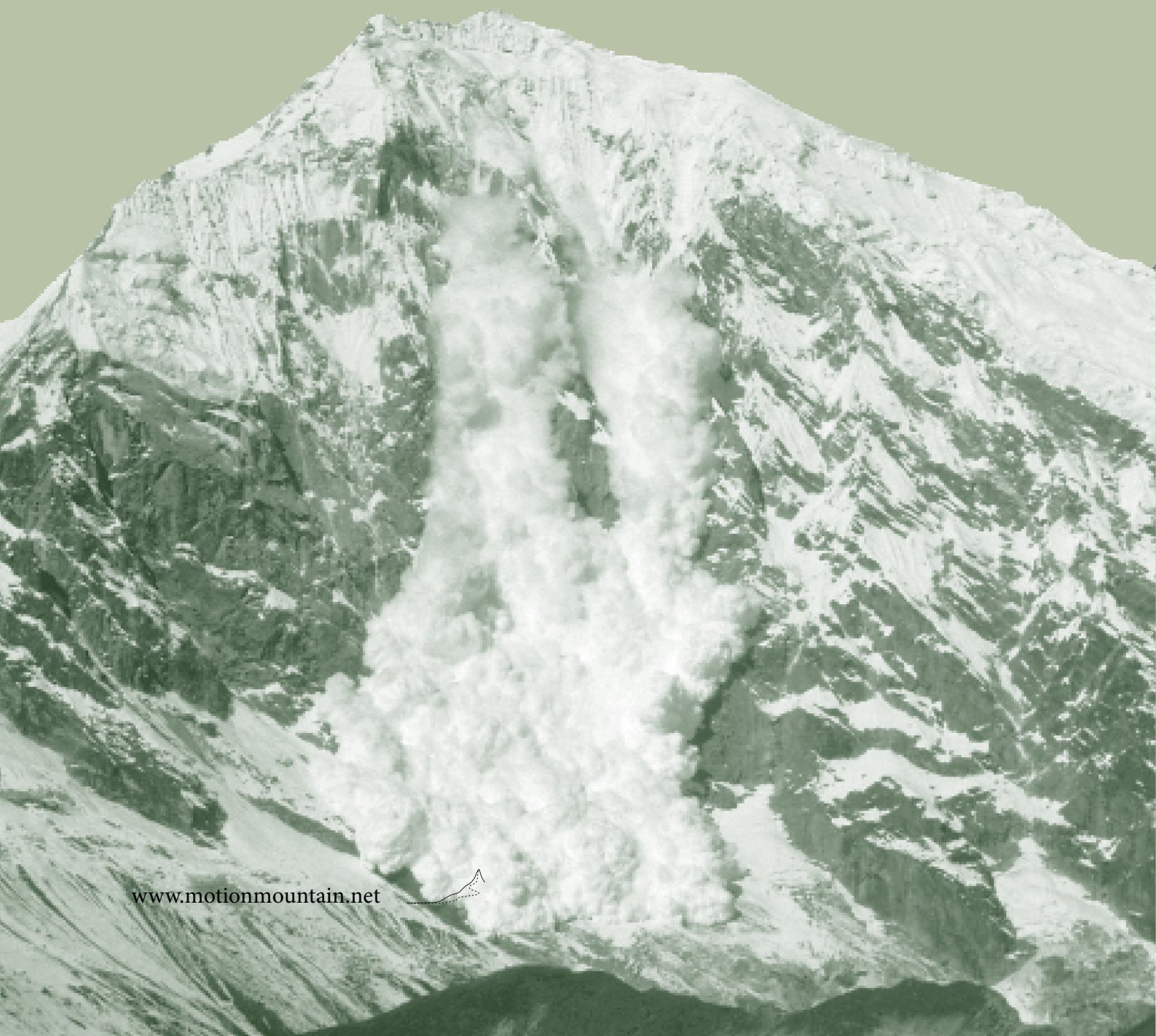


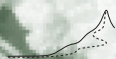
Christoph Schiller

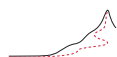
LA MONTAGNE MOUVEMENT

L'AVENTURE DE LA PHYSIQUE – VOL. I
CHUTE, FLUX ET CHALEUR



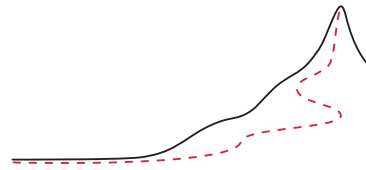
www.motionmountain.net





Christoph Schiller

LA MONTAGNE MOUVEMENT



L'Aventure de la Physique
Volume I

Chute, Flux et Chaleur

Traduit de l'anglais par Benoît CLENET

23^e édition, disponible gratuitement sur
www.motionmountain.net

Editio vicesima tertia.

Proprietas scriptoris © Christophori Schiller
secundo anno Olympiadis vicesimae nonae.

Omnia proprietatis iura reservantur et vindicantur.
Imitatio prohibita sine auctoris permissione.
Non licet pecuniam expetere pro aliquo, quod
partem horum verborum continet ; liber
pro omnibus semper gratuitus erat et manet.

Vingt-troisième édition.

Copyright © 2009 Christoph Schiller,
deuxième année de la 29^e Olympiade.

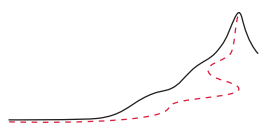


Ce fichier pdf est distribué sous licence Creative Commons
Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 3.0 Allemagne
dont le texte peut être consulté en intégralité sur la page
creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/deed.fr,
avec la restriction supplémentaire que toute reproduction,
distribution et utilisation, partielle ou totale, dans *n'importe quel*
produit ou service, qu'il soit commercial ou non, n'est pas autorisée
sans le consentement écrit du détenteur du droit d'auteur.
Toute personne est libre de consulter, enregistrer et imprimer
ce fichier pdf pour son usage personnel, et de le diffuser par
des moyens électroniques, mais uniquement sous sa forme originale
et de manière entièrement gratuite.

À Britta, Esther et Justus Aaron

τῷ ἐμοὶ δαίμονι

Die Menschen stärken, die Sachen klären.



PRÉFACE

“Primum movere, deinde docere*.”

Antiquité”

Ce livre s'adresse à toute personne curieuse de la nature et du mouvement. La curiosité portant sur la manière dont se meuvent les gens, les animaux, les choses, les images et l'espace nous entraîne dans de multiples aventures. Ce volume présente les meilleures d'entre elles dans le domaine du mouvement familier. L'observation du mouvement de tous les jours nous permet de déduire six propositions fondamentales : le mouvement quotidien est continu, conservé, relatif, réversible, invariant par réflexion, et... fainéant. Oui, la nature est vraiment paresseuse : dans chacun de ses mouvements, elle minimise le changement. Ce texte explore comment ces résultats sont déduits et comment ils s'accommodent de toutes les observations qui semblent les contredire.

La majorité des points de départ de la physique moderne, dont la structure est indiquée sur la [Figure 1](#), est constituée des résultats issus du mouvement quotidien. Le présent volume – le premier d'une collection qui en compte six – propose un tour d'horizon de la physique ; il résulte d'une triple aspiration que j'ai poursuivie depuis 1990 : présenter le mouvement d'une manière simple, moderne et vivante.

Afin d'être *simple*, le texte se focalise sur les concepts, tout en donnant aux mathématiques le niveau minimum nécessaire. La priorité est donnée à la compréhension des concepts de la physique plutôt qu'à l'utilisation des formules dans les calculs. Tout ce texte est à la portée d'un étudiant qui accède au premier niveau universitaire.

Afin d'être *moderne*, ce texte est enrichi par les nombreux joyaux – aussi bien théoriques qu'empiriques – qui parsèment la littérature scientifique.

Afin d'être *vivant*, ce texte tente de surprendre le lecteur autant que possible. Lire un livre de physique générale, ce devrait être comme assister à un spectacle de magie. Nous observons, nous nous étonnons, nous n'en croyons pas nos yeux, nous réfléchissons, et finalement nous comprenons le truc. Lorsque nous observons la nature, nous faisons souvent cette même expérience. C'est pourquoi chaque page propose au moins une surprise ou une provocation qui mettra la sagacité du lecteur à l'épreuve. Un grand nombre de défis intéressants sont proposés.

La devise de ce texte, *die Menschen stärken, die Sachen klären*, une phrase célèbre sur la pédagogie due à Hartmut von Hentig, se traduit ainsi : « Fortifier les hommes, clarifier les choses ». Clarifier les choses nécessite du courage, puisque changer les habitudes de pensée engendre la peur, souvent masquée par la colère. Mais en surpassant nos peurs

* « D'abord émouvoir, ensuite enseigner ». Dans les langues modernes, ce type mentionné de *mouvement* (celui du cœur) est souvent appelé *motivation* : ces deux termes sont issus de la même racine latine.

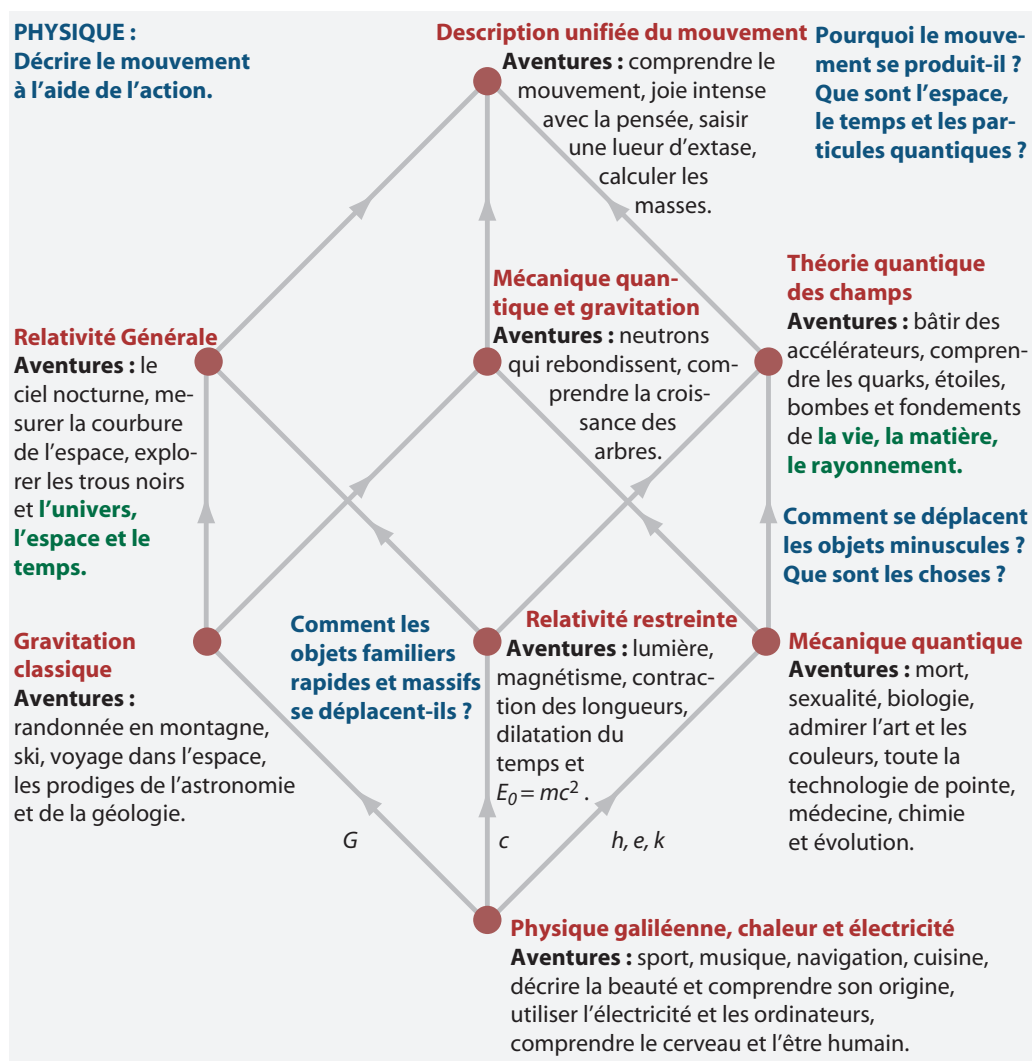


FIGURE 1 Une carte complète de la physique : les connexions sont définies par la vitesse de la lumière c , la constante de la gravitation G , la constante de Planck h , la constante de Boltzmann k et la charge élémentaire e .

nous gagnons en force. Nous ressentons alors des émotions intenses et enivrantes. Toutes les grandes aventures de la vie – et explorer le mouvement en est une – mènent à cela.

Munich, 10 janvier 2009.

REMERCIEMENT

Je remercie Benoît Clénet pour sa traduction de ce volume. Sa patience, son énergie et son professionnalisme sont exemplaires.

CONSEIL AU LECTEUR

D'après mon expérience d'enseignant, je connais une méthode d'apprentissage qui est toujours parvenue à transformer des élèves en échec en élèves gagnants : si vous lisez un livre pour l'étudier, résumez chaque section que vous lisez, *dans vos propres termes, à voix haute*. Si vous n'y arrivez pas, lisez la section une nouvelle fois. Recommencez jusqu'à ce que vous puissiez résumer clairement ce que vous avez lu avec vos propres mots, à voix haute. Vous pouvez le faire tout seul dans votre chambre, ou avec des amis, ou tout en marchant. Si vous faites cela avec tout ce que vous lisez, vous réduirez votre temps d'apprentissage et de lecture de manière significative. De surcroît, vous prendrez beaucoup plus de plaisir à apprendre avec des bons ouvrages et détesterez nettement moins les mauvais manuels. Les prodiges de cette méthode peuvent même l'utiliser tout en écoutant un cours, à voix basse, évitant ainsi de prendre constamment des notes.

COMMENT UTILISER CE LIVRE ?

Le texte en vert, que l'on trouve dans un grand nombre de notes en marge, signale un lien sur lequel on peut cliquer dans un lecteur pdf. Ces liens en vert sont soit des références bibliographiques, des notes de bas de page, des références croisées vers d'autres pages, des solutions aux défis ou des pointeurs vers des sites Web.

Les indices et solutions des *défis* sont donnés dans l'annexe. Les défis sont classés ainsi : niveau recherche (r), difficile (d), niveau étudiant standard (s) et facile (e). Les défis des types r, d ou s pour lesquels aucune solution n'a encore été incorporée dans le livre sont marqués (pe).

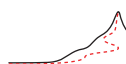
APPEL À CONTRIBUTION

Ce texte est et demeurera librement téléchargeable depuis Internet. En échange, envoyez-moi s'il vous plaît un bref courriel à fb@motionmountain.net, à propos des questions suivantes :

- Qu'est-ce qui n'était pas clair ?
- Quelle histoire, sujet, énigme, image ou film n'avez-vous pas compris ?
- Qu'est-ce qui devrait être amélioré ou corrigé ?

Défi 1 s

Vous pouvez également ajouter votre retour directement sur www.motionmountain.net/wiki. Au nom de tous les lecteurs, merci par avance pour votre collaboration. Si votre contribution est particulièrement pertinente, et si vous le souhaitez, votre nom sera mentionné dans les remerciements, ou bien vous recevrez une récompense, ou les deux. Mais par-dessus tout, très bonne lecture !



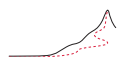


TABLE DES MATIÈRES

14	1	POURQUOI S'INTÉRESSER AU MOUVEMENT ?
		Le Mouvement existe-t-il ? 15 • Comment devrions-nous parler du mouvement ? 17 • Quels sont les différents types de mouvements ? 19 • Perception, continuité et changement 23 • Le monde a-t-il besoin d'états ? 25 • Curiosités et défis amusants sur le mouvement 26
30	2	DE LA MESURE DU MOUVEMENT À LA CONTINUITÉ
		Qu'est-ce que la vitesse ? 31 • Qu'est-ce que le temps ? 32 • Pourquoi les horloges tournent-elles dans le sens des aiguilles d'une montre ? 38 • Est-ce que le temps s'écoule ? 38 • Qu'est-ce que l'espace ? 39 • L'espace et le temps sont-ils absolus ou relatifs ? 42 • La taille – pourquoi les surfaces existent-elles, mais pas les volumes ? 43 • Qu'est-ce qu'une ligne droite ? 47 • Une Terre creuse ? 48 • Curiosités et défis amusants sur l'espace et le temps quotidiens 49
57	3	COMMENT DÉCRIRE LE MOUVEMENT – LA CINÉMATIQUE
		Le jet et le tir 59 • Qu'est-ce que le repos ? 61 • Les objets et les particules ponctuelles 64 • Des jambes et des roues 67
70	4	DES OBJETS ET DES IMAGES À LA CONSERVATION
		Mouvement et contact 71 • Qu'est-ce que la masse ? 72 • Le mouvement est-il éternel ? 79 • Appendice sur la conservation – l'énergie 81 • La vitesse est-elle absolue ? – La théorie de la relativité quotidienne 84 • La rotation 87 • Des roues en rotation 90 • Comment marchons-nous ? 91
94	5	DE LA ROTATION DE LA TERRE À LA RELATIVITÉ DU MOUVEMENT
		Comment la terre tourne-t-elle ? 99 • La Terre se déplace-t-elle ? 102 • La rotation est-elle relative ? 105 • Curiosités et défis amusants sur le mouvement quotidien 106 • Des jambes ou des roues ? – Suite 116
120	6	DYNAMIQUE DUE À LA GRAVITATION
		Propriétés de la gravitation 123 • La dynamique – Comment les choses bougent-elles dans plusieurs dimensions ? 128 • La gravitation dans le ciel 129 • La Lune 131 • Les orbites 133 • Les Marées 136 • La lumière peut-elle tomber ? 139 • Qu'est-ce que la masse ? – Suite 140 • Curiosités et défis amusants sur la gravitation 142
155	7	LA MÉCANIQUE CLASSIQUE ET LA PRÉDICTIBILITÉ DU MOUVEMENT
		Devrait-on employer la force ? 156 • États complets – conditions initiales 162 • Les surprises existent-elles ? L'avenir est-il déjà tout tracé ? 164 • Une conclusion étrange sur le mouvement 168 • Descriptions générales du mouvement 168
173	8	MESURER LE CHANGEMENT AVEC L'ACTION
		Le principe de moindre action 177 • Pourquoi le mouvement est-il si souvent limité ? 182 • Curiosités et défis amusants sur les lagrangiens 186
189	9	MOUVEMENT ET SYMÉTRIE
		Pourquoi pouvons-nous réfléchir et discuter ? 189 • Points de vue 191 • Symétries et groupes 192 • Représentations 193 • Symétries, mouvement et physique galiléenne 196 • Reproductibilité, conservation et théorème de Noether 200 • Curiosités et défis amusants sur la symétrie du mouvement 205

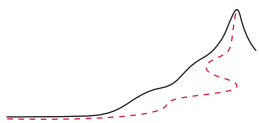
206	10 MOUVEMENTS ÉLÉMENTAIRES DES CORPS ÉTENDUS – VIBRATIONS ET ONDES
	Les ondes et leur mouvement 208 • Pourquoi pouvons-nous nous parler ? – Le principe de Huygens 214 • Signaux 215 • Ondes solitaires et solitons 217 • Curiosités et défis amusants sur les ondes et les corps étendus 220
227	11 LES CORPS ÉTENDUS EXISTENT-ILS ? – LES LIMITES DE LA CONTINUITÉ
	Montagnes et fractales 227 • Une barre de chocolat peut-elle durer pour toujours ? 228 • À quelle hauteur les animaux peuvent-ils sauter ? 230 • Élagage d'arbres 230 • L'écho du silence 231 • Des petites billes dures 232 • Le mouvement des fluides 235 • Curiosités et défis amusants sur les fluides 238 • Curiosités et défis amusants sur les solides 244 • Qu'est-ce qui peut bouger dans la nature ? 247
250	12 DE LA CHALEUR À L'INVARIANCE TEMPORELLE
	Température 250 • Entropie 254 • Courant d'entropie 256 • Les systèmes isolés existent-ils ? 257 • Pourquoi les ballons ont-ils besoin d'espace ? – La fin de la continuité 257 • Mouvement brownien 259 • Entropie et particules 261 • L'entropie minimale de la nature – le quantum d'information 263 • Pourquoi ne pouvons-nous pas nous souvenir du futur ? 264 • Est-ce que tout est fait de particules ? 265 • Pourquoi les pierres ne peuvent être ni continues ni fractales, ni faites de petites billes dures 267 • Curiosités et défis amusants sur la chaleur 268
275	13 AUTO-ORGANISATION ET CHAOS – L'ÉLÉGANCE DE LA COMPLEXITÉ
	Curiosités et défis amusants sur l'auto-organisation 282
285	14 DES FRONTIÈRES DE LA PHYSIQUE AUX LIMITES DU MOUVEMENT
	Thèmes de recherche en dynamique classique 285 • Qu'est-ce que le contact ? 285 • Précision et exactitude 286 • Est-ce que toute la nature peut être décrite dans un livre ? 287 • Pourquoi la mesure est-elle possible ? 287 • Le mouvement est-il illimité ? 288
289	A NOTATION ET CONVENTIONS
	L'alphabet latin 289 • L'alphabet grec 291 • Alphabet hébreu et autres écritures 293 • Chiffres et nombres 294 • Les symboles utilisés dans ce texte 295 • Calendriers 297 • Abréviations et éponymes ou concepts ? 299
300	B UNITÉS, MESURES ET CONSTANTES
	Unités naturelles de Planck 303 • Autres systèmes d'unités 305 • Curiosités et défis amusants sur les unités 306 • Précision et exactitude des mesures 312 • Constantes physiques fondamentales 313 • Nombres utiles 318
320	C SOURCES D'INFORMATION SUR LE MOUVEMENT
327	BIBLIOGRAPHIE
353	INDICES ET SOLUTIONS DES DÉFIS
391	CRÉDITS
	Remerciements 391 • Crédits filmographiques 392 • Crédits photographiques 392





CHUTE, FLUX ET CHALEUR

Dans notre apprentissage du mouvement des objets,
l'aventure de la randonnée et d'autres expériences
nous conduisent à introduire les concepts de
vitesse, temps, longueur, masse et température,
et d'en tirer parti pour mesurer le changement.
Nous découvrons comment flotter librement dans l'espace,
pourquoi nous avons des jambes au lieu de roues,
pour quelle raison le désordre ne peut être supprimé,
et pourquoi l'une des questions les plus ardues
de la science concerne l'écoulement de l'eau dans un tube.



CHAPITRE 1

POURQUOI S'INTÉRESSER AU MOUVEMENT ?

“ Tout mouvement est une illusion. ”
Zénon d'Élée*

BRAOUM ! L'éclair, frappant l'arbre situé à proximité, interrompt brutalement notre belle et paisible randonnée forestière : nos cœurs se mettent soudainement à battre plus rapidement. À la cime de l'arbre, nous voyons le feu apparaître une nouvelle fois, puis s'éteindre. Le léger vent agitant les feuilles autour de nous ramène ce lieu à son apaisement initial. À côté, l'eau d'une petite rivière suit son chemin tortueux vers le bas de la vallée, réfléchissant sur sa surface les silhouettes mouvantes des nuages.

Le mouvement est partout : amical et menaçant, terrible et magnifique. Il est fondamental pour notre existence humaine. Nous avons besoin du mouvement pour grandir, pour apprendre, pour penser et pour profiter de la vie. Nous utilisons le mouvement pour marcher à travers une forêt, pour écouter ses bruitages et pour parler de tout cela. Comme tous les animaux, nous comptons sur le mouvement pour chercher de la nourriture et pour survivre aux dangers. Comme tous les êtres vivants, nous avons besoin du mouvement pour nous reproduire, pour respirer et pour digérer les aliments. Comme pour tous les objets, le mouvement nous réchauffe.

Le mouvement est l'observation la plus fondamentale que nous puissions faire sur la nature en général. Cette remarque fait apparaître l'idée que *tout* ce qui se produit dans le monde est un certain type de mouvement. Il n'y a aucune exception. Le mouvement est une partie si fondamentale de nos observations que l'origine même du mot se perd dans l'obscurité de l'histoire linguistique indo-européenne. La fascination pour le mouvement a toujours fait de lui un objet favori de curiosité. Durant le cinquième siècle av.

Réf. 1 J.-C. dans la Grèce ancienne, son étude lui avait attribué un nom : la *physique*.

Le mouvement est également important pour l'existence humaine. Qui sommes-nous ? D'où venons-nous ? Qu'allons-nous faire ? Que devrions-nous faire ? Qu'est-ce que nous réserve l'avenir ? D'où viennent les gens ? Où vont-ils ? Qu'est-ce que la mort ? D'où vient le monde ? Comment la vie est-elle apparue ? Toutes ces questions sont en rapport avec le mouvement. L'étude du mouvement fournit des réponses qui sont à la fois profondes et surprenantes.

Réf. 3 Le mouvement est étrange. Bien qu'il soit omniprésent – dans les étoiles, dans les marées, dans nos paupières –, ni les penseurs antiques et ni les milliers d'autres qui se sont succédé depuis 25 siècles n'ont pu lever le voile sur le mystère central : *Qu'est-ce que le mouvement ?* Nous découvrirons que la réponse classique, « le mouvement est la

* Zénon d'Élée (v. 450 av. J.-C.), fut un des principaux représentants de l'École éléatique de philosophie.

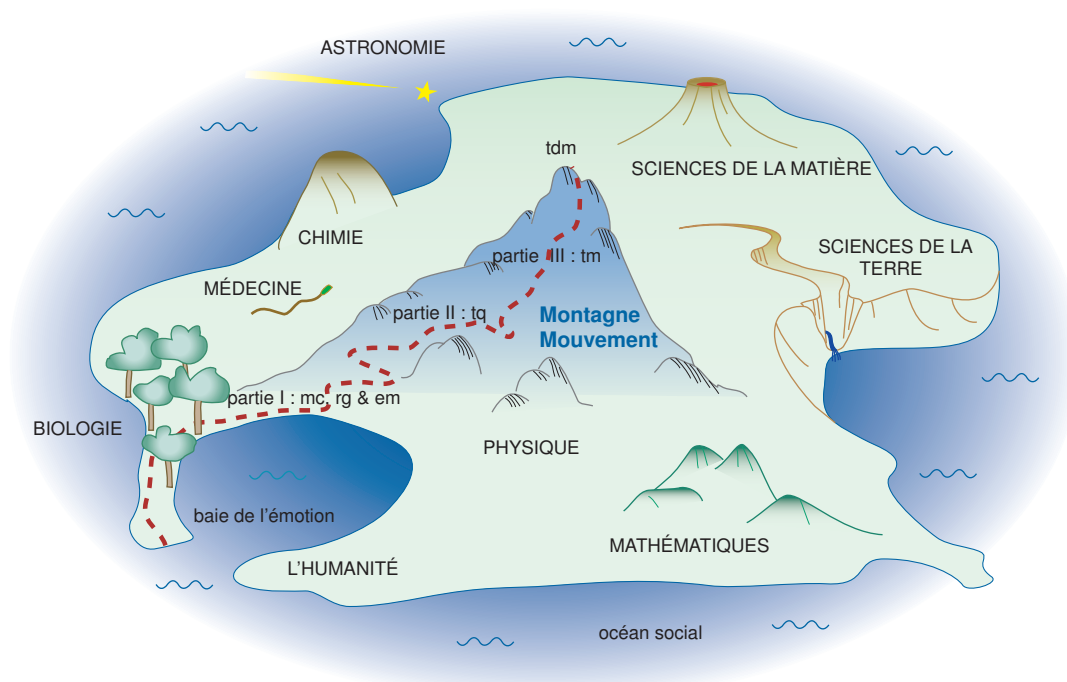


FIGURE 2 L'Île de l'Expérience, avec la Montagne Mouvement et la piste à suivre (mc : mécanique classique, rg : relativité générale, em : électromagnétisme, tq : théorie quantique, tm : théorie M, tdm : théorie du mouvement).

variation de la position dans le temps », est inappropriée. Ce n'est que récemment qu'une réponse a finalement été trouvée. Ceci est l'histoire du cheminement de cette découverte.

Le mouvement fait partie de l'expérience humaine. Si nous imaginons l'expérience humaine comme une île, alors le destin, représenté par les vagues de l'océan, nous a portés jusqu'à son rivage. Près du centre de l'île une montagne particulièrement haute émerge. Depuis son sommet nous pouvons survoler le paysage tout entier et avoir la sensation que toutes les expériences humaines ont un lien de parenté, en particulier les divers exemples de mouvement. Ceci est un guide vers le sommet de ce que j'ai nommé la Montagne Mouvement. Son parcours est une des plus belles aventures de l'esprit humain. Clairement, la première question à poser est :

LE MOUVEMENT EXISTE-T-IL ?

“Das Rätsel gibt es nicht. Wenn sich eine Frage überhaupt stellen läßt, so kann sie beantwortet werden*.”
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.5

Réf. 2 Pour aiguïser l'esprit sur le problème de l'existence du mouvement, regardez la **Figure 3** et suivez les instructions. Dans les deux cas les figures semblent tourner. Nous pouvons ressentir les mêmes effets lorsque nous marchons sur les pavés italiens en forme

* Le mystère n'existe pas. Si une question peut être posée, alors elle *peut* trouver une réponse.

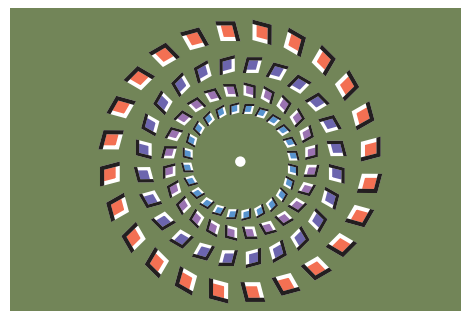
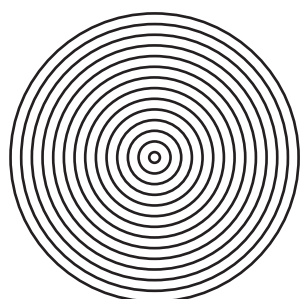


FIGURE 3 Illusions du mouvement : regardez la figure de gauche et déplacez légèrement la page, ou regardez le point blanc au centre de la figure de droite et bougez votre tête d'avant en arrière.

de vagues ou lorsque nous jetons un œil sur les illusions de la page Web www.ritsumei.ac.jp/~akitaoka/. Comment pouvons-nous être sûrs que le mouvement réel est différent de ceux-ci ou d'autres illusions similaires ?*

Défi 2 s

Plusieurs savants ont simplement avancé que le mouvement n'existe pas du tout. Leurs arguments ont profondément influencé la recherche sur le mouvement. Par exemple, le philosophe grec Parménide (né vers 515 av. J.-C. à Élée, une petite ville près de Naples, dans le sud de l'Italie) a émis l'idée que, puisque rien ne peut provenir du vide, le changement ne peut pas exister. Il a mis l'accent sur la *constance* de la nature et a donc logiquement affirmé que tout mouvement et donc tout changement est une illusion.

Réf. 5

Héraclite (v. 540 à v. 480 av. J.-C.) a tenu le point de vue opposé. Il l'a exprimé dans sa célèbre expression πάντα ῥεῖ « panta rhei » ou « tout se meut sans cesse »**. Il imaginait le changement comme étant l'essence de la nature, contrairement à Parménide. Ces deux opinions également célèbres ont incité plusieurs savants à rechercher plus précisément si, dans la nature, il y a des quantités *conservées* ou si la *création* est possible. Nous découvrirons la réponse plus tard ; en attendant, vous pouvez méditer sur l'alternative que vous préférez.

Défi 3 s

Le collaborateur de Parménide, Zénon d'Élée (né vers 500 av. J.-C.), a débattu avec tant d'intensité contre le mouvement que certains ont toujours un doute à ce propos aujourd'hui. Dans un de ses arguments il prétendit – dans un langage simple – qu'il est impossible de gifler quelqu'un, étant donné que la main doit premièrement parcourir la moitié du trajet vers le visage, puis parcourir la moitié de la distance qu'il reste, puis encore une fois et ainsi de suite. Par conséquent, la main ne pourra jamais atteindre le visage. L'argument de Zénon se concentre sur le lien entre *l'infini* et son opposé, le fini, dans la description du mouvement. Dans la théorie quantique moderne, un sujet similaire préoccupe encore aujourd'hui des scientifiques.

Réf. 6

Zénon a également affirmé qu'en observant un objet en mouvement durant un court instant, nous ne pouvons pas dire qu'il bouge. Zénon argumenta que, durant un court instant, il n'y a aucune différence entre un corps en mouvement et un corps au repos. Il en déduisit alors que, s'il n'y a pas de différence durant un court instant, il ne peut y en

* Les solutions des défis sont données soit à la page ??, soit plus loin dans le texte. Les défis sont classés en : niveau approfondi (r), difficile (d), niveau étudiant normal (n) ou facile (e). Les défis qui n'ont pas encore de solution sont marqués (ny).

** L'Annexe A explique comment lire un texte grec.

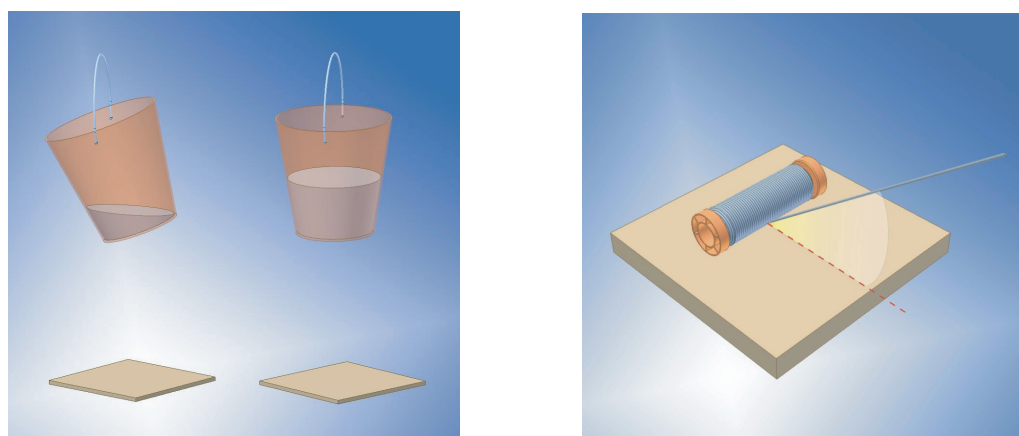


FIGURE 4 Combien faut-il d'eau pour faire en sorte que le seau soit suspendu verticalement ? À partir de quel angle la bobine tirée change-t-elle sa direction de mouvement ? (© Luca Gastaldi)

avoir non plus pour un temps plus long. Zénon a donc douté que le mouvement puisse clairement être distingué de son opposé, le *repos*. En réalité, dans l'histoire de la physique, les penseurs ont alterné plusieurs fois entre réponse positive et négative. Ce fut cette vraie question qui conduisit Albert Einstein au développement de la relativité générale, un des points culminants de notre voyage. Nous suivrons les principales réponses données par le passé. Ensuite, nous serons bien plus audacieux : nous nous demanderons en fin de compte si les courts instants de temps existent réellement. Cette question, qui nous emmènera loin, est essentielle pour la dernière partie de notre aventure.

Lorsque nous examinerons la théorie quantique, nous découvrirons que le mouvement est en réalité – dans une certaine mesure – une illusion, comme Parménide l'avait affirmé. Plus précisément, nous montrerons que nous observons le mouvement parce que notre existence humaine a un caractère limité. Nous trouverons que nous ressentons le mouvement uniquement parce que nous évoluons sur la Terre, avec une taille finie, avec un nombre d'atomes très grand mais limité, avec une température finie et modérée, parce que nous sommes électriquement neutres, très grands comparés à un trou noir de même masse, énormes par rapport à notre longueur d'onde de la mécanique quantique, très petits comparés à l'univers, avec une mémoire limitée, contraints par notre cerveau d'estimer l'espace et le temps comme des choses continues, et contraints par notre cerveau de décrire la nature comme étant constituée de parties distinctes. Si une seule de ces conditions n'était pas vérifiée, nous n'observerions pas le mouvement. Le mouvement, alors, n'existerait pas. Chacune de ces conclusions peut être découverte plus efficacement si nous commençons avec la question suivante :

COMMENT DEVRIONS-NOUS PARLER DU MOUVEMENT ?

“ Je hais le mouvement, qui déplace les lignes,
Et jamais je ne pleure et jamais je ne ris.
Charles Baudelaire, *La Beauté** ”

Réf. 7 * Charles Baudelaire (n. Paris 1821, d. Paris 1867).

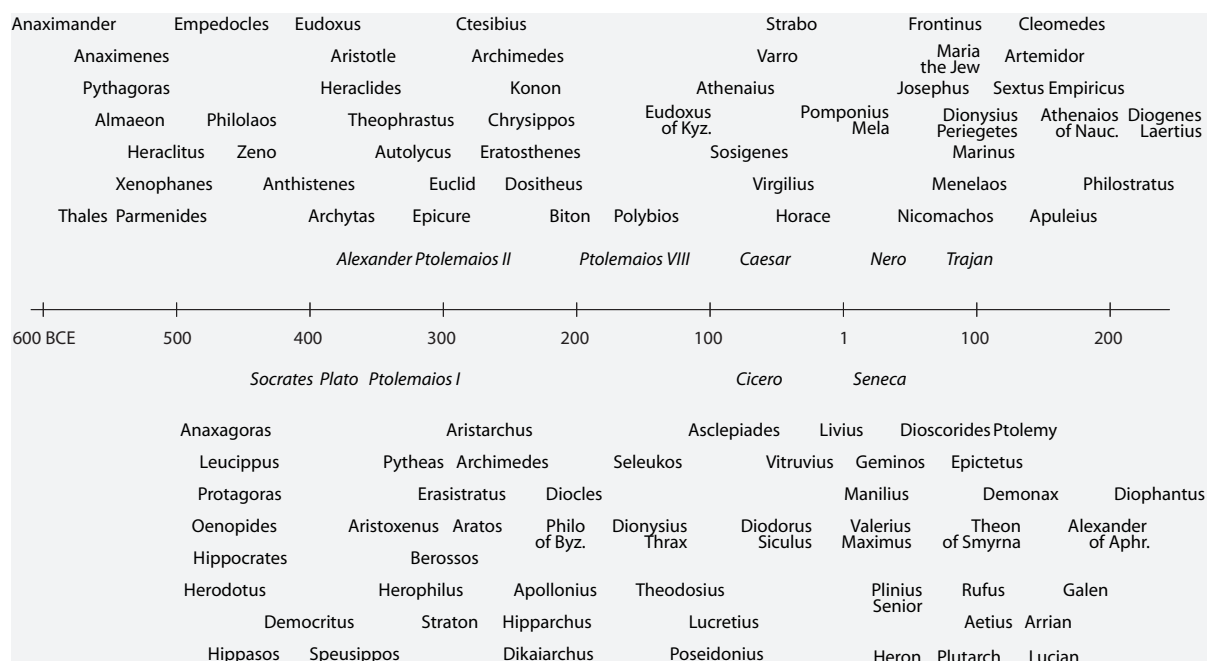


FIGURE 5 Une chronologie des scientifiques et des personnalités *politiques* dans l'Antiquité (la dernière lettre du nom est alignée avec l'année du décès).

Comme toute science, l'approche de la physique est double : nous progressons grâce à la *précision* et grâce à la *curiosité*. La précision donne aux échanges d'informations tout leur sens, et la curiosité fait qu'ils en valent la peine*. Toutes les fois que nous parlons du mouvement et que nous souhaitons avoir une meilleure précision ou une connaissance plus détaillée, nous sommes engagés, sciemment ou non, dans l'ascension de la Montagne Mouvement. À chaque augmentation dans la précision de la description, nous gagnons de l'altitude. Les exemples de la [Figure 4](#) le pointent du doigt. Lorsque vous remplissez un seau avec une petite quantité d'eau, il n'est pas suspendu verticalement. (Pourquoi ?) Si vous continuez à ajouter de l'eau, il commence à se tenir verticalement à partir d'un certain moment. Combien faut-il d'eau ? Lorsque vous tirez sur le fil d'une bobine de la manière indiquée, la bobine se déplacera en avant ou en arrière, en fonction de l'angle selon lequel vous tirez. Quel est l'angle limite entre les deux possibilités ?

Défi 4 pe

Une grande précision implique d'explorer jusqu'aux détails les plus fins. Cette méthode *augmente* en fait le plaisir pour l'aventure**. Plus nous gagnons de l'altitude sur la Montagne Mouvement, plus nous voyons loin et plus notre curiosité est récompensée. Les vues offertes sont à couper le souffle, surtout depuis le point culminant. Le chemin que nous suivrons – un parmi tous les itinéraires possibles – commence du côté de la biologie et entre directement dans la forêt qui se trouve au pied de la montagne.

Réf. 9

* Pour une série d'exemples intéressants sur le mouvement dans la vie de tous les jours, voir l'excellent livre de Walker.

Réf. 8

Défi 5 s

** Méfiez-vous de quiconque voudrait vous parler *sans* examiner les détails. Il essaie de vous tromper. Les détails sont importants. Ainsi, soyez vigilants durant *cette* promenade.

TABLEAU 1 Contenus de livres relatifs au mouvement sélectionnés dans une bibliothèque publique.

THÈMES SUR LE MOUVEMENT	THÈMES SUR LE MOUVEMENT
photographies du mouvement	le mouvement comme thérapie pour le traitement du cancer, du diabète, de l'acné et de la dépression
perception du mouvement Réf. 21	cinétose (mal des transports)
le mouvement comme aide à la méditation	exercices physiques pour la forme et le bien-être
maîtrise du mouvement en sport	aptitude à bouger à l'examen de santé
mouvement perpétuel	chorégraphie dans la danse, la musique et autres arts
le mouvement des étoiles et des anges Réf. 11	le mouvement comme preuve de l'existence de divers créateurs Réf. 10
efficacité bénéfique du mouvement	lien entre les habitudes changeantes et émotionnelles
le mouvement en psychothérapie Réf. 12	le mouvement pour surmonter un traumatisme
troubles du mouvement	locomotion des insectes, chevaux et robots
les agitations au Parlement	les changements dans l'art, les sciences et la politique
les mécanismes dans les montres	les gesticulations à la Bourse
développement de la marche chez les enfants	apprentissage et enseignement du mouvement
mouvements musicaux	mouvements de troupes Réf. 13
mouvements religieux	mouvements intestinaux
déplacements aux échecs	tours de passe-passe au casino Réf. 14
rapport entre le produit national brut et la mobilité des citoyens	

Une vive curiosité nous conduit en ligne droite aux extrêmes : comprendre le mouvement nécessite d'explorer les distances les plus grandes, les vitesses les plus élevées, les particules les plus petites, les forces les plus fortes et les idées les plus étranges. Commentons.

QUELS SONT LES DIFFÉRENTS TYPES DE MOUVEMENTS ?

« Chaque mouvement naît d'une volonté de changement. »

Antiquité

Le lieu le plus approprié pour avoir une vue d'ensemble générale sur les types de mouvement est une grande bibliothèque, comme indiqué dans le [Tableau 1](#). Les domaines dans lesquels le mouvement, les agitations et les déplacements jouent un rôle sont en réalité variés. Dans la Grèce ancienne les gens soupçonnaient déjà que tous les types de mouvement, et aussi plusieurs autres types de changement, étaient relatifs. Il est commun de distinguer au moins trois catégories.

La première catégorie de changement est celle du *déplacement* matériel, tels un individu en marche ou une feuille tombant d'un arbre. Le déplacement est le changement de position ou d'orientation des objets. Au sens large, l'activité humaine se place également



FIGURE 6 Un exemple de déplacement.

dans cette catégorie.

Une deuxième catégorie de changement regroupe les observations telles que la dissolution du sel dans l'eau, la formation de glace par congélation, la décomposition du bois, la cuisson des aliments, la coagulation du sang et la fusion et l'alliage des métaux. Ces changements de couleur, luminosité, dureté, température et autres propriétés matérielles sont appelés *transformations*. Les transformations sont des changements apparemment non reliés aux déplacements. Dans cette catégorie, quelques penseurs anciens y ajoutèrent l'émission et l'absorption de la lumière. Durant le vingtième siècle, on a prouvé que ces deux effets étaient des cas particuliers de transformations, comme le sont l'apparition et la disparition de matière récemment découvertes, que l'on observe dans le Soleil et dans la radioactivité. Le *changement d'esprit*, comme le changement d'humeur, de santé,

Réf. 15

Réf. 16

La troisième catégorie particulièrement importante de changement est la *croissance*. Elle est observée chez les animaux, les plantes et les bactéries, mais aussi dans les cristaux, les montagnes, les étoiles et les galaxies. Au cours du dix-neuvième siècle, les changements dans les populations de systèmes, l'*évolution biologique*, et, au cours du vingtième siècle, les changements dans la taille de l'univers, l'*évolution cosmique*, ont été ajoutés à cette catégorie. Traditionnellement, ces phénomènes furent étudiés par des sciences distinctes, qui aboutirent toutes indépendamment à la conclusion que la croissance est une combinaison du déplacement et de la transformation. La différence est pour l'une la complexité et pour l'autre l'échelle de temps.

Pendant la Renaissance, au début de la science moderne, seule l'étude du déplacement a été perçue comme faisant partie du champ de la physique. Le mouvement était assimilé au déplacement. Les deux autres domaines furent ignorés des physiciens. Malgré cette restriction, le champ de la recherche restait large, recouvrant une grande partie de l'Île de l'Expérience. La tentation évidente est de structurer ce domaine en distinguant les diffé-



FIGURE 7 Déplacement, croissance et transformation. (© Philip Plisson)

rents types de déplacement en fonction de leur origine. Les mouvements, tels que ceux des jambes lorsque nous marchons, sont *volontaires* parce qu'ils sont commandés par notre volonté, tandis que les déplacements d'objets externes, telle la chute d'un flocon de neige, que nous ne pouvons influencer par notre volonté, sont qualifiés de *passifs*. Les enfants sont capables de faire cette distinction à partir de 6 ans environ, et ceci marque une étape importante pour chaque personne dans le développement de sa compréhension précise de l'environnement*. À partir de cette distinction, la définition historique mais aujourd'hui périmée de la physique persiste comme une science du mouvement des objets inertes.

Puis, un jour, les machines sont apparues. À partir de ce moment-là, la distinction entre mouvements volontaire et passif s'est invitée dans le débat. Comme les êtres vivants, les machines peuvent se déplacer toutes seules et de cette façon imitent le mouvement volontaire. Toutefois, une observation méticuleuse nous montre que chaque élément dans une machine est déplacé par un autre, de telle sorte que leur mouvement est en fait passif. Les êtres vivants sont-ils également des machines ? Les activités humaines sont-elles aussi des exemples de mouvements passifs ? L'accumulation des observations durant les cent dernières années a rendu évident le fait que le déplacement volontaire** a, en réalité, les

* La réalisation complète de cet apprentissage peut échouer chez des individus ayant diverses convictions étranges, comme la croyance sur la capacité à agir sur la bille du jeu de la roulette, tel que découvert chez des joueurs compulsifs, ou sur la capacité à déplacer des objets distants par la pensée, tel que découvert chez de nombreuses autres personnes apparemment en bonne santé. Un récit divertissant et instructif sur toutes les duperies et illusions impliquées par l'apparition et la préservation de ces croyances est donné par JAMES RANDI, *The Faith Healers*, Prometheus Books, 1989. Prestidigitateur professionnel, il présente de nombreux sujets similaires dans plusieurs de ses autres ouvrages. Voir également le site Web <http://www.randi.org> pour plus de détails.

** En anglais, mouvement se dit *motion* [N.D.T.]. Le terme anglais « movement » est plutôt récent : il fut importé dans la langue anglaise à partir de l'ancien français et devint populaire seulement à la fin du dix-huitième siècle. Il ne fut jamais utilisé par Shakespeare.

Réf. 17 mêmes propriétés physiques que le mouvement passif des systèmes inertes. (Bien sûr, sur le plan émotionnel, les différences restent importantes, par exemple, le *pardon* ne peut être attribué qu'au mouvement volontaire.) La distinction entre les deux types n'est donc pas nécessaire et sera omise par la suite. Puisque les mouvements passif et volontaire ont les mêmes propriétés, nous pouvons apprendre des choses sur l'homme lui-même à travers l'étude du mouvement des objets inertes. Cela sera plus flagrant lorsque nous évoquerons les thèmes du déterminisme, de la causalité, de la probabilité, de l'infini, du temps et du sexe, pour ne citer que quelques-uns des sujets que nous rencontrerons sur notre chemin.

Avec l'accumulation des observations durant les dix-neuvième et vingtième siècles, les barrières historiques sur l'étude du mouvement furent encore plus mises en exergue. Des observations étendues montrèrent que toutes les transformations et tous les phénomènes de croissance, y compris le changement et l'évolution du comportement, sont aussi des exemples de déplacement. En d'autres termes, plus de 2 000 ans d'études ont prouvé que l'ancienne classification des observations était inutile : tout changement est un déplacement. Au milieu du vingtième siècle, cela culmina même avec la confirmation d'une idée encore plus précise, déjà formulée dans la Grèce ancienne : *chaque type de changement est causé par le mouvement de particules*. Il a fallu beaucoup de temps et d'efforts pour arriver à cette conclusion, qui s'est présentée uniquement parce que nous avons avancé sans relâche vers la plus haute précision possible dans la description de la nature. Les deux premières parties de cette aventure retracent le chemin jusqu'à ce résultat. (Êtes-vous d'accord pour cela ?)

Défi 6 s La dernière décennie du vingtième siècle a bouleversé cette vision. L'idée de particule s'est révélée fautive. Ce nouveau résultat, déjà suggéré par la théorie quantique avancée, apparaît dans la troisième partie de notre aventure à travers une combinaison d'observations et de déductions attentives. Mais nous aurons encore beaucoup de chemin à faire avant d'y arriver.

Pour l'instant, au début de notre promenade, nous retiendrons simplement que l'histoire a montré que la classification des différents types de mouvement n'est pas utile. C'est en essayant d'atteindre la précision maximale que l'on peut espérer arriver aux propriétés fondamentales du mouvement. La précision, et non la classification, est la règle à suivre. Comme Ernest Rutherford le disait : « All science is either physics or stamp collecting. »*

Réf. 18 Pour atteindre la précision nécessaire dans notre description du mouvement, nous avons besoin de choisir des exemples particuliers de mouvement et de les étudier pleinement en détail. Il est intuitivement clair que la description la plus précise est réalisable pour les exemples *les plus simples* possibles. Dans la vie de tous les jours, c'est le cas du mouvement de tous les corps inertes, solides et rigides, dans notre environnement, telle une pierre lancée en l'air. En réalité, comme tous les hommes, nous avons appris à lancer des objets bien avant d'avoir appris à marcher. Le lancer est une des premières expériences physiques que nous ayons accomplies par nous-mêmes**. Durant notre plus tendre enfance, en lançant des pierres, des jouets et d'autres objets, nous explorions la

* « Toute science est soit de la physique soit une collection de timbres. » [N.D.T.]

** L'importance du lancer apparaît également à partir des termes qui en dérivent : en latin, des mots comme *subjicio* (*subicio*), sujet, mettre sous ou « jeter dessous », *adversus*, objet, protester ou « jeter en face », *interjicio* (*interjacio*), interjection, insérer ou « jeter entre ». En grec, il a mené à des termes comme *symbole* ou « jeter

perception et les propriétés du mouvement, jusqu'à ce que nos parents aient eu peur pour les appareils ménagers. Nous allons faire la même chose.

“ Die Welt ist unabhängig von meinem Willen*.
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.373 ”

PERCEPTION, CONTINUITÉ ET CHANGEMENT

“ Il n'y a que les mauviettes qui n'étudient que le cas général, les vrais scientifiques courent après les exemples.
Beresford Parlett ”

Les êtres humains adorent percevoir les choses. La perception commence avant la naissance, et nous continuons à y prendre plaisir aussi longtemps que nous le pouvons. C'est pourquoi la télévision est si populaire, même quand elle est dépourvue de contenu. Pendant notre promenade à travers la forêt, au pied de la Montagne Mouvement, nous ne pouvons pas nous empêcher de percevoir. La perception est en premier lieu la capacité à *distinguer*. Nous utilisons l'opération cognitive élémentaire de la distinction à chaque instant de notre vie. Par exemple, durant notre enfance, nous avons tout d'abord appris à faire la distinction entre les objets familiers et inconnus, une aptitude rendue possible par l'association avec une autre capacité élémentaire, celle de *mémoriser* les expériences. La mémoire nous donne la possibilité d'expérimenter, de parler de la nature et donc de l'explorer. La perception, la classification et la mémorisation forment ensemble l'*apprentissage*. Dépourvus de l'une de ces trois aptitudes, nous ne pourrions pas étudier le mouvement.

Les enfants apprennent rapidement à distinguer la *continuité* de l'*instabilité*. Ils s'habituent à *reconnaître* les visages humains, même si un visage n'est jamais totalement le même à chaque fois qu'il est perçu. À partir de l'identification des visages, les enfants prolongent la reconnaissance à tout ce qui est observable. La reconnaissance fonctionne assez bien dans la vie quotidienne. Il est agréable de reconnaître ses amis, même dans la nuit, et même après plusieurs bières (ceci n'est pas un défi). L'action de reconnaître utilise donc toujours une forme de *généralisation*. Lorsque nous observons, nous avons toujours une idée générale dans notre esprit. Nous allons en préciser les principales.

Toutes les forêts nous rappellent l'essence de la perception. Assis sur l'herbe dans une clairière de la forêt au pied de la Montagne Mouvement, entourés par les arbres et le silence caractéristique de ces endroits, une sensation de tranquillité et de sérénité nous envahit. Soudain, quelque chose s'agite dans les buissons. Nos yeux se détournent sur-le-champ et notre attention se concentre. Les cellules nerveuses qui ont détecté le mouvement font partie de la région la plus ancienne de notre cerveau, que nous partageons avec les oiseaux et les reptiles : le tronc cérébral. À partir de ce moment, le cortex, ou cerveau récent, prend le relais pour analyser le type de mouvement et pour en déterminer l'origine. En surveillant le mouvement autour de notre champ de vision, nous observons deux entités invariantes : le paysage immobile et l'animal qui bouge. Après avoir identifié l'animal comme étant une biche, nous nous relâchons à nouveau.

Réf. 19

ensemble », *problème* ou « jeter en avant », *emblème* ou « jeter dedans » et – le petit dernier – *démon* ou « jeter à travers ».

* Le monde est indépendant de ma volonté.

Réf. 20 Comment avons-nous fait la différence entre le paysage et la biche ? Plusieurs étapes dans la vision et dans le cerveau sont impliquées. Le mouvement joue un rôle important dans celles-ci, comme nous le voyons mieux à partir du petit film saccadé placé dans les coins inférieurs gauches de ces pages. Chaque image montre seulement un rectangle comblé par un motif mathématiquement aléatoire. Mais, lorsque nous faisons défiler ces pages, nous discernons une forme en mouvement sur un fond immobile. À un instant donné, la forme ne peut être dissociée du fond : aucun objet n'est visible sur chacune de ces images. Néanmoins il est facile de percevoir son mouvement*. Des expériences de perception comme celle-ci ont été effectuées avec de nombreuses variantes. Dans l'une d'elle, on a constaté que le fait de détecter un tel objet en mouvement n'est pas quelque chose de spécifique aux humains. Les mouches ont la même aptitude, comme, en fait, tous les animaux qui ont des yeux.

Le petit film saccadé sur le coin inférieur gauche, comme toutes les expériences similaires, fait apparaître deux relations primordiales. Premièrement, le mouvement est perçu uniquement si un *objet* peut être distingué d'un *arrière-plan* ou d'un *milieu ambiant*. Beaucoup d'illusions sur le mouvement se focalisent sur ce point**. Deuxièmement, le mouvement exige de définir à la fois l'objet et l'environnement, et de les différencier l'un de l'autre. En fait, la notion d'espace est – entre autres – une abstraction de l'idée d'arrière-plan. Ce fond est étendu, l'objet animé est localisé. Tout cela vous semble ennuyeux ? Ça ne l'est pas : attendez juste une seconde.

Appelons l'ensemble des propriétés localisées qui restent invariantes ou constantes pendant le mouvement, comme la taille, la forme, la couleur, etc., pris ensemble, *objet* (physique) ou *corps* (physique). Nous restreindrons ensuite la définition, puisque sinon les images pourraient aussi bien être des objets. En d'autres termes, exactement comme au début, nous ressentons le mouvement comme un processus *relatif*. Il est perçu en relation avec l'environnement et par opposition à lui. La notion d'objet est par conséquent aussi une notion relative. Mais la distinction théorique élémentaire entre les objets localisés, isolés et l'environnement étendu n'est pas insignifiante ou sans importance. Premièrement, cela donne l'impression d'une définition qui se mord la queue. (Êtes-vous d'accord ?) Plus tard, ce problème nous occupera énormément. Deuxièmement, nous utilisons tellement fréquemment notre capacité à isoler des systèmes localisés de leur environnement que nous l'acceptons sans l'ombre d'un doute. Toutefois, comme nous le verrons dans la troisième partie de notre promenade, cette distinction se révèle logiquement et expérimentalement impossible*** ! Notre promenade nous amènera à découvrir la raison de cette impossibilité et ses conséquences importantes. Finalement, mis à part

Défi 7 s

Page ??

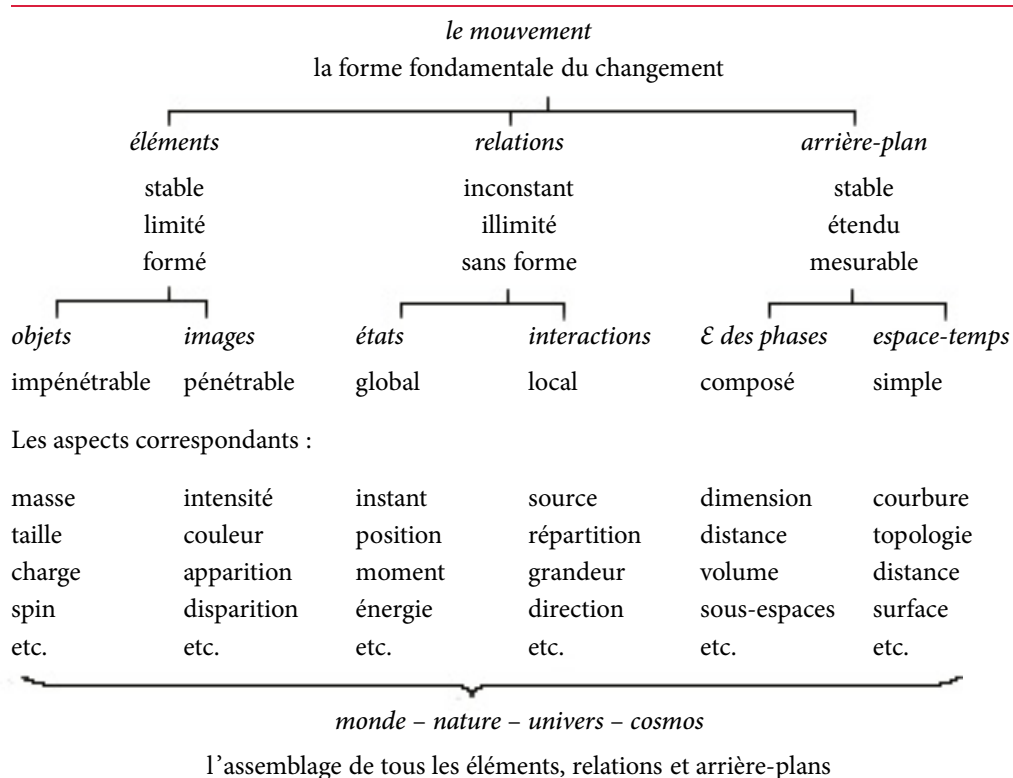
Réf. 21 * L'œil humain est très performant pour détecter le mouvement. Par exemple, l'œil peut déceler le mouvement d'un point lumineux même si la variation de l'angle est plus petite que celle qui peut être distinguée sur une image fixe. Les détails de ce phénomène et d'autres thèmes analogues pour les autres sens font partie du domaine de la recherche sur la perception.

** Le thème de la perception du mouvement est plein d'aspects intéressants. Le chapitre 6 du magnifique ouvrage de DONALD D. HOFFMAN, *Visual Intelligence – How We Create What We See*, W.W. Norton & Co., 1998, en est une excellente introduction. Sa série d'illusions sur le mouvement élémentaire peut être expérimentée et approfondie en association avec le site Web <http://aris.ss.uci.edu/cogsci/personnel/hoffman/hoffman.html>.

*** Contrairement à ce que l'on peut fréquemment lire dans la littérature populaire, la distinction est possible dans la théorie quantique. Elle devient impossible seulement lorsque la théorie quantique est unifiée avec la relativité générale.



TABLEAU 2 Arbre généalogique des notions physiques fondamentales.



les entités mobiles et le fond immobile, nous avons besoin d'un troisième concept, tel qu'indiqué dans le [Tableau 2](#).

Réf. 22

“ Il n'y a qu'une chose sage, c'est de connaître la pensée qui peut tout gouverner partout. ”
Héraclite d'Éphèse

LE MONDE A-T-IL BESOIN D'ÉTATS ?

“ Das Feste, das Bestehende und der Gegenstand sind Eins. Der Gegenstand ist das Feste, Bestehende; die Konfiguration ist das Wechselnde, Unbeständige*. ”
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 2.027 – 2.0271

Qu'est-ce qui différencie les divers dessins dans les coins en bas à gauche de chaque page ? Dans la vie quotidienne, nous dirions la *position* ou la *configuration* des objets concernés. La configuration décrit d'une certaine manière tous ces aspects qui peuvent être différents d'un cas à l'autre. On a coutume d'appeler la liste de tous les aspects

* Les objets, l'immuable et le perpétuel sont une seule et même chose. Les objets sont ce qui est immuable et durable ; leur configuration est ce qui est changeant et instable.



variables d'un ensemble d'objets leur *état de mouvement (physique)*, ou plus simplement leur *état*.

Les configurations dans les coins en bas à gauche diffèrent de tous les autres d'abord par le *temps*. Le temps est ce qui rend les opposés possibles : un enfant est dans une maison et le même enfant est en dehors de la maison. Le temps rend compte de ce type de contradiction et le résout. Mais l'état ne distingue pas seulement des configurations différentes dans le temps : l'état contient *tous* les aspects d'un système (c'est-à-dire d'un groupe d'objets) qu'on ne retrouve pas dans les systèmes *stationnaires*. Deux objets peuvent avoir les mêmes masse, forme, couleur, composition et être indiscernables par rapport à toutes les autres propriétés intrinsèques, néanmoins ils seront différents par rapport à leur position, ou leur vitesse, ou leur orientation. L'état met le doigt sur l'*originalité* d'un système physique* et nous permet de le distinguer de ses copies conformes. Par conséquent, l'état décrit également la relation d'un objet ou d'un système avec son environnement. Ou pour résumer : *l'état décrit tous les aspects d'un système qui dépendent de l'observateur*. Ces propriétés ne sont pas inintéressantes – réfléchissez juste à ceci : l'univers possède-t-il un état ?

Défi 9 s

Décrire la nature comme un ensemble d'entités stables et d'états variables est le point de départ de l'étude du mouvement. Les divers aspects des objets et de leurs états sont appelés des *observables*. Toutes ces définitions approximatives et préliminaires seront affinées pas à pas par la suite. En utilisant les termes précédemment introduits, nous pouvons stipuler que *le mouvement est le changement d'état des objets***.

Les états sont nécessaires pour la description du mouvement. Afin de progresser et de réaliser une description *exhaustive* du mouvement, nous avons besoin d'une description complète des objets et d'une description complète de leurs états possibles. La première approche, appelée physique galiléenne, consiste à caractériser notre environnement *quotidien* le plus précisément possible.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LE MOUVEMENT

Le mouvement n'est pas toujours un sujet simple***.

* *

Défi 10 s Est-ce que le déplacement d'un fantôme est un exemple de mouvement ?

* *

Défi 8 s

* Un *système physique* est un objet d'étude localisé. Dans la classification du [Tableau 2](#), le terme « système physique » est (à peu près) la même chose que « objet » ou « corps physique ». Les images ne sont habituellement pas considérées comme des systèmes physiques (bien que le rayonnement lumineux en soit un). Les trous sont-ils des systèmes physiques ?

** La séparation exacte entre ces aspects propres à l'objet et ceux appartenant à l'état dépendent de la précision des observations. Par exemple, la longueur d'un morceau de bois n'est pas constante : le bois se rétrécit et se courbe avec le temps, en raison des processus en œuvre au niveau moléculaire. Pour être précis, la longueur d'un morceau de bois n'est pas une caractéristique de l'objet, mais de son état. Les observations méticuleuses *renversent* alors la distinction entre l'objet et son mouvement, la distinction elle-même ne disparaît pas – du moins pas pour le moment.

*** Les sections intitulées « curiosités » sont des séries de sujets et de problèmes qui permettent de vérifier et d'approfondir l'utilisation des notions récemment introduites.



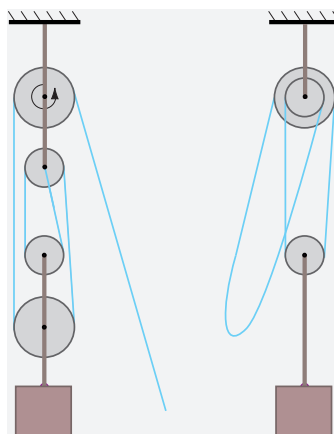


FIGURE 8 Une poulie composée et une poulie différentielle.

Un homme escalade une montagne de 9 heures du matin jusqu'à 13 heures. Il se couche au sommet et redescend le jour suivant, descendant encore une fois de 9 heures du matin jusqu'à 13 heures. Y a-t-il un endroit sur le chemin où il passe à la même heure les deux jours ?

Défi 11 s

* *

Défi 12 s Est-ce que quelque chose peut s'arrêter de bouger ? Comment pouvez-vous le montrer ?

* *

Défi 13 s Est-ce qu'un corps se déplaçant pour toujours en ligne droite démontre que la nature est infinie ?

* *

Défi 14 s L'univers peut-il bouger ?

* *

Défi 15 s Pour discuter de la précision avec précision, nous avons besoin de la mesurer. Comment vous y prendriez-vous ?

* *

Défi 16 s Pourrions-nous observer le mouvement si nous n'avions pas de mémoire ?

* *

Défi 17 s Quelle est la vitesse minimale que vous avez pu observer ? Y a-t-il une vitesse minimale dans la nature ?

* *

Selon la légende, le brahmane Sissa Ben Dahir, l'inventeur indien du jeu d'échecs, demanda au roi Sherham la récompense suivante pour son invention : il souhaite que l'on dépose un grain de blé sur la première case, deux sur la deuxième, quatre sur la troi-



sième, huit sur la quatrième, et ainsi de suite. Combien de temps tous les champs de blé du monde mettront-ils pour produire la quantité de grains nécessaire ?

Défi 18 s

* *

Lorsqu'une bougie allumée est déplacée, la flamme a du mal à suivre le mouvement de la bougie. Comment la flamme se comportera-t-elle si la bougie, toujours allumée, est placée dans une cage en verre et que l'ensemble est mis en mouvement ?

Défi 19 s

* *

Une bonne façon de gagner de l'argent est de construire des détecteurs de mouvement. Un détecteur de mouvement est une petite boîte dotée de quelques connecteurs métalliques. La boîte produit un signal électrique à chaque fois qu'elle bouge. Des détecteurs de quels types de mouvement pouvez-vous imaginer ? À quel prix pouvez-vous fabriquer une telle boîte ? Avec quelle précision ?

Défi 20 d

* *

Une boule parfaitement lisse et sphérique est posée près du bord d'une table parfaitement plate et horizontale. Que va-t-il se passer ? Au bout de combien de temps ?

Défi 21 d

* *

Vous marchez dans une boîte fermée dépourvue de fenêtre. La boîte est déplacée par des forces extérieures inconnues pour vous. Pouvez-vous déterminer, de l'intérieur de la boîte, comment vous vous déplacez ?

Défi 22 s

* *

Quelle longueur de corde devons-nous tirer pour soulever une masse d'une hauteur h à l'aide d'une poulie composée de quatre roues, comme indiqué sur la Figure 8 ?

Défi 23 s

* *

Lorsqu'un bloc est roulé sur un plancher sur un ensemble de tubes, quelles sont les vitesses du bloc et des tubes relativement au bloc ?

Défi 24 s

* *

Vous n'aimez pas les formules ? Si c'est le cas, utilisez la méthode suivante, qui ne prend que 3 minutes, pour inverser la situation. Cela vaut la peine de l'essayer, car elle va vous rendre la lecture de ce livre encore plus amusante. La vie est courte : elle devrait être, autant que possible, un plaisir, comme celui de lire cet ouvrage.

Réf. 15

Défi 25 s

1 - Fermez les yeux et rappelez-vous une expérience qui fut *absolument merveilleuse*, une situation où vous vous êtes senti excité, curieux et optimiste.

2 - Ouvrez vos yeux pendant une seconde ou deux et regardez la page 68 – ou toute autre page qui contient de nombreuses formules.

3 - Fermez alors une nouvelle fois vos yeux et repensez à votre expérience merveilleuse.

4 - Répétez l'observation des formules et la visualisation de votre souvenir – étapes 2 et 3 – trois fois encore.

Sortez alors de votre souvenir, regardez autour de vous pour revenir à l'instant présent



et au lieu présent, puis testez-vous. Regardez une nouvelle fois la page 68. Comment trouvez-vous les formules maintenant ?

* *

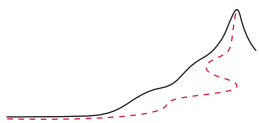
Durant le seizième siècle, Niccolo Tartaglia* proposa l'énigme suivante. Trois jeunes couples veulent traverser une rivière. Seule une petite barque pouvant transporter deux personnes est disponible. Les hommes sont extrêmement jaloux et ne voudront jamais laisser leur fiancée seule avec un autre homme. Combien d'allers-retours sont-ils nécessaires pour traverser la rivière ?

Défi 26 s



* Niccolo Fontana Tartaglia (1499–1557), important mathématicien vénitien.





CHAPITRE 2

DE LA MESURE DU MOUVEMENT À LA CONTINUITÉ

« Physic ist wahrlich das eigentliche Studium des Menschen*.

Georg Christoph Lichtenberg »

Défi 27 s

La description la plus simple du mouvement est celle que nous utilisons tous inconsciemment, comme les chats ou les singes, dans la vie de tous les jours : *une seule chose peut se trouver en un lieu donné à un instant donné*. Cette description générale peut être séparée en trois hypothèses : la matière est *impénétrable* et se *déplace*, le temps est fait d'*instants* et l'espace est fait de *points*. Sans ces trois hypothèses (êtes-vous d'accord pour les accepter ?) il est impossible de définir la vitesse dans la vie quotidienne. Cette description de la nature est appelée *physique galiléenne* ou *newtonienne*.

Galileo Galilei (1564–1642), professeur toscan de mathématiques, fut un fondateur de la physique moderne et est célèbre pour avoir défendu l'importance des observations comme moyens de vérification des hypothèses sur la nature. En exigeant et en accomplissant ces vérifications durant toute sa vie, il fut amené à améliorer constamment l'exactitude de la description du mouvement. Par exemple, Galilée étudia le mouvement en mesurant les variations de positions avec un chronomètre qu'il confectionna lui-même. Sa méthode remplaça la description spéculative de la Grèce ancienne par la physique expérimentale de la Renaissance italienne**.

Isaac Newton, alchimiste, mystique, théologien, physicien et politicien anglais (1643–1727), fut un des premiers à défendre avec vigueur l'idée selon laquelle les différents types de mouvement ont les mêmes propriétés. Il franchit des étapes importantes dans la mise en place des concepts utiles à la démonstration de cette idée***.

* « La Physique est vraiment l'étude appropriée de l'homme. » Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799) fut un important physicien et essayiste.

** Le meilleur et le plus instructif des livres sur la vie de Galilée et sur son époque est celui de Pietro Redondi (voir la note de la page 229). Galilée naquit l'année où le crayon fut inventé. Avant sa naissance, il était impossible de faire des calculs avec un crayon et du papier. Pour les curieux, le site Web <http://www.mpiwg-berlin.mpg.de> vous permettra de lire un manuscrit original de Galilée.

*** Newton naquit un an après la mort de Galilée. Une autre activité de Newton, comme maître de la Monnaie royale, fut de surveiller personnellement la pendaison des faux-monnayeurs. Sur l'engouement de Newton pour l'alchimie, voyez le livre de Dobbs. Entre autres, Newton croyait lui-même avoir été choisi par Dieu : il prit son nom latin, Isaacus Neutonius, et forma l'anagramme Jeova sanctus unus. Sur Newton et son rôle

Réf. 23

Réf. 24

dans la mécanique classique, lisez l'ouvrage de Clifford Truesdell.





FIGURE 9 Galileo Galilei.

QU'EST-CE QUE LA VITESSE ?

« Il n'y a absolument rien d'autre de semblable. »
Jochen Rindt*

La vitesse fascine. Pour les physiciens, non seulement les rallyes automobiles sont intéressants, mais aussi tous les objets qui se déplacent. Par conséquent, ils ont d'abord évalué autant d'exemples que possible. Une sélection en est donnée dans le [Tableau 4](#) et le [Tableau 5](#). Les préfixes et les unités utilisés sont décrits en détail dans l'[Annexe B](#).

La vie quotidienne nous apprend beaucoup de choses sur le mouvement : les objets peuvent se devancer les uns les autres et peuvent se déplacer dans des directions différentes. Nous remarquons également que les vitesses peuvent être augmentées ou modifiées de façon continue. La liste exhaustive de ces propriétés, fournie dans le [Tableau 3](#), est résumée par les mathématiciens dans une expression particulière : ils disent que les vitesses forment un *espace vectoriel euclidien***.

Page 64 Nous donnerons plus de détails sur cette expression bizarre sous peu. Pour l'instant, notons simplement que, pour décrire la nature, les concepts mathématiques se présentent comme l'instrument le plus précis.

On qualifie la vitesse de *galiléenne* lorsqu'elle est présumée être un vecteur euclidien. La vitesse est un concept fondamental. Par exemple, la vitesse ne nécessite pas de mesures d'espace et de temps pour être définie. Êtes-vous capable de trouver une méthode pour mesurer les vitesses sans mesurer l'espace et le temps ? Si c'est le cas, vous avez vraisemblablement envie de sauter à la page 15, passant par-dessus 2 000 ans de recherches. Si vous ne trouvez pas, lisez bien ceci : toutes les fois que nous mesurons une quantité, nous supposons implicitement que n'importe qui est capable d'en faire autant et que tout le monde trouvera le même résultat. En d'autres termes, nous définissons la *mesure* par rapport à une valeur standard. Nous supposons alors implicitement qu'un tel standard existe, c'est-à-dire qu'un exemple de vitesse « parfaite » peut être découvert. Historique-

Défi 28 d

* Jochen Rindt (1942–1970), célèbre pilote autrichien de rallye automobile de Formule 1, parlant à propos de la vitesse.

** Ainsi nommé d'après Euclide, ou Eukleidès, le grand mathématicien grec qui vivait à Alexandrie aux alentours de l'an 300 Av. J.-C. Euclide écrivit un traité monumental sur la géométrie, Στοιχεῖα ou les *Éléments*, qui est une des œuvres majeures de la pensée humaine. L'ouvrage expose toute la connaissance de l'époque sur la géométrie. Pour la première fois, Euclide introduisit deux approches qui sont maintenant utilisées communément : tous les énoncés sont déduits à partir d'un nombre réduit d'« axiomes » de base et, pour chaque énoncé, une « preuve » en est donnée. Le livre, encore édité aujourd'hui, fut l'œuvre de référence en géométrie pendant 2 000 ans. Sur le Web, on peut le trouver à l'adresse <http://aleph0.clarku.edu/~djoyce/java/elements/elements.html>.



TABLEAU 3 Propriétés de la vitesse au sens quotidien – ou vitesse galiléenne.

LES VITESSES PEUVENT	PROPRIÉTÉ PHYSIQUE	DÉNOMINATION MATHÉMATIQUE	DÉFINITION
Être distinguées	discernement	élément d'un ensemble	Page ??
Changer graduellement	continuité	espace vectoriel réel	Page 64, Page ??
Pointer quelque part	direction	espace vectoriel, dimensionnalité	Page 64
Être comparées	mesurable	métrique	Page ??
Être cumulées	additivité	espace vectoriel	Page 64
Avoir des angles définis	direction	espace vectoriel euclidien	Page 64
Dépasser toute limite	infini	infinitude	Page ??

ment, l'étude du mouvement n'examina pas cette question au premier abord, parce que pendant plusieurs siècles personne ne put trouver un tel standard de vitesse. Vous êtes donc en bonne compagnie.

Réf. 28 Quelques chercheurs se sont spécialisés dans l'étude des vitesses les plus faibles que l'on rencontre dans la nature : ils sont appelés géologues. Ne manquez jamais l'occasion de traverser un site tout en écoutant parler l'un d'entre eux.

La vitesse est un sujet profond pour une deuxième raison : nous découvrirons que toutes les propriétés du Tableau 3 sont uniquement approchées, aucune n'est exacte en réalité. Des expériences perfectionnées nous dévoileront les limites de chaque propriété de la vitesse galiléenne. La faillite des trois dernières propriétés nous conduira à la relativité restreinte et générale, l'échec des deux du milieu à la théorie quantique et l'échec des deux premières propriétés à la description unifiée de la nature. Mais, pour l'instant, nous resterons accrochés à la vitesse galiléenne, et nous poursuivons avec un autre concept galiléen qui en dérive : le temps.

« Sans les concepts de *lieu*, de *vide* et de *temps*, le changement ne peut se produire. [...] Il est donc clair [...] que leur compréhension doit être réalisée, en étudiant chacun d'entre eux séparément. »

Aristote* *Physique*, Livre III, partie 1.

QU'EST-CE QUE LE TEMPS ?

« Le temps n'existe pas intrinsèquement, mais seulement à travers les objets perçus, dont découlent les notions de passé, de présent et de futur. »

Lucrèce**, *De rerum natura*, lib. 1, v. 460 ss.

Pendant les premières années de leur vie, les enfants passent beaucoup de temps à jeter des objets autour d'eux. Le terme « objet » est un mot latin qui signifie « la chose qui peut être jetée en face ». La psychologie évolutive a montré expérimentalement qu'à

* Aristote (384/3–322), savant et philosophe grec.

** Titus Lucretius Carus (v. 95 à v. 55 av. J.-C.), poète et érudit latin.



TABLEAU 4 Quelques valeurs mesurées de vitesse.

OBSERVATION	VITESSE
Croissance des stalagmites	0,3 pm/s
Pouvez-vous trouver quelque chose de plus lent ?	Défi 29 s
Croissance d'un nodule de manganèse en plaine abyssale	80 am/s
Croissance du lichen	≥ 7 pm/s
Déplacement caractéristique des continents	10 mm/a = 0,3 nm/s
Croissance humaine pendant l'enfance, croissance capillaire	4 nm/s
Croissance des arbres	≤ 30 nm/s
Déplacement des électrons dans un fil métallique	1 μ m/s
Déplacement d'un spermatozoïde	de 60 à 160 μ m/s
Vitesse de la lumière au centre du Soleil	0,1 mm/s
Déplacement du ketchup	1 mm/s
Plus petite vitesse de la lumière mesurée dans la matière sur Terre	0,3 m/s Réf. 25
Chute des flocons de neige	de 0,5 m/s à 1,5 m/s
Vitesse du signal dans les cellules nerveuses humaines	0,5 m/s à 120 m/s Réf. 26
Vitesse du vent à 1 degré Beaufort (très légère brise)	moins de 1,5 m/s
Vitesse de la pluie qui tombe, en fonction du rayon de la goutte	de 2 m/s à 8 m/s
Poisson le plus rapide à la nage, le voilier (<i>Istiophorus platypterus</i>)	22 m/s
Record de vitesse en navigation maritime (par le vélisportiste Finian Maynard)	25,1 m/s
Animal le plus rapide à la course, le guépard (<i>Acinonyx jubatus</i>)	30 m/s
Vitesse du vent à 12 degrés Beaufort (ouragan)	plus de 33 m/s
Vitesse de l'air dans la gorge lors de l'éternuement	42 m/s
Le lancer mesuré le plus rapide : la balle du jeu de cricket	45 m/s
Homme en chute libre	de 50 à 90 m/s
Oiseau le plus rapide en vol, au piqué, le faucon pèlerin (<i>Falco peregrinus</i>)	60 m/s
Service le plus rapide au badminton	70 m/s
Vitesse moyenne des molécules d'oxygène dans l'air à température ambiante	280 m/s
Vitesse du son dans l'air sec au niveau de la mer et à température ordinaire	330 m/s
Claquement de l'extrémité du fouet	750 m/s
Vitesse d'une balle de fusil	3 km/s
Vitesse de la propagation de la fissure dans la brisure du silicium	5 km/s

Réf. 18 partir de cette toute première expérience les enfants extraient les notions de temps et d'espace. Les physiciens adultes en font de même lorsqu'ils étudient le mouvement à l'université.



TABLEAU 5 Quelques valeurs mesurées de vitesse (suite).

OBSERVATION	VITESSE
La plus haute vitesse macroscopique accomplie par l’homme : le satellite <i>Voyager</i>	14 km/s
Vitesse moyenne (et de pointe) de l’extrémité de l’éclair	600 km/s (50 000 km/s)
Vitesse de la Terre à travers l’univers	370 km/s
La plus haute vitesse macroscopique mesurée dans notre galaxie	$0,97 \cdot 10^8$ m/s Réf. 27
Vitesse des électrons dans un téléviseur couleur	$1 \cdot 10^8$ m/s
Vitesse des messages radio dans l’espace	299 792 458 m/s
La plus haute vitesse de groupe de la lumière jamais mesurée	$10 \cdot 10^8$ m/s
Vitesse d’un point lumineux émis par une tour de lumière lorsqu’il franchit la Lune	$2 \cdot 10^9$ m/s
La plus haute vitesse propre pour des électrons jamais réalisée par l’homme	$7 \cdot 10^{13}$ m/s
La plus haute vitesse possible pour un point lumineux ou une ombre	infinie

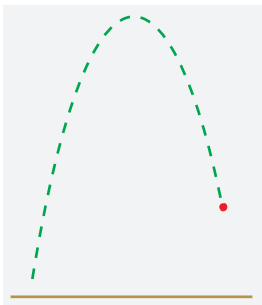


FIGURE 10 Une trajectoire typique suivie par une pierre jetée en l’air.

Lorsque nous jetons une pierre en l’air, nous pouvons définir une *succession* d’observations. Notre mémoire et nos sens nous donnent cette aptitude. L’ouïe enregistre les divers sons durant la montée, la chute et l’arrivée de la pierre. Nos yeux traquent l’emplacement de la pierre d’un point à l’autre. Toutes les observations ont leur emplacement dans la succession, avec certaines observations qui les précèdent, certaines observations qui leur sont simultanées, et d’autres encore qui les suivent. Nous disons que les observations sont perçues comme survenant à divers *instants* et nous appelons la succession des instants le *temps*.

Une observation qui est considérée comme étant la plus petite partie d’une succession, c’est-à-dire qui n’est pas elle-même une succession, est appelée un *événement*. Les événements sont primordiaux pour la définition du temps. En particulier, déclencher ou arrêter un chronomètre sont des événements. (Mais les événements existent-ils réellement ? Gardez cette question dans un coin de votre tête pendant que nous progressons.)

Les phénomènes successifs ont une autre propriété, connue comme étant la période, l’étendue ou la durée. Quelques valeurs mesurées sont données dans le [Tableau 6*](#). La

* Une année est abrégée par a (« annus » en latin).

La Montagne Mouvement – L’aventure de la physique Traduit de l’anglais par Benoît Clenet disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997–Mai 2010



TABLEAU 6 Quelques mesures sélectionnées de temps.

OBSERVATION	TEMPS
Le plus petit temps mesurable	10^{-44} s
Le plus petit temps jamais mesuré	10^{-23} s
Temps mis par la lumière pour traverser un atome typique	$10^{-18\pm 1}$ s
Période de la transition hyperfine de l'état fondamental du césium	108,782 775 707 78 ps
Battement d'aile de la mouche du vinaigre (drosophile)	1 ms
Période du pulsar (étoile à neutrons en rotation) PSR 1913+16	0,059 029 995 271(2) s
« Instant » humain	20 ms
La plus petite durée de vie d'un être vivant	0,3 j
Durée moyenne du jour il y a 400 millions d'années	79 200 s
Durée moyenne du jour aujourd'hui	86 400,002(1) s
Durée écoulée depuis votre naissance jusqu'à votre 1 000 millionième seconde de vie	31,7 a
Âge du plus ancien arbre vivant	4 600 a
Apparition du langage humain	$2 \cdot 10^5$ a
Âge de l'Himalaya	de 35 à $55 \cdot 10^6$ a
Âge de la Terre	$4,6 \cdot 10^9$ a
Âge des plus vieux astres	13,7 Ga
Âge de la plupart des protons de votre corps	13,7 Ga
Durée de vie du noyau de tantale ^{180}Ta	10^{15} a
Durée de vie du noyau de bismuth ^{209}Bi	$1,9(2) \cdot 10^{19}$ a

durée reflète l'idée que les successions *prennent* du temps. Nous disons qu'une opération prend du temps pour exprimer l'idée que d'autres opérations peuvent avoir lieu parallèlement à celle-ci.

Qu'est exactement le concept de temps, comportant des successions et des durées, inféré par les observations ? Beaucoup de gens ont examiné cette question : les astronomes, les physiciens, les horlogers, les psychologues et les philosophes. Ils ont tous trouvé que *le temps est déduit en comparant des mouvements*. Les enfants, dès leur plus jeune âge, développent la notion de « temps » à partir de la comparaison des mouvements dans leur voisinage. Les grandes personnes considèrent le mouvement du Soleil comme une référence et nomment le type de temps qui en résulte le *temps local*. À partir de la Lune ils ont construit un *calendrier lunaire*. En prenant une horloge particulière dans un village d'une île européenne, ils l'appellent le *temps universel coordonné* (TUC, en anglais Coordinated Universal Time, UTC), autrefois connu sous le nom de « temps moyen de Greenwich »*. Les astronomes utilisent le déplacement des astres et nomment ce résultat

* Le temps TUC officiel est utilisé pour déterminer la phase du courant électrique, les flux de transmission des compagnies de téléphone et le signal du système GPS utilisé par de nombreux systèmes de navigation dans le monde, notamment dans les navires, avions et camions. Pour plus d'informations, voir le site Web <http://www.gpsworld.com>. L'infrastructure de la gestion du temps est également importante pour d'autres

Défi 31 s pans de l'économie moderne. Pouvez-vous en repérer les plus importants ?



le *temps des éphémérides* (ou un de ses succédanés). Un observateur qui se réfère à sa montre personnelle désigne la lecture de celle-ci comme étant son *temps propre*, il est couramment utilisé dans la théorie de la relativité.

Page 309 Tout mouvement n'est pas forcément une bonne référence de temps. En l'an 2000 une rotation de la Terre ne prenait pas 86 400 secondes, comme en l'an 1900, mais 86 400,002 secondes. Pouvez-vous deviner en quelle année votre anniversaire sera décalé d'une journée entière par rapport au temps prévu de 86 400 secondes ?

Défi 32 s

Toutes les méthodes de définition du temps sont donc fondées sur des comparaisons entre mouvements. Dans le but de rendre ce concept aussi précis et aussi utile que possible, un *standard* de mouvement de référence est choisi, et avec celui-ci sont établies une succession standard et une durée standard. L'appareil qui réalise cette tâche est appelé une *horloge*. Nous pouvons alors répondre à la question du titre de cette section : *le temps est ce que nous lisons sur une horloge*. Remarquez que toutes les définitions du temps utilisées dans les diverses branches de la physique sont équivalentes à celle-ci. Aucune définition « plus profonde » ou plus fondamentale n'est possible*. Notez que le mot « moment » est en fait dérivé du mot « mouvement ». Dans ce cas précis, le langage suit la physique. De façon étonnante, la définition du temps qui vient d'être donnée est définitive. Elle ne changera plus jamais, même au sommet de la Montagne Mouvement. Cela peut surprendre au premier abord, car beaucoup de livres ont été écrits sur la nature du temps. Ils devraient plutôt examiner la nature du mouvement ! Mais c'est de toute façon le but de notre promenade. Nous sommes donc résignés à découvrir tous les secrets du temps comme une conséquence annexe de notre aventure. Chaque horloge nous rappelle qu'afin de comprendre le temps nous devons d'abord comprendre le mouvement.

Défi 33 s

Une *horloge* est un système en mouvement dont la position peut être lue. Bien sûr, une horloge *précise* est un système qui bouge le plus régulièrement possible, avec la plus petite perturbation extérieure possible. Y a-t-il une horloge parfaite dans la nature ? Les horloges existent-elles réellement en fin de compte ? Nous continuerons d'examiner ces questions dans tout ce travail et nous parviendrons pour finir à une conclusion étonnante. Pour l'instant, toutefois, nous énonçons un résultat intermédiaire ordinaire : puisque les horloges doivent exister, il existe d'une manière ou d'une autre dans la nature un procédé fondamental, naturel et *idéal* pour mesurer le temps. Pouvez-vous le découvrir ?

Le temps n'est pas seulement un aspect des observations, il est également une facette de notre expérience personnelle. Même dans notre vie intime la plus secrète, dans nos pensées, nos émotions et nos rêves, nous éprouvons les notions de succession et de durée. Les enfants apprennent à associer cette expérience intérieure du temps aux observations extérieures, et à faire usage de la propriété de diachronie des événements dans leurs activités. Les études sur l'origine du temps psychologique montrent qu'il coïncide – excepté par son manque d'exactitude – avec le temps des horloges**. Chaque personne vivante se sert inévitablement de la notion de temps dans sa vie de tous les jours comme d'une

* Les plus anciennes horloges sont les gnomons (ancêtres des cadrans solaires [N.D.T.]). La technique de leur construction s'appelle la *gnomonique*. Une introduction exhaustive et excellente dans ce domaine quelque peu insolite peut être consultée sur le site Web <http://www.sundials.co.uk>.

Page ?? ** Le cerveau contient une multitude d'horloges. L'horloge la plus précise pour les intervalles de temps courts, le compteur d'intervalle interne, est plus fiable que ce que l'on pense souvent, surtout avec de l'entraînement. Pour les périodes de temps comprises entre quelques dixièmes de seconde, nécessaires en musique, et quelques minutes, les hommes peuvent atteindre une exactitude de quelques pour cent.



TABLEAU 7 Propriétés du temps galiléen.

LES INSTANTS DU TEMPS	PROPRIÉTÉ PHYSIQUE	DÉNOMINATION MATHÉMATIQUE	DÉFINITION
Peuvent être distingués	distinction	élément d'un ensemble	Page ??
Peuvent être ordonnés	succession	ordre	Page ??
Définissent la durée	mesurable	métrique	Page ??
Peuvent avoir une durée infinitésimale	continuité	compacité, complétude	Page ??
Autorisent l'addition des durées	additivité	métrique	Page ??
Ne cachent aucune singularité	invariance par translation	homogénéité	Page 164
N'ont pas de fin	infini	infinitude	Page ??
Sont équivalents pour tous les observateurs	absolu	unicité	

Réf. 30

combinaison de succession et de durée. Cette réalité a été établie dans de multiples recherches. Par exemple, le terme « quand » existe dans toutes les langues.

Le temps est une notion *cruciale* pour dissocier différentes observations. Dans n'importe quelle séquence, nous constatons que les événements succèdent les uns aux autres continûment, apparemment sans fin. Dans ce contexte, « continûment » signifie que des observations qui ne sont pas trop éloignées dans le temps tendent à ne pas être trop différentes. Malgré tout, entre deux instants, aussi contigus qu'ils soient pour l'observateur, il y a toujours de la place pour d'autres événements. Les durées, ou *intervalles de temps*, consignées par des individus différents avec des horloges distinctes, concordent dans la vie quotidienne. Qui plus est, tous les observateurs s'accordent sur l'ordre des événements dans une séquence. Le temps est donc unique.

Page ??

Les propriétés mentionnées du temps ordinaire, listés dans le [Tableau 7](#), correspondent à l'interprétation fidèle de notre apprentissage quotidien du temps. Il est appelé *temps galiléen*. Toutes les propriétés peuvent être formulées collectivement en assignant au temps des nombres réels. En réalité, les nombres réels ont été forgés pour avoir précisément les mêmes propriétés que le temps galiléen, tel qu'il est expliqué dans l'entracte. Chaque instant du temps peut être désigné par un nombre réel, fréquemment noté t , et la durée d'une succession d'événements est donnée par l'écart entre les valeurs des événements final et initial.

Défi 34 s

Lorsque Galilée étudia le mouvement au cours du dix-septième siècle, les chronomètres n'existaient pas encore. En conséquence, il dut en construire un lui-même pour pouvoir mesurer des temps compris entre une fraction et quelques secondes. Pouvez-vous deviner comment il s'y est pris ?

Nous aurons justement beaucoup de divertissement avec le temps galiléen dans les deux premiers chapitres. Pourtant, des centaines d'années d'examen très minutieux ont montré que *chaque propriété* du temps que nous venons de lister est approximative, qu'aucune n'est strictement exacte. Cette histoire est relatée dans les chapitres qui suivent.



POURQUOI LES HORLOGES TOURNENT-ELLES DANS LE SENS DES AIGUILLES D'UNE MONTRE ?

Défi 35 s

« Quelle heure est-il en ce moment au pôle Nord ? »

Tous les mouvements de rotation dans notre société, comme les courses d'athlétisme, de chevaux, de vélo ou les courses de patins à glace, tournent dans le sens inverse de celui des aiguilles d'une montre. De façon analogue, chaque supermarché guide ses clients dans le sens inverse des aiguilles d'une montre à travers les allées. Les mathématiciens nomment cela le sens de rotation positif. Pourquoi ? La majorité des gens sont droitiers, et la main droite a plus de liberté lorsqu'elle est située vers l'extérieur du cercle. C'est également pour cela qu'il y a plusieurs centaines d'années les courses de chars dans les arènes se déroulaient dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Ainsi, toutes les courses en font toujours de même aujourd'hui. C'est pour cela aussi que les coureurs se déplacent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. Pour le même motif, les escaliers en colimaçon dans les châteaux sont édifiés de telle manière que les défenseurs droitiers, depuis les marches plus élevées, aient cette main vers l'extérieur.

À l'inverse, les horloges imitent l'ombre des cadrans solaires. Évidemment, cela est vrai seulement dans l'hémisphère Nord, et uniquement pour des cadrans solaires posés à même le sol, qui sont les plus répandus. (La vieille astuce pour localiser le sud en dirigeant l'aiguille des heures d'une montre horizontale vers le Soleil et en divisant par deux l'angle entre celle-ci et la direction de midi ne fonctionne pas dans l'hémisphère Sud.) Donc le fonctionnement de l'horloge indique tacitement dans quel hémisphère elle fut inventée. En plus, ceci nous indique également que les cadrans solaires fixés aux murs furent utilisés après ceux posés au sol.

EST-CE QUE LE TEMPS S'ÉCOULE ?

« Wir können keinen Vorgang mit dem 'Ablauf der Zeit' vergleichen – diesen gibt es nicht –, sondern nur mit einem anderen Vorgang (etwa dem Gang des Chronometers)*. »
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.3611

L'expression « l'écoulement du temps » est souvent utilisée pour exprimer le fait que dans la nature les changements se succèdent d'une manière régulière et continue. Mais bien que les aiguilles d'une horloge « glissent », le temps lui-même ne le fait pas. Le temps est une abstraction introduite spécialement pour décrire l'écoulement des événements autour de nous. Il ne s'écoule pas lui-même, il *définit* l'écoulement. Le temps n'avance pas. Le temps n'est ni linéaire ni cyclique. L'idée que le temps s'écoule constitue une entrave à la compréhension de la nature, comme l'idée que les miroirs intervertissent la droite et la gauche.

Page ??

Réf. 31

L'usage fallacieux de l'expression « l'écoulement du temps », diffusée d'abord par quelques penseurs grecs puis par Newton, persiste. Aristote (384/3–322 av. J.-C.), attentif au raisonnement logique, pointa du doigt ce malentendu, et d'autres le firent éga-

* Nous ne pouvons pas comparer un processus avec « le passage du temps » – il n'existe pas de telle chose – mais seulement avec un autre processus (tel que le fonctionnement d'un chronomètre).



Défi 36 e

Réf. 32

lement après lui. Néanmoins, des expressions telles que « le renversement du temps », « l'irréversibilité du temps », et le trop usité « la flèche du temps » sont encore d'usage courant. Lisez simplement une revue scientifique populaire choisie au hasard. Le fait est le suivant : le temps ne peut pas être renversé, seul le mouvement peut l'être, ou plus précisément les vitesses des objets. Le temps n'a pas de flèche, seul le mouvement en a une. Ce n'est pas l'écoulement du temps que les hommes ne peuvent arrêter, mais le mouvement de tous les objets dans la nature. Incroyablement, il y a même des livres écrits par d'éminents physiciens qui étudient différents types de « flèches du temps » et les comparent les unes aux autres. Comme on peut le prévoir, aucun résultat tangible ou nouveau n'en est issu. Le temps ne s'écoule pas.

De la même façon, les expressions verbales comme « le début (ou la fin) du temps » devraient être bannies. Un spécialiste du mouvement les traduit immédiatement par « le début (ou la fin) du mouvement ».

QU'EST-CE QUE L'ESPACE ?

« L'introduction des nombres comme coordonnées [...] est un acte de violence [...].
Hermann Weyl, *Philosophie der Mathematik und Naturwissenschaft**. »

À chaque fois que nous distinguons deux objets l'un de l'autre, par exemple deux étoiles, nous distinguons en tout premier lieu leur position. La distinction des positions est la capacité principale de notre sens visuel. La position est par conséquent une propriété importante de l'état physique d'un objet. Une position donnée est occupée par un seul objet à un instant donné. Les positions sont limitées. L'ensemble de toutes les positions disponibles, désigné par *espace (physique)*, agit à la fois comme un contenant et un arrière-plan.

La *taille* est une notion étroitement apparentée à l'espace et à la position, c'est l'ensemble des positions qu'un objet occupe. Des petits objets occupent uniquement des sous-ensembles de positions accaparées par ceux qui sont plus grands. Nous allons bientôt discuter de la taille.

Comment mettons-nous en évidence l'espace à partir des observations ? Pendant l'enfance, les hommes (et la plupart des animaux supérieurs) apprennent à rassembler les diverses perceptions de l'espace – visuelle, tactile, auditive, kinesthésique, vestibulaire, etc. – dans un ensemble cohérent d'expériences et de descriptions. L'aboutissement de ce processus d'apprentissage est une certaine « forme » de l'espace dans le cerveau. En fait, la question « où ? » peut être posée et on peut y répondre dans toutes les langues du monde. Pour être plus précis, les adultes tirent l'origine de l'espace des mesures de distance, grâce auxquelles les notions de longueur, de superficie, de volume, d'angle et d'angle solide sont toutes déduites. Les géomètres (mathématiciens et de terrain), les architectes, les astronomes, les vendeurs de moquette et les fabricants de doubles-décimètres fondent leur métier sur les mesures de distance. L'espace est un concept fa-

* Hermann Weyl (1885–1955) fut l'un des plus importants mathématiciens de son époque, aussi bien qu'un physicien théoricien éminent. Il fut un des derniers savants ayant embrassé les deux domaines, un contributeur de la théorie quantique et de la relativité, inventeur du terme théorie de « jauge », et auteur de nombreux ouvrages populaires.



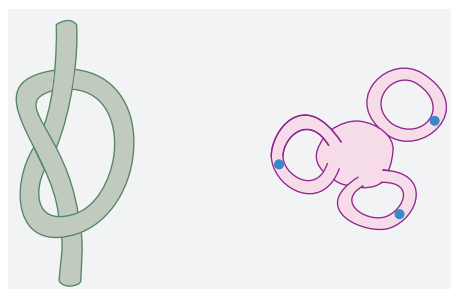


FIGURE 11 Deux preuves que l'espace possède trois dimensions : un nœud et l'oreille interne d'un mammifère.

çonné pour synthétiser toutes les relations de distance entre objets pour une description précise des observations.

Les doubles-décimètres fonctionnent bien uniquement s'ils sont droits. Mais, lorsque les hommes vivaient dans la forêt vierge, ils n'avaient pas d'objets droits autour d'eux. Aucune règle droite, aucun outil droit, rien. Aujourd'hui, la vue d'une ville est principalement une collection de lignes droites. Pouvez-vous expliquer comment les hommes ont pu accomplir cela ?

Défi 37 s

Une fois les hommes sortis de la jungle avec leur règle fraîchement construite, ils rassemblerent une foison de résultats. Les principaux d'entre eux sont énoncés dans le **Tableau 8**. Ils sont facilement confirmés par l'expérience personnelle. Les objets peuvent prendre des positions d'une manière apparemment *continue* : il y a sûrement davantage de positions que ce qui peut être dénombré*. La notion de taille est comprise en définissant la distance entre diverses positions, appelée *longueur*, ou en utilisant le champ de vision qu'un objet occupe lorsqu'il est observé, appelé sa *surface*. Longueur et surface peuvent être mesurées à l'aide d'une règle plate. Quelques mesures effectuées sont données dans le **Tableau 9**. La longueur des objets est indépendante de la personne qui les mesure, de leur position et de leur orientation. Dans la vie quotidienne la somme des angles de n'importe quel triangle est égale à deux angles droits. Il n'y a aucune exception dans l'espace.

L'expérience nous montre que l'espace possède trois dimensions. Nous pouvons définir des séries de positions dans précisément trois directions différentes. En fait, l'oreille interne de (presque) tous les vertébrés possède trois canaux semi-circulaires qui perçoivent la position du corps dans les trois dimensions de l'espace, comme indiqué sur la **Figure 11****. De la même manière, chaque œil humain est commandé par trois paires de muscles. (Pourquoi trois ?) Une autre preuve que l'espace possède trois dimensions est alléguée par les lacets : si l'espace avait plus de trois dimensions, les lacets seraient inutiles, parce que les nœuds n'existent que dans un espace tridimensionnel. Mais pourquoi l'espace a-t-il trois dimensions ? Il s'agit probablement de la question la plus ardue de la physique. Elle ne trouvera une réponse que dans la toute dernière étape de notre excursion.

Défi 38 s

* Pour une définition de l'indénombrabilité, voir la page ??.

** Remarquez que le fait de stipuler que l'espace a trois dimensions *implique* que l'espace est continu. Le mathématicien et philosophe néerlandais Luitzen Brouwer (n. Overschie 1881, d. Blaricum 1966) montra que la dimensionalité est un concept nécessaire uniquement pour les ensembles continus.



TABLEAU 8 Propriétés de l'espace galiléen.

LES POINTS	PROPRIÉTÉ PHYSIQUE	DÉNOMINA- TION MATHÉMA- TIQUE	DÉFINI- TION
Peuvent être distingués	distinction	élément d'un ensemble	Page ??
Peuvent être ordonnés s'ils sont alignés	succession	ordre	Page ??
Peuvent façonner des formes	forme	topologie	Page ??
Se disposent dans trois directions indépendantes	existence des nœuds	tri-dimensionalité	Page ??
Peuvent avoir une distance infinitésimale	continuité	compacité, complétude	Page ??
Définissent les distances	mesurable	métrique	Page ??
Permettent d'additionner des translations	additivité	métrique	Page ??
Définissent les angles	produit scalaire	espace euclidien	Page 64
Ne masquent aucune singularité	invariance par translation	homogénéité	
Peuvent dépasser toutes les frontières	infini	infinitude	Page ??
Sont définis pour tous les observateurs	absolu	unicité	Page 42

Défi 39 s

Il est souvent dit qu'il est impossible d'imaginer quatre dimensions. C'est faux. Essayez seulement. Par exemple, pouvez-vous approuver que les nœuds sont impossibles à faire en quatre dimensions ?

Comme les intervalles de temps, les intervalles d'espace peuvent être décrits avec plus de précision à l'aide des *nombres réels*. Afin de simplifier la communication, des *unités* de référence sont utilisées, de telle façon que tout le monde utilise les mêmes nombres pour des longueurs identiques. Les unités nous permettent d'explorer empiriquement les propriétés générales de l'*espace galiléen* : l'espace, le contenant des objets, est continu, tridimensionnel, isotrope, uniforme, infini, euclidien et unique ou « absolu ». En mathématiques, une structure ou concept mathématique qui possède toutes les propriétés mentionnées ci-dessus est appelé un *espace euclidien* tridimensionnel. Ses éléments, les *points* (*mathématiques*), sont décrits par trois paramètres réels. Ils sont communément notés

$$(x, y, z) \quad (1)$$

et dénommés *coordonnées*. Ils désignent et quantifient l'emplacement d'un point dans l'espace. (Pour la définition exacte des espaces euclidiens, voir page 64.)

Ce qui vient d'être dit en seulement une demi-page a pris en réalité 2 000 ans pour être développé, principalement parce qu'il fallut d'abord découvrir les concepts de



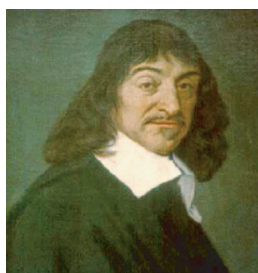


FIGURE 12 René Descartes.

« nombre réel » et de « coordonnée ». La première personne qui décrit les points de l'espace de cette façon fut le célèbre mathématicien et philosophe René Descartes*. d'après qui les coordonnées de l'expression (1) furent appelées *cartésiennes*.

Comme le temps, l'espace est un concept *indispensable* pour décrire le monde. En réalité, l'espace est implicitement introduit lorsque nous décrivons des situations avec plusieurs objets. Par exemple, quand plusieurs boules sont posées sur une table de billard, nous ne pouvons échapper à l'emploi de l'espace pour détailler les relations entre elles. Il n'existe aucune manière d'éviter l'utilisation des concepts d'espace quand nous traitons de la nature.

Défi 40 s Bien que nous ayons de toute manière besoin de l'espace pour parler de la nature, il est quand même intéressant de se demander pourquoi c'est comme ça. Par exemple, depuis que des méthodes de mesures de longueur existent, il doit y avoir une manière *naturelle* ou *idéale* pour mesurer des distances, des tailles et des rectitudes. Pouvez-vous la trouver ?

De même que pour le temps, chacune des propriétés de l'espace listées ci-dessus doit être vérifiée. Et à nouveau, des observations méticuleuses nous montreront que chaque propriété est approximative. En termes plus abrupts et plus concis, elles sont *toutes* erronées. Cela entérine la déclaration de Weyl au début de cette section. En fait, l'histoire de cette violence liée à l'introduction des nombres est contée par chaque forêt du monde, et bien entendu également par celle située au pied de la Montagne Mouvement. Pour l'écouter, nous devons simplement prêter l'oreille attentivement à ce que les arbres ont à nous dire.

« Μέτρον ἄριστον**.

Cléobule »

L'ESPACE ET LE TEMPS SONT-ILS ABSOLUS OU RELATIFS ?

Dans la vie de tous les jours, les notions d'espace et de temps galiléens renferment deux points de vue antagonistes. Cette dissonance a attisé les débats pendant plusieurs siècles. D'un côté, l'espace et le temps expriment quelque chose d'invariable et de permanent, ils agissent ensemble comme de grands récipients pour tous les objets et les

* René Descartes ou Cartesius (1596–1650), mathématicien et philosophe français, auteur de la célèbre expression « je pense, donc je suis », traduction de « cogito ergo sum ». De son point de vue c'est la seule formulation que nous pouvons tenir pour certaine.

** « La mesure est la meilleure des choses. » Cléobule (Κλεοβουλος) de Lindos, (v. 620–550 av. J.-C.) fut un des sept sages très connus.



TABLEAU 9 Quelques valeurs de mesures de distance.

OBSERVATION	DISTANCE
Longueur d'onde de Compton d'une galaxie	10^{-85} m (calculé seulement)
Longueur de Planck, la plus petite longueur mesurable	10^{-32} m
Diamètre du proton	1 fm
Longueur d'onde de Compton de l'électron	2,426 310 215(18) pm
Taille de l'atome d'hydrogène	30 pm
Plus petite oscillation du tympan détectable par l'oreille humaine	50 pm
Taille d'une petite bactérie	0,2 μ m
Longueur d'onde de la lumière visible	de 0,4 à 0,8 μ m
Le point : diamètre du plus petit objet visible à l'œil nu	20 μ m
Diamètre du cheveu humain (du plus fin au plus épais)	de 30 à 80 μ m
Longueur totale de l'ADN dans chaque cellule humaine	2 m
La plus grande créature vivante, le champignon <i>Armillaria ostoyae</i>	3 km
Longueur de l'équateur terrestre	40 075 014,8(6) m
Longueur totale des cellules nerveuses humaines	$8 \cdot 10^5$ km
Distance moyenne au Soleil	149 597 870 691(30) m
Une année-lumière	9,5 Pm
Distance à une étoile ordinaire	10 Em
Taille de la galaxie	1 Zm
Distance à la galaxie d'Andromède	28 Zm
L'objet visible le plus lointain	125 Ym

événements découverts dans la nature. En suivant cette voie, l'espace et le temps ont une réalité propre. En ce sens nous pouvons dire qu'ils sont fondamentaux ou *absolus*. D'un autre côté, l'espace et le temps sont des outils descriptifs qui nous permettent de parler des relations entre objets. Selon cette idée, ils n'ont plus aucun sens lorsqu'ils sont dissociés des objets et résultent uniquement des rapports entre ceux-ci. Ils sont dérivés, apparentés ou *relatifs*. Lequel de ces points de vue adopteriez-vous ? Les résultats de la physique ont alternativement privilégié une position puis l'autre. Nous renouvelerons cette hésitation tout au long de notre aventure, jusqu'à ce que nous trouvions la réponse. Et à l'évidence il s'agira d'une troisième solution.

Défi 41 e

Réf. 33

LA TAILLE – POURQUOI LES SURFACES EXISTENT-ELLES, MAIS PAS LES VOLUMES ?

La taille est un aspect primordial des objets. Comme un petit enfant qui n'a pas encore l'âge scolaire, chaque homme, dans ses agissements, découvre comment utiliser les propriétés de la taille et de l'espace. Comme des adultes qui cherchent la précision, la définition de la *distance* comme étant la différence entre des coordonnées nous permet de définir la *longueur* d'une manière fiable. Il a fallu plusieurs centaines d'années pour



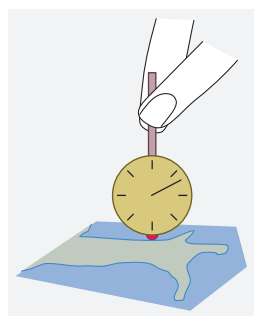


FIGURE 13 Un curvimètre ou odomètre.

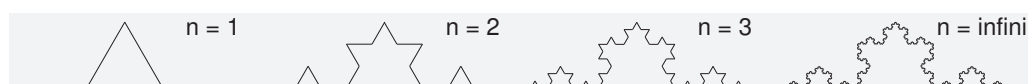


FIGURE 14 Une fractale : une courbe auto-similaire de longueur infinie (complètement à droite), et sa construction.

s'apercevoir que quelque chose ne *collait pas*. Plusieurs recherches en physique et en mathématiques aboutirent à des complications.

Les problèmes physiques se déclenchèrent avec une question étonnamment simple posée par Lewis Richardson* : quelle est la longueur de la côte ouest de l'Angleterre ?

En suivant la ligne du littoral sur une carte à l'aide d'un odomètre, un appareil représenté sur la Figure 13, Richardson trouva que la longueur l du littoral dépendait de l'échelle s (supposons 1 : 10 000 ou 1 : 500 000) de la carte utilisée :

$$l = l_0 s^{0,25} \quad (2)$$

(Richardson découvrit d'autres nombres pour d'autres côtes.) Le nombre l_0 est la longueur à l'échelle 1 : 1. Le résultat principal est que plus la carte est grande, plus la côte est longue. Qu'arriverait-il si l'échelle de la carte était agrandie au-delà même de la taille de l'original ? La longueur croîtrait au-delà de toutes limites. Un littoral peut-il réellement avoir une longueur *infinie* ? Oui, il le peut. En fait, les mathématiciens ont décrit un grand nombre de ces courbes : ils les ont nommées des *fractales*. Il en existe un nombre infini, et la Figure 14 en montre un exemple**. Pouvez-vous en construire d'autres ?

La longueur possède d'autres caractéristiques étranges. Le mathématicien italien Giuseppe Vitali fut le premier à découvrir qu'il est possible de couper un segment de droite de longueur 1 en morceaux qui peuvent être ré-assemblés – simplement en les alignant dans la direction du segment – en un segment de droite de longueur 2. Êtes-vous capable

* Lewis Fray Richardson (1881–1953), psychologue et physicien anglais.

** La plupart de ces courbes sont *auto-similaires*, c'est-à-dire qu'elles suivent des « lois » d'échelle similaires à celle mentionnée ci-dessus. Le terme « fractale » est dû au mathématicien polonais Benoît Mandelbrot et se réfère à une propriété étrange : dans un certain sens, elles ont un nombre de dimensions D non entier, bien qu'elles soient unidimensionnelles par construction. Mandelbrot remarqua que la dimension non entière était liée à l'exposant e de Richardson par $D = 1 + e$, donnant ainsi $D = 1,25$ dans l'exemple ci-dessus. La longueur des côtes et d'autres fractales sont merveilleusement présentées dans HEINZ-OTTO PEITGEN, HARTMUT JÜRGENS & DIETMAR SAUPE, *Fractals for the Classroom*, Springer Verlag, 1992, pp. 232–245. Cet ouvrage est également disponible dans plusieurs autres langues.



Défi 43 d de découvrir une telle division en vous servant de l'astuce que cela n'est réalisable qu'en utilisant un nombre infini de morceaux ?

Pour résumer, la longueur est bien définie pour des lignes qui sont droites ou incurvées de manière régulière, mais pas pour des lignes compliquées ou pour des lignes constituées d'une infinité de morceaux. Nous allons par conséquent éviter les fractales et autres courbes bizarrement formées par la suite, et nous allons prendre toutes nos précautions lorsque nous parlerons de segments infiniment petits. Cela fait partie des hypothèses principales des deux premières étapes de cette destinée, et nous ne devons jamais les oublier. Nous reviendrons sur ces hypothèses dans la troisième partie.

En réalité, toutes ces complications s'estompent lorsqu'elles sont confrontées au problème subséquent. Ordinairement, les aires et les volumes sont définis en recourant à la longueur. Vous pensez que c'est enfantin ? Vous êtes dans l'erreur, de même que vous êtes une victime des préjugés répandus par les écoles à travers le monde. Pour caractériser l'aire et le volume avec précision, leurs définitions doivent inclure deux propriétés : les valeurs doivent être *additives*, c'est-à-dire que, pour des ensembles finis ou infinis d'objets, l'aire et le volume total doivent être la somme des aires et des volumes de chaque élément de l'ensemble, et ils doivent être *inflexibles*, c'est-à-dire que, si l'on coupe une surface ou un volume en morceaux et qu'ensuite on remet ces morceaux en place, la valeur résultante doit demeurer identique. De telles définitions existent-elles ? Dit autrement, ces concepts d'aire et de volume existent-ils ?

Pour des aires dans une surface plane, nous procédons de la manière classique suivante : nous définissons l'aire A d'un rectangle de côtés a et b comme $A = ab$. Puisque n'importe quel polygone peut être transformé en un rectangle avec un nombre fini de coupes droites, nous pouvons alors évaluer l'aire de tous les polygones. Ensuite, nous pouvons définir l'aire des figures régulièrement courbées comme étant la limite de la somme de celles d'une infinité de polygones. Cette méthode, nommée *intégration*, est présentée en détail dans la section sur l'action physique.

Toutefois, l'intégration ne nous permet pas de définir l'aire de domaines ayant des frontières arbitraires. (Pouvez-vous vous figurer un tel domaine ?) Pour une définition complète, des outils plus sophistiqués sont nécessaires. Ils furent découverts en 1923 par le célèbre mathématicien Stefan Banach*. Il démontra que nous pouvons malgré tout définir une aire pour tous les ensembles de points quels qu'ils soient, même si la limite n'est pas continûment courbée mais extrêmement complexe, telle la courbe fractale précédemment mentionnée. Aujourd'hui cette notion généralisée de l'aire, techniquement une « mesure dénombrablement additive et invariante par isométrie », est appelée une *mesure de Banach* en son honneur. Les mathématiciens résument cette explication en disant que, puisqu'il existe une mesure de Banach en deux dimensions, il y a une manière de définir le concept d'aire – une mesure additive et rigide – pour tous les ensembles de points quels qu'ils soient**.

* Stefan Banach (Cracovie 1892–Lvov 1945) fut un important mathématicien polonais.

** En fait, cela est vrai uniquement pour des ensembles d'une surface plane. Pour des surfaces courbées telles que la surface d'une sphère, existent des difficultés que ne seront pas exposées ici. En plus, les problèmes soulevés dans la définition de la longueur des fractales surgissent également pour l'aire si la surface à mesurer n'est pas plate mais pleine de collines et de vallées. Un exemple typique est la superficie du poumon humain : en fonction de l'échelle de précision de l'examen, nous trouvons une valeur qui varie de cent mètres carrés jusqu'à beaucoup plus.



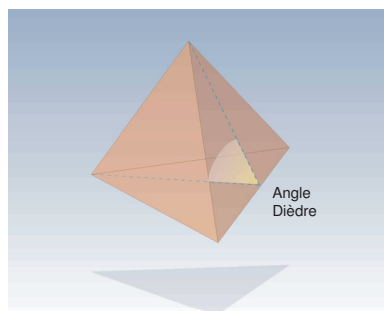


FIGURE 15 Un polyèdre avec un de ses angles dièdres. (© Luca Gastaldi)

Quelle est la situation en *trois* dimensions, c'est-à-dire pour le volume ? Nous pouvons commencer de la même façon que pour l'aire, en définissant le volume V d'un polyèdre rectangulaire de côtés a, b, c comme $V = abc$. Mais nous rencontrons alors le premier écueil : un polyèdre en général ne peut pas toujours être réduit à un cube par des coupes droites ! Cet achoppement fut découvert en 1900 et 1902 par Max Dehn*. Il remarqua que cette possibilité dépend des valeurs des angles des arêtes, ou angles dièdres, comme les mathématiciens les nomment. Si nous assignons à chaque arête d'un polyèdre en général un nombre donné par sa longueur l multipliée par une fonction particulière $g(\alpha)$ de son angle dièdre α , alors Dehn montra que la somme de tous les nombres pour toutes les arêtes d'un solide ne change pas après découpage, pourvu que la fonction satisfasse la relation $g(\alpha + \beta) = g(\alpha) + g(\beta)$ et $g(\pi) = 0$. Un exemple d'une telle fonction g étrange est celle qui attribue la valeur 0 à n'importe quel multiple rationnel de π et la valeur 1 à un ensemble de base des multiples irrationnels de π . Les valeurs pour tous les angles dièdres du polyèdre peuvent alors être obtenues par une combinaison de multiples rationnels de ces angles de base. En utilisant cette fonction, vous devez alors déduire par vous-même qu'un cube ne peut pas être découpé en un tétraèdre régulier parce que leurs invariants de Dehn respectifs sont différents**.

Défi 46 s

En dépit de ces difficultés relatives aux invariants de Dehn, nous *pouvons* définir un concept rigide et additif du volume pour les polyèdres, puisque pour tous les polyèdres et, plus généralement, pour toutes les formes « régulièrement courbées », nous pouvons encore utiliser l'intégration pour la définition de leur volume.

À présent considérons les formes générales et les découpages généraux en trois dimensions, et plus seulement les « réguliers » décrits plus haut. Nous butons alors sur le célèbre théorème (ou paradoxe) de *Banach-Tarski*. En 1924, Stefan Banach et Alfred Tarski*** prouvèrent qu'il est possible de découper une sphère en cinq morceaux qu'on peut ré-assembler pour donner deux sphères, chacune de la taille de l'original. Ce résultat contre-intuitif est le théorème de Banach-Tarski. Pis encore, une autre variante du théorème affirme ceci : prenez deux formes quelconques qui ne se prolongent pas à l'in-

Réf. 34

* Max Dehn (1878–1952), mathématicien allemand, élève de David Hilbert.

** Cela est également expliqué dans le magnifique livre de M. AIGLER & G. M. ZIEGLER, *Proofs from the Book*, Springer Verlag, 1999. Le titre est attribuable à la célèbre habitude qu'avait le grand mathématicien Paul Erdős d'imaginer que toutes les belles démonstrations mathématiques pouvaient être assemblées dans un « recueil des démonstrations ».

*** Alfred Tarski (n. Varsovie 1902, d. Berkeley 1983), mathématicien polonais.



fini et contenant chacune une sphère solide, alors il est toujours possible de transformer l'une en l'autre en un nombre *fini* de découpages. En particulier il est possible de transformer un petit pois en la Terre, ou vice versa. La taille ne compte pas* ! Le volume n'est donc pas du tout un concept utile.

Défi 47 s

Le théorème de Banach-Tarski soulève deux questions : premièrement, ce résultat peut-il s'appliquer à l'or ou au pain ? Cela permettrait de résoudre de nombreux problèmes. Deuxièmement, peut-il être appliqué à l'espace vide ? En d'autres termes, la matière et l'espace vide sont-ils continus ? Ces deux sujets seront étudiés plus tard dans notre exploration ; chaque résultat aura sa propre conséquence. Pour le moment, nous faisons l'impasse sur ce problème déroutant en restreignant notre intérêt aux formes continûment courbées (et aux découpages). Avec cette restriction, les volumes de matière et d'espace vide se conduisent merveilleusement bien : ils sont additifs et rigides, et ne soulèvent aucune contradiction. En réalité, les découpages requis pour le paradoxe de Banach-Tarski ne sont pas uniformes : il est impossible de les réaliser avec un couteau classique, puisqu'ils exigent un nombre infini d'angles infiniment aigus découpés avec un couteau infiniment tordu. Un tel couteau n'existe pas. Cependant, gardons dans un coin de notre tête l'idée que la taille d'un objet ou d'un morceau d'espace vide est une quantité subtile – et que nous avons besoin d'être prudent à chaque fois que nous discutons de cela.

QU'EST-CE QU'UNE LIGNE DROITE ?

Lorsque vous regardez un objet massif possédant une arête droite, il est sûr à 99 % qu'il a été fabriqué par l'homme**. La discordance entre les objets observés dans une ville – les immeubles, les bureaux, les voitures, les poteaux électriques, les boîtes, les livres – et les objets rencontrés dans une forêt – les arbres, les plantes, les cailloux, les nuages – est flagrante : dans la forêt rien n'est droit ou plat, dans la ville la majorité des objets le sont. Comment est-il envisageable que les hommes aient pu fabriquer des objets droits alors que l'on n'en rencontre aucun dans la nature ?

Défi 48 s

Chaque forêt nous renseigne sur l'origine de la rectitude. Elle présente des troncs d'arbre de haute taille et des rayons de lumière du jour qui filtrent du haut à travers le feuillage. Pour cette raison nous qualifions une ligne de *droite* si elle est en contact avec un fil à plomb ou un rayon de lumière sur toute sa longueur. En fait, les deux définitions sont équivalentes. Pouvez-vous confirmer cela ? Pouvez-vous trouver une autre définition ? Indubitablement, nous qualifions une surface de *plate* si, pour n'importe quelles direction et position, elle est en contact avec un fil à plomb ou un rayon de lumière le long de toute son étendue.

Réf. 35

* La démonstration de ce résultat ne nécessite pas de connaître beaucoup de mathématiques : elle est admirablement expliquée par Ian Stewart dans *Paradox of the spheres*, *New Scientist*, 14 janvier 1995, pp. 28–31. Le paradoxe de Banach-Tarski existe également en quatre dimensions, ainsi que dans n'importe quel nombre de dimensions plus élevé. Vous trouverez davantage de précisions mathématiques dans le magnifique livre de Stan Wagon.

Réf. 36

** Les contre-exemples les plus courants sont les nombreux minéraux cristallins, où la rectitude est liée à la structure atomique. Une autre exception célèbre est la formation géologique irlandaise bien connue dénommée la Chaussée des Géants. D'autres cas qui pourraient venir à l'esprit, comme certaines bactéries ayant des formes (approximativement) carrées ou (approximativement) triangulaires ne sont pas des contre-exemples, puisque ces formes ne sont qu'approximatives.





FIGURE 16 Une photographie de la Terre – vue depuis la direction du Soleil.

En résumé, la notion de rectitude – et ainsi également celle de platitude – est définie à l'aide de corps matériels ou de rayonnement. En réalité, tous les concepts spatiaux, de même que tous les concepts temporels, ont besoin du mouvement pour leur définition.

UNE TERRE CREUSE ?

L'espace et la ligne droite posent de délicats défis. Certaines personnes excentriques soutiennent que tous les hommes vivent à l'intérieur d'une sphère. Ils nomment (habituellement) cela la *théorie de la Terre creuse*. Ils prétendent que la Lune, le Soleil et les astres sont tous proches du centre de la sphère creuse. Ils expliquent aussi que la lumière suit des trajets courbés dans le ciel et ainsi que, lorsque les physiciens classiques parlent de la distance r au centre de la Terre, la distance réelle au centre de la Terre creuse est

Défi 49 s $r_{tc} = R_{\text{Terre}}^2/r$. Pouvez-vous montrer que ce modèle est faux ? Roman Sexl* posait régulièrement cette question à ses étudiants et collègues physiciens. La réponse est simple : si vous pensez détenir un argument pour montrer que cette idée est erronée, vous vous fourvoyez ! Il n'y a *aucune manière* de montrer qu'un tel point de vue est faux. Il est possible de décrire l'horizon, l'apparition du jour et de la nuit, ainsi que les photographies de satellites de la Terre ronde, comme celle de la Figure 16. Expliquer ce qui se produirait pendant un vol vers la Lune serait également amusant. Le point de vue logique sur

Défi 50 e

* Roman Sexl (1939–1986), physicien autrichien renommé, auteur de plusieurs ouvrages influents sur la gravitation et la relativité.





FIGURE 17 Une image illustrant la théorie de la Terre creuse, montrant comment le jour et la nuit apparaissent. (© Helmut Diehl)

Page 263

la Terre creuse est complètement *équivalente* à l'image familière d'un espace infiniment étendu. Nous reviendrons sur ce problème dans la section sur la relativité générale.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR L'ESPACE ET LE TEMPS QUOTIDIENS

L'espace et le temps conduisent à de nombreuses questions stimulantes pour la réflexion.

* *

Défi 51 s

Comment mesure-t-on la vitesse d'une balle de pistolet avec un chronomètre, dans un espace de 1 m^3 , sans électronique ? Indice : la même méthode peut aussi être utilisée pour mesurer la vitesse de la lumière.

* *

Défi 52 s

Imaginez un point noir sur une surface blanche. Quelle est la couleur de la ligne séparant le point du fond ? Cette question est couramment appelée énigme de Peirce.

* *

Défi 53 s

Le pain est aussi (approximativement) une fractale irrégulière. La dimension fractale du pain se situe autour de 2,7. Essayez de la mesurer.

* *



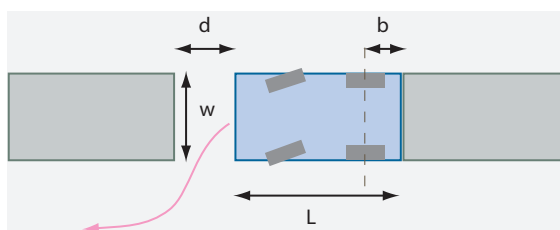


FIGURE 18 Quitter un emplacement de stationnement.

- La conduite automobile soulève de nombreux problèmes mathématiques. Un des plus importants est le problème du stationnement suivant : quelle est la distance d la plus courte jusqu'au véhicule d'en face, nécessaire pour quitter un emplacement de stationnement sans utiliser la marche arrière ? (Admettez que vous connaissez la géométrie de votre véhicule, comme indiqué dans la Figure 18, ainsi que son plus petit rayon de virage extérieur R , qui est connu pour chaque voiture.) Question suivante : quel est le plus petit espacement requis lorsque vous avez la possibilité de manœuvrer d'avant en arrière aussi souvent que vous le voulez ? Maintenant un problème pour lequel aucune solution ne semble être donnée dans la littérature : comment cet espacement dépend-il du nombre n de fois que vous utilisez la marche arrière ? (L'auteur offre 50 euros à la première solution correctement exposée qui lui sera envoyée.)

* *

- Combien de fois en 24 heures les aiguilles des heures et des minutes d'une horloge se trouvent-elles l'une sur l'autre ? Pour les horloges qui ont également une aiguille des secondes, combien de fois les trois aiguilles se trouvent-elles superposées ?

* *

- Combien de fois en douze heures les deux aiguilles d'une horloge peuvent-elles être *permutées* avec comme conséquence que la nouvelle situation indique un temps *valide* ? Que se passe-t-il pour des horloges qui ont également une troisième aiguille pour les secondes ?

* *

- De combien de minutes la Terre tourne-t-elle en une minute ?

* *

- Quelle est la vitesse la plus élevée atteinte par un lancer (avec ou sans raquette) ? Quel projectile fut utilisé ?

* *

- Une corde est posée tout autour de la Terre, sur l'équateur, aussi serrée que possible. La corde est ensuite rallongée de 1 m. Une souris peut-elle se faufiler sous celle-ci ?

* *

Jacques rame dans son bateau sur une rivière. Lorsqu'il se trouve sous un pont, il lâche



TABLEAU 10 La notation exponentielle : comment écrire des petits et des grands nombres.

NOMBRE	NOTATION EXPONENTIELLE	NOMBRE	NOTATION EXPONENTIELLE
1	10^0	10	10^1
0,1	10^{-1}	20	$2 \cdot 10^1$
0,2	$2 \cdot 10^{-1}$	32,4	$3,24 \cdot 10^1$
0,324	$3,24 \cdot 10^{-1}$	100	10^2
0,01	10^{-2}	1 000	10^3
0,001	10^{-3}	10 000	10^4
0,000 1	10^{-4}	100 000	10^5 etc.
0,000 01	10^{-5} etc.		

un ballon dans la rivière. Jacques continue à ramer dans la même direction pendant 10 minutes après qu'il a lâché le ballon. Il fait alors demi-tour et rame dans l'autre sens. Lorsqu'il parvient au ballon, le ballon a flotté sur 600 m depuis le pont. Quelle est la vitesse du courant de la rivière ?

Défi 62 s

* *

Adam et Bert sont frères. Adam a 18 ans. Bert est deux fois plus vieux qu'au temps où Adam avait l'âge qu'a Bert maintenant. Quel est l'âge de Bert ?

* *

Les scientifiques utilisent une manière particulière pour écrire des petits et des grands nombres, elle est illustrée dans le [Tableau 10](#).

Réf. 37 En 1996 la plus petite distance vérifiée expérimentalement fut 10^{-19} m, atteinte entre des quarks au Fermilab. (Pour savourer l'importance de cette distance, écrivez tous les chiffres sans l'exposant.) Que signifie cette mesure par rapport à la continuité de l'espace ?

Défi 63 s

* *

« Où suis-je ? » est une question usuelle. « Quand suis-je ? » n'est jamais posée, pas plus que dans d'autres langues. Pourquoi ?

Défi 64 s

* *

Défi 65 s Y a-t-il un intervalle de temps minimum dans la nature ? Une distance minimale ?

* *

En supposant que vous savez ce qu'est une ligne droite, comment caractériseriez-vous ou définiriez-vous la courbure d'une ligne incurvée en utilisant des nombres ? Et celle d'une surface ?

Défi 66 s

* *

Défi 67 s Quelle est la vitesse de votre battement de paupière ?



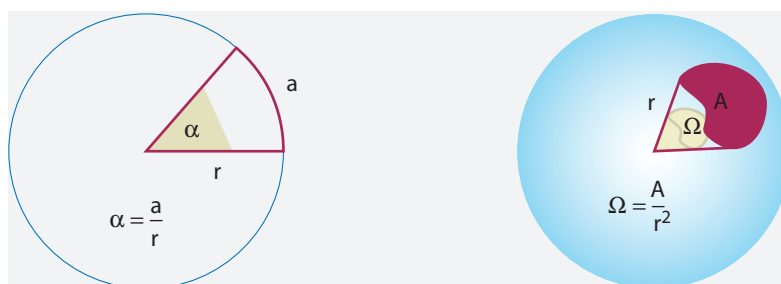


FIGURE 19 La définition des angles plan et solide.

* *

Défi 68 s L'aire de la surface du corps humain est d'environ 200 m^2 . Pouvez-vous dire d'où vient ce nombre gigantesque ?

* *

Défi 69 s Les fractales en trois dimensions donnent naissance à de nombreuses surprises. Prenez un tétraèdre régulier, collez alors sur chacune de ses faces triangulaires un tétraèdre régulier plus petit, de telle façon que la surface du solide soit à nouveau constituée de plusieurs triangles réguliers égaux. Répétez cette opération, en collant toujours des tétraèdres plus petits sur ces nouvelles surfaces triangulaires (plus nombreuses). Quelle est la forme de la fractale résultante après un nombre infini d'opérations ?

* *

Défi 70 s Zénon méditait sur ce qui arriverait à un objet en mouvement à un instant donné du temps. Pour discuter avec lui, vous décidez de construire l'obturateur pour appareil photographique le plus rapide possible que vous puissiez imaginer. Vous avez tout l'argent que vous désirez. Quel est le plus petit temps d'obturation que vous puissiez réaliser ?

* *

Défi 71 s Pouvez-vous démontrer le théorème de Pythagore de manière géométrique seulement, sans utiliser des coordonnées ? (Il y a plus de 30 solutions.)

* *

Défi 72 s Pourquoi la plupart des planètes et des lunes sont-elles (à peu près) sphériques ?

* *

Défi 73 s Un fil élastique joint les extrémités des deux aiguilles d'une horloge. Quel est le chemin suivi par le point situé au milieu du fil ?

* *

Il existe deux grandeurs importantes reliées aux angles. Comme indiqué sur la Figure 19, ce qui est communément appelé un *angle (plan)* est défini comme étant le rapport entre les longueurs de l'arc et du rayon. Un angle droit est égal à $\pi/2$ radian (ou $\pi/2$ rad) ou 90° . L'*angle solide* est le rapport entre l'aire et le carré du rayon. Un huitième d'une sphère est égal à $\pi/2$ steradian ou $\pi/2$ sr. En conséquence, un petit angle solide en forme



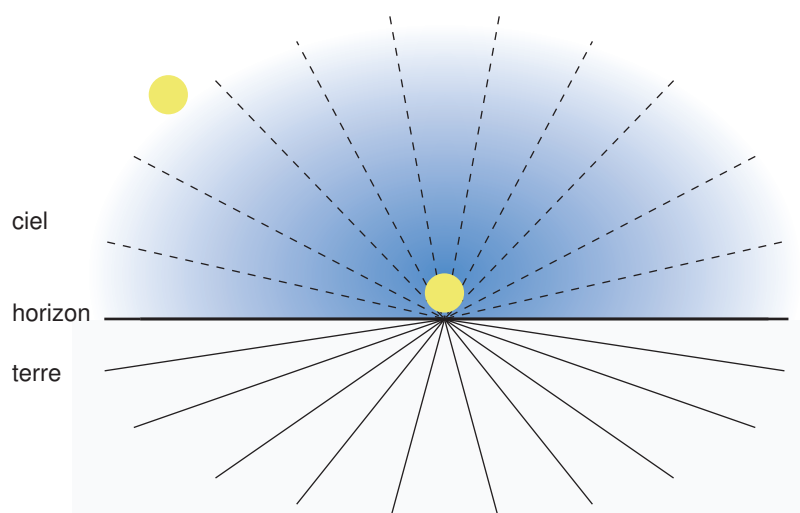


FIGURE 20 Comment la taille apparente de la Lune et celle du Soleil changent.

Défi 74 s de cône et l'angle de l'extrémité du cône sont *différents*. Pouvez-vous trouver la relation liant ces deux grandeurs ?

* *

La définition de l'angle permet de déterminer la taille de l'explosion d'un feu d'artifice. Évaluez le temps T , en secondes, entre le moment où vous voyez la fusée exploser dans le ciel et le moment où vous entendez l'explosion, mesurez l'angle (plan) α de la boule avec votre main. Le diamètre D est

$$D \approx 6 \text{ s}^\circ T \alpha . \quad (3)$$

Défi 75 e Pourquoi ? Pour en savoir plus sur les feux d'artifice, consultez le site Web <http://cc.oulu.fi/~kempmp>. Autre exemple : la distance angulaire entre les osselets d'un poing situé à bout de bras sont à peu près de 3° , 2° et 3° , la taille d'une main étendue, 20° . Pouvez-vous déterminer les autres angles en rapport avec votre main ?

Défi 76 s

* *

Défi 77 e Il est difficile d'évaluer la taille angulaire uniquement avec l'œil. Par exemple, pouvez-vous dire si la Lune est plus grande ou plus petite que l'ongle situé sur votre pouce à l'extrémité de votre bras tendu ? La taille angulaire n'est pas une grandeur intuitive. Elle nécessite d'utiliser des instruments de mesure.

Un exemple célèbre, indiqué sur la Figure 20, illustre la difficulté d'estimer des angles. Le Soleil et la Lune semblent tous les deux plus grands lorsqu'ils sont à l'horizon. Dans l'ancien temps, Ptolémée expliqua cette illusion par une modification inconsciente de la distance apparente opérée par le cerveau humain. En réalité, la Lune est même *beaucoup plus éloignée* de l'observateur lorsqu'elle est juste au-dessus de l'horizon, et donc son image est *plus petite* que celle qu'elle avait quelques heures plus tôt, quand elle était haute dans le ciel. Pouvez-vous confirmer cela ?

Défi 78 s



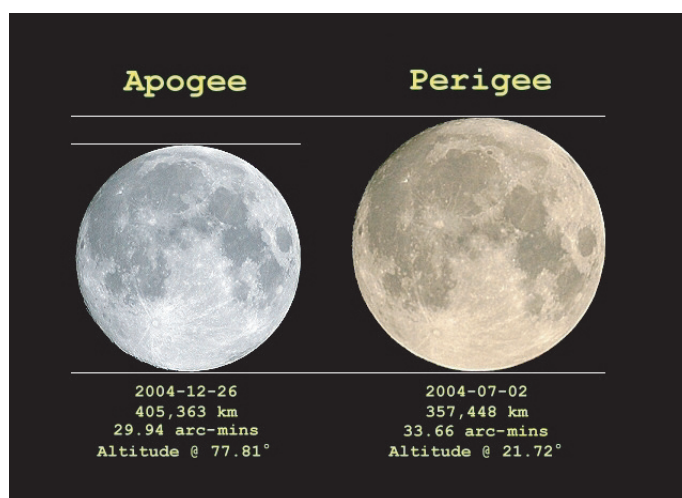


FIGURE 21 Comment la taille apparente de la Lune est modifiée durant son trajet orbital. (© Anthony Ayiomamitis)

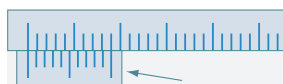


FIGURE 22 Un vernier/nonius/clavius.

En fait, la taille de la Lune change beaucoup plus à cause d'un autre effet : l'orbite de la Lune est elliptique. Un exemple de tout cela est montré sur la Figure 21.

* *

Des cylindres peuvent être utilisés pour faire rouler un objet plat sur le sol. Ils gardent l'objet plat toujours à la même distance du sol. Quelle figure dont la coupe transversale est autre que circulaire vous permet de réaliser la même prouesse ? Combien d'exemples pouvez-vous trouver ?

Défi 79 s

* *

Galilée fit aussi des erreurs. Dans son livre célèbre, les *Dialogues*, il affirma que la courbe formée par une fine chaînette suspendue entre deux clous est une parabole, c'est-à-dire la courbe définie par $y = x^2$. Cela n'est pas exact. Quelle est la véritable courbe ? Vous pouvez observer (approximativement) cette forme dans la figure des ponts suspendus.

Défi 80 d

* *

Comment fonctionne un *vernier* ? Il est appelé *nonius* dans d'autres langues. Le premier nom est dérivé d'un ingénieur militaire français* qui ne l'inventa pas, le second est un mot dérivé du nom latinisé de l'inventeur portugais d'un appareil plus élaboré** et du terme latin désignant « neuf ». En réalité, le dispositif tel qu'il est connu aujourd'hui –

* Pierre Vernier (1580–1637), officier militaire français passionné de cartographie.

** Pedro Nuñez ou Peter Nonnius (1502–1578), mathématicien et cartographe portugais.





FIGURE 23 Rayons anticrépusculaires. (© Peggy Peterson)

montré sur la Figure 22 – fut conçu autour de 1600 par Christophorus Clavius*, le même astronome qui fit des recherches qui établirent le fondement de la réforme du Calendrier grégorien de 1582. Êtes-vous capable de concevoir un vernier/nonius/clavius qui, au lieu d'augmenter la précision d'un facteur 10, le fait d'un facteur arbitraire ? Y a-t-il une limite à la précision accessible ?

Défi 81 s

* *

Dessinez trois cercles, de tailles différentes, qui se touchent les uns les autres. Maintenant dessinez un quatrième cercle dans l'espace du milieu, qui touche les trois à l'extérieur. Quelle relation simple vérifie l'inverse du rayon des quatre cercles ?

Défi 82 s

* *

Prenez un tétraèdre OABC dont les côtés OAB, OBC, OAC sont rectangles en O. En d'autres termes, OA, OB et OC sont tous perpendiculaires les uns aux autres. Dans le tétraèdre, les aires des triangles OAB, OBC, OAC sont respectivement 8, 4 et 1. Quelle est l'aire du triangle ABC ?

Défi 83 s

* *

Avec deux règles, vous pouvez additionner et soustraire des nombres en les couchant l'une près de l'autre. Êtes-vous capable de réaliser des règles qui vous permettent de multiplier et diviser de la même façon ? Des dispositifs plus élaborés utilisant ce principe sont appelés *règles de calcul* et furent les précurseurs des calculateurs électroniques. Ils furent utilisés partout dans le monde jusqu'aux années 1970.

Défi 84 s

* *

Combien de jours compterait une année si la Terre tournait dans l'autre sens avec la même vitesse de rotation ?

Défi 85 s

* *

Où se trouve le Soleil dans la situation spectaculaire montrée sur la Figure 23 ?

Défi 86 s

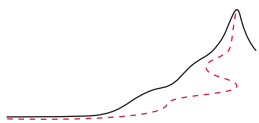
* Christophorus Clavius ou Schlüssel (1537–1612), astronome bavarois.



* *

- Réf. 38 Un univers bidimensionnel peut-il exister ? Alexander Dewdney décrit un tel univers dans un livre. Pouvez-vous expliquer pourquoi un univers bidimensionnel ne peut pas exister ?
- Défi 87 d





CHAPITRE 3

COMMENT DÉCRIRE LE MOUVEMENT – LA CINÉMATIQUE

“ La filosofia è scritta in questo grandissimo libro
che continuamente ci sta aperto innanzi agli
occhi (io dico l’universo) ... Egli è scritto in
lingua matematica*.”

Galileo Galilei, *Il saggiatore* VI.

Les expériences dévoilent que la plupart des animaux supérieurs et les jeunes enfants extraient les propriétés de l’espace et du temps galiléens de leur environnement. Plus tard, lorsque les enfants apprennent à parler, ils transposent ces expériences dans des concepts, de même que nous venons de faire ci-dessus. À l’aide de ces concepts, les enfants qui ont grandi disent alors que *le mouvement est le changement de position dans le temps*. Cette représentation est illustrée par le feuilletage rapide des coins inférieurs gauches de ce livre, en commençant à la page 169. Chaque page simule un instant du temps, et le seul changement qui a lieu durant le mouvement est celui de la position de l’objet, représenté par le point sombre. Les autres fluctuations d’une image à la suivante, qui sont imputables aux imperfections des techniques d’impression, peuvent être assimilées aux erreurs inévitables des mesures.

Il est manifeste qu’appeler « mouvement » le changement de la position dans le temps n’est *ni* une explication *ni* une définition puisque les deux notions de temps et de position sont déduites du mouvement lui-même. C’est seulement une *description* du mouvement. En revanche, la description est opportune parce qu’elle permet d’obtenir une précision élevée, comme nous le découvrirons en explorant la gravitation et l’électrodynamique. Après tout, la précision est notre fil conducteur durant cette excursion. De plus, la description précise des changements de position possède une dénomination appropriée : elle est nommée *cinématique*.

L’ensemble de toutes les positions prises par un objet dans le temps forme un *trajet* ou une *trajectoire*. La source de ce concept est flagrante lorsque nous regardons un feu d’artifice** ou encore le film saccadé précédemment mentionné situé dans les coins en bas à gauche après la page 169. Avec la description de l’espace et du temps par des nombres réels, une trajectoire peut être décrite en spécifiant ses trois coordonnées (x, y, z) – une pour chaque dimension – comme des fonctions continues du temps t . (Les fonctions

* La science est écrite dans cet immense livre qui se tient toujours ouvert devant nos yeux (je veux dire l’univers) ... Il est écrit en langage mathématique.

** Sur le monde des feux d’artifice, consultez la liste des questions fréquemment posées sur le forum de discussion rec.pyrotechnics, ou cherchez sur le Web. Une introduction simple se trouve dans l’article de J. A. CONKLING, Pyrotechnics, *Scientific American* pp. 66–73, juillet 1990.



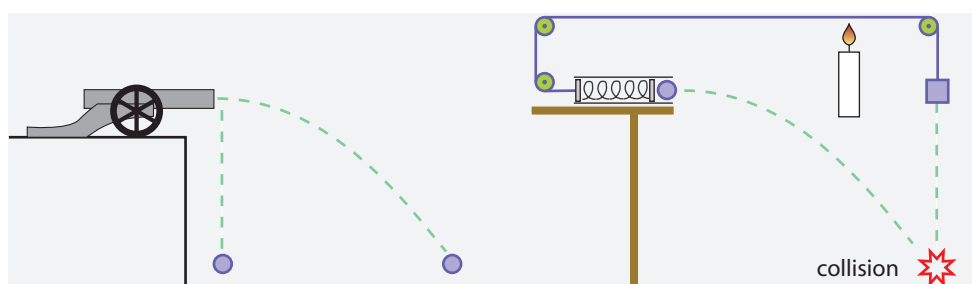


FIGURE 24 Deux manières de tester le fait que la durée de la chute libre ne dépend pas de la vitesse horizontale.

sont précisées en détail à la page ??.) Elles sont généralement notées de la manière suivante $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t) = (x(t), y(t), z(t))$. Par exemple, l'observation montre que la hauteur z de n'importe quelle pierre jetée ou en chute varie comme

$$z(t) = z_0 + v_0(t - t_0) - \frac{1}{2}g(t - t_0)^2 \quad (4)$$

où t_0 est l'instant où la chute commence, z_0 est la hauteur initiale, v_0 est la vitesse initiale dans la direction verticale et $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ est une constante qui est établie comme étant la même, dans la limite d'une partie pour 300, pour tous les corps chutant sur tous les points de la surface de la Terre. D'où vient la valeur $9,8 \text{ m/s}^2$ et ses variations ténues ? Une réponse préliminaire sera donnée sous peu, mais l'éclaircissement complet nous accapatera pendant la plus grande partie de cette promenade.

Réf. 39

L'équation (4) nous permet de déterminer la profondeur d'un puits, sachant le temps que met une pierre pour parvenir au fond. L'équation nous donne également la vitesse v avec laquelle nous atteignons le sol après avoir sauté d'un arbre, à savoir $v = \sqrt{2gh}$. Une hauteur de 3 m engendre une vitesse de 27 km/h. La vitesse est donc proportionnelle à la racine carrée de la hauteur seulement. Cela signifie-t-il que notre forte crainte de la chute résulte d'une surestimation de ses véritables effets ?

Défi 88 s

Défi 89 s

Galilée fut le premier à établir un résultat primordial à propos de la chute libre : les mouvements dans les directions horizontale et verticale sont *indépendants*. Il montra que le temps que met un boulet de canon tiré exactement horizontalement pour chuter est *indépendant* de la vigueur de la poudre à canon, comme indiqué sur la Figure 24. Beaucoup de grands savants ne furent pas d'accord avec cette affirmation, même après sa mort : en 1658, l'Academia del Cimento organisait encore une expérience pour vérifier cette assertion, en confrontant un boulet de canon tiré en l'air avec un autre qui tombait seulement verticalement. Pouvez-vous imaginer comment ils contrôlèrent la simultanéité ? La Figure 24 montre également comment vous pouvez vérifier ceci chez vous. Dans cette expérience, quelle que soit la charge de la poudre dans le canon, les deux projectiles entrèrent toujours en collision entre ciel et terre (si la table est assez haute), démontrant ainsi l'assertion.

Réf. 40

Défi 90 s

En d'autres termes, un boulet de canon n'est pas accéléré dans la direction horizontale. Son mouvement horizontal reste simplement inchangé. En étendant la description



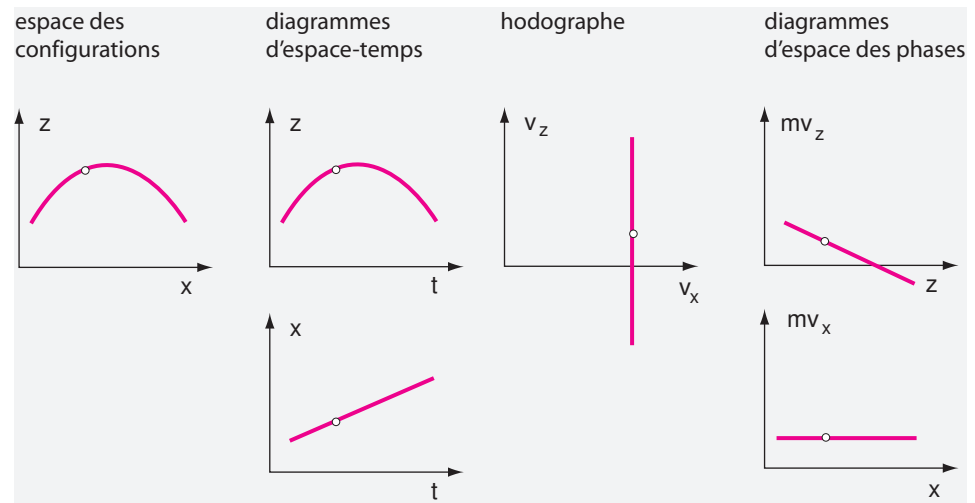


FIGURE 25 Divers types de graphiques décrivant la même trajectoire d'une pierre jetée.

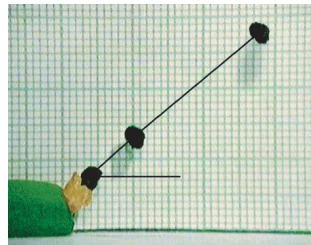


FIGURE 26 Trois images superposées d'une boulette d'excréments tirée par une chenille. (© Stanley Caveney)

de l'équation (4) aux deux expressions des coordonnées horizontales x et y , soit

$$\begin{aligned} x(t) &= x_0 + v_{x0}(t - t_0) \\ y(t) &= y_0 + v_{y0}(t - t_0), \end{aligned} \quad (5)$$

une description *exhaustive* des trajectoires suivies par les pierres lancées en résulte. Une trajectoire de cette forme est nommée une *parabole*. Elle est présentée sur les Figures 10, 24 et 25*. Une figure parabolique est également utilisée pour les réflecteurs lumineux dans les lampes de poche ou les phares de voiture. Pouvez-vous montrer pourquoi ?

Défi 91 s

LE JET ET LE TIR

La description cinématique du mouvement est utile pour répondre à un pan entier d'interrogations.

* Excepté pour les graphiques représentés sur la Figure 25, il y a également l'*espace des configurations* occupé par les coordonnées de toutes les particules d'un système. Pour une particule seule uniquement il est égal à l'espace réel. Le diagramme de l'espace des phases est également appelé diagramme d'espace des états.



* *

- Réf. 41 De nombreuses chenilles d'espèces de papillons de nuit et de jour projettent leurs déjections – pour le dire plus grossièrement : leur merde – de telle façon que leurs odeurs n'aident pas les prédateurs à les localiser. Stanley Caveney et son équipe ont pris des photos de ce comportement. La Figure 26 montre une chenille (jaune) de l'espèce *Calpodethlius* (Hesperiidae) à l'intérieur d'une feuille verte enroulée prise sur le fait. Sachant que le record de la distance observée est 1,5 m (bien qu'il s'agisse d'une autre espèce, *Epargyreus clarus*), quelle est la vitesse d'éjection ? Comment les chenilles accomplissent-elles cela ?
- Défi 92 s

* *

- Défi 93 s Quelle est la distance horizontale que nous pouvons atteindre avec une pierre, connaissant la vitesse et l'angle par rapport à l'horizontale avec lesquels elle est lancée ?

* *

- Défi 94 s Page 17 Comment la vitesse de la pluie tombante peut-elle être mesurée en utilisant un parapluie ? Cette méthode peut également être utilisée pour évaluer la vitesse de la lumière.

* *

- Défi 95 s Quel est le nombre maximum de balles avec lesquelles on peut jongler en même temps ?

* *

- Réf. 42 La découverte d'une limite maximale pour le saut en longueur est intéressante. Le record mondial de la vitesse du sprint en 1997 était de $12 \text{ m/s} \approx 43 \text{ km/h}$ par Ben Johnson, et le record féminin était de $11 \text{ m/s} \approx 40 \text{ km/h}$. En réalité, les athlètes du saut en longueur ne courent jamais plus vite qu'environ $9,5 \text{ m/s}$. Quelle distance supplémentaire de saut pourraient-ils atteindre s'ils pouvaient courir à la vitesse maximale ? Comment pourraient-ils réaliser cette performance ? De plus, les athlètes du saut en longueur s'élancent d'un angle d'environ 20° , puisqu'ils ne sont pas capables d'atteindre un angle supérieur à cause de la vitesse à laquelle ils courent. De quelle longueur supplémentaire pourraient-ils bénéficier s'ils pouvaient atteindre 45° ?
- Réf. 43
- Défi 96 s

* *

- Défi 97 s Est-il vrai que la chute d'une averse pourrait tuer s'il n'y avait pas la résistance de l'air de l'atmosphère ? Qu'en est-il pour la glace ?

* *

- Défi 98 s Les balles tirées par un revolver qui tombe à la renverse dans le vide sous l'effet de la détonation sont-elles dangereuses ?

- Défi 99 s Les deux derniers problèmes se posent parce que l'équation (4) ne s'applique pas dans tous les cas. Par exemple, la chute des feuilles ou des chips ne la vérifie pas. Comme Galilée l'avait déjà compris, c'est une conséquence de la résistance de l'air. Nous en parlerons bientôt. En réalité, même sans la résistance de l'air, le trajet suivi par une pierre n'est pas toujours une parabole : pouvez-vous découvrir une telle situation ?



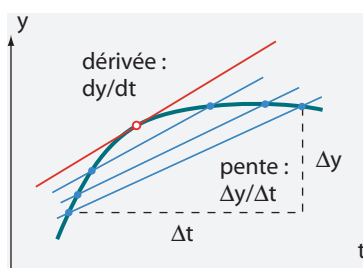


FIGURE 27 Dérivées.

QU'EST-CE QUE LE REPOS ?

Dans le tableau que Galilée brosse de la nature, le mouvement et le repos sont antagonistes. Dit autrement, un corps est au repos lorsque sa position, c'est-à-dire ses coordonnées, ne varie pas au cours du temps. De cette façon, le *repos* (galiléen) est défini comme suit :

$$\mathbf{x}(t) = \text{const.} \quad (6)$$

Plus tard, nous verrons que cette définition, contrairement à notre première impression, n'est pas très fructueuse et nécessite d'être retouchée. La définition du repos implique que les objets non stationnaires peuvent être discernés en comparant la rapidité de leur déplacement. Nous pouvons donc définir la *vitesse* $\mathbf{v}$ d'un objet comme étant la variation de sa position $\mathbf{x}$ dans le temps t . Elle est communément écrite

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{x}}{dt}. \quad (7)$$

Dans cette relation, valable pour chaque coordonnée prise séparément, d/dt signifie « variation par rapport au temps ». Nous pouvons alors avancer que la vitesse est la *dérivée* de la position par rapport au temps. La *vitesse* v est égale à la grandeur du vecteur vitesse $\mathbf{v}$. Les dérivées sont écrites comme des fractions pour rappeler au lecteur qu'elles proviennent de la notion de pente. L'expression

$$\frac{dy}{dt} \quad \text{est prise dans le sens d'une forme raccourcie de} \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta t}, \quad (8)$$

c'est une manière abrégée pour signifier que la *dérivée en un point* est la limite des pentes au voisinage de ce point, comme indiqué sur la Figure 27. Cette définition implique les règles de dérivation suivantes :

Défi 100 e

$$\frac{d(y+z)}{dt} = \frac{dy}{dt} + \frac{dz}{dt}, \quad \frac{d(cy)}{dt} = c \frac{dy}{dt}, \quad \frac{d}{dt} \frac{dy}{dt} = \frac{d^2 y}{dt^2}, \quad \frac{d(yz)}{dt} = \frac{dy}{dt} z + y \frac{dz}{dt}, \quad (9)$$

c étant n'importe quel nombre. C'est tout ce que nous aurons besoin de connaître sur les dérivées. Les quantités dt et dy , parfois elles-mêmes utiles, sont appelées des *diffé-*





FIGURE 28 Gottfried Leibniz.

rentielles. Ces concepts sont dus à Gottfried Wilhelm von Leibniz*. Les dérivées sont à la base de tous les calculs fondés sur la continuité de l'espace et du temps. Leibniz fut la personnalité qui rendit possible la description et l'utilisation de la vitesse dans la formulation physique et, en particulier, l'application aux calculs de l'idée de vitesse en un point donné dans le temps ou dans l'espace.

La définition de la vitesse présuppose qu'il y a un sens à considérer la limite $\Delta t \rightarrow 0$. En d'autres termes, il est admis que des intervalles infiniment petits de temps existent dans la nature. La définition de la vitesse avec les dérivées est possible uniquement parce que l'espace et le temps sont tous deux décrits par des ensembles qui sont *continus* ou, en langage mathématique, *connexes et complets*. Dans la suite de notre promenade, nous devons nous rappeler que, depuis la naissance de la physique classique, les *infinis* se manifestent dans la représentation de la nature. L'infiniment petit fait partie intégrante de notre définition de la vitesse. En fait, le calcul différentiel peut être défini comme étant l'étude de l'infini et de ses applications. Nous nous apercevons alors que l'apparition de l'infini n'implique pas systématiquement qu'une description soit irréalisable ou imprécise. Afin de rester précis, les physiciens emploient seulement ces deux espèces les plus petites des divers infinis possibles. Leur définition concise et un aperçu des autres types sont introduits dans l'entracte qui suit ce chapitre.

Page ??

Réf. 44

L'avènement de l'infini dans la description classique du mouvement fut d'abord vilipendé par Zénon d'Élée (vers 445 av. J. - C.), un disciple de Parménide, dans ses célèbres paradoxes sarcastiques. Dans son troisième paradoxe, ainsi nommé, Zénon explique que, puisque à chaque instant un objet donné séjourne dans une région de l'espace correspondant à sa taille, la notion de vitesse à un instant donné n'a aucun sens ; il conclut alors de manière ahurissante que le mouvement n'existe pas. De nos jours nous ne l'appellerions pas un paradoxe sur la *réalité* du mouvement, mais sur sa *description* classique, en particulier sur l'usage de l'espace et du temps infiniment divisibles. (Êtes-vous d'accord ?) Et pourtant, la description critiquée par Zénon fonctionne effectivement très bien dans la vie de tous les jours. La raison en est simple mais profonde : dans la vie quotidienne, les changements sont réellement continus.

Défi 102 e

De grands changements dans la nature sont constitués d'un grand nombre de petits changements. Cette propriété de la nature n'est pas intuitive. Par exemple, nous notons

* Gottfried Wilhelm von Leibniz (n. Leipzig 1646, d. Hanovre 1716), historien, diplomate, philosophe, mathématicien, physicien et homme de loi allemand. Il fut un des grands esprits de l'humanité, il inventa le calcul différentiel (avant Newton) et publia beaucoup d'ouvrages à succès dans les divers domaines qu'il explora, dont *De arte combinatoria*, *Hypothesis physica nova*, *Discours de métaphysique*, *Nouveaux essais sur l'entendement humain*, *Essais de théodicée* et *Monadologie*.



TABLEAU 11 Quelques valeurs d'accéléérations mesurées.

OBSERVATION	ACCÉLÉRATION
Quelle est la plus petite accélération que vous puissiez trouver ?	Défi 101 s
Accélération de la galaxie M82 due à son jet de matière	10 fm/s ²
Accélération d'une jeune étoile par un jet interstellaire	10 pm/s ²
Accélération du Soleil sur son orbite autour de la Voie lactée	0,2 nm/s ²
Décélération inexplicée des satellites Pioneer	0,8 nm/s ²
Accélération à l'équateur due à la rotation de la Terre	0,34 mm/s ²
Accélération centrifuge due à la rotation de la Terre	33 mm/s ²
Accélération des électrons dans un câble électrique domestique due au courant alternatif	50 mm/s ²
Accélération gravitationnelle sur la Lune	1,6 m/s ²
Accélération gravitationnelle à la surface de la Terre, dépendant de la localisation précise	9,8 ± 0,1 m/s ²
Accélération gravitationnelle standard	9,806 65 m/s ²
L'accélération la plus élevée pour une voiture ou une motocyclette avec des roues motorisées	15 m/s ²
Accélération gravitationnelle à la surface de Jupiter	240 m/s ²
Accélération du guépard	32 m/s ²
Accélération au déclenchement des airbags dans les voitures	360 m/s ²
L'accélération la plus rapide fournie par des pattes (par l'aphrophore, <i>Philaenus spumarius</i> , un insecte)	4 km/s ²
Balle de tennis contre un mur	0,1 Mm/s ²
Accélération d'une balle dans un fusil	5 Mm/s ²
Centrifugeuse la plus rapide	0,1 Gm/s ²
Accélération de protons dans les grands accélérateurs de particules	90 Tm/s ²
Accélération de protons à l'intérieur du noyau atomique	10 ³¹ m/s ²
La plus grande accélération possible dans la nature	10 ⁵² m/s ²

que nous avons considéré tacitement que le trajet suivi par un objet n'est pas une fractale ou toute autre entité d'apparence complexe. Dans la vie quotidienne cela est juste mais, dans d'autres domaines de la nature, cela ne l'est pas. La méfiance de Zénon sera partiellement réhabilitée plus tard dans notre excursion, et de plus en plus encore à mesure que nous progresserons. Ce retournement de situation ne sera que partiel, au sens où la réponse sera différente de celle qu'il envisageait. D'un autre côté, le doute concernant l'idée de « vitesse instantanée » s'avérera bien fondé. Pour le moment, nous n'avons malgré tout pas le choix : nous continuons avec le postulat fondamental que, dans la nature, les changements se produisent de manière continue.

Pourquoi la vitesse est-elle un concept indispensable ? Pour aspirer à plus de précision dans la description du mouvement, nous avons besoin d'établir la liste complète des aspects nécessaires pour caractériser l'état d'un objet. La notion de vitesse est évidemment dans cette liste. En poursuivant sur notre lancée, nous appelons *accélération* **a** d'un corps



la variation de sa vitesse $\mathbf{v}$ par rapport au temps, soit

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2} . \quad (10)$$

L'accélération est ce que nous ressentons lorsque la Terre tremble, qu'un avion décolle ou qu'une bicyclette tourne au coin d'une rue. Le **Tableau 11** cite davantage d'exemples. Comme la vitesse, l'accélération possède à la fois une grandeur et une direction, propriétés signalées par l'utilisation des caractères **gras** pour leur notation*.

Défi 105 s

Des dérivées d'ordre plus élevé que l'accélération peuvent aussi être définies de la même manière. Elles sont sans intérêt pour la description de la nature, parce que, comme nous le verrons bientôt, ni celles-ci ni l'accélération elle-même ne sont utiles pour la description de l'état de mouvement d'un système.

LES OBJETS ET LES PARTICULES PONCTUELLES

“ Wenn ich den Gegenstand kenne, so kenne ich auch sämtliche Möglichkeiten seines Vorkommens in Sachverhalten**.”
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 2.0123

Défi 106 e

Une perspective de l'étude du mouvement est de forger une description complète et précise des états et des objets à la fois. Grâce à la notion d'espace, la description des objets peut être considérablement affinée. En particulier, nous savons par expérience que tous les objets observés dans la vie quotidienne possèdent une propriété importante : ils peuvent être divisés en *parties*. Cette observation est souvent exprimée en disant que tous les objets, ou tous les corps, ont deux propriétés. Premièrement, ils sont constitués

* De telles quantités physiques sont appelées des *vecteurs*. Plus précisément, en langage mathématique, un vecteur est un élément d'un ensemble, appelé *espace vectoriel*, dans lequel les propriétés suivantes sont valables pour tout vecteur $\mathbf{a}$ et $\mathbf{b}$ et pour tout nombre c et d :

$$c(\mathbf{a} + \mathbf{b}) = c\mathbf{a} + c\mathbf{b} \quad , \quad (c + d)\mathbf{a} = c\mathbf{a} + d\mathbf{a} \quad , \quad (cd)\mathbf{a} = c(d\mathbf{a}) \quad \text{et} \quad 1\mathbf{a} = \mathbf{a} . \quad (11)$$

Défi 103 s

Un autre exemple d'espace vectoriel est l'ensemble de toutes les *positions* d'un objet. L'ensemble de toutes les rotations forme-t-il un espace vectoriel ? Tous les espaces vectoriels permettent la définition d'un unique vecteur nul et d'un seul vecteur opposé pour chaque vecteur de l'ensemble.

Remarquez que les vecteurs n'ont pas de points définis pour leur origine : deux flèches de même direction et même longueur sont deux vecteurs *identiques*, même si elles prennent leur départ en des points différents dans l'espace.

Dans de nombreux espaces vectoriels, la notion de *longueur* (caractérisant la « grandeur ») peut être introduite, généralement par le biais d'une étape intermédiaire. Un espace vectoriel est appelé *euclidien* si nous pouvons définir pour celui-ci un *produit scalaire* entre deux vecteurs, comme un nombre $\mathbf{ab}$ vérifiant

$$\mathbf{aa} \geq 0 \quad , \quad \mathbf{ab} = \mathbf{ba} \quad , \quad (\mathbf{a} + \mathbf{a}')\mathbf{b} = \mathbf{ab} + \mathbf{a'b} \quad , \quad \mathbf{a}(\mathbf{b} + \mathbf{b}') = \mathbf{ab} + \mathbf{ab'} \quad \text{et} \quad (c\mathbf{a})\mathbf{b} = \mathbf{a}(c\mathbf{b}) = c(\mathbf{ab}) . \quad (12)$$

Dans la notation en coordonnées cartésiennes, le produit scalaire standard est donné par $\mathbf{ab} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z$. À chaque fois qu'il s'annule, les deux vecteurs sont *orthogonaux*. La *longueur* ou *norme* d'un vecteur peut alors être définie comme la racine carrée du produit scalaire d'un vecteur par lui-même : $a = \sqrt{\mathbf{aa}}$.

Défi 104 s

Le produit scalaire est également utile pour déterminer les directions. En fait, le produit scalaire entre deux vecteurs encode l'angle qu'ils font entre eux. Pouvez-vous déduire cette relation importante ?

** Si je connais un objet, je connais aussi toutes les occurrences possibles de ses états d'occupations.



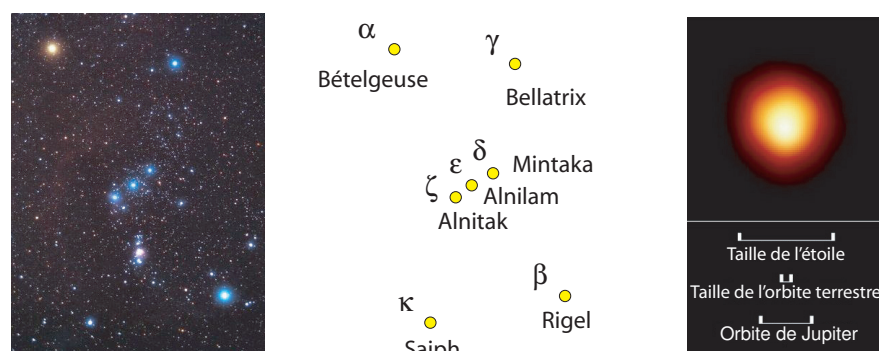


FIGURE 29 Orion (en couleurs naturelles) et Bételgeuse.

de *matière*^{*}, définie comme étant cet aspect d'un objet responsable de son impénétrabilité, c'est-à-dire la propriété qui empêche deux objets de se trouver au même endroit. Deuxièmement, les corps possèdent une certaine *forme* ou silhouette, définie comme étant la manière précise avec laquelle cette impénétrabilité est distribuée dans l'espace.

Afin de rendre compte du mouvement aussi fidèlement que possible, il est opportun de commencer avec les corps qui sont les plus élémentaires possible. En général, plus un corps est petit, plus il est simple. Un corps qui est si minuscule que ses parties ne nécessitent pas forcément d'être prises en compte est appelé une *particule*. (L'ancienne dénomination *corpuscule* est tombée aux oubliettes.) Les particules sont donc matérialisées comme de minuscules cailloux. Le cas extrême, une particule dont la taille est *négligeable* par rapport à la grandeur de son mouvement, de telle façon que sa position soit entièrement décrite par un *unique* triplet de coordonnées, est appelée une *particule ponctuelle* ou une *masse ponctuelle*. Dans l'équation (4), la pierre était assimilée à une particule ponctuelle.

Les objets assimilés à des points, c'est-à-dire les objets plus petits que tout ce que nous pouvons mesurer, existent-ils dans la vie quotidienne ? Oui et non. Les exemples les plus flagrants sont les étoiles. Aujourd'hui, des tailles angulaires aussi petites que $2 \mu\text{rad}$ peuvent être mesurées, cette limite étant fixée par les fluctuations de l'air dans l'atmosphère. Dans l'espace, comme pour le télescope Hubble en orbite autour de la Terre, la limite angulaire est fixée par le diamètre du télescope et est de l'ordre de 10 nrad . Pratiquement toutes les étoiles vues depuis la Terre sont plus petites que cette résolution et sont donc effectivement « comparables à des points », même lorsqu'elles sont observées avec les télescopes les plus performants.

Comme une exception à la règle générale, la taille de quelques grandes étoiles proches, de type géante rouge, peut être évaluée à l'aide d'instruments appropriés^{**}. Bételgeuse,

Réf. 45 * Matière est un mot dérivé du Latin « materia », qui signifie à l'origine « bois » et est dérivé via des étapes intermédiaires de « mater » qui signifie « mère ».

** Le site Web <http://www.astro.uiuc.edu/~kaler/sow/sowlist.html> fournit une introduction aux différents types d'étoiles. Le site Web <http://www.astro.wisc.edu/~dolan/constellations/constellations.html> donne des précisions et des informations intéressantes sur les constellations.

Pour un tour d'horizon sur les planètes, lisez le magnifique livre de K. R. LANG & C. A. WHITNEY, *Vagabonds de l'espace – Exploration et découverte dans le système solaire*, Springer Verlag, 1993. Les plus belles images d'étoiles peuvent être dénichées dans D. MALIN, *A View of the Universe*, Sky Publishing and



la plus brillante des deux épaules d'Orion, montrée dans la [Figure 29](#), Mira dans la Baieine, Antares du Scorpion, Aldébaran du Taureau et Sirius dans le Grand Chien sont des exemples d'étoiles dont la taille a été mesurée. Elles sont toutes à quelques années-lumière seulement de la Terre. Évidemment, comme le Soleil, toutes les autres étoiles ont une taille finie, mais nous ne pouvons pas démontrer cela en mesurant les dimensions sur les photographies. (Est-ce vrai ?)

La différence entre des sources « ponctuelles » et celles de taille finie peut être remarquée à l'œil nu : la nuit, les étoiles scintillent, mais pas les planètes. (Vérifiez-le !) Cet effet est dû à la turbulence de l'air. La turbulence a un effet sur la plupart des étoiles assimilées à des points parce qu'elle dévie les rayons lumineux d'une petite quantité. D'un autre côté, la turbulence de l'air est trop faible pour provoquer le clignotement des sources de taille angulaire plus importante, telles que les planètes ou les satellites artificiels*, parce que la déviation est en moyenne compensée dans ce cas.

Un objet est *ponctuel pour l'œil nu* si sa taille angulaire est plus petite qu'environ $2' = 0,6$ mrad. Pouvez-vous estimer la taille d'une particule de poussière « ponctuelle » ? En fait, un objet est *invisible* à l'œil nu s'il est ponctuel *et* si sa luminosité, c'est-à-dire l'intensité de la lumière provenant de l'objet jusqu'à l'œil, est inférieure à une certaine valeur critique. Pouvez-vous deviner s'il existe des constructions humaines visibles depuis la Lune ou depuis la navette spatiale ?

La définition ci-dessus de « ponctuel » est manifestement trompeuse dans la vie quotidienne. Les particules ponctuelles véritablement réelles existent-elles ? En réalité, est-il vraiment possible de montrer qu'une particule possède une taille évanescence ? Cette question sera primordiale dans les deux dernières parties de notre promenade. De la même manière, nous avons besoin de nous demander et de vérifier si les points dans l'espace existent. Notre excursion nous mènera au résultat étourdissant que toutes les réponses à ces questions sont négatives. Pouvez-vous imaginer pourquoi ? Ne soyez pas déçus si vous trouvez cette conclusion dure à avaler : de nombreux esprits brillants ont eu la même difficulté.

Cependant, beaucoup de particules, tels les électrons, les quarks ou les photons, sont considérées comme ponctuelles dans un but pratique. Une fois que nous savons comment décrire le mouvement des particules ponctuelles, nous pouvons également décrire le mouvement des corps plus volumineux, rigides ou déformables, en admettant qu'ils sont constitués de parties. C'est la même démarche que de décrire le mouvement entier d'un animal comme une combinaison du mouvement de ses différentes parties. La description la plus simple, l'*approximation du continu*, définit les corps étendus comme un assemblage infini de particules ponctuelles. Elle nous permet de comprendre et de prédire le mouvement de toutes les choses agréables, le mouvement de l'air dans les ouïssans et du parfum dans une pièce. Le mouvement du feu et de tous les autres corps gazeux, le fléchissement du bambou sous le vent, le changement de forme du chewing-gum, et la croissance des plantes et des animaux peuvent être également expliqués de cette manière.

Une description plus précise que celle de l'approximation du continu est donnée ci-

Cambridge University Press, 1993.

* Un *satellite* est un objet tournant autour d'une planète, comme la Lune. Un *satellite artificiel* est un système mis en orbite par l'homme, tels que les Spoutnik.



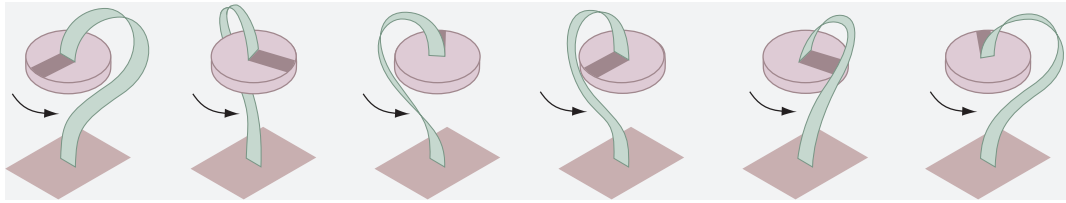


FIGURE 30 Comment un objet peut tourner continuellement sans embrouiller la liaison avec un second objet.

Page ?? dessous. Néanmoins, toutes les observations ont confirmé jusqu'à présent que le mouvement des corps volumineux peut être décrit avec une grande précision comme la conséquence du mouvement de leurs parties. Cette approche nous dirigera à travers les deux premières étapes de notre ascension montagnarde. C'est seulement à la troisième partie que nous découvrirons que cette décomposition est impossible à une échelle fondamentale.

DES JAMBES ET DES ROUES

Les membres du corps humain déterminent sa silhouette. La forme est une caractéristique importante des corps : elle nous indique, entre autres, comment les considérer. En particulier, les êtres vivants sont tous constitués d'un corps d'un seul tenant. Ce n'est pas une affirmation vide de sens : à partir de cette remarque nous pouvons déduire que les animaux ne peuvent avoir des roues ou des hélices, mais uniquement des jambes, des nageoires ou des ailes. Pourquoi ?

Appendix ?? Les êtres vivants n'ont qu'une seule surface. Dit plus simplement, ils n'ont qu'un seul morceau d'épiderme. Mathématiquement parlant, les animaux sont *connexes*. Cela est souvent supposé être incontestable, et on fait régulièrement allusion au fait que la circulation sanguine, les nerfs et les connexions lymphatiques reliées à une partie rotative s'emmêleraient. Toutefois, cet argument n'est pas si simple, comme le montre la Figure 30. Elle indique qu'il est malgré tout possible de faire tourner continuellement un corps par rapport à un second, sans emmêler les liaisons. Pouvez-vous trouver un exemple de ce type de mouvement sur votre propre corps ? Êtes-vous capable de voir comment plusieurs fils peuvent être attachés au corps rotatif de la figure sans entraver la rotation ?

Défi 112 s En dépit de la possibilité pour les animaux de posséder des parties rotatives, la méthode de la Figure 30 ne peut toutefois pas être appliquée pour rendre une roue ou une hélice utilisable. Pouvez-vous imaginer pourquoi ? L'évolution n'a pas eu le choix : elle a évincé les animaux possédant des parties tournant autour d'essieux. C'est la raison pour laquelle les hélices et les roues n'existent pas dans la nature. Bien sûr, cette limitation n'empêche pas les corps vivants de se déplacer de manière générale en roulant : les buissons épineux (ceux que l'on voit dans les westerns), les graines de divers arbres, quelques insectes, certains autres animaux, les enfants et les danseurs se déplacent à l'occasion en roulant ou en tournant leur corps tout entier.

Réf. 49 Les corps *uniques*, et donc tous les êtres vivants, ne peuvent se déplacer qu'au moyen d'une *contorsion* de leur forme : par conséquent ils sont contraints de marcher, courir, ramper ou agiter leurs ailes ou leurs nageoires, comme indiqué sur la Figure 31. Au





FIGURE 31 Les jambes et les « roues » chez les êtres vivants.

contraire, les systèmes constitués de plusieurs corps, tels que les bicyclettes, les pédalos ou autres machines, peuvent se déplacer *sans* aucun changement de forme de leurs constituants, autorisant ainsi l'usage de roues avec essieux, d'hélices ou autres appareils rotatifs*.

En résumé, à chaque fois que nous observons une construction dans laquelle une certaine partie tourne continuellement (et sans le « montage » de la figure), nous devinons immédiatement qu'il s'agit d'un artefact : c'est une machine et non pas un être vivant (mais pourtant construite par lui). Cependant, comme tant de déclarations concernant les créatures vivantes, la nature possède également des exceptions. La distinction entre un et deux corps est beaucoup moins claire si le système tout entier est constitué de quelques molécules, ce qui se produit clairement dans les bactéries. Des organismes tels que *Escherichia coli*, la bactérie bien connue hôte de l'intestin humain, ou les bactéries issues de la famille *Salmonella* nagent toutes en utilisant des flagelles. Les *flagelles* sont des filaments minces, du même acabit que les fins poils qui émergent de la membrane cellulaire. Il fut montré dans les années 1970 que chaque flagelle, constitué d'une ou plusieurs molécules allongées d'un diamètre de quelques dizaines de nanomètres, tourne

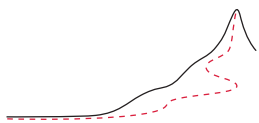
* Malgré l'inconvénient de ne pas pouvoir utiliser des parties rotatives et d'être réduites à un seul morceau, les constructions mobiles de la nature, généralement appelées des animaux, surpassent fréquemment les machines construites par l'homme. Par exemple, comparez la taille des plus petits systèmes volants bâtis par l'évolution à ceux construits par les hommes. (Consultez par exemple <http://pixelito.reference.be>.) Il y a deux explications à cet écart. Premièrement, les systèmes naturels ont incorporé des dispositifs de réparation et d'entretien. Deuxièmement, la nature peut bâtir de vastes structures à l'intérieur de contenants dotés d'ouvertures réduites. En fait, la nature est très astucieuse, à l'image de ce que les gens font lorsqu'ils construisent des voiliers à l'intérieur de bouteilles en verre. Le corps humain est plein d'exemples analogues, pouvez-vous en citer quelques-uns ?



Page ?? en réalité autour de son axe. Une bactérie est capable de faire tourner ses flagelles à la fois dans le sens horaire et antihoraire, elle peut réaliser plus de 1 000 rotations par seconde, et peut faire tourner tous ses flagelles en parfaite synchronisation. (Ces roues sont si minuscules qu'elles n'exigent pas de connexion mécanique.) Par conséquent les roues existent effectivement chez les êtres vivants, bien qu'elles soient très petites. Mais continuons dorénavant avec notre étude des objets ordinaires.

Réf. 50





CHAPITRE 4

DES OBJETS ET DES IMAGES À LA CONSERVATION

Réf. 51 En marchant à travers une forêt nous remarquons deux formes assez distinctes de mouvement : la brise déplace les feuilles et, en même temps, leurs ombres bougent sur le sol. Les ombres sont une forme élémentaire d' image. Les objets et les images sont tous les deux capables de bouger. Les tigres qui s'élancent, les flocons de neige qui chutent et la matière recrachée par les volcans sont des exemples de mouvement, puisqu' ils changent tous de position au cours du temps. Pour la même raison, l'ombre qui suit notre corps, le rayon de lumière qui tourne autour de la tour d' un phare durant une nuit brumeuse, et l' arc-en-ciel qui conserve constamment la même distance apparente pour un randonneur sont des exemples de mouvement.

Réf. 53 Toute personne qui a déjà visionné un dessin animé sait que les images peuvent bouger de façon plus surprenante que les objets. Les images peuvent modifier leur taille, leur forme et même leur couleur, une prouesse qu' un nombre restreint d' objets est capable de réaliser*. Les images peuvent apparaître et disparaître sans laisser de traces, se multiplier, s'interpénétrer, aller en arrière dans le temps et braver la gravité ou toute autre force. Les images, et même les ombres ordinaires, peuvent se déplacer plus vite que la lumière. Les images peuvent flotter dans l'espace et conserver la même distance par rapport aux objets qui s'approchent. Les objets ne peuvent presque rien faire de tout cela. En général, les « lois de la physique des dessins animés » sont assez différentes de celles de la nature. En réalité, le mouvement des images ne semble pas suivre une quelconque règle, par opposition au mouvement des objets. D' un autre côté, les objets et les images se différencient de leur environnement par le fait qu' ils possèdent tous les deux des *frontières* qui définissent leur taille et leur forme. Nous sentons la nécessité d' avoir des critères précis permettant de discerner ces deux cas.

Le fait de procéder à une distinction claire et nette entre les images et les objets est exécuté de la même façon lorsque les enfants ou les animaux se trouvent face à un miroir

Défi 116 s * Hormis les changements très lents tels que le changement de couleur des feuilles en automne, seuls certains cristaux, la pieuvre, le caméléon et quelques autres espèces animales réalisent cela dans la nature. Parmi les objets construits par l' homme, la télévision, les écrans d' ordinateurs, les appareils chauffants et certains lasers peuvent également le faire. Connaissez-vous d' autres exemples ? Le livre de K. NASSAU, *The Physics and Chemistry of Colour – the fifteen causes of colour*, J. Wiley & Sons, 1983, est une excellente source d' informations sur le thème des couleurs. Dans le domaine des sciences populaires, le livre le plus admirable est le travail exemplaire de l' astronome flamand MARCEL G. J. MINNAERT, *Light and Colour in the Outdoors*, Springer, 1993, une version revue et corrigée de sa splendide série de livres *De natuurkunde van 't vrije veld*, Thieme & Cie, Zutphen. Tous les scientifiques qui étudient la nature doivent lire ce livre. Sur le Web, voyez aussi le site, plus succinct, <http://webexhibits.org/causesofcolour>.



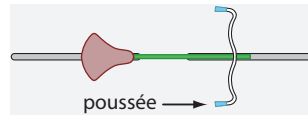


FIGURE 32 Dans quelle direction la bicyclette tourne-t-elle ?

Page ??

pour la première fois : ils essaient de *toucher* ce qu'ils voient. En fait, si nous sommes capables de toucher ce que nous voyons – ou, plus précisément, si nous sommes capables de le déplacer – nous l'appelons un *objet*, sinon c'est une *image**. Les images ne peuvent pas être palpées, alors que les objets peuvent l'être. Les images ne peuvent se heurter l'une l'autre, alors que les objets le peuvent. Et comme chacun le sait, toucher quelque chose permet d'appréhender sa résistance au mouvement. Certains corps, tels que les papillons, opposent une faible résistance et sont facilement déplacés, d'autres, tels que les bateaux, résistent beaucoup plus, et sont déplacés avec beaucoup de peine. Cette opposition au mouvement – ou plus exactement à la variation du mouvement – est appelée l'*inertie*, et la difficulté avec laquelle un corps peut être déplacé est appelée sa *masse (inertielle)*. Les images ne possèdent ni inertie ni masse.

Défi 117 s

En conclusion, pour la description du mouvement, nous devons distinguer les corps, qui peuvent être palpés et qui sont impénétrables, des images, qui ne le peuvent et qui ne le sont pas. Toute chose visible est soit un objet, soit une image. Il n'y a pas de tierce possibilité. (Êtes-vous d'accord ?) Dans le cas où l'objet est si lointain qu'il ne peut être touché, comme une étoile ou une comète, il peut être ardu de convenir si celui-ci est associé à une image ou à un objet. Nous rencontrerons à plusieurs reprises cette question épineuse. Par exemple, comment montreriez-vous que les comètes sont des objets et non des images ?

Défi 118 s

De la même manière que les objets sont constitués de *matière*, les images sont constituées de *rayonnement*. Les images font partie du royaume du théâtre d'ombres, du cinéma, de la télévision, du graphisme numérique, des organisations croyantes et du domaine des spécialistes en substances hallucinogènes. Les photographies, les films cinématographiques, les fantômes, les anges, les rêves et de nombreuses hallucinations sont des images (parfois provoquées par un dysfonctionnement psychique). Pour comprendre les images, nous avons besoin d'étudier le rayonnement (et également l'œil et le cerveau). Malgré cela, en raison de l'importance des objets – après tout, nous sommes nous-mêmes des objets – nous allons d'abord étudier ceux-ci.

Réf. 54

MOUVEMENT ET CONTACT

Réf. 55

« Démocrite soutient qu'il n'existe qu'une seule espèce de mouvement : celui qui résulte de la collision. »

Aetius, *Opinions*.

Lorsqu'un enfant monte sur un vélo à une roue, il ou elle tire profit d'une loi fondamentale dans notre univers : un corps agissant sur un autre le met en mouvement. En

* Nous pourrions suggérer d'y ajouter la nécessité que nous puissions faire tourner les objets sur eux-mêmes. Toutefois, cette exigence pose des problèmes dans le cas des atomes, tel qu'expliqué à la page ??, et des particules élémentaires, ainsi la rotation ne constitue pas une nécessité supplémentaire.



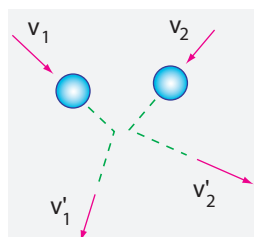


FIGURE 33 Les collisions déterminent la masse.



FIGURE 34 Le kilogramme standard. (© BIPM)

fait, en à peu près six heures, n'importe qui peut apprendre à monter sur un monocycle et s'amuser avec. Comme dans tous les divertissements de la vie, tel que s'amuser avec des jouets, des animaux, des femmes ou des hommes, des appareils, des enfants, la mer, le vent, aller au cinéma, jongler, faire une randonnée et faire l'amour, quelque chose exerce une action sur autre chose. Donc notre premier défi est de décrire ce transfert de mouvement de manière plus approfondie.

Le contact n'est pas la seule manière de mettre en mouvement quelque chose : une pomme qui tombe d'un arbre ou un aimant qui en attire un autre en sont des contre-exemples. Les influences à distance sont plus fascinantes : il n'y a rien de dissimulé, et cependant quelque chose d'obscur se produit. Le mouvement par contact semble plus facile à appréhender, et c'est pourquoi nous commençons généralement par celui-ci. Cependant, en dépit de ce parti pris, les forces sans contact ne peuvent pas être esquivées. En choisissant cette option nous nous représentons l'expérience commune de tous les cyclistes (voir la Figure 32). Si vous roulez à vélo à une vitesse suffisamment élevée et que vous tentez de tourner à gauche en poussant la poignée droite du guidon, vous tournerez à *droite**. En d'autres termes, malgré notre choix, le restant de notre promenade nous amènera rapidement à étudier également les interactions à distance.

QU'EST-CE QUE LA MASSE ?

« Δός μοι ποῦ στω καὶ κινῶ τὴν γῆν.
Da ubi consistam, et terram movebo**.

Archimède

* Cet effet impressionnant ne fonctionne évidemment qu'au-dessus d'une certaine vitesse minimale. Pouvez-vous déterminer quelle est cette vitesse ? Soyez prudents ! Une poussée trop forte vous fera chuter.

** « Donnez-moi un point fixe et un levier et je soulèverai la Terre. » Archimède (v. 283–212), scientifique et ingénieur grec. Cette citation lui fut attribuée par Pappus d'Alexandrie. Déjà, Archimède avait connaissance du fait que la distinction utilisée par les juristes entre propriété mobile et immobile n'avait aucun sens.



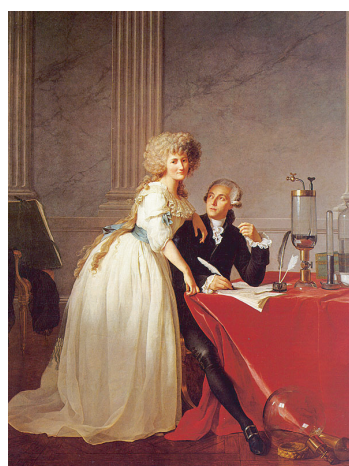


FIGURE 35 Antoine Laurent de Lavoisier.

Lorsque nous repoussons quelque chose, c'est parce que nous ne sommes pas familiers avec cette chose. De la même façon, lorsque nous donnons un coup de pied dans un objet dans la rue, nous prêtons immédiatement attention à la même notion que les enfants explorent quand, pour la première fois, ils se trouvent face à un miroir ou qu'ils aperçoivent un point rouge dessiné par un laser. Nous vérifions si cette entité inconnue peut être poussée et nous notons comment cet objet non identifié réagit à notre influence. Une version de haute précision de cette expérience est donnée dans la Figure 33. En répétant ce procédé avec divers couples d'objets, nous découvrons – comme dans la vie quotidienne – qu'une certaine quantité fixe m_i peut être assignée à chaque objet i . Plus l'objet est difficile à déplacer, plus cette quantité est grande ; elle est déterminée par la relation

$$\frac{m_2}{m_1} = -\frac{\Delta v_1}{\Delta v_2} \quad (13)$$

où Δv représente la variation de vitesse produite par la collision. Le nombre m_i est appelé *masse* de l'objet i .

Dans le but de manipuler des valeurs de masses qui soient communes à tout le monde, la valeur de la masse pour un objet sélectionné en particulier doit être fixée au préalable. Cet objet spécifique, montré sur la Figure 34 est appelé le *kilogramme standard* et est conservé avec beaucoup de soin dans un récipient en verre sous vide à Sèvres, à proximité de Paris. Il n'est utilisé que très occasionnellement afin que la poussière, l'humidité ou les égratignures ne risquent pas de modifier sa masse. C'est grâce au kilogramme standard que nous pouvons estimer la valeur de la masse de chaque objet dans le monde.

La masse quantifie ainsi la difficulté à faire bouger quelque chose. Les masses élevées sont plus dures à déplacer que les masses plus petites. Manifestement, seuls les objets sont dotés d'une masse, les images n'en ont pas. (Par ailleurs, le mot « masse » est dérivé, Réf. 45 via le latin, du mot grec $\mu\alpha\zeta\alpha$ – pain – ou de l'hébreu « mazza » – pain sans levain – de signification complètement différente.)

Les expériences avec les objets quotidiens ont également montré que, à tout moment





FIGURE 36 Christiaan Huygens.

dans n'importe quelle collision, la somme de toutes les masses en jeu est conservée :

$$\sum_i m_i = \text{const} . \quad (14)$$

Le premier à avoir formulé la loi de conservation de la masse fut Antoine Laurent de Lavoisier*. La conservation de la masse implique que la masse d'un système composé soit égale à la somme des masses des constituants. En résumé, *la masse galiléenne est une mesure de la quantité de matière*.

Ainsi, la définition de la masse peut être formulée d'une autre manière. Nous pouvons attribuer un nombre m_i à chaque objet i de telle façon que, pour des collisions libres de toute influence extérieure, la somme suivante reste invariante *pendant* la collision :

$$\sum_i m_i \mathbf{v}_i = \text{const} . \quad (15)$$

Le produit de la vitesse $\mathbf{v}_i$ par la masse m_i est nommé la *quantité de mouvement*** du corps. La somme, ou *quantité de mouvement totale* du système, reste identique avant et après la collision : c'est une quantité *conservée*. *La conservation de la quantité de mouvement définit la masse*. Les deux lois de conservation (14) et (15) furent exprimées de cette manière pour la première fois par le grand physicien hollandais Christiaan Huygens***.

* Antoine Laurent de Lavoisier (1743–1794), chimiste français et homme de talent. Lavoisier fut le premier à comprendre que la combustion est une réaction qui se produit en présence d'oxygène. Il découvrit les constituants de l'eau et introduisit des méthodes de mesure de masse en chimie. Lorsqu'il fut (injustement) condamné à la guillotine lors de la Révolution française, il se résigna à réaliser une expérience pour la recherche scientifique : il décida de cligner des paupières aussi longtemps que possible après que sa tête fut tranchée, afin de dévoiler aux autres combien de temps la perte de conscience met à survenir. Lavoisier parvint à cligner onze fois des yeux.

** Le terme anglais est *momentum*, et parfois on emploie en français le terme *moment* (d'une force). La quantité de mouvement ne doit pas être confondue avec l'*impulsion* (en anglais *impulse*), cette dernière étant l'intégrale de la force en fonction de la durée. Par abus de langage, nous parlerons dans les sections sur la relativité du « tenseur énergie-impulsion » alors qu'en toute rigueur nous devrions dire « tenseur énergie-quantité de mouvement » [N.D.T.].

*** Christiaan Huygens (n. La Haye 1629, d. Hofwijck 1695) fut un des principaux physiciens et mathématiciens de son époque. Huygens élucida les concepts de base de la mécanique, il fut également un des premiers à montrer que la lumière est une onde. Il rédigea des ouvrages prépondérants sur la théorie des probabilités, les mécanismes horlogers, l'optique et l'astronomie. Parmi ses nombreuses découvertes, Huygens s'évertua à montrer que la nébuleuse d'Orion est constituée d'étoiles, il découvrit Titan, une lune de Saturne (la seule



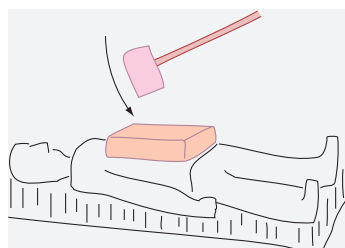


FIGURE 37 Est-ce dangereux ?

TABLEAU 12 Quelques valeurs mesurées de quantités de mouvement.

OBSERVATION	QUANTITÉ DE MOUE- MENT
Quantité de mouvement d'un photon de couleur verte	$2 \cdot 10^{-28}$ Ns
Quantité de mouvement moyenne d'une molécule d'oxygène dans l'air	10^{-26} Ns
Quantité de mouvement d'un photon de rayon X	10^{-23} Ns
Quantité de mouvement d'un photon γ	10^{-17} Ns
La plus grande quantité de mouvement d'une particule dans les accélérateurs	1 fNs
Quantité de mouvement de Planck	6,5 Ns
Boule de billard élançée	3 Ns
Balle de pistolet au vol	10 Ns
Coup de poing	de 15 à 50 Ns
Homme marchant tranquillement	80 Ns
Véhicule sur autoroute	40 kNs
Impact d'une météorite de 2 km de diamètre	100 TNs
Quantité de mouvement d'une galaxie dans une collision galactique	jusqu'à 10^{46} Ns

Quelques valeurs caractéristiques de quantités de mouvement sont données dans le [Tableau 12](#).

Défi 120 s

La conservation de la quantité de mouvement sous-tend implicitement que, lorsqu'une boule en mouvement heurte une autre boule au repos et de même masse, une formule simple permet de déterminer l'angle entre les directions que les boules empruntent après la collision. Pouvez-vous trouver cette formule ? Elle est particulièrement utile lorsque nous jouons au billard. Nous nous apercevrons plus tard qu'elle n'est *pas* valide en relativité restreinte.

Une autre conséquence est indiquée sur la [Figure 37](#) : un homme est allongé sur une planche à clous avec deux gros blocs de béton posés sur son abdomen. Un autre homme frappe les blocs à l'aide d'une lourde masse. L'homme allongé ne ressent aucune douleur puisque le choc est principalement absorbé par le béton – à moins qu'il soit retiré.

visible à l'époque [N.D.T.]), et montra que les anneaux de Saturne sont composés de rochers. (Cela paraît contradictoire avec Saturne lui-même, dont la masse volumique est inférieure à celle de l'eau.)



Défi 121 s Pourquoi ?

La définition précédente de la masse a été généralisée par le physicien et philosophe Ernst Mach* de façon à ce qu'elle reste valide même si les deux objets interagissent à distance, et aussi longtemps que dure cette interaction le long de la ligne joignant leurs positions. Le rapport des masses de deux corps est défini comme étant l'opposé du rapport inverse des accélérations respectives, ainsi donc

$$\frac{m_2}{m_1} = -\frac{a_1}{a_2}, \quad (16)$$

où a est l'accélération de chaque corps pendant l'interaction. Cette définition a été examinée en détail par la communauté des physiciens, principalement durant le dix-neuvième siècle. Quelques remarques résument ces résultats :

- La définition de la masse *implique* la conservation de la quantité de mouvement $\sum mv$. La conservation de la quantité de mouvement n'est *pas* une loi distincte. Elle ne peut pas être vérifiée expérimentalement, puisque la masse est définie de telle manière que ce principe puisse être formulé.
- La définition de la masse *implique* l'égalité entre les produits m_1a_1 et $-m_2a_2$. De tels produits sont appelés des *forces*. L'égalité entre les forces d'action et de réaction n'est pas un principe à part : la masse est définie de telle manière que ce principe puisse être formulé.
- La définition de la masse est *indépendante* du fait qu'un contact est établi ou non, et du fait que les accélérations sont dues à l'électricité, à la gravitation ou à toute autre interaction**. Puisqu'une interaction n'entre pas dans la définition de la masse, les valeurs de masses définies à partir de l'interaction électrique, nucléaire ou gravitationnelle sont toutes équivalentes tant que la quantité de mouvement est conservée. Toutes les interactions connues conservent la quantité de mouvement. Pour certaines raisons historiques malheureuses, la valeur de la masse mesurée avec les interactions électrique et nucléaire est appelée masse « inertielle » et la masse mesurée en utilisant la gravité est appelée masse « gravitationnelle ». Comme cela apparaîtra plus loin, cette distinction artificielle ne possède aucune signification intrinsèque. Cela deviendra particulièrement clair lorsque nous prendrons du recul par rapport aux corps en question.
- La définition de la masse est valide uniquement pour des observateurs au repos ou en

* Ernst Mach (Chirlitz–Turas 1838-Haar 1916), physicien et philosophe autrichien. Le *mach*, unité de mesure pour la vitesse des avions, défini comme étant un multiple de la vitesse du son dans l'air (environ 0,3 km/s), est nommé en son honneur. Il développa l'interféromètre de Mach-Zehnder, il étudia également les fondements de la mécanique. Ses réflexions concernant la masse et l'inertie ont influencé la construction de la relativité générale, et aboutirent au principe de Mach, qui apparaîtra un peu plus loin. Il fut également le dernier scientifique à renier orgueilleusement – avec humour, et contre toute évidence – l'existence des atomes.

** Tel qu'indiqué ci-dessus, seules les forces *centrales* vérifient la relation (16) utilisée pour définir la masse. Les forces centrales agissent entre les centres de masse des corps. Nous en donnerons une définition plus précise plus tard. Cependant, puisque toutes les forces fondamentales sont qualifiées de centrales, ceci n'est pas une contrainte. Il ne semble y avoir qu'une seule exception notable : le magnétisme. La définition de la masse est-elle toujours valide dans ce cas ?



TABLEAU 13 Quelques valeurs de masse mesurées.

OBSERVATION	MASS E
Augmentation de masse due à l'absorption d'un photon de couleur verte	$3,7 \cdot 10^{-36}$ kg
L'électron : le plus léger objet connu	$9,109\,381\,88(72) \cdot 10^{-31}$ kg
Un atome d'argon	$39,962\,383\,123(3)$ u = $66,359\,1(1)$ yg
Le plus léger objet jamais pesé (une particule d'or)	0,39 ag
L'homme à son âge le plus précoce (l'ovule fécondé)	10^{-8} g
L'eau adsorbée sur un poids en métal de 1 kilogramme	10^{-5} g
Masse de Planck	$2,2 \cdot 10^{-5}$ g
Empreinte digitale	10^{-4} g
Fourmi ordinaire	10^{-4} g
Gouttelette d'eau	1 mg
Abeille à miel	0,1 g
Êtres vivants les plus lourds, tels que le champignon <i>Armillaria ostoyae</i> ou un énorme séquoia <i>Sequoiadendron giganteum</i>	10^6 kg
Le plus grand navire au long cours	$400 \cdot 10^6$ kg
Le plus grand objet manipulé par l'homme (une énorme plate-forme de production de gaz)	$687,5 \cdot 10^6$ kg
Le plus grand iceberg dérivant depuis l'Antarctique	10^{15} kg
L'eau sur Terre	10^{21} kg
Masse du Soleil	$2,0 \cdot 10^{30}$ kg
Masse de notre Galaxie	10^{41} kg
Masse totale visible dans l'univers	10^{54} kg

mouvement inertiel (à vitesse constante [N.D.T.]). Nous reviendrons là-dessus plus tard.

En mesurant la masse des corps qui nous entourent, dont une liste est donnée dans le [Tableau 13](#), nous pouvons explorer l'art et la science de l'expérimentation. Nous découvrons aussi les propriétés fondamentales de la masse. Elle est *additive* dans la vie quotidienne, de telle sorte que la masse de deux corps assemblés est égale à la somme de leur masse respective. En outre, la masse est *continue* : elle peut apparemment prendre toutes les valeurs positives. Au final, la masse est *conservée* : la masse d'un système, définie comme étant la somme des masses de ses constituants, ne varie pas au cours du temps si le système est isolé du reste de l'univers. La masse n'est pas conservée seulement lors de collisions mais également durant la fusion, l'évaporation, la digestion et tout autre processus de transformation.

Nous verrons plus tard que dans le cas précis de la masse toutes ces propriétés, résumées dans le [Tableau 14](#), ne sont qu'approximatives. Des expériences précises nous dévoilent qu'aucune de celles-ci n'est exacte*. Pour l'instant nous continuons avec notre

* En particulier, afin de définir la masse nous devons être capables de *différencier* les corps. Cela semble être



TABLEAU 14 Propriétés de la masse galiléenne.

LES MASSES	PROPRIÉTÉ PHYSIQUE	DÉSIGNATION MATHÉMATIQUE	DÉFINITION
Peuvent être différenciées	distinction	élément d'un ensemble	Page ??
Peuvent être ordonnées	succession	ordre	Page ??
Peuvent être comparées	mesurable	métrique	Page ??
Peuvent varier graduellement	continuité	complétude	Page ??
Peuvent être additionnées	quantité de matière	additivité	Page 64
Dépassent toute limite	infini	infinitude, ouverture	Page ??
Ne changent pas	conservation	invariance	$m = \text{const}$
Ne disparaît pas	impénétrabilité	positivité	$m \geq 0$

conception actuelle, la masse galiléenne, comme si nous n'avions rien de mieux à nous mettre sous la dent.

Dans une expérience célèbre au cours du seizième siècle, Santorre Santorio (Santorio Santorio ou Sanctorius de Padoue) (1561–1636), un ami de Galilée, vécut durant plusieurs semaines avec toute sa nourriture et son breuvage, mais aussi ses toilettes, sur une vaste balance. Il projetait de tester la conservation de la masse. Comment le poids mesuré a-t-il varié avec le temps ?

Défi 123 s

La définition de la masse à travers la conservation de la quantité de mouvement signifie que, lorsqu'un objet tombe, la Terre est un tout petit peu plus accélérée. Si nous pouvions mesurer cette minuscule grandeur, nous pourrions déterminer la masse de la Terre. Malheureusement, cette mesure est impossible à réaliser. Pouvez-vous découvrir une meilleure façon de déterminer la masse de la Terre ?

Défi 124 s

Comme le [Tableau 14](#) le récapitule, la masse d'un corps est décrite avec plus de précision par un nombre réel *positif*, généralement noté m ou M . C'est une conséquence directe de l'impénétrabilité de la matière. Certes, une masse (inertielle) *négative* pourrait vouloir dire qu'un tel corps se déplacerait dans la direction opposée de n'importe quelle force ou accélération appliquée sur celui-ci. Un tel corps ne pourrait être conservé dans une boîte : il chercherait à tout prix à se frayer un chemin à travers n'importe quelle paroi qui tenterait de l'arrêter. Assez étrangement, les corps de masse négative chuteraient toujours vers le bas dans le champ d'une vaste masse positive (bien que plus lentement qu'une masse équivalente positive). Êtes-vous capable d'entériner ce fait ? Par contre, un objet ayant une minuscule masse positive flotterait à une grande distance d'un corps volumineux de masse négative, comme vous pouvez facilement le deviner en comparant les diverses accélérations mises en jeu. Une masse positive et une masse négative de même valeur (absolue) demeureront à distance constante et accéléreront spontanément dans des directions opposées le long de la ligne joignant les deux masses. Remarquez qu'à la fois l'énergie et la quantité de mouvement restent conservées dans tous ces scénarios*.

Défi 125 e

Défi 126 e

un prérequis enfantin, mais nous découvrirons que ce n'est pas toujours possible dans la nature.

* Pour les curieux, lisez R. H. PRICE, Negative mass can be positively amusing, *American Journal of Physics* 61, pp. 216–217, 1993. Des particules de masse négative enfermées dans une boîte échaufferaient cette boîte de masse positive au moment où elles traverseraient ses parois, et accéléreraient, c'est-à-dire perdraient de

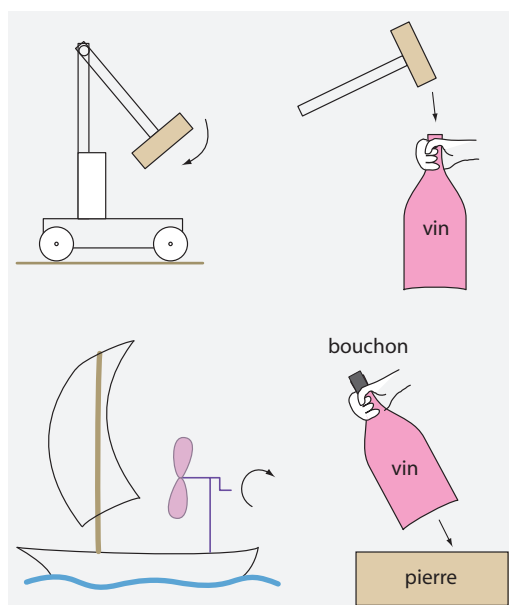


FIGURE 38 Que va-t-il se passer ?

Page 62, page ??

Les corps de masse négative n'ont jamais été observés. L'antimatière, dont nous discuterons bientôt, possède également une masse positive.

LE MOUVEMENT EST-IL ÉTERNEL ?

« Chaque corps persiste dans son état de repos ou de mouvement uniforme le long d'une ligne droite sauf s'il ne le peut plus. »
Arthur Eddington*

Le produit $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ de la masse d'une particule par sa vitesse est appelé sa *quantité de mouvement*. Elle représente la tendance d'un objet à persister dans son mouvement lors d'une collision. Plus cette valeur est grande, plus il est difficile d'immobiliser l'objet. Comme le vecteur vitesse, la quantité de mouvement possède une direction et une grandeur : c'est également un vecteur. En français l'expression « quantité de mouvement » est plus adéquate que l'anglais « momentum ». Dans l'ancien temps, le mot « mouvement » était utilisé à la place de « quantité de mouvement », par exemple par Newton. La conservation de la quantité de mouvement, dans la relation (15), explicite par conséquent la conservation du mouvement pendant les interactions.

La quantité de mouvement et l'énergie sont des *quantités extensibles*. Cela signifie que nous pouvons dire pour chacune d'elles qu'elles s'écoulent d'un corps vers un autre, et

Page 81
Défi 127 e

Défi 128 s

l'énergie, en même temps. Elles nous permettraient de concevoir un *mouvement perpétuel* de seconde espèce, c'est-à-dire un dispositif qui contournerait le second principe de la thermodynamique. De plus, un tel système n'aurait pas d'équilibre thermodynamique, parce que son énergie peut diminuer indéfiniment. Plus nous réfléchissons aux masses négatives, plus nous sommes confrontés à des propriétés étranges qui contredisent les observations. D'ailleurs, quelle est la gamme des valeurs de masse possibles pour des tachyons ?

* Arthur Eddington (1882–1944), astrophysicien britannique.

qu'elles peuvent s'*accumuler* dans les corps, de la même façon que l'eau coule et peut s'accumuler dans des récipients. Imaginer la quantité de mouvement comme quelque chose qui peut être *échangé* entre des corps en collision reste intuitif lorsque nous réfléchissons à la description des objets en mouvement.

La quantité de mouvement est conservée. Cela explique les difficultés que vous pourriez éprouver si vous étiez sur une surface parfaitement lisse, telle que la glace ou le marbre poli couvert d'huile : vous ne pouvez pas avancer même en vous tapotant le dos. (Avez-vous déjà tenté de placer un chat sur une telle surface marbrée ? Il n'est même pas capable de se tenir sur ses quatre pattes. Pas plus que nous-mêmes. Pouvez-vous deviner pourquoi ?) La conservation de la quantité de mouvement permet aussi de résoudre les casse-tête de la **Figure 38**.

Défi 129 s La conservation de la masse et de la quantité de mouvement signifie aussi que la téléportation (« beam me up »*) est impossible dans la nature. Pouvez-vous expliquer cela à un néophyte ?

Défi 130 s La conservation de la quantité de mouvement implique que la quantité de mouvement peut être assimilée à un fluide invisible. Dans une interaction, ce fluide invisible est transmis d'un objet à l'autre. Cependant, la quantité totale reste constante.

La conservation de la quantité de mouvement suggère également que le mouvement ne cesse jamais : il est simplement *échangé*. D'un autre côté, le mouvement « disparaît » régulièrement dans notre entourage, comme dans le cas d'un caillou qu'on laisse tomber sur le sol, ou d'une balle que l'on abandonne sur l'herbe. Qui plus est, dans notre vie de tous les jours, nous observons fréquemment de la création de mouvement, comme à chaque fois que nous ouvrons la main. Comment ces exemples s'ajustent-ils à la conservation de la quantité de mouvement ?

Il apparaît que la réponse se trouve dans les aspects microscopiques de ces systèmes. Un muscle *transforme* simplement un certain type de mouvement, à savoir celui des électrons situés dans certains composés chimiques**, en un autre, le mouvement des doigts. Le travail exercé par les muscles est analogue à celui d'un moteur à explosion qui transforme le mouvement des électrons contenus dans le carburant dans le mouvement des roues. Tous les deux exigent un carburant et s'échauffent durant le processus.

Nous devons également analyser le comportement microscopique d'une balle qui roule sur l'herbe jusqu'à ce qu'elle s'immobilise. La disparition du mouvement est appelée *frottement*. En étudiant cette situation attentivement, nous comprenons que l'herbe et la balle se réchauffent un petit peu pendant le processus. Pendant le frottement, le mouvement visible est transformé en chaleur. Plus tard, lorsque nous découvrirons la structure de la matière, il deviendra clair que la chaleur se manifeste par le mouvement désordonné des constituants microscopiques de chaque matériau. Lorsque ces constituants se déplacent tous dans la même direction, généralement l'objet tout entier se déplace. Lorsqu'ils fluctuent de manière aléatoire, l'objet reste au repos mais se réchauffe. La chaleur est une forme de mouvement. Ainsi le frottement semble n'être que disparition du mouvement, en réalité il est une transformation d'un mouvement ordonné en mouvement désordonné.

* Expression empruntée à la célèbre série télévisée Star Trek : « Beam me up Scotty ! », qui signifie littéralement « Téléporte-moi Scotty ! » [N.D.T.].

Réf. 57 ** Généralement l'adénosine triphosphate (ATP), le carburant de la plupart des processus chez les animaux.

Malgré la conservation de la quantité de mouvement, le mouvement perpétuel *macroscopique* n'existe pas, puisque le frottement ne peut pas être complètement supprimé*. Le mouvement est éternel seulement à un ordre de grandeur microscopique. En d'autres termes, la disparition et également l'apparition spontanée du mouvement dans notre vie quotidienne sont une illusion due aux limitations de nos facultés sensorielles. Par exemple, le mouvement attribué à chaque être vivant existe avant sa naissance, et est toujours là après sa mort. La même chose se produit avec son énergie. Ce résultat est probablement le plus impénétrable que nous puissions avoir sur l'idée de l'éternité, à partir des preuves collectées par l'observation. Ce n'est peut-être pas une coïncidence si l'énergie fut dénommée *vis viva*, ou « force vive », par Leibniz et d'autres penseurs de son époque.

Puisque le mouvement est conservé, il n'a pas d'origine. Donc, à ce point de notre promenade, nous ne pouvons pas répondre aux questions fondamentales : Pourquoi le mouvement existe-t-il ? Quelle est son origine ? Le bout du tunnel est encore loin.

APPENDICE SUR LA CONSERVATION – L'ÉNERGIE

Lorsqu'on examine des collisions avec soin, une deuxième quantité conservée se dévoile. Les expériences montrent que, dans le cas des collisions parfaites ou élastiques – des collisions sans frottement –, la quantité suivante, appelée *énergie cinétique* T du système, est également conservée :

$$T = \sum_i \frac{1}{2} m_i \mathbf{v}_i^2 = \sum_i \frac{1}{2} m_i v_i^2 = \text{const} . \quad (17)$$

L'énergie cinétique d'un corps dépend donc de sa masse et du carré de sa vitesse v . L'énergie cinétique est le potentiel que possède un corps pour provoquer des changements dans les corps qu'il heurte. La désignation finale « énergie cinétique » fut introduite par Gustave-Gaspard Coriolis**. Coriolis introduisit également le facteur $1/2$, de

* Quelques exemples drôles des tentatives passées pour construire une *machine à mouvement perpétuel* sont narrés dans STANISLAV MICHEL, *Perpetuum mobile*, VDI Verlag, 1976. De façon intéressante, l'idée de mouvement éternel chemina de l'Inde jusqu'en Europe à travers le monde islamique, vers les années 1200, et devint populaire puisqu'elle s'opposait à l'opinion courante de cette époque que tout mouvement sur Terre disparaît avec le temps. Consultez également les sites Web http://www.geocities.com/mercutio78_99/pmm.html et <http://www.lhup.edu/~dsimanek/museum/unwork.htm>. L'erreur conceptuelle faite par les âmes excentriques et employée par les esprits tordus est toujours la même : l'espoir de pouvoir surpasser le frottement. (Certes, ceci n'est vrai que pour le mouvement perpétuel de seconde espèce, celui du premier type – qui est encore plus en contradiction avec l'observation – tente même de générer de l'énergie à partir de rien.)

Si la machine est bien conçue, c'est-à-dire avec peu de frottements, alors elle peut prélever le peu d'énergie dont elle a besoin pour la subsistance de son mouvement dans des effets environnementaux subtils. Par exemple, au Victoria and Albert Museum à Londres nous pouvons admirer une magnifique horloge actionnée par les variations de la pression de l'air au cours du temps.

Réf. 58

Un faible frottement signifie que le mouvement prend beaucoup de temps avant de s'arrêter. Nous pensons *illico presto* au mouvement des planètes. En réalité, il *existe* des frottements entre la Terre et le Soleil. (Pouvez-vous en déterminer un des mécanismes ?) Mais sa valeur est si faible que la Terre a déjà tourné autour du Soleil pendant des milliers de millions d'années et continuera d'en faire autant pendant plus longtemps encore.

Défi 131 s

** Gustave-Gaspard Coriolis (n. Paris 1792, d. Paris 1843), ingénieur et mathématicien français.



FIGURE 39 Robert Mayer.

Défi 132 s telle sorte que la relation $dT/dv = p$ soit toujours vérifiée. (Pourquoi ?) Le mot énergie est emprunté au grec ancien ; au départ il était utilisé pour décrire le caractère, la détermination et signifiait « vigueur intellectuelle ou morale ». Il fut introduit en physique par Thomas Young (1773–1829) en 1807 parce que sa traduction littérale est « la force intérieure ». (Les lettres E , W , A et plusieurs autres sont utilisées pour symboliser l'énergie.) Une autre définition équivalente de l'énergie apparaîtra plus loin : l'énergie est ce qui peut être transformé en chaleur.

L'énergie (physique) est la mesure de l'aptitude à produire du mouvement. Un corps possède beaucoup d'énergie s'il est capable de déplacer de nombreux autres corps. L'énergie est un nombre, elle n'a pas de direction. La quantité de mouvement totale de deux masses égales se déplaçant avec des vitesses opposées est nulle, leur énergie totale s'accroît avec leur vitesse. L'énergie mesure donc aussi le mouvement, mais d'une manière différente de la quantité de mouvement. L'énergie mesure le mouvement à un niveau plus fondamental. Voici une autre définition équivalente : l'énergie est la capacité à produire du travail. Ici, le concept physique de travail est précisément, mais de manière plus détaillée, ce que nous entendons par travail dans notre vie courante*.

Ne soyez pas surpris si vous ne saisissez pas immédiatement la différence entre la quantité de mouvement et l'énergie : les physiciens ont mis environ deux siècles pour la comprendre. Parfois ils ont même insisté pour conserver la même dénomination pour les deux, et souvent ne savaient pas vraiment quelle situation faisait appel à quel concept. Il vous est donc permis de prendre plusieurs minutes pour vous familiariser avec ces notions.

L'énergie et la quantité de mouvement quantifient toutes les deux comment un système change. La quantité de mouvement nous indique comment le système change dans l'espace, l'énergie mesure comment le système change dans le temps. La quantité de mouvement est nécessaire pour comparer des mouvements ici et là-bas. L'énergie est nécessaire pour comparer des mouvements maintenant et demain. Quelques valeurs mesurées d'énergie sont données dans le [Tableau 15](#).

Défi 133 e Une manière d'exprimer la différence entre l'énergie et la quantité de mouvement est de réfléchir aux problèmes suivants. Est-il plus difficile d'arrêter un homme de masse m qui court à la vitesse v , ou un homme de masse $m/2$ qui court à la vitesse $2v$, ou encore un de masse $m/2$ à la vitesse $\sqrt{2}v$? Vous pouvez demander de l'aide à un ami qui joue au rugby pour vous conforter dans votre réponse.

Une autre distinction est illustrée par l'athlétisme : le véritable record du monde de

* Le *travail* (physique) est le produit de la force par la distance parcourue dans la direction de cette force.

TABLEAU 15 Quelques valeurs mesurées d'énergie.

OBSERVATION	ÉNERGIE
Énergie cinétique moyenne d'une molécule d'oxygène de l'air	$6 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Énergie d'un photon de couleur verte	$5,6 \cdot 10^{-20} \text{ J}$
Énergie d'un photon de rayon X	10^{-15} J
Énergie d'un photon γ	10^{-12} J
L'énergie la plus élevée d'une particule dans les accélérateurs	10^{-7} J
Homme marchant tranquillement	20 J
Une flèche en plein vol	50 J
Crochet droit en boxe	50 J
Énergie d'une pile de torche électrique	1 kJ
Balle de pistolet en vol	10 kJ
Digestion d'une pomme	0,2 MJ
Véhicule sur une autoroute	1 MJ
L'énergie la plus élevée de l'impulsion d'un laser	1,8 MJ
Flash d'un éclair	jusqu'à 1 GJ
Énergie de Planck	2,0 GJ
Petite bombe nucléaire (20 ktonnes)	84 TJ
Tremblement de terre de magnitude 7	2 PJ
La plus grosse bombe nucléaire (50 Mtonnes)	210 PJ
Impact d'une météorite de 2 km de diamètre	1 EJ
Consommation annuelle d'énergie par les machines	420 EJ
Énergie de rotation de la Terre	$2 \cdot 10^{29} \text{ J}$
Explosion d'une supernova	10^{44} J
Sursaut de rayons gamma	jusqu'à 10^{47} J
Énergie contenue dans la masse du Soleil d'après $E = mc^2$	$1,8 \cdot 10^{47} \text{ J}$
Énergie contenue dans le trou noir central de notre Galaxie	$4 \cdot 10^{53} \text{ J}$

saut en longueur, presque 10 m, est toujours détenu par un athlète qui, au début du vingtième siècle, courut avec un poids dans chaque main et projeta les poids derrière lui au moment où il commença à sauter. Pouvez-vous expliquer cette prouesse ?

Défi 134 s

Quand un véhicule voyageant à 100 m/s fonce de front sur un véhicule immobile de même marque et de même modèle, quel véhicule encaisse les plus gros dégâts ? Qu'est-ce qui change si le véhicule à l'arrêt a ses freins serrés ?

Défi 135 s

Pour avoir une meilleure intuition de l'énergie, nous allons maintenant adopter une approche complémentaire. Pendant l'année 2000, la consommation mondiale d'énergie (provenant de diverses sources : solaire, géothermie, biomasse, éolien, nucléaire, hydraulique, gaz, pétrole, charbon, ou animale) par les machines conçues par l'homme fut d'environ 420 EJ*, pour une population mondiale d'environ 6 milliards d'individus. Pour voir ce que cette consommation d'énergie signifie, nous traduisons celle-ci en consommation individuelle de la puissance énergétique : nous obtenons à peu près 2,2 kW. Le

Réf. 59

Page 300

* Pour une explication de la notation E, consultez l'Annexe B.

watt W est l'unité de la puissance, et est simplement défini par la relation $1\text{ W} = 1\text{ J/s}$, reflétant la définition de la *puissance (physique)* comme étant l'énergie consommée par unité de temps. De même qu'un individu au travail peut produire un travail mécanique d'environ 100 W, la consommation énergétique moyenne par individu est équivalente à environ 22 hommes travaillant pendant 24 heures de suite. (Consultez le [Tableau 16](#) pour voir quelques valeurs de puissances relevées dans la nature.) En particulier, si nous regardons la consommation énergétique des premiers pays du monde, l'habitant moyen fait fonctionner, pour ses besoins, des machines correspondant à plusieurs centaines de « domestiques ». Pouvez-vous citer quelques-unes de ces machines ?

Défi 136 s

L'énergie cinétique n'est donc pas conservée dans la vie quotidienne. Par exemple, dans les collisions inélastiques, telles que celles de morceaux de chewing-gum s'écrasant contre un mur, l'énergie cinétique est perdue. Le *frottement* anéantit l'énergie cinétique. En même temps, le frottement engendre de la chaleur. Le fait que l'énergie *totale* soit conservée est une découverte conceptuelle fondamentale à partir du moment où elle tient compte de la révélation que la chaleur est une forme d'énergie. Le frottement est alors en réalité un processus transformant l'énergie cinétique, c'est-à-dire l'énergie associée au mouvement de l'objet, en chaleur. À l'échelle microscopique, l'énergie est conservée*. En fait, sans la conservation de l'énergie, la notion de temps ne pourrait être définie. Nous allons révéler cette correspondance sous peu.

LA VITESSE EST-ELLE ABSOLUE ? – LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ QUOTIDIENNE

Page 143

Pourquoi ne ressentons-nous pas tous les mouvements de la Terre ? Les deux volets de la réponse étaient déjà connus en 1632. En premier lieu, tel que l'a illustré Galilée, nous ne ressentons pas les accélérations de la Terre parce que les effets qu'elles produisent sont si dérisoires que nos facultés sensorielles ne peuvent les détecter. En réalité, un grand nombre des accélérations citées doit causer des effets mesurables dans les expériences de haute précision, comme dans les horloges atomiques.

Mais le deuxième point soulevé par Galilée est tout aussi important. Nous ne ressentons pas les mouvements non accélérés, translationnels, parce que c'est *en principe* impossible. Nous ne pouvons éprouver le fait que nous sommes en mouvement ! Galilée mit en scène ce sujet en comparant les remarques de deux observateurs : l'un d'entre eux est sur le plancher des vaches et l'autre est situé sur l'un des moyens de transport les plus modernes de l'époque, un navire. Galilée se demanda si un homme sur la terre et un homme dans un bateau se déplaçant à vitesse constante éprouvent (ou « ressentent ») quelque chose de différent. Einstein utilisait des observateurs dans des trains. Plus tard,

* En réalité, la conservation de l'énergie ne fut dévoilée collectivement qu'en 1842 dans toute sa généralité par Julius Robert Mayer. Il était médecin de formation, et la revue *Annalen der Physik* refusa de publier son article, car il était censé contenir des « erreurs fondamentales ». Ce que les éditeurs appelaient des erreurs étaient en fait pour la plupart – mais pas seulement – des contradictions avec leurs préjugés. Plus tard, Helmholtz, Kelvin, Joule et de nombreux autres reconnurent le génie de Mayer. Toutefois, le premier à avoir formulé la loi de la conservation de l'énergie dans sa forme actuelle fut le physicien français Sadi Carnot (1796–1832) en 1820. Pour lui ce fait était si évident qu'il ne sentit pas la nécessité de publier ce résultat. Il alla plus loin et découvrit le second « principe » de la thermodynamique. Aujourd'hui, la conservation de l'énergie, également appelée premier « principe » de la thermodynamique, est un des piliers fondamentaux de la physique, du fait qu'elle s'applique dans toutes ses branches.

TABLEAU 16 Quelques valeurs mesurées de puissance.

OBSERVATION	PUISSANCE
Puissance du moteur flagellaire dans une bactérie	0,1 pW
Rendement lumineux d'une ampoule à incandescence	de 1 à 5 W
Consommation électrique d'une ampoule à incandescence	de 25 à 100 W
Un homme, pendant 8 heures de travail	100 W
Un cheval, pendant de 8 heures d'effort	300 W
Eddy Merckx, le célèbre cycliste, pendant une heure	500 W
Unité officielle de puissance : le cheval-vapeur	735 W
Grosse motocyclette	100 kW
Rendement d'une station génératrice d'électricité	de 0,1 à 6 GW
Production mondiale de la puissance électrique en l'an 2000	450 GW
Puissance consommée par la géodynamo terrestre	de 200 à 500 GW
Entrée à la surface de la Terre : irradiation solaire de la Terre Réf. 60	0,17 EW
Entrée à la surface de la Terre : énergie thermique provenant de l'intérieur de la Terre	32 TW
Entrée à la surface de la Terre : puissance émise par les marées (c'est-à-dire par la rotation de la Terre)	3 TW
Entrée à la surface de la Terre : puissance générée par l'homme à partir des combustibles fossiles	de 8 à 11 TW
Perte à la surface de la Terre : puissance stockée par la photosynthèse des plantes	40 TW
Record mondial de puissance d'un laser	1 PW
Sortie de la surface de la Terre : réflexion des rayons solaires dans l'espace	0,06 EW
Sortie de la surface de la Terre : puissance rayonnée dans l'espace à 287 K	0,11 EW
Puissance émise par le Soleil	384,6 YW
Puissance maximale dans la nature, $c^5/4G$	$9,1 \cdot 10^{51}$ W

Défi 137 e

il devint conventionnel d'utiliser des voyageurs dans des fusées. (Qu'est-ce qui viendra au prochain coup ?) Galilée justifia que seules les vitesses *relatives* entre les objets produisent des effets, et non pas les valeurs absolues des vitesses. Pour nos sens, il n'y a aucune différence entre un mouvement constant, uniforme, aussi rapide qu'il soit, et le repos. C'est ce que nous appelons dorénavant le *principe galiléen de relativité*. Dans la vie quotidienne, nous ressentons le mouvement uniquement si le moyen de transport vibre (donc s'il accélère) ou si nous nous déplaçons contre le vent. Par conséquent, Galilée conclut que deux observateurs en mouvement uniforme en ligne droite l'un par rapport à l'autre ne peuvent dire qui se déplace « réellement ». Quelle que soit leur vitesse relative, aucun d'entre eux ne se « sent » en mouvement*.

* En 1632, dans ses *Dialogues*, Galilée écrit : « Enfermez-vous avec un de vos amis dans la cabine principale située sous le pont de quelque grand navire, et emmenez avec vous là-bas quelques mouches, papillons et

Le repos est relatif. Ou plus clairement : le repos est une notion dépendante d'un observateur. Ce résultat de la physique galiléenne est si primordial que Poincaré introduisit l'expression « théorie de la relativité » et Einstein réexprima ce principe explicitement lorsqu'il publia sa célèbre théorie de la relativité restreinte. Cependant, ces dénominations sont maladroites. La physique galiléenne est aussi une théorie de la relativité ! La relativité du repos est commune à toute la physique. C'est une brique essentielle de la théorie du mouvement.

Le mouvement régulier ou uniforme n'a aucun effet observable. Seule la variation du mouvement en a un. En conséquence, chaque physicien peut conclure facilement au sujet de la formulation suivante due à Wittgenstein :

Daß die Sonne morgen aufgehen wird, ist eine Hypothese; und das heißt : wir wissen nicht, ob sie aufgehen wird*.

Cette phrase est *fausse*. Pouvez-vous expliquer pourquoi Wittgenstein s'est fourvoyé ici, malgré son désir ardent de vérité ?

Défi 138 s

d'autres petits animaux volants. Prenez une vaste cuvette d'eau contenant quelques poissons, suspendez une bouteille qui se vide goutte à goutte dans un large récipient placé en dessous. Lorsque le navire est immobilisé, observez attentivement comment les petits animaux volent avec des vitesses égales vers tous les côtés de la cabine. Le poisson nage indifféremment dans toutes les directions, les gouttes tombent dans le récipient en dessous, et, si vous lancez quelque chose à votre ami, vous devez le lancer plus fortement dans une direction que dans une autre, les distances étant égales : si vous sautez à pieds joints, vous traverserez des espaces égaux dans chaque direction. Après que vous aurez observé soigneusement toutes ces choses (bien qu'il ne fasse aucun doute que, lorsque le navire est au repos, tout doit se produire de cette manière), laissez le navire avancer à la vitesse que vous désirez ; aussi longtemps que le mouvement est uniforme et ne fluctue pas, vous ne découvrirez pas la moindre variation dans tous les effets identifiés, pas plus que vous ne pourrez dire à partir de n'importe lequel d'entre eux si le navire est en mouvement ou à l'arrêt. En sautant, vous enjamberez les mêmes espaces au sol qu'auparavant, sans que vous ne fassiez de sauts plus grands en direction de la poupe qu'en direction de la proue et alors même que le navire avance assez rapidement, en dépit du fait que, pendant le temps que vous êtes en l'air, le plancher en dessous de vous avancera dans la direction opposée à celle de votre saut. En lançant quelque chose à votre compagnon, vous n'aurez besoin d'aucune force supplémentaire pour l'atteindre, qu'il soit dans la direction de la tête du navire ou de la poupe, et que vous-même soyez en vis-à-vis. Les gouttelettes tomberont comme avant dans le récipient en dessous sans chuter en direction de la poupe, bien que le navire parcoure quelques intervalles de distance pendant que la goutte est en l'air. Les poissons dans leur eau ne nageront pas vers l'avant de leur cuvette avec plus d'effort que vers l'arrière, et iront avec la même facilité vers un appât disposé n'importe où sur les rebords de la cuvette. Finalement les papillons et les mouches continueront de voler indifféremment en direction de chaque côté, sans qu'il apparaisse jamais qu'ils soient concentrés en direction de la poupe, comme s'ils étaient épuisés de tenir le rythme avec la course du navire, dont ils auront été séparés durant de grands intervalles de temps en se tenant eux-mêmes dans les airs. Et si de la fumée est faite en brûlant quelque encens, elle sera vue sous la forme d'un petit nuage montant, restant immobile et ne se déplaçant pas plus vers un côté qu'un autre. Le motif de toutes ces correspondances d'effets est le fait que le mouvement du navire est pareil à toutes les choses qui sont contenues en lui, et à l'air également. C'est pourquoi je dis que vous devriez être sous le pont du navire, en cela que si ceci avait lieu au-dessus en plein air, lequel ne suivrait pas la course du navire, des différences plus ou moins perceptibles seraient aperçues dans quelques-uns des effets mentionnés. »

* « C'est une hypothèse que le soleil se lèvera demain, et cela signifie que nous ne savons pas s'il se lèvera. » Cette phrase connue est tirée de Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.36311.

TABLEAU 17 Quelques fréquences angulaires mesurées.

OBSERVATION	VITESSE ANGULAIRE $\omega = 2\pi/T$
Rotation de la Galaxie	$2\pi \cdot 0,14 \cdot 10^{-15} / \text{s} = 2\pi / 220 \cdot 10^6 \text{ a}$
Rotation moyenne du Soleil autour de son axe	$2\pi \cdot 3,8 \cdot 10^{-7} / \text{s} = 2\pi / 30 \text{ d}$
Phare typique	$2\pi \cdot 0,08 / \text{s}$
Danseur de ballet faisant une pirouette	$2\pi \cdot 3 / \text{s}$
Moteur diesel de navire	$2\pi \cdot 5 / \text{s}$
Rotor d'un hélicoptère	$2\pi \cdot 5,3 / \text{s}$
Machine à laver	jusqu'à $2\pi \cdot 20 / \text{s}$
Flagelle bactérien	$2\pi \cdot 100 / \text{s}$
Moteur de voiture de course	jusqu'à $2\pi \cdot 600 / \text{s}$
Le moteur à turbine le plus rapide jamais construit	$2\pi \cdot 10^3 / \text{s}$
Les pulsars les plus rapides (étoiles en rotation)	jusqu'à au moins $2\pi \cdot 716 / \text{s}$
Ultracentrifugeuse	$> 2\pi \cdot 2 \cdot 10^3 / \text{s}$
Roulette dentaire	jusqu'à $2\pi \cdot 13 \cdot 10^3 / \text{s}$
Rotation du proton	$2\pi \cdot 10^{20} / \text{s}$
Fréquence angulaire de Planck, la plus grande fréquence possible	$2\pi \cdot 10^{35} / \text{s}$

LA ROTATION

Le mouvement circulaire nous maintient en vie. Sans l'alternance du jour et de la nuit, nous serions morts de chaleur ou de froid, selon notre position sur le globe terrestre. Un court résumé sur la rotation est donc nécessaire. Nous avons vu auparavant qu'un corps est décrit par sa réticence à se mouvoir ; de manière similaire, un corps possède une réticence à tourner. Cette quantité est appelée son *moment d'inertie* et est communément notée Θ . La vitesse ou la fréquence de la rotation est signalée par la *vitesse angulaire*, usuellement notée ω . Quelques valeurs trouvées dans la nature sont données dans le [Tableau 17](#).

Les quantités observables qui décrivent la rotation sont semblables à celles qui décrivent le mouvement de translation, comme indiqué dans le [Tableau 18](#). Comme la masse, le moment d'inertie est défini de telle façon que la somme des *moments cinétiques* L – le produit du moment d'inertie par la vitesse angulaire – est conservée dans tout système qui n'interagit pas avec le monde extérieur :

$$\sum_i \Theta_i \omega_i = \sum_i L_i = \text{const.} \quad (18)$$

De la même façon que la conservation de la quantité de mouvement (ou « moment linéaire » [N.D.T.]) définit la masse, la conservation du moment cinétique (ou « moment angulaire » [N.D.T.]) définit le moment d'inertie.

Le moment d'inertie peut être lié à la masse et à la forme d'un corps. Si le corps est considéré comme étant constitué d'éléments de masse ou de volume très petits, l'expres-

TABLEAU 18 Correspondances entre mouvement de translation et de rotation.

Q U A N T I T É	T R A N S L A T I O N		R O T A T I O N	
État	temps	t	temps	t
	position	x	angle	φ
	quantité de mouvement	$p = mv$	moment cinétique	$L = \Theta \omega$
	énergie	$mv^2/2$	énergie	$\Theta \omega^2/2$
Mouvement	vitesse	v	vitesse angulaire	ω
	accélération	a	accélération angulaire	α
Réticence au mouvement	masse	m	moment d'inertie	Θ
Variation du mouvement	force	ma	couple	$\Theta \alpha$

sion qui en résulte est

$$\Theta = \sum_n m_n r_n^2, \quad (19)$$

Défi 139 e
Défi 140 s

où r_n est la distance de l'élément de masse m_n à l'axe de rotation. Pouvez-vous confirmer cette expression ? Par conséquent, le moment d'inertie d'un corps dépend de l'axe de rotation choisi. Pouvez-vous vérifier qu'il en est ainsi pour le cube ?

Défi 142 s

Certes, la grandeur du moment d'inertie dépend également de la disposition de l'axe utilisé pour sa définition. Pour chaque direction d'axe différente, nous pouvons distinguer un moment d'inertie *intrinsèque*, lorsque l'axe traverse le centre de masse du corps, d'un moment d'inertie *extrinsèque*, lorsque ce n'est pas le cas*. De la même manière, nous distinguons les moments cinétiques intrinsèque et extrinsèque. (Par ailleurs, le *centre de masse* d'un corps est ce point imaginaire qui se déplace en ligne droite lors d'une chute verticale, même si le corps est en rotation. Pouvez-vous trouver une manière de déterminer sa position pour un corps en particulier ?)

Défi 143 s

Tout objet qui possède une orientation possède également un moment cinétique intrinsèque. (Qu'en est-il de la sphère ?) Toutefois, les particules ponctuelles n'ont pas de moment cinétique intrinsèque – du moins en première approximation. (Cette conclusion sera modifiée en théorie quantique.) Le moment cinétique *extrinsèque* L d'une particule ponctuelle est donné par

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = \frac{2A(T)m}{T} \quad \text{ainsi} \quad L = r p = \frac{2A(T)m}{T} \quad (21)$$

où $\mathbf{p}$ représente la quantité de mouvement de la particule, $A(T)$ est la surface balayée par

* Les moments d'inertie intrinsèque et extrinsèque sont liés par la formule

$$\Theta_{\text{ext}} = \Theta_{\text{int}} + m d^2, \quad (20)$$

Défi 141 s

où d représente la distance entre le centre de masse et l'axe de rotation extrinsèque. Cette relation est appelée *théorème des axes parallèles de Steiner*. Êtes-vous apte à la démontrer ?

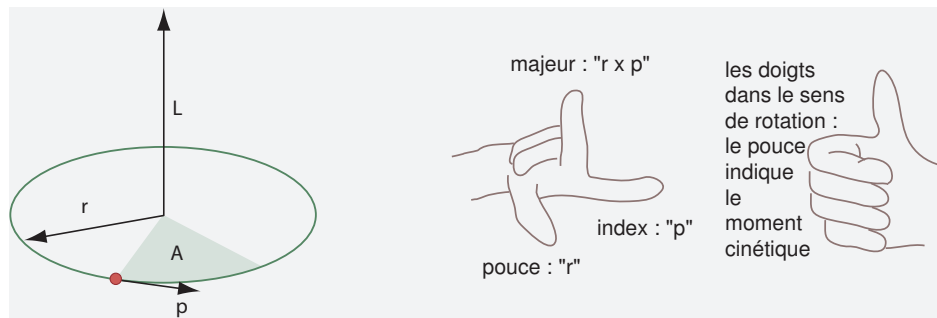


FIGURE 40 Moment cinétique et les deux versions de la règle de la main droite.

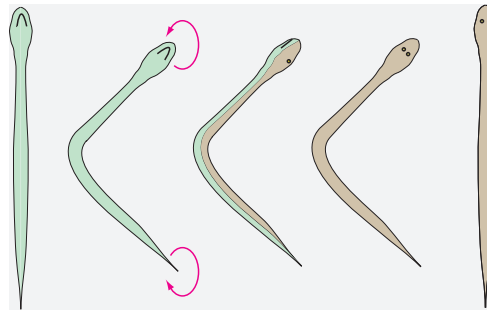


FIGURE 41 Comment un serpent se retourne autour de son axe.

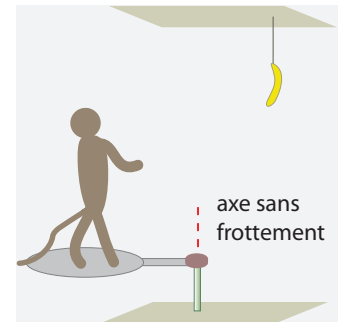


FIGURE 42 Le singe peut-il atteindre la banane ?

le vecteur position $\mathbf{r}$ de la particule pendant le temps T^* . Le moment cinétique indique donc la direction de l'axe de rotation, en suivant la règle de la main droite, tel que montré sur la Figure 40.

Nous définissons alors une *énergie de rotation* associée comme

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \Theta \omega^2 = \frac{L^2}{2\Theta} . \quad (23)$$

* Pour les curieux, le résultat du *produit vectoriel* $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$ entre deux vecteurs $\mathbf{a}$ et $\mathbf{b}$ est défini comme étant un vecteur perpendiculaire à la fois aux deux vecteurs, dont l'orientation est donnée par la *règle de la main droite*, et dont la longueur est donnée par $ab \sin \angle(\mathbf{a}, \mathbf{b})$, c'est-à-dire par l'aire du parallélogramme délimité par les deux vecteurs. À partir de cette définition, vous pouvez montrer que le produit vectoriel possède les propriétés suivantes :

Défi 144 e

$$\begin{aligned} \mathbf{a} \times \mathbf{b} &= -\mathbf{b} \times \mathbf{a} , \quad \mathbf{a} \times (\mathbf{b} + \mathbf{c}) = \mathbf{a} \times \mathbf{b} + \mathbf{a} \times \mathbf{c} , \quad \lambda \mathbf{a} \times \mathbf{b} = \lambda(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) = \mathbf{a} \times \lambda \mathbf{b} , \\ \mathbf{a} \times \mathbf{a} &= \mathbf{0} , \quad \mathbf{a}(\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = \mathbf{b}(\mathbf{c} \times \mathbf{a}) = \mathbf{c}(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) , \quad \mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = \mathbf{b}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{c}) - \mathbf{c}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) , \\ (\mathbf{a} \times \mathbf{b})(\mathbf{c} \times \mathbf{d}) &= \mathbf{a}(\mathbf{b} \times (\mathbf{c} \times \mathbf{d})) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})(\mathbf{b} \cdot \mathbf{d}) - (\mathbf{b} \cdot \mathbf{c})(\mathbf{a} \cdot \mathbf{d}) , \\ (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \times (\mathbf{c} \times \mathbf{d}) &= \mathbf{c}((\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \cdot \mathbf{d}) - \mathbf{d}((\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \cdot \mathbf{c}) , \\ \mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) + \mathbf{b} \times (\mathbf{c} \times \mathbf{a}) + \mathbf{c} \times (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) &= \mathbf{0} . \end{aligned} \quad (22)$$

Le produit vectoriel n'existe (pratiquement) que dans les espaces vectoriels à trois dimensions. (Voir l'[Annexe ??](#).) Le produit vectoriel s'annule si et seulement si les vecteurs sont parallèles entre eux. Le parallélépipède délimité par les trois vecteurs $\mathbf{a}$, $\mathbf{b}$ et $\mathbf{c}$ possède un volume $V = \mathbf{c}(\mathbf{a} \times \mathbf{b})$. La pyramide ou le tétraèdre formé à partir des trois vecteurs possède un sixième de ce volume.

Page ??
Défi 145 e

Cette expression est similaire à l'expression de l'énergie cinétique d'une particule. Pouvez-vous estimer la réponse à la question suivante : de combien de fois la grandeur de l'énergie cinétique de rotation de la Terre est-elle plus importante que la consommation annuelle d'électricité par l'humanité ? Si vous pouviez mettre la main sur un procédé qui permettrait de contrôler cette énergie, vous deviendriez illustre.

Défi 146 s

Comme dans la situation du mouvement de translation, l'énergie cinétique de rotation et le moment cinétique ne sont pas systématiquement conservés dans le monde macroscopique : l'énergie cinétique de rotation peut varier à cause des frottements, et le moment cinétique peut être modifié par des forces externes (les couples). Malgré tout, ces deux quantités sont toujours conservées à l'échelle microscopique pour des systèmes isolés.

Sur une surface parfaitement lisse, que l'on peut imiter avec de la glace polie ou avec une dalle de marbre badigeonnée d'une couche d'huile, il est impossible de se déplacer en avant. Pour réussir à bouger, nous avons besoin de nous appuyer *contre* quelque chose. Cela est-il également le cas pour la rotation ?

Bizarrement, il est possible de tourner même *sans* s'appuyer contre quelque chose. Vous pouvez l'expérimenter sur un fauteuil tournant de bureau bien lubrifié : simplement en tournant un bras au-dessus de la tête. Après chaque tour de bras, l'orientation de la chaise est rectifiée d'une petite quantité. Certes, la conservation du moment cinétique et de l'énergie cinétique de rotation n'empêche pas les corps de changer d'orientation. Les chats l'apprennent dans leur jeunesse. Une fois qu'ils se sont imprégnés de cette astuce, s'ils sont lâchés les pattes vers le haut, ils peuvent se retourner sur eux-mêmes de telle façon qu'ils atterrissent invariablement sur leurs pattes. Les serpents savent aussi comment se retourner sur eux-mêmes, comme le montre la [Figure 41](#). Au cours des jeux Olympiques nous pouvons observer les véliplanchistes et les gymnastes exécuter des figures similaires. Sur ce point, la rotation est ainsi différente de la translation. (Pourquoi ?)

Réf. 61

Défi 147 d

Le moment cinétique est conservé. Cette allégation est valide pour tout axe, pourvu que le frottement ne joue aucun rôle, ou que des forces externes (couples) n'exercent aucune action. Pour entériner ce point, Jean-Marc Lévy-Leblond souleva le problème de la [Figure 42](#). Le singe peut-il atteindre la banane sans quitter son plateau, en supposant que le plateau sur lequel le singe se trouve puisse tourner autour de l'axe sans aucun frottement ?

Réf. 3

Défi 148 s

DES ROUES EN ROTATION

La rotation est un phénomène intéressant à bien des égards. Une roue qui roule *ne* tourne *pas* autour de son axe, mais autour de son point de contact. Regardons cela de plus près.

Une roue de rayon R est en *rotation* si la vitesse de l'axe v_{axe} est reliée à la vitesse angulaire ω par

$$\omega = \frac{v_{\text{axe}}}{R} . \quad (24)$$

Pour tout point P situé sur la roue, à la distance r de l'axe, la vitesse v_P est la somme du mouvement de l'axe et du mouvement autour de l'axe. La [Figure 43](#) montre que v_P est perpendiculaire à d , la distance entre le point P et le point de contact de la roue. La figure

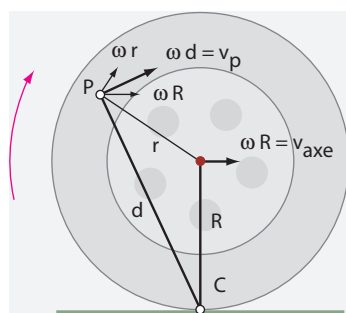


FIGURE 43 Les vitesses et les vecteurs unitaires pour une roue en rotation.

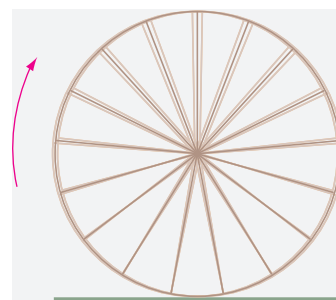


FIGURE 44 Une simulation d'une roue à rayons en rotation.

Défi 149 e montre également que le rapport des longueurs entre v_p et d est le même qu'entre v_{axe} et R . Par conséquent, nous pouvons écrire :

$$\mathbf{v}_p = \omega \times \mathbf{d}, \quad (25)$$

qui indique qu'une roue en rotation tourne en réalité autour de son point de contact avec le sol.

Curieusement, lorsqu'une roue roule, certains points situés dessus se déplacent en direction de l'axe de la roue, quelques autres demeurent à distance fixe par rapport à cet axe et d'autres encore s'écartent de celui-ci. Pouvez-vous localiser ces différents points ? En même temps, ils nous amènent à découvrir des motifs captivants lorsqu'une roue à rayons en rotation, telle qu'une roue de vélo, est photographiée.

À l'aide de ces résultats, vous pouvez entreprendre d'élucider le défi passionnant qui suit. Lorsqu'une roue de bicyclette prend un virage sur une surface glissante, elle va déraeper pendant un certain temps puis va continuer à rouler. De quelle façon la vitesse finale dépend-elle de la vitesse initiale et du frottement ?

COMMENT MARCHONS-NOUS ?

“ Le golf est une agréable promenade gâchée par une petite balle blanche. ”

Mark Twain

Pourquoi déplaçons-nous nos bras lorsque nous marchons ou courons ? Pour conserver l'énergie. En réalité, quand un mouvement du corps est exécuté avec le moins d'énergie possible, il est naturel et gracieux. (Cela peut en fait être considéré comme étant la véritable définition de la grâce. Cette relation est un fait notoire dans le monde de la danse. C'est également un aspect élémentaire des méthodes utilisées par les acteurs pour apprendre à déplacer leur corps aussi gracieusement que possible.)

Pour vous convaincre vous-même de l'économie d'énergie en jeu, tentez de marcher ou courir avec vos bras figés ou en mouvement dans la direction opposée à la direction habituelle : l'effort requis est considérablement plus important. Quand une jambe se déplace, elle produit un couple autour de l'axe du corps qui demande à être contrebalancé.

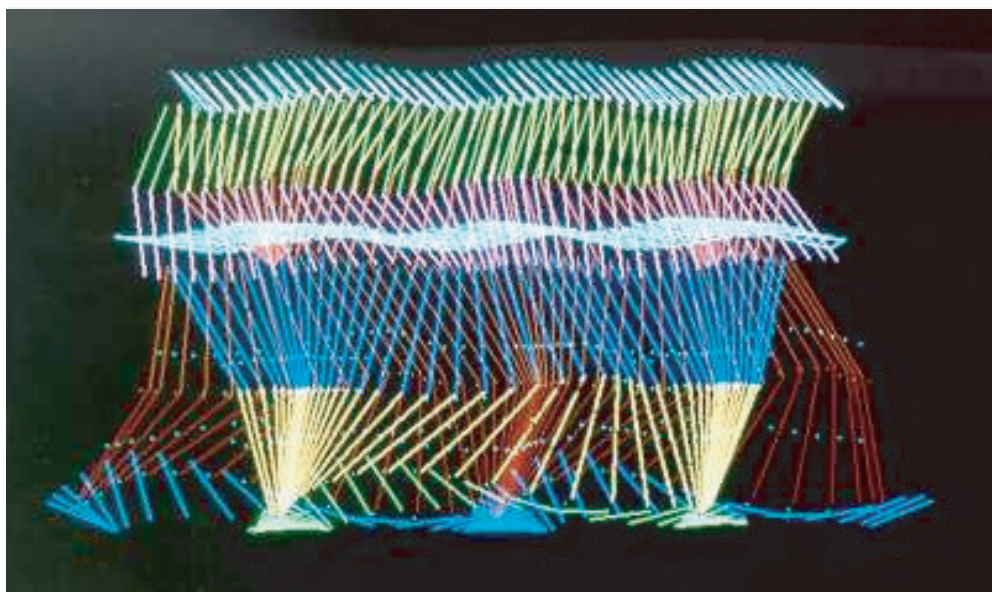


FIGURE 45 La décomposition du mouvement d'un homme qui marche. (© Ray McCoy)

La stratégie qui utilise le moins d'énergie est de balancer les bras. Puisque les bras sont plus légers que les jambes, ils doivent se déplacer plus loin par rapport à l'axe du corps pour compenser la quantité de mouvement. L'évolution a ainsi déplacé le point d'attache des bras, les épaules, beaucoup plus loin que celui des jambes, les hanches. Les animaux qui ont deux jambes mais pas de bras, comme les pingouins ou les pigeons, marchent beaucoup plus laborieusement, ils sont contraints de déplacer leur tronc corporel entier à chaque pas.

Réf. 64

Quels muscles effectuent le plus d'effort lors de la marche, ce mouvement que les spécialistes nomment la *démarche*? En 1980, Serge Gracovetsky a découvert que, dans la démarche humaine, l'essentiel de la force est fourni par les muscles situés le long de l'*épine dorsale*, et non par ceux des jambes. (En fait, les individus dépourvus de jambes sont toujours capables de marcher.) Lorsque vous effectuez un pas, les muscles lombaires redressent l'épine dorsale, ce qui l'oblige mécaniquement à tourner un peu d'un côté, de sorte que le genou de la jambe de ce côté vienne automatiquement en avant. Quand le pied se déplace, les muscles lombaires peuvent se relâcher et à nouveau se redresser au pas suivant. En fait, nous pouvons ressentir l'augmentation de la tension des muscles *dorsaux* lors de la marche sans nécessairement déplacer les bras, confirmant ainsi où se trouve le moteur corporel.

Défi 152 e

Les jambes humaines diffèrent de celles des singes sur un plan fondamental : les humains sont capables de courir. Il se trouve que le corps humain tout entier a été taillé pour la course, une aptitude qu'aucun autre primate ne possède. Le corps humain s'est dépouillé de sa toison pour obtenir un meilleur refroidissement, a développé la capacité de courir tout en gardant la tête en position stable, a développé la longueur adéquate des bras pour un équilibre approprié lors de la course, et possède même un ligament particulier dans le dos qui fonctionne comme un amortisseur pendant celle-ci. Autrement dit, de toutes les formes de mouvement, c'est la course qui est la plus humaine.

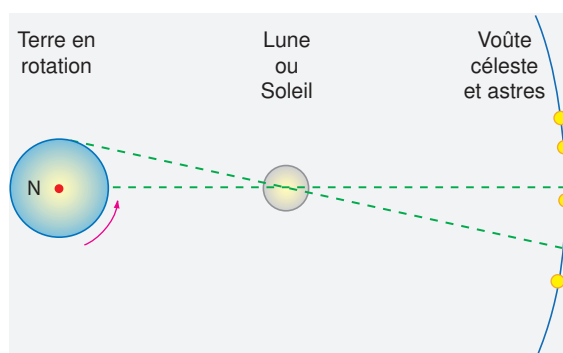
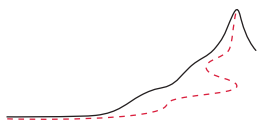


FIGURE 46 La parallaxe – non dessinée à l'échelle.





CHAPITRE 5

DE LA ROTATION DE LA TERRE À LA RELATIVITÉ DU MOUVEMENT

« Eppur si muove ! »

Anonyme*

Réf. 65

La quête des réponses à cette question donne un magnifique panorama de l'histoire de la physique classique. Aux environs de l'an 265 av. J.-C., le penseur grec Aristarque de Samos s'évertuait à soutenir que la Terre tourne. Il avait mesuré la parallaxe de la Lune (aujourd'hui estimée à près de $0,95^\circ$) et celle du Soleil (aujourd'hui connue comme étant de $8,8'$)**. La *parallaxe* est une notion captivante, c'est l'angle qui décrit la différence entre les positions d'un corps sur la voûte céleste lorsqu'il est vu par un observateur situé sur la surface de la Terre et lorsqu'il est vu par un observateur hypothétique situé au centre de la Terre (voir la Figure 46). Aristarque avait remarqué que la Lune et le Soleil *oscillent* dans le firmament, et que cette oscillation a une période de 24 heures. Il en conclut alors que la Terre tourne.

Page 17

La mesure de l'aberration de la lumière, qui peut être détectée avec un télescope lorsque nous admirons les étoiles, démontre également la rotation de la Terre. L'*aberration* est une anomalie dans la direction d'arrivée de la lumière, elle sera bientôt expliquée. À l'équateur, la rotation de la Terre ajoute une déviation angulaire de $0,32'$, changeant de signe toutes les 12 heures, à l'aberration due au mouvement de la Terre autour du Soleil, d'environ $20,5'$. À notre époque moderne, les astronomes ont accumulé un grand nombre de pièces à conviction supplémentaires, mais aucune d'entre elles n'est accessible à l'homme de la rue.

Par ailleurs, les mesures indiquant que la Terre n'est pas une sphère parfaite, mais qu'elle est *aplatie* aux pôles, confirment la rotation de la Terre. De nouveau, toutefois, cette mesure du dix-huitième siècle réalisée par Maupertuis*** n'est pas accessible à notre observation quotidienne.

C'est alors que, dans les années 1790 à 1792 à Bologne, Giovanni Battista Guglielmini (1763–1817) parvint finalement avec succès à mesurer ce que Galilée et Newton avaient postulé être la preuve la plus simple de la rotation de la Terre. Sur la Terre, les objets

* « Et pourtant elle tourne ! » est la phrase faussement attribuée à Galilée à propos de la Terre. Il est vrai, cependant, que lors de son procès il fut contraint de rétracter publiquement son idée d'une Terre en mouvement pour garder la vie (voir la note du bas de la page 229).

** Pour la définition des angles voir la page 52, et pour la définition des unités angulaires voir l'Annexe B.

*** Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698–1759), physicien et mathématicien français. Il fut un des personnalités clés dans la quête du principe de moindre action, qu'il nomma de cette manière. Il fut également nommé président de l'Académie des sciences de Berlin.

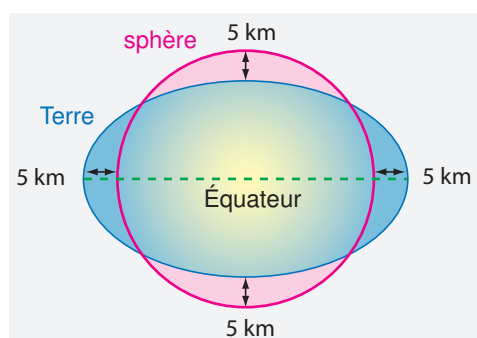


FIGURE 47 Déviation à la forme sphérique de la Terre due à sa rotation.

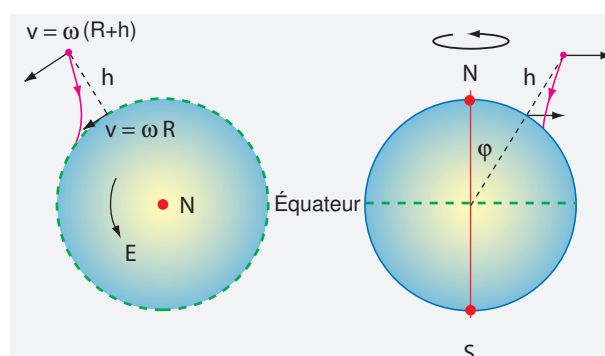


FIGURE 48 Les déviations de la chute libre en direction de l'est et en direction de l'équateur dues à la rotation de la Terre.

ne chutent pas verticalement, mais sont légèrement déviés vers l'est. Cette déviation survient parce qu'un objet conserve sa vitesse horizontale, celle qu'il a au point culminant à partir duquel il commence à tomber, comme indiqué sur la Figure 48. La découverte de Guglielmini fut la première pièce à conviction non astronomique de la rotation de la Terre. Les expériences furent renouvelées en 1802 par Johann Friedrich Benzenberg (1777–1846). En utilisant des boules métalliques qu'il lâcha de la tour de l'église Saint-Michel à Hambourg – d'une hauteur de 76 m – Benzenberg trouva que la déviation vers l'est était de 9,6 mm. Pouvez-vous confirmer que la valeur mesurée par Benzenberg concorde à peu près avec l'hypothèse que la Terre fait un tour sur elle-même toutes les 24 heures ? (Il y a également une déviation plus petite en direction de l'équateur, qui ne fut pas mesurée par Guglielmini, Benzenberg ou quiconque après eux jusqu'à ce jour, cependant cela complète la liste des effets de la rotation de la Terre sur la chute libre.) Ces deux déviations sont aisément compréhensibles si nous nous rappelons que les objets qui chutent décrivent une ellipse autour du centre de la Terre en rotation. Cette forme elliptique indique que la trajectoire d'une pierre lancée en l'air ne se situe pas dans un plan pour un observateur debout sur la Terre. Pour un tel observateur, la trajectoire exacte ne peut donc être dessinée sur une feuille de papier.

En 1835, l'ingénieur et mathématicien Gustave-Gaspard Coriolis (1792–1843), le citoyen français qui a également introduit les concepts modernes de « travail » et d'« énergie cinétique », mit le doigt sur un effet étroitement lié que personne n'avait jusqu'alors remarqué dans la vie courante. Un objet qui voyage dans un espace en rotation ne se

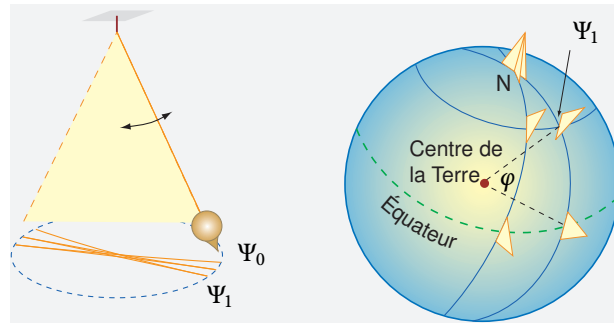


FIGURE 49 Le mouvement circulaire d'un pendule dévoilant la rotation de la Terre.

déplace par le long d'une ligne droite. Si la rotation est antihoraire, comme pour l'hémisphère Nord de la Terre, la vitesse d'un objet est légèrement détournée vers la droite, bien que sa grandeur reste constante. Cette notion ainsi nommée *accélération de Coriolis* (ou force de Coriolis) est provoquée par la variation de la distance à l'axe de rotation. Pouvez-vous en déduire son expression analytique, à savoir $\mathbf{a}_C = 2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}$?

Défi 154 s

L'accélération de Coriolis explique la tendance qu'ont de nombreux phénomènes à grande échelle à adopter une forme en spirale, tels le sens des cyclones et anticyclones en météorologie, le modèle global des vents sur la Terre et la variation des courants océaniques et des marées. Plus admirablement, l'accélération de Coriolis explique pourquoi les icebergs ne suivent pas la direction du vent lorsqu'ils dérivent en s'éloignant des calottes polaires. L'accélération de Coriolis joue aussi un rôle dans la trajectoire des boulets de canon (ce qui était la motivation initiale de Coriolis), dans les lancements de satellites, dans le déplacement des taches solaires et même dans le mouvement des électrons dans les molécules. Tous ces phénomènes sont de signes opposés dans les hémisphères Nord et Sud et, par conséquent, prouvent la rotation de la Terre. (Durant la Première Guerre mondiale, plusieurs artilleurs de la force navale américaine ratèrent leurs cibles dans l'hémisphère Sud parce que les ingénieurs avaient calibré les canons en tenant compte de l'effet de Coriolis valable pour l'hémisphère Nord.)

Réf. 66

Réf. 67

Ce n'est qu'en 1962, après plusieurs tentatives antérieures de la part d'autres chercheurs, qu'Asher Shapiro put vérifier le premier que l'effet de Coriolis avait une influence imperceptible sur la direction du tourbillon formé par l'écoulement de l'eau dans une baignoire. À la place d'une baignoire ordinaire, il eut besoin d'utiliser une installation expérimentale soigneusement conçue parce que, contrairement à une affirmation courante, cet effet ne peut être perçu dans une vraie baignoire. Il y parvint seulement en éliminant prudemment toutes les perturbations sur le système. Par exemple, il attendit 24 heures après le remplissage de la cuve (et en vérité ne céda jamais sa place à quelqu'un d'autre durant tout ce temps !) afin d'éviter tout mouvement résiduel de l'eau qui aurait pu perturber l'effet, et construisit un mécanisme d'ouverture, établi consciencieusement, entièrement symétrique par rotation. D'autres ont renouvelé l'expérience dans l'hémisphère Sud, confirmant le résultat. En d'autres termes, la tendance qu'ont les tourbillons des baignoires ordinaires à tourner n'est *pas* causé par la rotation de la Terre, mais résulte de la manière dont l'eau commence à s'écouler. Mais continuons avec l'histoire de la rotation de la Terre.

Réf. 68

Réf. 68

Finalement, en 1851, le médecin français reconverti à la physique Jean Bernard Léon

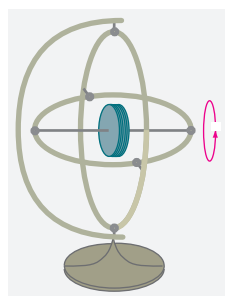


FIGURE 50 Le gyroscope.

Foucault (n. Paris 1819, d. Paris 1868) réalisa une expérience qui ôta tout scepticisme à cet égard et le rendit mondialement célèbre en l'espace de pratiquement une seule nuit. Il suspendit un pendule long de 67 m* au Panthéon à Paris et montra au public stupéfait que la direction de ses oscillations variait au cours du temps, en tournant lentement. Pour quiconque ayant quelques minutes de patience pour observer le changement de direction, l'expérience prouvait que la Terre tourne. Si la Terre ne tournait pas, le balancement du pendule se serait toujours effectué dans la même direction. Sur une Terre qui tourne, la direction varie vers la gauche, tel qu'indiqué sur la Figure 49, à moins que le pendule ne soit situé à l'équateur**. Le temps pendant lequel l'orientation du balancement fait un tour complet – le temps de précession – peut être calculé. Étudiez un pendule oscillant dans la direction nord-sud et vous trouverez que le temps de précession T_{Foucault} est donné par

Défi 156 d

$$T_{\text{Foucault}} = \frac{24 \text{ h}}{\sin \varphi} \quad (26)$$

où φ est la latitude de la position du pendule, c'est-à-dire 0° à l'équateur et 90° au pôle Nord. Cette formule est un des résultats les plus admirables de la cinématique galiléenne***.

Foucault fut également l'inventeur du *gyroscope* et celui qui le baptisa ainsi. Il construisit l'appareil, présenté sur la Figure 50, en 1852, un an après son pendule. Avec celui-ci, il démontra une nouvelle fois la rotation de la Terre. Puisqu'un gyroscope tourne, son axe demeure fixe dans l'espace – mais seulement lorsqu'il est observé depuis des étoiles ou des galaxies lointaines. (Ce n'est pas la même chose que de parler d'espace absolu. Pourquoi ?) Pour un observateur situé sur Terre, la direction de l'axe varie régulièrement avec une période de 24 heures. Les gyroscopes sont maintenant utilisés de manière routinière sur les bateaux et dans les avions pour donner la direction du nord, parce qu'ils sont

Défi 157 s

Défi 155 d
Réf. 69

* Pourquoi un pendule si long est-il nécessaire ? En comprendre les raisons nous permet de refaire l'expérience chez nous, en utilisant un pendule court de 70 cm, avec des manipulations astucieuses.

** La découverte montre également comment la précision et le génie sont pieds et poings liés. En fait, la première personne à observer cet effet fut Vincenzo Viviani, un élève de Galilée, dès 1661 ! Foucault a sûrement lu le travail de Viviani dans les publications de l'Accademia dei Lincei (l'Académie des Lynx, la plus ancienne académie purement scientifique d'Europe, fondée à Rome en 1603 [N.D.T.]). Mais il fallut le génie de Foucault pour associer cet effet à la rotation de la Terre, personne ne le fit avant lui.

*** Le calcul de la période du pendule de Foucault présuppose que le rythme de précession est constant durant une rotation. Ce n'est qu'une approximation (bien que généralement excellente).

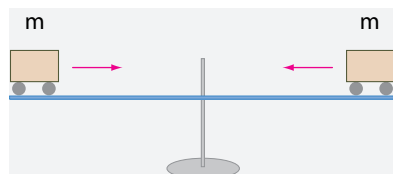


FIGURE 51 Montrer la rotation de la Terre par le truchement de la rotation d'un axe.

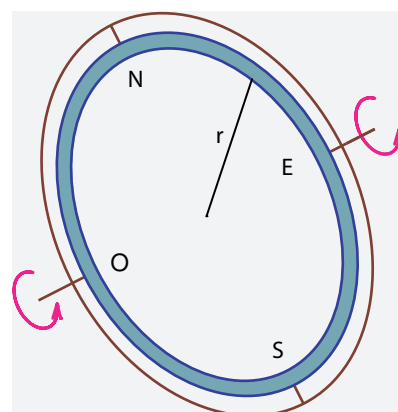


FIGURE 52 Démontrer la rotation de la Terre avec de l'eau.

beaucoup plus précis et fiables que les boussoles magnétiques. Dans les modèles les plus récents, nous utilisons la course circulaire de rayons laser au lieu de masses en rotation*.

En 1909, Roland von Eötvös mesura un effet ordinaire : en raison de la rotation de la Terre, le poids d'un objet dépend de la direction dans laquelle il se déplace. Par conséquent, une balance en rotation autour de l'axe vertical ne reste pas en parfaite position horizontale : la balance commence à osciller délicatement. Pouvez-vous expliquer l'origine de cet effet ?

Défi 159 s

Réf. 70

En 1910, John Hagen publia les résultats d'une expérience encore plus simple, proposée par Louis Poincaré en 1851. Deux masses sont posées sur une barre horizontale qui peut tourner autour d'un axe vertical, un dispositif connu sous le nom d'*isotoméographe*. Si les deux masses sont déplacées lentement vers le support, tel que montré sur la Figure 51, et si le frottement est négligeable, les barres tournent. Certes, ceci ne surviendrait pas si la Terre ne tournait pas. Pouvez-vous donner une explication à cette observation ? Cet effet peu connu est également utile pour que les physiciens fassent des paris entre eux.

Défi 160 s

En 1913, Arthur Compton montra qu'on peut tirer profit d'un tuyau fermé rempli d'eau et de quelques minuscules particules en suspension (ou des bulles) pour montrer que la Terre tourne. Cet appareil est appelé un *tube de Compton* ou une *roue de Compton*. Compton montra que, lorsqu'un tube horizontal rempli d'eau est tourné de 180°, quelque chose se produit qui nous permet de démontrer que la Terre tourne. L'expérience, indiquée sur la Figure 52, permet même de mesurer la latitude du point où l'expérience est réalisée. Pouvez-vous deviner ce qui se passe ?

Réf. 82

Défi 161 d

En 1925, Albert Michelson** et ses collaborateurs dans l'Illinois construisirent un interféromètre sous vide d'un périmètre invraisemblable de 1,9 km. Les interféromètres produisent des franges lumineuses brillantes et sombres, l'emplacement des franges dépendant de la vitesse avec laquelle l'interféromètre tourne. Le décalage des franges est dû

Page ??

Défi 158 s

* Pouvez-vous deviner comment la rotation est détectée dans ce cas précis ?

** Albert Abraham Michelson (n. Strzelno 1852, d. Pasadena 1931), physicien prussien puis polonais, et enfin américain des États-Unis. Il était obsédé par la mesure précise de la vitesse de la lumière, et reçut le prix Nobel de physique en 1907.

à un effet mesuré pour la première fois en 1913 par le physicien français Georges Sagnac : la rotation d'un interféromètre circulaire tout entier d'une vitesse angulaire (vecteur) Ω produit un décalage de phase angulaire $\Delta\varphi$ de la frange, donné par

$$\Delta\varphi = \frac{8\pi \Omega A}{c \lambda} \quad (27)$$

où A est la superficie (vecteur) du domaine encerclé par les deux rayons lumineux qui interfèrent, λ est leur longueur d'onde et c la vitesse de la lumière. Cet effet est dorénavant nommé l'*effet Sagnac*, même s'il avait été prédit 20 ans auparavant par Oliver Lodge*. Réf. 71
 Michelson et son équipe décelèrent un décalage de frange d'une période de 24 heures, dont la grandeur était exactement celle prévue par la rotation de la Terre. Des versions récentes de haute précision utilisent des lasers en anneau sur des surfaces de quelques mètres carrés seulement, mais capables de détecter des variations dans le rythme de rotation de la Terre de moins d'une partie par million. En réalité, au cours d'une année, la durée d'une journée fluctue de façon irrégulière de quelques millisecondes, principalement à cause des influences du Soleil et de la Lune, à cause des changements climatiques et de la convection du magma brûlant au cœur de la Terre**. Réf. 72
 Mais les tremblements de terre, le phénomène climatique El Niño et le remplissage des énormes digues fluviales ont également des répercussions sur la rotation de la Terre. Tous ces effets peuvent être étudiés avec la précision adéquate par des interféromètres ; ceux-ci peuvent également être utilisés dans la recherche sur les mouvements de la croûte terrestre provoqués par les marées lunaires ou les tremblements de terre, et dans les vérifications de la validité de la théorie de la relativité.

En résumé, les observations démontrent que la surface de la Terre tourne à raison de 463 m/s à l'équateur, une valeur plus grande que celle de la vitesse du son dans l'air – environ 340 m/s dans des conditions normales – et qu'en réalité nous *tournoyons* à travers le cosmos.

COMMENT LA TERRE TOURNE-T-ELLE ?

La rotation de la Terre est-elle *constante* à l'échelle des temps géologiques ? C'est une question ardue. Si vous pouviez découvrir une méthode qui pourrait apporter une réponse, publiez-la ! (Ceci est également vrai pour la question de savoir si la durée de l'année est constante.) Seul un petit nombre de méthodes sont connues, comme nous allons le découvrir par la suite. Réf. 73

La rotation de la terre n'est pas constante même pendant la durée d'une vie humaine. Elle varie de quelques parties pour 10^8 . Plus précisément, à l'échelle des temps « séculaires », la durée de la journée augmente d'environ 1 ou 2 ms par siècle, principalement à cause des frottements provoqués par la Lune (les marées, les mouvements de la croûte terrestre [N.D.T.]), et par la fonte des glaciers polaires. C'est ce qui ressort de l'analyse

* Oliver Lodge (1851–1940) était un physicien britannique qui étudia les ondes électromagnétiques et tenta de communiquer avec les morts. Personnalité étrange mais influente, ses idées sont fréquemment citées lorsque l'on allie divertissement et physique. Par ailleurs, il fut un des (rares) physiciens persuadés à la fin du dix-neuvième siècle que la physique était achevée.

** L'effet de la croissance des feuilles des arbres sur le changement du moment d'inertie de la Terre, déjà examiné en 1916 par Harold Jeffreys, est trop insignifiant pour être perçu, du moins jusqu'à présent.

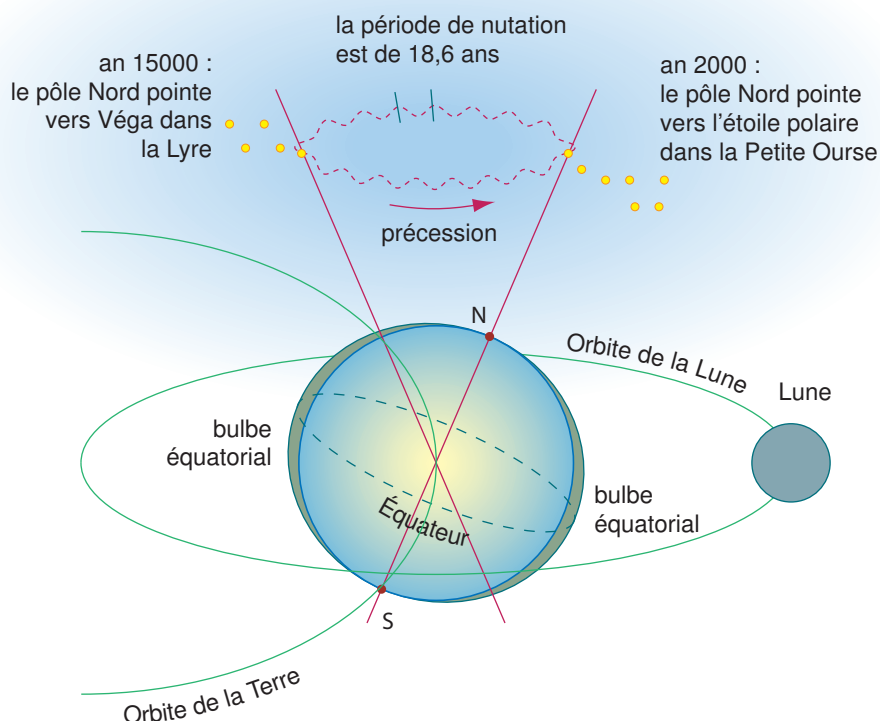


FIGURE 53 La précession et la nutation de l'axe de la Terre.

des observations astronomiques historiques consignées par les anciens astronomes babyloniens et arabes. Des variations « décennales » supplémentaires d'une amplitude de 4 ou 5 ms sont causées par les mouvements de convection de la partie liquide du noyau de la Terre.

Réf. 74

Des variations semestrielles et saisonnières de la longueur du jour – d'une amplitude de 0,4 ms tous les six mois, une autre de 0,5 ms sur l'année, et une de 0,08 ms au bout de 24 à 26 mois – sont essentiellement provoquées par les effets de l'atmosphère. Dans les années 1950, la disponibilité de mesures précises a montré qu'il existe même une variation de 0,2 ms de période de 14 et 28 jours, due à la Lune. Dans les années 1970, la découverte d'oscillations dans les vents, sur une échelle de temps d'environ 50 jours, montra qu'elles modifiaient la longueur du jour selon une amplitude d'environ 0,25 ms. Toutefois, ces dernières variations sont totalement irrégulières.

Réf. 75

Mais tout compte fait, pourquoi la terre tourne-t-elle ? La rotation de la Terre tire son origine de la rotation du nuage de gaz qui a créé le Système solaire. Ce contexte explique pourquoi le Soleil et toutes les planètes, sauf une, tournent sur eux-mêmes dans le même sens, et pourquoi toutes les planètes tournent autour du Soleil dans ce même sens. Mais le récit complet de cette histoire sort du cadre de ce manuel.

La rotation autour de son axe n'est pas le seul mouvement de la Terre, elle réalise éga-

lement d'autres mouvements. On le savait déjà depuis très longtemps. En 128 av. J.-C., l'astronome grec Hipparque découvrit ce qui est aujourd'hui appelé la *précession* (des équinoxes). Il avait confronté une mesure qu'il avait faite lui-même avec une autre faite 169 ans plus tôt. Hipparque remarqua alors que l'axe de la Terre pointait dans la direction d'étoiles différentes à des moments différents. Il en conclut que la voûte céleste se déplaçait. Aujourd'hui nous préférons dire que c'est l'axe de la Terre qui bouge. En l'espace d'une période de 25 800 ans, l'axe dessine un cône avec un angle ouvert de $23,5^\circ$. Ce mouvement, dessiné sur la Figure 53, est engendré par les forces de marées de la Lune et du Soleil sur le renflement équatorial de la Terre, ce qui a aussi pour conséquence de façonner son aplatissement. Le Soleil et la Lune essayent d'aligner l'axe de la Terre perpendiculairement à la trajectoire de celle-ci, ce couple conduisant à la précession de l'axe de la Terre. (Le même effet survient avec n'importe quelle toupie ou dans l'expérience avec les roues suspendues montrée à la page 170.)

De plus, l'axe de la Terre n'est pas fixe non plus par rapport à sa surface. En 1884, en mesurant l'angle exact du pôle Nord céleste au-dessus de l'horizon, Friedrich Küstner (1856–1936) remarqua que l'axe de la Terre se *déplaçait* par rapport à l'écorce terrestre, tel que Bessel l'avait suggéré 40 ans plus tôt. Comme conséquence de la découverte de Küstner, le Service international des latitudes (International Latitude Service, ou ILS [N.D.T.]) fut créé. Il s'avéra que le *mouvement polaire* que Küstner avait découvert était constitué de trois composantes : une légère dérive longitudinale – non encore élucidée –, un mouvement elliptique annuel dû aux variations saisonnières des masses d'air et d'eau, et un mouvement circulaire* d'une période d'environ 1,2 année causé par les fluctuations de la pression exercée dans les bas-fonds des océans. Concrètement, le pôle Nord se déplace d'une distance de 15 m autour d'une position centrale moyenne.

Réf. 76

En 1912, le météorologiste allemand et géophysicien Alfred Wegener (1880–1930) découvrit un phénomène encore plus important. Après avoir étudié les formes des plateaux continentaux et les strates géologiques des deux côtés de l'Atlantique, il conjectura que les continents se *déplacent*, et qu'ils sont tous des fragments d'un seul continent originel qui s'est brisé il y a 200 millions d'années**.

Bien qu'elle fût d'abord tournée en dérision tout autour du globe, la découverte de Wegener était correcte. Les relevés des satellites modernes, indiqués sur la Figure 54, confirment ce modèle. Par exemple, le continent américain s'éloigne du continent européen d'environ 10 mm par an. Certains conjecturent également que cette vitesse a pu être plus importante à certaines époques dans le passé. La manière de le vérifier est d'observer la magnétisation des roches sédimentaires. Aujourd'hui, c'est toujours un domaine de la recherche de pointe. En suivant la version moderne de ce modèle, appelé la *tectonique des plaques*, les continents (d'une masse volumique de $2,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$) flottent sur le manteau fluide de la Terre (d'une masse volumique de $3,1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$) comme des frag-

* Ce mouvement circulaire, un vacillement, fut prédit par le grand mathématicien suisse Leonhard Euler (1707–1783). En faisant usage de cette prédiction et des données de Küstner, Seth Chandler proclama en 1891 être l'initiateur de cette composante circulaire.

** Dans cet ancien supercontinent, appelé Gondwana, il y avait un fleuve colossal qui s'écoulait vers l'ouest depuis le Tchad jusqu'à Guayaquil en Équateur. Après que le continent se fut divisé, ce fleuve continua à s'écouler vers l'ouest. Lorsque la cordillère des Andes s'éleva, l'eau fut entravée dans sa course, et plusieurs millions d'années plus tard, elle s'écoula en sens inverse. Aujourd'hui, ce fleuve s'écoule toujours vers l'est et est appelé l'Amazone.

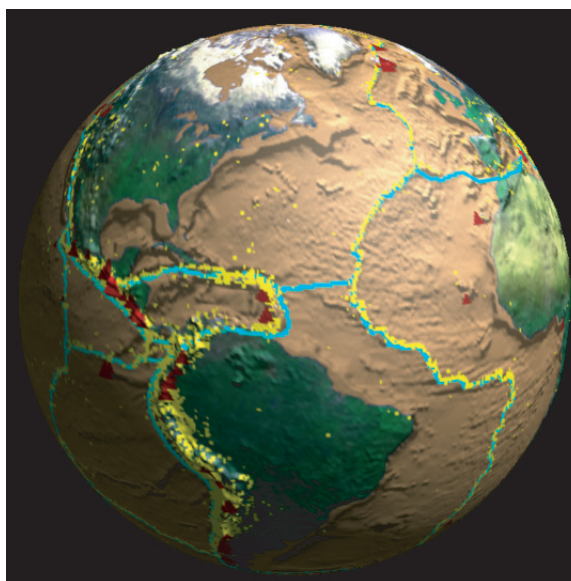


FIGURE 54 Les plaques continentales sont les objets d'étude du mouvement tectonique.

Page 107, page ??
Réf. 77

ments de liège sur de l'eau, la convection à l'intérieur du manteau terrestre constituant le moteur de ce mouvement.

LA TERRE SE DÉPLACE-T-ELLE ?

Le centre de gravité de la Terre n'est pas au repos par rapport à l'univers. Durant le troisième siècle av. J.-C. Aristarque de Samos proférait avec véhémence que la Terre tourne autour du Soleil. Cependant, le fait que les étoiles aient une apparence identique tout au long de l'année représente un obstacle fondamental au système héliocentrique. Comment est-ce possible puisque la Terre voyage autour du Soleil ? La distance entre la Terre et le Soleil était connue depuis le dix-septième siècle, mais c'est seulement en 1837 que Friedrich Wilhelm Bessel* parvint, le premier, à observer la *parallaxe* d'un astre. Ce fut le résultat de mesures extrêmement attentives et de calculs compliqués : il inventa les *fonctions de Bessel* afin de pouvoir y parvenir. Il fut capable de déceler une étoile, 61 Cygni, dont la position apparente changeait en fonction des mois de l'année. Observée durant une année entière, l'étoile décrit une petite ellipse dans le ciel, d'une ouverture d'angle de $0,588''$ (c'est la valeur moderne). Après avoir soigneusement écarté toutes les autres explications possibles, Bessel déduisit que la variation de la position était due au mouvement de la Terre autour du Soleil, et, à partir de la taille de l'ellipse, il détermina la distance de l'étoile à 105 Pm, ou 11,1 années-lumière.

Défi 163 s

Bessel avait donc accompli pour la première fois l'estimation de la distance d'une étoile. Ce faisant, il prouvait également que la Terre n'est pas fixe par rapport aux étoiles dans le ciel et qu'elle effectue en réalité des révolutions autour du Soleil. Ce mouvement lui-même n'était pas une surprise. Il confirmait le résultat sur l'aberration de la lumière

* Friedrich Wilhelm Bessel (1784–1846), astronome allemand, délaissa une carrière prospère dans les affaires pour dédier sa vie aux étoiles et devint le principal astronome de son époque.

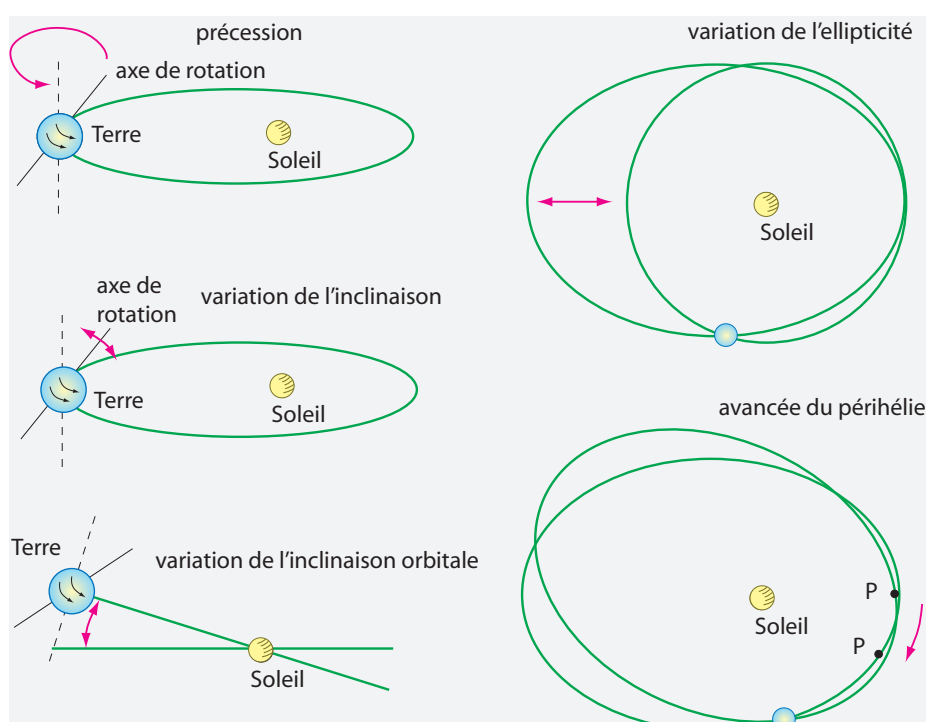


FIGURE 55 Variations du mouvement de la Terre autour du Soleil.

Page 17 mentionné plus haut, découvert en 1728 par James Bradley* et qui sera bientôt évoqué. La Terre tourne autour du Soleil.

Avec le perfectionnement des télescopes, d'autres mouvements de la Terre furent découverts. En 1748, James Bradley déclara qu'il existe une minuscule *variation* régulière de la précession, qu'il nomma la *nutation*, d'une période de 18,6 années et d'une amplitude angulaire de $19,2''$. La nutation se produit parce que le plan de l'orbite de la Lune autour de la Terre ne coïncide pas exactement avec le plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Seriez-vous capable de vérifier que cette situation induit la nutation ?

Défi 164 pe

Les astronomes ont également découvert que l'inclinaison de $23,5^\circ$ – ou l'*obliquité* – de l'axe de la Terre, qui représente l'angle entre son moment cinétique intrinsèque et son moment cinétique orbital, varie en réalité de $22,1^\circ$ à $24,5^\circ$ tous les 41 000 ans. Ce mouvement est provoqué par l'attraction du Soleil et les écarts de la forme de la Terre par rapport à la sphère parfaite. Pendant la Seconde Guerre mondiale, en 1941, l'astronome serbe Milutin Milankovitch (1879–1958) se retrancha dans l'isolement et en étudia les conséquences. Dans ses recherches il s'est rendu compte que cette période d'inclinaison de 41 000 années ainsi qu'une période moyenne de 22 000 ans de précession** ont provoqué l'avènement de plus de 20 *périodes glaciaires* durant les derniers 2 millions d'années.

* James Bradley, (1693–1762), astronome anglais. Il fut un des premiers astronomes à saisir l'importance des mesures précises et modernisa complètement l'Observatoire de Greenwich, dans la banlieue de Londres. Il découvrit l'aberration de la lumière, une innovation qui montrait que la Terre se déplace et qui lui permettait également de mesurer la vitesse de la lumière. Il découvrit aussi la nutation de la Terre.

** Il se trouve que la précession de 25 800 ans a provoqué trois ères caniculaires, de 23 700, 22 400 et 19 000 ans, dues aux interactions entre la précession et l'avancée du périhélie.

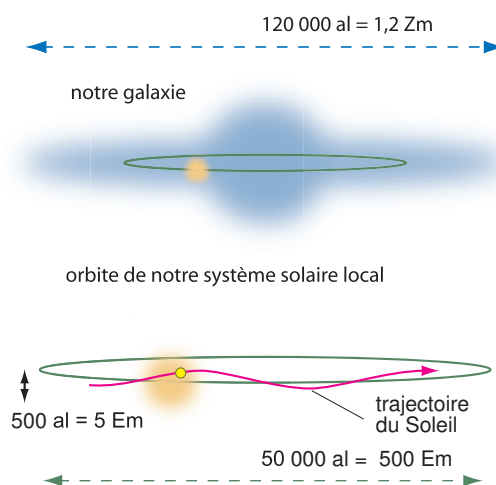


FIGURE 56 Déplacement du Soleil au sein de la Galaxie.

Réf. 78

Ce phénomène survient suite à une exposition plus ou moins forte des pôles au Soleil. Les quantités variables de glace fondue conduisent alors à des variations de la température moyenne. La dernière ère glaciaire a vu son apogée il y a environ 20 000 ans et s'est achevée il y a quelque 11 800 ans, la prochaine est encore loin de nous. Une confirmation éclatante des cycles des ères glaciaires, sans compter les nombreuses pièces à conviction géologiques, est fournie par les relevés des rapports des isotopes de l'oxygène dans les sédiments marins, ce qui permet de retracer l'évolution de la température moyenne durant le dernier million d'années.

L'orbite de la Terre modifie également son *excentricité* au cours du temps, passant d'une forme entièrement circulaire à légèrement ovale et ainsi de suite. Toutefois, cela se produit selon un schéma très complexe, sans aucune régularité périodique, et est engendré par l'influence des grosses planètes du Système solaire sur l'orbite terrestre. L'échelle de temps caractéristique est de l'ordre de 100 000 à 125 000 ans.

De plus, l'*inclinaison* de l'orbite terrestre varie par rapport à l'orbite des autres planètes, de $+2,5^\circ$ à $-2,5^\circ$ et vice versa. Cela semble se produire régulièrement tous les 100 000 ans.

Même la direction vers laquelle l'ellipse se dirige varie avec le temps. Ce phénomène, connu sous le nom d'*avancée du périhélie*, est dû en grande partie à l'influence des autres planètes ; le reste, une petite partie résiduelle, sera capital dans le chapitre sur la relativité générale. Ce fut la première donnée expérimentale qui confirma la théorie.

De toute évidence, la longueur de l'année varie également au cours du temps. Les écarts mesurés sont de l'ordre de quelques parties pour 10^{11} soit environ 1 ms par an. Cependant, la connaissance de ces variations et de leurs sources est beaucoup plus rudimentaire que celle des oscillations de la rotation de la Terre.

L'étape suivante est de se demander si le Soleil lui-même se déplace. La réponse est oui. Localement, il se déplace avec une vitesse de 19,4 km/s en direction de la constellation d'Hercule. Cela fut démontré par William Herschel en 1783. Mais globalement, le mouvement est beaucoup plus captivant. Le diamètre de la Galaxie fait au moins 100 000 années-lumière, et nous sommes situés à 26 000 années-lumière du bulbe central. (Ce

fait est connu depuis 1918, le centre de la galaxie est situé dans la direction du Sagittaire.) À notre emplacement, la Galaxie a une épaisseur de 1 300 années-lumière et, en ce moment, nous sommes 68 années-lumière « au-dessus » du plan central. Le Soleil, et avec lui le Système solaire tout entier, met environ 225 millions d'années pour faire une révolution autour du centre galactique, sa vitesse orbitale étant approximativement 220 km/s. Il semble que le Soleil continuera de s'éloigner du plan de la Galaxie jusqu'à ce qu'il soit à peu près à 250 années-lumière au-dessus de celui-ci, puis amorcera un mouvement opposé, comme indiqué sur la **Figure 56**. La période d'oscillation est estimée à approximativement 60 millions d'années, et a été invoquée comme étant le processus de l'extinction massive de la vie animale sur Terre, probablement à cause de quelque nuage de matière rencontré sur notre itinéraire. Ce point est encore largement débattu dans la communauté des chercheurs.

Réf. 79

Nous tournons autour du centre de la Galaxie parce que la formation des galaxies, comme celle du Système solaire, se produit toujours dans un tourbillonnement de matière. D'ailleurs, pouvez-vous confirmer à partir de vos propres observations que notre Galaxie tourne sur elle-même ?

Défi 165 s

Enfin, nous pouvons nous demander si la Galaxie elle-même se déplace. Son mouvement peut être observé en réalité parce qu'il est possible d'évaluer le mouvement du Soleil à travers l'univers, en le définissant comme étant son mouvement par rapport au rayonnement de fond cosmique. Cette valeur a été mesurée comme étant de 370 km/s. (La vitesse de la Terre par rapport au rayonnement de fond cosmique dépend bien sûr des saisons.) Cette valeur est une combinaison du mouvement du Soleil autour du centre de la Galaxie et du mouvement de la Galaxie elle-même. Cette dernière est provoquée par l'attraction gravitationnelle des galaxies les plus proches dans notre groupe local de galaxies*.

Réf. 80

En résumé, la Terre se déplace réellement, et elle le fait d'une manière quelque peu complexe. Comme Henri Poincaré le dirait, si nous sommes en un lieu donné aujourd'hui, par exemple le Panthéon à Paris, et que nous revenons au même endroit demain à la même heure, nous serons en réalité 31 millions de kilomètres plus loin. Cette description des choses pourrait rendre les voyages dans le temps extrêmement ardu dans le cas où ils seraient possibles (ce qui n'est pas vrai), toutes les fois que vous rentreriez d'un voyage dans le passé, vous devriez viser extrêmement juste pour retrouver l'ancienne position !

LA ROTATION EST-ELLE RELATIVE ?

Lorsque nous nous retournons brutalement, nos bras se soulèvent. Pourquoi en est-il ainsi ? Comment notre corps peut-il percevoir le fait que nous sommes en rotation ou non ? Il y a deux interprétations possibles. La première approche, promue par Newton, est de dire que l'espace est absolu : à chaque fois que nous tournons par rapport à cet espace, le système réagit. L'autre réponse est de remarquer qu'à chaque fois que les bras se soulèvent les astres tournent aussi, et exactement de la même manière. En d'autres termes, notre corps détecterait la rotation parce que nous nous déplaçons par rapport à la distribution moyenne de la masse dans l'espace.

* C'est la fin subite de notre ascension. Remarquez que l'expansion de l'univers, qui sera étudiée plus tard, ne produit aucun mouvement.

L'argument le plus souvent cité par rapport à cette discussion est attribuable à Newton. À la place des bras, il examina le cas de l'eau dans un seau en rotation. Comme d'habitude pour les discussions philosophiques, la réponse de Newton fut guidée par son comportement mystique déclenché par la mort de son père quelques années auparavant. Newton voyait l'espace absolu comme un dogme religieux et n'était pas même capable d'imaginer une alternative. Newton pensait donc que la rotation était un concept absolu. La plupart des scientifiques contemporains ont moins de préjugés et sont plus raisonnés que Newton. Ainsi, le consensus moderne formule que les effets de la rotation sont dus à la distribution de masse dans l'univers : la rotation est relative. Cependant, soyons honnêtes : cette question ne peut être élucidée par la physique galiléenne. Nous aurons besoin de la relativité générale.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LE MOUVEMENT QUOTIDIEN

« C'est un fait mathématique établi que la projection de ce caillou depuis ma main modifie la position du centre de gravité du cosmos. »
Thomas Carlyle*, *Sartor Resartus III*.

Voici quelques questions à méditer au sujet du mouvement.

* *

Défi 167 s Une automobile roulant à une certaine vitesse donnée consomme 7 litres d'essence pour 100 km. Quelle est la résistance combinée de l'air et de la route sur la roue ? (Supposez que le moteur possède un rendement de 25 %.)

* *

Défi 168 e Lors d'un voyage en train, vous pouvez tester la déclaration de Galilée sur la relativité quotidienne du mouvement. Fermez vos yeux et demandez à quelqu'un de vous faire tourner sur vous-même plusieurs fois : êtes-vous capable de dire dans quelle direction le train est en marche ?

* *

Défi 169 e Un train commence à rouler à une vitesse constante de 10 m/s entre deux villes A et B, séparées de 36 km. Le train prendra une heure pour effectuer le trajet. En même temps que le train démarre, une colombe rapide commence à voler de A jusqu'à B, à 20 m/s. Étant plus rapide que le train, la colombe arrive la première en B. Elle se met alors à voler en direction de A. Lorsqu'elle rencontre le train, elle fait encore demi-tour vers la ville B. Elle vole en faisant des allers-retours jusqu'à ce que le train parvienne en B. Quelle distance la colombe a-t-elle parcourue ?

* *

Défi 170 s Une bonne balance de salle de bains, utilisée pour déterminer le poids d'une personne, n'indique pas un poids constant lorsque vous vous appuyez dessus puis que vous demeurez immobile. Pourquoi en est-il ainsi ?

Défi 166 s * Thomas Carlyle (1797–1881). Êtes-vous d'accord avec la citation ?

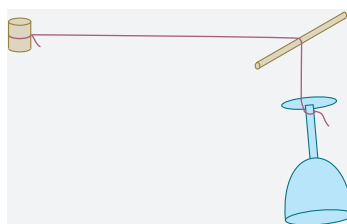


FIGURE 57 N'est-il pas risqué de lâcher le bouchon ?

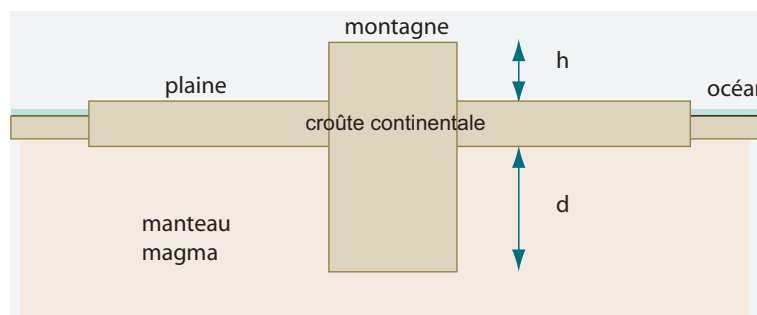


FIGURE 58 Un modèle simple pour les continents et les montagnes.

* *

Un bouchon est fixé à une mince ficelle d'un mètre de long. La ficelle passe sur une longue tige tenue horizontalement, et un verre à pied est attaché à l'autre bout. Si vous laissez tomber le bouchon comme sur la Figure 57, rien ne se brise. Pourquoi ? Que se passe-t-il ?

Défi 171 s

* *

En 1901, Duncan MacDougalls, un médecin, mesura le poids de personnes en train de mourir, dans le but de déterminer si la mort provoque une variation de la masse. Il releva une modification subite d'environ 20 g au moment du décès, avec de grandes variations d'un individu à l'autre. Il attribua cela à l'âme. Cette explication est-elle satisfaisante ? (Si vous en connaissez une plus satisfaisante, publiez-la !)

Défi 172 s

* *

La croûte terrestre est moins dense (2,7 kg/l) que le manteau terrestre (3,1 kg/l) et flotte sur celui-ci. Par conséquent, la croûte plus légère située sous une crête montagneuse doit être bien plus profonde que celle située sous une plaine. Si une montagne s'élève à 1 km au-dessus de la plaine, à quelle profondeur doit être située la croûte sous elle ? Le modèle simple en blocs montré sur la Figure 58 convient assez bien. D'abord il explique pourquoi, à proximité des montagnes, des mesures de la variation de la chute libre par rapport à la ligne verticale conduisent à des valeurs bien plus petites que celles attendues sans une croûte profonde. De plus, des mesures sonores ont directement confirmé que la croûte continentale est en réalité plus épaisse sous les montagnes.

Défi 173 s

* *

Posez en équilibre un stylo verticalement (la pointe vers le haut !) sur une feuille de pa-

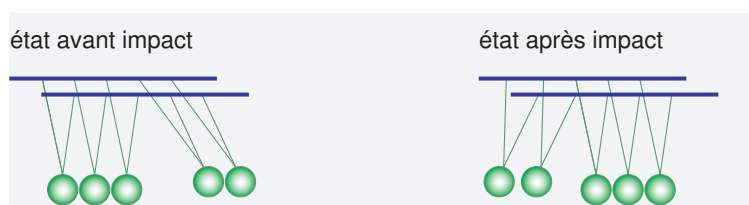


FIGURE 59 Un jouet bien connu.

Défi 174 e pier posée près du rebord d'une table. Comment pouvez-vous retirer la feuille sans faire tomber le stylo ?

* *

Défi 175 e Prenez un empilement de pièces de monnaie. Nous pouvons faire sortir les pièces, en commençant par celle située tout en bas de la pile, en projetant une autre pièce sur la surface de la table. Cette méthode nous aide également à visualiser la conservation bidimensionnelle de la quantité de mouvement.

* *

Réf. 81 Début 2004, deux hommes et une femme ont gagné 1,2 million £ en une soirée seulement dans un casino de Londres. Ils ont réussi en appliquant la formule de la mécanique galiléenne. Ils utilisèrent la méthode initiée par plusieurs physiciens dans les années 1950 qui avaient construit divers calculateurs minuscules, lesquels pouvaient prédire le résultat d'une bille de jeu de roulette à partir de la vitesse initiale communiquée par le croupier. Dans le cas de nos Britanniques, le groupe ajouta un scanner laser à un smartphone (un téléphone mobile couplé à un PDA [N.D.T.]) qui mesurait la trajectoire de la bille de roulette et prédisait les numéros sur lesquels elle devait s'immobiliser. De cette façon, ils passaient de 1 chance sur 37 de gagner à environ 1 chance sur 6. Après six mois d'investigations, Scotland Yard statua qu'ils pouvaient conserver l'argent qu'ils avaient gagné.

* *

Défi 176 e Un aller-retour par avion – à partir d'un point A jusqu'à un point B puis retour au point A – est-il plus rapide si le vent souffle, ou pas ?

* *

Défi 177 d Le jouet de la Figure 59 (un *pendule de Newton* ou « Newton's cradle » en anglais [N.D.T.]) soulève un comportement intéressant : lorsqu'un certain nombre de sphères sont soulevées puis relâchées pour frapper celles qui sont au repos, le même nombre de sphères se détache de l'autre côté, tandis que les sphères précédemment relâchées demeurent immobiles. À première vue, tout cela semble découler de la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. Cependant, la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement ne fournit que deux équations, ce qui s'avère insuffisant pour expliquer ou déterminer le comportement de cinq sphères. Alors pourquoi les sphères se comportent-elles de cette manière ? Et pourquoi oscillent-elles toutes en phase après qu'un temps suffisamment long s'est écoulé ?

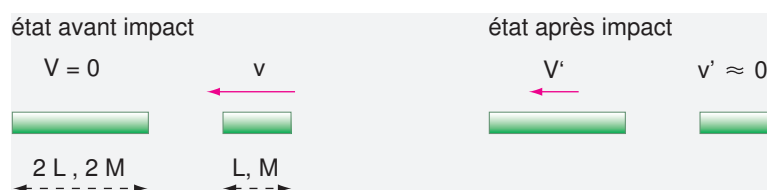


FIGURE 60 Une collision élastique qui semble ne pas respecter la conservation de l'énergie.

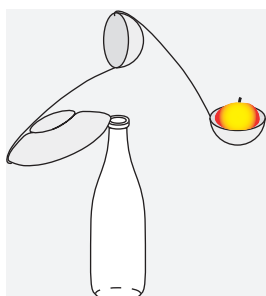


FIGURE 61 Le centre de masse détermine la stabilité.



FIGURE 62 Comment l'échelle tombe-t-elle ?

* *

Réf. 83

Un effet surprenant est employé dans les outils domestiques tels que les perceuses à percussion. Nous nous rappelons que lorsqu'une petite balle frappe élastiquement une plus grosse au repos, les deux balles se déplacent après le choc, et la plus petite se déplace évidemment plus vite que la plus grosse. Malgré cette assertion, lorsqu'un cylindre court frappe un autre plus long de même diamètre et de même matière, mais d'une longueur qui est un multiple *entier* de celle du cylindre court, quelque chose de stupéfiant se produit. Après le choc, le petit cylindre reste pratiquement au repos tandis que le plus grand se déplace, tel qu'indiqué sur la Figure 60. Quand bien même la collision est élastique, la conservation de l'énergie semble ne pas être vérifiée dans cette situation. (En réalité c'est pour cette raison que les démonstrations des collisions élastiques sont toujours effectuées avec des sphères à l'école.) Qu'arrive-t-il à l'énergie ?

Défi 178 d

* *

Défi 179 s

Un mur est-il plus fortement secoué lorsqu'il est frappé avec une balle qui rebondit sur lui ou lorsqu'il est frappé avec une balle qui reste collée dessus ?

* *

Défi 180 s

Les femmes au foyer savent comment déboucher une bouteille de vin en utilisant une étoffe. Pouvez-vous imaginer comment ? Elles savent également extraire le bouchon avec l'étoffe si celui-ci est tombé à l'intérieur de la bouteille. Comment ?

* *

Le problème de l'échelle qui glisse, schématisé sur la Figure 62, requiert une analyse

détaillée du mouvement de l'échelle dans le temps. Le problème est plus difficile qu'il n'y paraît, même si le frottement est négligé. Pouvez-vous dire si l'extrémité inférieure touche toujours le plancher ?

Défi 181 pe

* *

Réf. 84 Une mouche commune posée sur la poupe d'un bateau de 30 000 tonnes et de 100 m de longueur l'incline d'une distance plus petite que le diamètre d'un atome. Aujourd'hui, des distances si petites sont facilement mesurées. Pouvez-vous penser à au moins deux méthodes pour cela, dont une qui ne devrait pas coûter plus de 2 000 euros ?

Défi 182 s

* *

Le degré d'accélération qu'un homme peut supporter dépend de la durée pendant laquelle il est soumis à celle-ci. Pour un dixième de seconde, une accélération de $30g = 300 \text{ m/s}^2$, telle celle produite par un siège éjectable dans un avion, est acceptable. (Il paraît que le record d'accélération qu'un homme a pu supporter est d'environ $80g = 800 \text{ m/s}^2$.) Mais de manière empirique on affirme que des accélérations de $15g = 150 \text{ m/s}^2$ ou plus sont fatales.

* *

Les plus fortes accélérations *microscopiques* sont observées dans les collisions de particules, où nous obtenons des valeurs allant jusqu'à 10^{35} m/s^2 . Les plus fortes accélérations *macroscopiques* se produisent probablement dans les effondrements internes des *supernovae*, des étoiles en explosion qui peuvent être lumineuses au point d'être visibles dans le ciel en plein jour. Un équivalent sur Terre est l'intérieur des bulles qui implosent dans des liquides, un processus nommé *cavitation*. La cavitation produit souvent de la lumière, un effet découvert par Frenzel et Schulte en 1934 et appelé *sonoluminescence*. (Voir la Figure 63.) Elle se manifeste de façon frappante quand des bulles d'air dans l'eau sont étendues puis contractées par des haut-parleurs sous-marins à environ 30 kHz et elle autorise des mesures précises du mouvement des bulles. À un certain seuil d'intensité, le rayon de la bulle varie à la vitesse de 1500 m/s dans un espace réduit de quelques μm , donnant une accélération de plusieurs fois 10^{11} m/s^2 .

Réf. 85

* *

Défi 183 s Si un pistolet situé à l'équateur tire une balle verticalement, où la balle va-t-elle retomber ?

* *

Défi 184 s Pourquoi la plupart des bases de lancement de fusées sont-elles aussi rapprochées que possible de l'équateur ?

* *

Le voyage à travers l'espace interplanétaire serait-il sans risque pour la santé ? Les gens fantasment souvent à propos des longues excursions à travers le cosmos. Les expériences ont montré que, lors de voyages de longue durée, les rayons cosmiques, l'affaiblissement de la structure osseuse et la dégénérescence musculaire sont les plus grands périls. Un grand nombre d'experts médicaux s'interrogent sur la viabilité du voyage spatial pro-



FIGURE 63 Observation de la sonoluminescence et schéma de l'installation expérimentale.

Réf. 86 longé, d'une durée de plus de deux années. D'autres dangers sont les coups de soleil brusques, du moins à proximité du Soleil, et l'exposition au vide spatial. Jusqu'à présent un seul homme a fait l'expérience du vide sans protection. Il perdit conscience au bout de 14 secondes, mais fut sain et sauf.

* *

Défi 185 s Comment peut-on comparer l'énergie cinétique d'une balle de fusil à celle d'un homme qui court ?

* *

Défi 186 s Dans quelle direction une flamme s'incline-t-elle si elle brûle à l'intérieur d'une fiole posée sur une platine en rotation ?

* *

Défi 187 s Une balle de ping-pong est attachée à une pierre par une ficelle, et le tout est mis sous l'eau dans un récipient. L'installation est dessinée sur la Figure 64. Maintenant, le récipient est accéléré horizontalement. Dans quelle direction la balle se déplace-t-elle ? Qu'en déduisez-vous pour un récipient au repos ?

* *

Défi 188 s Qu'arrive-t-il à la taille d'un œuf lorsque nous le disposons dans une fiole de vinaigre pendant plusieurs jours ?

* *

Page ??
Défi 189 s

L'accélération centrifuge existe-t-elle ? La plupart des étudiants d'université ont eu cette stupéfaction d'entendre, durant un cours, un professeur leur annoncer qu'il s'agit d'une notion « imaginaire », contredisant ainsi l'expérience que nous avons tous eue en conduisant un véhicule dans un virage. Demandez simplement au professeur qui affirme cela de vous définir l'« existence ». (La définition que les physiciens utilisent généralement est donnée dans l'Intermède qui achève cette partie.) Vérifiez alors si la définition s'applique à ce terme et essayez vous-même de faire une expérience de pensée.

* *

Défi 190 e

La rotation cache une surprise pour celui qui l'étudie attentivement. Le moment cinétique est une quantité qui possède une grandeur et une direction. Cependant, ce n'est pas un vecteur, comme nous le montre n'importe quel miroir. Le moment cinétique d'un corps qui tourne dans un plan parallèle au miroir agit d'une manière différente d'une flèche commune : son image dans le miroir n'est pas réfléchi s'il pointe dans la direction du miroir ! Vous pouvez aisément vérifier cela vous-même. Pour cette raison, le moment cinétique est désigné par le terme de *pseudo-vecteur*. Cette circonstance ne constitue pas une entrave importante en physique classique, mais nous devons garder cela à l'esprit pour des occasions futures.

* *

Défi 191 s

Quelle est la meilleure manière de transporter un certain nombre de tasses pleines de café ou de thé tout en évitant de renverser du précieux liquide ?

* *

Défi 192 s

La Lune fuit la Terre à raison de 3,8 cm par an, à cause du frottement. Pouvez-vous dévoiler le mécanisme qui en est responsable ?

* *

Défi 193 pe

Quelle est l'amplitude d'oscillation d'un pendule qui se balance de telle manière que les valeurs absolues de son accélération à son point le plus bas et à son point de rebroussement soient égales ?

* *

Défi 194 pe

Pouvez-vous confirmer que la valeur de l'accélération d'une goutte d'eau chutant à travers de la vapeur est $g/7$?

* *

Que sont les tremblements de terre ? Les *tremblements de terre* sont des exemples de grande ampleur du même processus qui fait qu'une porte grince. Les plaques continentales correspondent aux surfaces métalliques situées au niveau des gonds de la porte.

Les tremblements de terre peuvent être assimilés à des sources d'énergie. L'échelle de Richter constitue une évaluation immédiate de leur énergie. La *magnitude de Richter* M_s d'un séisme, un simple nombre, est définie à partir de son énergie E en joule via la relation

$$M_s = \frac{\log(E/1J) - 4,8}{1,5} . \quad (28)$$



FIGURE 64 Comment la balle se déplace-t-elle quand le récipient est accéléré ?

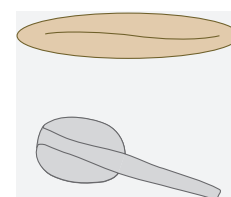


FIGURE 65 La célèbre pierre celtique et une variante fabriquée avec une cuillère.

Les nombres arbitraires qui apparaissent dans l'expression ont été choisis de façon à rapprocher le plus possible les valeurs des séismes de l'ancienne échelle de Mercalli (maintenant dénommée EMS98), purement qualitative, qui échelonne l'intensité d'un séisme. Toutefois, ce n'est pas complètement possible : les instruments les plus sensibles aujourd'hui détectent des séismes de magnitude -3 . La plus grande valeur jamais mesurée fut une magnitude de 10 sur l'échelle de Richter, au Chili en 1960. Des magnitudes supérieures à 12 sont probablement impossibles. (Pouvez-vous montrer pourquoi ?)

Défi 195 s

* *

La **Figure 65** montre l'intéressante *pierre celtique*, une pierre qui commence à tourner sur une surface plane dès qu'on la fait osciller. La taille peut varier de quelques centimètres à quelques mètres. Nous pouvons réaliser une variante élémentaire de ce surprenant outil simplement en pliant le manche d'une cuillère, pourvu que la pliure ne soit pas parfaitement symétrique. La rotation se fait toujours dans le même sens. Si la pierre est mise en rotation dans la mauvaise direction, au bout d'un moment elle s'immobilise et recommence à tourner dans l'autre sens ! Pouvez-vous expliquer cet effet ?

Réf. 83

Défi 196 d

* *

Quel est le mouvement du point de la surface terrestre qui a le Soleil à son zénith (c'est-à-dire verticalement au-dessus de lui) lorsqu'il est observé sur une carte de la Terre pendant une journée, puis jour après jour ?

Défi 197 pe

* *

Le moment d'inertie d'un corps dépend de la forme du corps en question. Généralement, le moment cinétique et la vitesse angulaire ne pointent pas dans la même direction. Pouvez-vous entériner ce fait avec un exemple ?

Défi 198 s

* *

Peut-il se produire qu'une antenne parabolique d'un satellite géostationnaire de télévision focalise la lumière du Soleil sur le récepteur ?

Défi 199 s

* *

Pourquoi est-il ardu de mettre à feu une fusée depuis un avion dans la direction opposée du mouvement de l'avion ?

Défi 200 s

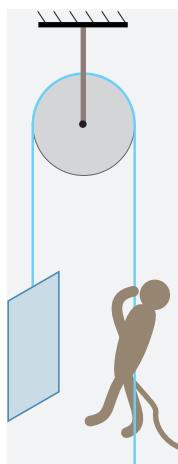


FIGURE 66 Comment le singe va-t-il se déplacer ?

* *

Prenez deux sphères creuses de même poids, de même taille et peintes toutes les deux avec la même couleur. L'une d'entre elles est faite de cuivre, l'autre est en aluminium. Bien évidemment, elles tombent avec la même vitesse et la même accélération. Que se passe-t-il si elles roulent toutes les deux de haut en bas sur un plan incliné ?

Défi 201 pe

* *

Un singe est suspendu à une corde. La corde passe par-dessus la roue d'une poulie et est liée à une masse de poids égal suspendue à l'autre extrémité, tel qu'indiqué sur la Figure 66. La corde et la roue sont sans masse et dénuées de tout frottement. Que se passe-t-il quand le singe grimpe vers le haut ?

Défi 202 s

* *

Défi 203 pe Quelle est la figure formée par une corde lors du saut à la corde ?

* *

Comment pouvez-vous mesurer la vitesse d'une balle de fusil avec une échelle et une règle graduée seulement ?

Défi 204 s

* *

Pourquoi un fusil peut-il faire un trou dans une porte mais ne peut pas la pousser pour l'ouvrir, ce qui est parfaitement opposé à ce qu'un doigt peut effectuer ?

Défi 205 e

* *

Un skieur nautique peut-il se déplacer avec une vitesse plus grande que celle du bateau qui le tire ?

Défi 206 s

* *

Prenez deux boîtes de conserve de même taille et de même poids, une pleine de raviolis et l'autre pleine de petits pois. Laquelle roule plus rapidement sur un plan incliné ?

Défi 207 e

* *

Défi 208 s Quel est le moment d'inertie d'une sphère homogène ?

* *

Le moment d'inertie est déterminé par les valeurs des composantes de ses trois axes principaux. Celles-ci sont toutes identiques pour une sphère ou pour un cube. Cela signifie-t-il qu'il est impossible de faire la différence entre une sphère et un cube concernant leur comportement inertiel ?

Défi 209 s

* *

Vous devez certainement connaître le « Dynabee » (une imitation du Powerball [N.D.T.]), un dispositif gyroscopique qui se tient dans la main et qui peut être accéléré à des vitesses élevées par des mouvements appropriés de la main. Comment fonctionne-t-il ?

Défi 210 d

* *

Il est possible de réaliser une toupie avec une agrafeuse métallique. Il est même possible de réaliser une de ces toupies-là en la faisant tourner sur la tête. Pouvez-vous découvrir comment ?

Défi 211 s

* *

Est-il vrai que la Lune, lorsqu'elle est dans son premier quartier dans l'hémisphère Nord, ressemble au dernier quartier de Lune dans l'hémisphère Sud ?

Défi 212 s

* *

Une confirmation splendide que la Terre est ronde peut être aperçue au coucher du Soleil si nous tournons, contrairement à nos habitudes, le dos au couchant. Dans la partie orientale de la voûte céleste, nous pouvons contempler la montée impressionnante de l'ombre de la Terre. (En réalité, des recherches attentives montrent que ce n'est pas l'ombre de la Terre, mais plutôt l'ombre de l'ionosphère.) Nous pouvons admirer une énorme tache s'élevant à travers l'horizon tout entier, ayant distinctement la forme d'un segment d'un vaste cercle.

* *

Défi 213 s À quoi ressemblerait la photographie de la Figure 67 si elle était prise à l'équateur ?

* *

La course en arrière est un sport intéressant. Les records mondiaux de courses en arrière en 2006 peuvent être consultés sur http://www.recordholders.org/en/list/backwards_running.html. Vous serez surpris de voir combien ces records sont plus élevés que votre meilleur temps individuel de course en *avant*.

Défi 214 e

* *

Puisque la Terre est ronde, il y a plusieurs chemins différents pour aller d'un point à un autre sur celle-ci en suivant la courbe d'un segment de cercle. Cela a une conséquence intéressante notamment pour les ballons de volley et pour ceux qui aiment mater les jo-



FIGURE 67 Le ciel nocturne après une pose longue – au-dessus du télescope du Mauna Kea à Hawaï (Gemini).

lies filles. Prenez un ballon de volley et observez sa valve. Si vous voulez déplacer la valve par une simple rotation à une autre position, vous pouvez choisir l'axe de rotation de différentes manières. Êtes-vous d'accord avec cela ? En d'autres termes, lorsque nous regardons dans une direction donnée et que nous voulons alors regarder dans une autre direction, l'œil parvient à accomplir cette modification de différentes manières. L'option choisie par l'œil humain a déjà été étudiée par des biologistes durant le dix-huitième siècle. C'est ce que nous appelons la « loi » de Listing*. Elle établit que tous les axes choisis par la nature se trouvent dans un plan unique. Pouvez-vous imaginer sa position dans l'espace ? Les hommes ont un intérêt indubitable à ce que ce mécanisme soit scrupuleusement respecté : sinon, mater les filles sur la plage pourrait provoquer l'enchevêtrement des muscles directeurs des yeux.

Défi 215 e

Défi 216 s

DES JAMBES OU DES ROUES ? – SUITE

L'accélération et la décélération des véhicules motorisés ordinaires dépassent rarement environ $1g = 9,8 \text{ m/s}^2$, l'accélération due à la gravité sur notre globe. Des accélérations plus importantes sont atteintes par les motos et les voitures de course grâce à l'utilisation de suspensions qui dévient le poids vers les essieux et par l'utilisation de

* Si vous souhaitez apprendre plus en détail comment la nature et l'œil y parviennent avec toute la complexité des trois dimensions, consultez les sites Web <http://schorlab.berkeley.edu/vilis/whatisLL.htm> et <http://www.med.uwo.ca/physiology/courses/LLConsequencesWeb/ListingsLaw/perceptual2.htm>.



FIGURE 68 Un lézard, le basilic commun (*Basiliscus basiliscus*), courant sur l'eau, indiquant comment les jambes propulsives prennent appui sur l'eau. (© TERRA)

carénages, de telle sorte que le véhicule est poussé vers le bas avec une force plus élevée que celle due à son propre poids. Les carénages modernes sont si efficaces pour plaquer une voiture contre la piste que les voitures de course peuvent rouler à vive allure sur le plafond d'un tunnel sans tomber.

Par le truchement de pneus spéciaux, ces forces dirigées vers le bas sont transformées en prise d'adhérence. Les pneus modernes de compétition supportent des accélérations vers l'avant, vers l'arrière et sur les côtés (requis lors d'une augmentation de vitesse, lors du freinage et lors de la prise d'un virage) d'approximativement 1,1 à 1,3 fois la charge du véhicule. Les ingénieurs pensaient auparavant qu'un facteur de 1 était la limite théorique, et cette limite est encore quelquefois rencontrée dans les manuels. Mais les progrès dans la technologie des pneus, principalement dus à une compréhension plus fine de l'interface entre le pneu et la surface de la route ainsi qu'à une mise en œuvre plus astucieuse du mécanisme des boîtes de vitesses, ont permis aux ingénieurs d'atteindre ces valeurs plus élevées. Les plus fortes accélérations, autour de $4g$, sont atteintes lorsqu'une partie du pneu fond et colle à la surface. Les pneus exceptionnels conçus à cet effet sont utilisés pour les dragsters, mais les maquettes de véhicules radiocommandés de haute performance peuvent également atteindre de telles valeurs.

Réf. 87 Comment comparer tous ces efforts à l'usage de jambes ? Les athlètes du saut en hauteur peuvent atteindre des crêtes d'accélération d'environ 2 à $4g$, les guépards plus de $3g$, les galagos (des lémuriens) jusqu'à $13g$, les criquets environ $18g$, et des puces ont été mesurées dans une accélération d'environ $135g$. L'accélération maximale connue dans le règne animal est celle de l'insecte claqueur (*Agriotes lineatus*, plus connu sous le nom de taupin [N.D.T.]), un petit insecte capable d'accélérer jusqu'à plus de $2000 \text{ m/s}^2 = 200g$, à peu près autant qu'un plomb de fusil à air comprimé lorsqu'il est tiré. Les jambes sont donc des dispositifs d'accélération indubitablement plus efficaces que les roues – un guépard peut aisément dépasser n'importe quelle voiture ou moto – et l'évolution a développé les jambes, à la place de roues, pour augmenter les chances de survie d'un animal en danger. En bref, les jambes sont *plus performantes* que les roues.



FIGURE 69 Un gerris ou araignée d'eau. (© Charles Lewallen)

Défi 217 s

Réf. 88

Il existe d'autres raisons pour utiliser des jambes plutôt que des roues. (Pouvez-vous en citer quelques-unes ?) Par exemple, les jambes, contrairement aux roues, permettent de marcher sur l'eau. Le plus célèbre animal capable de réaliser cette prouesse est le *basilic* commun (*Basiliscus basiliscus*)*. Ce reptile est long d'environ 50 cm et pèse quelque 90 g. Il ressemble à un minuscule *Tyrannosaurus rex* et est capable de courir sur ses pattes arrière à la surface de l'eau. Le mouvement a été étudié en détail avec des caméras ultra-rapides et par des mesures utilisant des modèles en aluminium des pieds de l'animal. Les expériences suggèrent que le frappement du pied sur l'eau ne fournit que 25 % de la force nécessaire pour courir sur l'eau. Les 75 % restants sont apportés par une poche d'air comprimé que les basilics engendrent entre leur pied et l'eau une fois que le pied est dans l'eau. En réalité, les basilics marchent principalement sur l'air**. Il a été calculé que les hommes sont pareillement aptes à marcher sur l'eau, à condition que leur pied frappe l'eau avec une vitesse de 100 km/h en utilisant la puissance physique simultanée de 15 sprinters. Ce qui représente vraiment un exploit pour tous ceux qui ont tenté d'y parvenir.

Il existe une seconde méthode pour marcher et courir sur l'eau. Elle permet même à ses usagers de demeurer immobiles au-dessus de la surface de l'eau. C'est ce que les araignées d'eau***, des insectes de la famille des *Gerridae* d'une longueur totale allant jusqu'à 15 mm, sont capables de faire (tout comme plusieurs espèces d'araignées). Comme tous les insectes, l'araignée d'eau possède six pattes (les araignées en ont huit). L'araignée d'eau utilise les pattes arrière et avant pour glisser au-dessus de la surface, à l'aide de milliers de poils minuscules reliés à son corps. Les poils, en même temps que la tension superficielle de l'eau, empêchent l'insecte d'être mouillé. Si vous versez du shampoing sur l'eau, l'araignée d'eau coule et ne peut donc plus se déplacer. Elle utilise ses grandes pattes du milieu comme des rames pour avancer sur la surface, parvenant de cette façon à des vitesses allant jusqu'à 1 m/s. En résumé, les araignées d'eau se déplacent en fait en ramant.

Les jambes soulèvent de nombreuses questions intéressantes. Les ingénieurs savent qu'un escalier est confortable à gravir seulement si, pour chaque marche, la somme de

* Au Moyen Âge, le mot « basilic » se référait à un monstre légendaire qui était censé apparaître brièvement juste avant la fin du monde. Aujourd'hui, c'est un petit lézard d'Amérique centrale.

Réf. 89

** Les deux méthodes utilisées par le basilic se rencontrent également dans le canoë-kayak de compétition.

*** Également appelées gerridés, et plus joliment encore « patineurs de l'eau », les araignées d'eau font en réalité partie de la famille des punaises [N.D.T.].

la profondeur l et du double de la hauteur h est une constante : $l + 2h = 0,63 \pm 0,02$ m.

Défi 218 s C'est la prétendue *formule de l'escalier*. Pourquoi s'exprime-t-elle ainsi ?

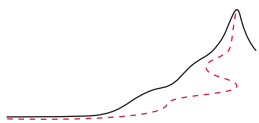
Défi 219 s Tous les animaux possèdent un nombre *pair* de jambes. Connaissez-vous une exception ? Pourquoi n'est-ce pas le contraire ? En réalité, nous pouvons argumenter qu'aucun animal n'a moins de quatre jambes. Pourquoi en est-il ainsi ?

Défi 220 e D'un autre côté, tous les animaux dotés de deux jambes les ont l'une près de l'autre, tandis que les systèmes dotés de roues les ont l'une derrière l'autre. Pourquoi n'est-ce pas l'inverse qui se produit ?

Réf. 90 Les jambes fournissent également des instruments simples de mesure des distances : comptez simplement vos pas. En 2006, il fut découvert que certaines espèces de fourmis, telle *Cataglyphis fortis*, tirent profit de cette méthode. Elles peuvent en compter jusqu'à 25 000 au moins, comme Matthias Wittlinger et son équipe l'ont montré. Ces fourmis utilisent cette aptitude pour trouver l'itinéraire le plus court pour retourner à leur domicile même dans un terrain désert dépourvu de tout repère.

Continuons dorénavant avec l'étude du mouvement transmis à distance, sans qu'il y ait le moindre contact.





CHAPITRE 6

DYNAMIQUE DUE À LA GRAVITATION

« Caddi come corpo morto cade.
Dante, *Inferno*, c. V, v. 142.* »

La première et principale méthode dépourvue de tout contact que nous découvrons dans notre environnement pour engendrer le mouvement est la *hauteur*. Elle concerne les chutes d'eau, la neige, la pluie et les pommes qui tombent. Le fait que la hauteur ait cette propriété parce qu'il existe une interaction entre chaque corps et la Terre a constitué une des découvertes fondamentales de la physique. La *gravitation* produit une accélération le long de la ligne qui relie les centres de gravité du corps et de la Terre. Remarquez que pour faire cette déclaration il est indispensable de comprendre que la Terre est un corps, tout comme une pierre ou la Lune, que ce corps est limité et qu'il possède par conséquent un centre et une masse. De nos jours, ces assertions sont communément admises, mais elles ne sont en aucun cas évidentes d'après notre expérience quotidienne**.

Comment la gravitation varie-t-elle lorsque deux corps sont éloignés l'un de l'autre ? Les spécialistes des objets lointains sont les astronomes. Au fil des ans, ils ont réalisé une multitude de relevés sur les mouvements de la Lune et des planètes. Le plus assidu de tous fut Tycho Brahe***, qui orchestra de manière industrielle la recherche de preuves astronomiques, grâce au parrainage de son souverain. Ses mesures constituèrent le fondement de la recherche de son jeune assistant, l'astronome souabe Johannes Kepler****,

* « Je tombai comme un corps que la vie abandonne. » (Traduction de Rivarol, 1867.) Dante Alighieri (Florence 1265–Ravenne 1321), le premier grand poète de la langue italienne.

** Dans plusieurs mythes sur la création ou l'agencement du monde, tels celui de la Bible ou celui de l'Inde, la Terre n'est pas un objet, mais une entité définie de façon imprécise, par exemple une île flottante ou ceinturée par les mers avec des frontières obscures et des explications confuses sur la manière dont elle reste suspendue. Parviendrez-vous à convaincre un ami que la Terre est ronde et non pas plate ? Pouvez-vous trouver un argument différent de celui de la rotondité de l'ombre de la Terre lorsqu'elle est visible sur la Lune ?

Défi 221 s

Réf. 91

Un célèbre explorateur, Robert Peary, proclama avoir atteint le pôle Nord en 1909. (En réalité, Roald Amundsen parvint le premier à la fois au pôle Sud et au pôle Nord.) Peary affirmait y avoir pris une photo, qui fit le tour du monde, mais qui prouva en fait qu'il n'était jamais allé là-bas. Pouvez-vous concevoir comment ?

Défi 222 s

Défi 223 s

D'ailleurs, si la Terre est ronde, les sommets de deux immeubles sont plus éloignés l'un de l'autre que leur base. Cet effet peut-il être mesuré ?

*** Tycho Brahe (1546–1601), astronome danois mondialement connu, fondateur d'Uraniborg (« palais d'Uranie » ou « palais des Cieux », Uranie étant la muse de l'Astronomie), le palais dédié à l'astronomie. Il consomma à peu près 10 % du produit national brut danois pour ses recherches, qui accouchèrent du premier catalogue exhaustif d'étoiles et des premiers relevés précis de la position des planètes.

**** Johannes Kepler (Weil der Stadt 1571–Ratisbonne 1630), après avoir aidé sa mère à assurer elle-même

Page ?? qui constitue la première description précise du mouvement planétaire. En 1684, toutes les observations sur les planètes et les projectiles furent synthétisées en une formulation étonnamment simple par le physicien anglais Robert Hooke* : chaque corps de masse M attire tout autre corps en direction de son centre avec une accélération dont la grandeur a est donnée par

$$a = G \frac{M}{r^2} \quad (29)$$

où r est la distance de centre à centre des deux corps. Elle est appelée « loi » universelle de la gravitation, ou attraction universelle, parce qu'elle s'applique de manière générale. La constante de proportionnalité G est appelée *constante gravitationnelle*, c'est une des constantes fondamentales de la nature, comme la vitesse de la lumière ou le quantum d'action. Nous en dirons un peu plus bientôt. L'effet de la gravité décroît donc avec l'augmentation de la distance : la gravité dépend de l'inverse du carré de la distance des corps en question. Si les corps sont petits comparés à la distance r , ou s'ils sont sphériques, l'expression (29) est correcte telle qu'elle est formulée. Pour des formes non sphériques, l'accélération doit être évaluée de manière séparée pour chaque partie du corps et être ajoutée à l'ensemble.

Réf. 92 La dépendance en l'inverse du carré est fréquemment appelée « loi » de la gravitation de Newton, parce que le physicien anglais Isaac Newton démontra de façon plus élégante que Hooke qu'elle coïncide avec toutes les observations astronomiques et terrestres. Cependant, il organisa par-dessus tout une campagne de relations publiques plus efficace, dans laquelle il prétendit de manière fallacieuse être l'initiateur de cette idée.

Newton publia une preuve élémentaire montrant que cette description du mouvement des astres fournit également une description exacte pour les cailloux jetés en l'air, ici-bas sur notre « Terre originelle ». Pour y parvenir, il compara l'accélération a_L de la Lune avec celle des pierres g . En ce qui concerne le rapport entre ces deux accélérations, la relation en l'inverse du carré prédit une valeur $a_L/g = R^2/d_L^2$, où R est le rayon de la Terre et d_L la distance de la Lune. La distance de la Lune peut être mesurée par triangulation, en comparant la position de la Lune sur la voûte céleste à partir de deux positions différentes sur la Terre**. Le résultat est $d_L/R = 60 \pm 3$, en fonction de la position orbitale de la Lune, prédisant de cette façon un rapport moyen $a_L/g = 3,6 \cdot 10^3$ à partir de la gravité universelle. Mais les deux accélérations peuvent également être mesurées directement. À la surface de la Terre, les pierres sont soumises à une accélération due à la gravitation d'une grandeur $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, telle qu'elle est déterminée en mesurant le temps que les pierres mettent pour tomber d'une hauteur donnée. Pour la Lune, la définition de l'accélération, $a = dv/dt$, dans le cas d'un mouvement circulaire – approximatif ici –

sa défense avec succès dans un procès pour sorcellerie, étudia la théologie protestante et devint professeur de mathématiques, d'astronomie et de rhétorique. Son premier ouvrage sur l'astronomie le rendit célèbre, puis il devint l'assistant de Tycho Brahe et, à la mort de son maître, fut nommé mathématicien impérial. Il fut le premier à utiliser les mathématiques dans la description des observations astronomiques et introduisit le domaine et le concept de « physique céleste ».

* Robert Hooke, (1635–1703), éminent physicien anglais et secrétaire de la Royal Society. Il écrivit également *Micrographie* (Micrographia), une superbe exploration illustrée de l'univers de l'infiniment petit.

** La première évaluation précise – mais pas la première tentative de mesure – fut accomplie en 1752 par les astronomes français Lalande et La Caille, qui mesurèrent en même temps la position de la Lune vue depuis Berlin et depuis Le Cap.

donne $a_L = d_L(2\pi/T)^2$, où $T = 2,4$ Ms est le temps que la Lune met pour effectuer une révolution autour de la Terre*. La mesure du rayon de la Terre** fournit $R = 6,4$ Mm, de telle façon que la distance moyenne Terre-Lune est $d_L = 0,38$ Gm. Nous obtenons ainsi $a_L/g = 3,6 \cdot 10^3$, en accord avec la prédiction ci-dessus. Grâce à ce célèbre « calcul lunaire » nous avons ainsi montré que la propriété en l'inverse du carré de la gravitation décrit en fait à la fois le mouvement de la Lune et celui des pierres. Peut-être désirerez-vous en déduire la valeur de GM ?

Défi 227 s

À partir de l'évidence que sur Terre tout mouvement évolue *in fine* vers le repos, tandis que dans les cieux tout mouvement est éternel, Aristote et beaucoup d'autres ont conclu que le mouvement dans le monde sublunaire possède des propriétés différentes du mouvement dans le monde supralunaire. Plusieurs penseurs avaient critiqué cette distinction, notamment le philosophe français et recteur de l'Université de Paris, Jean Buridan***. Le calcul lunaire fut le plus important résultat démontrant que cette distinction était fautive. C'est la raison pour laquelle l'expression (29) est nommée « loi » universelle de la gravitation.

Réf. 95

Cette conclusion nous autorise à élucider une autre vieille interrogation. Pourquoi la Lune ne tombe-t-elle pas du ciel ? Comme il se doit, la discussion précédente a montré que la chute est un mouvement provoqué par la gravitation. Donc la Lune est effectivement en train de chuter, avec la particularité qu'au lieu de tomber vers la Terre elle est continuellement en train de tomber autour d'elle. La Figure 70 schématise cette idée. La Lune rate sans cesse la Terre****.

* Cela se déduit facilement en remarquant que, pour un objet en mouvement circulaire, la grandeur v de la vitesse $\mathbf{v} = d\mathbf{x}/dt$ est donnée par $v = 2\pi r/T$. Le tracé du vecteur $\mathbf{v}$ au cours du temps, dénommé un *hodographe*, indique qu'il se comporte exactement comme la position de l'objet. Par conséquent la grandeur a de l'accélération $\mathbf{a} = d\mathbf{v}/dt$ est donnée par l'expression associée, à savoir $a = 2\pi v/T$.

Défi 224 s

** C'est le nombre le plus difficile à évaluer par soi-même. Le truc le plus surprenant pour déterminer la taille de la Terre est le suivant : observez un coucher de Soleil depuis le jardin d'une propriété, avec un chronomètre à la main. Lorsque le dernier rayon du Soleil disparaît, enclenchez le chronomètre et grimpez bien vite les étages de la maison. Là, le Soleil est toujours visible. Arrêtez le chronomètre quand le Soleil disparaît à nouveau et notez le temps t . Mesurez la hauteur h entre les deux positions de l'œil lorsque le Soleil était observé. Le rayon R de la Terre est alors donné par $R = k h/t^2$, avec $k = 378 \cdot 10^6 \text{ s}^2$.

Réf. 93

Défi 225 pe

Il existe également une manière simple pour mesurer la distance de la Lune, une fois que la taille de la Terre est connue. Prenez une photographie de la Lune lorsqu'elle est haute dans le ciel, et appelez θ son angle par rapport au zénith, c'est-à-dire par rapport à la verticale. Prenez une autre photo de la Lune quelques heures plus tard, lorsqu'elle est juste au-dessus de l'horizon. Sur cette image, contrairement à une illusion d'optique commune, la Lune est plus petite, parce qu'elle est plus éloignée. La raison en devient immédiatement claire en utilisant un croquis. Si q est le rapport entre les deux diamètres angulaires, la distance Terre-Lune d_L est donnée par la relation $d_L^2 = R^2 + [2Rq \cos \theta / (1 - q^2)]^2$. Amusez-vous à dériver celle-ci à partir du croquis.

Réf. 94

Page 53

Défi 226 pe

Une autre possibilité est de déterminer la taille de la Lune en comparant celle-ci à la taille de l'ombre de la Terre pendant une éclipse. La distance de la Lune est alors déduite de sa taille angulaire, environ $0,5^\circ$.

*** Jean Buridan (v. 1295 à v. 1366) fut également un des premiers penseurs modernes à faire l'hypothèse de la rotation de la Terre autour d'un axe.

**** Une autre façon d'exprimer cela est d'utiliser la réponse du physicien hollandais Christiaan Huygens (1629–1695) : la Lune ne tombe pas du ciel à cause de l'accélération centrifuge. Tel qu'il est expliqué à la page III, de nos jours cette interprétation ne recueille pas la faveur de la plupart des universités.

Réf. 96

Il existe un admirable problème en rapport avec la partie gauche de la figure : quels points sur la surface de la Terre peuvent être touchés en tirant une balle depuis une montagne ? Et quels points peuvent être touchés en tirant horizontalement ?

Défi 228 d



FIGURE 70 Le point de vue d'un physicien et celui d'un artiste concernant la chute de la Lune : un schéma de Christiaan Huygens (l'échelle n'est pas respectée) et une statue en marbre d'Auguste Rodin.

La gravité universelle explique aussi pourquoi la Terre et la plupart des planètes sont (approximativement) sphériques. Puisque la gravité décroît avec l'augmentation de la distance, un corps liquide dans l'espace essaiera toujours de se rassembler sous une forme sphérique. Vue à grande échelle, la Terre est en fait liquide. Nous savons également que la Terre est en train de se refroidir – c'est la raison pour laquelle la croûte et les continents se sont formés. La sphéricité des objets solides plus petits rencontrés dans l'espace, comme la Lune, implique donc qu'ils étaient liquides en des temps reculés.

PROPRIÉTÉS DE LA GRAVITATION

La gravitation implique que la trajectoire d'une pierre ne décrive pas une parabole, comme il fut déclaré au début, mais réellement une ellipse autour du centre de la Terre. C'est pour exactement la même raison que les planètes se déplacent le long d'ellipses autour du soleil. Êtes-vous capable de valider cette affirmation ?

Défi 229 pe

La gravitation universelle nous permet de résoudre une énigme. La valeur bizarre de l'accélération $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ que nous avons rencontrée dans l'équation (4) est finalement due à la relation

$$g = GM_{\text{Terre}}/R_{\text{Terre}}^2 \quad (30)$$

Cette équation peut être devinée à partir de l'équation (29) en considérant que la Terre est sphérique. L'accélération usuelle g de la gravité est donc une conséquence de la taille de la Terre, de sa masse et de la valeur de la constante universelle de la gravitation G . Certes, la valeur de g est presque constante à la surface de la Terre parce que celle-ci est presque une sphère. L'expression (30) explique également pourquoi g s'amenuise au fur et à mesure que nous nous élevons au-dessus de la Terre, et les écarts de la forme de la Terre par rapport à la sphéricité explicitent pourquoi g est différent aux pôles et plus élevé sur un plateau. (Que serait-il sur la Lune ? Sur Mars ? Sur Jupiter ?)

Défi 230 s

D'ailleurs, il est possible d'inventer une machine simple, autre qu'un Yo-Yo, qui diminue l'accélération effective de la gravité d'une certaine quantité connue, nous permettant ainsi de mesurer sa valeur plus facilement. Pouvez-vous imaginer laquelle ?

Défi 231 s

Remarquez que 9,8 est approché par π^2 . Ce n'est *pas* une coïncidence : le mètre a été fixé de telle manière que cela soit juste. La période T d'un pendule en oscillation,

Réf. 97 proposition était à peu près identique à celle du pendule – mais beaucoup plus précise. La définition du mètre par le méridien fut alors adoptée par l'Assemblée nationale en France le 26 mars 1791, selon la formule consacrée que « un méridien passe sous les pieds de chaque être humain, et tous les méridiens sont égaux ». (Néanmoins, la distance de l'équateur aux pôles n'est pas exactement de 10 Mm. C'est une étrange histoire. Un des deux géographes qui déterminèrent la taille du premier mètre étalon fut malhonnête. Les données qu'il avait fournies pour ses relevés – selon la méthode générale indiquée sur la Figure 71 – étaient inventées de toutes pièces. Ainsi, le premier mètre étalon officiel à Paris était plus court qu'il aurait dû l'être.)

Mais nous pouvons encore nous poser la question : pourquoi la Terre a-t-elle la masse et la taille qu'elle a ? Et pourquoi G a-t-il la valeur qu'il a ? La première question requiert la connaissance de l'histoire du Système solaire, elle est toujours sans réponse et reste un domaine actif de la recherche. La seconde question est entrevue dans l'Annexe B.

Si tous les objets s'attirent mutuellement, il devrait en être de même pour les objets de notre vie quotidienne. La gravité doit aussi fonctionner à *petite échelle*. C'est bien le cas, mais les effets sont si petits que ce n'est que longtemps après qu'ils eurent été prédits par la gravité universelle qu'ils purent être mesurés. Mesurer cet effet permet de déterminer la constante gravitationnelle G .

Défi 235 s Remarquez que mesurer la constante gravitationnelle G est également la seule manière de déterminer la masse de la Terre. Le premier à le faire, en 1798, fut le physicien anglais Henry Cavendish : il utilisa le dispositif, les idées et la méthode de John Michell qui décéda alors qu'il tentait de réaliser l'expérience. Michell et Cavendish* nommèrent cet objectif et le résultat de leurs expériences la « pesée de la Terre ». Êtes-vous capable d'imaginer comment ils ont procédé ? La valeur issue des expérimentations récentes donne

$$G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2 = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg s}^2. \quad (32)$$

L'expérience de Cavendish était donc la première à confirmer que la gravité fonctionnait aussi à petite échelle.

Défi 236 s Par exemple, deux individus moyens séparés de 1 m ressentent une accélération l'un vers l'autre qui est plus petite que celle exercée par une mouche commune lorsqu'elle se pose sur la peau. Donc nous faisons fi, habituellement, de l'attraction entre les personnes. Lorsque nous en tenons compte, c'est pour une raison beaucoup plus puissante. Cette simple évaluation prouve donc que la gravitation ne peut pas être la véritable cause qui fait que les gens tombent amoureux, et que l'attraction sexuelle ne trouve pas son origine dans la gravitation mais dans une source différente. Les fondements de cette autre interaction, l'amour, seront étudiés plus tard dans notre promenade : elle est appelée l'*électromagnétisme*.

Mais la gravité révèle bien d'autres propriétés plus intéressantes. Les effets de la gravitation peuvent aussi être décrits par une autre observable, à savoir le *potentiel* (gravitationnel) φ . Nous avons alors la relation simple que l'accélération est donnée par le *gradient*

* Henry Cavendish (1731–1810) fut un des grands génies de la physique. Riche et solitaire, il découvrit un grand nombre de lois de la nature, mais ne les publia jamais. S'il l'avait fait, son nom serait bien plus connu.

John Michell (1724–1793) était prêtre catholique, géologue et astronome amateur.

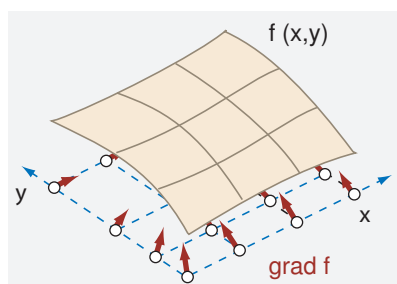


FIGURE 72 Le potentiel et le gradient.

du potentiel

$$\mathbf{a} = -\nabla\varphi \quad \text{ou} \quad \mathbf{a} = -\text{grad } \varphi . \quad (33)$$

Le gradient est uniquement un terme savant pour définir la « direction dans laquelle la pente est la plus importante ». Il est défini pour chaque point d'une inclinaison, il est grand pour une pente abrupte et petit pour une peu prononcée. Il pointe dans la direction de la montée la plus inclinée, comme indiqué sur la Figure 72. Le gradient est noté ∇ , prononcez « nabla », et est mathématiquement défini comme étant le vecteur $\nabla\varphi = (\partial\varphi/\partial x, \partial\varphi/\partial y, \partial\varphi/\partial z) = \text{grad } \varphi$. Le signe négatif dans (33) est introduit par convention, dans le but d'obtenir des valeurs de potentiel plus élevées pour des altitudes plus grandes*. Pour un corps ponctuel ou sphérique de masse M , le potentiel φ est

$$\varphi = -G \frac{M}{r} . \quad (34)$$

Un potentiel simplifie considérablement la description du mouvement, puisqu'un potentiel est additif : en se donnant le potentiel d'une particule ponctuelle, nous pouvons calculer le potentiel et donc le mouvement autour de n'importe quel autre objet de forme irrégulière**.

* En deux dimensions ou plus, les pentes sont notées $\partial\varphi/\partial z$ – où ∂ est toujours prononcé « d » – parce que dans ces cas l'expression $d\varphi/dz$ possède une signification légèrement différente. Les détails de ceci dépassent le cadre de cette excursion.

** D'autre part, pour un corps étendu quelconque, le potentiel est établi en exigeant que la *divergence* de son gradient soit donnée par la masse (ou la charge) par unité de volume multipliée par une certaine constante de proportionnalité. Plus concrètement, nous avons

$$\Delta\varphi = 4\pi G\rho \quad (35)$$

où $\rho = \rho(\mathbf{x}, t)$ est la masse volumique du corps et l'opérateur Δ , prononcez « delta », est défini par $\Delta f = \nabla \cdot \nabla f = \partial^2 f / \partial x^2 + \partial^2 f / \partial y^2 + \partial^2 f / \partial z^2$. L'équation (35) est appelée *équation de Poisson* pour le potentiel φ . Elle est baptisée d'après Siméon Denis Poisson (1781–1842), éminent physicien et mathématicien français. Les positions pour lesquelles ρ n'est pas nul sont appelées les *sources* du potentiel. Le mot source ainsi dénommé $\Delta\varphi$ d'une fonction est une quantification du nombre de fois où la fonction $\varphi(\mathbf{x})$ en un point $\mathbf{x}$ diffère de la valeur moyenne dans une région autour du point. (Pouvez-vous montrer cela, en montrant que $\Delta\varphi \approx \bar{\varphi} - \varphi(\mathbf{x})$?) En d'autres termes, l'équation de Poisson (35) suggère que la valeur réelle du potentiel en un point est la même que la valeur moyenne autour du point moins la masse volumique multipliée par $4\pi G$. En particulier, dans la situation d'un espace vide, le potentiel en un point est égal à la moyenne du potentiel autour de ce point.

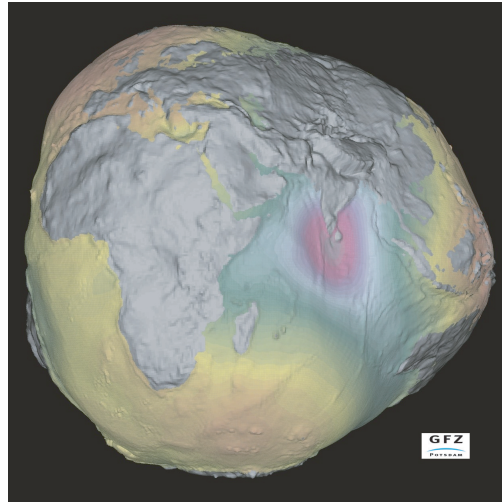


FIGURE 73 La forme de la Terre, en exagérant les hauteurs. (© GeoForschungsZentrum Potsdam)

Le potentiel φ est une grandeur captivante : avec un simple nombre à chaque position de l'espace, nous pouvons décrire l'apparence du vecteur de l'accélération gravitationnelle. Cela aboutit mécaniquement à la conclusion que la gravité en Nouvelle-Zélande agit dans la direction opposée à la gravité à Paris. De plus, le potentiel suggère l'introduction de l'énergie potentielle U en posant

$$U = m\varphi \quad (36)$$

et nous permet ainsi de déterminer la variation de l'énergie cinétique T d'un corps en chute libre d'un point 1 à un point 2 par

$$T_1 - T_2 = U_2 - U_1 \quad \text{ou} \quad \frac{1}{2}m_1\mathbf{v}_1^2 - \frac{1}{2}m_2\mathbf{v}_2^2 = m\varphi_2 - m\varphi_1. \quad (37)$$

D'une autre façon, l'énergie totale, définie comme étant la somme des énergies cinétique et potentielle, est *conservée* durant le mouvement due à la gravité. C'est une caractéristique inhérente à la gravitation. Toutes les accélérations ne dérivent pas forcément d'un potentiel. Les systèmes qui ont cette propriété sont appelés *conservatifs*. Les accélérations dues aux frottements ne sont pas conservatives, mais celles dues à l'électromagnétisme le sont.

De manière intéressante, le nombre d de dimensions de l'espace est contenu implicitement dans le potentiel d'une masse sphérique : sa dépendance par rapport au rayon r est en réalité $1/r^{d-2}$. L'exposant $d - 2$ a été vérifié expérimentalement jusqu'à une précision élevée : aucune déviation de d par rapport à 3 n'a été relevée.

Défi 238 s
Réf. 100

Souvent, le concept de *champ gravitationnel* est introduit, défini comme $\mathbf{g} = -\nabla\varphi$. Nous négligerons ce point dans notre promenade, parce que nous découvrirons, en suivant la théorie de la relativité, que la gravité n'est pas du tout causée par un champ. En réalité, même le concept de potentiel gravitationnel se révèle n'être qu'une approximation.

- Réf. 101 Le concept de potentiel nous aide à mieux comprendre la *forme* de la Terre. Puisque la majeure partie de la Terre est toujours liquide lorsqu'elle est observée à grande échelle, sa surface est toujours horizontale par rapport à la direction déterminée par la combinaison des accélérations de la gravité et de la rotation. En résumé, la Terre n'est *pas* une sphère. Ce n'est pas un ellipsoïde non plus. La forme mathématique définie par l'exigence d'équilibre est appelée un *géoïde*. La forme du géoïde diffère d'un ellipsoïde convenablement choisi de tout au plus 50 m. Pouvez-vous décrire mathématiquement le géoïde ? Le géoïde est une excellente approximation de la forme véritable de la Terre. Le niveau de la mer diverge de celui-ci de moins de 20 mètres. Les différences peuvent être mesurées avec un satellite équipé d'un radar et sont d'un intérêt crucial pour les géologues et les géographes. Par exemple, il a été montré que le pôle Sud est plus proche du plan équatorial que le pôle Nord d'environ 30 m. Cela est probablement dû aux vastes étendues massives des terres de l'hémisphère Nord.
- Réf. 102
- Défi 239 pe
- Page 95 Nous avons vu précédemment comment l'inertie de la matière, à travers ladite « force centrifuge », agrandit le rayon de la Terre à l'équateur. Dit autrement, la Terre est *aplatie* aux pôles. L'équateur possède un rayon a de 6,38 Mm, tandis que la distance b des pôles au centre de la Terre est de 6,36 Mm. L'écrasement précis $(a - b)/a$ est égal à $1/298,3 = 0,0034$. En conséquence, le sommet du mont Chimborazo en Équateur, même si sa hauteur n'est que de 6 267 m au-dessus du niveau de la mer, est plus éloigné du centre de la Terre d'environ 20 km que le sommet du mont Sagarmatha* au Népal, dont la hauteur au-dessus du niveau de la mer est de 8 850 m. Le sommet du mont Chimborazo est en réalité le point de la surface du globe le plus éloigné du centre de la Terre.
- Appendix B Par conséquent, si la Terre s'arrêtait de tourner (mais gardait sa forme), l'eau contenue dans les océans s'écoulerait vers le nord : toute l'Europe se retrouverait sous l'eau, mis à part les quelques montagnes de la chaîne des Alpes qui ont une hauteur supérieure à environ 4 km. Les régions nordiques de l'Europe seraient recouvertes par une couche d'eau de 6 km à 10 km d'épaisseur. Le mont Sagarmatha serait à 11 km au-dessus du niveau de la mer. Si nous prenons en compte le changement de la forme de la Terre qui en résulterait, ces chiffres seraient plus petits. De plus, le changement de forme provoquerait des tempêtes et des séismes extrêmement violents. Aussi longtemps que ces effets ne surviennent pas, nous pourrions être *certain*s que le Soleil se lèvera vraiment demain,
- Page 86 contrairement à ce que certains philosophes laissent sous-entendre.

LA DYNAMIQUE – COMMENT LES CHOSSES BOUGENT-ELLES DANS PLUSIEURS DIMENSIONS ?

Résumons un peu la situation. Si un corps ne peut se déplacer que le long d'une ligne (éventuellement courbe), les notions d'énergies cinétique et potentielle sont suffisantes pour déterminer la façon dont il se déplace. Brièvement, le mouvement en *une dimension* découle directement de la conservation de l'énergie.

Si plus de *deux dimensions spatiales* sont impliquées, la conservation de l'énergie est insuffisante pour caractériser la manière dont un corps se déplace. Si un corps peut se mouvoir dans *deux dimensions*, et si les forces en jeu sont internes (ce qui est toujours le cas en théorie, mais jamais en pratique), la conservation du moment cinétique peut être invoquée. Le mouvement complet en deux dimensions découle donc de la conservation

* Le mont Sagarmatha est plus connu sous le nom de mont Everest.

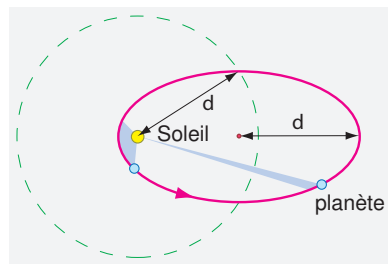


FIGURE 74 Le mouvement d'une planète autour du Soleil, indiquant son demi-grand axe d , qui représente également la distance moyenne au Soleil.

Défi 240 s

de l'énergie et du moment cinétique. Par exemple, toutes les propriétés de la chute libre vérifient la conservation de l'énergie et du moment cinétique. (Êtes-vous capable de le montrer ?)

Page 173

Dans le cas du mouvement dans *trois dimensions*, une loi plus générale est nécessaire pour déterminer le mouvement. Il apparaît que tout mouvement découle d'un principe élémentaire : l'intégrale de la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle sur un intervalle de temps est toujours la plus petite possible. C'est le *principe de moindre action*. Nous expliquerons plus en détail cette méthode de calcul par la suite.

Pour des mouvements gravitationnels simples, le mouvement est bidimensionnel. La plupart des problèmes en trois dimensions dépassent le cadre de ce texte. En fait, quelques-uns de ces problèmes font toujours l'objet de recherches actives. Dans cette aventure, nous explorerons le mouvement tridimensionnel uniquement pour des situations sélectionnées qui fournissent d'importantes perspectives.

LA GRAVITATION DANS LE CIEL

L'expression de l'accélération due à la gravitation $a = GM/r^2$ décrit également le mouvement de toutes les planètes autour du Soleil. N'importe qui peut vérifier que les planètes restent toujours à l'intérieur du *Zodiaque*, une étroite bande qui traverse le ciel. La ligne centrale du Zodiaque représente la trajectoire du Soleil et est appelée l'*écliptique*, parce que la Lune doit être située sur celle-ci pour provoquer une éclipse. Mais le mouvement détaillé des planètes n'est pas aisé à décrire*. Quelques générations avant Hooke, l'astronome souabe Johannes Kepler avait deviné plusieurs « lois » dans sa recherche scrupuleuse du mouvement des planètes dans le Zodiaque. Les trois principales sont les suivantes :

1. Les planètes décrivent des trajectoires elliptiques dont le Soleil occupe l'un des foyers (1609).
2. Les planètes balaient des aires égales en des temps égaux (1609).
3. Toutes les planètes ont le même rapport T^2/d^3 entre la période sidérale T et le demi-grand axe d (1619).

Les principaux résultats sont formulés dans la Figure 74. La découverte de ces trois « lois » a nécessité un travail véritablement titanesque. Kepler n'avait aucune machine à calculer à sa disposition, ni même de règle à calcul. Le procédé qu'il utilisa pour ses calculs faisait

* La hauteur apparente de l'écliptique varie selon la période de l'année et c'est la raison pour laquelle les saisons existent. Par conséquent, les saisons sont aussi des répercussions de la gravitation.



FIGURE 75 La modification de l'apparence de la Lune pendant le mois lunaire, révélant sa libration. (© Martin Elsässer)

appel aux logarithmes, tout juste découverts. Toute personne qui a déjà utilisé des tables de logarithmes pour réaliser des calculs peut avoir une idée de la quantité de travail qui se trouve derrière ces trois découvertes.

La seconde « loi » à propos des aires balayées égales signifie que les planètes se meuvent plus rapidement lorsqu'elles sont proches du Soleil. C'est une autre façon de formuler la conservation du moment cinétique. Mais maintenant, nous arrivons au point crucial. Le volume colossal du travail réalisé par Brahe et Kepler peut être synthétisé dans l'expression $a = GM/r^2$. Pouvez-vous confirmer que les trois « lois » découlent toutes de l'expression de l'attraction universelle de Hooke ? En publiant cette découverte, Newton réalisa sa réussite majeure. Essayez de reproduire cet exploit : cela vous familiarisera non seulement avec les écueils, mais également avec le potentiel de la physique, et vous donnera la satisfaction réjouissante que procure la résolution des énigmes.

Newton a résolu l'énigme à l'aide de croquis géométriques. Newton ne pouvait pas écrire, et encore moins manipuler, les équations différentielles lorsqu'il a publié ses résultats sur l'attraction universelle. En fait, il est bien connu que les méthodes de notation et de calcul de Newton étaient rudimentaires. (Beaucoup plus rudimentaires que les vôtres !) Le mathématicien anglais Godfrey Hardy* avait l'habitude de dire que l'insistance à utiliser la notation intégrale et différentielle de Newton plutôt que la méthode antérieure et meilleure due à son rival Leibniz, toujours en usage aujourd'hui, avait projeté les mathématiques anglaises cent ans en arrière.

Kepler, Hooke et Newton devinrent célèbres parce qu'ils mirent de l'ordre dans la description des mouvements planétaires. Cette réussite, bien que d'utilité pratique réduite, fut largement diffusée parce que l'astrologie était ancrée dans les esprits depuis très longtemps.

Pourtant, la gravitation ne se limite pas à cela. L'attraction universelle explique le mouvement et la forme de la Voie lactée et des autres galaxies, le mouvement de nombreux

* Godfrey Harold Hardy (1877–1947) était un théoricien des nombres, Britannique de premier plan, et l'auteur de la célèbre *Apologie d'un mathématicien*. Il « découvrit » également le célèbre mathématicien indien Srinivasa Ramanujan et le rapatria en Grande-Bretagne.

Défi 241 pe

Réf. 24

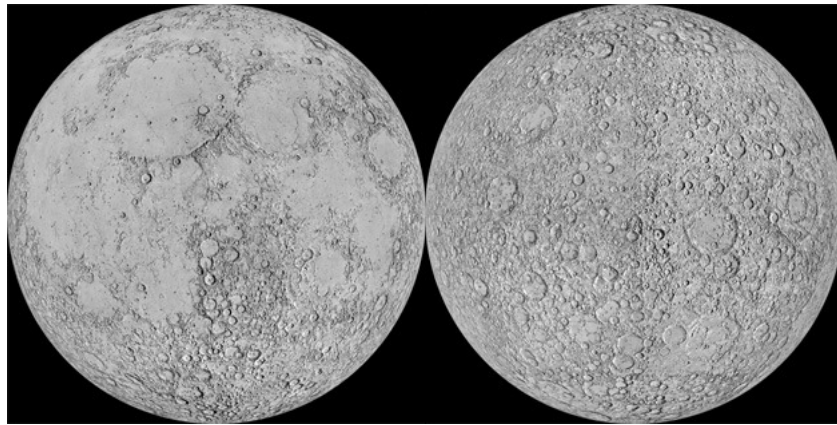


FIGURE 76 Cartographies de la face visible (à gauche) et de la face cachée (à droite) de la Lune, montrant le nombre de fois que cette dernière a protégé la Terre d'impacts de météorites (avec l'amabilité de l'USGS).

Défi 242 s

phénomènes climatiques, et explique pourquoi la Terre possède une atmosphère mais pas la Lune. (Pouvez-vous expliquer cela ?) En fait, la gravitation universelle nous en apprend beaucoup plus au sujet de la Lune.

LA LUNE

Combien dure une journée sur la Lune ? La réponse est à peu près 14 journées terrestres. C'est le temps qu'il faut sur la Lune pour voir le Soleil de nouveau à une position donnée.

Nous entendons souvent que la Lune montre toujours la même face à la Terre. Mais ceci est faux. Comme nous pouvons le vérifier à l'œil nu, un point de repère fixé au centre de la face de la Lune lors de la pleine Lune n'est pas au centre une semaine après. Les divers mouvements qui conduisent à cette modification sont appelés *librations*. Elles sont indiquées dans le film de la Figure 75*. Ces mouvements apparaissent principalement parce que la Lune ne décrit pas une orbite circulaire, mais elliptique, autour de la Terre et parce que l'axe de la Lune est légèrement incliné par rapport à celui de sa révolution autour de la Terre. Par conséquent, autour de 45 % de la surface de la Lune est constamment masquée à la Terre.

Les premiers clichés des régions cachées furent pris dans les années 1960 par un satellite artificiel soviétique. Les satellites modernes ont fourni des cartes précises, comme sur la Figure 76. La surface de la face cachée est beaucoup plus accidentée que celle de la face visible, puisqu'elle est du côté qui intercepte la plupart des astéroïdes qui tombent sous l'influence de la Terre. Ainsi l'attraction de la Lune permet de dévier les astéroïdes de la Terre. Le nombre potentiel d'extinctions massives de la vie animale est donc réduit à une portion petite, mais non négligeable. En d'autres termes, l'attraction gravitationnelle de la Lune a de nombreuses fois sauvé la race humaine de l'extermination**.

* Le film est au format AVI DivX 5 et nécessite un composant logiciel (plug-in) dans Acrobat Reader pour pouvoir être visualisé.

** Les pages Web <http://cfa-www.harvard.edu/iau/lists/Closest.html> et InnerPlot.html donnent une idée du

Les voyages sur la Lune des années 1970 ont également montré que la Lune tire son origine de la Terre elle-même : il y a très longtemps, un objet frappa la Terre de façon presque tangentielle et projeta une portion considérable de matière dans l'espace. C'est le seul mécanisme capable de donner une explication à la grande taille de la Lune, à son faible contenu en fer et également à sa composition générale en matériaux.

Réf. 103

Réf. 104

Défi 243 s

La Lune est en train de s'éloigner de la Terre à raison de 3,8 cm par an. Ce fait entérine l'hypothèse ancienne qui stipulait que les marées ralentissent la rotation de la Terre. Pouvez-vous imaginer comment cette déduction a pu être effectuée ? Puisque la Lune ralentit la Terre, la Terre change aussi de forme en réponse à cet effet. (Souvenez-vous que la forme de la Terre dépend de sa vitesse de rotation.) Ces variations de forme influencent l'activité tectonique de la Terre, et peut-être aussi la dérive des continents.

Réf. 105

La Lune a de nombreux effets sur la vie animale. Un exemple célèbre est le moustique *Clunio*, qui vit sur les côtes à fortes marées. *Clunio* passe entre six et douze semaines au stade larvaire, il se métamorphose alors pour vivre seulement pendant une ou deux heures comme un insecte volant adulte, temps pendant lequel il se reproduit. Les moustiques ne se reproduiront que s'ils sont sortis pendant la période de marée basse d'une grande marée. Les grandes marées sont les marées particulièrement fortes qui se produisent pendant les pleines et nouvelles lunes, lorsque les effets solaire et lunaire s'additionnent. Elles apparaissent seulement tous les 14,8 jours. En 1995, Dietrich Neumann a montré que les larves ont deux horloges intégrées, une de rythme circadien et l'autre de rythme circalunaire, qui déterminent ensemble la métamorphose à ces quelques heures précises où l'insecte peut se reproduire. Il montra également que l'horloge circalunaire est synchronisée par la luminosité nocturne de la Lune. Autrement dit, les larves surveillent la Lune la nuit et décident ainsi quand elles devront se métamorphoser : elles sont les plus petits astronomes connus.

Réf. 106

Si les insectes peuvent avoir des cycles circalunaires, il ne devrait pas être surprenant que les femmes aient de tels cycles. Cependant, dans ce cas précis, l'origine de la longueur du cycle est toujours inconnue.

Réf. 107

Réf. 108

Page 100

La Lune aide également à stabiliser l'inclinaison de l'axe de la Terre, le conservant dans une position plus ou moins figée relativement au plan de la trajectoire autour du Soleil. Sans la Lune, l'axe changerait de direction de façon imprévisible, nous n'aurions pas de rythme régulier du jour et de la nuit, nous aurions des variations climatiques extrêmement fortes, et l'évolution de la vie aurait été impossible. Sans la Lune, la Terre tournerait aussi beaucoup plus rapidement et nous aurions un temps beaucoup moins clément. Le principal effet résiduel de la Lune sur la Terre, la précession de son axe, est responsable des ères glaciaires.

Réf. 109

En outre, la Lune protège la Terre des rayons cosmiques en augmentant considérablement le champ magnétique terrestre. En d'autres termes, l'importance de la Lune est cruciale pour l'évolution de la vie. Comprendre comment les planètes de la taille de la Terre arrivent à avoir des satellites de la taille de la Lune est donc primordial pour estimer la probabilité que la vie existe sur d'autres planètes. Jusqu'à présent, il semble que les très grands satellites soient rares, il n'y a que quatre lunes recensées plus grandes que celle de la Terre, mais elles tournent autour de planètes plus grosses, à savoir Jupiter et

nombre approximatif d'objets qui frappent la Terre chaque année. Sans la Lune, nous aurions beaucoup plus de cataclysmes.

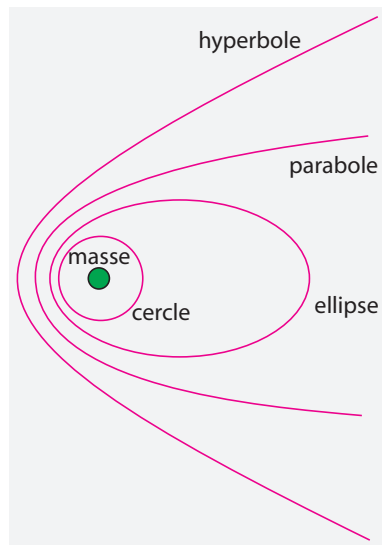


FIGURE 77 Les orbites possibles dues à l'attraction universelle.

Saturne. En fait, la formation des satellites est toujours un domaine actif de recherches. Mais revenons aux conséquences de la gravitation dans le ciel.

LES ORBITES

La trajectoire d'un corps orbitant autour d'un autre sous l'influence de la gravité forme une ellipse dont l'un des foyers est occupé par le corps central. Une orbite circulaire est également possible, un cercle étant un cas particulier d'ellipse. La trajectoire d'un objet gravitant près d'un autre peut aussi prendre la forme d'une parabole ou d'une hyperbole, comme indiqué sur la Figure 77. Les cercles, ellipses, paraboles et hyperboles sont collectivement désignés sous l'appellation *sections coniques*. En réalité chacune de ces courbes peut être mise en évidence en coupant un cône avec un couteau.

Défi 244 e

Pouvez-vous le montrer ?

Si les orbites sont principalement des ellipses, il s'ensuit que les comètes reviennent. L'astronome anglais Edmund Halley (1656–1742) fut le premier à exprimer cette conclusion et à prédire le retour d'une comète. Elle arriva à la date prévue en 1756, et est dorénavant baptisée d'après son nom. La période de la comète de Halley est comprise entre 74 et 80 ans, la première observation enregistrée a été faite il y a 22 siècles, et elle a été observée depuis à chacun de ses 30 passages, le dernier datant de 1986.

Selon l'énergie initiale et le moment cinétique initial du corps par rapport à l'astre central, il existe deux autres possibilités : les trajectoires *paraboliques* et les trajectoires *hyperboliques*. Pouvez-vous déterminer les conditions que l'énergie et le moment cinétique doivent vérifier pour que ces trajectoires apparaissent ?

Défi 245 pe

Concrètement, les trajectoires paraboliques n'existent pas dans la nature. (Bien que certaines comètes semblent s'approcher de cette situation lorsqu'elles se déplacent autour du Soleil, presque toutes les comètes suivent des courbes elliptiques.) Les trajectoires hyperboliques existent : des satellites artificiels en empruntent lorsqu'ils sont lancés vers une planète, généralement dans le but de modifier la direction du satellite à travers le

Système solaire.

Pourquoi la « loi » en l'inverse du carré nous amène-t-elle aux sections coniques ? Premièrement, pour deux corps, le moment cinétique total L est une constante :

$$L = mr^2 \dot{\varphi} \quad (38)$$

et par conséquent les mouvements se produisent dans un plan. L'énergie E est aussi une constante

$$E = \frac{1}{2} m \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} m \left(r \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 - G \frac{mM}{r} . \quad (39)$$

Défi 246 pe Ensemble, ces deux équations impliquent que

$$r = \frac{L^2}{Gm^2M} \cdot \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{2EL^2}{G^2m^3M^2}} \cos \varphi} . \quad (40)$$

Maintenant, toute courbe définie par l'expression générale

$$r = \frac{C}{1 + e \cos \varphi} \quad \text{ou} \quad r = \frac{C}{1 - e \cos \varphi} \quad (41)$$

est une ellipse pour $0 < e < 1$, une parabole pour $e = 1$ et une hyperbole pour $e > 1$, un des foyers étant à l'origine. La quantité e , appelée *excentricité*, décrit comment la courbe est resserrée. En d'autres mots, un corps en orbite autour d'une masse centrale suit une section conique.

Dans toutes les orbites, la masse pesante centrale se déplace également. En fait, les deux corps orbitent autour de leur centre de masse commun. Les deux corps suivent le même type de courbe (ellipse, parabole ou hyperbole), mais les dimensions de chaque courbe diffèrent.

Défi 247 e

Si plus de deux objets se déplacent sous une influence gravitationnelle mutuelle, de nombreuses possibilités supplémentaires pour le mouvement surgissent. La classification et les mouvements sont assez complexes. En fait, ce problème connu sous le nom de *problème de plusieurs corps* est toujours un thème de recherche, et les résultats sont mathématiquement fascinants. Regardons quelques exemples.

Quand plusieurs planètes encerclent une étoile, elles s'attirent également l'une vers l'autre. Les planètes ne se déplacent donc pas le long d'ellipses parfaites. La déviation la plus grande est l'avancée du périhélie, tel qu'indiqué sur la [Figure 55](#). Elle est observée pour Mercure et quelques-unes des autres planètes, y compris la Terre. D'autres différences par rapport à la forme elliptique surgissent le temps d'une révolution. En 1846, les écarts observés du mouvement de la planète Uranus par rapport à la trajectoire prévue par la gravité universelle furent mis à profit pour prédire l'existence d'une autre planète, Neptune, qui fut découverte quelque temps plus tard.

Page 78

Nous avons vu que la masse est toujours positive et que la gravitation est par conséquent toujours attractive. Il n'y a pas d'*antigravité*. La gravité peut-elle néanmoins être utilisée pour la *lévitation*, éventuellement en utilisant plus de deux corps ? Oui, il y en a

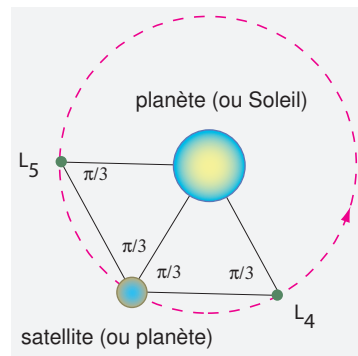


FIGURE 78 Deux points de Lagrange stables.

deux exemples*. Les premiers sont les satellites géostationnaires, qui sont utilisés pour les transmissions de chaînes télévisées et d'autres signaux depuis et vers la Terre.

Les *points de Lagrange* (ou *points de libration*) en sont les seconds exemples. Baptisés d'après leur découvreur, ce sont des points de l'espace situés à proximité d'un système à deux corps, tel que Lune-Terre ou Terre-Soleil, à l'emplacement desquels des petits objets ont une position d'équilibre stable. Un aperçu en est donné sur la Figure 78. Pouvez-vous déterminer leur position précise, en vous souvenant qu'il faut prendre en compte la rotation ? Il y a trois points de Lagrange supplémentaires sur la ligne Terre-Lune. Combien d'entre eux sont-ils stables ?

Il existe des milliers d'astéroïdes, appelés *astéroïdes troyens*, à l'emplacement et autour des points de Lagrange du système Soleil-Jupiter. En 1990, un astéroïde troyen du système Mars-Soleil fut repéré. Finalement, en 1997, un astéroïde « presque troyen » a été découvert qui suit la Terre dans sa course autour du Soleil (il est seulement transitoire et suit une orbite quelque peu compliquée). Ce « second compagnon » de la Terre a un diamètre de 5 km. De la même manière, une forte concentration de poussières a été observée aux principaux points de Lagrange du système Terre-Lune.

Pour résumer, l'équation simple $\mathbf{a} = -GM\mathbf{r}/r^3$ décrit correctement un grand nombre de phénomènes célestes. La première personne à révéler de manière claire que cette expression explique tout ce qui se passe dans le ciel fut Pierre Simon Laplace** dans son fameux livre *Traité de mécanique céleste*. Lorsque Napoléon l'interrogea sur le fait qu'il ne faisait aucune mention du Créateur dans son livre, Laplace répondit par sa célèbre sentence, qui résume à elle seule l'ouvrage : « *Je n'ai pas eu besoin de cette hypothèse* ». En particulier, Laplace étudia la stabilité du Système solaire, l'excentricité de l'orbite lunaire et les excentricités des orbites planétaires, en donnant toujours un parfait accord entre les calculs théoriques et les observations.

Ces résultats sont de véritables prouesses pour l'expression simple de l'attraction universelle. Ils expliquent également pourquoi elle est qualifiée d'« universelle ». Mais jusqu'à quelle précision cette formule peut-elle aller ? Puisque l'astronomie permet la me-

* La lévitation est discutée en détail à la page ??.

** Pierre Simon Laplace (n. Beaumont-en-Auge 1749, d. Paris 1827), important mathématicien français. Son traité fut édité en cinq volumes entre 1798 et 1825. Il fut le premier à proposer l'idée que le Système solaire s'est formé à partir d'un nuage de gaz en rotation, et un des premiers personnages à imaginer et explorer les trous noirs.

Défi 248 pe

Défi 249 pe

Réf. 110

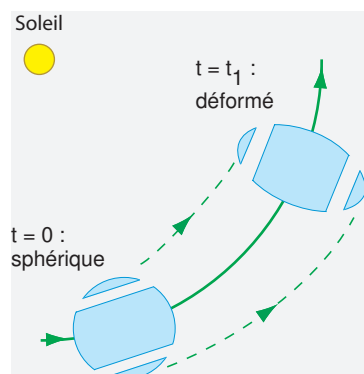


FIGURE 79 Déformation de marée due à la gravité.



FIGURE 80 L'origine des marées.

sure la plus précise des mouvements gravitationnels, elle fournit également les tests les plus rigoureux. En 1849, Urbain Le Verrier conclut après une étude intensive qu'il n'y avait qu'un seul exemple connu de désaccord entre l'observation et la gravité universelle, à savoir une observation concernant la planète Mercure. (Actuellement quelques autres sont connus.) Le point de l'orbite de la planète Mercure le moins éloigné du Soleil, son *périhélie*, se déplace selon une cadence qui est légèrement moindre que celle prédite : il releva une minuscule différence, autour de $38''$ par siècle. (Ceci fut rectifié à $43''$ par siècle en 1882 par Simon Newcomb.) Le Verrier soupçonnait que cet écart était dû à une planète située entre Mercure et le Soleil, *Vulcain*, qu'il pourchassa de nombreuses années durant, en vain. L'étude du mouvement dut attendre Albert Einstein pour trouver une explication correcte de cette différence.

Réf. 111

LES MARÉES

Pourquoi les manuels de physique évoquent-ils toujours le phénomène des marées ? Parce que, comme nous le montrera la relativité générale, les marées prouvent que l'espace est courbé ! Il est donc très utile de les étudier avec un peu plus d'attention. Les marées éveillent l'intérêt. La gravitation explique les marées océaniques comme une conséquence de l'attraction de l'eau des océans par la Lune et le Soleil. Même si leur amplitude n'est que d'environ 0,5 m au large, elle peut atteindre 20 m en certains endroits particuliers proches des côtes. Pouvez-vous imaginer pourquoi ? La *terre* également est soulevée et abaissée par le Soleil et la Lune, d'environ 0,3 m, comme les mesures par satellites l'indiquent. Même l'*atmosphère* est sujette aux marées, et les variations de pression correspondantes peuvent être déduites des relevés de la pression atmosphérique.

Défi 250 s

Réf. 39

Réf. 112

Les marées apparaissent sur chaque corps *étendu* se déplaçant dans le champ gravitationnel d'un autre. Pour saisir l'origine des marées, dessinez un corps en orbite, comme la Terre, et imaginez ses constituants, telles les calottes de la Figure 79, comme étant retenus entre eux par des ressorts. La gravité universelle implique que les vitesses des orbites sont plus lentes lorsqu'elles sont plus distantes du corps central. Par conséquent, la calotte à l'extérieur de l'orbite sera vue comme étant plus lente que celle du milieu, mais

elle est *tirée* par le reste du corps par le truchement des ressorts. Au contraire, le fragment intérieur sera vu comme orbitant plus rapidement, mais il est *retenu* par les autres. Étant ralentie, la calotte intérieure cherche à tomber en direction du Soleil ; l'autre calotte étant accélérée, elle tend à s'en éloigner. Au total, les deux calottes ressentent un étirement vers l'extérieur par rapport au centre du corps, limité par les ressorts qui freinent la déformation. En conclusion, *les corps étendus sont déformés dans la direction de l'hétérogénéité du champ*.

Par exemple, en raison des forces de marées la Lune présente toujours (approximativement) la même face à la Terre. En plus, son rayon dans la direction de la Terre est plus grand d'environ 5 m que le rayon perpendiculaire à celle-ci. Si les ressorts internes sont trop faibles, le corps est déchiqueté en morceaux. De cette manière un *anneau* de fragments peut se former, tel que la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter ou les anneaux autour de Saturne.

Revenons à la Terre. Si un corps est entouré d'eau, il formera des bourrelets dans la direction du champ gravitationnel appliqué. Afin de mesurer et de comparer l'intensité des forces de marées dues au Soleil et à la Lune, nous simplifions les effets des marées à leur strict minimum. Comme indiqué sur la [Figure 80](#), nous pouvons étudier la déformation d'un corps due à la gravité en analysant la déformation de quatre morceaux. Nous pouvons l'étudier dans le cas de la chute libre, parce que le mouvement orbital et la chute libre sont équivalents. Maintenant, la gravitation fera en sorte que certains des morceaux se rapprocheront et d'autres s'écarteront, en fonction de leur position relative. La figure révèle clairement que l'intensité de la déformation – l'eau ne possède pas de ressorts incorporés – dépend de la variation de l'accélération gravitationnelle avec la distance. En d'autres termes, l'accélération *relative* qui provoque les marées est proportionnelle à la dérivée de l'accélération gravitationnelle.

En utilisant les chiffres de l' [Annexe B](#), les accélérations gravitationnelles du Soleil et de la Lune mesurées sur Terre sont

$$\begin{aligned} a_{\text{Soleil}} &= \frac{GM_{\text{Soleil}}}{d_{\text{Soleil}}^2} = 5,9 \text{ mm/s}^2 \\ a_{\text{Lune}} &= \frac{GM_{\text{Lune}}}{d_{\text{Lune}}^2} = 0,033 \text{ mm/s}^2 \end{aligned} \quad (42)$$

et donc l'attraction de la Lune est environ 178 fois plus faible que celle du Soleil.

Quand deux corps proches tombent à proximité d'une grande masse, l'accélération relative est proportionnelle à leur distance, et vérifie $da = da/dr dr$. Le facteur de proportionnalité $da/dr = \nabla a$, appelé l'*accélération de marée* (gradient), est la véritable mesure des effets de marée. Près d'une grande masse sphérique M , elle est donnée par

$$\frac{da}{dr} = -\frac{2GM}{r^3} \quad (43)$$

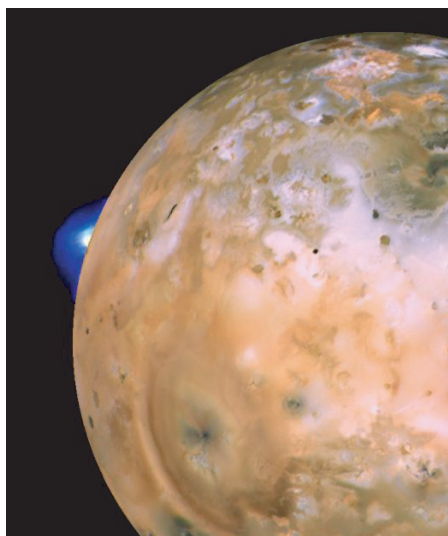


FIGURE 81 Un effet spectaculaire des marées : le volcanisme sur Io (NASA).

ce qui conduit aux valeurs

$$\begin{aligned}\frac{da_{\text{Soleil}}}{dr} &= -\frac{2GM_{\text{Soleil}}}{d_{\text{Soleil}}^3} = -0,8 \cdot 10^{-13} / \text{s}^2 \\ \frac{da_{\text{Lune}}}{dr} &= -\frac{2GM_{\text{Lune}}}{d_{\text{Lune}}^3} = -1,7 \cdot 10^{-13} / \text{s}^2.\end{aligned}\quad (44)$$

De façon plus qualitative, bien que l'étirement dû à la Lune soit beaucoup plus fort, on prédit que ses marées sont un peu plus de *deux fois plus fortes* que les marées du soleil, ce qui est véritablement observé. Quand le Soleil, la Lune et la Terre sont alignés, les deux marées s'additionnent, ces *grandes marées* sont particulièrement fortes et se produisent tous les 14,8 jours, à la pleine et à la nouvelle Lune.

Les marées produisent également des *frottements*. Les frottements conduisent à un ralentissement de la rotation de la Terre. Aujourd'hui, le ralentissement peut être évalué par des horloges précises (alors même que des variations de courtes durées dues à d'autres causes, comme le climat, sont nettement plus importantes). Les résultats s'accordent bien avec les fossiles montrant qu'il y a 400 millions d'années, pendant la période dévonienne, une année comptait 400 jours, et une journée à peu près 22 heures. Il a été également estimé qu'il y a 900 millions d'années chacune des 481 journées que comptait une année durait 18,2 heures. Le frottement à la base de ce ralentissement a également pour conséquence une augmentation de la distance de la Lune à la Terre d'environ 3,8 cm par an. Êtes-vous capable d'expliquer pourquoi ?

Comme mentionné ci-dessus, le mouvement de la croûte terrestre dû aux marées est également responsable du déclenchement des *tremblements de terre*. Donc la Lune peut aussi produire des effets dangereux sur la Terre. (Malheureusement, la connaissance de ces mécanismes ne permet pas de prédire les tremblements de terre.) L'exemple le plus fascinant des effets des marées est observé sur Io, un satellite de Jupiter. Ses marées sont si

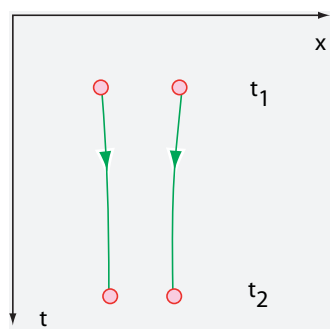


FIGURE 82 Des particules tombant côte à côte se rapprochent au cours du temps.

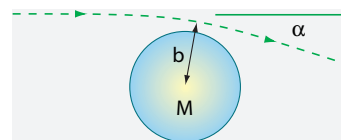


FIGURE 83 La masse fléchit la lumière.

fortes qu'elles entraînent une intense activité volcanique, comme indiqué sur la Figure 81, avec des panaches éruptifs pouvant atteindre 500 km de haut. Si les marées sont encore plus fortes, elles peuvent détruire entièrement le corps, comme cela s'est produit pour l'astre situé entre Mars et Jupiter qui a donné naissance aux planétoïdes, et (probablement) pour les lunes qui ont enfanté les anneaux de Saturne.

Page 123 Pour résumer, les marées sont dues aux accélérations relatives entre des masses proches. Ceci a une conséquence importante. Dans le chapitre sur la relativité générale nous découvrirons que le temps multiplié par la vitesse de la lumière joue le même rôle que la distance. Le temps devient donc une dimension supplémentaire, comme indiqué sur la Figure 82. En exploitant cette similitude, deux particules libres se déplaçant dans la même direction correspondent à des lignes parallèles dans l'espace-temps. Deux particules tombant côte à côte correspondent aussi à des lignes parallèles. Les marées montrent que de telles particules se rapprochent l'une de l'autre. En d'autres termes, les marées impliquent que des lignes parallèles se rapprochent l'une de l'autre. Mais des lignes parallèles peuvent se rapprocher l'une de l'autre *seulement* si l'espace-temps est courbé. Brièvement, les marées impliquent que l'espace et l'espace-temps sont *courbés*. Ce raisonnement élémentaire aurait pu être accompli durant le dix-huitième siècle, cependant, il fallut encore 200 ans de plus et tout le génie d'Albert Einstein pour le révéler.

LA LUMIÈRE PEUT-ELLE TOMBER ?

“ Die Maxime, jederzeit selbst zu denken, ist die Aufklärung*.

Emmanuel Kant ”

Page 15 Vers la fin du dix-septième siècle le monde découvrait que la lumière possède une vitesse finie – une épopée que nous relaterons en détail plus tard. Une entité qui se déplacerait avec une vitesse infinie ne pourrait être affectée par la gravité, du fait que celle-ci n'aurait pas le temps d'y produire son effet. Une entité dotée d'une vitesse finie, par contre, se doit de ressentir la gravité et donc tombe.

* La maxime de penser toujours par soi-même, c'est la culture de l'esprit.

Réf. 113 Lorsque la lumière parvient à la surface de la Terre, sa vitesse a-t-elle augmenté ? Pendant presque trois siècles les gens n'avaient aucun moyen en leur possession pour détecter de tels effets. Ainsi cette question ne fut pas étudiée. En 1801, l'astronome prussien Johann Soldner (1776–1833) fut le premier à poser la question d'une manière différente. Étant astronome, il était habitué à observer les étoiles et à mesurer leur angle de visée. Il réalisa que la lumière qui passe près d'un corps massif devrait être *déviée* à cause de la gravité.

Défi 253 pe Soldner analysa la situation d'un corps sur une trajectoire hyperbolique, se déplaçant à une vitesse c à la distance b (mesurée depuis le centre) d'une masse sphérique M , tel que schématisé sur la Figure 83. Soldner déduisit l'expression de l'angle de déviation

$$\alpha_{\text{grav. univ.}} = \frac{2}{b} \frac{GM}{c^2} . \quad (45)$$

Page 162 Nous voyons que l'angle est maximal lorsque le corps en mouvement rase de très près la masse M . Pour la lumière déviée par la masse du Soleil, l'angle se révèle être tout au plus de $0,88'' = 4,3 \mu\text{rad}$ seulement. À l'époque de Soldner, cet angle était trop petit pour pouvoir être mesuré. Ainsi ce problème fut ignoré. Si sa résolution avait été poursuivie, la relativité générale aurait commencé comme science expérimentale, et non par l'effort théorique d'Albert Einstein ! Pourquoi ? La valeur calculée par la formule ci-dessus est *différente* de la valeur mesurée. La première expérience eut lieu en 1919*, elle mit en évidence la dépendance correcte par rapport à la distance, mais releva un écart allant jusqu'à $1,75''$, exactement le double de l'expression (45). La cause n'est pas facile à découvrir : en fait, l'écart est dû à la courbure de l'espace, comme nous le verrons. En bref, la lumière peut tomber, mais ce sujet masque de nombreuses surprises.

QU'EST-CE QUE LA MASSE ? – SUITE

La masse décrit comment un objet interagit avec les autres. Dans notre promenade, nous avons rencontré deux de ses caractéristiques. La *masse inertielle* est la propriété qui conserve le mouvement des objets et qui offre une résistance au changement de leur mouvement. La *masse gravitationnelle* est la propriété responsable de l'accélération des corps proches (l'aspect actif) ou de l'accélération de ces corps par des objets situés à proximité (l'aspect passif). Par exemple, l'aspect actif de la masse de la Terre détermine l'accélération des corps à sa surface. L'aspect passif de ces corps nous permet de les peser afin de mesurer leur masse en utilisant uniquement des distances, c'est-à-dire sur une bascule ou une balance. La masse gravitationnelle est le fondement du *poids*, qui est la résistance à soulever les choses**.

La masse gravitationnelle d'un corps est-elle égale à sa masse inertielle ? Une réponse approximative est donnée par l'expérience : un objet qu'il est difficile de déplacer est également difficile à soulever. L'expérimentation la plus simple est de prendre deux corps de masses différentes et de les laisser tomber. Si l'accélération est la même pour tous les corps, alors la masse inertielle est égale à la masse gravitationnelle (passive), parce que

Défi 254 pe * D'ailleurs, comment mesureriez-vous la déviation de la lumière à côté d'un Soleil éclatant ?

Défi 255 pe ** Quelles sont les valeurs indiquées par une balance pour une personne de 85 kg jonglant avec trois balles de 0,3 kg chacune ?

dans la relation $ma = \nabla(GMm/r)$ le m du membre de gauche est en réalité la masse inertielle, et le m du membre de droite est en fait la masse gravitationnelle.

Mais au dix-septième siècle Galilée avait largement diffusé un argument encore plus ancien démontrant, sans même recourir à une simple expérience, que l'accélération est en réalité la même pour tous les corps. Si des masses plus grandes tombaient plus rapidement que des masses plus petites, alors le paradoxe suivant devrait se présenter. N'importe quel corps peut être vu comme étant constitué d'un grand morceau relié à un petit fragment. Si les petits corps tombaient vraiment moins vite, le petit fragment devrait ralentir le grand dans sa chute, ainsi donc le corps complet devrait tomber *moins* rapidement que le grand fragment tout seul (ou se briser en morceaux). En même temps, le corps étant plus grand que ses parties, il devrait chuter *plus* rapidement que celles-ci. C'est évidemment impossible : toute masse doit tomber avec la même accélération.

Réf. 114 De nombreuses expériences précises ont été réalisées depuis la discussion initiale de Galilée. Dans toutes celles-ci l'indépendance de l'accélération de la chute libre par rapport à la masse et à la composition matérielle a été confirmée avec la précision qu'elles permettaient. En d'autres mots, autant que nous puissions le dire, la masse gravitationnelle et la masse inertielle sont *équivalentes*. Quelle est la source de cette mystérieuse égalité ?

Page 72 Ce prétendu « mystère » est un exemple typique de méconnaissance, maintenant répandue à travers le monde entier dans l'enseignement de la physique. Retournons à la définition de la masse comme étant l'inverse du rapport négatif entre les accélérations. Nous avons fait allusion au fait que les origines physiques des accélérations ne jouaient aucun rôle dans la définition parce que cette origine n'apparaît pas dans l'expression. En d'autres termes, la valeur de la masse est, par définition, indépendante de l'interaction. Cela signifie en particulier que la masse inertielle, fondée sur l'interaction électromagnétique, et la masse gravitationnelle sont identiques *par définition*.

Défi 256 pe Nous remarquons également que nous n'avons jamais défini un concept distinct pour la « masse gravitationnelle passive ». La masse qui est accélérée par la gravitation est la masse inertielle. Pire, il n'y a aucune manière de définir une « masse gravitationnelle passive ». Essayez ! Toutes les méthodes, comme la pesée d'un objet, ne peuvent pas être distinguées de celles qui déterminent la masse inertielle à partir de sa réaction à l'accélération. En réalité, toutes les méthodes de mesure de masse utilisent des dispositifs non gravitationnels. Les balances en sont des exemples excellents.

Si la « masse gravitationnelle passive » était différente de la masse inertielle, nous aurions des conséquences inquiétantes. En considérant les corps pour lesquels elle serait différente nous aurions des problèmes avec la conservation de l'énergie. De la même façon, prétendre que la « masse gravitationnelle active » diffère de la masse inertielle nous attirerait des ennuis.

Une autre manière de considérer ce problème est la suivante : comment la « masse gravitationnelle » pourrait-elle se distinguer de la masse inertielle ? La différence dépendrait-elle de la vitesse relative, du temps, de la position, de la composition ou de la masse elle-même ? Chacune de ces possibilités contredit soit la conservation de l'énergie soit celle de la quantité de mouvement.

Page 145 Il n'est pas étonnant que toutes les mesures confirment l'équivalence de tous les types de masses. Ce thème ressurgit dans la relativité générale, n'apportant aucun nouveau résultat probant. « Les deux » masses demeurent égales, la masse est une caractéristique

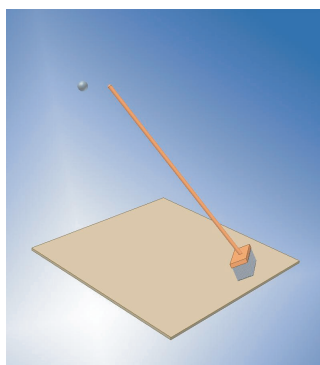


FIGURE 84 Les balais tombent plus rapidement que les pierres. (© Luca Gastaldi)

unique des corps. Un autre problème demeure, malgré tout. Quelle est la *source* de la masse ? Pourquoi existe-t-elle ? Cette question simple mais profonde ne peut pas trouver de réponse dans la physique classique. Nous devons nous armer de patience avant de découvrir cela.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LA GRAVITATION

“Fallen ist weder gefährlich noch eine Schande ;
Liegen bleiben ist beides*.”
Konrad Adenauer

* *

La gravité sur la Lune ne représente qu'un sixième de celle sur Terre. Pourquoi ceci implique-t-il qu'il est difficile de marcher rapidement et de courir sur la Lune (comme il a pu être vu sur les images télévisées enregistrées sur place) ?

* *

L'expression en l'inverse du carré de l'attraction universelle possède une restriction : elle ne nous permet pas de faire des prédictions raisonnables sur la matière dans l'univers. La gravitation universelle prédit qu'une distribution de masse homogène est instable. En réalité, on observe une distribution non homogène. Toutefois, la gravitation universelle ne prédit pas la masse volumique moyenne, l'obscurité de la nuit, les vitesses observées des galaxies lointaines, etc. En fait, pas une seule propriété de l'univers n'est expliquée. Pour cela, nous aurons besoin de la relativité générale.

* *

Imaginez que vous ayez douze pièces d'apparence identique, dont l'une est contrefaite. La pièce falsifiée possède une masse différente des onze autres authentiques. Comment pouvez-vous déterminer laquelle est la pièce contrefaite et si elle est plus légère ou plus lourde, en utilisant une balance ordinaire uniquement trois fois ?

Défi 257 e

* *

* « Chuter n'est ni dangereux ni honteux, rester couché est les deux à la fois. » Konrad Adenauer (n. Cologne 1876, d. Rhöndorf 1967), chancelier allemand.

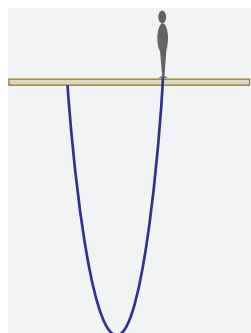


FIGURE 85 La situation initiale d'un sauteur à l'élastique.

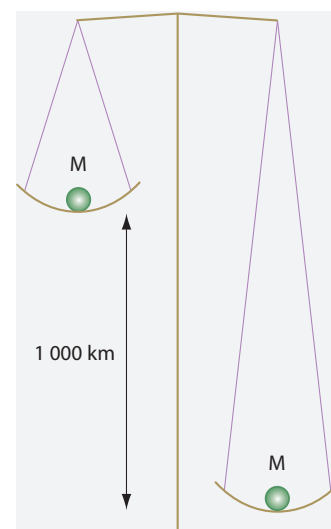


FIGURE 86 Une balance juste ?

Pour un physicien, l'*antigravité* est la gravité répulsive. Elle n'existe pas dans la nature. Cependant, le mot « antigravité » est utilisé de manière incorrecte par de nombreuses personnes, comme une rapide recherche sur Internet le montre. Certaines personnes nomment « antigravité » tout effet qui *surpasse* la gravité. Toutefois, cette définition implique que les tables et les chaises sont des dispositifs antigravitants. En suivant cette définition, la majorité des producteurs de bois, d'acier et de béton feraient affaire dans les métiers de l'antigravitation. La définition sur Internet n'a absolument aucun sens.

* *

Tous les objets sur Terre tombent-ils avec la même accélération de $9,8 \text{ m/s}^2$, sachant que la résistance due à l'air peut être négligée ? Non. Tous les concierges le savent. Vous pouvez vérifier cela par vous-même. Un balai faisant un angle d'environ 35° frappe le plancher avant une pierre, comme les sons des différents impacts le confirment. Êtes-vous capable d'expliquer pourquoi ?

Défi 258 s

* *

Les sauteurs à l'élastique sont aussi accélérés plus fortement que g . Pour un élastique de masse m et un sauteur de masse M , l'accélération maximum a est

$$a = g \left(1 + \frac{1}{8} \frac{m}{M} \left(4 + \frac{m}{M} \right) \right). \quad (46)$$

Défi 259 s Pouvez déduire cette relation à partir de la Figure 85 ?

* *

Défi 260 s Devinette : quel est le poids d'une balle en liège d'un rayon de 1 m ?

* *

Défi 261 s Devinette : 1 000 billes en fer de 1 mm de diamètre sont rassemblées en un amoncellement. Quelle est sa masse ?

* *

Défi 262 s Comment pouvez-vous tirer profit de vos observations faites durant vos voyages pour montrer que la Terre n'est pas plate ?

* *

L'accélération due à la gravité est-elle constante ? Pas vraiment. Chaque jour, il est estimé que 10^8 kg de matière tombe sur la Terre sous la forme de météorites.

* *

Défi 263 s La Terre et la Lune attirent toutes les deux les corps. Le centre de masse du système Terre-Lune est éloigné de 4 800 km du centre de la Terre, et est situé presque à côté de sa surface. Pourquoi les corps sur Terre tombent-ils toujours en direction du centre de la Terre ?

* *

Défi 264 pe Chaque corps sphérique chute-t-il avec la même accélération ? Non. Si le poids de l'objet est comparable à celui de la Terre, la distance décroît d'une manière différente. Pouvez-vous entériner cette affirmation ? Qu'est-ce qui est faux alors dans l'argument de Galilée concernant la constance de l'accélération de la chute libre ?

* *

Défi 265 s Il est facile de soulever une masse d'un kilogramme posée sur le sol ou sur une table. Vingt kilogrammes sont plus difficiles. Un millier est impossible. Cependant, $6 \cdot 10^{24}$ kg est réalisable. Pourquoi ?

* *

Défi 266 pe Le rapport entre les forces des marées de la Lune et du Soleil est approximativement 7 : 3. Est-il vrai que c'est aussi le rapport entre les masses volumiques des deux corps ?

* *

Défi 267 pe Le frottement entre la Terre et la Lune ralentit la rotation de chacune. La Lune a cessé de tourner sur elle-même il y a plusieurs millions d'années, et la Terre est sur la bonne voie pour en faire autant. Lorsque la Terre cessera de tourner, la Lune arrêtera de s'éloigner de la Terre. À quelle distance de la Terre la Lune se trouvera-t-elle à ce moment-là ? Par la suite pourtant, dans un futur bien plus lointain, La Lune se rapprochera à nouveau de la Terre, à cause des frottements entre le système Terre-Lune et le Soleil. Ce phénomène ne se produira que si le Soleil brille pour toujours, ce qui est faux, mais pouvez-vous malgré tout expliquer cela ?

* *

Lorsque vous courez en direction de l'est, vous *perdez du poids*. Il y a deux explications distinctes : l'accélération « centrifuge » augmente de telle sorte que la force avec laquelle vous êtes tiré vers le bas diminue, et la force de Coriolis apparaît, avec un résultat ana-

Défi 269 pe logue. Pouvez-vous quantifier l'importance des deux effets ?

* *

Défi 270 s Quel est le rapport des périodes entre une pierre tombant d'une distance l et un pendule se balançant le long de la moitié d'un cercle de rayon l ? (Ce problème a été posé par Galilée.) Combien de chiffres du nombre π pouvons-nous espérer déterminer de cette manière ?

* *

Défi 271 s Pourquoi un vaisseau spatial peut-il accélérer grâce à l'*effet de fronde gravitationnelle* (ou *effet catapulte*) lorsqu'il fait le tour d'une planète, en dépit de la conservation de la quantité de mouvement ? Il est conjecturé que le même effet est aussi responsable de l'existence des quelques astres exceptionnellement rapides qui sont observés dans la Galaxie.
Réf. 98 Par exemple, l'étoile HE0457-5439 se déplace à 720 km/s, ce qui est nettement supérieur aux 100 à 200 km/s de la plupart des étoiles dans la Voie lactée. Il semble que ce rôle de centre d'accélération soit occupé par un trou noir.

* *

Réf. 99 L'orbite d'une planète autour du Soleil possède de nombreuses propriétés captivantes. Quel est l'hodographe de cette orbite ? Quels sont les hodographes des orbites paraboliques et hyperboliques ?
Défi 272 s

* *

Défi 273 s Une question élémentaire mais ardue : si tous les corps s'attirent les uns les autres, pourquoi toutes les étoiles ne tombent-elles pas ou ne sont-elles pas déjà tombées les unes vers les autres ?

* *

Réf. 115 L'accélération g due à la gravité à une profondeur de 3 000 km est de 10,05 m/s², plus de 2 % supérieure à celle de la surface de la Terre. Comment est-ce possible ? De même, sur le plateau tibétain, g est plus élevé que la valeur au niveau de la mer de 9,81 m/s², bien que le plateau soit plus éloigné du centre de la Terre que ne l'est le niveau de la mer.
Défi 274 s Comment est-ce possible ?

* *

Défi 275 s Quand la Lune fait le tour du Soleil, sa trajectoire a-t-elle des segments *concaves* en direction du Soleil, comme le montre la partie droite de la Figure 87, ou non, comme indiqué sur la gauche ? (Indépendamment de ce problème, les deux trajectoires sur le schéma masquent le fait que la trajectoire de la Lune ne se situe *pas* dans le même plan que celui de la trajectoire de la Terre autour du Soleil.)

* *

Vous pouvez démontrer que des objets *s'attirent les uns les autres* (et qu'ils ne sont pas seulement attirés par la Terre) à l'aide d'une simple expérience que n'importe qui peut réaliser chez lui, comme décrit sur le site Web <http://www.fourmilab.ch/gravitation/foobar/>.

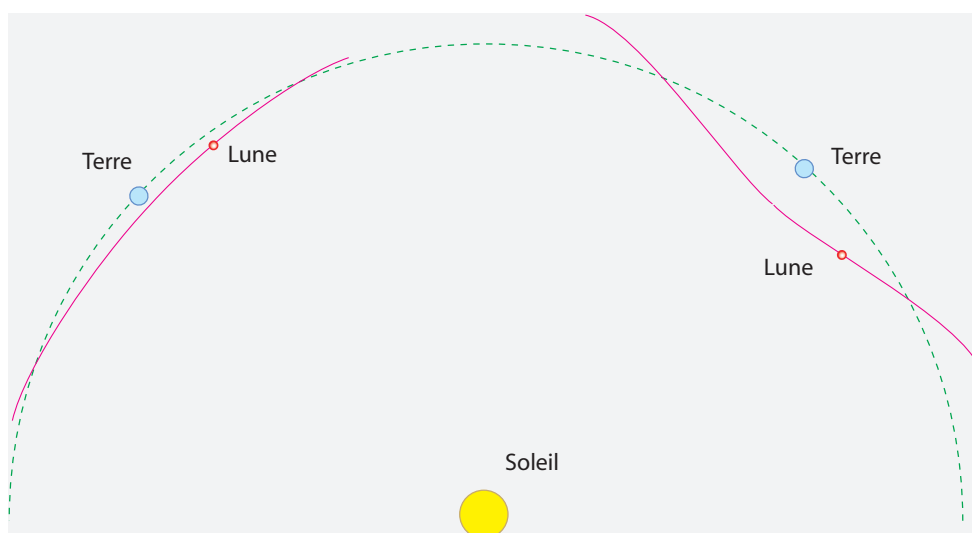


FIGURE 87 Laquelle de ces deux trajectoires de la Lune est-elle correcte ?

* *

Il est instructif de calculer la *vitesse d'échappement* sur la Terre, c'est-à-dire la vitesse à laquelle un corps doit être lancé pour qu'il ne retombe jamais. Elle se révèle être de 11 km/s. Quelle est la vitesse d'échappement pour le Système solaire ? Par ailleurs, la vitesse d'échappement de notre Galaxie est de 129 km/s. Que se passerait-il si une planète ou un système était si lourd que sa vitesse d'échappement serait plus importante que la vitesse de la lumière ?

Défi 276 s

* *

Pour des corps de forme irrégulière, le centre de gravité d'un corps n'est *pas* identique au centre de masse. Êtes-vous capable de confirmer cela ? (Conseil : trouvez et faites usage de l'exemple le plus simple possible.)

Défi 277 s

* *

La gravité peut-elle produire de la répulsion ? Qu'est-ce qui se passe pour un petit corps situé à l'intérieur d'une grande masse en forme de C ? Est-il poussé en direction du centre de masse ?

Défi 278 pe

* *

Réf. 116 La *forme* de la Terre n'est pas une sphère. Par conséquent, un fil à plomb n'indique généralement pas la direction du centre de la Terre. Quel est le plus grand écart en degrés ?

Défi 279 pe

* *

Quel est le plus grand astéroïde duquel nous pouvons nous échapper simplement en sautant ?

Défi 280 s

* *

Si vous observez le ciel chaque jour à 6 heures du matin, la position du Soleil change au



FIGURE 88 L'analemma au-dessus de Delphes entre janvier et décembre 2002. (© Anthony Ayiomamitis)

cours de l'année. Le résultat de la [Figure 88](#) montre le Soleil ainsi photographié sur la même image. La courbe, appelée analemma, est due à l'inclinaison de l'axe de la Terre, ainsi qu'à la forme elliptique de la trajectoire autour du Soleil. La forme de l'analemma est également reconstruite dans les cadrans solaires de haute qualité. Les points supérieur et inférieur (caché) correspondent aux solstices.

* *

La constellation (groupement d'étoiles) dans laquelle le Soleil reste à midi (au centre du fuseau horaire) un jour donné est supposée être le « signe zodiacal » de ce jour-là. Les astrologues affirment qu'ils sont au nombre de douze, à savoir Bélier, Taureau, Gémeaux, Cancer, Lion, Vierge, Balance, Scorpion, Sagittaire, Capricorne, Verseau et Poissons et que chacun occupe (assez précisément) un douzième d'une année ou un douzième de l'écliptique. N'importe quelle vérification à l'aide d'un calendrier indique qu'en ce moment le Soleil de midi n'est jamais dans le signe zodiacal qui est normalement associé à ces jours-là. L'association a été décalée d'environ un mois depuis qu'elle fut définie, à cause de la précession de l'axe de la Terre. Une vérification avec une carte de la voûte céleste montre que les douze constellations n'ont pas la même longueur et que, sur l'écliptique, il y en a quatorze et non pas douze. Il y a *Ophiuchus*, la constellation du Serpenteaire, entre le Scorpion et le Sagittaire, et *Cetus*, la Baleine, entre le Verseau et les Poissons. En réalité, aucune formulation astronomique concernant les signes du Zodiaque n'est correcte. Pour le dire clairement, l'astrologie, contrairement à son appellation, n'est *pas* relative aux astres. (Dans certaines langues, le terme qui signifie « charlatan » est dérivé

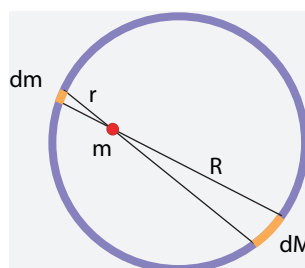


FIGURE 89 L'annulation de la force gravitationnelle à l'intérieur d'une coquille sphérique de matière.

du mot « astrologue ».)

* *

- Réf. 118 L'accélération gravitationnelle pour une particule située à l'intérieur d'une coquille sphérique est nulle. L'annulation de la gravité dans ce cas est indépendante de la forme de la particule et de sa position, et indépendante de l'épaisseur de la coquille. Pouvez-vous établir cette affirmation en utilisant la Figure 89 ? Cela est vrai uniquement à cause de la dépendance en $1/r^2$ de la gravité. Pouvez-vous montrer que ce résultat ne s'applique pas pour des coquilles non sphériques ? Remarquez que l'annulation de la gravité à l'intérieur d'une coquille sphérique ne s'applique généralement pas s'il y a de la matière située à l'extérieur de la coquille. Comment pouvons-nous annihiler les effets de la matière extérieure ?
- Défi 281 s
- Défi 282 s

* *

- Réf. 119 Pendant longtemps, on a pensé qu'il n'y avait aucune planète supplémentaire au-delà de Neptune et Pluton dans notre Système solaire, parce que leur orbite n'indiquait aucune perturbation due à un autre corps. Aujourd'hui, l'opinion est différente. Il s'avère qu'il y a seulement huit planètes : Pluton n'est pas une planète, mais le premier objet d'un ensemble de petits astres plus éloignés que les planètes, situés dans la ceinture de Kuiper et le nuage d'Oort. (Les astronomes ont malgré tout consenti à continuer d'appeler Pluton « planète » en dépit de cette évidence, pour éviter d'avoir à en débattre*.) Des objets sont régulièrement découverts dans la ceinture de Kuiper. En 2003, on a trouvé un objet, appelé *Sedna*, qui est presque aussi grand que Pluton mais trois fois plus éloigné du soleil**.
- Réf. 120

* *

En astronomie, on découvre périodiquement de nouveaux exemples de corps en mouvement, même au siècle présent. Parfois il s'agit aussi de fausses alertes. Un exemple fut la prétendue chute de *minuscules comètes* sur la Terre. Elles étaient censées être constituées

* Le débat a finalement eu lieu en août 2006, lors d'une assemblée générale à Prague : les 2 500 astronomes de l'Union Astronomique Internationale ont relégué Pluton au rang de « planète naine ». [N.D.T.]

** On découvre continuellement des nouveaux corps, mais Sedna a joué un rôle particulier dans la prise de conscience des astronomes de l'urgence d'une définition claire d'une planète. C'est devenu criant lorsqu'on a détecté Éris sur des photographies, en janvier 2005, un astre qui se révèle être plus gros que Pluton. [N.D.T.]

Réf. 121 de quelques douzaines de kilogrammes de glace, frappant la Terre toutes les quelques secondes. Il est dorénavant établi que cela ne se produit pas. D'un autre côté, il est vrai que plusieurs tonnes d'astéroïdes chutent sur Terre chaque jour, sous la forme de particules minuscules. Malheureusement, la découverte d'objets pouvant potentiellement frapper la Terre n'est pas du tout évidente. Les astronomes aiment à souligner qu'un astéroïde aussi massif que celui qui a provoqué l'extinction des dinosaures pourrait frapper la Terre sans qu'aucun astronome ne le remarque à l'avance, si sa direction est quelque peu exceptionnelle, comme depuis l'hémisphère Sud, où les télescopes installés sont peu nombreux.

* *

Défi 283 s La gravitation universelle n'autorise que des orbites elliptiques, paraboliques ou hyperboliques. Il est impossible pour un petit objet s'approchant d'un autre plus gros d'être capturé par celui-ci. Pour le moins, c'est ce que nous en savons jusqu'à présent. Pourtant, tous les livres d'astronomie racontent des histoires de capture dans notre Système solaire. Par exemple, plusieurs satellites externes de Saturne ont été capturés. Comment est-ce possible ?

* *

Défi 284 s Quelle forme un tunnel devrait-il avoir pour qu'une pierre le traverse en tombant sans toucher les parois ? (On suppose que la densité est homogène.) Si la Terre ne tournait pas, le tunnel serait en ligne droite et traverserait son centre, et la pierre tomberait vers le bas et remonterait sans cesse, dans un mouvement d'oscillation. Pour une Terre en rotation, le problème est beaucoup plus épineux. Quelle est cette forme sachant que le tunnel commence à l'équateur ?

* *

Défi 285 e La Station spatiale internationale fait le tour de la Terre toutes les 90 minutes à une altitude d'environ 380 km. Vous pouvez observer sa position sur le site Web <http://www.heavens-above.com>. Par ailleurs, à chaque fois qu'elle se situe juste au-dessus de l'horizon, la station est le troisième objet le plus lumineux dans le ciel nocturne, devancé uniquement par la Lune et Vénus. Jetez-y un coup d'œil.

* *

Défi 286 s Est-il vrai que le centre de masse du Système solaire, son barycentre, est constamment situé à l'intérieur du Soleil ? Même si une étoile ou le Soleil ne se déplace que très peu lorsque des planètes tournent autour, ce mouvement peut être mesuré avec précision en faisant usage de l'effet Doppler des ondes lumineuses ou sonores. Jupiter, par exemple, produit une variation de vitesse de 13 m/s dans le Soleil, la Terre 1 m/s. Les premières planètes en dehors du Système solaire, aux environs du pulsar PSR1257+12 et de l'étoile 51 Pegasi, ont été découvertes de cette manière, en 1992 et 1995. Depuis ce temps, plus de 150 planètes ont été découvertes à l'aide de cette méthode. Jusqu'à présent, la plus petite planète découverte a 7 fois la masse de la Terre.

* *

Tous les points sur la Terre ne reçoivent pas le même nombre d'heures de lumière du

Défi 287 d jour pendant une année. Les effets sont difficiles à identifier, cependant pouvez-vous en relever un ?

* *

Défi 288 s Les phases de la Lune peuvent-elles avoir un effet mesurable sur le corps humain ? Qu'en est-il des effets dus aux marées lunaires ?

* *

Défi 289 s Il y a une différence essentielle entre le système héliocentrique et l'ancienne idée que toutes les planètes tournaient autour de la Terre. Le système héliocentrique établit que certaines planètes, telles que Mars et Vénus, peuvent se trouver *entre* la Terre et le Soleil à certaines périodes, et *derrière* le Soleil à d'autres moments. A contrario, le système géocentrique affirme qu'elles sont toujours situées entre. Pourquoi un différend si important ne remet-il pas immédiatement en cause le système géocentrique ?

* *

Réf. 122 La reformulation la plus énigmatique de la description du mouvement exprimée par $\mathbf{ma} = \nabla U$ est l'équation suivante qui paraît presque insensée :

$$\nabla v = d\mathbf{v}/ds \quad (47)$$

Défi 290 s où s représente la longueur de la trajectoire du mouvement. Elle est appelée *formulation par rayon* des équations du mouvement de Newton. Pouvez-vous découvrir des exemples de son application ?

* *

Défi 291 s Vue depuis Neptune, la taille du Soleil est la même que celle de Jupiter vue depuis la Terre au moment où elle est le plus proche. Est-ce vrai ?

* *

Réf. 123 Qu'est-ce que la gravité ? Ce n'est pas une question triviale. En 1690, Nicolas Fatio de Duillier et, en 1747, Georges Louis Lesage suggérèrent une explication pour la dépendance en $1/r^2$. Lesage argumenta que le monde est empli de petites particules – il les appela des « corpuscules ultramondains » – voltigeant partout de manière aléatoire et heurtant tous les objets. Des objets ordinaires ne ressentent pas ces coups, puisqu'ils sont continuellement frappés au hasard dans toutes les directions. Mais lorsque deux objets sont proches l'un de l'autre, ils se font de l'ombre pour la partie du flux qui provient de la direction de l'autre corps, avec pour résultat une attraction. Pouvez-vous montrer qu'une telle attraction possède une dépendance en $1/r^2$?

Défi 292 pe Toutefois, la proposition de Lesage pose un certain nombre de difficultés. Cette hypothèse ne fonctionne que si les collisions sont inélastiques. (Pourquoi ?) Cependant, cela signifierait que tous les corps se réchaufferaient au cours du temps, comme Jean-Marc Lévy-Leblond l'a expliqué.

Réf. 3

Il y a deux problèmes supplémentaires avec la suggestion de Lesage. Premièrement, un corps libre de tout mouvement dans l'espace devrait être touché par un plus grand nombre de particules, ou par des particules plus rapides, à l'avant qu'à l'arrière. Par

conséquent, le corps devrait être ralenti. Deuxièmement, la gravité devrait dépendre de la taille, mais d'une manière étrange. En particulier, trois corps se trouvant le long d'une droite ne devraient *pas* se faire de l'ombre, puisqu'une telle ombre n'est pas observée. Mais ce modèle naïf prédit le contraire.

Malgré toutes les critiques, cette célèbre idée revient régulièrement sur la table en physique depuis son apparition, même si de telles particules n'ont jamais été détectées. Ce n'est que dans la troisième partie de notre escalade de la montagne que nous résoudrons cette question.

* *

Défi 293 pe Pour quels corps la gravité décroît-elle lorsque vous vous en approchez ?

* *

Défi 294 pe Pouvons-nous mettre un satellite en orbite en utilisant un canon ? La réponse dépend-elle de la direction dans laquelle nous tirons ?

* *

Deux informaticiens partagent leur expérience. « J'ai balancé mon Pentium III et mon Pentium IV par la fenêtre. » « Et alors ? » « Le Pentium III était plus rapide. »

* *

Défi 295 s À quelle fréquence la Terre se lève-t-elle et se couche-t-elle lorsqu'elle est vue depuis la Lune ? La terre montre-t-elle des phases ?

* *

Défi 296 pe Quel est le poids de la Lune ? Quelle est sa proportion par rapport au poids des Alpes ?

* *

Défi 297 s En raison du léger aplatissement de la forme de la Terre, la source du Mississippi est à peu près 20 km plus proche du centre de la Terre que son embouchure. L'eau coule effectivement en courant ascendant. Comment est-ce possible ?

* *

Défi 298 s Si un astre est constitué de matière de haute densité, la vitesse d'une planète orbitant autour de lui peut être plus grande que celle de la lumière. Comment la nature fait-elle pour esquiver cette étrange possibilité ?

* *

Réf. 124
Page 279 Qu'advient-il du Système solaire à l'avenir ? Cette interrogation est étonnamment difficile à résoudre. Le principal spécialiste de cette question, le scientifique français des systèmes planétaires Jacques Laskar, a simulé quelques centaines de millions d'années d'évolution à l'aide de calculs numériques réalisés sur des ordinateurs. Il découvrit que les orbites planétaires sont stables, mais qu'à petite échelle le chaos se manifeste dans l'évolution du Système solaire. Les diverses planètes s'influencent entre elles de manière subtile mais toujours mal comprise. Les effets qui ont eu lieu par le passé sont toujours en cours d'étude, comme la variation d'énergie de Jupiter, due au fait qu'il provoqua

TABLEAU 19 Une propriété inexpliquée de la nature : les distances des planètes et les valeurs données par la loi de Titius–Bode.

PLANÈTE	n	DISTANCE EN UA	
		PRÉDITE	MESURÉE
Mercure	$-\infty$	0,4	0,4
Vénus	0	0,7	0,7
Terre	1	1,0	1,0
Mars	2	1,6	1,5
Planétoïdes	3	2,8	2,2 à 3,2
Jupiter	4	5,2	5,2
Saturne	5	10,0	9,5
Uranus	6	19,6	19,2
Neptune	7	38,8	30,1
Pluton	8	77,2	39,5

l'expulsion de petits astéroïdes du Système solaire, ou comme l'acquisition d'énergie par Neptune. Il reste beaucoup de recherches à faire dans ce domaine.

* *

Un des problèmes non résolus sur le Système solaire est l'explication de la distance des planètes découverte en 1766 par Johann Daniel Titius (1729–1796) et diffusée par Johann Elert Bode (1747–1826). Titius découvrit que les distances d des planètes au Soleil peuvent être approchées par

$$d = a + 2^n b \quad \text{avec} \quad a = 0,4 \text{ UA}, \quad b = 0,3 \text{ UA} \quad (48)$$

où les distances sont mesurées en unités astronomiques et n est le numéro de la planète. L'approximation qui en résulte est comparée aux observations dans le [Tableau 19](#).

De façon intéressante, les trois dernières planètes ainsi que les planétoïdes furent découverts *après* la mort de Bode et de Titius. La loi a prédit la distance d'Uranus avec succès, de même que celle des planétoïdes. Malgré ces réussites – et l'échec pour les deux dernières planètes – personne n'a encore trouvé de modèle pour la formation des planètes qui explique la loi de Titius. Les gros satellites de Jupiter et d'Uranus sont régulièrement espacés, mais ne s'accordent pas avec la loi de Titius–Bode.

Démontrer ou réfuter cette loi est un des défis qui demeurent en mécanique classique. Quelques chercheurs soutiennent que cette loi est une conséquence de l'invariance d'échelle, d'autres affirment que c'est un hasard ou même une diversion. Cette dernière interprétation est également suggérée par le comportement contraire à la loi de Titius–Bode de pratiquement toutes les planètes extrasolaires. Le débat n'est pas clos.

* *

Il y a environ 3 000 ans, les Babyloniens avaient mesuré les périodes orbitales des sept

TABLEAU 20 Les périodes orbitales connues des Babyloniens.

A S T R E	P É R I O D E
Saturne	29 a
Jupiter	12 a
Mars	687 j
Soleil	365 j
Vénus	224 j
Mercure	88 j
Lune	29 j



FIGURE 90 Une éclipse solaire (11 août 1999, photographiée depuis la station russe Mir).

corps célestes connus à l’époque. Ordonnés de la plus longue période à la plus courte, ils les écrivirent comme dans le [Tableau 20](#).

Les Babyloniens introduisirent également la semaine et la division de la journée en 24 heures. Ils avaient dédié chacune des 168 heures de la semaine à un corps céleste, en suivant l’ordre du tableau. Ils avaient également dédié la journée entière au corps céleste qui correspondait à la première heure de ce jour-là. Le premier jour de la semaine était voué à Saturne, la disposition des autres jours de la semaine suivait alors le [Tableau 20](#). Cette histoire fut contée par Cassus Dio (v. 160 à v. 230). Vers la fin de l’Antiquité, la disposition fut modifiée par l’Empire romain. Dans les langues germaniques, incluant l’anglais, les noms latins des corps célestes furent remplacés par les dieux germanins correspondants. L’ordre samedi, dimanche, lundi, mardi, mercredi, jeudi et vendredi est donc une conséquence à la fois de relevés astronomiques et de croyances astrologiques de la part des Anciens.

* *

En 1722, le grand mathématicien Leonhard Euler commit une erreur dans ses calculs qui le conduisit à conclure que, si un tunnel était construit d’un pôle de la Terre à l’autre, une pierre tombant à l’intérieur atteindrait le centre de la Terre, se retournerait alors immédiatement et rebrousseait chemin. Voltaire tourna en dérision cette conclusion durant

Défi 299 e
Réf. 127

plusieurs années. Pouvez-vous corriger Euler et montrer que le véritable mouvement est une oscillation entre les deux pôles, et pouvez-vous évaluer le temps de chute de pôle à pôle que cela prendrait (en supposant la densité homogène) ?

Défi 300 s

Quelle serait la période d'oscillation pour un tunnel droit de longueur l à partir d'un point quelconque de la surface au point opposé sur le globe, n'allant *pas* de ce fait d'un pôle à l'autre ?

Défi 301 s

* *

La Figure 90 montre une photographie de l'éclipse solaire de 1999 prise par la station spatiale russe *Mir*. Elle indique clairement que le point de vue général d'un phénomène peut être complètement différent de celui qui est local. Quelle est la vitesse de l'ombre ?

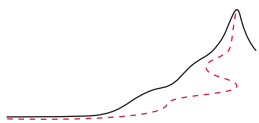
Défi 302 s

* *

En 2005, des mesures par satellites ont mis en évidence le fait que l'eau dans le fleuve Amazone exerce une pression sur le terrain allant jusqu'à 75 mm de plus pendant la saison où il est en crue que pendant la saison où il est presque vide.

Réf. 128





CHAPITRE 7

LA MÉCANIQUE CLASSIQUE ET LA PRÉDICTIBILITÉ DU MOUVEMENT

Tous les types de mouvement dans lesquels on peut décrire la masse d'un corps comme étant sa seule propriété invariable forment ce qui est appelé la *mécanique*. La dénomination « mécaniciens » est aussi attribuée aux spécialistes qui étudient ce domaine de la physique. Nous pouvons imaginer la mécanique comme étant la branche athlétique de la physique* : à la fois en athlétisme et en mécanique les longueurs, les temps et les masses sont les seules quantités mesurées.

Plus précisément, notre domaine d'investigation actuel est appelé la mécanique *classique*, pour la distinguer de la mécanique *quantique*. La principale différence est qu'en physique classique des valeurs arbitrairement petites sont présumées exister, alors que ce n'est pas le cas en mécanique quantique. L'utilisation de nombres réels pour les quantités observables est donc primordiale en physique classique.

La mécanique classique est également régulièrement appelée *physique galiléenne* ou *physique newtonienne*. Le fondement de la mécanique classique, la description du mouvement en utilisant uniquement l'espace et le temps, est appelé la *cinématique*. Un exemple en est la description de la chute libre par $z(t) = z_0 + v_0(t - t_0) - \frac{1}{2}g(t - t_0)^2$. Le reste, partie majeure de la mécanique classique, est la description du mouvement comme une conséquence des interactions entre les corps. Elle est nommée la *dynamique*. Une illustration de la dynamique est la formule de l'attraction universelle.

La distinction entre la cinématique et la dynamique peut aussi être faite en relativité, en thermodynamique et en électrodynamique. Même si nous n'avons pas encore exploré ces domaines d'investigation, nous savons qu'il n'y a pas que la gravitation dans l'Univers. Une observation élémentaire permet de trancher : le frottement. Le frottement ne peut pas être causé par la gravité, parce qu'il n'est pas observé dans les cieux, où le mouvement suit uniquement les lois gravitationnelles**. Qui plus est, sur Terre, le frottement est indépendant de la gravité, comme vous avez probablement déjà pu l'expérimenter. Il doit exister une autre interaction responsable du frottement. Nous allons bientôt l'étudier. Mais un sujet complémentaire mérite une explication tout de suite.

* Ceci est en contradiction avec la véritable provenance du terme « mécanique », qui signifie « science des machines ». Il dérive du grec μηχανή, qui signifie « machine » et qui se trouve même être à l'origine du mot français « machine » lui-même. Quelquefois, le terme « mécanique » est utilisé pour l'étude du mouvement des corps *solides* uniquement, excluant par exemple l'hydrodynamique. Cet usage eut la faveur des physiciens durant le siècle passé.

** Ce n'est pas parfaitement exact : dans les années 1980, le premier cas de frottement gravitationnel fut révélé : l'émission des ondes gravitationnelles. Nous discuterons de ceci en détail plus tard.

DEVRAIT-ON EMPLOYER LA FORCE ?

« L'usage direct de la force est une solution si misérable pour résoudre n'importe quel problème, qu'elle est en général employée uniquement par les petits enfants et par les grandes nations. »

David Friedman

Tout le monde doit prendre position sur cette question, même les étudiants en physique. En fait, plusieurs sortes de forces sont utilisées et observées dans la vie quotidienne. Nous voulons parler des forces musculaire, gravitationnelle, spirituelle, sexuelle, maléfique, supernaturelle, sociale, politique, économique et de nombreuses autres. Les physiciens voient les choses plus simplement. Ils nomment *interactions* les différents types de forces observés entre des objets. L'étude minutieuse de toutes ces interactions nous montrera que, dans la vie courante, elles sont d'origine électrique.

Pour les physiciens, tout changement est causé par le mouvement. Le mot force prend alors également une définition plus restrictive. La *force (physique)* est définie comme étant la *variation de la quantité de mouvement*, c'est-à-dire comme

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} . \quad (49)$$

La force est le changement ou flux de la quantité de mouvement. Si une force agit sur un corps, la quantité de mouvement circule vers celui-ci. De fait, la quantité de mouvement peut être imaginée comme étant un certain liquide invisible et impalpable. La force mesure quelle quantité de ce liquide s'écoule depuis un corps vers un autre par unité de temps.

En utilisant la définition galiléenne de la quantité de mouvement de translation $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, nous pouvons réécrire la définition de la force (pour une masse constante) comme

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} , \quad (50)$$

où $\mathbf{F} = \mathbf{F}(t, \mathbf{x})$ est la force agissant sur un objet de masse m et où $\mathbf{a} = \mathbf{a}(t, \mathbf{x}) = d\mathbf{v}/dt = d^2\mathbf{x}/dt^2$ est l'accélération du même objet, c'est-à-dire sa variation de vitesse*.

Cette expression établit en termes précis que la force est ce qui modifie la *vitesse* des masses. La quantité est appelée « force » parce qu'elle correspond à de nombreux aspects de la force musculaire, mais *pas* tous. Par exemple, plus la force est importante, plus une pierre peut être lancée loin.

Cependant, à chaque fois que la notion de force sera employée, nous devons nous souvenir que *la force physique est différente de la force ordinaire ou de l'effort courant*.

* Cette équation fut écrite ainsi pour la première fois par le mathématicien et physicien suisse Leonhard Euler (1707–1783) en 1747, plus de 70 ans après la première loi de Newton et 20 ans après le décès de celui-ci, et à qui elle est généralement attribuée par erreur. C'était Euler, et non pas Newton, qui comprit le premier que cette définition de la force est fonctionnelle dans *tous* les cas où il y a du mouvement, quelles qu'en soient les apparences, qu'il s'agisse de particules ponctuelles ou d'objets étendus, et qu'il s'agisse de corps rigides, déformables ou fluides. De façon surprenante et contrairement aux affirmations qui sont faites régulièrement, l'équation (50) est toujours valide en relativité, comme indiqué à la page 71.

TABLEAU 21 Quelques valeurs mesurées de force.

OBSERVATION	FORCE
Valeur de force mesurée dans un microscope à résonance magnétique	820 zN
Force maximale exercée par des dents	1,6 kN
Force typique exercée par une massue	2 kN
Force exercée par des quadriceps	jusqu'à 3 kN
Force éprouvée par un excellent adhésif de 1 cm ²	jusqu'à 10 kN
Force nécessaire pour sectionner une bonne corde utilisée pour l'escalade	30 kN
Force maximale mesurable dans la nature	$3,0 \cdot 10^{43}$ N

L'effort est probablement la meilleure approximation du concept de *puissance (physique)*, généralement notée P , et définie (pour une force constante) comme

$$P = \frac{dW}{dt} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v} \quad (51)$$

dans laquelle le *travail (physique)* W est défini comme étant $W = \mathbf{F} \cdot \mathbf{s}$. Le travail physique est une forme d'énergie, comme vous pouvez le vérifier. Remarquez qu'un homme qui marche en portant un sac à dos très lourd réalise cet effort avec beaucoup de peine. Donc

Défi 304 s

pourquoi se sent-il si fatigué ? Le travail, comme toute forme d'énergie, doit être pris en considération quand on cherche à vérifier la conservation de l'énergie.

Défi 305 s

Avec la définition du travail donnée ci-dessus, vous pouvez résoudre les énigmes suivantes. Qu'arrive-t-il à la consommation électrique d'un escalier roulant si vous marchez dessus au lieu de rester debout immobile ? Quelle est l'incidence de la définition du

Défi 306 d

travail sur le salaire des scientifiques ?

Réf. 129

Lorsque des étudiants en examen disent que la force agissant sur une pierre lancée est moindre au point le plus haut de la trajectoire, on a coutume de répondre qu'ils utilisent un point de vue erroné, à savoir la *vision aristotélicienne*, dans laquelle la force est proportionnelle à la vitesse. De temps à autre il est même dit qu'ils utilisent un concept différent de l'*état* de mouvement. La critique accentue alors, avec un air de supériorité, le fait que cela est faux. C'est une image typique de la méconnaissance intellectuelle. Chaque étudiant sait, en faisant du vélo, en jetant une pierre ou en tirant un objet, que l'augmentation de l'effort produit une augmentation de la vitesse. Les étudiants ont raison, tous les théoriciens qui en déduisent que ces étudiants ont une conception erronée de la *force* ont tort. En réalité, à la place du concept *physique* de la force, l'élève utilise simplement la version *quotidienne*, à savoir l'effort. De ce fait, l'effort exercé par la gravité sur une pierre en vol est moindre au point le plus haut de la trajectoire. Bien saisir la différence entre la force physique et l'effort quotidien est la principale embûche dans l'apprentissage de la mécanique*.

* Ce palier est si élevé que de nombreux physiciens professionnels ne l'ont jamais réellement franchi eux-mêmes. Ceci est confirmé par les innombrables commentaires dans les articles qui proclament que la force physique est définie d'après la masse, et, en même temps, que la masse est définie en utilisant la force (la dernière partie de la phrase étant une erreur fondamentale).

Régulièrement, le flux de la quantité de mouvement, l'équation (49), n'est pas reconnu comme étant la définition de la force. C'est dû principalement à une observation courante : il semble y avoir des forces sans aucune accélération associée, ou variation dans la quantité de mouvement, comme dans une corde sous tension ou dans de l'eau à haute pression. Lorsque nous nous appuyons contre un arbre, il n'y a aucun mouvement, bien qu'une force soit appliquée. Si la force est l'écoulement de la quantité de mouvement, où celle-ci va-t-elle ? Elle se répartit dans les minuscules déformations des bras et de l'arbre. En fait, quand nous commençons à pousser et donc à déformer, la variation associée de la quantité de mouvement des molécules, des atomes ou des électrons des deux corps peut être mise en évidence. Après que la déformation est établie, et en regardant sous un grossissement encore plus important, nous pouvons effectivement constater qu'un flux de quantité de mouvement continu et équivalent se propage dans les deux directions. La nature de cet écoulement sera élucidée dans la partie sur la théorie quantique.

Puisque la force est le flux net de la quantité de mouvement, elle est nécessaire comme concept distinct seulement dans la vie quotidienne, où elle est utile dans des situations où les flux nets de la quantité de mouvement sont inférieurs aux flux totaux. À l'échelle microscopique, la quantité de mouvement seule est suffisante pour la description du mouvement. Par exemple, la notion de *poids* décrit la circulation de la quantité de mouvement due à la gravité. Ainsi nous n'utiliserons presque jamais le mot « poids » dans la partie microscopique de notre aventure.

À travers sa définition, le concept de force est clairement distinct de la « masse », de la « quantité de mouvement », de l'« énergie » et de la « puissance ». Mais où les forces trouvent-elles leur origine ? En d'autres termes, quels effets dans la nature ont la capacité d'accélérer des corps en puisant de la quantité de mouvement dans des objets ? Le [Tableau 22](#) en donne un aperçu.

Chaque exemple de mouvement, de celui qui nous permet de choisir la direction de notre regard à celui qui transporte un papillon à travers un paysage bucolique, peut être classé dans l'une des deux colonnes de gauche du [Tableau 22](#). D'un point de vue physique, les deux colonnes sont séparées par le critère suivant : dans le premier ensemble, l'accélération d'un corps peut être dirigée dans une direction différente de sa vitesse. Le second ensemble d'exemples ne produit que des accélérations qui sont exactement *opposées* à la vitesse du corps en mouvement, comme nous pouvons le constater dans le référentiel d'un milieu qui freine. Une telle force de résistance est appelée *frottement*, *force de traînée* ou *amortissement*. Tous les exemples du second ensemble sont des types de frottement. Vérifiez-le.

Défi 308 e

Le frottement peut être si fort que le mouvement d'un corps tout entier par rapport à son environnement est rendu impossible. Ce type de frottement, appelé *frottement statique* ou *frottement d'adhérence*, est familier et important : sans lui, faire tourner les roues des bicyclettes, des trains ou des voitures n'aurait absolument aucun effet. Pas une seule vis ne resterait serrée. Nous ne pourrions pas plus courir ou marcher dans une forêt, puisque le terrain serait encore plus glissant que la glace polie. En réalité, non seulement notre propre mouvement, mais tous les *mouvements volontaires* des êtres vivants sont *fondés* sur le frottement. Le cas est similaire pour les machines qui se déplacent toutes seules. Sans frottement statique, les hélices des navires, des avions et des hélicoptères ne seraient d'aucune utilité et les ailes des avions ne produiraient aucun soulèvement pour les garder dans les airs. (Pourquoi ?) En résumé, le frottement statique est requis toutes

Défi 309 s

TABLEAU 22 Sélection de processus et de dispositifs qui modifient le mouvement des corps.

SITUATIONS QUI PEUVENT CONDUIRE À UNE ACCÉLÉRATION	SITUATIONS QUI CONDUISENT UNI- QUEMENT À UNE DÉ- CÉLÉRATION	MOTEURS ET ACTIONNEURS	AC-
<i>piézoélectricité</i>			
quartz sous tension électrique	thermoluminescence	trépied piézo en marche	
<i>gravitation</i>			
chute	ondes gravitationnelles	poulie	
<i>collisions</i>			
satellite tombant vers une planète	accident de voiture	moteur de fusée	
extension des montagnes	collision de météorites	nage des larves	
<i>effets magnétiques</i>			
aiguille de boussole et aimant	freinage électromagnétique	pistolet électromagnétique	
magnétostriktion	pertes des transformateurs	moteur linéaire	
courant dans un fil et aimant	échauffement électrique	galvanomètre	
<i>effets électriques</i>			
peigne frotté près de cheveux	frottement entre solides	moteur électrostatique	
bombes	feu	muscles, flagelle du spermatozoïde	
tube de téléviseur	microscope électronique	moteur brownien	
<i>lumière</i>			
lévitation par la lumière	refroidissement par laser	(véritable) moulin solaire	
voiles solaires pour satellites	pression lumineuse (étoiles)	capteur solaire	
<i>élasticité</i>			
arc et flèche	bretelles de pantalons	moteur à ultrasons	
arbres cambrés qui se redressent	oreiller, airbag	bimorphes	
<i>osmose</i>			
sève qui monte dans les arbres	conservation par le sel	pendule osmotique	
électro-osmose		projection de rayons X	
<i>chaleur & pression</i>			
champagne réfrigéré	résistance d'une planche de surf	pistons hydrauliques	
bouilloire	sables mouvants	machine à vapeur	
baromètre	parachute	fusil à air comprimé, voilier	
séismes	résistance au glissement	sismomètre	
appel d'air près d'un train	absorbeurs de chocs	turbine à eau	
<i>nucléaire</i>			
radioactivité	s'engouffrer dans le Soleil	explosion d'une supernova	
<i>biologie</i>			
croissance du bambou	trouvez ! Défi 307 pe	moteurs moléculaires	

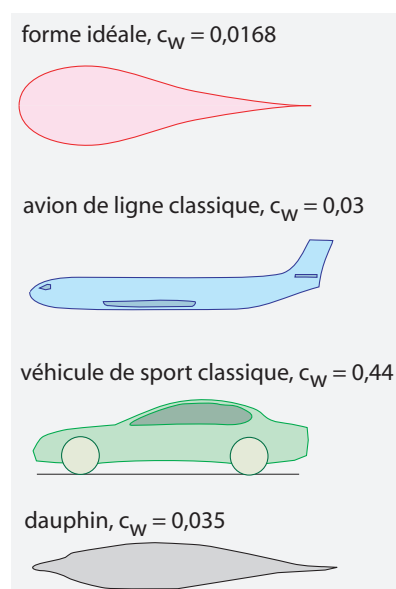


FIGURE 91 Formes et résistance à l'eau et à l'air.

les fois que nous souhaitons nous déplacer relativement à notre environnement.

Une fois qu'un objet se déplace à travers son environnement, il est entravé par un autre type de frottement : le *frottement dynamique*, qui agit sur des corps en mouvement relatif. Sans lui, des corps en chute libre rebondiraient toujours à la même hauteur, sans jamais parvenir à s'arrêter. Ni les parachutes ni les freins ne fonctionneraient ; pire encore, nous n'aurions aucune mémoire, comme nous le verrons plus loin*.

Puisque les exemples de mouvement de la deuxième colonne du [Tableau 22](#) incluent le frottement, l'énergie macroscopique n'est pas conservée dans ceux-ci : ces systèmes sont *dissipatifs*. Dans la première colonne, l'énergie macroscopique est constante : ces systèmes sont *conservatifs*.

Les deux premières colonnes peuvent également être distinguées l'une de l'autre en utilisant un critère mathématique plus abstrait : sur la gauche se trouvent des accélérations qui peuvent être dérivées d'un potentiel, sur la droite, des décélérations qui ne le peuvent pas. Comme dans le cas de la gravitation, la description de n'importe quelle sorte de mouvement est nettement simplifiée par l'utilisation d'un potentiel : à chaque position dans l'espace, nous n'avons besoin que de l'unique valeur du potentiel pour calculer la trajectoire d'un objet, au lieu des trois nombres de l'accélération ou de la force. Qui plus est, la grandeur de la vitesse d'un objet à n'importe quel point peut être calculée directement à partir de la conservation de l'énergie.

Les processus à l'origine de la seconde colonne *ne peuvent pas* être décrits par un potentiel. Ce sont les cas dans lesquels nous devons nécessairement employer la force si nous voulons décrire le mouvement d'un système. Par exemple, la force F due à la

* Une récente étude suggère qu'il est possible que dans certains systèmes cristallins, tels des éléments en tungstène sur du silicium, dans des conditions idéales, un frottement glissant puisse être extrêmement petit et puisse même disparaître dans certaines directions du mouvement. Ce phénomène, dénommé *superlubrication*, est actuellement un sujet de recherches.

résistance de l'air sur un corps est *approximativement* donnée par

$$F = \frac{1}{2} c_w \rho A v^2 \quad (52)$$

où A représente l'aire de sa surface exposée au frottement et v sa vitesse relativement à l'air, ρ est la masse volumique de l'air. Le *coefficient de traînée* c_w est un nombre adimensionnel qui dépend de la forme de l'objet en mouvement. (Quelques exemples en sont donnés dans la [Figure 91](#).) Vous devez vérifier que la résistance aérodynamique ne peut pas être dérivée d'un potentiel*.

Défi 311 pe

Le coefficient de traînée c_w est mesuré expérimentalement comme étant toujours supérieur à 0,0168, qui correspond à un profil aérodynamique optimal. Une voiture aérodynamique a une valeur comprise entre 0,25 et 0,3, mais de nombreux véhicules de sport partagent avec les camionnettes des valeurs de 0,44 et plus**.

Réf. 133

La résistance du vent est également importante pour les hommes, en particulier en athlétisme. Il est estimé que des sprinteurs du 100 m consacrent entre 3 % et 6 % de leur puissance à surmonter la résistance de l'air. Ceci conduit à des temps de courses t_w variables lorsque la vitesse w du vent est impliquée, ils sont associés par la relation

Défi 312 pe

$$\frac{t_0}{t_w} = 1,03 - 0,03 \left(1 - \frac{w t_w}{100} \right)^2, \quad (53)$$

dans laquelle l'estimation la plus prudente de 3 % est utilisée. Un vent contraire d'une vitesse de -2 m/s provoque un accroissement du temps de 0,13 s, suffisant pour transformer un record mondial potentiel en un résultat « seulement » excellent. (À partir de cette formule êtes-vous capable de déterminer la valeur de c_w pour des coureurs ?)

Défi 313 pe

De façon analogue, le parachutage fonctionne grâce à la résistance de l'air. Pouvez-vous préciser comment la vitesse d'un corps qui chute varie dans le temps, en supposant que le coefficient de traînée et la forme sont *constants* ?

Défi 314 s

A contrario, le frottement statique possède des propriétés différentes. Il est proportionnel à la force qui presse les deux corps l'un contre l'autre. Pourquoi ? En étudiant le phénomène plus en détail, nous trouvons que le frottement d'adhérence est proportionnel à la surface réelle de contact. Cela souligne le fait que mettre deux solides en contact est presque identique à prendre la Suisse, à la retourner à l'envers et à la poser contre l'Autriche : la surface de contact est beaucoup plus petite que celle estimée macroscopi-

Réf. 134

* Une telle affirmation concernant le frottement n'est exacte qu'en trois dimensions, comme c'est le cas dans la nature. Dans le cas d'une unique dimension, un potentiel peut *toujours* être trouvé.

Défi 310 s

** Calculer les coefficients de traînée à l'aide d'ordinateurs, en donnant la forme du corps en question et les propriétés du fluide, est une des tâches les plus ardues de la science. Le problème n'est toujours pas complètement résolu.

Le thème des formes aérodynamiques est encore beaucoup plus captivant pour des corps fluides. Ceux-ci gardent leur forme grâce à la *tension superficielle*. Par exemple, la tension superficielle laisse les cheveux d'une brosse humide ensemble. La tension superficielle détermine également la forme des gouttes de pluie. Les expériences montrent qu'elle est sphérique pour des gouttes inférieures à 2 mm de diamètre, et que les gouttes de pluie plus grosses sont en forme de *lentille*, avec une partie aplatie vers le bas. Cette forme classique en larme n'est *pas* rencontrée dans la nature, quelque chose de vaguement similaire à celle-ci survient lors du détachement de la goutte, mais *jamais* pendant sa chute.

Réf. 132

quement. Le point crucial est que la véritable surface de contact est proportionnelle à la force *normale*. L'analyse de ce qui se passe au niveau de la surface de contact est toujours un sujet actif de recherches, les chercheurs sont en train d'étudier ces problèmes en utilisant des instruments tels que des microscopes à force atomique, des microscopes à force latérale et des triboscopes. Tous ces efforts trouvent des applications dans les disques durs d'ordinateurs qui durent plus longtemps, car le frottement entre le disque et la tête de lecture est une variable essentielle qui détermine la durée de vie.

Toutes les formes de frottement sont accompagnées d'une augmentation de la température du corps en mouvement. La raison devint évidente suite à la découverte des atomes. Le frottement n'est pas observé dans des systèmes ne comportant que quelques particules – par exemple, 2, 3 ou 4. Le frottement apparaît seulement dans les systèmes ayant un grand nombre de particules, généralement de l'ordre de plusieurs millions, voire plus. De tels systèmes sont appelés systèmes *dissipatifs*. Les changements de température et le frottement lui-même sont tous les deux dus au mouvement d'un grand nombre de particules microscopiques les unes contre les autres. Ce mouvement n'est pas intégré dans la description galiléenne. Lorsque c'est le cas, le frottement et la perte d'énergie disparaissent, et des potentiels peuvent alors être employés dans tout ceci. Des accélérations positives – d'ampleur microscopique – apparaissent alors également, et le mouvement se révèle être conservé. Ainsi, tout mouvement est conservatif à un ordre de grandeur microscopique. Par conséquent, à cette échelle, il est possible d'expliquer *tout* mouvement sans le concept de force*. La morale de cette histoire est que nous devrions utiliser la force uniquement dans une situation : dans le cas du frottement, et seulement lorsque nous ne voulons pas plonger dans les détails microscopiques**.

« Et qu'avons-nous besoin de ce moteur, quand l'étude réfléchie de la nature nous prouve que le mouvement perpétuel est la première de ses lois ?
Donatien de Sade, *Justine ou Les Malheurs de la vertu*. »

ÉTATS COMPLETS – CONDITIONS INITIALES

« Quid sit futurum cras, fuge quaerere...***
Horace, *Odi*, lib. I, ode 9, v. 13. »

* Le premier scientifique qui élimina la force dans la description de la nature fut Heinrich Rudolf Hertz (n. Hambourg 1857, d. Bonn 1894), le célèbre découvreur des ondes électromagnétiques, dans son manuel de mécanique, *Die Prinzipien der Mechanik*, Barth, 1894, republié par Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1963. Son idée fut fortement critiquée à l'époque, et ce n'est qu'une génération plus tard, lorsque la mécanique quantique se débarrassa sereinement de ce concept une bonne fois pour toutes, que l'idée fut communément admise. (Nombreux sont ceux qui ont spéculé sur le rôle que Hertz aurait pu jouer dans le développement de la mécanique quantique et la relativité générale, s'il n'était pas décédé si jeune.) Dans son livre, Hertz avait également formulé le principe de la trajectoire la plus courte : les particules suivent des géodésiques. Cette description est un des piliers même de la relativité générale, comme nous le verrons plus loin.

** Dans le cas des relations humaines, l'évaluation devrait être quelque peu précisée, comme le montre l'étude menée par James Gilligan.

*** « De quel futur sera fait demain, ne demandez jamais... » Horace est Quintus Horatius Flaccus (65–8 av. J.-C.), le grand poète romain.

Réf. 135

Réf. 56

Nous décrivons souvent le mouvement d'un corps en précisant la dépendance par rapport au temps de sa position, par exemple comme

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_0 + \mathbf{v}_0(t - t_0) + \frac{1}{2}\mathbf{a}_0(t - t_0)^2 + \frac{1}{6}\mathbf{j}_0(t - t_0)^3 + \dots \quad (54)$$

Les variables dotées d'un indice 0, comme la position de départ $\mathbf{x}_0$, la vitesse initiale $\mathbf{v}_0$, etc., sont appelées *conditions initiales*. Des conditions initiales sont nécessaires pour n'importe quelle description du mouvement. Des systèmes physiques distincts ont des conditions initiales différentes. Celles-ci spécifient donc le caractère *exclusif* d'un système donné. Les conditions initiales nous permettent aussi de distinguer la situation actuelle d'un système de celle à n'importe quel instant passé : les conditions initiales précisent les *aspects variables* d'un système. En d'autres termes, elles résument le passé d'un système.

Page 25 Les conditions initiales sont de cette façon précisément les propriétés que nous avons cherchées pour une description de l'état d'un système. Pour trouver une description complète des états, nous avons donc besoin uniquement d'une description complète des conditions initiales. Il apparaît que, pour la gravitation comme pour toutes les autres interactions microscopiques, il n'y a *pas* besoin de l'accélération initiale $\mathbf{a}_0$, du jerk initial $\mathbf{j}_0$ ou de quantités initiales d'ordre plus important. Dans la nature, l'accélération et le jerk dépendent seulement des propriétés des objets et de leur environnement, elles ne dépendent pas du passé. Par exemple, l'expression $a = GM/r^2$, donnant l'accélération d'un petit corps à proximité d'un autre plus grand, ne dépend pas du passé, mais seulement du milieu. La même chose se produit pour les autres interactions fondamentales, comme nous allons bientôt le découvrir.

Page 65 L'état complet d'une masse ponctuelle en mouvement est donc précisé en donnant sa position et sa quantité de mouvement à chaque instant du temps. Ainsi nous avons atteint une description complète des propriétés intrinsèques des objets ponctuels, à savoir par leur masse, et de leurs états de mouvement, à savoir par leur quantité de mouvement, leur énergie, leur position dans le temps. Pour les objets rigides étendus, nous avons également besoin de l'orientation, de la vitesse angulaire et du moment cinétique. Pouvez-vous préciser les quantités nécessaires dans le cas de corps étendus élastiques ou fluides ?

Défi 315 pe

L'ensemble de tous les états possibles d'un système est désigné par un nom particulier : il est appelé l'*espace des phases*. Nous utiliserons ce concept à plusieurs reprises. Comme tout espace, il possède un nombre de dimensions. Pouvez-vous le trouver pour un système comportant N particules ponctuelles ?

Défi 316 s

Cependant, il y a des situations dans la nature où le mouvement d'un objet dépend de caractéristiques autres que sa masse, le mouvement peut dépendre de sa couleur (pouvez-vous trouver un exemple ?), de sa température et de quelques autres propriétés que nous découvrirons bientôt. Pouvez-vous donner un exemple d'une propriété intrinsèque que nous avons omise jusqu'à présent ? Et pour chaque propriété intrinsèque il y a des variables d'état à découvrir. Ces nouvelles propriétés sont les fondements du champ de l'investigation physique sous-jacente à la mécanique. Nous devons par conséquent conclure que pour l'instant nous ne sommes pas parvenus à une description complète du mouvement.

Défi 317 s

Défi 318 s

Défi 319 s Il est intéressant de rappeler un défi plus ancien et de le formuler à nouveau : l'univers a-t-il des conditions initiales ? Possède-t-il un espace des phases ? Comme conseil, rappelez-vous que, lorsqu'une pierre est lancée, les conditions initiales résument les effets du lanceur, son histoire, la manière dont il est arrivé là, etc. ; en d'autres termes, les conditions initiales résument les effets que l'environnement a eus pendant l'histoire d'un système.

« Un optimiste est quelqu'un qui pense que le futur est incertain. »

LES SURPRISES EXISTENT-ELLES ? L'AVENIR EST-IL DÉJÀ TOUT TRACÉ ?

« Die Ereignisse der Zukunft können wir nicht aus den gegenwärtigen erschließen. Der Glaube an den Kausalnexus ist ein Aberglaube*.
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 5.1361 »

« La liberté c'est de savoir reconnaître le nécessaire. »

Friedrich Engels (1820–1895)

Défi 320 e Si, après avoir grimpé dans un arbre, nous sautons sur le sol, nous ne pouvons stopper notre saut au milieu de sa trajectoire. Une fois que le saut est commencé, il est inévitable et déterminé, comme tous les mouvements passifs. Pourtant, lorsque nous commençons à bouger un bras, nous pouvons arrêter son mouvement ou transformer une gifle en une caresse. Le mouvement volontaire ne semble pas être inévitable ou prédéterminé. Laquelle de ces deux situations est la plus générale ?

Commençons avec l'exemple que nous pouvons décrire le plus précisément possible pour le moment : la chute d'un corps. Une fois que le potentiel φ agissant sur une particule est fixé et pris en compte, en utilisant

$$\mathbf{a}(x) = -\nabla\varphi = -GM\mathbf{r}/r^3, \quad (55)$$

et l'état à un instant donné qui est fourni par les conditions initiales comme

$$\mathbf{x}(t_0) = x_0 \quad \text{et} \quad \mathbf{v}(t_0) = v_0, \quad (56)$$

nous pouvons alors déterminer le mouvement à l'avance. La trajectoire complète $\mathbf{x}(t)$ peut être calculée avec ces deux renseignements. En raison de cette faisabilité, une équation telle que (55) est appelée une *équation d'évolution* pour le mouvement de l'objet. (Remarquez que le mot « évolution » possède une signification différente en physique et en biologie.) Une équation d'évolution exprime toujours l'idée que l'on n'observe pas dans la nature tous les types de changements possibles, mais seulement certaines situations précises. Toutes les successions possibles et imaginables d'événements ne sont pas observées, mais seulement un nombre limité d'entre elles. En particulier, l'équation (55) explicite que, d'un instant au suivant, les objets modifient leur mouvement par le tru-

* « Nous ne pouvons pas déduire les événements du futur à partir de ceux du présent. La superstition n'est rien d'autre que la croyance dans les liens de cause à effet. »

chement du potentiel qui agit sur eux. Donc, en fixant une équation d'évolution et un état initial, le mouvement tout entier d'un système est *fixé de manière unique*. Cette propriété du mouvement est souvent nommée *déterminisme*. Puisque ce terme est familièrement utilisé avec des connotations différentes, distinguons-le prudemment de plusieurs concepts similaires pour éviter tout malentendu.

Le mouvement peut être déterministe et en même temps rester *imprévisible*. Cette dernière caractéristique peut avoir quatre origines : un nombre énorme de particules impliquées qui rend tout calcul inexploitable, la complexité des équations d'évolution, des informations insuffisantes concernant les conditions initiales, et des formes de l'espace-temps qui ne sont pas familières. La prévision météorologique est un exemple où les trois premières conditions sont vérifiées en même temps*. Néanmoins, son mouvement est toujours déterministe. À proximité des trous noirs, les quatre conditions s'appliquent toutes ensemble. Pourtant, à proximité des trous noirs, le mouvement est encore déterministe.

Le mouvement peut être à la fois déterministe et *aléatoire* dans le temps, c'est-à-dire avoir des résultats différents à partir d'expériences identiques. Le mouvement d'une bille de roulette est déterministe, mais est également aléatoire**. Comme nous le verrons plus tard, les situations de la mécanique quantique tombent dans cette catégorie, de même que tous les exemples de mouvements irréversibles, comme une goutte d'encre qui se répand dans de l'eau claire. Dans tous ces cas le hasard et la non-reproductibilité ne sont qu'apparents, ils disparaissent lorsque nous prenons en compte la description des états et des conditions initiales au niveau microscopique. En résumé, le déterminisme n'entre pas en contradiction avec l'*irréversibilité (macroscopique)*. Toutefois, à l'échelle microscopique, le mouvement déterministe est toujours réversible.

Une dernière notion qui doit être discernée du déterminisme est la *non-causalité*. La causalité est l'exigence qu'une cause doit précéder son effet. Cela reste superficiel en physique galiléenne, mais devient primordial en relativité restreinte, dans laquelle la causalité entraîne que la vitesse de la lumière est une limite dans la propagation des effets. En réalité, il semble impossible d'avoir un mouvement déterministe (de matière et d'énergie) qui soit *non causal*, c'est-à-dire plus rapide que la lumière. Pouvez-vous confirmer cela ? Ce sujet sera plus profondément étudié dans la section sur la relativité restreinte.

Dire que le mouvement est « déterministe » signifie qu'il est fixé une fois pour toutes dans le futur *mais également dans le passé*. Il est parfois affirmé que des prédictions d'observations futures représentent un test décisif pour une description exacte de la nature. En raison de notre capacité fréquente et impressionnante à influencer l'avenir, ce n'est pas forcément un bon test. Toute théorie doit, avant tout, décrire correctement les observations passées. C'est notre impuissance à pouvoir modifier le passé qui a pour résultat notre impossibilité de choisir la bonne description de la nature, qui est si centrale en physique. En ce sens, l'expression « situation initiale » est un choix malheureux, parce qu'il nous conduit automatiquement à rechercher la situation initiale de l'univers et

* Pour des images magnifiques de nuages, consultez le site Web <http://www.goes.noaa.gov>.

** Les mathématiciens ont développé une large palette de tests pour déterminer si un ensemble de nombres peut être qualifié d'*aléatoire*. Les résultats de la roulette passent tous ces tests avec succès – uniquement dans les casinos honnêtes, toutefois. De tels tests vérifient typiquement la distribution identique des nombres, des paires de nombres, des triplets de nombres, etc. D'autres tests sont le test du chi-deux χ^2 , le(s) test(s) de Monte Carlo, et le test du gorille.

Défi 321 s

Réf. 136

à tenter ainsi de répondre à des questions qui peuvent trouver une réponse sans cette information. Le principal ingrédient d'une description déterministe est que tout mouvement peut être réduit à une équation d'évolution plus un état explicite. Cet état peut aussi bien être initial, intermédiaire ou final. Le mouvement déterministe est défini de manière unique dans le passé et dans le futur.

Défi 322 s

Pour avoir une idée claire du déterminisme, il est utile de rappeler pourquoi la notion de « temps » s'est immiscée dans notre description du monde. Nous avons introduit le temps parce que nous observons en premier lieu que nous sommes capables de définir des successions dans les observations, et, en second lieu, que le changement sans limites n'existe pas. C'est à l'opposé des films, où un individu peut passer une porte pour ressortir sur un autre continent ou dans un autre siècle. Dans la nature, nous n'observons pas de métamorphoses, comme des individus se transformant en grille-pain ou des chiens en brosses à dents. Nous introduisons le « temps » uniquement parce que les changements successifs que nous observons sont extrêmement restreints. Si la nature n'était pas reproductible, le temps ne pourrait pas être employé. En résumé, le déterminisme exprime l'idée que *des changements successifs ne sont limités à chaque fois qu'à une unique occurrence possible*.

Puisque le déterminisme est relié à l'usage de la notion du temps, de nouvelles interrogations surgissent dès que le concept temporel est modifié, comme cela se produit dans la relativité restreinte, en relativité générale et dans la physique théorique des hautes énergies. Ces questions sont très amusantes.

Page ??

En résumé, chaque description de la nature qui utilise la notion de temps, telles celle de la vie quotidienne, celle de la physique classique et celle de la mécanique quantique, est intrinsèquement et inévitablement déterministe, puisqu'elle relie des observations passées et futures, *bannissant* toute alternative. En bref, *l'usage du temps implique le déterminisme, et vice versa*. Lorsque nous formulons des conclusions métaphysiques, comme il est si familier de nos jours en discutant de la théorie quantique, nous ne devrions jamais oublier cette relation. Quiconque utilise des horloges mais renie le déterminisme entretient une double personnalité* !

L'idée que le mouvement est fixé produit souvent de la crainte, parce que nous avons été éduqués pour associer le déterminisme avec un manque de liberté. D'un autre côté, nous faisons l'expérience de la liberté dans nos actions et nous appelons cela le *libre arbitre*. Nous savons qu'il est indispensable pour notre créativité et pour notre bonheur. Par conséquent il semblerait que le déterminisme soit opposé au bonheur.

Mais qu'est-ce que précisément le libre arbitre ? Beaucoup d'encre a coulé pour tenter de trouver une définition précise. Nous pouvons essayer de définir le libre arbitre comme la liberté dans le choix des conditions initiales. Toutefois, des conditions initiales doivent elles-mêmes résulter des équations d'évolution, de telle façon qu'il n'y a en réalité pas de liberté dans leur choix. Nous pouvons tenter de définir le libre arbitre à partir de l'idée de l'imprévisibilité, ou à partir de propriétés similaires, comme l'incalculabilité. Mais ces définitions se heurtent au même problème de base : quelle que soit cette définition, il n'y a *aucune voie* pour démontrer expérimentalement qu'une action a été réalisée librement. Les éventuelles définitions sont inutiles. En résumé, le libre arbitre *ne peut pas* être observé. (Les psychologues possèdent également un grand nombre de données

* Cela peut malgré tout faire l'objet de nombreux divertissements.

qui leur sont propres pour appuyer cela, mais c'est une autre histoire.)

Aucun processus *graduel* – par opposition à *instantané* – ne peut être dû au libre arbitre. Les processus graduels sont décrits par le temps et sont déterministes. En ce sens, la question concernant le libre arbitre en devient une concernant l'existence de changements instantanés dans la nature. Ce sera un sujet récurrent dans la suite de notre promenade. La nature a-t-elle le potentiel de surprendre ? Dans notre vie courante, elle ne l'a pas. Des modifications subites ne sont pas observées. Bien entendu, nous aurons toujours à examiner cette question dans d'autres domaines, dans l'infiniment petit et dans l'infiniment grand. En réalité, nous changerons d'opinion plusieurs fois. L'absence de surprise dans la vie quotidienne est fondée de manière profonde dans notre corps : la notion de curiosité est basée sur l'idée que toute chose découverte est utile par la suite. Si la nature nous surprenait constamment, la curiosité n'aurait aucun sens.

Une autre remarque contredit l'existence des aberrations : au début de notre excursion, nous définissions le temps en faisant usage de la continuité du mouvement, plus tard nous avons exprimé cela en disant que le temps est une conséquence de la conservation de l'énergie. La conservation est le contraire de la surprise. D'ailleurs, un défi demeure : pouvez-vous montrer que le temps ne serait pas définissable même si les surprises n'existaient que *rarement* ?

Succinctement, jusqu'à présent nous n'avons aucune preuve que les surprises existent dans la nature. Le temps existe parce que la nature est déterministe. Le libre arbitre ne peut pas être défini avec la précision requise par la physique. En formulant qu'il n'y a aucun changement instantané, nous formulons implicitement qu'il n'existe qu'une définition consistante du libre arbitre : c'est une *sensation*, en particulier d'indépendance par rapport aux autres, d'indépendance par rapport à la peur et d'acceptation des conséquences de nos actions. Le libre arbitre est une sensation de satisfaction. Cela résout le paradoxe apparent : le libre arbitre étant une impression, il existe en tant qu'expérience humaine, même si tous les objets se déplacent sans aucune possibilité de choisir. Il n'y a aucune contradiction*.

Même si l'action humaine est prédéterminée, elle reste authentique. Alors pourquoi le déterminisme est-il si effrayant ? C'est une question que chacun doit se poser à lui-même. Quelle distinction le déterminisme implique-t-il pour votre vie, pour les actions, les choix, les responsabilités et les plaisirs que vous rencontrez** ? Si vous concluez qu'être conditionné est différent d'être libre, vous devez changer votre manière de vivre ! La peur du déterminisme provient généralement du refus de considérer le monde tel qu'il est. Paradoxalement, c'est précisément celui qui insiste sur l'existence du libre arbitre qui cherche à échapper aux responsabilités.

* Le fait que le libre arbitre soit une sensation peut également être confirmé par une introspection attentive. L'idée du libre arbitre survient toujours *après* qu'une action a été entamée. C'est une expérience magnifique que de s'asseoir dans un environnement paisible, avec l'intention de faire, dans un nombre indéterminé de minutes, un petit geste, comme fermer sa main. Si vous observez attentivement, dans tous ses détails, ce qui se passe à l'intérieur de vous-même aux alentours du véritable moment de la décision, vous trouvez soit un mécanisme qui a conduit à la décision, soit une vague impression obscure et diffuse. Vous ne trouvez jamais de libre arbitre. Une telle expérience est une voie magnifique pour expérimenter avec profondeur les prodiges de la personnalité. Des expériences de ce genre peuvent également être une des origines possibles de la spiritualité humaine, puisqu'elles indiquent la relation que chacun entretient avec le reste de la nature.

** Si les « lois » de la nature sont déterministes, sont-elles en contradiction avec les « lois » morales ou éthiques ? Les gens peuvent-ils toujours être tenus pour responsables de leurs actions ?

« Vous avez la capacité de vous surprendre vous-même. »
Richard Bandler et John Grinder

UNE CONCLUSION ÉTRANGE SUR LE MOUVEMENT

« Darum kann es in der Logik auch *nie* Überraschungen geben*.
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.1251 »

La mécanique classique décrit la nature d'une manière relativement simple. Les *objets* sont invariables et sont des entités massives situées dans l'espace-temps. Les *états* sont les propriétés variables des objets, décrites par la position dans l'espace et l'instant dans le temps, par l'énergie et la quantité de mouvement, et par leurs équivalents rotationnels. Le *temps* est la relation mesurée par une horloge entre des événements. Les *horloges* sont des dispositifs en mouvement non perturbé dont la position peut être observée. L'*espace*, et la position, est la relation mesurée par une règle graduée entre des objets. Les *règles graduées* sont des appareils dont la forme est subdivisée par quelques marques, figées de manière invariante et observable. Le *mouvement* est la variation de la position dans le temps (fois la masse), il est déterminé, ne révèle aucune surprise, il est conservé (même après la mort), et est provoqué par la gravitation et d'autres interactions.

Défi 327 s Même si cette description fonctionne plutôt bien, elle contient une définition en boucle. Pouvez-vous l'identifier ? Chacun des deux concepts centraux du mouvement est défini à l'aide de l'autre. Les physiciens s'escrimèrent pendant environ 200 ans sur la mécanique classique sans remarquer ou sans vouloir remarquer ce fait. Même les penseurs qui avaient un intérêt à discréditer la science ne l'ont pas relevé. Une science exacte
Défi 328 s peut-elle être fondée sur une définition circulaire ? Manifestement, la physique s'en est plutôt bien sortie jusqu'à présent. Certains ont même affirmé que cette situation est en principe inévitable. Malgré ces jugements, défaire cette boucle logique est une des aspirations du reste de notre promenade. Pour l'accomplir, nous avons besoin d'accroître considérablement le niveau de précision de notre description du mouvement.

À chaque fois que la précision est accrue, l'imagination est restreinte. Nous découvrons que de nombreux types de mouvement qui paraissent réalisables ne le sont pas. Le mouvement est limité. La Nature limite la vitesse, la taille, l'accélération, la masse, la force, la puissance et un grand nombre d'autres quantités. Ne persévérez dans votre lecture que si vous êtes préparé à troquer la fantaisie pour la précision. Cela ne sera pas perdu, puisque vous obtiendrez alors quelque chose d'autre : les rouages de la nature vous émerveilleront.

DESCRIPTIONS GÉNÉRALES DU MOUVEMENT

« Πλεῖν ἀνάγκη, ζῆν οὐκ ἀνάγκη**.
Pompée »

* « Par conséquent il ne peut *jamais* y avoir de surprises dans la logique. »

** « Navigare necesse, vivere non necesse (Naviguer est nécessaire, mais il n'est pas nécessaire de vivre). »

Réf. 139 Gnaeus Pompeius Magnus (106–48 av. J.-C.), cité par Plutarque (v. 45 à v. 125).





FIGURE 92 Quelle forme de rampe permet à la pierre noire de glisser le plus rapidement du point A au point inférieur B ?

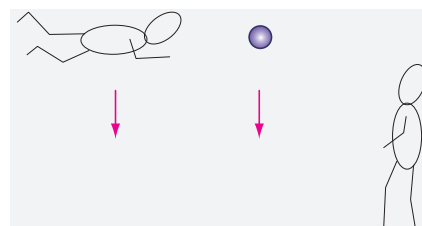


FIGURE 93 Le mouvement peut-il être défini de la même manière pour tous les observateurs ?

Partout sur la Terre – même en Australie – les gens remarquent que les pierres tombent « vers le bas ». La promulgation de la « loi » universelle de la gravitation a été facilitée par cette constatation ancestrale. Pour le découvrir, tout ce qu'il y eut à faire fut de rechercher une description de la gravité qui fût valide au niveau général. La seule remarque complémentaire qui doit être faite afin de déduire la formule $a = GM/r^2$ est que la gravité varie avec la hauteur.

En résumé, le fait de réfléchir *globalement* nous aide à rendre notre description du mouvement plus précise. Comment pouvons-nous décrire le mouvement de la manière la plus générale possible ? Il apparaît que nous avons six manières d'aborder cette question, chacune d'elles nous sera utile sur notre chemin vers le sommet de la Montagne Mouvement. Nous commencerons par une vue d'ensemble, puis nous explorerons les détails de chaque approche.

- La première approche globale du mouvement émane du caractère limité de ce que nous avons appris jusqu'à présent. Lorsque nous déduisons le mouvement d'une particule à partir de son accélération en cours, nous sommes en train d'utiliser la description du mouvement la plus *locale* possible. Par exemple, toutes les fois que nous utilisons une équation d'évolution, nous utilisons en fait l'accélération de la particule en un lieu et à un instant donnés pour déterminer sa position et son mouvement *juste après* cet instant et *au voisinage immédiat* de cet endroit.

Les équations d'évolution ont donc un « horizon » imaginaire de rayon zéro.

L'approche opposée est illustrée dans le célèbre problème de la **Figure 92**. Le défi est de trouver le trajet qui permet de réaliser le mouvement de glissement le plus rapide possible depuis un point élevé jusqu'à un point distant plus bas. Pour résoudre cela, nous avons besoin de considérer le mouvement comme un tout, pour tous les instants et toutes les positions. L'approche globale requise par des interrogations comme celle-ci nous mènera tout droit à une description du mouvement qui est simple, précise et séduisante : le dénommé principe de paresse universelle, également connu sous le nom de principe de moindre action.

- La deuxième approche globale du mouvement émerge lorsque nous comparons les diverses descriptions du même système fournies par des observateurs distincts. Par exemple, les observations d'une personne qui chute d'une falaise, d'un passager de montagnes russes, et d'un observateur debout sur le plancher des vaches seront généralement différentes. Les relations entre toutes ces observations nous conduisent à

Défi 329 d



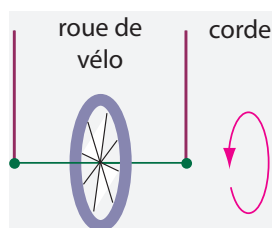


FIGURE 94 Que se passe-t-il lorsqu'une corde est coupée ?

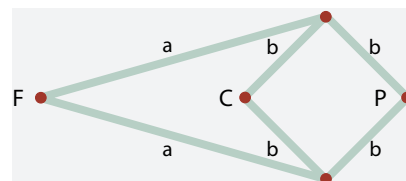


FIGURE 95 Comment dessiner une ligne droite à l'aide d'un compas ? Fixez un point F, posez un crayon à la jointure P et déplacez C avec un compas le long d'un cercle.

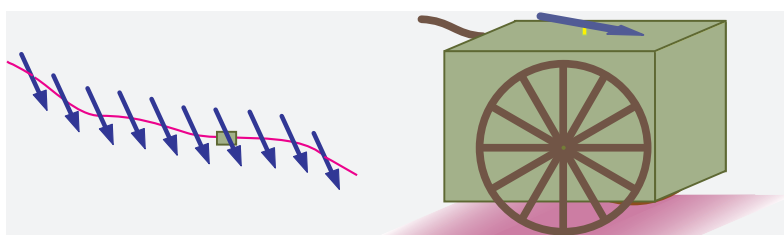


FIGURE 96 Une charrette pointant vers le sud.

une description générale, valide pour tout le monde. Cette méthode nous mène à la théorie de la relativité.

- La troisième approche globale du mouvement consiste à explorer le mouvement des corps *étendus et rigides*, plutôt que celui des masses ponctuelles. Le résultat non intuitif de l'expérience de la Figure 94 montre que le jeu en vaut la chandelle.

Pour pouvoir concevoir des machines, il est indispensable de comprendre comment les corps rigides d'un groupe interagissent. Comme exemple, le mécanisme de la Figure 95 associe le mouvement des points C et P. Il définit tacitement un cercle de telle façon que nous ayons toujours la relation $r_C = 1/r_P$ entre les distances de C et de P à son centre. Pouvez-vous trouver ce cercle ?

Défi 330 pe

Réf. 140

Défi 331 d

Un autre excellent challenge consiste à inventer une charrette en bois, dotée d'engrenages qui relient une flèche aux roues de telle manière que, quel que soit l'itinéraire que la charrette emprunte, la flèche pointe toujours vers le sud (voir la Figure 96). Comme nous le verrons, la solution à ce problème est utile pour mieux appréhender la relativité générale.

Réf. 141

Un autre exemple intéressant pour le mouvement rigide est le fait que les mouvements humains, tel le déplacement d'un bras en général, sont constitués d'un petit nombre de mouvements élémentaires. Tous ces exemples sont tirés du domaine captivant de la technique ; malheureusement, nous aurons trop peu de temps pour explorer ce sujet durant notre excursion.

- La quatrième manière générale d'aborder le mouvement est l'étude des *corps étendus non rigides*. Par exemple, la *mécanique des fluides* étudie l'écoulement des fluides (tels que le miel, l'eau ou l'air) autour de corps solides (tels des cuillères, des bateaux, des voiles ou des ailes). La mécanique des fluides tente donc d'expliquer comment



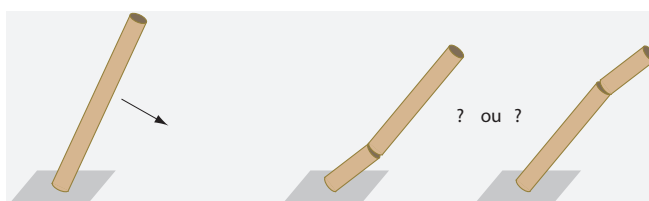


FIGURE 97 Comment et où un conduit de cheminée en brique qui chute se brise-t-il ?

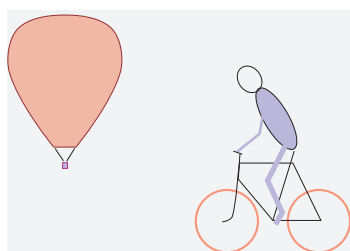


FIGURE 98 Pourquoi les ballons emplis d'air chaud restent-ils gonflés ? Comment pouvez-vous mesurer le poids d'un cycliste en utilisant uniquement une règle ?

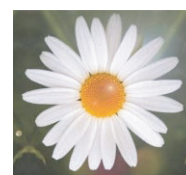


FIGURE 99 Qu'est-ce qui détermine le nombre de pétales d'une marguerite ?

Réf. 142

Défi 332 s

Défi 333 s

volent les insectes, les oiseaux et les avions*, pourquoi les voiliers peuvent naviguer en s'appuyant sur le vent, ce qui se passe quand un œuf dur est mis en rotation sur une fine couche d'eau, ou comment une bouteille pleine de vin peut être vidée de la manière la plus rapide possible.

À l'instar des fluides, nous pouvons étudier le comportement des *solides déformables*. Ce domaine de recherche est appelé la *mécanique des milieux continus*. Elle traite des déformations et des oscillations des structures étendues. Elle cherche à expliquer, par exemple, pourquoi les cloches sont faites selon une forme particulière, comment de grands corps – comme des conduits de cheminée en chute libre – se brisent lorsqu'ils subissent une contrainte, et comment les chats peuvent se retourner tout seuls de façon adéquate pendant qu'ils chutent. Tout au long de notre voyage, nous rencontrerons à plusieurs reprises des problèmes concernant ce domaine, qui empiète même sur la relativité générale et sur le monde des particules élémentaires.

- La cinquième approche globale du mouvement concerne l'étude du mouvement d'un nombre colossal de particules. Celle-ci est dénommée la *mécanique statistique*. Les concepts qui nécessitent de décrire les gaz, comme la température et la pression

* Les mécanismes du vol des insectes constituent toujours une discipline de recherches actives. Traditionnellement, la mécanique des fluides était focalisée sur les grands systèmes, comme les bateaux, les navires et les avions. En fait, le plus petit objet conçu par l'homme capable de voler de manière contrôlée – disons, un avion ou un hélicoptère radiocommandé – est beaucoup plus grand et plus lourd que de nombreux êtres volants que l'évolution a engendrés. Il s'avère que commander le vol de petits corps nécessite davantage de connaissances et plus d'astuce que commander le vol d'objets plus grands. Vous pouvez en apprendre plus sur ce sujet à la page ??.



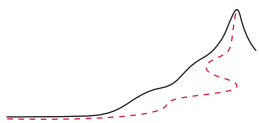
(voir la Figure 98), constitueront notre première étape vers la compréhension des trous noirs.

- La sixième approche globale du mouvement concerne tous les points de vue mentionnés ci-dessus *en même temps*. Une telle avancée est primordiale pour comprendre l'expérience quotidienne, et la *vie* elle-même. Pourquoi une fleur possède-t-elle un nombre particulier de pétales ? Comment un embryon se différencie-t-il dans l'utérus ? Qu'est-ce qui fait battre nos cœurs ? Comment les crêtes montagneuses et les silhouettes des nuages émergent-elles ? Comment les astres et les galaxies évoluent-ils ? Comment les vagues de l'océan sont-elles façonnées par le vent ?

Tous ces cas sont des exemples d'*auto-organisation* ; les chercheurs en sciences de la vie parlent simplement de *croissance*. Quelle que soit la désignation utilisée pour ces processus, ils sont caractérisés par l'apparition spontanée de motifs, de formes et de cycles. Ces processus constituent un sujet commun de recherche à travers un grand nombre de disciplines, incluant la biologie, la chimie, la médecine, la géologie et les sciences de l'ingénieur.

Nous allons maintenant donner une courte introduction à ces six approches globales du mouvement. Nous allons commencer avec la première, à savoir la description générale des objets, assimilés à des points, en mouvement. La méthode élégante décrite ci-dessous fut le résultat de plusieurs siècles d'efforts collectifs, et constitue le point culminant de la mécanique. Elle fournit également les bases pour toutes les descriptions supplémentaires du mouvement que nous rencontrerons plus tard.





CHAPITRE 8

MESURER LE CHANGEMENT AVEC L'ACTION

Le mouvement peut être décrit par des nombres. Pour une unique particule, les relations entre les coordonnées spatiales et temporelles décrivent le mouvement. La prise de conscience que des expressions telles que $(x(t), y(t), z(t))$ peuvent être employées pour retracer l'itinéraire d'une particule en mouvement fut une étape décisive dans le progrès de la physique moderne.

Nous pouvons aller encore plus loin. Le mouvement est une forme de changement. Et ce changement peut lui-même être utilement décrit par des nombres. En réalité, le changement peut être quantifié par un nombre unique. Cette découverte constitua l'étape cruciale suivante. Il fallut aux physiciens près de deux siècles d'efforts pour dévoiler la manière de décrire le changement. En conséquence, la quantité qui mesure le changement possède un nom étrange : elle est appelée *action (physique)**. Pour se rappeler le rapport qui existe entre l'« action » et le changement, pensez simplement à un film d'Hollywood : quand il y a beaucoup d'action, il y a aussi une grande quantité de changements.

Imaginez que nous prenions deux clichés d'un système à des instants différents. Comment pourriez-vous définir la quantité de changement qui se produit entre les deux ? À quels moments les choses changent-elles beaucoup, et quand changent-elles seulement un petit peu ? Primo, un système qui possède beaucoup de mouvement témoigne d'une grande quantité de changement. Il paraît donc logique que l'action d'un système constitué de sous-systèmes indépendants doive être la somme des actions de ces sous-systèmes.

Secundo, le changement s'accumule souvent – mais pas toujours – au cours du temps ; dans d'autres cas, un changement récent peut compenser un changement antérieur. Le changement peut ainsi augmenter ou diminuer avec le temps.

* Remarquez que cette « action » n'est pas identique à l'« action » qui apparaît dans des formulations telles que « chaque action possède une réaction égale et opposée ». Ce dernier usage, initié par Newton, n'a pas résisté ; par conséquent ce terme a été réutilisé. Après Newton, le terme « action » fut tout d'abord utilisé pour une signification intermédiaire avant d'être finalement adopté dans son sens moderne employé ici. Cette dernière signification est la seule qui est utilisée dans ce texte.

Un autre emploi qui a été recyclé est le « principe de moindre action ». Dans les livres anciens, il était employé dans un contexte différent de celui de ce chapitre. Actuellement, il se réfère à ce qu'il est d'usage d'appeler le *principe de Hamilton* dans le monde anglo-saxon, bien qu'il soit (principalement) dû à d'autres personnalités, particulièrement Leibniz. Les anciennes significations et dénominations sont tombées en désuétude et ne sont pas maintenues ici.

Derrière ces mutations terminologiques se cache l'histoire longue de deux siècles de tentatives effrénées pour décrire le mouvement à l'aide des *principes variationnels* ou *extrémaux* : l'objectif était de perfectionner et d'achever le travail initié par Leibniz. Ces principes n'ont aujourd'hui qu'un intérêt historique, parce qu'ils sont tous des cas particuliers du principe de moindre action décrit ici.

TABLEAU 23 Quelques valeurs d'action pour des changements observés ou imaginaires.

CHANGEMENT	VALEUR APPROXIMATIVE POUR L'ACTION
Le plus petit changement mesurable	$0,5 \cdot 10^{-34}$ Js
Exposition d'une pellicule photographique	$1,1 \cdot 10^{-34}$ Js à 10^{-9} Js
Battement d'aile d'une drosophile (mouche)	env. 1 pJs
Ouverture d'une fleur au lever du jour	env. 1 nJs
Avoir les joues rouges	env. 10 mJs
Verre tenu par rapport à un verre lâché	0,8 Js
Arbre courbé par le vent d'un côté à l'autre	500 Js
Faire disparaître un lapin blanc par de la « vraie » magie	100 PJs
Dissimuler un lapin blanc	env. 0,1 Js
Changement cérébral maximum en une minute	env. 5 Js
Rester en lévitation à 1 m pendant une minute	env. 40 kJs
Accident de voiture	env. 2 kJs
Naissance	env. 2 kJs
Changement provoqué par une vie humaine	env. 1 EJs
Arrêt d'un véhicule pendant le clignement d'un œil	20 kJs
Grand tremblement de terre	env. 1 PJs
Disparition d'une voiture pendant le clignement d'un œil	1 ZJs
Lever du soleil	env. 0,1 ZJs
Une source de sursaut gamma avant et après l'explosion	env. 10^{46} Js
L'univers après qu'une seconde s'est écoulée	indéfini et indéfinissable

Tertio, pour un système dans lequel le mouvement est stocké, transformé ou transféré d'un sous-système à un autre, le changement est inférieur à celui d'un système pour lequel ce n'est pas le cas.

Les propriétés mentionnées impliquent que la mesure naturelle du changement est l'écart moyen entre l'énergie cinétique et potentielle multiplié par le temps écoulé. Cette quantité possède toutes les bonnes propriétés : elle est (habituellement) la somme des quantités correspondantes pour tous les sous-systèmes si ceux-ci sont indépendants, elle augmente généralement avec le temps (à moins que l'évolution ne compense quelque chose qui est survenu auparavant), et elle diminue si le système transforme du mouvement en énergie potentielle.

Ainsi l'action (physique) S , mesurant le changement dans un système, est défini comme

$$S = \overline{L} \cdot (t_f - t_i) = \overline{T - U} \cdot (t_f - t_i) = \int_{t_i}^{t_f} (T - U) dt = \int_{t_i}^{t_f} L dt, \quad (57)$$

où T représente l'énergie cinétique, U l'énergie potentielle que nous connaissons déjà, L est la différence entre eux, et la barre supérieure indique une moyenne temporelle.





FIGURE 100 Joseph Lagrange.

La quantité L s'appelle le *lagrangien* (ou *fonction lagrangienne*) du système* et décrit ce qui est ajouté au cours du temps, à chaque fois que les choses changent. Le signe $\int$ est un « S » étiré, pour « somme », et est prononcé « intégrale de ». En termes intuitifs il désigne l'opération (appelée *intégration*) d'adjonction des valeurs d'une quantité variant au cours d'intervalles infinitésimaux de temps dt . Les instants initial et final sont notés, respectivement, en bas et en haut du signe « intégrale ». La Figure 101 clarifie cette idée : l'intégrale représente simplement l'aire de la zone sombre située sous la courbe $L(t)$.

Défi 335 e

Mathématiquement, l'intégrale de la courbe $L(t)$ est définie comme suit

$$\int_{t_i}^{t_f} L(t) dt = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{m=i}^f L(t_m) \Delta t = \bar{L} \cdot (t_f - t_i) . \quad (58)$$

En d'autres termes, l'intégrale est la limite, lorsque les intervalles de temps deviennent très petits, de la somme des aires des bandes rectangulaires distinctes qui approchent la fonction**. Puisque le signe $\sum$ représente également une somme, et puisqu'un intervalle de temps Δt infinitésimal est noté dt , nous pouvons comprendre la notation utilisée pour l'intégration. L'intégration est une somme de toutes les tranches. Cette notation fut développée par Gottfried Leibniz pour souligner précisément cette remarque. Physiquement parlant, l'intégrale du lagrangien mesure l'effet que L accumule au cours du temps. En fait, l'action est appelée « effet » dans certaines langues, comme l'allemand.

En résumé, l'action est l'intégrale du lagrangien sur un intervalle de temps. L'unité de l'action, et donc du changement physique, est l'unité de l'énergie (le joule, J), multiplié par l'unité du temps (la seconde). Ainsi, le changement est mesuré en Js. Une valeur importante signifie un grand changement. Le Tableau 23 montre quelques valeurs approximatives d'actions.

Pour comprendre plus précisément la définition de l'action, nous allons commencer avec le cas le plus simple : un système qui possède une énergie potentielle nulle, telle une

* Celle-ci est baptisée d'après Giuseppe Lodovico Lagrangia (n. Turin 1736, d. Paris 1813), plus connu sous le nom de Joseph-Louis Lagrange. Il fut le plus important mathématicien de son époque, commença sa carrière à Turin, puis travailla pendant 20 ans à Berlin, et finalement pendant 26 ans à Paris. Il travailla entre autres sur la théorie des nombres et la mécanique analytique, pour laquelle il développa la majeure partie de l'arsenal mathématique utilisé de nos jours dans les calculs en mécanique classique et en gravitation classique. Il appliqua cela avec succès à de nombreux mouvements observés dans le Système solaire.

** Pour plus de détails sur l'intégration, voir l'Annexe ??.



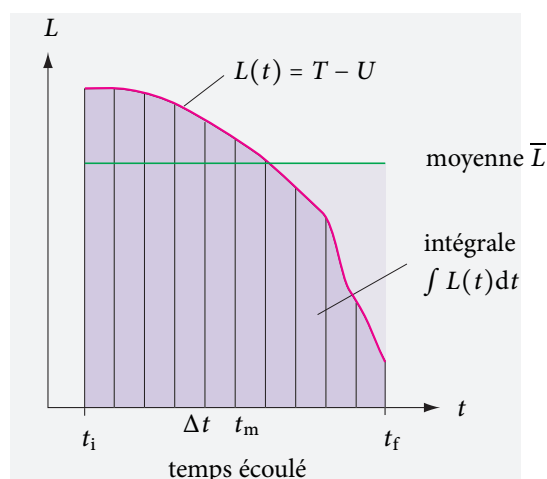


FIGURE 101 Définition de l'effet total comme une accumulation (addition ou intégrale) de petits effets au cours du temps.

particule se déplaçant librement. Bien évidemment, une grande énergie cinétique implique qu'il y a beaucoup de changement. Si nous observons la particule à deux instants donnés, plus la distance spatiale entre ces deux points est grande et plus le changement est important. En outre, le changement observé est plus grand si la particule se déplace plus rapidement, c'est-à-dire si son énergie cinétique est plus importante. Tout cela paraît trivial.

Ensuite, observons une unique particule se déplaçant dans un potentiel. Par exemple, une pierre qui chute perd de l'énergie potentielle en échange d'un gain en énergie cinétique. Plus il y a d'énergie échangée, plus il y a de changement. Cela explique le signe moins (la différence) dans la définition de L . Si nous examinons une particule qui est d'abord jetée en l'air puis qui retombe, la courbe de $L(t)$ est d'abord située en dessous de l'axe du temps, et ensuite au-dessus. Nous remarquons que la définition de l'intégration nous amène à comptabiliser l'aire de la surface grise située *sous* l'axe du temps comme étant *négative*. Le changement peut ainsi être négatif, et peut être, comme prévu, compensé par un changement ultérieur.

Pour quantifier le changement dans un système constitué de plusieurs parties indépendantes, nous ajoutons simplement toutes les énergies cinétiques et nous défalquons toutes les énergies potentielles. Cette méthode nous permet de définir des actions pour des gaz, des liquides et de la matière solide. Même si les constituants interagissent, nous obtenons toujours un résultat sensé. En bref, l'action est une quantité *additive*.

L'action physique mesure donc, à l'aide d'un nombre unique, la quantité du changement observé dans un système entre deux instants donnés du temps. L'objet de l'observation peut être n'importe quoi : une explosion, une caresse affective ou un changement de couleur. Nous découvrirons plus tard que cette idée est également applicable en relativité et dans la théorie quantique. N'importe quel changement se produisant dans n'importe quel système de la nature peut être mesuré à l'aide d'un seul nombre.



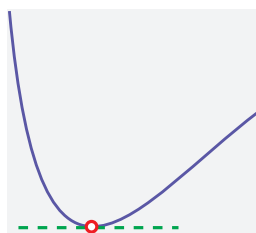


FIGURE 102 La tangente au point minimal d'une courbe possède une pente nulle.

LE PRINCIPE DE MOINDRE ACTION

Nous détenons dorénavant une mesure précise du changement, qui, comme nous allons le voir, permet une description simple et puissante du mouvement. Dans la nature, le changement qui se produit entre deux instants est toujours *le plus petit* possible. *La nature minimise l'action**. De tous les mouvements possibles, la nature choisit constamment celui pour lequel le changement est *minimal*. Examinons-en quelques exemples.

Défi 336 e Dans le cas élémentaire d'une particule libre, lorsque aucun potentiel n'est impliqué, le principe de l'action minimale entraîne que la particule se déplace selon une ligne *droite* avec une vitesse *constante*. Tous les autres chemins conduiraient à des actions plus importantes. Pouvez-vous le vérifier ?

Défi 337 e Lorsque la gravité entre en jeu, une pierre lancée vole le long d'une parabole (ou, plus précisément, le long d'une ellipse) parce que n'importe quelle autre trajectoire, disons une pour laquelle la pierre effectue une boucle en l'air, devrait nécessiter une action *plus importante*. Une nouvelle fois, vous devez certainement avoir envie de le vérifier par acquit de conscience.

Toutes les observations soutiennent cette constatation simple et élémentaire : les choses se déplacent toujours de la manière qui engendre la quantité d'action la plus petite possible. Cette affirmation s'applique au chemin tout entier et à chacun de ses segments. Bertrand Russel l'avait appelée la « loi de la paresse universelle ».

Il est d'usage d'exprimer cette notion du changement minimal d'une manière différente. L'action fluctue lorsque la trajectoire varie. La trajectoire réelle est celle dont l'action est la plus petite. Vous vous souviendrez que vous avez appris à l'école que la dérivée d'une fonction s'annule à son minimum : un minimum possède une tangente horizontale. Dans le cas présent, nous ne faisons pas varier une quantité, mais une trajectoire entière, par conséquent nous ne parlons pas d'une dérivée ou d'une pente, mais d'une variation. On a coutume de noter δS la variation de l'action. Le *principe de moindre action* établit donc que :

$$\triangleright \text{La trajectoire réelle entre des points extrémaux donnés vérifie la relation } \delta S = 0. \quad (59)$$

Les mathématiciens appellent cela un *principe variationnel*. Remarquez que les points extrémaux doivent être fixés : nous devons comparer des mouvements ayant les *mêmes* états initiaux et finaux.

* En fait, dans certaines situations particulières l'action est maximale, de telle sorte que la forme la plus générale du principe est que l'action est « stationnaire », ou « extrémale », signifiant par là minimale *ou* maximale. La condition d'annulation de la variation, donnée ci-dessous, recouvre les deux cas à la fois.



Avant de discuter de ce principe plus en détail, nous pouvons vérifier qu'il est équi-



valent à l'équation d'évolution*. Pour ce faire, nous pouvons mettre en œuvre une procé-

Page 160

* Pour ceux qui sont intéressés, nous donnons ici quelques commentaires sur l'équivalence entre les équations lagrangiennes et d'évolution. Pour commencer, les lagrangiens ne sont pas définis pour des systèmes non conservatifs, ou *dissipatifs*. Nous avons vu qu'il n'existe pas de potentiel pour chaque mouvement comportant du *frottement* (et plus d'une seule dimension), par conséquent il n'y a pas d'action dans ces circonstances. Une approche possible pour surmonter cette restriction consiste à utiliser une formulation généralisée du principe de moindre action. À chaque fois qu'il y a absence de potentiel, nous pouvons exprimer la variation du *travail* δW entre des trajectoires x_i distinctes comme

$$\delta W = \sum_i m_i \ddot{x}_i \delta x_i . \quad (60)$$

Le mouvement est alors décrit de la manière suivante :

$$\triangleright \text{La trajectoire réelle satisfait la relation } \int_{t_i}^{t_f} (\delta T + \delta W) dt = 0 \quad \text{sachant que} \quad \delta x(t_i) = \delta x(t_f) = 0 . \quad (61)$$

Défi 338 pe

La quantité qui est intégrée n'a pas de nom, elle représente une notion généralisée du changement. Vous pourriez essayer de vérifier que cela mène bien aux équations d'évolution appropriées. Ainsi, bien que des descriptions lagrangiennes *adéquates* existent uniquement pour des systèmes *conservatifs*, ce principe peut être extrapolé aux systèmes dissipatifs et rester ainsi efficace.

De nombreux physiciens préféreront une autre approche. Ce qu'un mathématicien nomme une généralisation, un physicien l'appelle un cas particulier : le principe (61) masque le fait que *tout* frottement résulte du principe habituel de l'action minimale, si nous incorporons tous les détails microscopiques. Il n'existe aucun frottement dans le monde microscopique. Le frottement est une notion macroscopique approximative.

Néanmoins, des points de vue mathématiques supplémentaires sont opportuns. Par exemple, ils nous imposent des contraintes intéressantes dans l'utilisation des lagrangiens. Ces limites, qui ne s'appliquent que si l'on conçoit le monde de manière purement classique – ce qui n'est pas vrai –, furent découvertes il y a environ une centaine d'années. À cette époque les ordinateurs n'étaient pas encore disponibles, et l'exploration de nouvelles techniques calculatoires était importante. Nous en donnons un aperçu succinct.

Réf. 144

Les coordonnées utilisées en relation avec les lagrangiens ne sont pas nécessairement des coordonnées cartésiennes. Des coordonnées *généralisées* sont particulièrement utiles lorsque le mouvement subit des *contraintes*. C'est le cas pour un pendule, dans lequel la masse doit toujours se trouver à la même distance du point de suspension, ou pour un patineur sur glace, chez qui les patins doivent se déplacer dans la direction vers laquelle ils pointent. Des coordonnées généralisées peuvent même être un amalgame de positions et de quantités de mouvement. Elles peuvent se diviser en plusieurs types génériques.

Page 260

Page ??

Des coordonnées généralisées sont dénommées *holonomiques-scléronomiques* si elles sont liées aux coordonnées cartésiennes de manière fixée, indépendamment du temps : des systèmes physiques décrits par de telles coordonnées incluent le pendule et une particule dans un potentiel. Des coordonnées sont appelées *holonomiques-rhéonomiques* si la dépendance est aussi temporelle. Un exemple d'un système rhéonomique pourrait être un pendule dont la longueur varie dans le temps. Les deux termes rhéonomique et scléronomique sont dus à Ludwig Boltzmann. Ces deux cas, qui concernent des systèmes qui ne sont décrits que par leur géométrie, sont regroupés ensemble dans les *systèmes holonomiques*. L'expression est de Heinrich Hertz.

La situation la plus générale est dénommée *anholonomique*, ou *non holonomique*. Les lagrangiens fonctionnent bien uniquement pour des systèmes holonomiques. Malheureusement, la signification du terme « non holonomique » a été modifiée. Maintenant, ce terme est aussi utilisé pour désigner certains systèmes rhéonomiques. L'usage moderne qualifie de non holonomique tout système qui prend en compte des vitesses. Donc, un patineur sur glace ou un disque en rotation est fréquemment qualifié de système non holonomique. Il faut donc rester très prudent avant de décider de ce que l'on entend par non holonomique dans chaque contexte particulier.

Même si l'usage des lagrangiens, et de l'action, possède des limitations, ceux-ci ne nous ennuiant plus au niveau microscopique, puisque les systèmes microscopiques sont toujours conservatifs, holonomiques et scléronomiques. Au niveau fondamental, les équations d'évolution et les lagrangiens sont en réalité équivalents.



deuxième courante, qui est une partie intégrante de ce que l'on appelle le *calcul des variations*. La condition $\delta S = 0$ implique que l'action, c'est-à-dire l'aire sous la courbe de la **Figure 101**, est minimale. Avec un peu de réflexion, on voit que si le lagrangien est de la forme $L(x_n, v_n) = T(v_n) - U(x_n)$, alors

Défi 339 pe

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial v_n} \right) = - \frac{\partial U}{\partial x_n} \quad (62)$$

où n dénombre toutes les coordonnées de toutes les particules*. Pour une unique particule, ces *équations de Lagrange du mouvement* se réduisent à

Défi 340 e

$$m\mathbf{a} = -\nabla U. \quad (64)$$

C'est l'équation d'évolution : elle indique que la force qui agit sur une particule est le gradient de l'énergie potentielle U . Le principe de moindre action engendre donc l'équation du mouvement. (Pouvez-vous montrer l'inverse ?)

Défi 341 s

En d'autres termes, *tous les systèmes évoluent d'une manière telle que le changement est aussi petit que possible*. La nature est parcimonieuse. Elle est donc à l'exact opposé d'un thriller hollywoodien, dans lequel l'action est maximale. La nature s'apparente plus à une vieille dame circonspecte qui fait le minimum d'actions.

Le principe de l'action minimale établit également que la trajectoire réelle est celle pour laquelle la *moyenne* du lagrangien sur le chemin tout entier est minimale (voir la **Figure 101**). La nature est un Dr DoLittle**. Pouvez-vous le vérifier ? Ce point de vue nous permet de déduire directement les équations de Lagrange (62).

Défi 342 pe

Le principe de moindre action différencie la trajectoire réelle de toutes les autres trajectoires imaginaires. Cette observation a conduit Leibniz*** à sa célèbre interprétation que le monde réel est le « meilleur des mondes possibles »****. Nous pourrions écarter cela comme des spéculations métaphysiques, mais nous devrions rester capables de fasci-

* La forme la plus générale pour un lagrangien $L(q_n, \dot{q}_n, t)$, utilisant les coordonnées holonomiques généralisées q_n , conduit aux équations de Lagrange de la forme

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_n} \right) = \frac{\partial L}{\partial q_n}. \quad (63)$$

Afin de déduire ces équations, nous avons aussi besoin de la relation $\delta \dot{q} = d/dt(\delta q)$. Cette relation est valable uniquement pour les coordonnées *holonomiques* introduites dans la note de bas de page précédente et illustre leur importance.

Réf. 145

Nous devons aussi souligner que le lagrangien d'un système en mouvement n'est pas unique, cependant, l'étude de la manière selon laquelle les divers lagrangiens d'un système donné en mouvement sont reliés ne constitue pas une partie de notre promenade.

D'ailleurs, les indices q pour la position et p pour la quantité de mouvement furent introduits en physique par le mathématicien Carl Jacobi (n. Potsdam 1804, d. Berlin 1851).

** C'est-à-dire qu'elle en fait le moins possible, tel que Phileas Fogg dans *Le Tour du monde en 80 jours*, de Jules Verne : « Phileas Fogg était de ces gens mathématiquement exacts, qui, jamais pressés et toujours prêts, sont économes de leurs pas et de leurs mouvements » [N.D.T.].

*** « Tout est pour le mieux dans le meilleur des mondes possibles. » Leibniz [N.D.T.].

**** Cette idée fut ridiculisée par le philosophe français Voltaire (1694–1778) dans ses écrits clairvoyants, notamment dans le livre perspicace *Candide*, rédigé en 1759, et toujours largement disponible.



Defi 343 s nation pour ce problème. Leibniz était vraiment excité à propos du principe de moindre action parce que c'était la première fois que des observations réelles étaient distinctes de toutes les autres possibilités imaginables. Pour la première fois, la quête des raisons pour lesquelles les choses sont telles qu'elles sont devenait une partie intégrante de l'investigation physique. Le monde pourrait-il être différent de ce qu'il est ? Dans le principe de moindre action, nous avons un indice de réponse négative. (Qu'en pensez-vous ?) La réponse finale ne fera surface que dans la dernière partie de notre aventure.

Defi 344 pe Étant une manière de décrire le mouvement, le lagrangien présente plusieurs avantages par rapport à l'équation d'évolution. En premier lieu, le lagrangien est généralement plus *concis* que l'écriture des équations d'évolution correspondantes. Par exemple, nous n'avons besoin que d'un *seul* lagrangien pour décrire un système unique, bien qu'ayant de nombreuses particules. Nous faisons moins d'erreurs, en particulier des erreurs de signe, de même que nous apprenons plus rapidement à réaliser les calculs. Essayez simplement de développer les équations d'évolution d'une chaîne de masses reliées par des ressorts, comparez alors ce labeur à celui d'une dérivation en utilisant un lagrangien. (Ce système se comporte comme une chaîne d'atomes.) Nous rencontrerons bientôt un autre exemple : David Hilbert n'eut besoin que de quelques semaines pour déduire les équations du mouvement de la relativité générale en utilisant un lagrangien, alors qu'Albert Einstein avait planché pendant dix ans à les rechercher directement.

De plus, la description à l'aide d'un lagrangien est valable avec *n'importe quel* ensemble de coordonnées décrivant l'objet étudié. Les coordonnées ne doivent pas nécessairement être cartésiennes, elles peuvent être choisies comme nous le voulons : cylindriques, sphériques, hyperboliques, etc. Ces *coordonnées généralisées*, telles qu'on les appelle, nous permettent de calculer rapidement le comportement de nombreux systèmes mécaniques qui sont en pratique trop complexes à étudier par le truchement des coordonnées cartésiennes. Par exemple, pour programmer le mouvement des bras d'un robot, les angles au niveau des articulations fournissent une description plus claire que les coordonnées cartésiennes des extrémités des bras. Les angles sont des coordonnées non cartésiennes. Elles simplifient considérablement les calculs : l'opération de recherche du chemin le plus économique pour mouvoir la main d'un robot d'un point à un autre peut être résolue beaucoup plus facilement à l'aide de variables angulaires.

De manière plus importante, le lagrangien nous permet de déduire rapidement les propriétés essentielles d'un système, à savoir ses *symétries* et ses *quantités conservées*. Nous développerons cette idée fondamentale prochainement, et nous l'utiliserons régulièrement tout au long de notre promenade.

Page 196 Finalement, la formulation lagrangienne peut être généralisée pour embrasser *tous les types d'interactions*. Puisque les concepts d'énergie cinétique et potentielle sont généraux, le principe de moindre action peut être utilisé en électricité, en magnétisme et en optique aussi bien qu'en mécanique. Le principe de moindre action est primordial en relativité générale et en théorie quantique, et nous permet d'associer aisément ces deux domaines à la mécanique classique.

Réf. 143 Au fur et à mesure que le principe de moindre action s'est répandu, les gens l'ont appliqué à un nombre toujours croissant de problèmes. Aujourd'hui, des lagrangiens sont utilisés partout depuis l'étude des collisions de particules élémentaires jusqu'à la programmation du mouvement des robots en intelligence artificielle. Toutefois, nous ne devons pas oublier que, malgré sa simplicité remarquable et son intérêt, la formulation



Défi 345 s lagrangienne est *équivalente* aux équations d'évolution. Elle n'est ni plus générale ni plus spécifique. En particulier, elle *ne donne pas une explication* pour n'importe quel type de mouvement, mais simplement une image de celui-ci. En réalité, la recherche d'une nouvelle « loi » physique du mouvement se résume *simplement* à la recherche d'un nouveau lagrangien. C'est logique puisque la description de la nature requiert toujours la description du changement. Le changement dans la nature est invariablement représenté par des actions et des lagrangiens.

Réf. 146
Défi 346 pe

Le principe de moindre action formule que l'action est minimale lorsque les points extrémaux du mouvement, et en particulier le temps écoulé entre eux, sont figés. Il est moins bien connu que le principe réciproque est également valable : si l'action reste fixe, le temps écoulé est maximum. Pouvez-vous le montrer ?

Bien que le principe de moindre action ne soit pas une explication du mouvement, d'une manière ou d'une autre il en appelle une. Cependant, nous devons nous armer de patience. *Pourquoi* la nature obéit au principe de moindre action et *comment* elle le fait deviendront limpides lorsque nous examinerons la théorie quantique.

Réf. 147

« Ne confondez jamais le mouvement avec l'action. »

Ernest Hemingway

POURQUOI LE MOUVEMENT EST-IL SI SOUVENT LIMITÉ ?

« L'optimiste pense qu'il est dans le meilleur des mondes possibles, et le pessimiste est conscient de cela. »

Robert Oppenheimer

Réf. 148

En regardant autour de nous sur Terre et dans le ciel, nous observons que la matière n'est pas uniformément distribuée. La matière est attirée par d'autre matière : elle s'amasse en *agrégats*. Quelques exemples majeurs d'agrégats sont donnés dans la **Figure 103** et dans le **Tableau 24**. Dans le diagramme masse-taille de la **Figure 103**, les deux échelles sont logarithmiques. Nous notons la présence de trois lignes droites : une ligne $m \sim l$ qui se prolonge vers le haut depuis la masse de Planck* jusqu'à l'univers lui-même via les trous noirs, une ligne $m \sim 1/l$ qui se prolonge vers le bas depuis la masse de Planck jusqu'à l'agrégat le plus fin possible, et la ligne classique de la matière $m \sim l^3$, qui se prolonge vers le haut depuis les atomes, en passant par la Terre et le Soleil. La première de ces lignes, la limite du trou noir, est interprétée par la relativité générale, les deux dernières, la limite des agrégats et la ligne classique de la matière, le sont par la théorie quantique**.

Les agrégats qui ne sont pas situés sur la ligne classique de la matière montrent également que plus l'interaction qui maintient les constituants ensemble est forte, plus les agrégats sont petits. Mais pourquoi la matière est-elle principalement rencontrée dans des amas ?

Avant tout, des agrégats de matière se forment à cause de l'existence d'interactions *attractives* entre les objets. Deuxièmement, ils se forment à cause des *frottements* : lorsque

Page 303

* La masse de Planck est donnée par $m_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c / G} = 21,767(16) \mu\text{g}$.

** La **Figure 103** suggère que des domaines situés au-delà de la physique puissent exister, nous découvrirons plus tard que ce n'est pas le cas puisque la masse et la taille ne sont pas définies dans ces domaines.



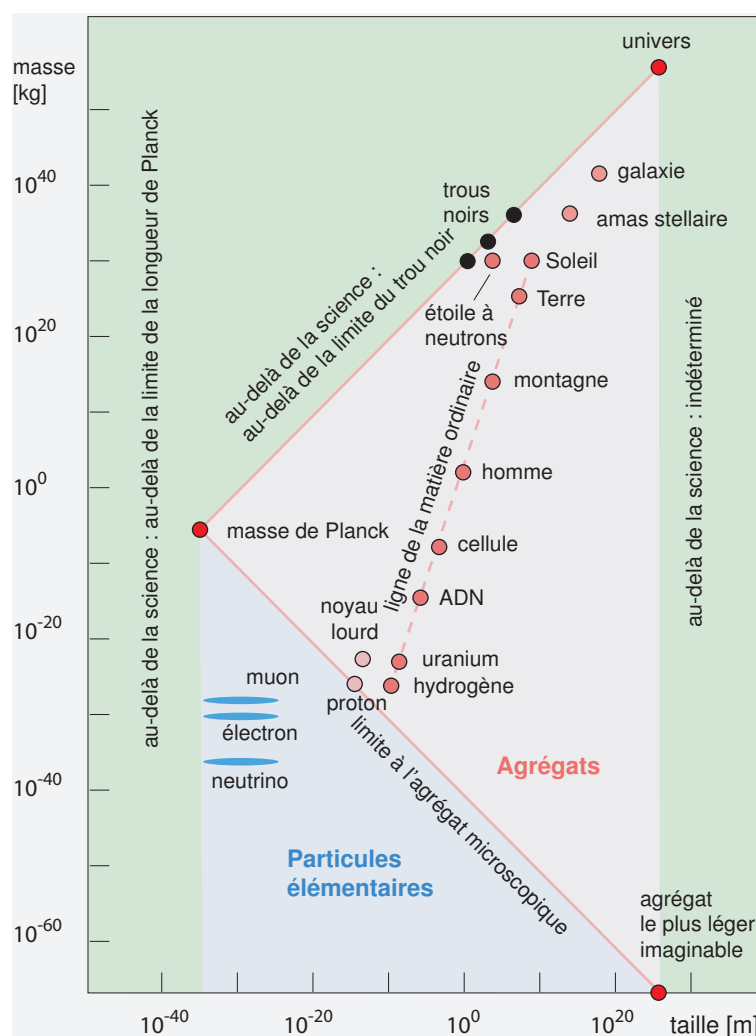


FIGURE 103 Les agrégats dans la nature.

deux constituants se rapprochent, un agrégat peut être créé uniquement si l'énergie libérée peut se transformer en chaleur. Troisièmement, les agrégats possèdent une taille finie à cause des effets *répulsifs* qui empêchent les objets de s'écrouler complètement. De concert, ces trois facteurs assurent que le mouvement fini est beaucoup plus courant que le mouvement « libre », sans limite.

Trois types seulement d'attraction conduisent aux agrégats : la gravité, l'attraction entre charges électriques et l'interaction nucléaire forte. De façon similaire, trois types seulement de répulsion sont observés : la rotation, la pression et le principe d'exclusion de Pauli (que nous rencontrerons plus tard). Des neuf combinaisons possibles d'attraction et de répulsion, toutes n'apparaissent pas dans la nature. Pouvez-vous relever lesquelles sont absentes à partir de la Figure 103 et du Tableau 24, et pourquoi ?

De façon coordonnée, l'attraction, le frottement et la répulsion impliquent que le changement et l'action sont minimisés quand des objets se rencontrent puis restent



Défi 348 pe

ensemble. Le principe de moindre action engendre donc la stabilité des agrégats. Par ailleurs, l'histoire de la formation du monde explique également pourquoi tant d'agrégats *tournent*. Pouvez-vous dire pourquoi ?

Mais finalement, pourquoi le frottement existe-t-il ? Pourquoi des interactions attractives et répulsives existent-elles ? Et pourquoi – comme cela devrait se manifester d'après ce qui a été dit – la matière ne s'est-elle *pas* trouvée sous forme d'agrégats à certaines époques reculées ? Dans le but de répondre à ces questions, nous devons tout d'abord analyser une autre propriété générale du mouvement : la symétrie.

TABLEAU 24 Quelques agrégats principaux rencontrés dans la nature.

AGRÉGAT	TAILLE (DIAMÈTRE)	NB OBS.	COMPOSANTS
agrégats gravitationnellement liés			
matière à travers l'univers	≈ 100 Ym	1	superamas de galaxies, atomes d'hydrogène et d'hélium
quasar	10^{12} à 10^{14} m	$20 \cdot 10^6$	baryons et leptons
superamas de galaxies	≈ 3 Ym	10^7	amas et groupes de galaxies
amas de galaxies	≈ 60 Zm	$25 \cdot 10^9$	10 à 50 galaxies
groupe de galaxies ou amas	≈ 240 Zm		de 50 à plus de 2 000 galaxies
notre groupe local de galaxies	ga-50 Zm	1	≈ 40 galaxies
galaxie ordinaire	0,5 à 2 Zm	$3,5 \cdot 10^{12}$	10^{10} à $3 \cdot 10^{11}$ étoiles, nuages de poussière et de gaz, peut-être des systèmes solaires
notre galaxie	1,0(0,1) Zm	1	10^{11} étoiles, nuages de poussière et de gaz, systèmes solaires
nuages interstellaires	jusqu'à 15 Em	$\gg 10^5$	hydrogène, glace et poussière
système solaire ^a	inconnu	> 100	étoile, planètes
notre Système solaire	30 Pm	1	Soleil, planètes (diamètre de l'orbite de Pluton : 11,8 Tm), satellites, planétoïdes, comètes, astéroïdes, poussière, gaz
nuage d'Oort	6 à 30 Pm	1	comètes, poussière
ceinture de Kuiper	60 Tm	1	planétoïdes, comètes, poussière
étoile ^b	10 km à 100 Gm	$10^{22 \pm 1}$	gaz ionisé : protons, neutrons, électrons, neutrinos, photons
notre étoile	1,39 Gm		
planète ^a (Jupiter, Terre)	143 Mm, 12,8 Mm	$9+ \approx 100$	solides, liquides, gaz et, en particulier, atomes lourds
planétoïdes (Varuna, etc.)	50 à 1 000 km	≈ 10 (est. 10^9)	solides
satellites	10 à 1 000 km	≈ 50	solides
étoiles à neutrons	10 km	≈ 1 000	principalement des neutrons
agrégats électromagnétiquement liés^c			



A G R É G A T	T A I L L E (D I A M È T R E)	N B O B S .	C O M P O S A N T S
astéroïdes, montagnes ^d	1 m à 930 km	>26 000	(10 ⁹ estimés) solides, généralement monolithiques
comètes	10 cm à 50 km	> 10 ⁶	glace et poussière
planétoïdes, solides, quides, gaz, fromage	li- 1 nm à > 100 km	n.a.	molécules, atomes
animaux, plantes, képhir	5 µm à 1 km	10 ^{26±2}	organes, cellules
cerveau	0,15 m	10 ¹⁰	neurones et autres types de cellules
cellules :		10 ^{31±1}	organites, membranes, molécules
la plus petite (<i>Nanoar. ≈ 400 nm chaeum equitans</i>)			molécules
amibe	600 µm		molécules
la plus grande (nerf de ba- ≈ 30 m leine, plantes unicellulaires)			molécules
molécules :		≈ 10 ^{78±2}	atomes
H ₂	≈ 50 pm	10 ^{72±2}	atomes
ADN (humain)	2 m (total par lule)	cel-10 ²¹	atomes
atomes, ions	30 pm à 300 pm	10 ^{80±2}	électrons et noyaux
agrégats liés par l'interaction faible ^c			
aucun			
agrégats liés par l'interaction forte ^c			
noyau	> 10 ⁻¹⁵ m	10 ^{79±2}	nucléons
nucléon (proton, neutron)	≈ 10 ⁻¹⁵ m	10 ^{80±2}	quarks
mésons	≈ 10 ⁻¹⁵ m	n.a.	quarks
étoiles à neutrons : voir ci-dessus			

Réf. 149

a. Ce n'est qu'en 1994 que fut mise en évidence la première pièce à conviction sur le fait qu'il existe des objets qui tournent autour d'étoiles autres que notre Soleil. Sur plus de 100 *planètes extrasolaires* détectées jusqu'à présent, la plupart se trouvent autour d'étoiles de classe F, G et K (les lettres désignent le *type spectral* de l'astre. C'est la classification de Harvard qui attribue un type spectral à une étoile, elle correspond globalement à une échelle de température [N.D.T.]), y compris des étoiles à neutron. Par exemple, trois corps encerclent le pulsar PSR 1257+12, et un anneau de matière entoure l'étoile β Pictoris. Ces corps apparaissent comme étant des astres sombres, des naines brunes ou d'énormes planètes gazeuses comme Jupiter. En raison des restrictions dues aux dispositifs d'observation, aucun des systèmes découverts jusqu'à présent ne constitue un système solaire du même type que celui dans lequel nous vivons. En réalité, seul un petit nombre de planètes similaires à la Terre ont été détectées jusqu'à maintenant.

b. Le Soleil se situe parmi les 7 % d'étoiles les plus brillantes. De toutes les étoiles, 80 % sont des naines rouges de classe M, 8 % sont des naines orange de classe K, et 5 % sont des naines blanches de classe D : elles sont toutes très pâles. Presque toutes les étoiles visibles dans le ciel nocturne appartiennent aux 7 % brillantes. Quelques-unes d'entre elles proviennent de la rare classe O de couleur bleue ou de la classe B bleue-blanche (comme l'Épi, Régulus et Rigel), 0,7 % constituent la classe A blanche et lumineuse (comme Sirius, Véga et Altaïr), 2 % sont de la classe F jaune-blanche (comme Canopus, Procyon et l'Étoile polaire), 3,5 % sont



- de la classe G jaune (comme Alpha du Centaure, Capella ou le Soleil). Les exceptions incluent les quelques géantes visibles de la classe K, comme Arcturus et Aldébaran, et les rares supergéantes de classe M, comme Bételgeuse et Antares. Nous en dirons plus sur les étoiles un peu plus loin.
- Page 228 c. Pour plus de détails sur les agrégats *microscopiques*, voir la table des constituants dans l'Annexe ??.
- Réf. 150 d. On estime qu'il y a environ 10^9 astéroïdes (ou planétoïdes) d'au moins 1 km de large et environ 10^{20} qui pèsent au moins 100 kg. Par ailleurs, aucun astéroïde situé entre Mercure et le Soleil – les hypothétiques *Vulcanoïdes* – n'a été détecté jusqu'à présent.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LES LAGRANGIENS

Lorsque Lagrange publia son livre *Mécanique analytique*, en 1788, celui-ci constitua un point culminant de l'histoire de la mécanique. Il était fier d'avoir rédigé un exposé systématique de la mécanique sans un seul dessin. Évidemment l'ouvrage était difficile à lire et ne connut pas un réel succès. Cependant, sa méthode se généralisa le temps d'une génération.

* *

- En partant du principe que l'action est la quantité élémentaire qui décrit le mouvement, nous pouvons définir l'énergie comme étant l'action par unité de temps, et la quantité de mouvement comme l'action par unité de distance. L'énergie d'un système décrit donc sa quantité de changement au cours d'un certain laps de temps, et la *quantité de mouvement* sa quantité de changement sur une certaine distance. Que représentent alors la quantité de mouvement angulaire et l'énergie rotationnelle ?
- Défi 349 s

* *

- « Dans la nature, la télépathie ou la prière n'ont aucun effet possible, puisque dans la plupart des cas le changement à l'intérieur du cerveau est nettement inférieur au changement revendiqué dans le monde extérieur. » Cet argument est-il correct ?
- Défi 350 s

* *

En physique galiléenne, le lagrangien est la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle. Plus tard, cette définition sera généralisée d'une façon telle qu'elle aiguëra notre compréhension de cette dichotomie : le lagrangien devient la différence entre une expression représentant des particules libres et une expression due à leurs interactions. En d'autres termes, le mouvement d'une particule est un compromis ininterrompu entre ce que la particule ferait si elle était libre et ce que les autres particules veulent lui faire faire. À cet égard, les particules se comportent beaucoup comme des êtres humains.

* *

- Défi 351 pe Expliquez ceci : pourquoi $T + U$ est-il constant, alors que $T - U$ est minimal ?

* *

Dans la nature, la somme $T + U$ des énergies cinétique et potentielle est *constante* pendant le mouvement (pour des systèmes isolés), tandis que la moyenne de la différence $T - U$ est *minimale*. Est-il envisageable d'en déduire, en combinant ces deux faits, que les systèmes



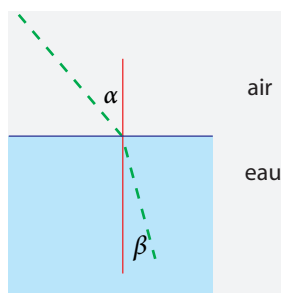


FIGURE 104 La réfraction de la lumière est due à l'optimisation du trajet temporel.

Défi 352 pe tendent vers un état d'énergie potentielle minimale ?

* *

Il existe un principe de *moindre effort* décrivant la croissance des arbres. Lorsqu'un arbre – une *phanérophyte monopodiale** – croît et produit des feuilles, entre 40 % et 60 % de la masse dont il est constitué, à savoir de l'eau et des minéraux, doit être déplacée du sol vers le haut**. Par conséquent, un arbre obtient le plus grand nombre possible de branches le plus haut placées en consommant la plus petite quantité d'énergie. C'est la raison pour laquelle toutes les feuilles ne se situent pas au plus haut sommet d'un arbre. Pouvez-vous déduire d'autres conclusions sur les arbres à partir de ce principe ?

Défi 353 pe

* *

Réf. 151

Un autre principe de minimisation peut être utilisé pour comprendre la conception du corps des animaux, particulièrement leur taille et les proportions de leurs structures internes. Par exemple, la pulsation du cœur et la fréquence de respiration varient ensemble avec la masse animale m comme $m^{-1/4}$, et la puissance dissipée varie comme $m^{3/4}$. Il s'avère que de tels exposants découlent de trois propriétés des êtres vivants. Premièrement, ils transportent de l'énergie et de la matière à travers leur organisme par le truchement d'un réseau ramifié de vaisseaux : quelques-uns sont grands et beaucoup d'autres sont petits. Deuxièmement, ces vaisseaux possèdent tous la même taille minimale. Et troisièmement, ces réseaux sont optimisés afin de minimiser l'énergie requise pour le transport. Ensemble, ces relations expliquent de nombreuses autres lois d'échelle, elles devraient également expliquer pourquoi l'échelle de l'espérance de vie animale est comme $m^{-1/4}$, ou pourquoi la plupart des mammifères ont approximativement le même nombre de battements de cœur de leur vivant.

Réf. 152

Une explication concurrente, utilisant un principe de minimisation différent, stipule qu'un quart de la puissance produite dans n'importe quel réseau est utilisé afin que le flux rejoigne la destination par le chemin le plus direct.

* *

Le principe de minimisation pour le mouvement de la lumière est encore plus élégant : la

* Phanérophyte : végétal pérenne dont les bourgeons sont situés à plus de 50 cm du sol pendant le repos végétatif (arbres, arbustes). Monopodial : dont la croissance se fait principalement à partir des bourgeons terminaux (la plante est peu ramifiée). [N.D.T.]

** Le reste de la masse provient du CO_2 de l'air.



lumière emprunte toujours le chemin qui nécessite le plus petit temps de trajet. On savait depuis longtemps que cette idée décrivait exactement comment la lumière change de direction lorsqu'elle passe de l'air à l'eau. Dans l'eau, la lumière se déplace plus lentement, le rapport entre la vitesse dans l'air et celle dans l'eau est appelé l'*indice de réfraction* de l'eau. L'indice de réfraction, généralement noté n , dépend de la matière traversée. Sa valeur pour l'eau est d'environ 1,3. Ce rapport des vitesses, associé au principe du temps minimal, conduit à la « loi » de la réfraction, qui s'énonce comme une simple relation entre les sinus des deux angles. Pouvez-vous la déduire ? (En fait, la définition exacte de l'indice de réfraction est en rapport avec le vide, et non avec l'air. Mais cette différence est négligeable : pouvez-vous imaginer pourquoi ?)

Défi 354 s

Défi 355 s

Pour le diamant, l'indice de réfraction est de 2,4. Cette valeur élevée représente une explication possible de l'éclat des diamants lorsqu'ils sont taillés avec 57 faces *étincelantes*.

Défi 356 s

Pouvez-vous imaginer quelques autres raisons ?

* *

Pouvez-vous confirmer que chacun de ces principes de minimisation est un cas particulier du principe de moindre action ? En réalité, c'est le cas pour *tous* les principes de minimisation connus dans la nature. Chacun d'entre eux, comme le principe de moindre action, est un principe de moindre changement.

Défi 357 s

* *

En physique galiléenne, la valeur de l'action dépend de la vitesse de l'observateur, mais non de sa position ou de son orientation. Mais l'action, lorsqu'elle est correctement définie, *ne* devrait *pas* dépendre de l'observateur. Tous les observateurs devraient être d'accord sur la valeur du changement observé. Ce n'est qu'avec la relativité restreinte que l'exigence d'une action qui doit être indépendante de la vitesse de l'observateur sera satisfaite. Comment l'action relativiste sera-t-elle définie ?

Défi 358 s

* *

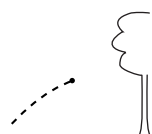
Mesurer tout le changement qui se produit dans l'univers présuppose que l'univers est un système physique. Est-ce vraiment le cas ?

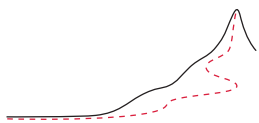
Défi 359 s

* *

Un mouvement pour lequel l'action est particulièrement bien minimisée dans la nature nous est cher : la marche. De vastes efforts de recherche tentent de concevoir des robots qui reproduisent le fonctionnement et le contrôle de l'optimisation de l'énergie dans les jambes humaines. Pour un exemple, consultez le site Web de Tao Geng sur <http://www.cn.stir.ac.uk/~tgeng/research.html>.

Réf. 153





CHAPITRE 9

MOUVEMENT ET SYMÉTRIE

La seconde manière de décrire globalement le mouvement est de le décrire de telle sorte que *tous* les observateurs s'accordent. Un objet situé sous le feu des projecteurs est qualifié de *symétrique* s'il apparaît sous le même aspect lorsqu'il est observé depuis différentes positions. Par exemple, une fleur de myosotis, dont la Figure 105 en donne une image, est symétrique parce qu'elle prend une apparence identique dès qu'on la tourne sur elle-même de 72 degrés. De nombreuses fleurs d'arbres fruitiers ont la même symétrie. Nous disons également que, sous un changement de position, la fleur possède une *propriété invariante*, à savoir sa forme. Si de telles positions possibles sont nombreuses, alors nous parlons d'une *haute* symétrie, sinon d'une *basse* symétrie. Par exemple, un trèfle à quatre feuilles possède une plus haute symétrie qu'un à trois feuilles, plus courant. Des perspectives différentes impliquent des observateurs distincts. En physique, ces points de vue sont généralement nommés des *référentiels* (physiques) et sont mathématiquement décrits par des systèmes de coordonnées*.

Une haute symétrie signifie que de nombreux observateurs font la même observation. À première vue, peu d'objets ou d'observations symétriques semblent exister dans la nature. En fait, c'est une erreur. Au contraire, nous pouvons déduire que la nature tout entière est symétrique par le simple fait que nous pouvons tous parler de celle-ci, que nous en avons tous le même point de vue ! Qui plus est, la symétrie de la nature est considérablement plus haute que celle d'une fleur de myosotis. Nous nous apercevrons que cette haute symétrie est à la base de la célèbre formule $E_0 = mc^2$.

Défi 360 s

POURQUOI POUVONS-NOUS RÉFLÉCHIR ET DISCUTER ?

“ L'harmonie dissimulée est beaucoup plus profonde que celle qui est apparente. ”
Héraclite d'Éphèse, environ 500 av. J.-C.

Réf. 154

Pourquoi pouvons-nous comprendre quelqu'un lorsqu'il parle de l'univers, même si nous ne sommes pas dans ses chaussons ? Nous le pouvons pour deux raisons : parce que la plupart des choses ont une apparence *similaire* sous des angles différents, et parce que nous avons eu *préalablement*, pour la plupart, des expériences similaires.

« Similaire » signifie que ce que *nous* observons et ce que *les autres* observent concorde d'une manière ou d'une autre. En d'autres termes, de nombreux aspects des observa-

* Plus précisément, en physique, un référentiel est un système de coordonnées de l'espace-temps, composé de trois coordonnées d'espace et d'une coordonnée de temps, utilisé pour définir les notions de position, de vitesse et d'accélération [N.D.T.].

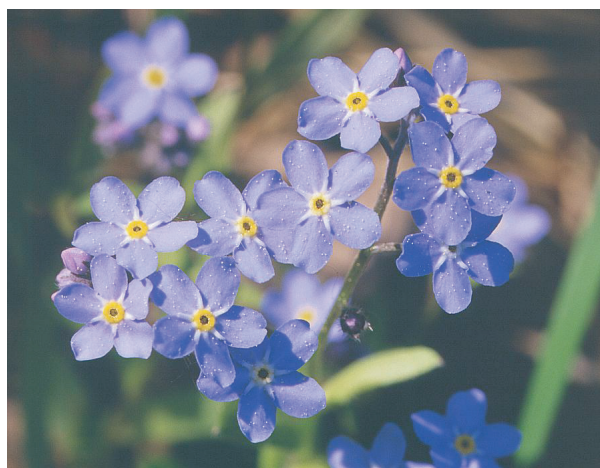


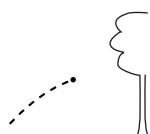
FIGURE 105 Le *myosotis* (*Boraginaceae*), aussi dénommé « Ne m'oubliez pas » dans de nombreuses langues. (© Markku Savela)

tions ne dépendent pas du point de vue. Par exemple, le nombre de pétales d'une fleur est toujours identique pour tous les observateurs. Nous pouvons donc dire que cette quantité possède la plus haute symétrie possible. Nous verrons ci-dessous que la masse en est un autre exemple semblable. Les observables qui ont la plus haute symétrie possible sont appelées des *scalaires* en physique. D'autres aspects varient d'un observateur à l'autre. Par exemple, la taille apparente fluctue avec la distance de l'observation. Cependant, la taille réelle est indépendante des observateurs. En termes généraux, n'importe quelle forme d'*indépendance des points de vue* est un modèle de symétrie, et le fait que deux individus observant la même chose depuis des positions différentes puissent se comprendre l'un et l'autre démontre que la nature est symétrique. Nous allons commencer à analyser les particularités de cette symétrie dans cette section et nous poursuivrons pendant la plupart du reste de notre promenade.

Dans le monde qui nous entoure, nous remarquons une autre propriété générale : non seulement le même phénomène apparaît comme similaire à des observateurs différents, mais aussi des phénomènes *différents* apparaissent comme similaires au *même* observateur. Par exemple, nous savons que si le feu brûle les doigts dans la cuisine, il fera de même à l'extérieur de la maison, et également à d'autres endroits et à d'autres moments. La nature exhibe l'aptitude à la *reproductibilité*. La nature ne réserve aucune surprise. En fait, notre mémoire et notre pensée ne sont possibles que grâce à cette propriété élémentaire de la nature. (Pouvez-vous le confirmer ?) Comme nous le verrons, la reproductibilité nous conduit à de fortes restrictions supplémentaires sur la description de la nature.

Sans l'indépendance des points de vue et la reproductibilité, parler aux autres ou à soi-même serait impossible. Plus important encore, nous découvrirons que l'indépendance des points de vue et la reproductibilité permettent beaucoup plus que de rendre tout simplement possible le fait de pouvoir discuter : elles fixent également le *contenu* de ce que nous pouvons nous dire. En d'autres termes, nous verrons que notre description de la nature découle logiquement, de manière pratiquement indépendante, du simple fait que nous pouvons parler de la nature à nos amis.

Défi 361 s



POINTS DE VUE

“ La tolérance... est le soupçon que l'autre pourrait avoir raison. ”

Kurt Tucholski (1890–1935), écrivain allemand.

“ La tolérance – une force que nous souhaitons principalement aux adversaires politiques. ”

Wolfram Weidner (né en 1925), journaliste allemand.

Lorsque le petit d'homme commence à rencontrer d'autres personnes durant son enfance, il s'aperçoit rapidement que certaines expériences sont partagées, alors que d'autres, comme les rêves, ne le sont pas. Apprendre à effectuer cette distinction est une des aventures de la vie humaine. Dans ces pages, nous nous focalisons sur une partie des expériences du premier type : les observations *physiques*. Toutefois, même parmi celles-ci, des distinctions doivent être effectuées. Dans la vie quotidienne, nous sommes habitués à reconnaître que les poids, les volumes, les longueurs et les durées sont indépendants du point de vue de l'observateur. Nous pouvons parler de ces quantités observées à qui-conque, et il n'y a aucun désaccord à propos de leurs valeurs, à partir du moment où elles ont été correctement mesurées. Pourtant, d'autres quantités doivent dépendre de l'observateur. Imaginez que vous parliez à un ami après qu'il a sauté d'un des arbres qui jalonnent notre chemin, au moment où il est en train de chuter vers le sol. Il affirmera que le sol de la forêt se rapproche à grande vitesse, bien que vous-même prétendrez que ce sol est stationnaire. Manifestement, la différence entre ces affirmations est due à leurs points de vue discordants. La vitesse d'un objet (dans cet exemple celle du sol de la forêt ou celle de votre ami lui-même) est ainsi une propriété moins symétrique que le poids ou la taille. Tous les observateurs ne s'accordent pas sur sa valeur.

Dans le cas des observations dépendantes du point de vue, la compréhension reste toujours possible si l'on se donne un peu de peine : chaque observateur peut s'*imaginer* observer à partir de la position de l'autre, et *vérifier* si le résultat imaginé concorde avec l'affirmation de l'autre*. Si cette affirmation ainsi imaginée et la véritable affirmation de l'autre observateur coïncident, ces observations sont cohérentes, et les différences dans les formulations ne sont dues qu'à des points de vue différents. Sinon, la différence est fondamentale et ils ne peuvent pas se mettre d'accord ou se parler. En utilisant cette approche, vous pouvez même dire si les sentiments, les jugements ou les goûts des hommes proviennent de différences fondamentales ou non.

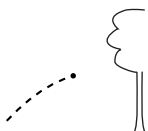
Défi 362 s

La distinction entre des quantités indépendantes du point de vue (invariantes) et d'autres dépendantes du point de vue est une distinction primordiale. Des quantités invariantes, telles que la masse ou la forme, décrivent des propriétés *intrinsèques*, et des quantités qui dépendent de l'observateur modélisent l'*état* du système. Par conséquent, nous devons impérativement répondre aux questions suivantes afin de trouver une description *complète* de l'état d'un système physique :

— Quels points de vue sont possibles ?

* Les hommes développent à l'âge d'environ quatre ans la capacité d'imaginer que d'autres peuvent se trouver dans des situations *différentes* de la leur. Par conséquent, avant cet âge, les hommes sont incapables de concevoir la relativité restreinte, après ils le peuvent.

Réf. 155



- Comment les descriptions se transforment-elles d'un point de vue à un autre ?
- Quelles observables ces symétries admettent-elles ?
- Qu'est-ce que ces conséquences ont à nous dire à propos du mouvement ?

Page 84

Page 201

Jusqu'à présent, dans la discussion, nous avons étudié des points de vue qui diffèrent selon la position, l'orientation, le temps et, encore plus important, selon le mouvement. Par rapport à chacun d'entre eux, des observateurs peuvent se trouver au repos, se déplacer à vitesse constante ou accélérer. Ces changements « concrets » de points de vue sont ceux que nous étudierons en premier. Dans ce cas, la nécessité de cohérence des observations faites par des observateurs différents est appelée le *principe de relativité*. Les symétries associées à ce type d'invariance sont nommées des symétries *externes*. Elles sont listées dans le **Tableau 26**.

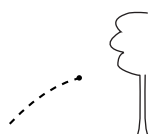
Une deuxième classe de changements fondamentaux des points de vue concerne les changements « abstraits ». Des points de vue peuvent différer selon la description mathématique utilisée : de tels changements sont appelés des *changements de jauge*. Ils seront introduits pour la première fois dans la section sur l'électrodynamique. À nouveau, il est exigé que toutes les formulations soient cohérentes à travers les différentes descriptions mathématiques. Cette exigence de cohérence est appelée le *principe d'invariance de jauge*. Les symétries associées sont nommées symétries *internes*.

La troisième classe de changements, dont l'importance ne peut pas apparaître immédiatement dans la vie de tous les jours, est celle du comportement d'un système sous l'échange de ses parties. L'invariance associée est appelée *symétrie de permutation*. C'est une symétrie *discrète*, et nous la rencontrerons dans la seconde partie de notre aventure.

Les trois conditions de cohérence décrites ci-dessus sont appelées « principes » parce que ces formulations élémentaires sont si profondes qu'elles déterminent presque complètement les « lois » de la physique, comme nous le verrons bientôt. Un peu plus tard nous découvrirons que le fait de chercher une description complète de l'état des objets produira également une description complète de leurs propriétés *intrinsèques*. Mais nous avons eu assez d'introduction : allons directement au cœur du sujet.

SYMÉTRIES ET GROUPES

Puisque nous sommes à la recherche d'une description exhaustive du mouvement, nous avons besoin de comprendre et de décrire l'ensemble complet des symétries de la nature. On dit qu'un système est symétrique, ou qu'il possède une *symétrie*, s'il apparaît sous une forme identique lorsqu'il est observé sous différents angles. Nous disons également que ce système possède une *invariance* par rapport au changement d'un point de vue à un autre. Les changements de points de vue sont appelés *opérations de symétrie* ou *transformations*. Une symétrie est donc une transformation ou, plus généralement, un ensemble de transformations. Toutefois, elle est beaucoup plus que cela : l'application consécutive de deux opérations de symétrie est une autre opération de symétrie. Pour être plus précis, une symétrie est un ensemble $G = \{a, b, c, \dots\}$ d'éléments, les transformations, combiné avec un opérateur binaire $\circ$ appelé *concaténation* ou *multiplication* et prononcé « suivi de » ou « fois », dans lequel les propriétés suivantes sont vérifiées pour



tout élément a , b et c :

$$\begin{aligned} \text{associativité, c'est-à-dire} \quad & (a \circ b) \circ c = a \circ (b \circ c) \\ \text{existence d'un élément neutre } e \text{ tel que} \quad & e \circ a = a \circ e = a \\ \text{existence d'un élément inverse } a^{-1} \text{ tel que} \quad & a^{-1} \circ a = a \circ a^{-1} = e \end{aligned} \quad (65)$$

Tout ensemble qui vérifie ces trois propriétés déterminantes, ou axiomes, est appelé un *groupe (mathématique)*. Historiquement, la notion de groupe fut le premier exemple d'une structure mathématique définie d'une manière totalement abstraite*. Pouvez-vous donner un exemple d'un groupe choisi dans la vie quotidienne ? Comme nous le verrons, les groupes apparaissent fréquemment en physique et en mathématiques, parce que les symétries sont présentes presque partout**. Pouvez-vous donner la liste des opérations de symétrie qui apparaissent dans les motifs de la Figure 106 ?

Défi 363 s

Réf. 156

Défi 364 s

REPRÉSENTATIONS

En observant un système symétrique et composé tel que celui de la Figure 106, nous remarquons que chacune de ses parties, par exemple chaque motif rouge, appartient à un ensemble d'objets identiques, généralement appelé un *multiplet*. Considéré dans son ensemble, le multiplet possède (au moins) les propriétés de symétrie du système tout entier. Pour certains des motifs colorés de la Figure 106, nous avons besoin de quatre objets pour constituer un multiplet complet, bien que pour d'autres deux suffisent, ou un seulement, comme dans le cas de l'étoile centrale. En réalité, dans chaque système symétrique, chaque partie peut être classée selon le type de multiplet auquel elle appartient. Lors de notre ascension de la montagne nous réaliserons la même classification avec chaque partie de la nature, obtenant ainsi une précision toujours croissante.

Défi 365 e

Un *multiplet* est un ensemble de parties qui se transforment les unes dans les autres selon toutes les transformations de symétrie. Les mathématiciens nomment généralement *représentations* ces multiplets abstraits. En spécifiant à quel multiplet un composant appartient, nous décrivons de quelle manière ce composant constitue une partie du système entier. Regardons comment cette classification est réalisée.

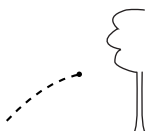
En langage mathématique, les transformations de symétrie sont fréquemment décrites par des matrices. Par exemple, dans le plan, une image symétrique (réflexion) par rapport

* Ce terme est dû à Évariste Galois (1811–1832), cette structuration à Augustin-Louis Cauchy (1789–1857) et cette définition axiomatique à Arthur Cayley (1821–1895).

** En principe, les groupes mathématiques ne nécessitent pas forcément d'être définis comme des groupes de symétrie, mais nous pouvons démontrer que tous les groupes peuvent être considérés comme des groupes de transformation dans un certain espace mathématique convenablement choisi. Ainsi donc en mathématiques nous pouvons utiliser les termes « groupe de symétrie » et « groupe » de manière indifférente.

Un groupe est dit *abélien* si son opération de concaténation est commutative, c'est-à-dire si $a \circ b = b \circ a$ pour tout couple d'éléments a et b . Dans cette condition, la concaténation est parfois appelée *addition*. Les rotations forment-elles un groupe abélien ?

Un sous-ensemble $G_1 \subset G$ d'un groupe G peut lui-même être un groupe ; nous parlons alors de *sous-groupe* et nous disons souvent abusivement que G est *plus grand* que G_1 ou que G est un groupe de *plus haute* symétrie que G_1 .



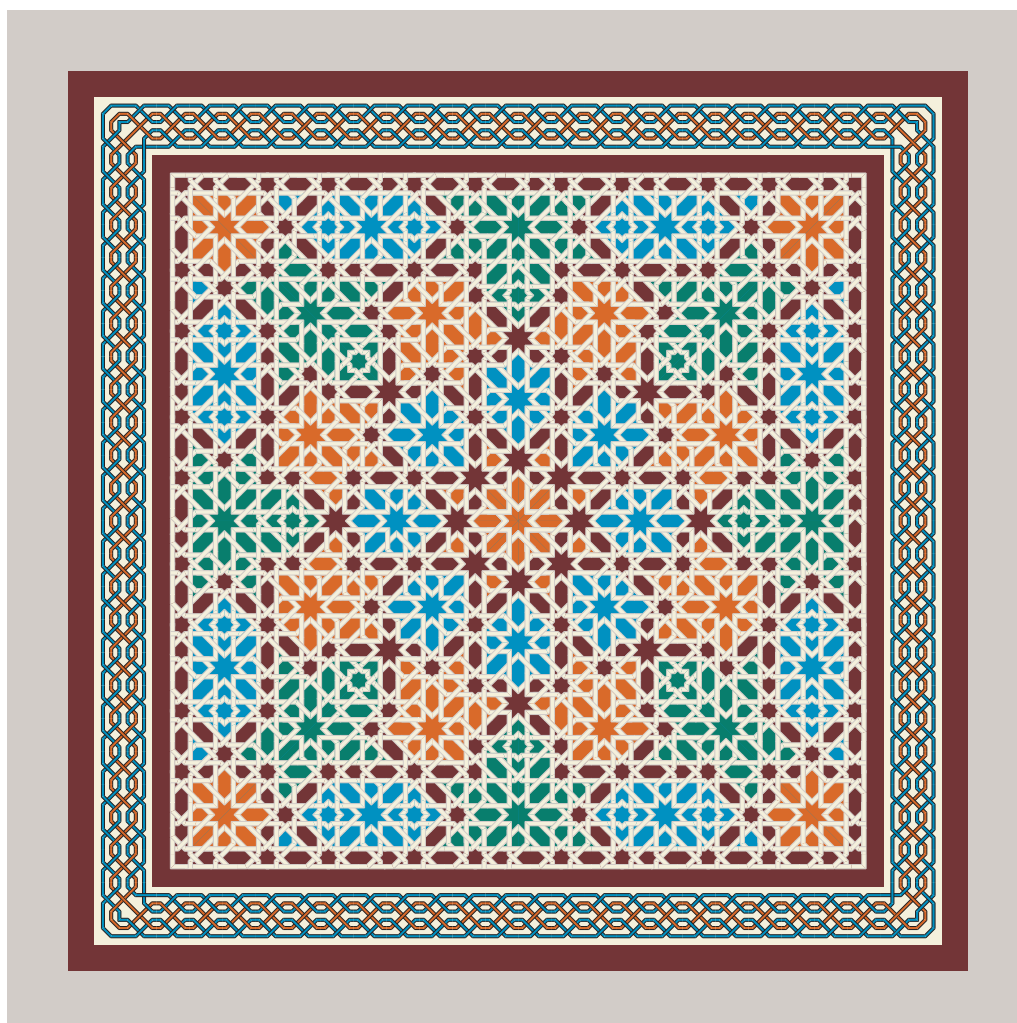


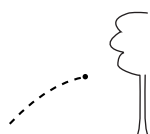
FIGURE 106 Un ornement latino-arabe dans le palais du Gouverneur à Séville. (© Christoph Schiller)

à la première diagonale de ce plan est représentée par la matrice

$$D(\text{réfl}) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (66)$$

puisque chaque point (x, y) est transformé en (y, x) lorsqu'il est multiplié par la matrice $D(\text{réfl})$. Par conséquent, pour un mathématicien, une *représentation* d'un groupe de symétrie G est une affectation d'une matrice $D(a)$ à chaque élément a du groupe telle que la représentation de la concaténation de deux éléments a et b est égale au produit de la représentation D de chaque élément :

$$D(a \circ b) = D(a)D(b). \quad (67)$$



Par exemple, la matrice de l'équation (66), ainsi que les matrices associées à toutes les autres opérations de symétrie possèdent cette propriété*.

Pour chaque groupe de symétrie, la construction et la classification de toutes les représentations possibles constituent une activité importante. Celle-ci correspond à la classification de tous les multiplets possibles qu'un système symétrique peut comporter. De cette façon, la compréhension de la classification de tous les multiplets et toutes les parties qui peuvent apparaître dans la Figure 106 nous informera sur la manière d'arranger toutes les parties possibles qui peuvent composer un objet ou un exemple de mouvement !

Une représentation D est qualifiée d'*unitaire* si toutes les matrices $D(a)$ sont unitaires**. Presque toutes les représentations qui surgissent en physique, à l'exception seulement d'une poignée d'entre elles, sont unitaires : cette propriété est la plus restrictive, puisqu'elle précise que les transformations correspondantes sont des applications injectives et qu'elles sont inversibles, ce qui signifie qu'un observateur ne verra jamais plus ou moins de choses qu'un autre. Évidemment, si un observateur peut discuter avec un second, le deuxième observateur peut également parler au premier.

L'ultime propriété importante d'un multiplet, ou d'une représentation, concerne sa structure. Si un multiplet peut être vu comme étant constitué de sous-multiplets, il est qualifié de *réductible*, sinon d'*irréductible*. Le même vocabulaire s'applique aux représentations. Les représentations irréductibles ne peuvent évidemment pas être décomposées. Par exemple, le groupe de symétrie (approximatif) de la Figure 106, communément appelé D_4 , possède huit éléments. Il est associé à la représentation matricielle générale exacte, unitaire et irréductible

Défi 367 e

* Il y a quelques conditions accessoires évidentes, mais importantes, pour une représentation : les matrices $D(a)$ doivent être inversibles, ou non singulières, et l'opérateur identité de G doit être associé à la matrice unité. En langage beaucoup plus concis, nous disons qu'une représentation est un *homomorphisme* de G dans le groupe des matrices inversibles ou non singulières. Une matrice D est inversible si son déterminant $\det D$ n'est pas nul.

En général, si une fonction f d'un groupe G à un autre groupe G' satisfait la relation

$$f(a \circ_G b) = f(a) \circ_{G'} f(b), \quad (68)$$

alors elle est appelée *homomorphisme*. Un homomorphisme f qui est à la fois injectif et surjectif est appelé un *isomorphisme*. Si une représentation est également injective, elle est qualifiée de *fidèle*, *exacte* ou *juste*.

De la même façon que pour les groupes, des structures mathématiques plus complexes comme les anneaux, les corps et les algèbres associatives peuvent également être représentées par des classes appropriées de matrices. Une représentation du corps des nombres complexes en est donnée dans l'Annexe ??.

** La *transposée* A^T d'une matrice A est définie élément par élément par $(A^T)_{ik} = A_{ki}$. La *conjuguée complexe* A^* d'une matrice A est définie par $(A^*)_{ik} = (A_{ik})^*$. La matrice *adjointe* $A^\dagger$ d'une matrice A est définie par $A^\dagger = (A^T)^*$. Une matrice est qualifiée de *symétrique* si $A^T = A$, d'*orthogonale* si $A^T = A^{-1}$, d'*hermitienne* ou *auto-adjointe* (les deux sont synonymes dans toutes les applications physiques) si $A^\dagger = A$ (les matrices hermitiennes ont des valeurs propres réelles), et *unitaires* si $A^\dagger = A^{-1}$. Les matrices unitaires possèdent des valeurs propres de norme un. La multiplication par une matrice unitaire est une application injective, puisque l'évolution temporelle des systèmes physiques est une application d'un instant vers un autre, l'évolution est toujours décrite par une matrice unitaire. Une matrice *réelle* respecte $A^* = A$, une matrice *antisymétrique* ou *symétrique par rapport à la diagonale* est définie par $A^T = -A$, une matrice *anti-hermitienne* par $A^\dagger = -A$ et une matrice *anti-unitaire* par $A^\dagger = -A^{-1}$. Toutes les applications décrites par ces types particuliers de matrices sont injectives. Une matrice est *singulière*, c'est-à-dire non injective, si $\det A = 0$.

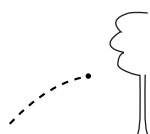


TABLEAU 25 Correspondances entre les symétries d'un ornement, d'une fleur et de la nature tout entière.

S Y S T È M E	M O T I F L A T I N O – A R A B E	F L E U R	M O U V E M E N T
Structure et composants	ensemble de bandes et de motifs	ensemble de pétales, tige	trajectoire du mouvement et observables
Symétrie du système	symétrie des motifs	symétrie de la fleur	symétrie du lagrangien
Description mathématique du groupe de symétrie	D_4	C_5	en relativité galiléenne : position, orientation, instant et variations de vitesse
Invariants	nombre d'éléments d'un multiplet	nombre de pétales	nombre de coordonnées, grandeur des scalaires, vecteurs et tenseurs
Représentations des composants	types de multiplets d'éléments	types de multiplets de composants	tenseurs, y compris scalaires et vecteurs
Représentation la plus symétrique	singulet	partie de symétrie circulaire	scalaire
Représentation fidèle la plus simple	quadruplet	quintuplet	vecteur
Représentation la moins symétrique	quadruplet	quintuplet	aucune limite (tenseur de rang infini)

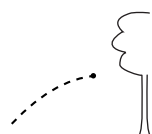
$$\begin{pmatrix} \cos n\frac{\pi}{2} & -\sin n\frac{\pi}{2} \\ \sin n\frac{\pi}{2} & \cos n\frac{\pi}{2} \end{pmatrix} n = 0..3, \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (69)$$

Cette représentation est un *octet*. La liste exhaustive de toutes les représentations irréductibles possibles du groupe D_4 est donnée par des *singulets*, des *couples* et des *quadruplets*. Pouvez-vous tous les repérer ? Ces représentations permettent la classification de toutes les bandes noires et blanches qui apparaissent dans la figure, ainsi que celle des motifs colorés. Les éléments les plus symétriques sont les singulets, les moins symétriques étant les membres des quadruplets. Le système complet constitue toujours un singulet.

À l'aide de ces concepts nous sommes prêts à discuter du mouvement avec une meilleure précision.

SYMÉTRIES, MOUVEMENT ET PHYSIQUE GALILÉENNE

Chaque jour, nous faisons l'expérience que nous sommes capables de nous parler les uns aux autres à propos du mouvement. Il doit donc être possible de découvrir une quan-



tité *invariante* qui le décrit. Nous la connaissons déjà : c'est l'*action*. Craquer une allumette est un changement. C'est le même changement qu'elle soit allumée ici ou là-bas, dans une direction ou une autre, aujourd'hui ou demain. En fait, l'action (galiléenne) est une quantité dont la valeur est la même pour chaque observateur *au repos*, indépendamment de son orientation ou de l'instant auquel il réalise son observation.

Dans le cas des motifs arabes de la Figure 106, la symétrie nous permet de déduire la liste des multiplets ou des représentations qui peuvent constituer ses éléments de base. Cette méthode doit aussi être possible pour le mouvement. Nous déduisons la classification des bandes de l'ornement arabe en singulets, couples, etc. à partir des divers angles d'observation possibles. Pour un système en mouvement, les éléments de base, correspondant aux bandes, sont les *observables*. Puisque nous considérons que la nature est symétrique sous différents changements de points de vue, nous pouvons cataloguer toutes les observables. Pour ce faire, nous avons besoin de dresser la liste de toutes les transformations de points de vue et d'en déduire l'inventaire de toutes leurs représentations.

Notre expérience quotidienne montre que le monde reste inchangé après des changements de position, d'orientation et d'instant de l'observation. Nous parlons également d'invariance par translation dans l'espace, d'invariance par rotation et d'invariance par translation du temps. Ces transformations sont différentes de celles du modèle arabe sur deux points : elles sont *continues* et elles sont *illimitées*. Ainsi, leurs représentations seront généralement continûment variables et sans frontières : elles seront des *quantités* ou des *grandeurs*. En d'autres termes, des observables seront confectionnées à l'aide de *nombres*. De cette manière nous avons justifié pourquoi des nombres sont *nécessaires* pour toute description du mouvement*.

Puisque des observateurs peuvent avoir une orientation différente, la plupart des représentations seront des objets possédant une direction. En bref, la symétrie sous le changement de position, d'orientation ou d'instant de l'observation a pour conséquence que toutes les observables sont soit des « scalaires », soit des « vecteurs » ou plus généralement des « tenseurs »**.

Un *scalaire* est une quantité observable qui demeure identique pour tous les observateurs : elle correspond à un singulet. Des exemples en sont la masse ou la charge d'un objet, la distance entre deux points, la distance à l'horizon, et beaucoup d'autres. Leurs valeurs autorisées sont (généralement) continues, illimitées et sans direction. Le potentiel en un point et la température en un point sont d'autres exemples de scalaires. La vitesse n'est évidemment pas un scalaire, pas plus que la coordonnée d'un point. Pouvez-vous trouver d'autres exemples et contre-exemples ?

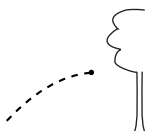
L'énergie est une observable énigmatique. C'est un scalaire si l'on considère uniquement des changements de lieu, d'orientation et d'instant de l'observation. Mais l'énergie n'est plus un scalaire si des changements de vitesse de l'observateur sont pris en compte. Personne n'a jamais recherché une généralisation de l'énergie telle qu'elle soit une grandeur scalaire également pour les observateurs mobiles. C'est seulement Albert Einstein qui l'a découvert, complètement par hasard. Nous reviendrons sur ce sujet bientôt.

* Contrairement aux vecteurs et aux tenseurs d'ordre plus élevé, seuls les scalaires peuvent être des quantités qui ne peuvent prendre qu'un ensemble discret de valeurs, comme +1 ou -1 seulement. Plus brièvement, seuls les scalaires peuvent être des observables *discrètes*.

** Plus tard, les *spineurs* seront ajoutés, et compléteront, cette liste.

Défi 370 s

Défi 369 e



Toute quantité qui possède une grandeur et une direction et qui « reste identique » par rapport à l'environnement après un changement de point de vue est un *vecteur*. Par exemple, la flèche qui relie deux points fixes situés sur le sol est un vecteur. Sa longueur est la même pour tous les observateurs, sa direction varie d'un observateur à l'autre, mais pas par rapport à son environnement. D'un autre côté, la flèche qui relie un arbre au lieu où un arc-en-ciel touche la terre n'est *pas* un vecteur, puisque ce lieu ne reste pas figé par rapport au milieu environnant lorsque l'observateur change.

Défi 371 e

Les mathématiciens disent que les vecteurs sont des entités orientées qui restent invariantes sous des transformations de coordonnées. Les vitesses des objets, les accélérations et la force exercée par un champ en un point sont des exemples de vecteurs. (Pouvez-vous le confirmer ?) La grandeur d'un vecteur est un scalaire : elle est la même pour tout observateur. D'ailleurs, un résultat célèbre et déconcertant des expériences réalisées au dix-neuvième siècle montra que la vitesse de la lumière n'est *pas* un vecteur pour les transformations galiléennes. Ce mystère sera résolu un peu plus tard.

Page 88

Page 113

Les tenseurs sont des vecteurs généralisés. Comme exemple, prenez le moment d'inertie d'un objet. Il spécifie la dépendance du moment cinétique par rapport à la vitesse angulaire. Pour tout objet, le fait de doubler la grandeur de la vitesse angulaire permet de doubler la grandeur du moment cinétique ; pourtant, ces deux vecteurs ne sont pas parallèles l'un à l'autre si l'objet n'est pas une sphère. En général, si les grandeurs de ces deux vecteurs sont proportionnelles, dans le sens où le fait de doubler la grandeur d'un vecteur double la grandeur de l'autre, mais sans que ces deux vecteurs soient parallèles l'un à l'autre, alors le « facteur » de proportionnalité est un *tenseur* (du second ordre). Comme tous les facteurs de proportionnalité, les tenseurs ont une grandeur. En plus, les tenseurs possèdent une direction et une *forme* : ils décrivent les correspondances qui existent entre les vecteurs auxquels ils sont associés. Puisque les vecteurs sont les quantités les plus simples dotées d'une grandeur et d'une direction, alors les tenseurs sont les quantités les plus simples dotées d'une grandeur et d'une direction qui dépend d'une seconde direction choisie. Les vecteurs peuvent être visualisés comme des flèches orientées, les tenseurs peuvent l'être comme des ellipsoïdes orientés*. Pouvez-vous citer un autre exemple de tenseurs ?

Défi 373 s

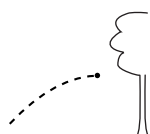
Retournons à la description du mouvement. Le [Tableau 25](#) indique que, dans des systèmes physiques, nous devons toujours discerner la symétrie du lagrangien tout entier – correspondant à la symétrie du modèle complet – de la représentation des observables – correspondant aux multiplets des rubans. Puisque l'action doit être un scalaire, et puisque toute observable doit être un tenseur, les lagrangiens contiennent des sommes

* Un tenseur de rang n est le facteur de proportionnalité situé entre un tenseur de rang 1, c'est-à-dire un vecteur, et un tenseur de rang $(n - 1)$. Les vecteurs et les scalaires sont des tenseurs respectivement de rang 1 et de rang 0. Les scalaires peuvent être imaginés comme des sphères, les vecteurs comme des flèches et les tenseurs de rang 2 comme des ellipsoïdes. Les tenseurs de rang plus élevé correspondent à des formes de plus en plus complexes.

Un vecteur possède la même longueur et la même direction pour tous les observateurs, un tenseur (de rang 2) possède le même déterminant, la même trace (en algèbre linéaire, la trace d'une matrice carrée est définie comme étant la somme de ses éléments diagonaux [N.D.T.]) et la même somme de ses sous-déterminants diagonaux pour tous les observateurs.

Défi 372 e

Un vecteur est défini mathématiquement par une *liste* d'éléments, un tenseur (de rang 2) est décrit par une *matrice* d'éléments. Le rang ou l'ordre d'un tenseur détermine ainsi le nombre d'indices que possède l'observable. Pouvez-vous montrer cela ?



et des produits de tenseurs uniquement dans des combinaisons qui forment des scalaires. Les lagrangiens renferment donc seulement des produits scalaires ou des généralisations de ceux-ci. En résumé, les lagrangiens apparaissent toujours sous la forme

$$L = \alpha a_i b^i + \beta c_{jk} d^{jk} + \gamma e_{lmn} f^{lmn} + \dots \quad (70)$$

où les indices affectés aux variables a, b, c , etc. sur lesquelles les additions sont effectuées sont toujours répétés (ainsi en général, les symboles de sommation sont tout simplement omis). Les lettres grecques représentent des constantes. Par exemple, l'action d'une particule ponctuelle libre en physique galiléenne était donnée par

$$S = \int L dt = \frac{m}{2} \int v^2 dt \quad (71)$$

qui est en réalité de la forme mentionnée plus haut. Nous rencontrerons de nombreux autres cas pendant notre étude du mouvement*.

Galilée avait déjà compris que le mouvement est également invariant sous des changements de points de vue ayant des vitesses différentes. Cependant, l'action que nous venons de définir ne reflète pas cela. Il fallut quelques années pour lever le voile sur la généralisation correcte : elle est fournie par la théorie de la relativité restreinte. Avant que nous l'étudiions, nous devons achever le présent sujet.

Page 84

Réf. 157

Défi 374 pe

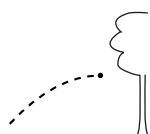
* Par ailleurs, la liste classique des points de vue d'observation possibles – à savoir les positions différentes, les instants d'observation différents, les orientations différentes, et les vitesses différentes – est-elle également *exhaustive* pour l'action (71) ? De façon surprenante, la réponse est non. Un des premiers qui remarqua cette particularité fut Niederer, en 1972. En étudiant la théorie quantique des particules ponctuelles, il s'aperçut que même l'action d'une particule ponctuelle libre galiléenne est invariante sous certaines autres transformations. Si les deux observateurs utilisent les coordonnées $(t, \mathbf{x})$ et (τ, ξ) , l'action (71) est invariante sous les transformations

$$\xi = \frac{\mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{x}_0 + \mathbf{v}t}{\gamma t + \delta} \quad \text{et} \quad \tau = \frac{\alpha t + \beta}{\gamma t + \delta} \quad \text{avec} \quad \mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{1} \quad \text{et} \quad \alpha\delta - \beta\gamma = 1 \quad (72)$$

où $\mathbf{R}$ décrit la rotation de l'orientation d'un observateur par rapport à celle de l'autre, $\mathbf{v}$ la vitesse relative entre les deux observateurs, et $\mathbf{x}_0$ le vecteur qui pointe entre les deux origines à l'instant zéro. Ce groupe renferme deux cas particuliers importants de transformations :

$$\begin{aligned} &\text{Le groupe de Galilée, connexe et statique} \quad \xi = \mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{x}_0 + \mathbf{v}t \quad \text{et} \quad \tau = t \\ &\text{Le groupe de transformation SL}(2, \mathbb{R}) \quad \xi = \frac{\mathbf{x}}{\gamma t + \delta} \quad \text{et} \quad \tau = \frac{\alpha t + \beta}{\gamma t + \delta} . \end{aligned} \quad (73)$$

Le deuxième groupe, à trois paramètres, inclut le *renversement d'espace*, les *dilatations*, la *translation du temps* et un ensemble de transformations dépendantes du temps tel que $\xi = \mathbf{x}/t$, $\tau = 1/t$ appelées *expansions*. Les dilatations et les expansions sont rarement citées puisqu'elles sont des symétries des particules ponctuelles seulement, elles ne s'appliquent pas aux objets et systèmes ordinaires. Elles réapparaîtront plus tard cependant, sous un jour encore plus important.



REPRODUCTIBILITÉ, CONSERVATION ET THÉORÈME DE NOETHER

“J’abandonnerai ma masse, ma charge et ma quantité de mouvement à la science.”
Graffiti

Défi 375 pe La reproductibilité des observations, c’est-à-dire la symétrie sous le changement d’instant ou « invariance par translation du temps », est un exemple d’indépendance de point de vue. (Cela n’est pas évident, pouvez-vous trouver ses représentations irréductibles ?) Cette correspondance possède plusieurs conséquences importantes. Nous avons vu que la symétrie implique l’invariance. Il apparaît que pour des symétries *continues*, telle la symétrie de translation du temps, cette affirmation peut être exprimée de façon plus précise : pour toute symétrie continue du lagrangien, il existe une constante conservée associée pour le mouvement, et vice versa. La formulation exacte de cette correspondance est le théorème d’Emmy Noether*. Elle découvrit ce résultat en 1915 lorsqu’elle vint en aide à Albert Einstein et David Hilbert, qui étaient tous les deux en lutte et en concurrence dans l’édification de la relativité générale. Toutefois, ce résultat s’applique à n’importe quel type de lagrangien.

Réf. 158

Noether examina des symétries continues dépendant d’un paramètre b continu. Une transformation de point de vue est une symétrie si l’action S ne dépend pas de la valeur de b . Par exemple, en modifiant la position comme suit :

$$x \mapsto x + b \quad (74)$$

on laisse l’action

$$S_0 = \int T(v) - U(x) dt \quad (75)$$

invariante, puisque $S(b) = S_0$. Cette situation implique que

$$\frac{\partial T}{\partial v} = p = \text{const} \quad ; \quad (76)$$

en résumé, la symétrie sous le changement de position entraîne la conservation de la quantité de mouvement. L’inverse est également vrai.

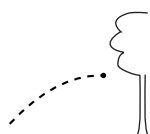
Dans le cas d’une symétrie sous le décalage de l’instant de l’observation, nous trouvons

$$T + U = \text{const} \quad ; \quad (77)$$

ou, dit autrement, l’invariance par la translation du temps entraîne que l’énergie reste constante. Ici encore, l’inverse est aussi correct. Nous disons également que l’énergie et la quantité de mouvement sont des *générateurs* des translations du temps et de l’espace.

La quantité conservée pour une symétrie continue est parfois appelée la *charge de Noether*, parce que le mot *charge* est utilisé en physique théorique pour désigner des ob-

* Emmy Noether (n. Erlangen 1882, d. Bryn Mayr 1935), mathématicienne allemande. Ce théorème ne constituait qu’une activité secondaire dans sa carrière qu’elle voua principalement à la théorie des nombres. Le théorème s’applique également aux symétries de jauge, où il établit que, pour chaque symétrie de jauge, est associée une identité pour l’équation du mouvement et vice versa.



servables étendues conservées. Donc, l'énergie et la quantité de mouvement sont des charges de Noether. La « charge électrique », la « charge gravitationnelle » (ou masse) et la « charge topologique » en sont des exemples courants. Quelle est la charge conservée pour l'invariance par rotation ?

Défi 377 s

Nous remarquons que l'expression « l'énergie est conservée » a plusieurs significations. Avant tout, elle signifie que l'énergie d'une particule libre *unique* est constante au cours du temps. Ensuite, elle veut dire que l'énergie totale de *n'importe quel* nombre de particules indépendantes est constante. Finalement, elle indique que l'énergie d'un *système* de particules, c'est-à-dire en incluant leurs interactions, est constante au cours du temps. Les collisions sont des exemples de ce dernier cas. Le théorème de Noether rend compte à la fois de toutes ces situations, comme vous pouvez le vérifier en utilisant les lagrangiens correspondants.

Défi 378 e

Mais le théorème de Noether formule également, ou plutôt renouvelle, une vérité encore plus profonde : si l'énergie n'était pas conservée, le temps ne pourrait être défini. La description intégrale de la nature requiert l'existence de quantités conservées, comme nous l'avons remarqué lorsque nous avons introduit les concepts d'objet, d'état et d'environnement. Par exemple, nous avons alors défini les objets comme des entités *permanentes*, entendez comme des entités caractérisées par des quantités conservées. Nous avons également vu que l'introduction du temps est possible uniquement parce que dans la nature il « n'y a pas de surprises ». Le théorème de Noether évoque précisément à quoi une telle « surprise » devrait ressembler : la non-conservation de l'énergie. Quoi qu'il en soit, les bonds d'énergie n'ont jamais été observés – même pas, non plus, à l'échelle quantique.

Page 25

Page 164

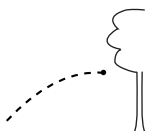
Puisque les symétries sont si importantes pour la description de la nature, le **Tableau 26** fournit un panorama de toutes les symétries de la nature que nous rencontrons. Leurs principales propriétés sont également listées. Excepté pour celles qui sont marquées comme « approximatives » ou « spéculatives », une preuve expérimentale de l'inexactitude de *n'importe laquelle* d'entre elles constituerait en réalité un véritable coup de théâtre.

TABEAU 26 Les symétries de la relativité et de la théorie quantique avec leurs propriétés, ainsi que la liste complète des *inductions* logiques utilisées dans ces deux domaines.

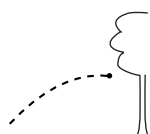
SYMÉTRIE	TYPE [NB DE PARA- MÈ- TRES]	ES- PACE D'AC- TION	GROU- PE TOPO- LOGIE	REPRÉ- SENTA- TIONS POS- SIBLES	QUAN- TITÉ CONSER- VÉE	VIDE / MATIÈRE ASYMÉ- TRIQUE	EFFET PRINCI- PAL
----------	---	------------------------------	-------------------------------	---	---------------------------------	---------------------------------------	-------------------------

Symétries externes, d'espace-temps ou géométriques

Translation d'espace et de temps	$R \times R^3$ [4 par.]	espace, temps	non compact	scalaires, vecteurs	quantité de mouvement et énergie	oui/oui	autorise le quotidien
Rotation	$SO(3)$ [3 par.]	espace	S^2	tenseurs	quantité de mouvement	oui/oui	communi- cation



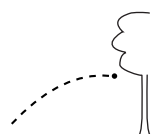
SYMÉTRIE	TYPE [NB DE PARA- MÈ- TRES]	ES- PACE D'AC- TION	GROU- PE TOPO- LOGIE	REPRÉ- SENTA- TIONS POS- SIBLES	QUAN- TITÉ CONSER- VÉE	VIDE / MATIÈ- RE ASYMÉ- TRIQUE	EFFET PRINCI- PAL
Impulsion de Galilée	R^3 [3 par.]	espace, temps	non compact	scalaires, vecteurs, tenseurs	vitesse du centre de masse	oui/aux vitesses faibles	relativité du mouve- ment
Lorentz	Lie homogène SO(3,1) [6 par.]	espace-temps	non compact	tenseurs, spineurs	énergie-quantité de mouvement $T^{\mu\nu}$	oui/oui	vitesse de la lumière constante
Poincaré ISL(2,C)	Lie non homogène [10 par.]	espace-temps	non compact	tenseurs, spineurs	énergie-quantité de mouvement $T^{\mu\nu}$	oui/oui	
Invariance par dilatation	R^+ [1 par.]	espace-temps	rayon	n -dimen. continuum	aucune	oui/non	particules sans masse
Invariance conforme spéciale	R^4 [4 par.]	espace-temps	R^4	n -dimen. continuum	aucune	oui/non	particules sans masse
Invariance conforme	[15 par.]	espace-temps	compliqué	tenseurs, spineurs sans masse	aucune	oui/non	invariance du cône de lumière
Symétries dynamiques, dépendantes des interactions : la gravitation							
Gravité en $1/r^2$	SO(4) [6 par.]	espace des config.	comme SO(4)	couple de vecteurs	direction du périhélie	oui/oui	orbites fermées
Invariance par difféomorphisme	$[\infty$ par.]	espace-temps	compliqué	espace-temps	énergie-quantité de mouvement local	oui/non	avancée du périhélie
Symétries dynamiques, du mouvement classique et de la mécanique quantique							
Mouvement par inversion T (« temps »)	discret	espace des phases ou de Hilbert	discret	pair, impair	parité T	oui/non	réversibilité



SYMÉTRIE	TYPE [NB DE PARA- MÈ- TRES]	ES- PACE D'AC- TION	GROU- PE TOPO- LOGIE	REPRÉ- SENTA- TIONS POS- SIBLES	QUAN- TITÉ CONSER- VÉE	VIDE / MATIÈ- RE ASYMÉ- TRIQUE	EFFET PRINCI- PAL
Parité par inversion P (« spatiale »)	discret	espace des phases ou de Hilbert	discret	pair, impair	parité P	oui/non	les mondes miroirs existent
Conjugaison de charge C	globale, anti- linéaire, anti-her- mitienne	espace des phases ou de Hilbert	discret	pair, impair	parité C	oui/non	les antipar- ticules existent
CPT	discret	espace des phases ou de Hilbert	discret	pair	parité CPT	oui/oui	rend la théorie des champs possible

Symétries de jauge dynamiques, dépendantes des interactions

Invariance de jauge électroma- gnétique classique	$[\infty \text{ par.}]$	espace de champs	non im- portant	non important	charge électrique	oui/oui	lumière sans masse
Invariance de jauge électroma- gnétique quantique	Lie U(1) abélien [1 par.]	espace de Hilbert	cercle S^1	champs	charge électrique	oui/oui	photon sans masse
Dualité électro- magnétique	Lie U(1) abélien [1 par.]	espace de champs	cercle S^1	abstrait	abstrait	oui/non	aucun
Jauge faible	Lie SU(2) non abélien [3 par.]	espace de Hilbert	comme SU(3)	particules	charge faible	non/ approx.	
Jauge de couleur	Lie SU(3) non abélien [8 par.]	espace de Hilbert	comme SU(3)	quarks de couleur	couleur	oui/oui	gluons sans masse
Symétrie chirale	discret	fermions	discret	gauche, droite	hélicité	à peu près	fermions « sans masse » ^a



SYMÉTRIE	TYPE [NB DE PARA- MÈ- TRES]	ES- PACE D'AC- TION	GROU- PE TOPO- LOGIE	REPRÉ- SENTA- TIONS POS- SIBLES	QUAN- TITÉ CONSER- VÉE	VIDE / MATIÈ- RE ASYMÉ- TRIQUE	EFFET PRINCI- PAL
Symétries de permutation							
Échange de particule	discret	espace de Fock etc.	discret	fermions et bosons	aucune	n.a./oui	paradoxe de Gibbs
Sélection de symétries <i>spéculative</i> de la nature							
GUT	E_8 , SO(10)	Hilbert	à partir du groupe de Lie	particules	à partir du groupe de Lie	oui/non	conver- gence de la constante de couplage
Supersymétrie N^b	globale	Hilbert		particules, s- particules	T_{mn} et N spineurs ^c Q_{imn}	non/non	particules « sans masse » ^a
Parité R	discret	Hilbert	discret	+1, -1	parité R	oui/oui	sfermions, jauginos
Symétrie de tresse	discret	son propre espace	discret	vague	vague	oui/peut- être	vague
Dualité espace-temps	discret	tous	discret	le vide	vague	oui/peut- être	masses fixes des particules
Symétrie d'événement	discret	espace- temps	discret	la nature	aucune	oui/non	vague

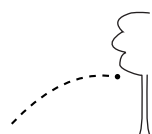
Pour des détails concernant les relations entre la symétrie et l'induction logique, voyez la page ??
L'explication des termes utilisés dans le tableau sera complétée tout au long de notre promenade.
Les nombres réels sont symbolisés par R .

a. Seulement approximativement, « sans masse » signifie que $m \ll m_P$, c'est-à-dire que $m \ll 22 \mu g$.

b. La supersymétrie $N = 1$, mais pas la supergravité $N = 1$, est probablement une bonne approximation pour la nature aux énergies rencontrées.

c. $i = 1 \dots N$.

En résumé, puisque nous pouvons *parler* de la nature, nous pouvons déduire plusieurs de ses symétries, en particulier sa symétrie sous les translations de temps et d'espace. À partir des symétries naturelles, en utilisant le théorème de Noether, nous pouvons déduire les charges conservées telles que l'énergie ou les moments cinétique et de translation. En d'autres termes, les définitions de masse, d'espace et de temps, associées à leurs



propriétés de symétrie, sont *équivalentes* à la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement. La conservation et la symétrie sont deux manières d'exprimer la même propriété de la nature. Pour le dire simplement, notre aptitude à parler de la nature signifie que l'énergie et la quantité de mouvement sont conservées.

En général, la manière la plus élégante pour dévoiler les « lois » de la nature consiste à rechercher des symétries naturelles. À plusieurs reprises au cours de l'Histoire, chaque fois que cette relation a été comprise, la physique a réalisé des progrès notables. Par exemple, Albert Einstein découvrit la théorie de la relativité de cette façon, et Paul Dirac donna naissance à l'électrodynamique quantique. Nous utiliserons la même méthode tout au long de notre marche, dans sa troisième partie nous découvrirons certaines symétries qui sont encore plus fantastiques que celles de la relativité. Maintenant, cependant, nous allons continuer par l'approche suivante de la description globale du mouvement.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LA SYMÉTRIE DU MOUVEMENT

Défi 379 pe Quel est le trajet suivi par quatre tortues partant des quatre angles d'un carré, si chacune d'elles marche continuellement à la même vitesse en direction de sa voisine de gauche (ou de droite) ?

* *

Défi 380 s Quelle est la symétrie d'une oscillation simple ? Et celle d'une onde ?

* *

Défi 381 s Pour quels systèmes le renversement du mouvement est-il une transformation symétrique ?

* *

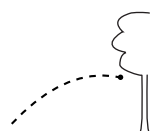
Défi 382 pe Quelle est la symétrie d'une rotation continue ?

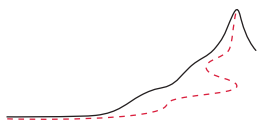
* *

Défi 383 pe Une sphère possède un tenseur pour le moment d'inertie qui est diagonal avec trois nombres égaux. La même chose est vraie pour le cube. Pouvez-vous distinguer les sphères des cubes par leur comportement sous une rotation ?

* *

Défi 384 pe Existe-t-il dans la nature un mouvement dont la symétrie est parfaite ?





CHAPITRE 10

MOUVEMENTS ÉLÉMENTAIRES DES CORPS ÉTENDUS – VIBRATIONS ET ONDES

Nous avons défini l'action, et donc le changement, comme étant l'intégrale du lagrangien, et le lagrangien comme la différence entre l'énergie cinétique et l'énergie potentielle. Une masse m attachée à un ressort représente un des systèmes les plus simples dans la nature. Son lagrangien est donné par

$$L = \frac{1}{2}mv^2 - kx^2, \quad (78)$$

où k représente une quantité caractérisant le ressort, dénommée constante du ressort. Ce lagrangien est dû à Robert Hooke, au dix-septième siècle. Pouvez-vous démontrer son résultat ?

Défi 385 e

Le mouvement qui résulte de ce lagrangien est périodique, comme indiqué sur la [Figure 107](#). Le lagrangien décrit l'oscillation de la longueur du ressort. Ce mouvement est exactement identique à celui d'un long pendule. Il est baptisé *mouvement harmonique*, parce qu'un objet vibrant rapidement de cette manière produit un son musical complètement pur – ou harmonique. (L'instrument de musique qui produit les ondes harmoniques les plus pures est la flûte traversière. Cet instrument fournit donc la meilleure idée du « chant » du mouvement harmonique.) Le graphe d'une oscillation harmonique ou linéaire, montrée sur la [Figure 107](#), est appelé une *courbe de sinus*. Elle peut être vue comme étant l'élément fondamental de toute oscillation. Toutes les autres, les oscillations non harmoniques dans la nature, peuvent être reconstituées à partir des courbes de sinus, comme nous allons le voir bientôt.

Page 208

Chaque mouvement oscillant transforme continuellement de l'énergie cinétique en énergie potentielle et vice versa. C'est le cas pour les marées, le pendule ou pour tout récepteur radiophonique. Cependant de nombreuses oscillations s'atténuent également au cours du temps : elles sont amorties. Des systèmes dotés d'une *grande* capacité d'amortissement, tels que les pare-chocs des voitures, sont utilisés pour étouffer les vibrations. Des systèmes ayant un amortissement *minuscule* sont utiles dans la conception des horloges précises et autonomes sur une longue durée. La quantification la plus simple du taux d'amortissement est le nombre d'oscillations qu'un système utilise pour réduire son amplitude à $1/e \approx 1/2,718$ fois sa valeur initiale. Ce nombre caractéristique est baptisé le *facteur Q*, d'après l'abréviation de « facteur de qualité ». Un facteur Q pauvre est inférieur ou égal à 1, un de qualité excellente est supérieur ou égal à 100 000. (Pouvez-vous écrire un lagrangien simple pour un oscillateur amorti d'un facteur Q donné ?) Dans la nature, les oscillations amorties ne conservent généralement pas une fréquence

Défi 386 pe

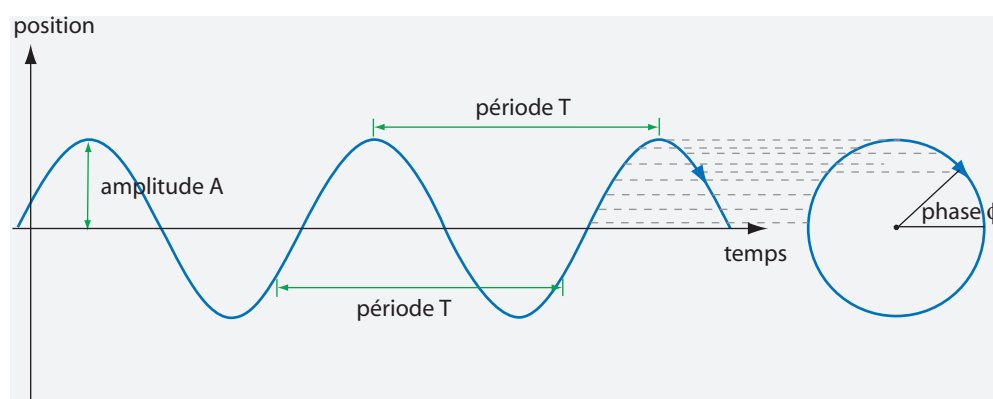


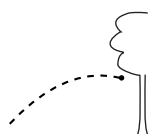
FIGURE 107 L'oscillation la plus simple.

TABLEAU 27 Quelques valeurs de fréquence mécanique relevées dans la nature.

OBSERVATION	FRÉQUENCE
Fréquences sonores dans les gaz émis par les trous noirs	$\approx 1 \text{ fHz}$
Précision dans les fréquences de vibration mesurées du Soleil	jusqu'à 2 nHz
Fréquences de vibration du Soleil	jusqu'à env. 300 nHz
Fréquences des vibrations qui perturbent la détection des ondes gravitationnelles	jusqu'à $3 \mu\text{Hz}$
Fréquence de vibration la plus faible sur la Terre Réf. 159	$309 \mu\text{Hz}$
Fréquence de résonance de l'estomac et des organes internes (donnant l'expérience du « bruit dans le ventre »)	$1 \text{ à } 10 \text{ Hz}$
Battement d'aile d'une mouche minuscule	$\approx 1\,000 \text{ Hz}$
Son audible pour les jeunes êtres humains	$20 \text{ Hz à } 20 \text{ kHz}$
Sonar utilisé par les chauves-souris	jusqu'à plus de 100 kHz
Sonar utilisé par les dauphins	jusqu'à 150 kHz
Fréquence sonore utilisée dans l'imagerie ultrasonore	jusqu'à 15 MHz
Fréquences (sonores) des phonons mesurées dans des cristaux simples	jusqu'à 20 THz et plus

constante, toutefois, pour le pendule simple, cela reste le cas à un haut degré d'exactitude. La raison en est que, pour un pendule, la fréquence d'oscillation ne dépend pas significativement de l'amplitude (tant que l'amplitude de l'oscillation est inférieure à 20° environ). C'est la raison pour laquelle les pendules sont utilisés comme oscillateurs dans les horloges mécaniques.

Bien évidemment, pour une horloge excellente, le comportement des oscillations ne doit pas seulement dénoter un amortissement faible, mais doit également être indépendant de la température et être insensible à toute autre influence extérieure. L'introduction des cristaux de quartz en tant qu'oscillateurs a constitué un progrès notable du vingtième siècle. Techniquement, le quartz est constitué de cristaux de la taille de quelques grains de sable, qui peuvent être mis en oscillation en appliquant un signal électrique. Le quartz possède une faible dépendance à la température et un grand facteur Q ; de plus, comme il consomme peu d'énergie, des horloges précises peuvent désormais fonction-



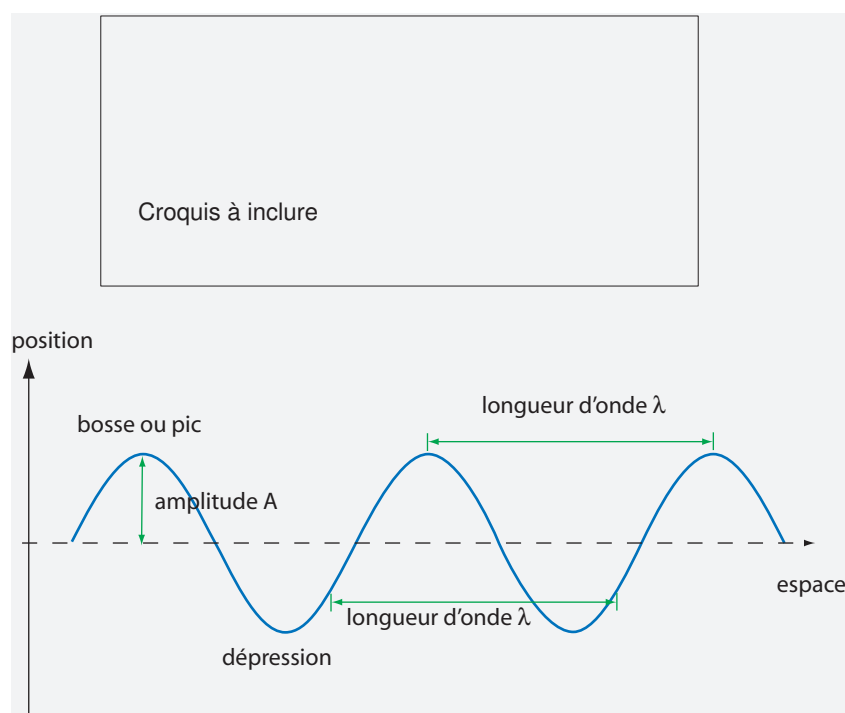


FIGURE 108 Décomposition d'une onde, ou d'un signal en général, en ondes harmoniques

ner à l'aide de petites batteries.

Chaque oscillation harmonique est décrite par trois grandeurs : l'*amplitude*, la *période* (l'inverse de la fréquence) et la *phase*. La phase différencie des oscillations de même amplitude et de même période : elle définit à quel moment l'oscillation commence. La Figure 107 révèle comment une oscillation harmonique est associée à une rotation imaginaire. Par conséquent, la phase est décrite de manière adéquate par un angle compris entre 0 et 2π .

Tous les systèmes qui oscillent émettent également des ondes. En réalité, les vibrations apparaissent uniquement dans les systèmes étendus, et les oscillations sont simplement les mouvements les plus élémentaires des systèmes étendus. Le mouvement général répétitif d'un système étendu est l'onde.

LES ONDES ET LEUR MOUVEMENT

Les ondes sont des inhomogénéités en déplacement ou, de manière équivalente, des vibrations en déplacement. Les ondes se déplacent bien que le milieu environnant soit immobile. Toute onde peut être vue comme étant une superposition d'ondes *harmoniques*. Pouvez-vous décrire la différence dans la forme de l'onde entre un ton pur harmonique, un son musical, un bruit et une explosion ? Chaque effet sonore peut être imaginé comme étant constitué d'ondes harmoniques. Celles-ci, également appelées *ondes sinusoïdales* ou *ondes linéaires*, sont les éléments fondamentaux sur lesquels tous les mouvements internes d'un corps étendu sont bâtis.

Chaque onde harmonique est caractérisée par une *fréquence* d'oscillation, une *vitesse*

Défi 387 e

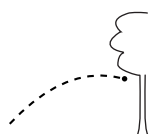


TABLEAU 28 Quelques vitesses d'ondes.

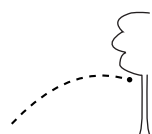
O N D E	V I T E S S E
Tsunami	environ 200 m/s
Son dans la plupart des gaz	0,3 km/s
Son dans l'air à 273 K	331 m/s
Son dans l'air à 293 K	343 m/s
Son dans l'hélium à 293 K	1,1 km/s
Son dans la plupart des liquides	1,1 km/s
Son dans l'eau à 273 K	1,402 km/s
Son dans l'eau à 293 K	1,482 km/s
Son dans l'or	4,5 km/s
Son dans l'acier	5,790 km/s
Son dans le granit	5,8 km/s
Son dans le verre	5,9 km/s
Son dans le béryllium	12,8 km/s
Son dans le bore	jusqu'à 15 km/s
Son dans le diamant	jusqu'à 18 km/s
Son dans un fullerène (C ₆₀)	jusqu'à 26 km/s
Onde plasma dans InGaAs	600 km/s
Lumière dans le vide	$2,998 \cdot 10^8$ m/s

de propagation, une *longueur d'onde* et une *phase*, comme on peut le deviner à partir de la Figure 108. Des ondes de faible amplitude sur l'eau montrent cela plus clairement. Dans une onde harmonique, chaque position réalise une oscillation harmonique. La phase d'une onde précise la position d'un point de l'onde (ou d'une crête) à un instant donné. C'est un angle compris en 0 et 2π . Comment la fréquence et la longueur d'onde sont-elles reliées dans une onde ?

Défi 388 e

Les ondes surviennent à l'intérieur de tous les corps *étendus*, qu'ils soient solides, liquides, gazeux ou sous forme de plasmas. À l'intérieur des corps fluides, les ondes sont *longitudinales*, ce qui signifie que le mouvement de l'onde est dans la même direction que son oscillation. Le son qui se propage dans l'air est un exemple d'onde longitudinale. À l'intérieur des corps solides, les ondes peuvent également être *transverses*, dans ce cas la vibration de l'onde est perpendiculaire à la direction de propagation.

Des ondes apparaissent aussi aux *interfaces* entre des corps : les interfaces eau-air sont des cas bien étudiés. Même une interface eau de mer-eau douce, que l'on appelle *eaux mortes*, révèle des ondes : elles peuvent apparaître même si la surface supérieure de l'eau est immobile. N'importe quel vol dans un avion fournit aussi une opportunité d'étudier les empilements réguliers de nuages à l'interface entre les couches d'air chaud et froid dans l'atmosphère. Les ondes sismiques qui se propagent le long des limites entre le plancher des océans et l'eau de mer sont également bien comprises. Les ondes de surface générales ne sont habituellement ni longitudinales ni transverses, mais un mélange des deux.



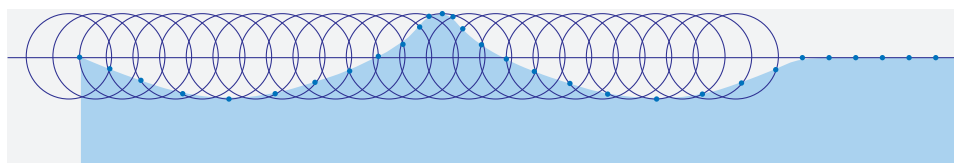


FIGURE 109 La formation d'ondes de gravité sur l'eau.

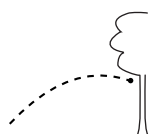
Concernant les surfaces liquides, nous classifions les ondes en fonction de la force nécessaire pour restituer une surface plane. Le premier type, les *ondes de tension superficielle*, joue un rôle à des échelles allant jusqu'à quelques centimètres. À des échelles plus grandes, la gravité prend le dessus et est la principale force de rétablissement, ainsi nous parlons des *ondes de gravité*. C'est sur ce dernier type que nous allons nous concentrer ici. Les ondes de gravité dans l'eau, au contraire des ondes de tension superficielle, ne sont pas sinusoïdales en raison de la manière particulière dont l'eau se déplace dans une telle onde. Comme indiqué sur la Figure 109, la surface de l'eau décrit une courbe engendrée par un point situé sur un cercle qui roule, ce qui provoque la forme caractéristique et asymétrique de l'onde avec une courte crête pointue et de longues dépressions peu profondes. (Tant qu'il n'y a pas de vent et que le sol sous l'eau est horizontal, les ondes sont également symétriques par une réflexion d'avant en arrière.)

Pour des ondes de gravité dans l'eau, comme pour nombre d'autres ondes, la vitesse dépend de la longueur d'onde. En fait, la vitesse c des vagues dépend de la longueur d'onde λ et de la profondeur d de l'eau de la manière suivante :

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{\lambda}}, \quad (79)$$

où g est l'accélération due à la gravité (et en supposant que l'amplitude est beaucoup plus petite que la longueur d'onde). La formule indique deux régimes limites. Premièrement, des vagues courtes et profondes apparaissent quand la profondeur de l'eau est plus grande que la moitié de la longueur d'onde. Pour des *vagues profondes*, la vitesse de phase est $c \approx \sqrt{g\lambda/2\pi}$, donc dépendante de la longueur d'onde, et la vitesse de groupe est environ égale à la moitié de la vitesse de phase. Des vagues moins profondes sont donc plus lentes. Deuxièmement, des *vagues longues* et peu profondes apparaissent lorsque la profondeur est inférieure à 5 % de la longueur d'onde. Dans ce cas, $c \approx \sqrt{gd}$, il n'y a aucune dispersion et la vitesse de groupe est à peu près égale à la vitesse de phase. Les vagues peu profondes les plus impressionnantes sont les tsunamis, ces vagues énormes déclenchées par des tremblements de terre sous-marins. (Ce mot japonais est composé de *tsu*, signifiant port, et *nami*, signifiant onde.) Puisque les tsunamis sont des ondes peu profondes, ils possèdent une faible dispersion et peuvent ainsi voyager sur de longues distances : ils peuvent faire plusieurs fois le tour de la Terre. Les temps d'oscillation caractéristiques sont compris entre 6 et 60 minutes, donnant des longueurs d'ondes comprises entre 70 et 700 km et des vitesses au large de 200 à 250 m/s, identiques à celle d'un avion à réaction. Leur amplitude au large est fréquemment de l'ordre de 10 cm ; toutefois, des échelles d'amplitudes variant avec la profondeur d comme $1/d^4$ et s'élevant jusqu'à 40 m ont été mesurées sur la terre ferme. Ce fut l'ordre de grandeur de l'énorme tsunami désastreux

Défi 389 e



observé dans l'océan Indien le 26 décembre 2004.

Des ondes peuvent également se propager dans l'espace vide. Les ondes lumineuses et gravitationnelles en sont deux exemples. L'exploration de l'électromagnétisme et de la relativité nous en dira plus sur leurs propriétés.

Toute étude du mouvement doit incorporer celle du mouvement ondulatoire. Nous savons par expérience que les ondes peuvent frapper ou même endommager des cibles, donc chaque onde transporte de l'énergie et de la quantité de mouvement, bien que (en moyenne) aucune matière ne se déplace le long de la direction de propagation de l'onde. L'énergie E d'une onde est la somme de ses énergies cinétique et potentielle. La densité d'énergie cinétique dépend de la variation temporelle du déplacement u en un point donné : des ondes qui oscillent rapidement transportent une énergie cinétique plus importante. La densité d'énergie potentielle dépend du gradient du déplacement, c'est-à-dire de sa variation spatiale : des ondes resserrées et étroites emportent une énergie potentielle plus grande que celles qui sont plus allongées. (Pouvez-vous expliquer pourquoi l'énergie potentielle ne dépend pas directement du déplacement lui-même ?) Pour des ondes harmoniques se propageant le long de la direction z , chaque type d'énergie est proportionnel au carré de la variation de son déplacement respectif :

Défi 390 s

Réf. 160

$$E \sim \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)^2 + v^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2. \quad (80)$$

Défi 391 pe

Comment la densité d'énergie est-elle reliée à la fréquence ?

La *quantité de mouvement* d'une onde est dirigée le long de sa direction de propagation. La valeur de la quantité de mouvement dépend à la fois de la variation spatiale et temporelle du déplacement u . Pour des ondes harmoniques, la densité P de la quantité de mouvement est proportionnelle au produit de ces deux quantités :

$$P_z \sim \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (81)$$

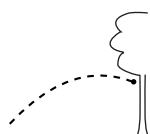
Lorsque deux trains d'ondes linéaires se heurtent ou interfèrent, la quantité de mouvement totale est conservée durant toute la collision. Une conséquence importante de la conservation de la quantité de mouvement est que les ondes qui sont réfléchies par un obstacle le sont avec un angle de réflexion égal à l'opposé de l'angle d'incidence par rapport à la normale à la surface. Que se passe-t-il pour la phase ?

Défi 392 s

Les ondes, comme les corps mobiles, transportent de l'énergie et de la quantité de mouvement. En termes simples, si vous hurlez contre un mur, le mur est frappé. Ces collisions, par exemple, peuvent donner naissance à des avalanches sur les pentes montagneuses enneigées. De la même manière, les ondes, comme les corps, peuvent emporter du moment cinétique. (Quel type d'onde est nécessaire pour que cela soit possible ?) Toutefois, nous pouvons distinguer six propriétés principales qui permettent de distinguer le mouvement des ondes du mouvement des corps.

Défi 393 pe

— Les ondes peuvent se cumuler ou s'annuler l'une et l'autre, elles peuvent donc s'interpénétrer. Ces effets, dénommés *superposition* et *interférence*, sont fortement liés à la linéarité de la plupart des ondes.



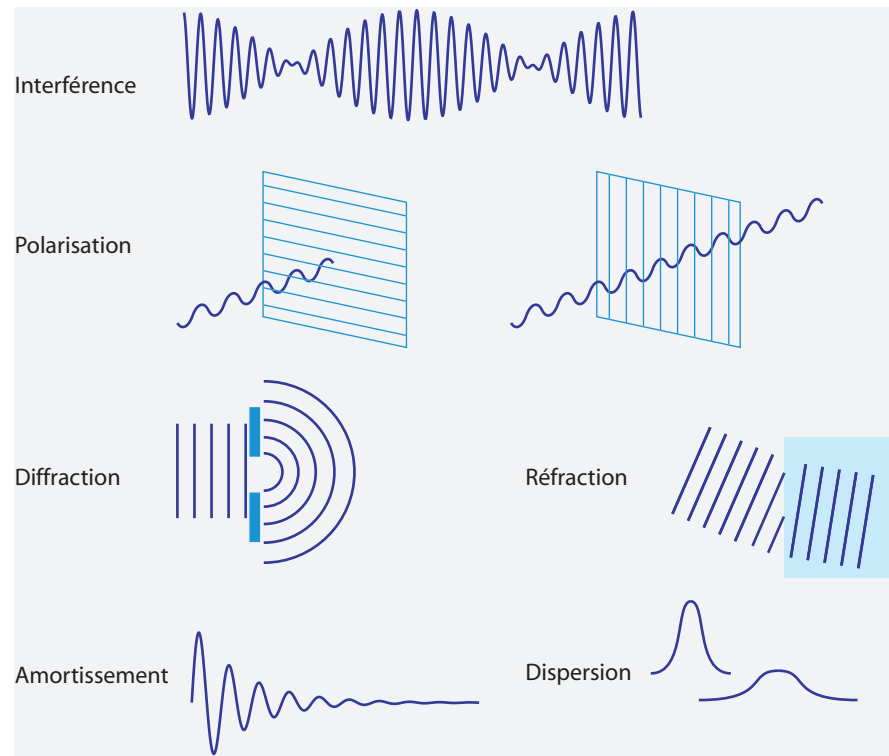


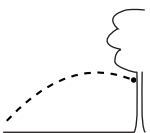
FIGURE 110 Les six principales propriétés du mouvement des ondes.

- Les ondes transverses en trois dimensions peuvent osciller dans des directions différentes : elles présentent une *polarisation*.
- Les ondes, comme le son, peuvent traverser les interfaces et se propager d'un milieu à un autre. C'est la *diffraction*.
- Les ondes changent de direction lorsqu'elles changent de milieu. C'est la *réfraction*.
- Les ondes peuvent avoir une vitesse de propagation dépendante de la fréquence. C'est la *dispersion*.
- Souvent, l'amplitude d'une onde décroît avec le temps : les ondes subissent un *amortissement*.

Dans la vie courante, les corps matériels ne se comportent pas de ces manières-là lorsqu'ils se déplacent. Ces six effets ondulatoires surgissent parce que le mouvement d'une onde est associé au mouvement des entités *étendues*. L'illustre débat qui fit rage pour savoir si les électrons ou la lumière sont des ondes ou des particules nous somme de vérifier si ces effets spécifiques aux ondes peuvent être observés ou non. C'est un sujet de la théorie quantique. Avant que nous l'étudiions, pouvez-vous citer un exemple d'une observation qui implique qu'un certain mouvement ne peut certainement pas être une onde ?

Défi 394 s

Après avoir mis en lumière la fréquence f et la vitesse de propagation v , nous voyons que toutes les ondes sinusoïdales sont caractérisées par la distance λ entre deux crêtes ondulatoires voisines : cette distance est appelée la longueur d'onde. Toutes les ondes



vérifient la relation primaire

$$\lambda f = v . \quad (82)$$

Dans de nombreuses situations, la vitesse v d'une onde dépend de sa longueur d'onde. C'est le cas pour les vagues. Cette variation de vitesse avec la longueur d'onde est appelée *dispersion*. Par opposition, la vitesse du son dans l'air ne dépend pas de la longueur d'onde (à un haut niveau d'exactitude). Le son dans l'air ne montre pratiquement aucune dispersion. En réalité, s'il y avait de la dispersion pour le son, nous ne pourrions pas nous entendre parler les uns les autres à de grandes distances.

Dans la vie quotidienne, nous ne percevons pas la lumière comme une onde, parce que sa longueur d'onde n'est que d'un demi-millième de millimètre environ. Pourtant la lumière affiche les six effets caractéristiques du mouvement d'une onde. Un arc-en-ciel, par exemple, ne peut être compris entièrement que lorsque les cinq derniers effets ondulatoires sont pris en considération. La diffraction et l'interférence peuvent même être observées simplement avec vos doigts. Pouvez-vous dire comment ?

Défi 395 s

Comme chaque oscillation anharmonique, une onde anharmonique peut être décomposée en ondes sinusoïdales. La Figure 108 en fournit quelques exemples. Si les diverses ondes sinusoïdales contenues dans une perturbation se propagent différemment, l'onde originale se déformera durant le trajet. C'est la raison pour laquelle un écho ne résonne pas exactement comme le son original ; pour la même raison, un grondement de tonnerre situé tout près se fait entendre différemment d'un grondement plus lointain.

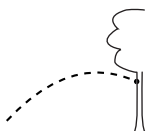
Tous les systèmes qui oscillent émettent également des ondes. Chaque récepteur radio ou TV contient des oscillateurs. Par conséquent, n'importe quel récepteur de ce type est aussi un (faible) émetteur. En réalité, dans certains pays, les autorités poursuivent les individus qui écoutent des émissions radiophoniques et qui enfreignent l'interdiction d'écouter les ondes radio émises par ces appareils. De la même façon, à l'intérieur de l'oreille humaine, une foule de minuscules structures, les cellules ciliées, oscillent. Par conséquent, l'oreille doit également émettre du son. Cette prédiction, faite en 1948 par Tommy Gold, fut confirmée uniquement en 1979 par David Kemp. Ces susnommées *émissions otoacoustiques* peuvent être détectées par le truchement de délicats microphones. Elles sont actuellement en cours d'étude pour élucider le fonctionnement encore incompris de l'oreille et pour diagnostiquer diverses maladies auditives sans nécessairement recourir à la chirurgie.

Réf. 161

Puisque toute perturbation mobile peut être décomposée en ondes sinusoïdales, le mot « onde » est utilisé par les physiciens pour désigner toutes ces fluctuations ambulantes, qu'elles ressemblent ou non à des ondes sinusoïdales. En fait, ces perturbations n'ont même pas forcément besoin de voyager. Prenez une onde statique : est-elle une onde ou une oscillation ? Les ondes statiques ne voyagent pas, elles sont des oscillations. Mais une onde statique peut être vue comme la superposition de deux ondes voyageant dans des directions opposées. Puisque toutes les oscillations sont des ondes statiques (pouvez-vous le confirmer ?), nous pouvons dire que toutes les oscillations sont des formes particulières d'ondes.

Défi 396 pe

Les perturbations mobiles les plus importantes sont celles qui sont localisées. La Figure 108 montre un exemple d'une pulsation ou groupe d'ondes localisées, ainsi que sa décomposition en ondes harmoniques. Les groupes d'ondes sont très utilisés dans la communication orale et dans les signaux de communication.



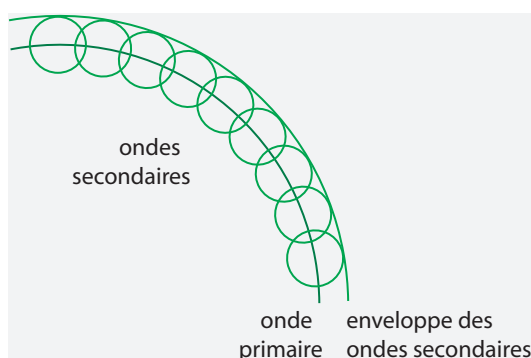


FIGURE 111 Propagation d'onde comme une conséquence du principe de Huygens.

POURQUOI POUVONS-NOUS NOUS PARLER? – LE PRINCIPE DE HUYGENS

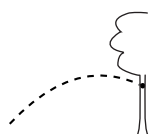
Les propriétés de notre environnement ne révèlent souvent toute leur importance que lorsque nous posons des questions simples. Pourquoi pouvons-nous utiliser la radio ? Pourquoi pouvons-nous parler dans des téléphones portables ? Pourquoi pouvons-nous nous écouter les uns les autres ? Il apparaît qu'une partie cruciale de la réponse à ces questions est que l'espace dans lequel nous vivons possède un nombre *impair* de dimensions.

Dans les espaces de dimension *paire*, il est impossible de parler, parce que les paroles ne s'arrêtent jamais. C'est un résultat primordial qui est facilement vérifié en lançant une pierre dans un lac : même après que la pierre a disparu, des vagues sont toujours émises depuis l'emplacement où elle a coulé, alors que lorsque nous nous arrêtons de parler, plus aucune onde n'est émise. Les ondes se comportent ainsi différemment en deux et trois dimensions.

En trois dimensions, il est possible de dire que la propagation d'une onde se produit de la manière suivante : chaque point sur un front d'onde (lumineux ou sonore) peut être considéré comme étant la source d'ondes secondaires, la surface qui est formée par l'enveloppe de toutes les ondes secondaires détermine la position future du front d'onde. L'idée est illustrée sur la Figure 111. Elle peut être utilisée pour décrire, sans l'aide des mathématiques, la propagation des ondes, leur réflexion, leur réfraction, et, par une généralisation due à Augustin Fresnel, leur diffraction. (Essayez !)

Cette idée fut d'abord proposée par Christiaan Huygens en 1678, d'où son appellation de *principe de Huygens*. Presque deux cents ans plus tard, Gustav Kirchoff montra que ce principe est une conséquence de l'équation d'onde en trois dimensions, et donc, dans le cas de la lumière, une conséquence des équations du champ de Maxwell.

Mais la description des fronts d'onde comme enveloppes d'ondes secondaires possède une restriction essentielle. Elle n'est pas correcte en deux dimensions (bien que la Figure 111 soit bidimensionnelle !). En particulier, elle ne s'applique pas aux vagues sur l'eau. La propagation des vagues *ne peut pas* être calculée de cette façon avec exactitude. (C'est possible uniquement si la situation est limitée à une onde d'une seule fréquence.) Il apparaît que, pour des vagues sur l'eau, les ondes secondaires ne dépendent pas seulement du front d'onde des ondes primaires, mais également de leur partie intérieure. La raison est qu'en deux dimensions (et tout autre nombre pair) des ondes de fréquences



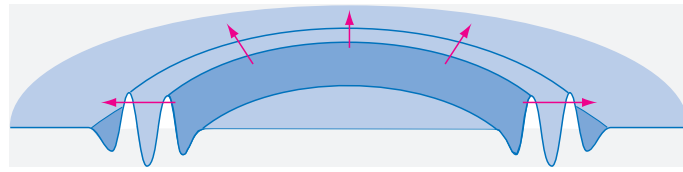


FIGURE 112 Une vague invraisemblable sur l'eau : le centre n'est jamais plat.

différentes possèdent nécessairement des vitesses différentes. Et une pierre chutant dans l'eau engendre des ondes ayant plusieurs fréquences. Au contraire, en trois dimensions (et tout autre nombre impair plus grand), des ondes de fréquences quelconques possèdent la même vitesse.

Nous pouvons également formuler que le principe de Huygens est cohérent si l'équation d'onde est résolue par une onde circulaire qui ne laisse aucune amplitude derrière elle. Les mathématiciens traduisent cela en exigeant que la fonction delta développée $\delta(c^2t^2 - r^2)$ vérifie l'équation d'onde, c'est-à-dire que $\partial_t^2 \delta = c^2 \Delta \delta$. La fonction delta est cette « fonction » étrange qui est nulle partout sauf à l'origine, où elle prend une valeur infinie. Quelques propriétés supplémentaires décrivent de manière précise comment tout cela se produit*. On montre que la fonction delta est une solution de l'équation d'onde seulement si l'espace est de dimension impaire et supérieure à trois. En d'autres termes, bien qu'une pulsation ondulatoire sphérique soit possible, une pulsation circulaire ne l'est pas : dans une onde en expansion, il n'existe aucune façon de maintenir le centre immobile (voir la Figure 112). C'est précisément ce que montre l'expérience de la pierre. Vous pouvez tenter de produire une pulsation circulaire (une onde qui ne possède que quelques crêtes) la prochaine fois que vous serez dans votre bain ou près d'un lac : vous n'y parviendrez pas.

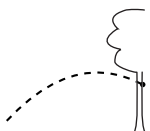
En résumé, la raison pour laquelle une pièce devient sombre dès que nous éteignons la lumière, est que nous vivons dans un espace doté d'un nombre de dimensions qui est impair et plus grand que un.

SIGNAUX

Un signal représente le moyen de transport de l'information. Chaque signal est un mouvement d'énergie. Les signaux peuvent être soit des objets soit des ondes. Une pierre projetée peut être un signal, comme peut l'être un sifflement. Les ondes sont une forme plus commode de communication parce qu'elles n'exigent pas de transport de matière : il est plus aisé d'utiliser l'électricité dans un fil téléphonique pour transporter une parole que de commander un coursier. En réalité, la plupart des avancées technologiques modernes peuvent être retracées à partir du moment où il y a eu séparation entre le transport de matière et celui du signal. Au lieu d'acheminer un orchestre complet pour transmettre de la musique, nous pouvons envoyer des signaux radiophoniques. Au lieu d'expédier des lettres manuscrites, nous rédigeons des courriels. Au lieu de nous déplacer à la bibliothèque nous surfons sur Internet.

Les plus grands progrès dans la communication sont issus de l'utilisation des signaux

* La principale propriété est $\int \delta(x) dx = 1$. En termes mathématiques concis, la « fonction » delta est une distribution.



pour transporter de grandes quantités d'énergie. C'est ce que font les câbles électriques : ils acheminent de l'énergie sans transporter de quantité (perceptible) de matière. Nous n'avons pas nécessairement besoin de connecter nos appareils de cuisine directement à une centrale électrique : nous pouvons obtenir l'énergie par le biais de fils de cuivre.

Pour toutes ces raisons, le mot « signal » est fréquemment compris comme ayant uniquement rapport aux ondes. La voix, le son, les signaux électriques, les signaux radio et lumineux sont les exemples les plus courants de signaux ondulatoires.

Page 15

Les signaux sont caractérisés par leur vitesse et leur contenu en information. Il apparaît que ces deux grandeurs sont limitées. La limitation de la vitesse est le point d'orgue de la théorie de la relativité restreinte.

Une limite élémentaire sur le contenu en information peut être formulée lorsque nous remarquons que le flux d'information est donné par la forme précise du signal. La forme est caractérisée par une fréquence (ou longueur d'onde) et une position en fonction du temps (ou espace). Pour chaque signal – et pour chaque onde – il existe une relation entre l'incertitude sur le temps d'arrivée Δt et l'incertitude sur la fréquence angulaire $\Delta \omega$:

$$\Delta t \Delta \omega \geq \frac{1}{2} . \quad (83)$$

Cette relation d'indétermination temps–fréquence exprime le fait que, dans un signal, il est impossible de spécifier à la fois l'instant d'arrivée et la fréquence avec une précision exacte. Les deux incertitudes sont (à un facteur numérique près) l'inverse l'une de l'autre. (Nous disons également que le produit du temps par la bande passante est toujours supérieur à $1/4\pi$.) Nous sommes confrontés à cette restriction parce que, d'une part, nous avons besoin d'une onde la plus proche possible d'une onde sinusoïdale pour déterminer précisément sa fréquence, mais que, d'autre part, nous avons besoin d'un signal le plus étroit possible pour déterminer avec exactitude son temps d'arrivée. La contradiction entre ces deux exigences conduit à cette limitation. La relation d'indétermination est donc une caractéristique intrinsèque de chaque phénomène ondulatoire. Vous pourriez vouloir examiner cette relation avec n'importe quelle onde dans votre environnement.

Défi 398 e

De manière équivalente, il existe une relation entre l'incertitude sur la position Δx et l'incertitude sur le vecteur d'onde $\Delta k = 2\pi/\Delta \lambda$ d'un signal :

$$\Delta x \Delta k \geq \frac{1}{2} . \quad (84)$$

Comme dans la situation précédente, cette relation d'indétermination exprime aussi qu'il est impossible de déterminer à la fois la position d'un signal et sa longueur d'onde avec une précision parfaite. Cette relation d'indétermination position–vecteur d'onde est également une particularité de n'importe quel phénomène ondulatoire.

Chaque relation d'incertitude est le corollaire de l'existence d'une minuscule entité. Dans le cas des ondes, cette entité la plus petite du phénomène est la période (ou le cycle, comme il est d'usage de l'appeler). À chaque fois qu'il y a une plus petite unité dans un phénomène naturel, une relation d'incertitude en découle. Nous rencontrerons d'autres relations d'indétermination à la fois en relativité et dans la théorie quantique. Comme

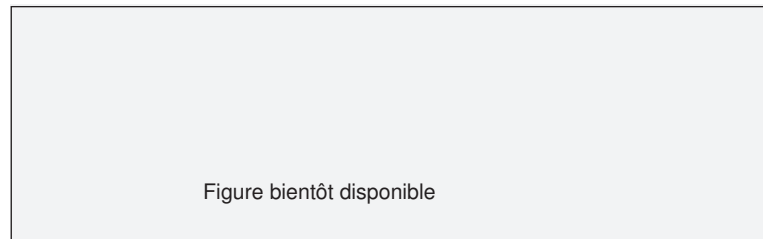


FIGURE 113 Signaux électriques mesurés dans un nerf.

nous le découvrirons, elles sont toujours dues à l'existence d'entités infimes.

Toutes les fois que des signaux sont émis, leur contenu peut être perdu. Chacune des six caractéristiques des ondes listées à la [page 211](#) peut conduire à une dégradation de l'information contenue. Pouvez-vous en fournir un exemple pour chaque cas ? L'énergie, la quantité de mouvement et toutes les autres propriétés conservées des signaux ne sont jamais perdues, bien entendu. L'atténuation des signaux est apparentée à la disparition du mouvement. Lorsque du mouvement disparaît par le frottement, il nous semble disparaître, alors qu'en réalité il est transformé en chaleur. Pareillement, quand un signal semble disparaître, il est en fait transformé en bruit. Le *bruit (physique)* est un rassemblement de nombreux signaux désordonnés, de la même manière que la chaleur est une collection de nombreux mouvements désordonnés.

Toute propagation du signal est décrite par une équation d'onde. Un exemple célèbre est l'équation découverte par Hodgkin et Huxley. C'est une approximation réaliste du comportement du potentiel électrique dans les nerfs. En utilisant les connaissances sur le comportement des ions potassium et sodium, ils élaborèrent une équation compliquée qui décrit l'évolution de la tension V dans les nerfs, et ainsi la façon dont les signaux sont propagés. Cette équation décrit de manière fiable les tensions de pointe caractéristiques mesurées dans les nerfs, et indiquées sur la [Figure 113](#). Cette figure indique clairement que ces ondes diffèrent des ondes sinusoïdales : elles ne sont pas harmoniques. L'anharmonicité est une conséquence de la non-linéarité. Mais la non-linéarité peut provoquer des effets encore plus profonds.

ONDES SOLITAIRES ET SOLITONS

En août 1834, l'ingénieur écossais John Scott Russell (1808–1882) consigna une observation étrange relevée dans un canal fluvial, dans la campagne située aux alentours d'Édimbourg. Lorsqu'un bateau tiré à travers le canal était subitement arrêté, une onde bizarre sur l'eau s'éloignait de celui-ci. Elle était constituée d'une seule crête, longue d'environ 10 m et haute de 0,5 m, se déplaçant à 4 m/s environ. Il poursuivit cette crête, montrée dans la reconstitution de la [Figure 114](#), sur plusieurs kilomètres avec son cheval : la vague disparut seulement très lentement. Russel n'avait pas observé de dispersion, comme pour les vagues classiques sur l'eau : la largeur de la crête demeurait constante. Russel commença alors à produire de telles ondes dans son laboratoire et étudia intensivement leurs propriétés. Il montra que la vitesse dépendait de l'amplitude, contrairement aux ondes harmoniques, linéaires. Il releva également que la profondeur d du canal était un paramètre déterminant. En fait, la vitesse v , l'amplitude A et la largeur L de ces ondes



FIGURE 114 Une onde solitaire sur l'eau suivie par un canot à moteur, reconstituant la découverte de Scott Russel. (© Dugald Duncan)

à crête unique sont reliées par

$$v = \sqrt{gd} \left(1 + \frac{A}{2d} \right) \quad \text{et} \quad L = \sqrt{\frac{4d^3}{3A}}. \quad (85)$$

Comme ces expressions l'indiquent, et comme Russel le notifia, les vagues hautes sont étroites et rapides, alors que les vagues superficielles sont lentes et larges. La forme des vagues est fixe durant leur déplacement. Aujourd'hui, celles-ci et toutes les autres vagues stationnaires dotées d'une seule crête sont appelées des *ondes solitaires*. Elles surgissent uniquement lorsque la dispersion et la non-linéarité du système se compensent exactement l'une l'autre. Russel remarqua aussi que les ondes solitaires produites dans des canaux fluviaux peuvent se traverser sans s'altérer, même quand elles voyagent dans des directions opposées; les ondes solitaires qui possèdent cette propriété sont baptisées des *solitons*. Les solitons restent stables lorsqu'ils se rencontrent, comme indiqué sur la [Figure 115](#), bien qu'en général les ondes solitaires ne le soient pas.

Ce n'est que soixante ans plus tard, en 1895, que Korteweg et de Vries s'aperçurent que des ondes solitaires produites dans des canaux possèdent une forme décrite par

$$u(x, t) = A \operatorname{sech}^2 \frac{x - vt}{L} \quad \text{où} \quad \operatorname{sech} x = \frac{2}{e^x + e^{-x}}, \quad (86)$$

($\operatorname{sech}(x)$ représente la fonction *sécante hyperbolique* [N.D.T.]) et que la relation trouvée par Russel était due à l'équation d'onde

$$\frac{1}{\sqrt{gd}} \frac{\partial u}{\partial t} + \left(1 + \frac{3}{2d} u \right) \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{d^2}{6} \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} = 0. \quad (87)$$

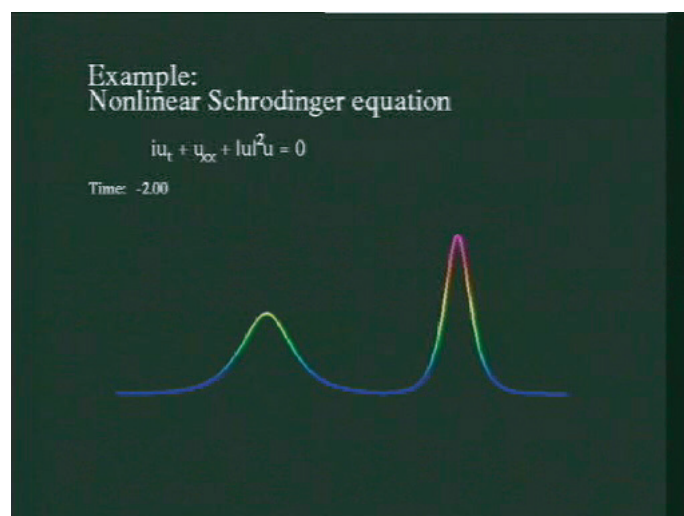


FIGURE 115 Les solitons restent stables lorsqu'ils se rencontrent. (© Jarmo Hietarinta)

Cette équation pour le développement de u est appelée *équation de Korteweg–de Vries* en leur honneur*. L'étonnante stabilité des solutions solitaires est due à l'effet antagoniste des deux termes qui distinguent cette équation des équations d'onde linéaires : pour les solutions solitaires, le terme non linéaire compense exactement la dispersion induite par le terme contenant la dérivée troisième.

Réf. 164 Durant plusieurs décennies, de telles ondes solitaires ont été vues comme des curiosités mathématiques et physiques. Mais près d'une centaine d'années plus tard il devint clair que l'équation de Korteweg–de Vries est un modèle universel pour les ondes faiblement non linéaires dans le régime de faible dispersion, et ainsi d'importance primordiale. Cette conclusion fut révélée par Kruskal et Zabusky, qui démontrèrent mathématiquement en 1965 que les solutions (86) demeurent inchangées lors de collisions. Cette découverte les poussa à introduire le terme *soliton*. Ces solutions peuvent en réalité s'interpénétrer sans changement de vitesse ou de forme : une collision n'occasionne qu'un minuscule décalage de position pour chaque pulsation.

Les ondes solitaires jouent un rôle dans de nombreux exemples d'écoulements fluides. On les rencontre dans les courants océaniques, et même la grande tache rouge de Jupiter, qui constitua une structure stable de son observation durant plusieurs siècles, en est un exemple.

Réf. 165 Les ondes solitaires apparaissent également lorsqu'un son d'intensité extrêmement forte est produit dans des solides. Dans ces situations, elles peuvent conduire à la création de pulsations sonores de quelques nanomètres seulement de longueur. Les pulsations lumineuses solitaires sont aussi utilisées à l'intérieur de certaines fibres optiques de communication, où elles fournissent une transmission (presque) sans atténuation de signal.

Réf. 163

* Cette équation peut être simplifiée en faisant un changement de variable pour u : plus précisément, elle peut être réécrite comme $u_t + u_{xxx} = 6uu_x$. Tant que les solutions sont des fonctions sech, celle-ci et d'autres versions remaniées de l'équation sont connues sous le même nom.

Vers la fin du vingtième siècle, une deuxième vague d'intérêt pour les mathématiques des solitons a ressurgi, lorsque les théoriciens quantiques s'intéressèrent à eux. La raison est simple mais profonde : un soliton est une « chose intermédiaire » située entre une particule et une onde, il possède à la fois les particularités de ces deux entités. Pour cette raison, les solitons constituent dorénavant une partie essentielle de toute description des particules élémentaires, comme nous le découvrirons un peu plus loin.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LES ONDES ET LES CORPS ÉTENDUS

« La société est une vague. La vague se déplace vers l'avant, mais pas l'eau dont elle est constituée. »
Ralph Waldo Emerson, *Self-Reliance*.

Défi 400 e Quand la fréquence d'un son est doublée, nous disons que le son est plus haut d'une octave. Deux sons qui diffèrent d'une octave sont agréables à entendre, lorsqu'ils sont joués ensemble. Deux autres rapports harmonieux de fréquences – ou d'« intervalles », comme disent les musiciens – sont les quarts et les quintes. Quels sont les rapports correspondants des fréquences ? (Remarque : la réponse fut l'une des plus anciennes découvertes en physique, elle est attribuée à Pythagore, autour de 500 av. J.-C.)

* *

Défi 401 s Un orchestre est en train de jouer de la musique dans une vaste salle. Quelqu'un écoute cette musique, à une distance de 30 m. Une autre personne écoute cette même musique avec un poste de radio, à une distance de 3 000 km. Qui entend la musique le premier ?

* *

Défi 402 pe Quelle est la période d'un pendule simple, c'est-à-dire d'une masse m attachée à une ficelle sans masse de longueur l ? Quelle est cette période si la ficelle est beaucoup plus longue que le rayon de la Terre ?

* *

Défi 403 s Quelle trajectoire est parcourue par un corps se déplaçant sur un plan, mais attaché par une ficelle à un point fixe de ce plan ?

* *

Défi 404 e La *sirène* d'alarme est un appareil qui indique comment la rotation et l'oscillation sont reliées entre elles. Découvrez comment elle fonctionne, et construisez-en une vous-même.

* *

Défi 405 e La lumière est une onde, comme nous le découvrirons plus tard. Par conséquent, la lumière atteignant la Terre depuis l'espace est réfractée lorsqu'elle pénètre dans l'atmosphère. Pouvez-vous confirmer que, par conséquent, les étoiles apparaissent, dans une certaine mesure, plus hautes dans le ciel nocturne qu'elles ne le sont en réalité ?

* *

Quelles sont les plus hautes vagues océaniques ? Cette question n'a été systématiquement

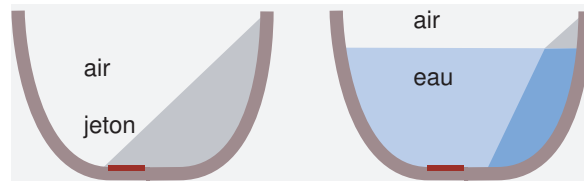


FIGURE 116 Ombres et réfraction.

Réf. 166 étudiée que très récemment, en utilisant des satellites. Le résultat époustouflant montre que des vagues en mer d'une hauteur de 25 m et plus sont *courantes* : il y a quelques vagues de cette sorte sur les océans à chaque instant donné. Ce résultat confirme les rares récits des capitaines de navire au long cours et explique de nombreux naufrages maritimes.

Les surfeurs doivent donc avoir beaucoup de chance pour surfer sur une vague de 30 m. (Le record est situé juste en dessous de cette hauteur.) Mais, probablement, les vagues les plus impressionnantes sur lesquels surfer sont celles de Pororoca, une série d'ondes de 4 m qui se déplacent de l'océan vers le fleuve Amazone chaque printemps, à contre-courant de l'écoulement du fleuve. Ces vagues peuvent être chevauchées sur une dizaine de kilomètres.

* *

Toutes les ondes sont, éventuellement, amorties. Cet effet est souvent dépendant de la fréquence. Pouvez-vous fournir une confirmation de cette dépendance dans le cas du son dans l'air ?

Défi 406 s

* *

Défi 407 e Lorsque vous faites un trou avec une aiguille dans une feuille de papier noire, le trou peut être utilisé comme une lentille grossissante. (Essayez-le.) La diffraction est responsable de l'effet de lentille. D'ailleurs la diffraction de la lumière par des trous fut remarquée au dix-septième siècle par Francesco Grimaldi, qui en déduisit que la lumière est une onde. Ses observations furent discutées plus tard par Newton, qui les écarta ensuite à tort.

* *

Posez une tasse vide près d'une lampe, de telle façon que le fond de la tasse reste à l'ombre. Lorsque vous remplissez la tasse avec de l'eau, une partie du fond s'éclairera, à cause de la réfraction de la lumière provenant de la lampe. Le même effet nous permet de concevoir des lentilles. Cet effet est aussi à la base des instruments tels que les télescopes.

Page ??

* *

Défi 408 s Les vagues sur l'eau sont-elles transverses ou longitudinales ?

* *

La vitesse des vagues sur l'eau restreint la vitesse des navires. Un bateau à la surface ne peut pas se déplacer (beaucoup) plus rapidement qu'environ $v_{\text{crit}} = \sqrt{0,16gl}$, où

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$, l étant sa longueur, et 0,16 un nombre déterminé expérimentalement, appelé le nombre de Froude critique. Cette relation reste valide pour tous les navires et animaux, des énormes pétroliers ($l = 100 \text{ m}$ qui donne $v_{\text{crit}} = 13 \text{ m/s}$) jusqu'aux canards ($l = 0,3 \text{ m}$ qui donne $v_{\text{crit}} = 0,7 \text{ m/s}$). La vitesse critique est celle d'une vague de même longueur d'onde que celle du navire. En fait, se déplacer à des vitesses supérieures à la valeur critique est possible, mais nécessite nettement plus d'énergie. (Une vitesse supérieure est aussi possible si le navire surfe sur une vague.) Ainsi tous les animaux marins et les navires sont plus rapides lorsqu'ils se déplacent sous la surface – où la limite due aux ondes de surface n'existe pas – que lorsqu'ils nagent à la surface. Par exemple, les canards peuvent nager trois fois plus vite sous l'eau qu'à la surface.

Défi 409 s

Le record de *natation olympique* est-il très éloigné de la valeur critique ?

* *

La vitesse de groupe des vagues (dans les eaux profondes) est inférieure à la vitesse des vagues prises individuellement. Par conséquent, lorsqu'un groupe de crêtes ondulatoires voyage, à l'intérieur du groupe les crêtes se déplacent de l'arrière vers l'avant, apparaissant à l'arrière, voyageant vers l'avant et s'éteignant au niveau du front avant.

* *

Nous pouvons entendre la mer au loin ou une autoroute lointaine beaucoup plus distinctement à la tombée de la nuit qu'au lever du jour. C'est un effet de la réfraction. La vitesse du son décroît avec la température. Le soir, le sol se rafraîchit plus rapidement que l'air situé au-dessus. Par conséquent, le son qui quitte le sol et qui voyage vers le haut est réfracté vers le bas, autorisant des distances d'écoute plus longues. Dans la matinée, l'air est généralement froid au-dessus et chaud en dessous. Le son est réfracté vers le haut, et les sons éloignés ne peuvent atteindre un auditeur situé au sol. La réfraction implique donc que les matinées sont silencieuses, et que nous pouvons entendre des sons plus éloignés au cours des soirées. Les éléphants tirent profit de ce phénomène sonore durant les soirées pour communiquer sur des distances de plus de 10 km. (Ils utilisent également les ondes sonores du sol pour communiquer, mais c'est une autre histoire.)

* *

La réfraction implique également qu'il existe un canal sonore dans l'océan, et dans l'atmosphère. La vitesse du son décroît avec la température, et augmente avec la pression. À une profondeur océanique de 1 km, ou à une hauteur atmosphérique de 13 à 17 km (c'est le point culminant atteint par les cumulonimbus, les nuages les plus élevés ou, de manière équivalente, c'est le milieu de la couche d'ozone), le son atteint sa vitesse minimale. En conséquence, le son qui est émis à cette distance et qui essaie de s'en écarter est canalisé vers celle-ci. Les baleines utilisent cette canalisation sonore pour communiquer avec leurs congénères grâce à des sons musicaux magnifiques ; nous pouvons trouver des enregistrements de ces chants sur Internet. L'armée utilise avec succès des microphones placés au niveau du canal sonore de l'océan pour localiser les sous-marins, et des microphones sur des aérostats situés dans le canal atmosphérique pour épier les explosions nucléaires. (En réalité, les expériences sonores dirigées par l'armée restent la cause principale d'échouage des baleines, qui sont assourdies et perdent leur orientation. Des expériences similaires dans l'air avec des ballons de haute altitude sont fréquemment

Défi 410 e

Réf. 167

confondues avec des soucoupes volantes, comme lors de la célèbre affaire Roswell.)

* *

Réf. 168 Des animaux beaucoup plus petits communiquent également par les ondes sonores. En 2003, il fut découvert que les harengs communiquent en utilisant des bruits qu'ils produisent lorsqu'ils pètent. Lorsque le gaz s'échappe, il produit un tic-tac dont le spectre de fréquence atteint jusqu'à 20 kHz. Nous pouvons même entendre des enregistrements de ce son sur Internet. Les détails de cette communication, comme les différences entre les mâles et les femelles, sont toujours en cours d'étude. Il est possible que ces sons doivent également être utilisés par des prédateurs pour détecter les harengs saurs, et ils pourraient même être utilisés par de futurs bateaux de pêche.

* *

Sur les mers balayées par les vents, les crêtes blanches des vagues induisent plusieurs effets importants. Le bruit provient de minuscules bulles d'eau explosant et implosant. Le bruit des vagues au large est donc la superposition de nombreuses petites explosions. En même temps, les crêtes blanches représentent les lieux où les mers absorbent le gaz carbonique de l'atmosphère, et ainsi elles réduisent le réchauffement global de la planète.

* *

Défi 411 s Pourquoi y a-t-il de nombreux petits trous dans les plafonds des bureaux d'un grand nombre d'entreprises ?

* *

Défi 412 pe Quelle quantité détermine la longueur d'onde des vagues émises lorsqu'une pierre est jetée dans un étang ?

* *

Réf. 3 Yakov Perelman cite les quatre problèmes suivants dans son ravissant recueil de problèmes physiques.

Défi 413 s (1) Une pierre tombant dans un lac produit des vagues circulaires. Quelle est la forme des vagues produites par une pierre chutant dans une rivière, où l'eau s'écoule dans une certaine direction ?

Défi 414 s (2) Il est possible de construire une lentille pour le son, de la même manière qu'il est possible d'en construire une pour la lumière. À quoi une telle lentille ressemblerait-elle ?

Défi 415 pe (3) Quel est le son que l'on entend à l'intérieur des coquillages ?

Défi 416 s (4) La lumière prend environ huit minutes pour voyager du Soleil à la Terre. Quelle conséquence cela a-t-il pour un lever du soleil ?

* *

Défi 417 s Pouvez-vous décrire comment un Rubik's Cube est conçu ? Et ses généralisations à des nombres plus élevés de segments ? Y a-t-il une limite au nombre de segments possibles ? Ces énigmes sont encore plus tenaces que la quête du réarrangement du cube. Des casse-tête identiques peuvent être relevés dans l'étude de nombreux mécanismes, depuis les robots jusqu'aux machines textiles.

* *

Défi 418 pe Le son produit typiquement une variation de pression de 10^{-8} bar dans l'oreille. Comment est-elle déterminée ?

L'oreille est en fait un dispositif sensible. Il est maintenant établi que la plupart des cas de mammifères marins, comme les baleines, dérivant vers le rivage sont dus à des problèmes auditifs : certains dispositifs militaires (soit des signaux sonar soit des explosions) ont généralement détruit leur oreille de telle façon qu'ils deviennent sourds et perdent l'orientation.

* *

Réf. 169 Les *infrasons*, sons inaudibles situés en dessous de 20 Hz, constituent un récent domaine de recherche. Dans la nature, les infrasons sont émis par les séismes, les éruptions volcaniques, le vent, le tonnerre, les chutes d'eau, les météorites en chute et les vagues déferlantes. Le mouvement des glaciers, les tremblements de terre sous-marins, les avalanches et les orages géomagnétiques émettent également des infrasons. Les sources anthropiques sont représentées par les lancements de missiles, le trafic automobile, les moteurs à essence et les compresseurs d'air.

Il est avéré que des infrasons de haute intensité peuvent provoquer des vomissements ou des perturbations du sens de l'équilibre (140 dB ou plus pendant 2 minutes), et même la mort (170 dB pendant 10 minutes). Les effets d'intensités plus basses sur la santé humaine ne sont pas encore connus.

L'infrason peut effectuer plusieurs fois le tour du monde avant de s'éteindre, comme l'explosion volcanique du Krakatoa le montra en 1883. Grâce aux détecteurs infrasonores modernes, les vagues déferlantes marines peuvent être détectées à des centaines de kilomètres de distance. Les vagues déferlantes engendrent un « fredonnement » permanent de la croûte terrestre à des fréquences comprises entre 3 et 7 mHz. Le *réseau global d'infrason* du SSI utilise les infrasons pour détecter les tests d'armes nucléaires, les séismes et les éruptions volcaniques, et peut comptabiliser les météorites. Les météorites ne sont que très rarement audibles à l'oreille humaine.

* *

Réf. 170 La méthode utilisée pour mettre en évidence les ondes sinusoïdales contenues dans un signal, comme indiqué sur la [Figure 108](#), est appelée transformée de Fourier. Elle est prépondérante dans toutes les sciences et dans la technologie. Dans les années 1980, une généralisation intéressante se popularisa, dénommée la *transformée en ondelettes*. Au contraire de la transformée de Fourier, la transformée en ondelettes nous permet de localiser des signaux en fonction du temps. Des transformées en ondelettes sont utilisées pour comprimer efficacement des images numériques, pour diagnostiquer des problèmes de turbine d'avion, et dans de nombreuses autres applications.

* *

Défi 419 r Si vous aimez les challenges d'ingénieurs, en voici un qui est toujours ouvert. Comment pouvons-nous concevoir un système robuste et efficace qui puisse transformer l'énergie des vagues en électricité ?

* *

Si vous êtes intéressé par les vagues océaniques, vous devriez également être fasciné par la science de l'*océanographie*. Pour une introduction, consultez les manuels en libre accès sur <http://oceanworld.tamu.edu/>.

* *

Défi 420 r

Dans notre description des corps étendus, nous avons supposé que chaque point d'un corps peut être analysé séparément tout au long de son mouvement. Cette hypothèse est-elle justifiée ? Que se passerait-il si ce n'était pas le cas ?

* *

Une espèce particulière d'ondes apparaît dans les explosions et les vols supersoniques : les *ondes de choc*. Dans une onde de choc, la densité de la pression d'un gaz varie brutalement, sur des distances de l'ordre de quelques micromètres. L'étude des ondes de choc est un domaine de recherches à part entière, les ondes de choc déterminent le trajet aérien des projectiles, le claquement des fouets et les effets des détonations.

* *

Réf. 171

Défi 421 e

Les chauves-souris volent la nuit en utilisant l'*écholocation**. Les dauphins l'utilisent également. Le sonar, utilisé par les navires de pêche pour détecter les bancs de poissons, reproduit le système des dauphins. Il est beaucoup moins connu que les humains possèdent la même aptitude. Avez-vous déjà essayé d'écholocaliser un mur dans une pièce complètement sombre ? Vous serez surpris de constater comment cela est facilement réalisable. Produisez simplement un sifflement criard ou un bruit sifflotant qui s'arrête brutalement, puis écoutez l'écho. Vous serez alors capable de localiser les murs de manière fiable.

* *

Les oiseaux chantent. Si vous désirez explorer comment ce phénomène se réalise, regardez le film en rayons X trouvé sur le site Web http://www.indiana.edu/~songbird/multi/cineradiography_index.html.

* *

Réf. 172

Chaque soliton est une structure unidimensionnelle. Les analogues bidimensionnels existent-ils ? Ce problème demeura ouvert durant de nombreuses années. Finalement, en 1988, Boiti, Leon, Martina et Fumagalli remarquèrent qu'une certaine équation d'évolution, l'équation de Davey-Stewartson, pouvait avoir des solutions qui sont localisées en deux dimensions. Ces résultats furent généralisés par Fokas et Santini et plus encore par Hietarinta et Hirota. Une telle solution est appelée aujourd'hui un *dromion*. Les dromions sont des protubérances qui sont localisées en deux dimensions et qui peuvent se déplacer sans disparaître tout au long de la diffusion, dans des systèmes non linéaires. Un exemple est indiqué sur la [Figure 117](#). Toutefois, jusqu'à présent, aucune solution de ce genre n'a été observée dans les expériences, ce qui constitue l'un des plus importants défis expérimentaux toujours ouverts en science non linéaire.

* Elles utilisent l'écho renvoyé par des cris (des salves d'ultrasons de fréquence $f = 60$ kHz) qu'elles émettent pour se repérer [N.D.T.].

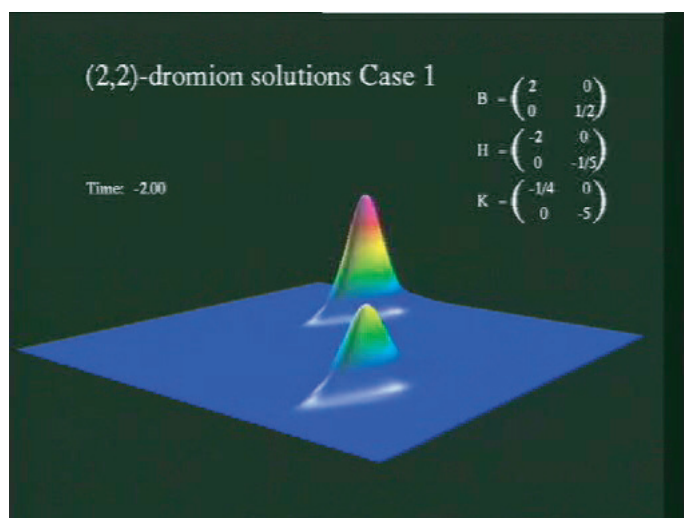
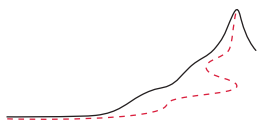


FIGURE 117 Simulation du mouvement d'un dromion à travers un milieu bidimensionnel. (© Jarmo Hietarinta)





CHAPITRE 11

LES CORPS ÉTENDUS EXISTENT-ILS ? – LES LIMITES DE LA CONTINUITÉ

Nous venons de discuter du mouvement des corps étendus de manière assez détaillée. Nous avons vu que les corps étendus dénotent un mouvement ondulatoire. Mais les corps étendus existent-ils dans la nature ? Assez étrangement, cette interrogation a été l'une des questions les plus intensément débattues en physique. Au cours des siècles, elle est réapparue de nombreuses fois et, à chaque amélioration de la description du mouvement, la réponse a alterné entre l'affirmatif et le négatif. Un grand nombre d'intellectuels ont été mis en prison et de nombreux autres sont toujours persécutés pour avoir donné des réponses qui ne sont pas politiquement correctes ! En réalité, ce problème se révèle déjà dans la vie quotidienne.

MONTAGNES ET FRACTALES

Page 44

Réf. 173

À chaque fois que nous escaladons une montagne, nous suivons le contour de sa forme. Nous décrivons généralement ce contour par une surface courbée bidimensionnelle. Dans la vie courante nous remarquons que c'est une bonne approximation. Mais il existe des alternatives. La plus populaire est l'idée que les montagnes sont des surfaces fractales. Une *fractale* fut définie par Benoît Mandelbrot comme un ensemble qui est auto-similaire sous une quantité dénombrable mais infinie de valeurs d'agrandissements*. Nous avons déjà rencontré les lignes fractales. Un exemple d'algorithme pour construire une *surface* fractale (aléatoire) est montré sur le côté droit de la [Figure 118](#). Il produit des formes qui ressemblent remarquablement aux véritables montagnes. Les résultats sont si réalistes qu'ils sont utilisés dans les productions d'Hollywood. Si cette description était correcte, les montagnes seraient étendues, mais pas continues.

Défi 422 s

Mais les montagnes pourraient également être des fractales d'un type différent, comme indiqué dans la partie gauche de la [Figure 118](#). Les surfaces montagneuses pourraient avoir une infinité de petits trous et d'autres plus petits encore. En fait, nous pourrions aussi imaginer que les montagnes sont décrites comme des versions tridimensionnelles de la partie gauche de la figure. Les montagnes seraient alors une espèce de gruyère mathématique. Pouvez-vous inventer une expérience afin de décider si les fractales fournissent la description correcte pour modéliser les montagnes ? Pour appréhender ce problème, aidons-nous d'une barre de chocolat.

* Pour une définition de l'indénombrabilité, allez à la page ??.

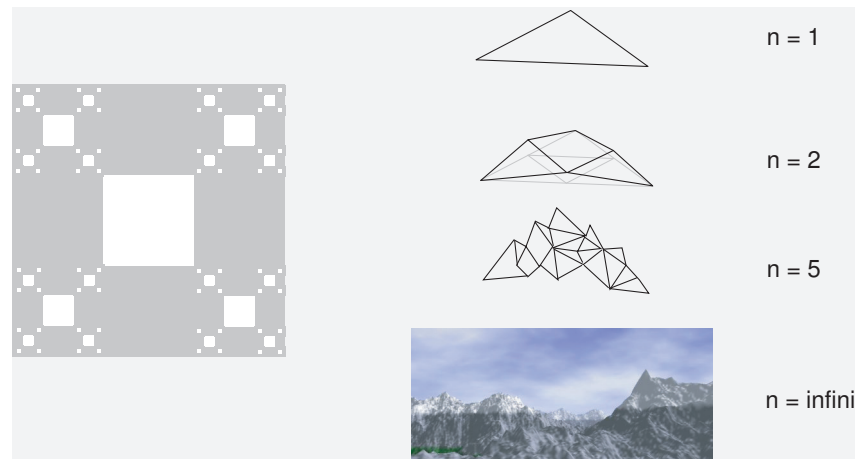


FIGURE 118 Des paysages et des montagnes vus comme des fractales. (photographie © Paul Martz)

UNE BARRE DE CHOCOLAT PEUT-ELLE DURER POUR TOUJOURS ?

« D’une goutte d’eau un logicien pourrait prévoir
un océan Atlantique ou un Niagara. »
Arthur Conan Doyle, *A Study in Scarlet*

Tout enfant sait comment faire durer une barre de chocolat pour toujours : il mange la moitié de ce qu’il reste chaque jour. Cependant, cette astuce ne fonctionne que si la matière est un invariant d’échelle. En d’autres mots, la méthode ne fonctionne que si la matière est soit *fractale*, car elle serait alors invariante d’échelle pour un ensemble discret de facteurs de zoom, soit *continue*, auquel cas elle serait invariante d’échelle pour n’importe quel facteur de zoom. Quelle réponse, s’il y en a une, s’applique à la nature ?

Page 43

Nous avons déjà rencontré un fait qui assimilait la continuité à une hypothèse contestable : la continuité nous permettrait, comme Banach et Tarski l’ont montré, de démultiplier la nourriture et n’importe quelle matière par un découpage et un réassemblage astucieux. La continuité permettrait aux enfants de déguster la *même* quantité de chocolat chaque jour, sans jamais acheter une nouvelle barre. La matière n’est donc pas continue. Maintenant, le chocolat fractal n’est pas évincé par cette déduction, mais d’autres expériences examinent cette question. En réalité, nous remarquons que les matériaux fondus n’occupent pas des volumes beaucoup plus petits que les mêmes à l’état solide. Nous découvrons aussi que les matériaux ne rétrécissent pas, même sous les pressions les plus élevées. Donc la matière n’est pas fractale. Quelle est alors sa structure ?

Défi 423 s

Pour avoir une idée de la structure de la matière, nous pouvons considérer du chocolat fluide ou même uniquement de l’huile – qui reste malgré tout l’ingrédient principal du chocolat – et l’étaler sur une grande surface. Par exemple, nous pouvons étaler une goutte d’huile sur une mare lors d’une journée sans pluie ou sans vent ; il n’est pas difficile d’observer quelles parties de l’eau sont couvertes par l’huile et lesquelles ne le sont pas. Une petite gouttelette d’huile ne peut pas recouvrir une surface plus grande que... pouvez-vous deviner cette valeur ? Essayer d’étaler ce mince film plus loin conduira inévitablement à sa déchirure en morceaux. La méthode des enfants pour prolonger le plaisir du chocolat ne fonctionne donc pas pour toujours : elle prend soudainement fin un

jour. L'expérience de l'huile montre qu'il existe une épaisseur *minimale* pour les films d'huile, d'une valeur d'environ 2 nm. Cette simple expérience peut même être réalisée à la maison, elle indique qu'il y a une taille minimale dans la matière. La matière est faite de minuscules constituants. Cela confirme les observations réalisées par Joseph Loschmidt* en 1865, qui fut le premier à mesurer la taille des constituants de la matière**. En 1865, ce n'était pas une surprise d'apprendre que la matière était faite de petits éléments, puisque l'existence d'une taille la plus petite – mais pas sa valeur – avait déjà été déduite par Galilée, lorsqu'il étudiait quelques questions simples mais différentes***.

* Joseph Loschmidt (n. Pocerny 1821, d. Vienne 1895) était un physicien et chimiste autrichien. L'expérience de l'huile fut popularisée quelques décennies plus tard, par Kelvin. Il est souvent affirmé que Benjamin Franklin fut le premier à diriger l'expérience de l'huile, c'est faux. Franklin ne mesura pas l'épaisseur, et ne considéra même pas cette question. Il avait versé de l'huile sur l'eau, mais manqua la conclusion la plus importante qui pouvait se dessiner à partir de cela. Mêmes les génies ne découvrent pas tout.

** Loschmidt savait que la viscosité (dynamique) d'un gaz était donnée par $\eta = \rho l v / 3$, où ρ représente la densité du gaz, v la vitesse moyenne des constituants et l leur libre parcours moyen. À l'aide de la prédiction d'Avogadro (faite en 1811 sans préciser aucune valeur) qu'un volume V de n'importe quel gaz contient toujours le même nombre N de constituants, nous obtenons également $l = V / \sqrt{2\pi N \sigma^2}$, où σ représente la section efficace des constituants. (La section efficace est la surface fictive que devrait avoir une particule cible pour reproduire la probabilité observée de collision ou de réaction avec une autre particule en supposant que ces collisions se produisent entre des objets matériels impénétrables [N.D.T.].) Loschmidt présuma alors que, lorsque le gaz est liquéfié, le volume du liquide est la somme des volumes des particules. Il mesura donc toutes les quantités concernées et détermina N . La valeur contemporaine de N , appelé le *nombre d'Avogadro* ou *nombre de Loschmidt*, est de $6,02 \cdot 10^{23}$ particules pour 22,4 l de n'importe quel gaz dans des conditions normales de pression et de température (aujourd'hui appelé 1 mol).

*** Galilée fut assigné en justice à cause de ses idées concernant les atomes et non à propos du mouvement de la Terre, comme il est souvent entendu. Pour avoir une idée précise des objets de la controverse dans le cas de Galilée, particulièrement ceux qui intéressent les physiciens, le meilleur texte est l'excellent livre de PIETRO REDONDI, *Galileo eretico*, Einaudi, 1983, traduit en anglais dans *Galileo Heretic*, Princeton University Press, 1987. Il est également disponible dans de nombreuses autres langues. Redondi, qui est un illustre historien des sciences et confrère de Pierre Costabel, raconte l'histoire de la querelle entre Galilée et les instances réactionnaires de l'Église catholique. Il découvrit un document de cette époque – la dénonciation anonyme qui donna naissance au procès – qui lui permit de montrer que la condamnation de Galilée à une détention à perpétuité pour ses idées sur le mouvement de la Terre était montée de toutes pièces par son ami le pape pour le *protéger* d'une condamnation à mort inévitable par rapport à un sujet différent.

Les raisons de son arrestation, qui furent formulées par la dénonciation, n'étaient pas relatives à ses idées sur l'astronomie et sur le mouvement de la Terre, mais à ses affirmations concernant la matière. Galilée défendit l'idée que, puisque la matière n'est pas invariante d'échelle, elle doit être constituée d'« atomes » ou, comme il les nommait, de *piccolissimi quanti* – les plus petits quanta. C'était et cela reste toujours une hérésie. Un véritable catholique n'est toujours pas autorisé à croire aux atomes. En réalité, la théorie des atomes n'est pas compatible avec la transformation du pain et du vin en chair et sang humains, dénommée *transsubstantiation*, qui constitue un principe central de la foi catholique. À l'époque de Galilée, les tribunaux inquisitoires punissaient l'hérésie, c'est-à-dire les opinions personnelles divergentes, par la peine de mort. Malgré qu'il fût condamné à la prison lors de son procès, Galilée publia son dernier livre, rédigé par un vieil homme en état d'arrestation, sur le problème de la variation d'échelle. Aujourd'hui, l'Église catholique refuse toujours de publier les actes et d'autres documents relatifs à ce procès. Ses dignitaires évitent prudemment le thème des atomes, et n'importe quelle parole sur ce sujet exposerait l'Église catholique à la dérision. En fait, la théorie quantique, nommée d'après l'expression utilisée par Galilée, est devenue aujourd'hui la description la plus précise de la nature.

À QUELLE HAUTEUR LES ANIMAUX PEUVENT-ILS SAUTER ?

Les puces peuvent sauter à des hauteurs équivalentes à une centaine de fois leur taille, les hommes à des hauteurs d'environ leur propre taille seulement. En fait, les études biologiques rapportent une observation simple : la plupart des animaux, en laissant de côté leur taille, atteignent à peu près la même hauteur de saut comprise entre 0,8 et 2,2 m, qu'ils soient des humains, des chats, des sauterelles, des singes, des chevaux ou des panthères. L'explication de cette réalité ne prend que deux lignes. Pouvez-vous la découvrir ?

Réf. 174
Défi 424 s

L'observation ci-dessus semble être un exemple d'invariance d'échelle. Mais il y a quelques exceptions intéressantes aux deux extrémités de l'échelle des masses. À l'échelle des petites masses, les acariens et autres petits arthropodes n'atteignent pas de telles hauteurs parce que, comme tous les petits objets, ils rencontrent le problème de la résistance de l'air. Du côté des grandes masses, les éléphants ne sautent pas aussi haut, parce que cela briserait leur squelette. Mais finalement pourquoi les os se brisent-ils ?

Pourquoi tous les hommes sont-ils à peu près de la même taille ? Pourquoi n'y a-t-il pas d'adultes géants d'une hauteur de dix mètres ? Pourquoi n'existe-t-il pas un quelconque animal terrestre plus grand que les éléphants ? La réponse fournit la clé de la compréhension de la structure de la matière. En fait, les matériaux dont nous sommes constitués ne permettraient pas de telles variations d'échelle, puisque les os des géants s'effondreraient sous le poids qu'ils auraient à supporter. Les os possèdent une force limitée parce que leurs composants sont collés les uns aux autres avec une attraction limitée. La matière continue – qui n'existe que dans les dessins animés – ne pourrait nullement se briser, et la matière fractale serait infiniment fragile. La matière cède sous une charge finie parce qu'elle est composée de tous petits constituants élémentaires.

ÉLAGAGE D'ARBRES

Les délicates pentes inférieures de la Montagne Mouvement sont recouvertes d'arbres. Les arbres sont des structures passionnantes. Prenez leur stature. Pourquoi les arbres ont-ils une taille finie ? Déjà au seizième siècle, Galilée savait qu'il n'est pas possible d'augmenter la hauteur d'un arbre jusqu'à l'infini : à un certain point, un arbre n'aurait pas la vigueur nécessaire pour supporter son propre poids. Il estima la hauteur maximale à environ 90 m ; le record actuel, inconnu à son époque, semble être de 150 m, détenu par l'arbre australien *Eucalyptus regnans*. Mais après tout pourquoi y a-t-il une limite ? La réponse est la même que pour les os : le bois possède une force limitée parce qu'il n'est pas invariant d'échelle, et il n'est pas invariant d'échelle parce qu'il est composé de petits constituants, à savoir des atomes*.

En réalité, le calcul de la valeur précise de la hauteur limite est plus compliqué. Les arbres ne doivent pas se briser lors de violentes tempêtes. La résistance au vent limite le rapport hauteur sur épaisseur h/d à environ 50 pour des arbres de taille normale (pour $0,2\text{ m} < d < 2\text{ m}$). Pouvez-vous dire pourquoi ? Des arbres plus fins sont limités en hauteur à moins de 10 m par l'exigence qu'ils doivent regagner leur position verticale après avoir été courbés par le vent.

Défi 425 pe

Réf. 176

De telles études sur les contraintes naturelles répondent aussi à la question de savoir

Réf. 175

* Il existe un autre facteur limitant important : les colonnes d'eau à l'intérieur des arbres ne doivent pas céder. Ces deux facteurs semblent donner des hauteurs limites identiques.

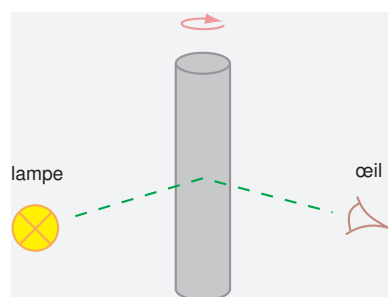


FIGURE 119 Les atomes existent : la rotation d'un rouleau d'aluminium provoque des oscillations de luminosité.

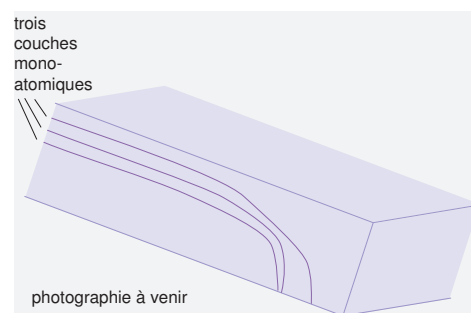


FIGURE 120 Des niveaux atomiques situés dans des cristaux d'arséniure de gallium brisés peuvent être observés sous un microscope optique.

Défi 426 s

Réf. 177

pourquoi les arbres sont faits de bois et non pas, par exemple, d'acier. Vous pourriez vérifier par vous-même que la hauteur maximale d'un pilier d'une masse donnée est déterminée par le rapport E/ρ^2 entre le module d'élasticité et le carré de la masse volumique. Le bois est en fait le matériau pour lequel ce rapport est le plus élevé. Les spécialistes des matériaux sont parvenus, tout récemment, à obtenir des rapports légèrement meilleurs avec des matériaux composites en fibre.

Mais après tout, pourquoi les matériaux se brisent-ils ? Toutes les observations fournissent la même réponse et confirment le raisonnement de Galilée : parce qu'il existe une taille minimale dans les matériaux. Par exemple, des corps sous contrainte sont déchirés à l'emplacement où leur résistance est minimale. Si un corps était complètement homogène, il ne pourrait pas être déchiré, une fêlure ne pourrait être amorcée nulle part. Si un corps avait une structure en gruyère fractal, les fêlures pourraient démarrer à des emplacements multiples et un choc infinitésimal suffirait alors à les produire.

Une expérience simple qui indique que les solides possèdent une taille minimale est montrée dans la **Figure 119**. Un rouleau cylindrique d'un unique cristal d'aluminium pur révèle un comportement surprenant lorsqu'il est éclairé de côté : sa luminosité dépend de la manière dont le rouleau est orienté, bien qu'il soit parfaitement circulaire. Cette dépendance angulaire est due à l'agencement des atomes d'aluminium dans le rouleau.

Il n'est pas difficile de confirmer expérimentalement l'existence d'une dimension minimale dans les solides. Cette dernière est suffisante pour briser un unique cristal, comme une galette d'arséniure de gallium, en deux. La surface de rupture soit est parfaitement plate, soit montre des niveaux extrêmement fins, comme indiqué sur la **Figure 120**. Ces paliers sont visibles avec un microscope optique ordinaire. (Pourquoi ?) Il apparaît que toutes les hauteurs des paliers sont des multiples d'une taille minimale : sa valeur est d'environ 0,2 nm. L'existence d'une dimension minimale, correspondant à la hauteur d'un atome, bannit toute opportunité d'invariance d'échelle dans la matière.

Défi 427 pe

L'ÉCHO DU SILENCE

Après avoir escaladé les pentes de la Montagne Mouvement, nous arrivons dans une région où la forêt est recouverte d'une neige profonde. Nous nous arrêtons un instant et

observons autour de nous. Il fait sombre, tous les animaux sont endormis, il n'y a pas de vent et aucun bruit ne se fait entendre. Nous nous immobilisons, sans respirer, et écoutons le silence. (Vous pouvez également reproduire cette expérience dans un studio tel que ceux utilisés pour les enregistrements musicaux, ou dans une chambre paisible en pleine nuit.) Dans les situations de silence parfait, l'oreille devient automatiquement plus sensible*, nous ressentons alors une étrange sensation. Nous entendons deux bourdonnements : un bruit faiblement aigu et un autre fortement aigu, qui sont manifestement provoqués à l'intérieur de l'oreille. Les expériences indiquent que la note la plus élevée est due à l'activité des cellules ciliées dans l'oreille interne. La note la plus basse est due à la pulsation sanguine qui traverse la tête. Mais finalement pourquoi entendons-nous un bruit ?

De nombreuses expériences similaires confirment que, quoi que nous fassions, nous ne pouvons jamais éliminer le bruit dans les mesures. Ce type inéluctable de bruit est appelé *bruit de grenaille* en physique. Les propriétés statistiques de ce type de bruit correspondent effectivement précisément à ce qui serait attendu si les écoulements, au lieu d'être des mouvements continus de matière, étaient des transports d'un grand nombre d'entités identiques, petites et discrètes. Ainsi, le simple fait d'écouter le bruit démontre que le courant électrique est constitué d'électrons, que l'air et les liquides sont faits de molécules, et que la lumière se compose de photons. Dans un sens, l'écho du silence représente le son des atomes. Le bruit de grenaille n'existerait pas dans les systèmes continus.

DES PETITES BILLES DURES

« Je préfère comprendre la cause d'un phénomène élémentaire qu'être le roi de Perse. »
Démocrite

Des observations précises montrent que la matière n'est ni continue ni fractale : la matière est constituée de particules fondamentales élémentaires. Galilée, qui déduisit leur existence en pensant aux géants et aux arbres, les appela « les plus petits quanta ». Aujourd'hui ils sont appelés « atomes », en l'honneur d'une discussion célèbre qui eut lieu dans la Grèce antique. En réalité, il y a 2 500 ans, les Grecs se posèrent la question suivante : si le mouvement et la matière sont conservés, comment le changement et la transformation peuvent-ils exister ? L'école philosophique de Leucippe et Démocrite d'Abdère**

* L'oreille humaine peut détecter des variations de pression d'au moins 20 μ Pa.

** Leucippe d'Élée (Λευκιππος) (v. 490 à v. 430 av. J.-C.) fut un philosophe grec. Élée était une petite ville située au sud de Naples. Elle se trouve en Italie, mais appartenait à l'époque à la Grande Grèce. Démocrite (Δημοκρίτης) d'Abdère (v. 460 à v. 356 ou 370 av. J.-C.), également philosophe grec, fut indubitablement le plus grand philosophe qui ait jamais vécu. En même temps que son maître Leucippe, il fut le fondateur de la théorie atomiste. Démocrite était un penseur fort admiré, et un contemporain de Socrate. Le vaniteux Platon ne mentionna jamais son nom, puisqu'il représentait un danger pour sa propre renommée. Démocrite écrivit de nombreux ouvrages qui ont tous été perdus, ils ne furent pas recopiés pendant le Moyen Âge à cause de leur point de vue scientifique et rationnel sur le monde, qui était considéré comme blasphématoire par les fanatiques religieux qui avaient le monopole sur l'industrie de la recopie des manuscrits. De nos jours, il est devenu courant de revendiquer – de façon incorrecte – que Démocrite ne possédait aucune preuve de l'existence des atomes. C'est un exemple caractéristique de désinformation couplée à la sombre intention de se sentir supérieur aux Anciens.

effectuèrent deux observations particulières avec beaucoup de soins. Ils remarquèrent que le sel se dissout dans l'eau. Ils remarquèrent également qu'un poisson peut nager dans l'eau. Dans le premier cas, le volume d'eau n'augmente pas quand le sel est dissous. Dans le second cas, lorsque le poisson avance, il doit pousser de l'eau vers les côtés. Leucippe et Démocrite déduisirent qu'il existe une seule explication possible qui puisse vérifier ces observations et qui réconcilie également conservation et transformation : la nature est faite de vide et de minuscules particules indivisibles et conservées*. De cette manière n'importe quel exemple de mouvement, de changement ou de transformation est dû à des réorganisations de ces particules, le changement et la conservation sont donc réconciliés.

En résumé, puisque la matière est dure, possède une forme et est divisible, Leucippe et Démocrite l'imaginèrent comme étant constituée d'atomes. Les atomes sont des particules qui sont dures, ont une forme, mais sont indivisibles. En d'autres termes, les Grecs se figurèrent la nature comme un vaste jeu de Lego. Les pièces de Lego sont en tout premier lieu dures ou *impénétrables*, c'est-à-dire répulsives à des distances extrêmement petites. Elles sont *attractives* à petite distance : elles restent collées ensemble. Finalement, elles ne dénotent *aucune interaction* à grande distance. Les atomes se comportent de la même manière. (En réalité, ce que les Grecs appelèrent « atomes » correspondait en partie à ce que nous appelons aujourd'hui des « molécules ». Ce dernier terme fut inventé par Amadeo Avogadro en 1811 afin de clarifier cette distinction. Mais oublions ce détail pour le moment.)

Puisque les atomes sont invisibles, il fallut de nombreuses années avant que tous les scientifiques soient convaincus par les expériences démontrant leur existence. Au dix-neuvième siècle, l'idée des atomes fut magnifiquement vérifiée par la découverte des « lois » de la chimie et celles du comportement des gaz. Plus tard, les effets du bruit furent découverts.

De nos jours, avec les progrès de la technologie, des atomes isolés peuvent être observés, photographiés, hologrammés, comptabilisés, touchés, déplacés, soulevés, lévités et tournés. Et en fait, comme la matière courante, les atomes possèdent une masse, une taille, une forme et une couleur. Des atomes uniques ont même été utilisés comme ampoules et comme lasers.

Actuellement, des chercheurs issus de plusieurs disciplines prennent plaisir à jouer avec les atomes de la même façon que les enfants jouent avec des Lego. La démonstration la plus admirable de ces possibilités est probablement fournie par les nombreuses applications du microscope à force atomique. Si jamais vous avez l'occasion d'en voir

* Cette histoire est contée par Lucrèce, dont le nom complet est Titus Lucretius Carus, dans son célèbre texte *De rerum natura*, autour de 60 av. J.-C. (Une traduction anglaise peut être consultée sur <http://perseus.uchicago.edu/hopper/text.jsp?doc=Perseus:text:1999.02.0131> et une traduction française sur <http://bcs.fltr.ucl.ac.be/LUCR/I.html> et <http://remacle.org/bloodwolf/philosophes/Lucrece/table.htm>.) Lucrèce cite de nombreuses autres preuves. Dans le livre 1, il montre qu'il y a des espaces vides dans les solides – comme l'indiquent la porosité et les différences de densité – et dans les gaz – comme le prouve le vent. Il montre que les odeurs sont dues à des particules, et que c'est ainsi de l'évaporation. (Pouvez-vous trouver plus de pièces à conviction ?) Il explique également que les particules ne peuvent être vues à cause de leur petite taille, mais que leurs effets peuvent être ressentis et qu'ils permettent d'expliquer logiquement toutes les observations.

Surtout si nous imaginons ces particules comme étant des petites billes, nous ne pouvons pas nous empêcher de qualifier cette idée de typiquement masculine. (Quelle serait l'approche féminine ?)

Page 258

Réf. 178, Réf. 179

Réf. 180

Réf. 181

Défi 428 pe

Défi 429 d

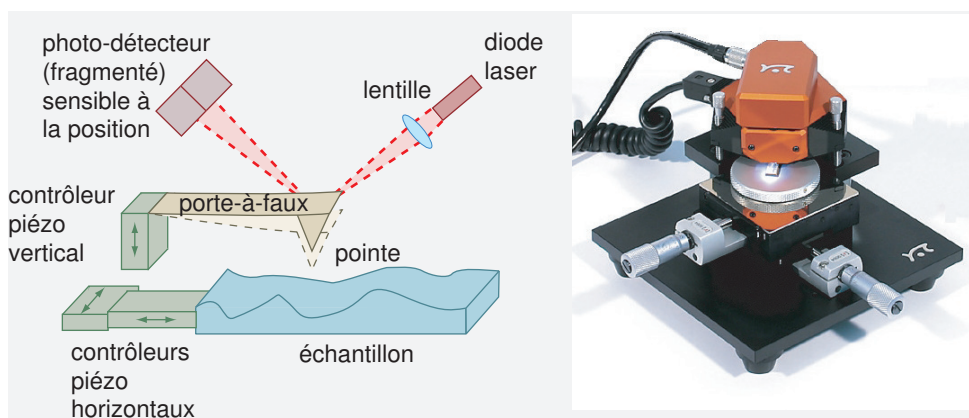


FIGURE 121 Le principe et une réalisation d'un microscope à force atomique. (photographie © Nanosurf)

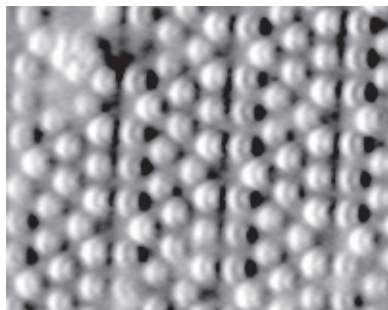


FIGURE 122 Les atomes situés sur la surface d'un cristal de silicium cartographié avec un microscope à force atomique. (© Universität Augsburg)

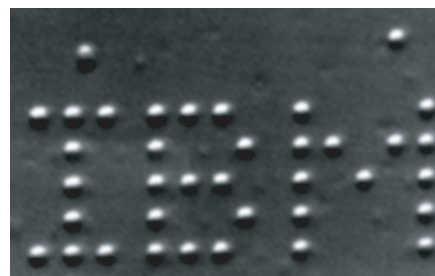


FIGURE 123 Résultat du déplacement d'atomes d'hélium sur une surface métallique. (© IBM)

Réf. 182

un, ne la manquez pas* ! C'est un dispositif simple qui jalonne la surface d'un objet à l'aide d'une aiguille dont la pointe est de la taille d'un atome ; de telles aiguilles, généralement en tungstène, sont aisément confectionnées avec une méthode simple de gravure à l'eau-forte. Les fluctuations de la hauteur de l'aiguille le long de son trajet au-dessus de la surface sont enregistrées à l'aide d'un rayon lumineux qui s'infléchit. Avec un peu d'attention, les atomes de l'objet peuvent être décelés et rendus visibles sur un écran d'ordinateur. En utilisant des types particuliers de ces microscopes, l'aiguille peut être mise à profit pour déplacer des atomes un par un à des emplacements voulus de la surface. Il est également possible de balayer une surface, de soulever un atome donné et de le projeter en direction d'un spectromètre de masse pour déterminer à quelle famille d'atomes il appartient.

Réf. 183

* Une version économique ne coûte que quelques milliers d'euros, et vous permettra d'étudier la différence entre une galette de silicium – cristalline – une couche de farine – amorphe et granuleuse – et une surface pure.

À ce propos, la construction des microscopes à force atomique ne constitue qu'une petite amélioration de ce que la nature a déjà développé par millions : lorsque nous utilisons nos oreilles pour écouter, nous détectons en réalité des variations d'environ 1 nm dans la position du tympan. En d'autres termes, nous avons tous deux « microscopes à force atomique » incorporés dans nos têtes.

En conclusion, la matière n'est pas invariante d'échelle : en particulier, elle n'est ni lisse ni fractale. La matière est constituée d'atomes. Différents types d'atomes, sans compter les diverses combinaisons possibles entre eux, donnent naissance aux différentes déclinaisons de substances. Des images obtenues à partir de microscopes à force atomique indiquent que la taille et l'agencement des atomes représentent la *forme* et l'*étendue* des objets, confirmant le modèle du Lego pour la matière*. Par conséquent, la description du mouvement des objets étendus peut être réduite à la description du mouvement de leurs atomes. Le mouvement atomique formera un thème primordial des pages suivantes. Une de ses répercussions est particulièrement marquante : la chaleur. Avant que nous l'étudions, nous devons considérer les fluides.

LE MOUVEMENT DES FLUIDES

Page 275

Les fluides peuvent être des liquides ou des gaz. Leur mouvement peut être excessivement complexe, comme la [Figure 124](#) le montre. De tels mouvements compliqués sont fréquemment cités comme exemples d'auto-organisation ou de chaos ; ces formes sont discutées ci-dessous.

Comme tout mouvement, le mouvement fluide obéit à la conservation de l'énergie. Dans le cas où il n'y a pas d'énergie convertie en chaleur, la conservation de l'énergie est particulièrement simple. Le mouvement qui ne génère pas de chaleur implique l'absence de tourbillons, un tel mouvement fluide est qualifié de *laminaire*. Si la vitesse du fluide ne dépend pas du temps quelle que soit la position, il est qualifié de *stationnaire*. Pour un mouvement qui est à la fois laminaire et stationnaire, la conservation de l'énergie peut être exprimée à l'aide de la vitesse v et de la pression p :

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p + \rho g z = \text{const} \quad (88)$$

où z représente la hauteur au-dessus du sol. C'est l'*équation de Bernoulli*, dans laquelle le premier terme est l'énergie cinétique (par unité de volume) du fluide, et les deux autres termes sont des énergies potentielles (par unité de volume). Le dernier terme n'est important que si le fluide se soulève par rapport au sol. Le second terme est l'énergie potentielle (par unité de volume) qui résulte de la compression du fluide. En réalité, la pression est une énergie potentielle par unité de volume.

Défi 430 e

* L'étude de la matière avec encore plus de raffinement conduit à l'idée dorénavant bien connue que la matière, à des grossissements de plus en plus forts, est faite de molécules, d'atomes, de noyaux, de protons et de neutrons, et finalement de quarks. Les atomes contiennent également des électrons. Un dernier type de matière, les neutrinos, est observé en provenance du Soleil et de certains types de matériaux radioactifs. Et même si les briques fondamentales sont devenues de plus en plus petites avec le temps, l'idée de base demeure identique : la matière est constituée d'entités les plus petites, que l'on appelle aujourd'hui des particules élémentaires. Dans la seconde partie de notre ascension montagnarde nous explorerons cette idée en détail. L' [Annexe ??](#) liste les propriétés mesurées de toutes les particules élémentaires connues.

Page ??

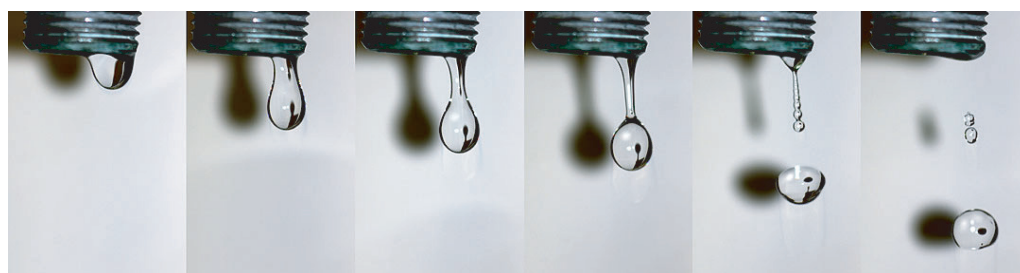
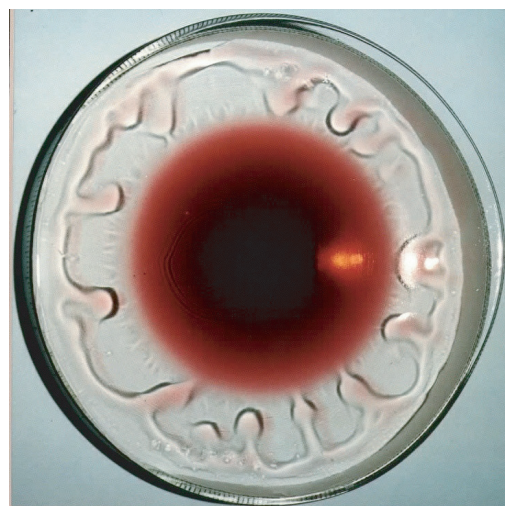
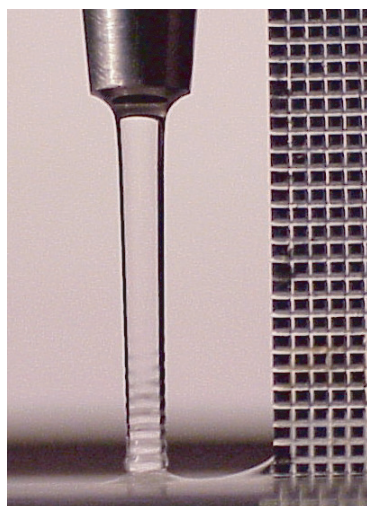
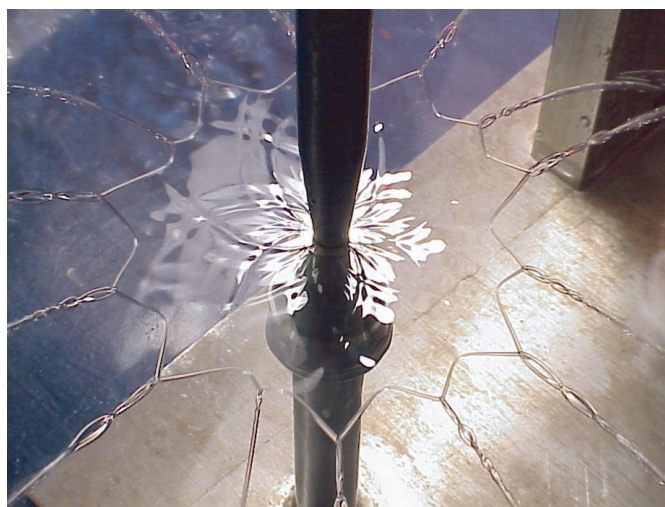


FIGURE 124 Quelques exemples de mouvements fluides : un jet d'eau vertical frappant un obstacle horizontal, deux jets d'un mélange glycérol-eau se rencontrant selon un angle oblique, un jet d'eau pénétrant dans un réservoir, un verre de vin exhibant des larmes (tous © John Bush, MIT) et un robinet qui fuit (© Andrew Davidhazy).

Défi 431 s La conservation de l'énergie implique que plus la pression est basse, plus la vitesse d'un fluide devient grande. Nous pouvons utiliser cette relation pour mesurer la vitesse d'un écoulement d'eau stationnaire dans un tube. Nous avons juste besoin de rétrécir partiellement le tube à un emplacement le long de celui-ci, et de mesurer la différence de pression avant et au niveau du goulet d'étranglement du tube. Nous trouvons que la vitesse v est donnée par $v = k\sqrt{p_1 - p_2}$. (Que représente la constante k ?) Un dispositif utilisant cette méthode est appelé un tube de Venturi.

Si la géométrie d'un système reste figée et si la vitesse du fluide est accrue, à une certaine vitesse nous observons une transition : le liquide perd sa limpidité, l'écoulement n'est plus stationnaire. Nous voyons cela à chaque fois que nous ouvrons un robinet d'eau. L'écoulement passe de laminaire à turbulent. Dans cette situation, l'équation de Bernoulli n'est plus valide.

Réf. 184 La description de la turbulence est certainement le plus ardu de tous les problèmes de la physique. Lorsque le jeune Werner Heisenberg fut assigné à poursuivre les recherches sur la turbulence, il refusa – bien lui en prit – en disant que c'était trop difficile. Il se tourna vers quelque chose de plus facile puis initia et développa à la place la mécanique quantique. La turbulence est un sujet tellement vaste, avec ses nombreux concepts qui restent mal compris, qu'en dépit du nombre et de l'importance de ses applications ce n'est qu'aujourd'hui, au début du vingt et unième siècle, que ses secrets commencent à être percés. Il est généralement admis que les équations du mouvement décrivant les fluides, les *équations de Navier–Stokes*, sont suffisantes pour comprendre la turbulence*. Mais les mathématiques derrière elles sont fantastiques. Il existe même une récompense d'un million de dollars offerte par l'Institut Clay de mathématiques pour l'achèvement de certaines étapes sur le chemin de la résolution des équations.

Réf. 185 Des systèmes importants qui montrent un écoulement laminaire, des tourbillons et de la turbulence en même temps sont les ailes et les voiles. Toutes les ailes fonctionnent mieux en mode laminaire. L'essentiel d'une aile est qu'elle attribue à l'air une vitesse dirigée vers le bas avec le moins de turbulence possible. (C'est pour minimiser la turbulence que les ailes sont courbées. Si le moteur est très puissant, une aile plate inclinée d'un certain angle fonctionne également. Les fortes turbulences sont aussi un avantage pour atterrir en toute sécurité.) La vitesse dirigée vers le bas de la traînée d'air provoque une force centrifuge qui agit sur l'air qui passe au-dessus de l'aile. Cela conduit à une pression plus faible, et donc à un soulèvement. (Les ailes ne sont donc *pas* fondées sur l'équation de Bernoulli, où des pressions plus basses *le long* de l'écoulement conduisent à une vitesse de l'air plus élevée, comme malheureusement de nombreux livres ont l'habitude de le dire. Au-dessus d'une aile, la vitesse plus élevée est reliée à la pression plus basse *à travers* l'écoulement.)

Page ?? Les vitesses différentes de l'air au-dessus et en dessous de l'aile provoquent des tourbillons aux extrémités de chacune d'elles. Ces tourbillons sont particulièrement importants pour le décollage de n'importe quel insecte, oiseau ou avion. Nous donnons plus loin plus de détails sur les ailes.

* Elles sont baptisées d'après Claude Navier (n. Dijon 1785, d. Paris 1836), important ingénieur français qui dirigea la construction de plusieurs ponts, et George Gabriel Stokes (n. Skreen 1819, d. Cambridge 1903), important physicien et mathématicien irlandais.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LES FLUIDES

Quelle est la quantité d'eau nécessaire pour humidifier l'air dans une pièce en hiver ? À 0 °C, la pression de vapeur saturante de l'eau dans l'air est de 6 mbar, à 20 °C elle est de 23 mbar. Par conséquent, le réchauffement de l'air en hiver donne tout au plus une humidité de 25 %. Pour augmenter l'humidité de 50 %, nous avons donc besoin d'environ 1 litre d'eau pour 100 m³.

Défi 432 e

* *

Vous êtes dans un bateau sur un étang avec une pierre, un seau d'eau et un morceau de bois. Qu'advient-il du niveau de l'eau de l'étang après que vous aurez jeté la pierre dedans ? Après que vous aurez jeté l'eau dans l'étang ? Après que vous aurez jeté le morceau de bois ?

Défi 433 s

* *

Un navire quitte un fleuve pour pénétrer dans la mer. Que se passe-t-il ?

Défi 434 s

* *

Accrochez un ballon de baudruche sur l'extrémité d'une bouteille et laissez-le suspendu à l'intérieur de la bouteille. Jusqu'où pouvez-vous gonfler le ballon à l'intérieur de la bouteille ?

Défi 435 e

* *

Posez une petite boulette de papier dans l'encolure d'une bouteille horizontale et essayez de souffler dessus pour la faire entrer dedans. Le papier volera *dans votre direction*. Pourquoi ?

Défi 436 e

* *

Il est possible de faire sauter un œuf d'un coquetier dans un second situé juste derrière lui en soufflant dessus. Pouvez-vous exécuter ce tour ?

Défi 437 e

* *

Durant le dix-septième siècle, des ingénieurs qui avaient besoin de puiser de l'eau faisaient face à un défi. Pour puiser de l'eau depuis un puits minier jusqu'à la surface, aucune pompe à eau n'est concevable si la différence de hauteur est supérieure à 10 m. Pour le double de cette hauteur, nous avons toujours besoin de deux pompes en série, reliées par un réservoir intermédiaire. Pourquoi ? Comment les arbres parviennent-ils alors à pomper de l'eau vers le haut sur des hauteurs plus grandes ?

Défi 438 s

* *

Lorsque l'hydrogène et l'oxygène sont combinés pour former de l'eau, la quantité d'hydrogène nécessaire est exactement le double de la quantité d'oxygène, s'il ne reste aucune quantité de gaz après la réaction. Comment cette observation confirme-t-elle l'existence des atomes ?

Défi 439 s

* *

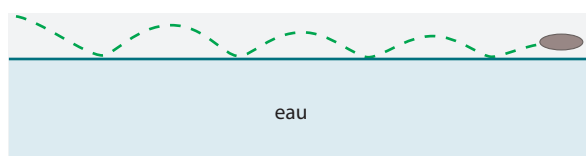


FIGURE 125 Quel est votre propre record du nombre de ricochets ?

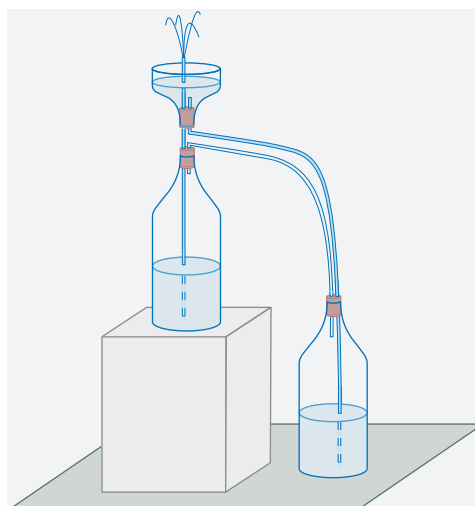


FIGURE 126 La fontaine de Héron.

Défi 440 s Comment les chocolats pralinés fourrés à l'alcool sont-ils fabriqués ? Remarquez que l'alcool n'est pas injecté dedans après leur fabrication, parce qu'il n'y aurait aucune façon de conserver le tout assez hermétiquement.

* *

Réf. 186 Combien de fois une pierre peut-elle ricocher lorsqu'elle est projetée sur la surface de l'eau ? Le record mondial actuel fut accompli en 2002 : 40 ricochets. Nous en savons plus concernant le précédent record mondial, accompli en 1992 : une pierre plate, triangulaire, de la taille de la paume fut projetée à une vitesse de 12 m/s (d'autres disent 20 m/s) et une vitesse de rotation d'environ 14 tours par seconde le long d'une rivière, recouvrant à peu près 100 m avec 38 sauts. (Cette succession de ricochets fut filmée par un caméscope depuis un pont.)

Défi 441 r Qu'est-ce qui serait nécessaire pour accroître le nombre de ricochets ? Pouvez-vous concevoir une machine qui serait un meilleur lanceur que vous-même ?

* *

Défi 442 s L'élément le plus abondant dans l'air est l'azote (environ 78 %). Le deuxième élément le plus abondant est l'oxygène (environ 21 %). Quel est le troisième élément le plus abondant ?

* *

L'eau peut s'écouler en montant : la fontaine de Héron en est la preuve vivante. Héron

d'Alexandrie (v. 10 à v. 70) décrit celle-ci il y a 2 000 ans. Elle peut être aisément fabriquée à la maison, en utilisant quelques bouteilles en plastique et une petite tuyauterie.

Défi 443 s Comment fonctionne-t-elle ?

* *

Une ampoule est placée, sous l'eau, dans un cylindre fixe en acier d'un diamètre de 16 cm. Une Fiat Cinquecento (500 kg) est placée sur un piston poussant sur la surface de l'eau.

Défi 444 s L'ampoule résistera-t-elle ?

* *

Défi 445 pe Quel est le gaz le plus dense ? La vapeur la plus dense ?

* *

Chaque année, l'Institut des systèmes maritimes de l'université de Rostock organise une compétition. Le défi est de construire un bateau en papier ayant la charge utile la plus importante. Le bateau en papier doit peser 10 g au maximum, la charge utile est mesurée en déversant des petites charges de plomb dessus, jusqu'à ce que le bateau coule. Le record de 2002 s'élève à 2,6 kg. Pouvez-vous atteindre cette valeur ? (Pour plus d'informations, consultez le site Web <http://www.paperboat.de>.)

Défi 446 e

* *

Une version moderne d'une ancienne question – déjà formulée par Daniel Colladon (1802–1893) – est la suivante : un navire de masse m sur une rivière est tiré par des chevaux trotant le long de la rive et attachés par des cordes. Si la rivière est constituée d'hélium superfluide, ce qui signifie qu'il n'y a pas de frottement entre le navire et la rivière, quelle est l'énergie nécessaire pour tirer le navire en amont le long de la rivière jusqu'à ce qu'une hauteur h ait été franchie ?

Défi 447 s

* *

L'enseignant suisse Auguste Piccard (1884–1962) était un célèbre explorateur de la stratosphère. Il parvint à une hauteur de 16 km dans son *aérostat*. À l'intérieur de la cabine hermétique suspendue en dessous de son ballon, il avait une pression d'air normale. Toutefois, il avait besoin d'introduire dans la cabine plusieurs cordes attachées au ballon, afin d'être capable de tirer sur celles-ci pour le commander. Comment disposa-t-il les cordes dans la cabine tout en empêchant l'air de la quitter ?

Défi 448 s

* *

Un homme ne peut pas respirer quelle que soit sa profondeur sous l'eau, même s'il a un tube rejoignant la surface. À une profondeur de quelques mètres, essayer d'en faire autant est inévitablement mortel ! Même à une profondeur de 60 cm seulement, le corps humain ne peut respirer de cette manière que pendant quelques minutes. Pourquoi ?

Défi 449 s

* *

Selon sa tenue vestimentaire, un homme en l'air chute avec une vitesse limite d'environ 180 km/h. Combien de temps faut-il pour tomber d'un avion situé à 3 000 m jusqu'à une hauteur de 200 m ?

Défi 450 pe

* *

Défi 451 s Plusieurs personnes ont survécu à des chutes libres en sautant depuis des avions situés à mille mètres ou plus, sans même avoir un parachute. Comment cela fut-il possible ?

* *

Défi 452 s La pression liquide dépend de la hauteur. Si la pression sanguine humaine moyenne à la hauteur du cœur est de 13,3 kPa, pouvez-vous deviner sa valeur à l'intérieur du pied en position debout ?

* *

Défi 453 s Le cœur humain pompe le sang à un taux d'environ 0,1 l/s. Un vaisseau capillaire possède un diamètre identique à celui d'un globule rouge, autour de 7 μm , et dans celui-ci le sang se déplace à une vitesse d'un demi-millimètre par seconde. Combien de vaisseaux capillaires y a-t-il chez un homme ?

* *

Réf. 187 Quelques gouttes de thé coulent toujours le long de la partie basse du bec d'une théière (ou alors elles tombent sur la table). Ce phénomène a même été reproduit en utilisant des simulations du mouvement des liquides avec des supercalculateurs, par Kistler et Scriven, en employant les équations de Navier–Stokes. Malgré tout cela, les théières déversent toujours quelques gouttes.

* *

Défi 454 s Les meilleures bulles de savon géantes peuvent être obtenues en mélangeant 1,5 l d'eau, 200 ml de sirop de glucose et 450 ml de liquide vaisselle. Mélangez tout ceci et laissez reposer pendant quatre heures. Vous pouvez alors réaliser les plus grosses bulles en trempant un anneau métallique faisant jusqu'à 100 mm de diamètre dans le mélange. Mais pourquoi les bulles de savon éclatent-elles ?

* *

Défi 455 pe Une goutte d'eau qui tombe dans une casserole contenant de l'huile brûlante danse* sur la surface pendant un temps très long, si l'huile est à plus de 220 °C. Les cuisiniers testent la température de l'huile de cette manière. Pourquoi cet effet, connu sous le nom d'effet Leidenfrost**, se produit-il ?

* *

Défi 456 s Pourquoi les molécules d'air ne tombent-elles pas par terre puis restent ainsi ?

* *

Défi 457 s Lequel des deux entonnoirs remplis d'eau de la Figure 127 est-il vidé le plus rapidement ? Appliquez la conservation de l'énergie au mouvement du fluide (également appelé « loi » de Bernoulli) pour découvrir la bonne réponse.

Réf. 188

* Elle est en réalité en lévitation au-dessus de la surface [N.D.T.].

** Il est nommé d'après Johann Gottlieb Leidenfrost (1715–1794), physicien allemand.

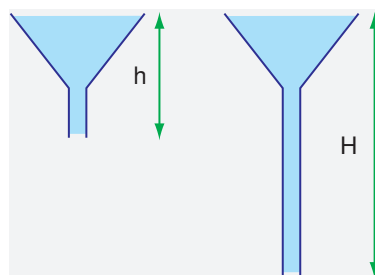


FIGURE 127 Quel entonnoir est plus rapide ?

* *

Comme nous l'avons vu, un écoulement rapide provoque une dépression. Comment les poissons font-ils pour éviter de se faire happer les yeux lorsqu'ils nagent très rapidement ?

Défi 458 s

* *

Les balles de golf possèdent des creux pour les mêmes raisons que les balles de tennis sont duveteuses et que l'épiderme des requins et des dauphins n'est pas lisse : des aspérités sur la surface réduisent la résistance à l'écoulement parce que de nombreux petits remous produisent moins de frottement que quelques-uns plus grands. Pourquoi ?

Défi 459 pe

* *

Le verre est un solide. Toutefois, de nombreux manuels soutiennent que le verre est un liquide. Cette confusion a été diffusée pendant environ une centaine d'années, probablement à l'origine d'une erreur de traduction d'une phrase d'un manuel allemand publié en 1933 par Gustav Tamman, *Der Glaszustand*. Pouvez-vous donner au moins trois raisons qui prouvent que le verre est un solide et non un liquide ?

Défi 460 s

* *

Le record officiel de hauteur atteint par un hélicoptère est de 12 442 m au-dessus du niveau de la mer, bien que celui de 12 954 m ait également été revendiqué. (Le premier fut obtenu en 1972, le second en 2002, tous les deux par des pilotes français dans des hélicoptères français.) Pourquoi, alors, les gens persistent-ils à utiliser leurs jambes pour gravir le sommet du mont Sagarmatha*, la plus haute montagne du monde ?

Défi 461 s

* *

Un fil à coudre quelque peu emmêlé se trouve sur la surface d'une coupe remplie d'eau. Le fait de déposer un petit peu de liquide vaisselle à l'intérieur du périmètre délimité par le fil oblige celui-ci à adopter immédiatement une forme circulaire. Pourquoi ?

Défi 462 e

* *

Pouvez-vous déposer un mouchoir sous l'eau en utilisant un verre, tout en le gardant sec ?

Défi 463 s

* Nom népalais du mont Everest qui signifie « le front du ciel » en sanskrit [N.D.T.].

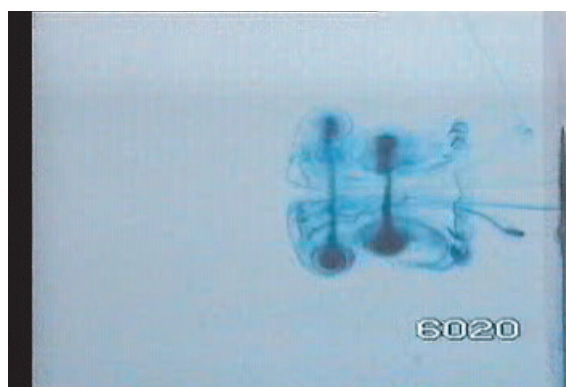


FIGURE 128 Deux anneaux tourbillonnaires sautant l'un par-dessus l'autre. (© Lim Tee Tai)

* *

Êtes-vous capable de souffler sur une balle de ping-pong pour la faire sortir d'un entonnoir ? Que se passe-t-il si vous soufflez dans un entonnoir en direction d'une bougie allumée ?

* *

La chute d'une feuille, avec sa trajectoire complexe, est toujours un sujet d'expérimentation. Nous sommes encore loin d'être capables de prédire le temps que prendra une feuille pour parvenir au sol. Le mouvement de l'air autour d'une feuille n'est pas aisé à décrire. Un des phénomènes les plus simples de l'hydrodynamique demeure également un de ses plus farouches casse-tête.

* *

Réf. 190 Les fluides exhibent de nombreux effets captivants. Les bulles de savon dans l'air sont constituées d'un mince film sphérique de liquide avec de l'air de chaque côté. En 1932, des anti-bulles, de minces films sphériques d'air avec du liquide des deux côtés, ont été observées pour la première fois. En 2004, le physicien belge Stéphane Dorbolo et son équipe montrèrent qu'il est possible de les produire dans des expériences simples et, en particulier, dans la bière belge.

* *

Défi 464 e Avez-vous déjà laissé tomber un bonbon Mentos dans une bouteille de Coca Cola Light ? Vous obtiendrez un effet intéressant. (Faites-le à vos propres risques et périls...) Est-il possible de construire une fusée de cette manière ?

* *

Défi 465 e Une aiguille peut flotter sur l'eau, si vous la déposez avec précaution. Essayez simplement, en utilisant une fourchette.

* *

Les fluides exhibent de nombreux mouvements compliqués. Pour en avoir un aperçu,

- jetez un œil sur la magnifique galerie d'images du site Web <http://serve.me.nus.edu.sg/limtt>. Un des exemples les plus fascinants du mouvement fluide est le motif des tourbillons en anneaux imbriqués les uns dans les autres (comme s'ils jouaient à saute-mouton), indiqué dans la Figure 128. Lim Tee Tai explique qu'il est extrêmement difficile d'obtenir plus de deux anneaux imbriqués, à cause du subtil non-alignement des anneaux tourbillonnaires qui conduit à l'effondrement de ce système.
- Défi 466 e
- Réf. 194

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LES SOLIDES

- Quelle est la longueur maximale d'un câble métallique suspendu verticalement ? Un câble pourrait-il être descendu depuis un satellite géostationnaire jusqu'à la Terre ? Cela signifierait que nous pourrions réaliser un « ascenseur » spatial. Quelle longueur le câble devrait-il avoir ? Quel poids ? Comment pourriez-vous construire un tel système ? Quelles embûches rencontreriez-vous ?
- Défi 467 s

* *

La matière est constituée d'atomes. Au cours des siècles, l'entêtement persistant de nombreuses personnes à nier cette idée a conduit à la perte de nombreux trésors. Durant plus de mille ans, les gens pensaient que les véritables perles pourraient être discernées des fausses en les martelant avec une masse : seules les fausses perles se briseraient. Pourtant, *toutes* les perles se brisent. (Même les diamants se brisent dans cette situation.) Par conséquent, la grande majorité des perles magnifiques collectées dans le monde ont été fracassées en morceaux.

* *

- Les livres de bandes dessinées ont des ennuis avec le concept d'atomes. Astérix pourrait-il réellement balancer des Romains en l'air en utilisant son poing ? Les coups de feu précis du revolver de Lucky Luke sont-ils possibles ? Le fil de soie de Spiderman peut-il le supporter dans ses balancements de building en building ? Bip Bip peut-il s'immobiliser dans sa course effrénée en trois temps trois mouvements ? Peut-on commander au Soleil de s'arrêter dans le ciel ? Les vaisseaux spatiaux planent-ils en utilisant du carburant ? Prenez n'importe quel héros de bande dessinée et demandez-vous si la matière faite d'atomes lui permettrait de réaliser les prouesses dont il semble capable. Vous découvrirez que la plupart des dessins animés sont comiques précisément parce qu'ils présupposent que la matière n'est pas constituée d'atomes, mais qu'elle est continue ! Dans un certain sens, les atomes assimilent la vie à une aventure sérieuse.
- Défi 468 e

* *

- Les hommes peuvent-ils provoquer des séismes ? Que se passerait-il si 1 000 millions d'Indiens sautaient en même temps de leur table de cuisine sur le sol ?
- Défi 469 s

En réalité, plusieurs tremblements de terre particulièrement violents *ont été* déclenchés par les êtres humains. Cela s'est produit lorsque des barrages fluviaux ont été remplis, ou quand de l'eau a été injectée dans des forages miniers. Il a été suggéré que l'extraction des eaux souterraines profondes provoquerait également des séismes. Si cela est confirmé, une proportion notable de tous les tremblements de terre pourrait avoir été déclenchée par l'homme.

* *

Défi 470 s Comment une pointe d'une stalactite peut-elle être distinguée d'une pointe d'une stalagmite ? Ces différences existent-elles aussi pour des pics de glace ?

* *

Défi 471 s Quelle masse beaucoup plus grande vos pèse-personnes indiqueraient-ils si vous vous teniez debout dessus dans un espace vide ?

* *

Le corps humain est l'un des corps étendus les plus complexes. Dans de récentes simulations sur le comportement d'êtres humains lors d'accidents de voiture, les modèles les plus avancés incluent les côtes, les vertèbres ainsi que tous les autres os et les divers organes. Pour chaque composant, ses propriétés spécifiques à la déformation sont prises en compte. Avec de tels modèles et de telles simulations, la protection des passagers et des conducteurs dans les véhicules peut être optimisée.

* *

Défi 472 s Le trou le plus profond jamais foré sur la Terre fait 12 km de profondeur. En 2003, quelqu'un suggéra d'élargir un tel trou et d'y déverser des millions de tonnes de fer liquide. Il affirmait que le fer coulerait vers le centre de la Terre. Si un dispositif de mesure communiquant était abandonné dans le fer, il pourrait transmettre ses observations jusqu'à la surface en utilisant des ondes sonores. Pouvez-vous fournir quelques raisons qui montrent que cela ne pourrait pas fonctionner ?

* *

La puissance économique d'une nation a longtemps été associée à sa capacité à produire de l'acier de bonne qualité. En réalité, la révolution industrielle commença avec la production massive d'acier. Chaque scientifique devrait connaître les principes fondamentaux concernant l'acier. L'acier est une combinaison de fer et de carbone auxquels peuvent également être ajoutés d'autres éléments, principalement des métaux. Nous pouvons distinguer trois principaux types d'acier, en fonction de sa structure cristalline. Les aciers ferritiques possèdent une structure cristalline cubique à corps centré, comme indiqué sur la Figure 129, les aciers austénitiques possèdent une structure cristalline cubique à faces centrées et les aciers martensitiques ont une structure tétragonale à corps centré. Le Tableau 29 fournit plus de détails.

La photographie de l'Atomium est aimablement fournie par Eric Vandeginste (droits d'auteurs réservés), et est tirée de son site Web <http://atmospheres.be>. L'Atomium lui-même est protégé par les droits d'auteurs, la permission de la reproduire ici a été accordée par Asbl Atomium Vzw et SABAM Belgium.

* *

Réf. 189 Défi 473 pe Le claquement du fouet est un phénomène élémentaire qui nécessite une explication complexe. Depuis le travail expérimental de Peter Krehl, nous avons appris que le fouet claque lorsque l'extrémité atteint une vitesse égale au double de la vitesse du son. Pouvez-vous imaginer pourquoi ?

TABLEAU 29 Les types d'acier, leurs propriétés et utilisations.

ACIER FERRITIQUE	ACIER AUSTÉNITIQUE	ACIER MARTENSITIQUE
acier « ordinaire » cubique à corps centré (ccc) fer et carbone	acier « mou » cubique à faces centrées (cfc) fer, chrome, nickel, manganèse, carbone	acier de grande dureté, fragile tétragonale à corps centré (tcc) acier au carbone et alliages
Exemples		
constructions en acier	la majorité des aciers inoxydables (18/8 Cr/Ni)	surfaces des forets de perceuses
tôles en acier de voiture	ustensiles de cuisine	lames de couteaux
Navires en acier	industrie alimentaire	ressorts en acier, vilebrequins
ferrite inoxydable à 12 % Cr	aciers Cr/V pour réacteurs nucléaires	
Propriétés		
phases décrites par le diagramme de phase fer-carbone	phases décrites par le diagramme de Schaeffler	phases décrites par le diagramme fer-carbone et le diagramme TTT (transformation temps-température)
en équilibre à température ambiante (TA)	certaines alliages en équilibre à TA	n'est pas en équilibre à TA, mais stable
les propriétés mécaniques et la taille du grain dépendent du traitement thermique	les propriétés mécaniques et la taille du grain dépendent du pré-traitement thermo-mécanique	les propriétés mécaniques et la taille du grain dépendent fortement du traitement thermique
endurci en réduisant la taille du grain, par forgeage, en augmentant la quantité de carbone ou par nitration	endurci uniquement par travail à froid	de toute façon très dure – façonné par irradiation laser, induction thermique, etc.
grains de ferrite et perlite, avec cémentite (Fe_3C)	grains d'austénite	grains de martensite
ferromagnétique	pas ou faiblement magnétique	ferromagnétique

* *

Une chaîne de bicyclette est un objet étendu dépourvu de raideur. Toutefois, si elle est mise en rotation rapide, elle acquiert une raideur dynamique et peut rouler de haut en bas sur un plan incliné ou sur le sol. Cet effet surprenant peut être contemplé sur <http://www.iwf.de/NR/rdonlyres/EEFA7FDC-DDDC-490C-9C49-4537A925EFE6/718/C14825.asx> ou <http://www.iwf.de/NR/rdonlyres/EEFA7FDC-DDDC-490C-9C49-4537A925EFE6/793/C148292.smil>.



FIGURE 129 Les aciers ferritiques sont ccc (cubiques à corps centré), comme le montre le célèbre Atomium à Bruxelles, une partie d'un cristal de fer agrandi jusqu'à une hauteur de plus de 100 m (photo © Eric Vandeginste, le mot Atomium lui-même est déposé par Atomium – SABAM)

* *

Les dispositifs mécaniques ne sont pas abordés dans ce texte. Beaucoup de progrès sont aujourd'hui encore réalisés dans ce domaine. Par exemple, des individus ont construit des robots qui sont capables de rouler sur un monocycle. Mais même la physique de la conduite humaine du monocycle n'est pas simple.

Réf. 191

Réf. 192

* *

Il existe de nombreux arguments contre l'existence des atomes assimilés à des billes dures. Thomson-Kelvin le mit par écrit : « L'hypothèse monstrueuse de morceaux de matière infiniment forts et infiniment rigides. » Même si Thomson avait raison dans son commentaire, les atomes existent. Pourquoi ?

Réf. 193

Défi 474 s

QU'EST-CE QUI PEUT BOUGER DANS LA NATURE ?

Avant de passer à l'étape suivante pour décrire le mouvement de manière globale, nous allons examiner les possibilités de mouvement dans la vie quotidienne. Un tour d'horizon en est donné dans le [Tableau 30](#). Les domaines qui appartiennent à la vie quotidienne – le mouvement des fluides, de la matière, des types de matière, de la chaleur, de la lumière et de la charge – constituent les domaines de la physique des milieux continus.

Dans la physique des milieux continus, il y a trois domaines que nous n'avons pas encore étudiés : le mouvement de la charge électrique et de la lumière, appelé électrodynamique, le mouvement de la chaleur, appelé thermodynamique, et le mouvement du vide. Une fois que nous aurons exploré ces domaines, nous aurons achevé la première étape de notre description du mouvement : la physique des milieux continus. En physique des milieux continus, le mouvement et les entités mobiles sont décrits avec des

TABLEAU 30 Quantités étendues dans la nature, c'est-à-dire des quantités qui *s'écoulent* et *s'accumulent*.

DOMAINE	QUANTITÉ ÉTENDUE (TRANS- PORTEUR D'ÉNERGIE)	COURANT (INTENSITÉ DU FLUX)	QUAN- TITÉ INTRIN- SÈQUE (FORCE MOTRICE)	FLUX D'ÉNER- GIE (PUIS- SANCE)	RÉSISTANCE AU DÉPLA- CEMENT (INTENSITÉ DE LA CRÉATION D'ENTRO- PIE)
Rivières	masse m	écoulement massique m/t	différence de hauteur gh	$P = gh\,m/t$	$R_m = gh\,t/m$ [m ² /s kg]
Gaz	volume V	écoulement volumique V/t	pression p	$P = pV/t$	$R_V = p\,t/V$ [kg/s m ⁵]
Mécanique	quantité de mouvement $\mathbf{p}$	force $\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$	vitesse $\mathbf{v}$	$P = \mathbf{v} \cdot \mathbf{F}$	$R_p = t/m$ [s/kg]
	moment cinétique $\mathbf{L}$	couple $\mathbf{M} = d\mathbf{L}/dt$	vitesse angulaire $\boldsymbol{\omega}$	$P = \boldsymbol{\omega} \cdot \mathbf{M}$	$R_L = t/mr^2$ [s/kg m ²]
Chimie	quantité de matière n	écoulement de matière $I_n = dn/dt$	potentiel chimique μ	$P = \mu I_n$	$R_n = \mu t/n$ [Js/mol ²]
Thermo- dynamique	entropie S	écoulement d'entropie $I_S = dS/dt$	température T	$P = T I_S$	$R_S = T\,t/S$ [K ² /W]
Lumière	comme tout rayonnement sans masse, elle peut s'écouler mais ne peut s'accumuler.				
Électricité	charge q	courant électrique $I = dq/dt$	potentiel électrique U	$P = U I$	$R = U/I$ [Ω]
Magnétisme	on ne rencontre aucune source magnétique accumulable dans la nature.				
Physique nucléaire	des quantités étendues existent, mais n'apparaissent pas dans la vie quotidienne.				
Gravitation	un espace vide peut bouger et s'écouler, non observé dans la vie quotidienne.				

quantités continues qui peuvent prendre n'importe quelle valeur, y compris des valeurs arbitrairement petites ou arbitrairement grandes.

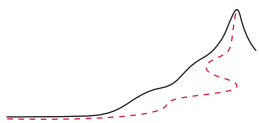
Mais la matière *n'est pas* continue. Nous avons déjà vu que la matière ne peut pas être indéfiniment divisée en entités toujours plus petites. En réalité, nous découvrirons qu'il existe des expériences précises qui définissent des limites aux valeurs observées pour *tous* les domaines de la physique des milieux continus. Il y a une limite à la masse, à la vitesse, au moment cinétique, à la force, à l'entropie et à la variation de la charge. Les

conséquences de ces découvertes forment la seconde étape de notre description du mouvement : la théorie quantique et la relativité. La théorie quantique est basée sur des limites microscopiques, la relativité est fondée sur des limites macroscopiques. La troisième et dernière étape de notre description du mouvement sera accomplie par l'unification de la théorie quantique et de la relativité générale.

Réf. 196

Chaque domaine de la physique, quelle que soit son appartenance à l'une de ces étapes précitées, décrit finalement le changement à l'aide de deux quantités : l'énergie et une quantité étendue caractéristique du domaine étudié. Une quantité observable est qualifiée d'*étendue* si elle augmente avec la taille du système. Le [Tableau 30](#) en fournit une synthèse. Les quantités intrinsèque et étendue associées à ce que nous appelons dans le langage courant la « chaleur » sont la *température* et l'*entropie*.





CHAPITRE 12

DE LA CHALEUR À L'INVARIANCE TEMPORELLE

Réf. 197

Nous continuons notre brève déambulation à travers le domaine des descriptions générales du mouvement avec un tour d'horizon sur la chaleur et les concepts principaux qui lui sont associés. Pour notre propos, nous n'aurons besoin de connaître que les principes fondamentaux de la chaleur. Les connaissances de base qui sont enseignées à l'école sont pour la plupart suffisantes.

TEMPÉRATURE

Les corps macroscopiques, c'est-à-dire les corps constitués de nombreux atomes, ont une température. La température d'un corps macroscopique est un élément de son état. On observe que deux corps quelconques en contact tendent ensemble à avoir la même température : la température est contagieuse. En d'autres termes, la température décrit une situation d'équilibre. L'existence de celle-ci et sa contagiosité sont souvent nommées le *principe zéro de la thermodynamique*. Le réchauffement est l'augmentation de la température.

Comment la température est-elle mesurée ? Le dix-huitième siècle mit le doigt sur la réponse la plus évidente : la notion qui définit et quantifie le mieux la température est celle de l'*expansion des gaz*. Pour l'exemple le plus simple, appelé gaz *parfait*, le produit de la pression p par le volume V est proportionnel à la température :

$$pV \sim T. \quad (89)$$

Réf. 198

Page 300

La constante de proportionnalité est fixée par la *quantité* de gaz utilisé. (Nous en saurons plus bientôt.) La relation du gaz parfait nous permet de déterminer la température en mesurant la pression et le volume. C'est de cette manière que la température (absolue) a été définie et mesurée durant environ un siècle. Pour définir l'*unité* de température, nous avons seulement besoin de fixer la quantité de gaz prise en considération. Il est coutumier de fixer cette quantité à 1 mol : pour l'oxygène cela correspond à 32 g. Cette constante de proportionnalité, appelée *constante du gaz parfait* R , est définie comme étant égale à $R = 8,3145 \text{ J/mol K}$. Ce nombre a été choisi dans le but d'obtenir la meilleure adéquation avec l'échelle de température établie indépendamment de celle-ci : le Celsius. En fixant la constante du gaz parfait de cette manière nous définissons 1 K, ou un Kelvin, comme étant l'unité de la température. En termes concis, une augmentation de température d'un Kelvin est définie comme étant l'augmentation de température qui provoque l'accroissement du volume d'un gaz parfait – à pression constante – d'un rapport de

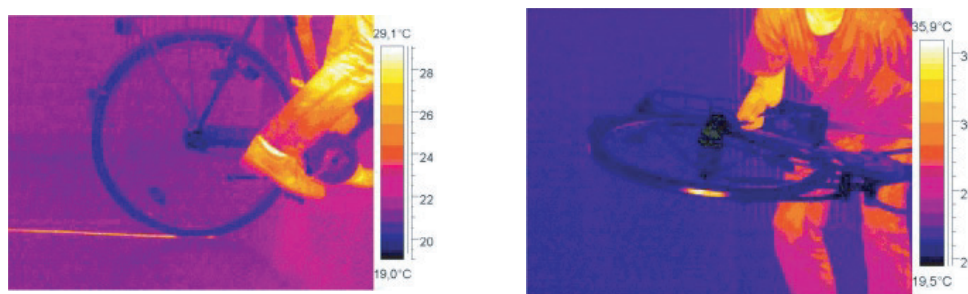


FIGURE 130 Le freinage produit de la chaleur sur le sol et dans le pneu. (© Klaus-Peter Möllmann et Michael Vollmer)

Défi 475 pe $1/273,15$ ou $0,3661\%$.

En règle générale, si nous avons besoin de déterminer la température d'un objet, nous prenons une mole de gaz, nous la mettons en contact avec l'objet, patientons un instant, et mesurons alors la pression et le volume du gaz. La relation (89) du gaz parfait détermine alors la température. De façon plus importante, la relation du gaz parfait indique qu'il existe une température la plus basse dans la nature, à savoir la température à laquelle un gaz parfait aurait un volume quasi nul. Cela devrait survenir à $T = 0\text{ K}$, c'est-à-dire à $-273,15\text{ °C}$. Certes, d'autres effets, comme le volume des atomes eux-mêmes, empêchent toujours le volume du gaz d'atteindre une valeur nulle. Le *troisième principe de la thermodynamique* fournit une autre raison pour laquelle cela est également impossible.

La température atteinte par une civilisation peut être utilisée comme une mesure de son progrès technologique. Nous pouvons définir l'âge du bronze (1,1 kK, 3500 av. J.-C.), l'âge du fer (1,8 kK, 1000 av. J.-C.), l'âge électrique (3 kK, à partir de env. 1880) et l'âge atomique (plusieurs MK, à partir de 1944) de cette manière. En tenant compte également de la quête vers les températures les plus basses, nous pouvons définir l'âge quantique (4 K, depuis 1908).

Réf. 199

Le réchauffement implique l'existence d'un flux d'énergie. Par exemple, le frottement chauffe et ralentit des corps en mouvement. Il y a longtemps, la « création » de la chaleur par du frottement fut même testée expérimentalement. On montra que la chaleur pouvait être produite à partir du frottement, à l'aide seulement d'une friction continue, sans aucune restriction (un exemple est indiqué dans la Figure 130). Cette « création » implique que la chaleur n'est pas un fluide matériel extorqué d'un corps – laquelle dans cette situation serait épuisée au bout d'un certain temps – mais quelque chose d'autre. En réalité, aujourd'hui, nous savons que la chaleur, bien qu'elle se comporte d'une certaine manière comme un fluide, est due au mouvement désordonné des particules. La conclusion de ces recherches est simple. Le frottement est la transformation de l'énergie mécanique en *énergie thermique*.

Réf. 195

Pour réchauffer 1 kg d'eau de 1 K avec du frottement, il faut transformer 4,2 kJ d'énergie mécanique. Le premier à avoir mesuré cette quantité avec précision fut, en 1842, le physicien allemand Julius Robert Mayer (1814–1878). Il considérait son expérience comme une preuve de la conservation de l'énergie. En réalité, il fut la première personne à formuler celle-ci ! Cela semble être embarrassant pour la physique moderne qu'un médecin fût le premier à démontrer la conservation de l'énergie et, du reste, qu'il fût ridiculisé par la plupart des physiciens de son époque. Pire, la conservation de l'énergie ne fut

TABLEAU 31 Quelques valeurs de température.

OBSERVATION	TEMPÉRATURE
Température la plus petite, mais inaccessible	0 K = $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$
Dans le cas des lasers, il peut parfois y avoir un sens à parler de température négative.	
Température qu'un vide parfait aurait à la surface de la Terre	40 zK
Gaz de sodium dans certaines expériences de laboratoire – système matériel le plus froid réalisé par l'homme et peut-être dans l'univers	0,45 nK
Température du fond cosmologique des neutrinos dans l'univers	$\approx 2\text{ K}$
Température du fond cosmologique du gaz de photons (ou fond de rayonnement cosmologique) dans l'univers	2,7 K
Hélium liquide	4,2 K
Point triple de l'oxygène	54,3584 K
Azote liquide	77 K
Temps le plus froid jamais mesuré (Antarctique)	185 K = $-88\text{ }^{\circ}\text{C}$
Point de congélation de l'eau à pression normale	273,15 K = $0,00\text{ }^{\circ}\text{C}$
Point triple de l'eau	273,16 K = $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$
Température moyenne à la surface de la Terre	287,2 K
La plus petite température inconfortable pour la peau	316 K (normale + 10 K)
Intérieur du corps humain	$310,0 \pm 0,5\text{ K} = 36,8 \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$
Temps le plus chaud mesuré	343,8 K = $70,7\text{ }^{\circ}\text{C}$
Point d'ébullition de l'eau à pression normale	373,13 K ou $99,975\text{ }^{\circ}\text{C}$
Bronze liquide	$\approx 1\,100\text{ K}$
Fer pur liquide	1 810 K
Point de congélation de l'or	1 337,33 K
Filament incandescent d'une ampoule	2,9 kK
Centre de la Terre	4 kK
Surface du Soleil	5,8 kK
L'air dans l'éclair foudroyant	30 kK
Surface d'étoile la plus chaude (au centre de NGC 2240)	250 kK
Espace entre la Terre et la Lune (il n'y a pas de coquille)	jusqu'à 1 MK
Centre du Soleil	20 MK
À l'intérieur du tokamak à fusion nucléaire JET	100 MK
Centre des astres les plus chauds	1 GK
Température maximale des systèmes sans création de paire électron-positron	$\approx 6\text{ GK}$
L'univers lorsqu'il avait 1 s	100 GK
Température de Hagedorn	1,9 TK
Collisions d'ions lourds – valeur max. anthropique	jusqu'à 3,6 TK
Température de Planck (la limite maximale des températures)	10^{32} K

acceptée que lorsqu'elle fut exprimée des nombreuses années plus tard par deux autori-

tés en la matière : Hermann von Helmholtz – lui-même également médecin reconverti en physicien – et William Thomson, qui avait également cité les recherches similaires mais postérieures de James Joule*. Chacun d'entre eux reconnut la prévalence de Mayer. La publicité faite par William Thomson conduisit par la suite à l'appellation de l'unité de l'énergie en l'honneur de Joule.

En résumé, la somme de l'énergie mécanique et de l'énergie thermique est constante. C'est ce que nous appelons généralement le *premier principe de la thermodynamique*. De manière équivalente, il est impossible de produire de l'énergie mécanique sans compenser celle-ci par une certaine autre forme d'énergie. C'est un énoncé fondamental, parce que par-dessus tout il signifie que l'humanité s'arrêtera de vivre un jour. En fait, nous vivons principalement grâce à l'énergie du Soleil, et puisque le Soleil est de taille finie, son contenu en énergie se consumera tôt ou tard. Pouvez-vous estimer quand cela surviendra ?

Défi 476 s

Il existe également un deuxième (en sus du troisième déjà mentionné) principe de la thermodynamique, lequel sera présenté plus loin. L'étude de ces thèmes est dénommée la *thermostatique* si les systèmes concernés sont en équilibre, et la *thermodynamique* s'ils ne le sont pas. Dans ce dernier cas, nous discernons les situations *proches* de l'équilibre, quand les concepts d'équilibre tels que la température peuvent encore être utilisés, des situations *éloignées* de l'équilibre, comme l'auto-organisation, où de tels concepts ne peuvent généralement pas être appliqués.

Page 275

Y a-t-il un sens à distinguer l'énergie thermique de la chaleur ? La réponse est oui. De nombreux textes anciens utilisent le mot « chaleur » pour exprimer la même chose que l'énergie thermique. Cependant cela est confus : dans ce texte « chaleur » est utilisé, en accord avec les pratiques modernes, comme étant le terme courant employé pour désigner l'entropie. L'énergie thermique et la chaleur s'écoulent d'un corps à un autre, et s'accumulent tous les deux. Ils n'ont aucune masse mesurable**. À la fois la quantité d'énergie thermique et la quantité de chaleur à l'intérieur d'un corps augmentent avec l'augmentation de température. La relation précise sera donnée sous peu. Mais la chaleur possède de nombreuses autres propriétés intéressantes et d'anecdotes à raconter. De celles-ci, deux sont particulièrement importantes : premièrement, la chaleur est issue des particules, et, deuxièmement, la chaleur est au cœur de la démarcation entre le passé et le futur. Ces deux histoires sont entrelacées.

* Hermann von Helmholtz (n. Potsdam 1821, d. Berlin 1894), scientifique prussien prépondérant. William Thomson (devenu plus tard Lord Kelvin) (1824–1907), éminent physicien irlandais. James Prescott Joule (1818–1889), physicien anglais. Joule est prononcé de telle façon qu'il rime avec « cool », comme ses descendants aiment à le souligner. (La prononciation du nom « Joule » varie d'une famille à l'autre.)

** Cela pourrait changer à l'avenir, quand les mesures des masses augmenteront en précision, permettant ainsi la détection d'effets relativistes. Dans ce cas, l'augmentation de température peut être détectée par le biais de son augmentation de masse associée. Toutefois, de tels changements sont perceptibles seulement avec une douzaine de chiffres, voire plus, dans la précision des mesures de masse.

Page 61

TABLEAU 32 Quelques valeurs mesurées d'entropie.

PROCESSUS / SYSTÈME	VALEUR D'ENTROPIE
Fonte de 1 kg de glace	1,21 kJ/K kg = 21,99 J/K mol
Eau dans des conditions normales	70,1 J/K mol
Ébullition de 1 kg d'eau liquide à 101,3 kPa	6,03 kJ/K = 110 J/K mol
Fer dans des conditions normales	27,2 J/K mol
Oxygène dans des conditions normales	161,1 J/K mol

ENTROPIE

« – C'est irréversible.
– Comme mon imperméable ! »
Mel Brooks, *Spaceballs*, 1987

Réf. 196 Chaque domaine de la physique décrit le changement en relation avec deux quantités : l'énergie et une quantité étendue caractéristique du domaine étudié. Bien que la chaleur soit reliée à l'énergie, la quantité que les physiciens nomment généralement chaleur *n'est pas* une quantité étendue. Pire, ce que les physiciens appellent chaleur n'est pas la même chose que ce que nous appelons chaleur dans notre langage courant. La quantité étendue correspondant à ce que nous appelons « chaleur » dans la langue courante est appelée *entropie**. L'entropie décrit la chaleur de la même façon que la quantité de mouvement décrit le mouvement. Lorsque deux objets différents en température sont mis en contact, un écoulement d'entropie a lieu entre eux, comme l'écoulement de la quantité de mouvement qui se produit lorsque deux objets de vitesses différentes se rencontrent. Définissons la notion d'entropie plus explicitement et explorons ses propriétés avec un peu plus de précision.

L'entropie mesure le degré de *mélange* de l'énergie à l'intérieur d'un système, c'est-à-dire comment l'énergie est répartie ou partagée parmi les constituants d'un système. Donc, l'entropie se cumule lorsque des systèmes identiques sont réunis pour n'en former qu'un. Quand deux bouteilles d'un litre d'eau à la même température sont versées ensemble, l'entropie de l'eau s'ajoute.

Comme n'importe quelle autre quantité étendue, l'entropie peut être accumulée dans un corps, elle peut s'écouler dans ou en dehors des corps. Lorsque l'eau est transformée en vapeur, l'entropie ajoutée dans l'eau est en réalité contenue dans la vapeur. En bref, l'entropie est ce qui est appelé « chaleur » dans notre langage quotidien.

Contrairement à plusieurs autres quantités étendues importantes, l'entropie n'est pas conservée. Le partage de l'énergie dans un système peut être accru, par exemple en le réchauffant. Cependant, l'entropie est « à moitié conservée » : dans les systèmes isolés, l'entropie ne décroît pas, le mélange ne peut pas être défait ou annulé. Ce qui est appelé équilibre est simplement la situation du mélange** le plus élevé possible. En résumé, l'en-

* Le terme « entropie » fut inventé par le physicien allemand Rudolph Clausius (1822–1888) en 1865. Il le formula à partir du grec *ἐν* « en » et *τρόπος* « direction », pour lui donner une consonance similaire à « énergie ». Il a toujours possédé la signification donnée ici.

** En physique, on parle plus exactement du *désordre* [N.D.T.].

tropie dans un système isolé augmente jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur la plus élevée possible.

Défi 477 pe Lorsqu'un morceau de rocher est détaché d'une montagne, il chute, dégringole dans la vallée, se réchauffe un petit peu, et en fin de compte s'immobilise. Le processus opposé, par lequel un rocher se refroidit et tombe vers le haut, n'est jamais observé. Pourquoi ? Le mouvement inverse ne contredit aucune loi ou aucun modèle que nous ayons déduit jusqu'à présent concernant le mouvement.

Réf. 200 Les rochers ne tombent jamais vers le haut parce que les montagnes, les vallées et les roches sont constituées de nombreuses particules. Les mouvements des systèmes comportant de nombreuses particules, particulièrement dans le domaine de la thermostatique, sont appelés des *processus*. La distinction entre des processus *réversibles*, tels que la trajectoire d'une pierre lancée, et des processus *irréversibles*, tels que la dégringolade du rocher mentionné ci-dessus, est centrale en thermostatique. Les processus irréversibles sont tous ces processus dans lesquels le frottement et ses généralisations jouent un rôle. Ils sont ceux qui augmentent la répartition ou le mélange de l'énergie. Ils sont prépondérants : s'il n'y avait pas de frottement, les boutons des chemises et les lacets des chaussures ne resteraient pas attachés, nous ne pourrions pas marcher ou courir, les machines à café ne pourraient délivrer du café, et, peut-être encore plus important que tout le reste, nous n'aurions pas de mémoire.

Page ??

Les processus irréversibles, au sens où ce terme est utilisé en thermostatique, transforment le mouvement macroscopique en mouvement désordonné de la part de tous les petits constituants microscopiques impliqués : ils augmentent le partage et le mélange de l'énergie. Les processus irréversibles ne sont donc pas *rigoureusement* irréversibles – mais leur renversement est extrêmement improbable. Nous pouvons dire que l'entropie mesure la « quantité d'irréversibilité » : elle quantifie le degré de mélange ou de désordre qu'un mouvement collectif a subi.

L'entropie n'est pas conservée. L'entropie – la « chaleur » – peut survenir de nulle part, puisque la répartition ou le mélange d'énergie peut se produire spontanément, de lui-même. Par exemple, quand deux liquides différents de même température sont mélangés – comme de l'eau avec de l'acide sulfurique – la température finale de la mixture peut être différente. De façon similaire, quand des courants électriques circulent à travers des matériaux à température ambiante, le système peut se réchauffer ou se refroidir, en fonction du matériau.

Défi 478 pe Le *second principe de la thermodynamique* déclare que « l'entropie n'est jamais ce qu'elle était ». Plus précisément, *l'entropie dans un système isolé tend vers son maximum*. Ici, un *système isolé* est un système qui n'échange pas d'énergie ou de matière avec son environnement. Pouvez-vous en imaginer un exemple ?

L'entropie ne décroît jamais. La vie de tous les jours montre que, dans un système isolé, le désordre augmente avec le temps, jusqu'à ce qu'il atteigne un certain maximum. Pour réduire le désordre, nous avons besoin d'exercer un effort, c'est-à-dire du travail et de l'énergie. En d'autres termes, afin de réduire le désordre dans un système, nous avons besoin de relier ce système à une source d'énergie d'une manière particulièrement élaborée. Les réfrigérateurs nécessitent du courant électrique précisément pour cette raison.

Parce que l'entropie ne diminue jamais, la *couleur blanche ne persiste jamais*. Toutes les fois que le désordre augmente, la couleur blanche devient « sale », habituellement grise ou marron. C'est probablement pour cette raison que les objets blancs, comme les vê-

tements blancs, les maisons blanches et les sous-vêtements blancs, sont appréciés dans notre société. Les objets blancs défient le désordre.

L'entropie permet de définir le concept d'*équilibre* plus précisément comme étant l'état d'entropie maximale, ou de répartition maximale d'énergie.

COURANT D'ENTROPIE

Nous savons par l'expérience quotidienne que le transport d'une quantité étendue implique systématiquement du frottement. Le frottement implique de la création d'entropie. En particulier, la circulation de l'entropie elle-même produit de l'entropie supplémentaire. Par exemple, quand un logement est chauffé, de l'entropie est produite dans les murs. Le réchauffement implique de conserver une différence de température ΔT entre l'intérieur et l'extérieur de l'appartement. Le flux J de chaleur traversant un mètre carré de mur est donné par

$$J = \kappa \Delta T = \kappa (T_i - T_e) \quad (90)$$

où κ représente une constante caractérisant l'aptitude du mur à conduire la chaleur. Pendant qu'il conduit la chaleur, le mur *produit* également de l'entropie. La création d'entropie σ est proportionnelle à la différence entre les courants d'entropie intérieur et extérieur. En d'autres termes, nous avons

$$\sigma = \frac{J}{T_e} - \frac{J}{T_i} = \kappa \frac{(T_i - T_e)^2}{T_i T_e} . \quad (91)$$

Remarquez que nous avons supposé dans ces calculs que tout ce qui est situé dans chaque tranche parallèle au mur est proche de l'équilibre, hypothèse raisonnable dans la vie courante. Un exemple typique d'un mur convenable possède une valeur $\kappa = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$ dans une échelle de températures situées entre 273 K et 293 K. Avec cette valeur, nous obtenons une création d'entropie de

$$\sigma = 5 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}^2\text{K} . \quad (92)$$

Défi 479 pe

Pouvez-vous comparer la quantité d'entropie qui est produite dans le courant avec celle qui est transportée ? En comparaison, un excellent duvet en plumes d'oie possède une valeur $\kappa = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, laquelle est également appelée 15 tog dans les magasins*.

Il existe deux autres manières, excepté la conduction de chaleur, pour transporter de l'entropie : la *convection*, utilisée par les appareils de chauffage domestiques, et le *rayonnement*, qui est possible uniquement à travers un espace vide. Par exemple, la Terre rayonne environ $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ dans l'espace, soit au total environ $0,51 \text{ PW/K}$. L'entropie est (presque) identique à celle que la Terre reçoit du Soleil. Si une quantité plus importante d'entropie devait être rayonnée au loin par rapport à celle reçue, la température

* Cette unité n'est pas plus ridicule que celle officielle $\text{BthU} \cdot \text{h/sqft/cm}^\circ\text{F}$ (ce n'est pas une blague) utilisée dans quelques provinces éloignées de notre galaxie.

La puissance d'isolation des matériaux est habituellement mesurée par la constante $\lambda = \kappa d$ qui est indépendante de l'épaisseur d de la couche isolante. Des valeurs relevées dans la nature s'échelonnent de $2\,000 \text{ W/Km}$ environ pour le diamant, qui est le meilleur conducteur de tous, à la valeur minuscule de $5 \cdot 10^{-3} \text{ W/Km}$ pour le gaz krypton, en passant par des valeurs comprises entre $0,1 \text{ W/Km}$ et $0,2 \text{ W/Km}$ pour le bois, entre $0,015 \text{ W/Km}$ et $0,05 \text{ W/Km}$ pour la laine, le liège et la mousse.

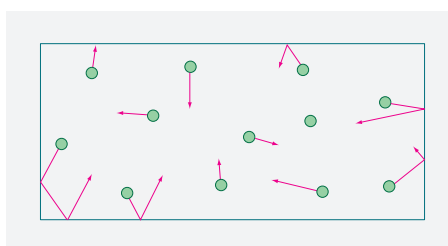


FIGURE 131 L'idée fondamentale de la mécanique statistique, concernant les gaz.



FIGURE 132 Daniel Bernoulli.

de la surface de la Terre devrait augmenter. C'est ce qui est appelé l'*effet de serre*. (Il est aussi nommé *réchauffement global*.) Espérons qu'il restera insignifiant dans les années à venir.

LES SYSTÈMES ISOLÉS EXISTENT-ILS ?

Jusqu'à présent, dans toute notre discussion nous avons supposé que nous pouvions distinguer le système en observation de son environnement. Mais de tels systèmes *isolés* ou *fermés*, c'est-à-dire des systèmes qui n'interagissent pas avec leur environnement, existent-ils réellement ? Notre propre existence humaine fut vraisemblablement le modèle originel de ce concept : nous ressentons la possibilité d'agir indépendamment de notre environnement. Un système isolé peut être simplement défini comme étant un système qui n'échange aucune énergie ou matière avec son milieu environnant. Durant de nombreux siècles, les scientifiques ne virent aucune raison de contester cette définition.

La notion de système isolé dut être clarifiée dans une certaine mesure avec l'avènement de la mécanique quantique. Néanmoins, cette notion fournit encore des descriptions utiles et précises de la nature dans ce domaine. Ce ne sera que dans la troisième partie de notre promenade qu'elle changera du tout au tout. Auparavant, la question de savoir si l'univers est un système isolé nous conduira à des résultats surprenants. (Qu'en pensez-vous* ?) Nous aborderons bientôt la première étape vers cette réponse.

Défi 480 s

POURQUOI LES BALLONS ONT-ILS BESOIN D'ESPACE ? – LA FIN DE LA CONTINUITÉ

Les propriétés de la chaleur dépendent du matériau. Leur étude devrait donc nous permettre de comprendre quelque chose concernant les constituants de la matière. Mainte-

* Une suggestion bizarre : votre réponse est presque certainement fausse.

nant, de toutes les substances, les plus simples sont les gaz*. Les gaz ont besoin d'espace : une certaine quantité de gaz possède une pression et un volume. En fait, il ne fallut pas beaucoup de temps pour montrer que les gaz *ne peuvent pas* être continus. Un des premiers scientifiques à imaginer les gaz comme étant constitués d'atomes fut Daniel Bernoulli**. Bernoulli argumenta que, si les atomes sont des petites particules dotées d'une masse et d'une quantité de mouvement, il devrait être capable de réaliser des prédictions quantitatives sur le comportement des gaz et de les vérifier grâce à l'expérience. Si les particules voltigent partout dans un gaz, alors la *pression* d'un gaz dans un récipient est produite par le flux régulier de particules frappant les parois. Il était alors facile de conclure que, si les particules sont supposées se comporter comme des minuscules billes dures et parfaitement élastiques, la pression p , le volume V et la température T doivent être reliés par l'égalité

Défi 481 pe

$$pV = \frac{3k}{2}NT \quad (93)$$

où N est le nombre de particules contenues dans le gaz. (La constante de Boltzmann k , une des constantes fondamentales de la nature, est définie ci-dessous.) Un gaz constitué de particules ayant un tel comportement théorique est appelé un *gaz parfait*. La relation (93) a été vérifiée par des expériences à température ambiante et d'autres à température plus élevée, pour tous les gaz connus.

Bernoulli dérivait ainsi cette relation pour les gaz, avec une prédiction particulière pour la constante de proportionnalité, à partir de l'unique hypothèse que les gaz sont constitués de petits composants massifs. Cette dérivation fournit un argument décisif en faveur de l'existence des atomes et de leur comportement similaire à celui d'objets ordinaires, bien que minuscules. (Pouvez-vous imaginer comment N pourrait être déterminé expérimentalement ?)

Défi 482 pe

Le modèle du gaz parfait nous permet de répondre à des questions telles que celle illustrée dans la **Figure 133**. Deux ballons de baudruche *identiques*, dont l'un est plus gonflé que l'autre, sont reliés via un tuyau et une valve. La valve est ouverte. Lequel des deux se dégonfle ?

Défi 483 s

La relation des gaz parfaits établit que des gaz plus chauds, à une pression donnée, requièrent plus de volume. Cette relation explique donc pourquoi les vents et les orages existent, pourquoi les ballons remplis d'air chaud s'élèvent, pourquoi les moteurs à explosion fonctionnent, pourquoi la couche d'ozone est détruite par certains gaz, ou pourquoi,

Défi 484 e

* Par ailleurs, le mot *gaz* est une construction moderne. Il fut inventé par l'alchimiste et physicien bruxellois Johan Baptista van Helmont (1579–1644), de façon à avoir une consonance similaire à « chaos ». C'est un de ces rares mots qui ont été inventés par une seule personne puis adoptés par la suite partout dans le monde.

** Daniel Bernoulli (n. Groningue 1700, d. Bâle 1782), fut un important mathématicien et physicien suisse. Son père Johann et son oncle Jakob étaient des mathématiciens célèbres, comme l'étaient ses frères et certains de ses neveux. Daniel Bernoulli publia beaucoup de résultats mathématiques et physiques. En physique, il étudia la décomposition du mouvement complexe en translation et en rotation. En 1738 il publia l'*Hydrodynamique*, dans lequel il déduisit tous les résultats à partir d'un unique principe, à savoir la conservation de l'énergie. Le *principe de Bernoulli*, ainsi nommé, établit pourquoi (et comment) la pression d'un fluide décroît lorsque sa vitesse augmente. Il étudia les marées et de nombreux problèmes mécaniques complexes, et interpréta la « loi » de Boyle–Mariotte pour les gaz. Pour la publication de ses travaux il obtint le prestigieux prix de l'Académie française des sciences – un précurseur du prix Nobel – à dix reprises.

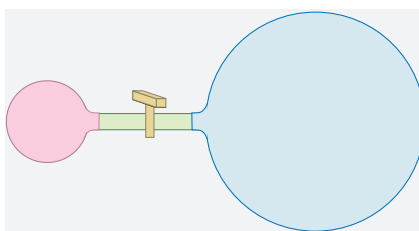


FIGURE 133 Quel ballon gagne ?

pendant l'été extrêmement chaud de 2001 dans le sud de la Turquie, les masques à oxygène étaient nécessaires pour se promener dehors en milieu de journée.

Défi 485 s Maintenant vous pouvez relever le défi suivant : comment pouvez-vous mesurer le poids d'une voiture ou d'un vélo uniquement avec une règle ?

Réf. 201 La métaphore des gaz, comme étant constitués d'éléments durs sans aucune interaction à longue distance, s'écroule à des températures très basses. Pourtant, la relation du gaz parfait (93) peut être améliorée pour surmonter ces embûches grâce à la prise en compte des variations dues aux interactions entre les atomes ou les molécules. Cette approche est aujourd'hui de pratique courante et nous permet de mesurer des températures, même à des valeurs extrêmement basses. Les effets observés en dessous de 80 K, tels que la solidification de l'air, la circulation du courant électrique sans aucun frottement, ou l'écoulement des liquides sans frottement, forment à eux seuls un domaine fascinant : le monde captivant de la physique des basses températures. Elle sera explorée plus loin.

Page ??, page ??

MOUVEMENT BROWNIEN

Réf. 203 Il est facile d'observer, sous un microscope, que des petites particules (comme du pollen) dans un liquide ne restent jamais au repos. Elles semblent suivre un mouvement en zigzag aléatoire. En 1827, le botaniste anglais Robert Brown (1773–1858) montra à l'aide d'une série d'expériences que cette observation est indépendante du type de particule et du type de liquide utilisé. En d'autres termes, Brown avait découvert un bruit fondamental dans la nature. Autour de 1860, ce mouvement était attribué aux molécules du liquide qui heurtent les particules. En 1905 et 1906, Marian von Smoluchowski et, indépendamment, Albert Einstein argumentèrent que cette théorie pouvait être testée expérimentalement, bien qu'à cette époque personne ne fût capable d'observer directement les molécules. Ce test tire profit des propriétés spécifiques du bruit thermique.

Défi 486 pe Il était déjà clair depuis longtemps que si les molécules, c'est-à-dire les particules indivisibles de matière, existaient réellement, alors la chaleur devait être un mouvement désordonné de ces constituants et la température devait être l'énergie moyenne par degré de liberté de ces éléments. Le modèle de Bernoulli de la Figure 131 suggère que, pour des gaz monoatomiques, l'énergie cinétique T_{cin} pour une particule est donnée par

$$T_{\text{cin}} = \frac{3}{2} kT \quad (94)$$

où T représente la température. La constante de Boltzmann déjà citée $k = 1,4 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

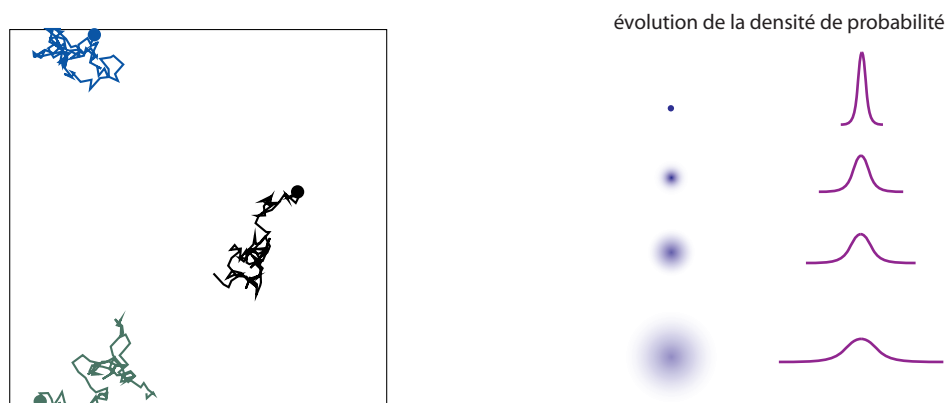


FIGURE 134 Exemples de trajectoires pour des particules en mouvement brownien et leur distribution de déplacements.

représente le facteur de conversion standard entre la température et l'énergie*. À la température ambiante de 293 K, l'énergie cinétique est ainsi de 6 zJ.

Défi 487 pe

Si l'on utilise la relation (94) pour calculer la vitesse des molécules de l'air à température ambiante, on aboutit à des valeurs de plusieurs centaines de mètres par seconde. Alors pourquoi la fumée issue d'une flamme met-elle si longtemps à se diffuser à travers une pièce ? Rudolph Clausius (1822–1888) répondit à cette question au milieu du dix-neuvième siècle : la diffusion est ralentie par les multiples collisions avec les molécules de l'air, de la même manière que les particules de pollen heurtent les molécules du liquide.

À première vue, nous pourrions stipuler que la distance moyenne que la particule de pollen a parcourue après n collisions devrait être nulle, parce que les vitesses des molécules sont aléatoires. Cependant, c'est faux, comme le montre l'expérience.

Défi 488 pe

Nous pouvons observer la moyenne du carré d'un déplacement, noté $\langle d^2 \rangle$, pour la particule de pollen. Nous ne pouvons pas prédire dans quelle direction la particule se déplacera, mais nous savons qu'elle se déplace. Si la distance que la particule parcourt après une collision est l , la moyenne du carré du déplacement après n collisions est donnée, comme vous devriez être capable de le montrer par vous-même, par

$$\langle d^2 \rangle = nl^2 . \quad (95)$$

Pour des molécules ayant une vitesse moyenne v au cours d'un temps t ceci donne

$$\langle d^2 \rangle = nl^2 = vlt . \quad (96)$$

* L'important physicien autrichien Ludwig Boltzmann (n. Vienne 1844, d. Duino 1906) est très célèbre pour ses travaux sur la thermodynamique, pour laquelle il interpréta tous les phénomènes thermodynamiques et les observables, y compris l'entropie, comme des conséquences du comportement des molécules. Planck baptisa la constante de Boltzmann en l'honneur de ses recherches. Il fut l'un des plus importants physiciens de la fin du dix-neuvième siècle et le précurseur de nombreux développements qui conduisirent à la théorie quantique. On dit que Boltzmann s'est suicidé en partie à cause de la réticence de la communauté scientifique à reconnaître ses idées. De nos jours, son œuvre constitue toujours le savoir de référence inculqué par les manuels.

TABLEAU 33 Quelques valeurs caractéristiques d'entropie par particule à température et pression *standards* comme multiples de la constante de Boltzmann.

MATIÈRE	ENTROPIE PAR PARTICULE
Solides monoatomiques	0,3 k à 10 k
Diamant	0,29 k
Graphite	0,68 k
Plomb	7,79 k
Gaz monoatomiques	15-25 k
Hélium	15,2 k
Radon	21,2 k
Gaz diatomiques	15 k à 30 k
Solides polyatomiques	10 k à 60 k
Liquides polyatomiques	10 k à 80 k
Gaz polyatomiques	20 k à 60 k
Eicosane	112 k

En d'autres termes, la moyenne du carré du déplacement augmente proportionnellement avec le temps. Bien sûr, ce n'est vrai que si le liquide est constitué de molécules séparées. En mesurant à plusieurs reprises la position d'une particule, on devrait obtenir la distribution indiquée dans la [Figure 134](#) pour la probabilité que la particule soit repérée à une distance donnée du point de départ. Celle-ci est appelée la *loi normale* (ou *distribution gaussienne*). En 1908, Jean Perrin* réalisa de vastes expériences dans le but de tester cette prédiction. Il trouva que l'équation (96) décrivait exactement les observations consignées, persuadant ainsi quiconque que le mouvement brownien est en réalité dû aux collisions avec les molécules du liquide environnant, comme Smoluchowski et Einstein l'avaient suggéré**. Perrin reçut le prix Nobel de physique de 1926 pour ces expériences.

Réf. 204

Einstein montra également que la même expérience pouvait être utilisée pour déterminer le nombre de molécules contenues dans un litre d'eau (ou, de manière équivalente, la constante de Boltzmann k). Pouvez-vous développer la manière dont il s'y prit ?

Défi 489 d

ENTROPIE ET PARTICULES

Une fois qu'il fut clair que la chaleur et la température sont dues au mouvement de particules microscopiques, les gens se demandèrent ce que l'entropie *représente* au niveau

* Jean Perrin (1870–1942), important physicien français, consacra la majeure partie de sa carrière à la recherche de la preuve expérimentale de l'hypothèse atomique et à la détermination du nombre d'Avogadro. Dans sa quête, il perfectionna l'usage des émulsions, du mouvement brownien et des films d'huile. Son discours de prix Nobel (<http://nobelprize.org/physics/laureates/1926/perrin-lecture.html>) relate l'histoire captivante de sa recherche. Il rédigea le livre incontournable *Les atomes* et fonda le Centre national de la recherche scientifique. Il était également le premier à postuler, en 1901, qu'un atome est similaire à un système solaire tout entier.

** Dans une ravissante démonstration expérimentale, Pierre Gaspard et son équipe montrèrent en 1998 que le mouvement brownien est également chaotique, au strict sens physique qui sera donné plus tard.

Page 266

microscopique. La réponse peut être formulée de plusieurs manières. Les deux réponses les plus radicales sont :

- L'entropie est le nombre attendu de questions à oui ou non, multiplié par $k \ln 2$, dont les réponses nous renseigneraient complètement sur la description du système, c'est-à-dire sur son état microscopique.
- L'entropie mesure le (logarithme du) nombre W d'états microscopiques possibles. Un état macroscopique donné peut avoir de nombreuses réalisations microscopiques. Le logarithme de ce nombre, multiplié par la constante de Boltzmann k , donne l'entropie*.

En résumé, plus l'entropie est élevée, plus il y a de micro-états possibles. À travers l'une ou l'autre de ces définitions, l'entropie mesure la quantité de hasard dans un système. En d'autres termes, elle mesure la transformabilité de l'énergie : une entropie plus élevée signifie que la transformabilité est moins importante. D'autre part, l'entropie quantifie la *liberté* dans le choix du micro-état qu'un système possède. Une forte entropie signifie un haut degré de liberté dans le choix du micro-état. Par exemple, quand une molécule de glucose (une sorte de sucre) est produite par la photosynthèse, environ 40 bits d'entropie sont libérés. Cela signifie qu'après que le glucose s'est formé 40 questions supplémentaires à oui ou non doivent trouver une réponse afin de déterminer l'état microscopique complet du système. Les physiciens utilisent fréquemment une unité macroscopique, la plupart des systèmes intéressants sont vastes, et donc une entropie de 10^{23} bits est notée 1 J/K^{**} .

Réf. 206

Pour résumer, l'entropie est donc une mesure particulière qui permet de quantifier le désordre dans des systèmes thermiques. Trois points méritent d'être soulignés. En premier lieu, l'entropie n'est pas *la* mesure du désordre, mais *une* mesure du désordre. Il est par conséquent *incorrect* d'utiliser l'entropie comme un *synonyme* du concept de désordre, comme il est souvent évoqué dans la littérature populaire. L'entropie n'est définie que pour des systèmes qui ont une température, en d'autres termes, uniquement pour des systèmes qui sont en équilibre ou proches de l'équilibre. (Pour des systèmes loin de l'équilibre, aucune mesure de désordre n'a été trouvée jusqu'à présent, peut-être parce qu'aucune d'entre elles n'est possible.) En fait, l'utilisation du terme entropie a tellement dégénéré que parfois nous sommes obligés de parler de l'entropie *thermodynamique* pour être plus clairs.

En second lieu, l'entropie est reliée à l'information *seulement si* l'information est aussi définie comme étant $-k \ln W$. Pour éclaircir ce point, prenez un livre d'une masse d'un kilogramme. À température ambiante, son contenu en entropie est d'environ 4 kJ/K . L'information imprimée à l'intérieur d'un livre, disons de 500 pages de 40 lignes ayant chacune 80 caractères parmi 64 possibilités, correspond à une entropie de $4 \cdot 10^{-17} \text{ J/K}$. En bref, ce qui est habituellement appelé « information » dans notre vie quotidienne représente une fraction négligeable de ce qu'un physicien nomme information. L'entropie est définie en utilisant le concept *physique* de l'information.

* Lorsque Max Planck se rendit en Autriche pour rechercher la tombe anonyme de Boltzmann dans le but de l'inhumer dans une tombe convenable, il inscrivit la formule $S = k \ln W$ sur la pierre tombale. (Quel physicien aurait, de nos jours, les moyens de financer la tombe d'un autre ?)

** Ce n'est qu'approximativement vrai. Pouvez-vous trouver la valeur exacte ?

Réf. 207
Défi 491 pe

Finalement, l'entropie n'est *pas* non plus une mesure de ce qui est appelé la *complexité* d'une situation dans la vie ordinaire. En réalité, personne n'a encore trouvé une quantité décrivant cette notion quotidienne. Cette tâche est étonnamment difficile. Essayez !

En résumé, si vous entendez le mot entropie utilisé avec une signification différente de $S = k \ln W$, méfiez-vous : quelqu'un est en train de vous rouler, probablement avec quelques idéologies.

L'ENTROPIE MINIMALE DE LA NATURE – LE QUANTUM D'INFORMATION

Avant que nous achevions complètement notre discussion sur la thermostatique, nous devons mettre le doigt d'une autre manière sur l'importance de la constante de Boltzmann k . Nous avons vu que cette constante apparaît à chaque fois que la granularité de la matière joue un rôle ; elle exprime le fait que la matière est constituée de petites entités élémentaires. La manière la plus saisissante de formuler cette vérité est la suivante : *il existe une entropie minimale dans la nature*. En réalité, pour tous les systèmes, l'entropie vérifie

$$S \geq \frac{k}{2} . \quad (97)$$

Ce résultat est vieux de presque 100 ans, il fut exprimé plus clairement (avec un facteur numérique différent) par le physicien hongro-allemand Leo Szilard. La même remarque fut soulevée par le physicien français Léon Brillouin (encore une fois avec un facteur numérique différent). Cette assertion peut également être prise pour la *définition* de la constante de Boltzmann.

Réf. 208

Réf. 209

L'existence d'une entropie minimale dans la nature est une idée profonde. Elle élimine la possibilité de la continuité de la matière et aussi celle de sa « fractalité ». Une entropie minimale implique que la matière est constituée d'un nombre fini de petits éléments. La limite de l'entropie exprime l'idée que la matière est faite de particules*. La limite de l'entropie montre également que la physique galiléenne ne peut pas être correcte : la physique galiléenne suppose que des quantités arbitrairement petites doivent exister. L'entropie limite est la première des diverses limites du mouvement que nous rencontrerons jusqu'à ce que nous achevions la seconde partie de notre ascension. Dès que nous aurons découvert toutes les limites, nous pourrons démarrer la troisième et dernière partie, qui conduit à l'unification.

La présence d'une quantité minimale suggère l'existence d'une limite sur la précision des mesures. Les mesures ne peuvent pas avoir une précision infinie. Cette limitation est généralement exprimée sous la forme d'une relation d'incertitude. En réalité, l'existence d'une entropie minimale peut être reformulée comme une relation d'incertitude entre la température T et l'énergie interne U d'un système :

$$\Delta \frac{1}{T} \Delta U \geq \frac{k}{2} . \quad (98)$$

* L'entropie minimale laisse sous-entendre que la matière est constituée de minuscules sphères. L'*action* minimale, que nous rencontrerons dans la théorie quantique, suggère implicitement que ces sphères sont en réalité des nuages miniatures.

Réf. 210 Cette relation* fut exprimée par Niels Bohr et fut discutée par Werner Heisenberg, qui
 Page ?? la catalogua comme l'un des principes d'incertitude fondamentaux de la nature. La
 Réf. 212 constante de Boltzmann (divisée par 2) cristallise ainsi la valeur de la plus petite entropie
 Réf. 209 possible dans la nature. Pour cette raison, Gilles Cohen-Tannoudji la qualifie de *quantum d'information* et Herbert Zimmermann la dénomme le *quantum d'entropie*.

L'expression (98) lève le voile sur une idée encore plus générale. Pour chaque valeur minimale attribuable à une observable, il existe un principe d'incertitude associé. Nous soulignerons plusieurs fois cette remarque durant le reste de notre aventure, et de façon la plus importante lorsque nous aborderons le quantum d'action et le principe d'incertitude de Heisenberg.

La mise en évidence d'une entropie minimale possède de nombreuses conséquences. En tout premier lieu, elle met en lumière le troisième principe de la thermodynamique. Une entropie minimale implique que le zéro absolu de la température ne peut être atteint. Deuxièmement, une entropie minimale explique pourquoi les valeurs d'entropie sont finies et non pas infinies. Troisièmement, elle détermine la valeur absolue de l'entropie pour chaque système. En physique des milieux continus, l'entropie, comme l'énergie, n'est définie qu'à une constante additive près. La limite de l'entropie remédie à tous ces problèmes.

L'existence d'une valeur minimale pour une observable signifie qu'un principe d'incertitude existe entre deux quantités quelconques dont le produit donne cette observable. Par exemple, le taux de production d'entropie et le temps forment une telle paire. En réalité, un principe d'incertitude relie le taux de production d'entropie $P = dS/dt$ et le temps t :

$$\Delta P \Delta t \geq \frac{k}{2} . \quad (99)$$

Réf. 212, Réf. 211 À partir de celui-ci et de la relation antérieure (98) il est possible de déduire tous les
 Défi 492 pe résultats de la physique statistique, c'est-à-dire la théorie précise de la thermostatique et de la thermodynamique. Nous n'explorerons pas davantage celle-ci ici. (Pouvez-vous montrer que le principe zéro découle de l'existence d'une entropie minimale ?) Nous nous restreindrons à l'une des pierres angulaires de la thermodynamique : le deuxième principe.

POURQUOI NE POUVONS-NOUS PAS NOUS SOUVENIR DU FUTUR ?

« Une mémoire qui n'opère que dans le passé n'a rien de bien fameux, déclara la Reine.
 Lewis Carroll, *Alice au pays des merveilles* – De l'autre côté du miroir »

Page 32 Auparavant, lorsque nous avons discuté du temps, nous ignorions la différence entre le passé et le futur. Mais manifestement une différence existe, puisque nous n'avons pas la faculté de nous remémorer le futur. Ce n'est pas une restriction due uniquement à notre cerveau. Tous les appareils que nous avons inventés, tels que les magnétophones, les appareils photographiques, les journaux et les livres, nous transmettent des informations uniquement sur le passé. Existe-t-il une manière de concevoir un caméscope doté d'un

Réf. 211 * Il apparaît que la valeur historique du terme de droite, donné par k , doit être rectifiée par $k/2$.

Défi 493 pe bouton « futur » ? Une telle fonction aurait à résoudre un sérieux problème : comment distinguerait-elle le futur proche du futur éloigné ? Il n'y a pas besoin de réfléchir énormément pour s'apercevoir que n'importe quelle façon de la mettre en œuvre entrerait en conflit direct avec le second principe de la thermodynamique. C'est un manque de chance, car nous aurions précisément besoin de ce dispositif pour prouver qu'il existe un mouvement plus rapide que la lumière. Pouvez-vous découvrir ce rapport ?

Défi 494 pe En résumé, le futur ne peut pas être connu à l'avance parce que des systèmes isolés tendent toujours vers un état d'entropie maximale. Dit encore plus simplement, la mémoire existe car le cerveau est fait de nombreuses particules, et donc le cerveau en est réduit au passé*. Cependant, pour les types de mouvement les plus simples, dans lesquels quelques particules seulement sont impliquées, la différence entre le passé et le futur s'évanouit. Pour des systèmes dotés d'un petit nombre de particules, il n'y a aucune distinction entre des temps qui s'éloignent et des temps qui s'approchent de l'instant présent. Nous pouvons dire que le futur diffère du passé uniquement dans notre cerveau, ou, de manière équivalente, uniquement à cause du frottement. Par conséquent, la différence entre le passé et le futur n'est pas souvent évoquée dans cette promenade, bien qu'elle représente une partie essentielle de notre expérience humaine. Mais tout le plaisir de cette présente aventure est justement de pouvoir dépasser nos limites.

EST-CE QUE TOUT EST FAIT DE PARTICULES ?

« Un physicien est la réalisation des atomes pour comprendre les atomes. »

George Wald

Réf. 213

Historiquement, l'étude de la mécanique statistique a été d'une importance cruciale pour la physique. Elle a fourni la première démonstration que des objets physiques sont constitués de particules en interaction. L'histoire de ce domaine représente en fait une longue chaîne de découvertes montrant que toutes les propriétés que nous attribuons aux objets, comme la taille, la rigidité, la couleur, la masse volumique, le magnétisme, la conductivité électrique ou thermique, sont issues des interactions entre les nombreuses particules dont ils sont composés. La révélation que *tous les objets sont constitués de particules en interaction* a souvent été citée comme étant la principale découverte de la science moderne.

Page 248 Comment cette découverte fut-elle réalisée ? Le [Tableau 30](#) listait les principales quantités étendues utilisées en physique. Les quantités étendues sont capables de s'écouler. Il apparaît que tous les écoulements dans la nature sont *composés* de processus élémentaires, comme indiqué dans le [Tableau 34](#). Nous avons vu que les flux de masse, de volume, de charge, d'entropie et de substance sont composés. Plus tard, la théorie quantique montrera la même chose à propos du flux de la quantité de mouvement et du moment cinétique. *Tous les écoulements sont constitués de particules.*

Réf. 214 Le succès de cette idée a incité beaucoup de gens à la généraliser jusqu'à cette déclaration : « Tout ce que nous observons est constitué de parties. » Cette approche a été appliquée avec succès à la chimie avec les molécules, aux sciences des matériaux et à la

* Ou, dit encore autrement, le cerveau est « obligé » d'évoluer d'un état d'entropie donnée vers un état de plus forte entropie [N.D.T.].

TABLEAU 34 Quelques valeurs minimales de flux relevées dans la nature.

OBSERVATION	VALEUR MINIMALE
Flux de matière	une molécule, un atome ou une particule
Flux volumique	une molécule, un atome ou une particule
Flux de quantité de mouvement	constante de Planck divisée par la longueur d'onde
Flux de moment cinétique	constante de Planck
Quantité chimique d'une substance	une molécule, un atome ou une particule
Flux d'entropie	entropie minimale
Flux de charge	charge élémentaire
Flux de lumière	constante de Planck divisée par la longueur d'onde

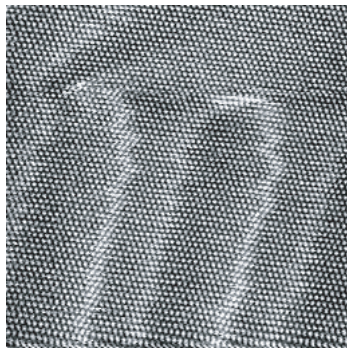


FIGURE 135 Une surface d'un unique cristal d'or (111), chaque point lumineux étant un atome, avec un déboîtement de sa surface. (© CNRS)

géologie avec les cristaux, à l'électricité avec les électrons, aux atomes avec les particules élémentaires, à l'espace avec les points, au temps avec les instants, à la lumière avec les photons, à la biologie avec les cellules, à la génétique avec les gènes, à la neurologie avec les neurones, aux mathématiques avec les ensembles et les relations, à la logique avec les propositions élémentaires, et même à la linguistique avec les morphèmes et les phonèmes. Toutes ces sciences se sont développées sur l'idée que tout est constitué de *parties* en relation. Cette idée élémentaire est si évidente en soi que nous éprouvons beaucoup de difficulté à en formuler une alternative. Essayez seulement !

Toutefois, dans le cas de la nature *tout* entière, l'idée que celle-ci soit une somme de parties en relation est inexacte. Elle s'avère être seulement un préjugé, et un préjugé si enraciné qu'il retarda des évolutions postérieures en physique dans les dernières décennies du vingtième siècle. En particulier, elle *ne* s'applique *pas* aux particules élémentaires ou à l'espace-temps. La révélation de la véritable description de la totalité de la nature est le défi le plus redoutable et le plus passionnant de notre aventure, car il nécessite un renversement complet de nos habitudes de réflexion. Ce sujet renferme énormément de surprises ludiques.

La Montagne Mouvement - L'Aventure de la Physique Traduit de l'anglais par Benoit Clenet - disponible gratuitement sur www.motionmountain.net Copyright © Christoph Schiller Novembre 1997-Mai 2010

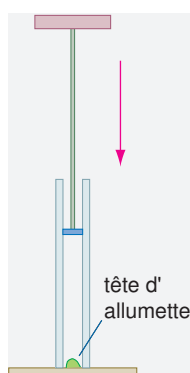


FIGURE 136 La pompe à combustion.

« Jede Aussage über Komplexe läßt sich in eine Aussage über deren Bestandteile und in diejenigen Sätze zerlegen, welche die Komplexe vollständig beschreiben*.
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 2.0201 »

POURQUOI LES PIERRES NE PEUVENT ÊTRE NI CONTINUES NI FRACTALES, NI FAITES DE PETITES BILLES DURES

L'exploration de la température produit un autre résultat intéressant. Les chercheurs étudièrent d'abord les gaz, et mesurèrent quelle quantité d'énergie était nécessaire pour les réchauffer de 1 K. Le résultat est étonnamment simple : tous les gaz se partagent seulement quelques valeurs, lorsque le nombre de molécules N est pris en considération. Les gaz monoatomiques (situés dans un récipient à un volume constant) nécessitent une énergie de $3Nk/2$, les gaz diatomiques (et ceux qui possèdent une molécule linéaire) $5Nk/2$, et la majorité des autres gaz $3Nk$, où $k = 1,4 \cdot 10^{-23}$ J/K est la constante de Boltzmann.

Page 260

L'explication de cette constatation allait bientôt poindre : chaque degré de liberté thermodynamique** contribue à une énergie de $kT/2$ sur l'énergie totale, où T représente la température. Donc le nombre de degrés de liberté dans les corps physiques est fini. Les corps ne sont pas continus, ils ne sont pas fractals non plus : s'ils l'étaient, leur énergie thermique spécifique*** serait infinie. La matière est donc en réalité constituée de petites entités élémentaires.

Tous les degrés de liberté contribuent à l'énergie thermique spécifique. Du moins, c'est ce que les physiciens classiques prédisent. Les solides, comme les pierres, possèdent 6 degrés de liberté thermodynamiques et devraient comporter une énergie thermique spécifique de $3Nk$. À haute température, c'est ce qui est réellement observé. Mais les

* « Tout énoncé portant sur des complexes se laisse analyser en un énoncé sur leurs éléments et en propositions telles qu'elles décrivent complètement ces complexes. »

** Un *degré de liberté thermodynamique* est, pour chaque particule d'un système, le nombre de dimensions dans lesquelles elle peut se déplacer plus le nombre de dimensions dans lesquelles elle est retenue dans un potentiel. Des atomes dans un solide en ont six, des particules dans des gaz monoatomiques n'en ont que trois, des particules dans des gaz diatomiques ou des molécules linéaires rigides en ont cinq. Le nombre de degrés de liberté des molécules plus grandes dépend de leur forme.

Réf. 215

*** Qui représente la quantité d'énergie thermique par unité de masse [N.D.T.].

mesures effectuées sur les solides à température ambiante produisent des valeurs plus basses, et, plus la température est basse, plus la valeur devient petite. Même les gaz indiquent des valeurs inférieures à celles mentionnées ci-dessus lorsque la température est suffisamment basse. En d'autres termes, les molécules et les atomes se comportent différemment à des énergies très basses : les atomes ne sont pas des petites billes dures inchangeables. La variation de ces valeurs constitue l'un des premiers indices vers l'avènement de la théorie quantique.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LA CHALEUR

La compression de l'air accroît sa température, ce qui est indiqué directement par la pompe à combustion, une variante de la pompe à vélo, représentée sur la [Figure 136](#). (Pour voir un exemplaire en fonctionnement, consultez le site <http://www.tn.tudelft.nl/cdd>.) Une tête d'allumette au fond d'une pompe à air faite d'un matériau transparent est facilement enflammée par la compression de l'air au-dessus d'elle. La température de l'air après la compression est si élevée que le bout de l'allumette s'enflamme spontanément.

* *

Si la chaleur est véritablement un mouvement désordonné d'atomes, un énorme problème surgit. Lorsque deux atomes se frappent de plein fouet, à l'instant où leur distance est la plus petite, ils ont une vitesse nulle. Où l'énergie cinétique part-elle ? Certes, elle est transformée en énergie potentielle. Mais cela implique alors que les atomes peuvent être déformés, qu'ils possèdent une structure interne, qu'ils sont constitués de parties, et qu'ils peuvent donc en principe être brisés. En bref, si la chaleur est un mouvement atomique désordonné, *les atomes ne sont pas indivisibles* ! Au dix-neuvième siècle, cet argument fut avancé pour montrer que la chaleur ne peut pas être un mouvement atomique, mais doit être une certaine espèce de fluide. Mais puisque nous tenons pour certain que la chaleur est réellement de l'énergie cinétique, les atomes doivent en réalité être divisibles, bien que leur nom signifie « indivisible ». Nous n'avons pas besoin de mener une expérience onéreuse pour le montrer.

* *

Réf. 216 En 1912, Émile Borel remarqua que, si un gramme de matière était déplacé d'un centimètre sur Sirius, cela modifierait le champ gravitationnel de la Terre d'une quantité minuscule. Ce changement infinitésimal serait suffisant pour rendre la trajectoire des molécules dans un gaz impossible à calculer au bout d'une fraction de seconde.

* *

Défi 496 s Non seulement les gaz, mais également la plupart des autres matériaux voient leur volume augmenter lorsque la température s'élève. En conséquence, les câbles électriques supportés par les pylônes pendent beaucoup plus bas en été qu'en hiver. Est-ce vrai ?

* *

Réf. 217 Ce qui suit est un célèbre problème dû à Fermi. Étant donné qu'un cadavre humain se refroidit en quatre heures après le décès, quel est le nombre minimal de calories nécessaires

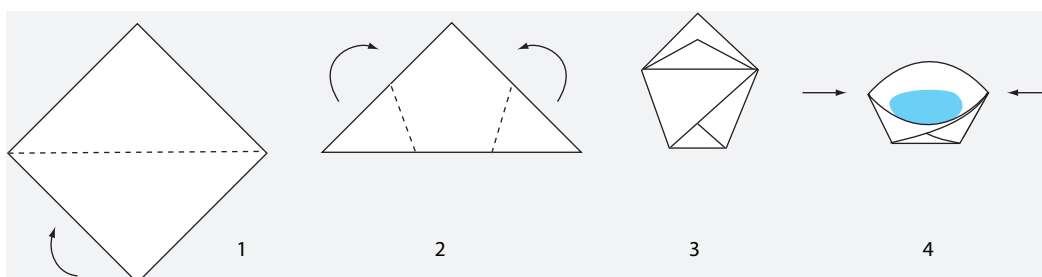


FIGURE 137 Pouvez-vous faire bouillir de l'eau dans cette tasse en papier ?

Défi 497 pe par jour dans notre alimentation ?

* *

L'énergie contenue dans le mouvement thermique n'est pas insignifiante. Une balle de fusil de 1 g voyageant à la vitesse du son possède une énergie cinétique d'uniquement 0,01 kcal.

* *

Défi 498 s Comment un ballon d'air chaud ordinaire de $1\,500\text{ m}^3$ fonctionne-t-il ?

* *

Si vous ne trouvez pas ce texte passionnant, voici une suggestion. Vous pouvez utiliser du papier pour réaliser une tasse, comme indiqué sur la Figure 137, et faire bouillir de l'eau contenue dedans au-dessus d'une flamme. Cependant, pour réussir, vous devez être un

Défi 499 s tant soit peu prudent. Pouvez-vous indiquer de quelle manière ?

* *

Défi 500 pe Le mélange de 1 kg d'eau à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ et de 1 kg d'eau à $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ donne 2 kg d'eau à $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Quel est le résultat du mélange de 1 kg de *glace* à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ et de 1 kg d'eau à $100\text{ }^{\circ}\text{C}$?

* *

Réf. 218 La température de l'air la plus élevée jamais enregistrée dans laquelle un homme a survécu est $127\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cette expérience fut menée en 1775 à Londres par le secrétaire de la Royal Society, Charles Blagden, accompagné de quelques-uns de ses amis, qui demeura dans une pièce à cette température durant 45 minutes. De façon intéressante, le bifteck saignant qu'il avait pris avec lui était cuit (« bien cuit ») quand lui et ses amis quittèrent la pièce. Quelle condition devait être scrupuleusement respectée afin d'empêcher de cuire

Défi 501 s les individus de la même manière que le bifteck ?

* *

Défi 502 s Pourquoi l'eau bout-elle à $99,975\text{ }^{\circ}\text{C}$ au lieu de $100\text{ }^{\circ}\text{C}$?

* *

Défi 503 s Pouvez-vous remplir une bouteille avec exactement $1 \pm 10^{-30}\text{ kg}$ d'eau ?

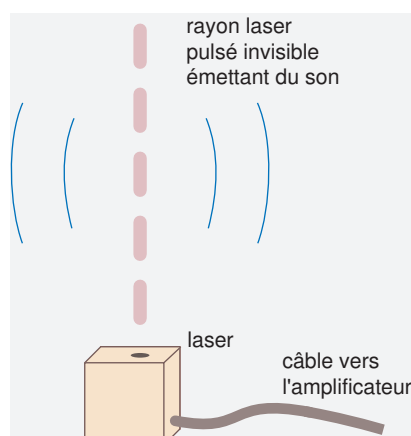


FIGURE 138 Le haut-parleur invisible.

* *

Un gramme de graisse, que ce soit du beurre ou de la graisse humaine, contient 38 kJ d'énergie chimique (ou, en unités anciennes plus familières aux nutritionnistes, 9 kcal). C'est la même valeur que celle de l'essence. Pourquoi les gens et le beurre sont-ils moins dangereux que l'essence ?

Défi 504 s

* *

En 1992, le physicien hollandais Martin van der Mark inventa un haut-parleur qui fonctionne en chauffant l'air avec un rayon laser. Il démontra que, avec la bonne longueur d'onde et une modulation convenable de l'intensité, un rayon laser dans l'air peut générer du son. Cet effet à la base de ce dispositif, appelé *effet photoacoustique*, se révèle dans de nombreux matériaux. La meilleure longueur d'onde du laser pour l'air est située dans le domaine de l'infrarouge, sur l'une des quelques lignes d'absorption du spectre de la vapeur d'eau. En d'autres termes, un rayon laser infrarouge correctement modulé qui rayonne à travers l'atmosphère produit du son. Une telle lumière peut être émise à partir d'un petit semi-conducteur à laser de la taille d'une boîte d'allumettes masquée au plafond et dirigée vers le bas. Le son est émis dans toutes les directions perpendiculaires au rayon. Puisque la lumière laser infrarouge n'est pas visible, Martin van der Mark inventa un haut-parleur invisible ! Malheureusement, l'efficacité des modèles actuels reste encore faible, de sorte que la puissance du haut-parleur n'est pas encore suffisante pour des applications pratiques. Les progrès dans la technologie des lasers devraient changer la donne, de telle sorte qu'à l'avenir nous devrions être capables d'entendre des sons qui sont émis depuis le centre d'une pièce apparemment vide.

* *

Une célèbre question d'examen : comment pouvez-vous mesurer la hauteur d'un immeuble à l'aide d'un baromètre, d'une corde et d'une règle ? Découvrez au moins six manières différentes d'y répondre.

Défi 505 s

* *

Défi 506 pe Quelle est la probabilité approximative que, parmi un million de lancers d'une pièce de monnaie, vous obteniez exactement 500 000 fois pile et autant de fois face ?

Vous aurez certainement besoin de la formule de Stirling $n! \approx \sqrt{2\pi n} (n/e)^n$ pour calculer la réponse*.

* *

Défi 507 s Parler de l'entropie de l'univers a-t-il un sens ?

* *

Défi 508 pe Un ballon gonflé à l'hélium peut-il soulever le réservoir qui a servi à le remplir ?

* *

Tous les processus faisant intervenir du frottement, telles l'osmose, la diffusion, l'évaporation, ou la dégénérescence, sont *lents*. Ils prennent un certain temps caractéristique. Il apparaît que n'importe quel processus (macroscopique) doté d'une échelle de temps est irréversible. Ce n'est pas une véritable surprise : nous savons intuitivement que défaire des choses prend toujours plus de temps que de les faire. C'est une nouvelle fois une manifestation du deuxième principe de la thermodynamique.

* *

Réf. 219 Il apparaît que le *stockage* de l'information est possible avec une création d'entropie minime. Cependant, l'*effacement* de l'information réclame de l'entropie. C'est la raison principale pour laquelle les ordinateurs, ainsi que les cerveaux, ont besoin de sources d'énergie et de systèmes de refroidissement, même si leurs mécanismes n'avaient, mis à part cela, pas besoin d'énergie.

* *

Défi 509 pe Lorsque nous mélangeons du rhum chaud avec de l'eau froide, quelle est la proportion entre l'augmentation de l'entropie due au mélange et l'augmentation de l'entropie due à la différence de température ?

* *

Défi 510 s Pourquoi n'y a-t-il pas de petits hommes, par exemple d'une taille de 10 mm, comme dans de nombreux contes de fées ? En fait, il n'existe aucun animal à sang chaud de cette taille. Pourquoi ?

* *

Éclairer un objet avec un rayon lumineux puis l'éteindre et le rallumer à plusieurs reprises produit du son. Ceci est appelé l'*effet photoacoustique*, et est dû à l'expansion thermique du matériau. En modifiant la fréquence de la lumière, et en mesurant l'intensité du bruit, nous dévoilons un spectre photoacoustique caractéristique du matériau. Cette méthode nous permet de détecter des concentrations gazeuses dans l'air d'une partie pour 10^9 . Elle est utilisée, parmi d'autres méthodes, pour étudier les gaz émis par

* Il existe de nombreuses variantes de la formule de Stirling, dont une, élémentaire : $n! \approx \sqrt{(2n+1/3)\pi} (n/e)^n$. Une autre est $\sqrt{2\pi n} (n/e)^n e^{1/(12n+1)} < n! < \sqrt{2\pi n} (n/e)^n e^{1/(12n)}$.

les plantes. Les plantes émettent du méthane, de l'alcool et de l'acétaldéhyde en petites quantités, l'effet photoacoustique peut détecter ces gaz et nous aider à comprendre le processus sous-jacent à leur émission.

* *

Défi 511 pe Quelle est la probabilité approximative pour que toutes les molécules d'oxygène de l'air quittent une ville donnée pendant quelques minutes, tuant ainsi tous les habitants ?

* *

Défi 512 pe Si vous versez un litre d'eau dans la mer et que vous le mélangez complètement à travers tous les océans, et qu'alors vous soutirez un litre de ce mélange, quelle quantité des atomes originaux récupérerez-vous ?

* *

Défi 513 pe Combien de temps resteriez-vous à respirer dans la pièce dans laquelle vous vous trouvez si elle était hermétique ?

* *

Défi 514 pe Qu'est-ce qui se passe si vous déposez un peu de cendre sur un morceau de sucre et que vous mettez le feu à l'ensemble ? (Attention : c'est dangereux et pas pour les enfants.)

* *

Défi 515 pe Les calculs sur l'entropie sont souvent étonnants. Pour un système de N particules ayant chacune deux états possibles, il y a $W_{\text{tout}} = 2^N$ états. La configuration la plus probable, avec exactement la moitié des particules dans un état et l'autre moitié dans l'autre état, nous donne $W_{\text{max}} = N!/((N/2)!)^2$. Maintenant, pour un système macroscopique de particules, nous devrions avoir typiquement $N = 10^{24}$. Cela donne $W_{\text{tout}} \gg W_{\text{max}}$; en réalité, le premier est 10^{12} fois plus grand que le second. D'un autre côté, nous trouvons que les 20 premiers chiffres de $\ln W_{\text{tout}}$ et $\ln W_{\text{max}}$ coïncident ! Bien que la configuration avec exactement la moitié des particules dans chaque état soit beaucoup plus rare que le cas général, où ce rapport peut varier, l'entropie se révèle être la même. Pourquoi ?

Défi 516 pe

* *

Défi 517 pe Si la chaleur est due au mouvement des atomes, nos facultés sensorielles de perception de la chaleur et du froid sont simplement des détecteurs de mouvement. Comment pourraient-elles fonctionner ?

Défi 518 pe Par ailleurs, les sens de l'odorat et du goût peuvent également être assimilés à des détecteurs de mouvement, puisqu'ils signalent la présence de molécules se baladant dans l'air ou dans des liquides. Êtes-vous d'accord avec cette idée ?

* *

Défi 519 s La Lune possède une atmosphère, bien qu'extrêmement ténue, composée de sodium (Na) et de potassium (K). Cette atmosphère a été détectée jusqu'à neuf rayons lunaires à partir de sa surface. Cette atmosphère de la Lune est produite à la surface par le rayonnement ultraviolet issu du Soleil. Pouvez-vous estimer la densité atmosphérique de la Lune ?

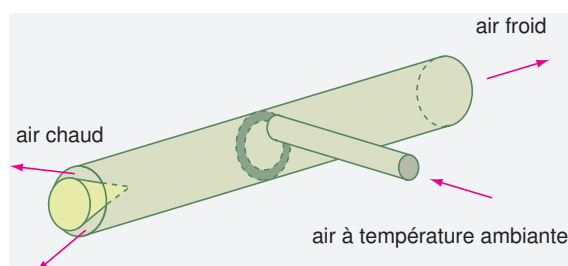


FIGURE 139 Le tube à tourbillons de Wirbelrohr ou de Ranque-Hilsch.

* *

Défi 520 pe Est-il sensé d'ajouter une ligne au [Tableau 30](#) concernant la quantité d'action physique ? Une colonne ? Pourquoi ?

* *

Défi 521 s La diffusion fournit une échelle de longueur. Par exemple, les insectes assimilent l'oxygène à travers leur épiderme. Par conséquent, les parties intérieures de leur corps ne peuvent pas être situées à plus d'un centimètre environ de la surface. Pouvez-vous lister certaines autres échelles de longueur dans la nature sous-tendues par des processus de diffusion ?

* *

L'ascension de l'air chaud est la raison pour laquelle de nombreux insectes sont retrouvés dans des nuages en altitude à la tombée de la nuit. Beaucoup d'insectes, particulièrement ceux qui se nourrissent du sang des animaux, sont attirés par l'air chaud et humide.

* *

Défi 522 s Les thermomètres fondés sur le mercure peuvent atteindre 750 °C. Comment cela est-il possible, étant donné que le mercure bout à 357 °C ?

* *

Défi 523 s À quoi une bougie allumée dans des conditions d'apesanteur ressemble-t-elle ?

* *

Défi 524 s Il est possible de construire une centrale électrique en édifiant une grande cheminée, de telle façon que l'air chauffé par le Soleil s'écoule vers le haut dans celle-ci, entraînant une turbine dans son ascension. Il est également possible de réaliser une centrale électrique en mettant en œuvre un long tube vertical, et en y laissant un gaz tel que l'ammoniac s'élever dans celui-ci, lequel est alors liquéfié au sommet par les températures basses des couches supérieures de l'atmosphère. Quand il retombe dans un second tube comme un liquide – exactement comme la pluie – il entraîne une turbine. Pourquoi de tels projets, qui sont pour la plupart entièrement écologiques, ne sont-ils pas encore utilisés ?

* *

Le tube à tourbillons de Ranque-Hilsch ou de *Wirbelrohr* est un des dispositifs les plus

surprenants jamais inventés. En exhalant, au milieu de celui-ci, de l'air comprimé à température ambiante, deux écoulements d'air se forment à ses extrémités. L'un d'eux est extrêmement froid, pouvant atteindre facilement $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, et l'autre extrêmement chaud, allant jusqu'à $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Aucune partie mobile et aucun appareil de chauffage ne se trouvent à l'intérieur. Comment fonctionne-t-il ?

Défi 525 s

* *

Il est facile de faire cuire un œuf de telle façon que le blanc soit dur mais que le jaune d'œuf reste liquide. Pouvez-vous accomplir l'inverse ?

Défi 526 s

* *

Les moteurs thermoacoustiques, les pompes et les réfrigérateurs fournissent de nombreuses applications étranges et fascinantes de la chaleur. Par exemple, il est possible de produire un bruit élevé dans des cavités métalliques fermées pour déplacer de la chaleur d'un emplacement froid à un autre chaud. De tels dispositifs possèdent quelques parties mobiles et sont toujours en cours d'étude dans l'espoir de leur trouver des applications pratiques à l'avenir.

Réf. 220

* *

Est-ce qu'un système isolé contenant quelques particules contredit le deuxième principe de la thermodynamique ?

Défi 527 pe

* *

Qu'advient-il de l'entropie lorsque la gravitation est prise en compte ? Nous avons soigneusement mis de côté la gravitation dans notre discussion. En réalité, de nombreux problèmes surgissent – essayez simplement de réfléchir à ce sujet. Par exemple, Jakob Beckenstein a découvert que la matière atteint son entropie la plus élevée possible lorsqu'elle forme un trou noir. Pouvez-vous le confirmer ?

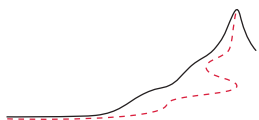
Défi 528 pe

* *

Les exposants et les trois premiers chiffres des valeurs numériques de la constante de Boltzmann $k = 1,38 \cdot 10^{-23}\text{ J/K}$ et de la combinaison h/ce concordent (mais pas les unités !), où h représente la constante de Planck et e est la charge de l'électron. Pouvez-vous montrer que cela n'est que pure coïncidence ?

Défi 529 pe





CHAPITRE 13

AUTO-ORGANISATION ET CHAOS – L'ÉLÉGANCE DE LA COMPLEXITÉ

“ Parler de la physique non linéaire c'est comme qualifier la zoologie d'étude des animaux autres que les éléphants. ”

Stanislaw Ulam

Réf. 221

Réf. 222

Défi 530 s

Dans notre énumération des descriptions générales du mouvement, le dernier point concerne l'étude de l'auto-organisation. L'auto-organisation est l'apparition de l'ordre. L'*ordre* est un mot qui fait référence aux *formes*, comme la symétrie complexe des flocons de neige, aux *motifs*, comme les rayures des zèbres, et aux *cycles*, comme l'harmonie musicale lors d'un chant. Chaque exemple de ce que nous appelons *beauté* est une combinaison de formes, de motifs et de cycles. (Êtes-vous d'accord ?) L'auto-organisation peut donc être définie comme étant l'étude de l'origine de la beauté.

L'apparition de l'ordre dans la nature est une observation générale que nous pouvons faire sur celle-ci. Les fluides en particulier exhibent de nombreux phénomènes où l'ordre apparaît et disparaît. Nous pouvons citer le vacillement plus ou moins régulier d'une bougie allumée, le claquement d'un drapeau dans le vent, le flot régulier des bulles jaillissant à partir de petites irrégularités dans la surface d'une coupe à champagne, et la chute régulière ou irrégulière des gouttes d'eau d'un robinet qui fuit.

L'apparition de l'ordre est relevée dans la différenciation cellulaire d'un embryon à l'intérieur du corps d'une femme, dans la formation des motifs colorés des tigres, des poissons tropicaux et des papillons, dans les agencements symétriques des pétales d'une fleur, dans la formation des rythmes biologiques et ainsi de suite.

Tous les processus de croissance sont des phénomènes d'auto-organisation. Avez-vous déjà médité sur la manière merveilleuse dont les dents croissent ? Un matériau pratiquement inorganique façonne des formes dans les rangées supérieures et inférieures des dents, s'ajustant exactement les unes aux autres. La façon dont ce processus est contrôlé constitue toujours un thème de recherche. De façon équivalente, la formation, avant et après la naissance, de réseaux de neurones dans le cerveau est un autre processus d'auto-organisation. Même les processus physiques sous-jacents à la pensée, impliquant des signaux électriques variables, doivent être décrits en termes d'auto-organisation.

L'évolution biologique est un cas exceptionnel de croissance. Prenez l'évolution des formes animales. Il apparaît que la langue des serpents est fourchue parce que c'est la forme la plus efficace pour suivre des traces chimiques laissées par des proies et d'autres serpents de la même espèce. (Les serpents flairent à l'aide de leur langue.) Le nombre fixe des doigts dans une main humaine ou des pétales d'une fleur est aussi une conséquence de l'auto-organisation.

Réf. 223

Page ??

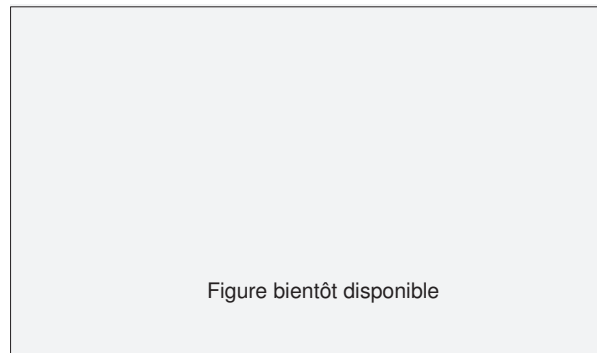


FIGURE 140 Exemples d'auto-organisation pour le sable.

TABLEAU 35 Motifs sur le sable dans la mer et sur la plage.

MOTIF	PÉRIODE	AMPLITUDE	ORIGINE
talus de sable	2 à 10 km	2 à 20 m	marées
dunes de sable	100 à 800 m	5 m	marées
méga-ondulations	1 m	0,1 m	marées
ondulations	5 cm	5 mm	vagues
sable musical	95 à 105 Hz	jusqu'à 105 dB	vent sur les dunes de sable, avalanches faisant vibrer la dune

Défi 531 e

De nombreux problèmes d'auto-organisation sont des problèmes mécaniques : par exemple, l'élaboration des chaînes de montagnes lorsque les continents bougent, la création des séismes ou la formation des agencements réguliers de nuages dans le ciel. Il peut être captivant de méditer, durant un voyage en avion quelque peu monotone, sur les mécanismes sous-jacents à la formation des nuages que vous apercevez depuis cet avion.

Les études sur les conditions requises pour l'apparition ou la disparition d'ordre ont montré que leur description ne nécessite qu'un petit nombre seulement de concepts élémentaires, indépendamment des détails du système physique étudié. Cela devient flagrant lorsque nous analysons quelques exemples.

Toute la richesse de l'auto-organisation se dévoile elle-même, tout simplement, dans l'étude du sable. Pourquoi les dunes de sable sont-elles ondulées, comme sur le sol sablonneux au fond de la mer ? Nous pouvons également étudier comment les avalanches se produisent sur les tas de sable escarpés et comment le sable se comporte dans les sabliers, dans les mixeurs ou dans les récipients en vibration. Ces résultats sont souvent étonnants.

Réf. 224

Par exemple, aussi récemment qu'en 1996, Paul Umbanhowar et ses collaborateurs découvrirent que, lorsqu'un récipient plat contenant de minuscules billes de bronze (autour de 0,165 mm de diamètre) est secoué de haut en bas dans le vide à certaines fréquences, la surface de ce « sable » de bronze forme des amoncellements stables. Ils sont montrés sur la Figure 141. Ces tas, dénommés *oscillons*, montent et descendent également. Un oscillon peut se déplacer et interagir avec un autre.



FIGURE 141 Oscillons formés par des billes de bronze secouées, la taille horizontale est d'environ 2 cm. (© Paul Umbanhowar)

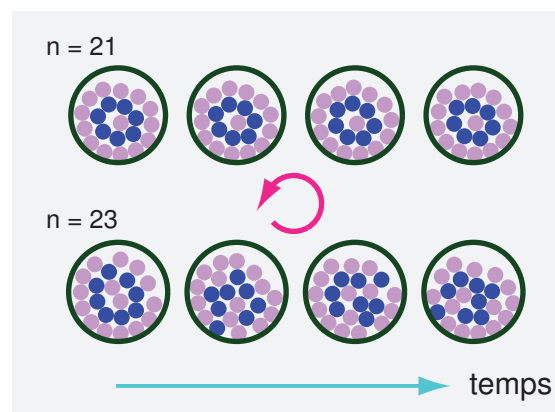


FIGURE 142 Les nombres magiques : 21 sphères, lorsqu'on les fait tourbillonner dans un tambour, se comportent différemment des nombres non magiques de sphères, comme 23. (redessiné à partir de photographies, © Karsten Kötter)

Réf. 225

Les oscillons dans le sable représentent un exemple simple d'un effet plus général dans la nature : des systèmes *discrets* dotés d'interactions non linéaires peuvent arborer des excitations localisées. Ce sujet fascinant commence tout juste à être étudié. Il se pourrait bien qu'il donne des résultats concernant notre compréhension des particules élémentaires.

Réf. 226

Le sable renferme de nombreux autres processus de formation de motifs. Un mélange de sable et de sucre, lorsqu'ils sont déversés sur un tas, forme une structure en couches régulières qui, vue de biais, ressemble aux rayures d'un zèbre. Des cylindres en rotation horizontale, contenant des mélanges binaires, séparent les composants du mélange au bout d'un certain temps. Ou encore prenez un récipient comportant deux compartiments séparés par une cloison de 1 cm. Remplissez les deux moitiés avec du sable et secouez rapidement le récipient tout entier à l'aide d'une machine. À la fin, tout le sable s'accumulera spontanément dans une moitié du récipient. Comme autre exemple d'auto-organisation du sable, certains ont analysé les divers types de dunes de sable qui « chantent » lorsque le vent souffle sur elles. En réalité, le comportement du sable et de la poussière s'avère être un thème tellement magnifique et fascinant que la perspective que chaque homme redevienne poussière ne paraît finalement pas si sinistre.

Réf. 227

Karsten Kötter et son équipe découvrirent en 1999 un autre exemple simple et élégant d'auto-organisation. Ils notèrent que le comportement d'un ensemble de sphères qui tourbillonnent dans un tambour dépend du nombre de sphères utilisées. Généralement, toutes les sphères sont continuellement mélangées entre elles. Mais pour certains nombres « magiques », comme 21, des motifs stables en anneau émergent, pour lesquels les sphères extérieures restent à l'extérieur et les sphères intérieures demeurent à l'in-



FIGURE 143 Auto-organisation : un flocon de neige en croissance. (quicktime © Kenneth Libbrecht)

térieur. Les anneaux, mieux discernés en colorant les sphères, sont montrés sur la [Figure 142](#).

Réf. 228 Tout cela, ainsi que de nombreuses autres études de systèmes auto-organisés, a bouleversé notre compréhension de la nature sur un grand nombre de plans. En tout premier lieu, cela nous indique que les motifs et les formes sont similaires aux cycles : ils sont tous dus au mouvement. Sans le mouvement, et donc sans l'histoire, il n'y a pas d'ordre, ni de motifs ou de formes. Chaque motif a une histoire, chaque motif est une conséquence du mouvement. Un exemple en est représenté sur la [Figure ??](#).

Deuxièmement, les motifs, les formes et les cycles sont dus au mouvement cohérent d'un grand nombre de petits constituants. Des systèmes qui s'auto-organisent sont toujours composés : ils constituent des *structures coopératives*.

Troisièmement, tous ces systèmes vérifient les équations d'évolution qui sont *non linéaires* pour les variables de configuration. Les systèmes linéaires ne s'auto-organisent pas. De nombreux systèmes auto-organisés exhibent également un mouvement *chaotique*.

Quatrièmement, l'apparition et la disparition de l'ordre dépendent de la vigueur d'une force motrice, que l'on appelle le *paramètre d'ordre*. Souvent, le mouvement chaotique survient lorsque la force motrice s'accroît au-delà de la valeur nécessaire à l'apparition de l'ordre. La turbulence est un exemple de mouvement chaotique, qui apparaît lorsque le paramètre d'ordre, qui est proportionnel à la vitesse du fluide, s'accroît jusqu'à des valeurs élevées.

De plus, toute forme d'ordre et toute structure apparaissent lorsque deux types de mouvement, en général, se concurrencent l'un l'autre, à savoir un processus « moteur » d'augmentation de l'énergie et un mécanisme « dissipatif » de freinage. La thermodynamique joue un rôle dans toute auto-organisation. Les systèmes auto-organisés sont toujours des *systèmes dissipatifs* et sont toujours loin de l'équilibre. Quand le moteur et la dissipation sont du même ordre de grandeur, et quand le comportement clé du système ne représente pas une fonction linéaire de l'action motrice, de l'ordre peut apparaître*.

* Pour décrire le « mystère » de la vie humaine, des mots tels que « flamme », « fleuve » ou « arbre » sont

Tous les systèmes auto-organisés au commencement de l'apparition de l'ordre peuvent être explicités par des équations décrivant l'amplitude A du motif sous la forme générale

$$\frac{\partial A(t, x)}{\partial t} = \lambda A - \mu |A|^2 A + \kappa \Delta A + \text{ordres plus élevés} . \quad (100)$$

Ici, l'observable A – qui peut être complexe – est celle qui apparaît, lorsque l'ordre apparaît, comme étant l'amplitude d'oscillation ou l'amplitude du motif. Le premier terme λA est le terme moteur, dans lequel λ est un paramètre décrivant la force de ce moteur. Le terme suivant est une non-linéarité caractéristique en A , μ étant un paramètre qui décrit sa force, et le troisième terme $\kappa \Delta A = \kappa(\partial^2 A / \partial x^2 + \partial^2 A / \partial y^2 + \partial^2 A / \partial z^2)$ est un terme dissipatif (et diffusif) caractéristique.

Nous pouvons distinguer deux situations principales. Dans les cas où le terme dissipatif ne joue aucun rôle ($\kappa = 0$), nous trouvons que, lorsque le paramètre moteur λ augmente au-dessus de zéro, une oscillation *temporelle* surgit, c'est-à-dire un cycle stable avec une amplitude non nulle. Dans les cas où le terme diffusif joue un rôle, l'équation (100) décrit comment une amplitude pour une oscillation *spatiale* survient lorsque le paramètre moteur λ devient positif, puisque la solution $A = 0$ devient alors spatialement instable.

Défi 532 pe

Défi 533 pe

Dans les deux cas, le déclenchement de l'ordre est appelé une *bifurcation*, parce qu'à cette valeur critique du paramètre moteur λ la situation avec une amplitude nulle, c'est-à-dire l'état homogène (ou non ordonné), devient instable, et l'état ordonné devient stable. *Dans des systèmes non linéaires, l'ordre est stable.* C'est le résultat conceptuel majeur de ce domaine. L'équation (100) et ses nombreuses variantes nous permettent de décrire un grand nombre de phénomènes, allant des spirales, des ondes, des motifs hexagonaux, et des défauts topologiques, jusqu'à certaines formes de turbulence. Pour chaque système physique qui est étudié, la principale tâche consiste à extraire l'observable A et les paramètres λ , μ et κ des processus physiques sous-jacents.

Réf. 229

L'auto-organisation est un vaste domaine qui produit de nouveaux résultats presque chaque semaine. Pour découvrir de nouveaux sujets d'étude, il est souvent suffisant de garder tout simplement un œil alerte, la plupart des effets sont accessibles sans connaissance des mathématiques avancées. Bonne chasse !

Défi 534 pe

La plupart des systèmes qui montrent de l'auto-organisation montrent également un autre type de mouvement. Quand le paramètre moteur d'un système auto-organisé est augmenté vers des valeurs de plus en plus élevées, l'ordre devient de plus en plus irrégulier, et au final nous rencontrons généralement du chaos. Pour les physiciens, le mouvement c^0 est le type de mouvement le plus irrégulier qui puisse exister*. Le chaos peut être défini indépendamment de l'auto-organisation, à savoir comme étant le

souvent utilisés par analogie. Ceux-ci sont tous des exemples de systèmes auto-organisés : ils possèdent de nombreux degrés de liberté, ont des forces motrices et de freinage en compétition, dépendent de manière critique de leurs conditions initiales, dénotent un comportement chaotique et irrégulier, et montrent parfois des cycles et un comportement régulier. Les êtres humains et la vie humaine leur ressemblent à tous ces égards, et il existe ainsi un fondement solide pour leur usage en tant que métaphore. Nous pourrions même aller plus loin et stipuler que la beauté à l'état pur est de l'auto-organisation à l'état pur. Le manque de beauté résulte en fait souvent d'un équilibre perturbé entre un moteur externe et un freinage externe.

* Sur le thème du chaos, lisez le livre magnifique de H. -O. PEITGEN, H. JÜRGENS & D. SAUPE, *Chaos and Fractals*, Springer Verlag, 1992. Il contient des images renversantes, le bagage mathématique nécessaire

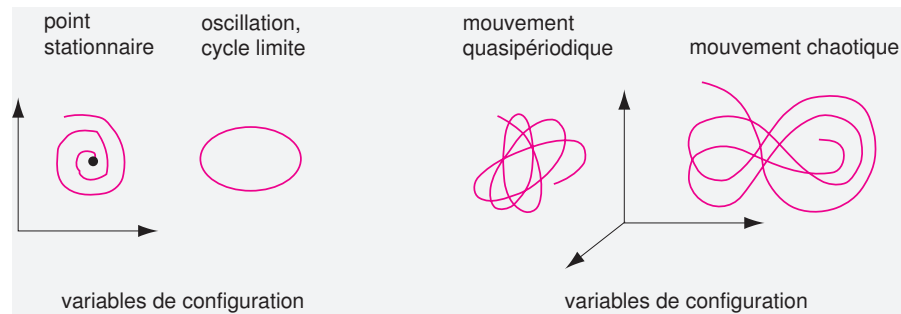


FIGURE 144 Exemples de différents types de mouvement dans l'espace des configurations.

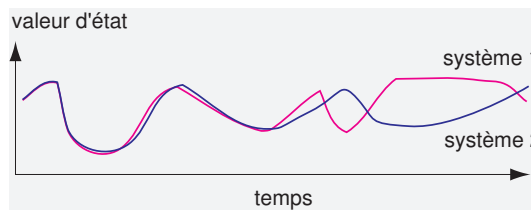


FIGURE 145 Sensibilité aux conditions initiales.

mouvement des systèmes pour lesquels de petites variations dans les conditions initiales évoluent vers des écarts énormes dans le mouvement (de croissance exponentielle avec le temps), comme indiqué sur la Figure 145. Plus précisément, le *chaos* est un mouvement désordonné caractérisé par un *exposant de Lyapounov* positif. Le temps (météorologique) est un tel système, comme le sont les robinets d'eau qui fuient, le lancer d'un dé et de nombreux autres systèmes courants. Par exemple, la recherche sur les mécanismes qui produisent le battement du cœur a révélé que le cœur n'est pas un oscillateur, mais un système chaotique doté de cycles irréguliers. Cela permet au cœur d'être prêt en permanence à faire face à des demandes de changement dans la cadence du battement, ce qui se produit dès que le corps a besoin d'augmenter ou de diminuer ses efforts.

Réf. 230

À ce propos, pouvez-vous citer un argument simple qui montre que ce que nous appelons l'*effet papillon* n'existe pas ? Cet « effet » est souvent évoqué dans les revues : l'explication généralement donnée est que les non-linéarités impliquent qu'une petite variation dans les conditions initiales peut conduire à de vastes effets, donc le battement de l'aile d'un papillon est censé être capable de provoquer une tornade. Bien que les non-linéarités puissent réellement conduire à la croissance de perturbations, l'effet papillon n'a jamais été observé. Il n'existe pas.

Défi 535 s

Le mouvement chaotique existe également dans les machines : le chaos apparaît dans le mouvement des trains sur les rails, dans les boîtes de vitesses et dans les tuyaux des sapeurs-pompiers. L'étude précise du mouvement qui apparaît dans un briquet zippo fera également, très probablement, ressortir un exemple de chaos. La description mathé-

Défi 536 pe

et quelques programmes informatiques permettant une exploration personnelle de ce sujet. « Chaos » est un terme ancien : d'après la mythologie grecque, la première déesse, Gaïa, c'est-à-dire la Terre, émergea du chaos qui régnait au commencement du monde. Elle donna alors naissance aux autres dieux, aux animaux et aux premiers êtres humains.

matique du chaos – simple pour certains cas d'école mais extrêmement alambiquée pour d'autres – reste un important sujet de recherches.

Réf. 231 Toutes les étapes du désordre à l'ordre, à la quasi-périodicité et finalement au chaos sont des exemples d'auto-organisation. Ces types de mouvement, illustrés sur la [Figure 144](#), sont observés dans un grand nombre de systèmes fluides. Leur étude devrait conduire, un jour, à une compréhension plus profonde des mystères de la turbulence. En dépit de la fascination pour ce sujet, nous ne l'explorerons pas davantage, parce qu'elle ne nous conduit pas dans la direction du sommet de la Montagne Mouvement.

Mais l'auto-organisation est également d'un grand intérêt pour une raison plus générale. Des gens affirment parfois que notre aptitude à formuler les modèles et les règles de la nature à partir de l'observation n'implique pas que nous ayons la capacité de prédire toutes les observations à partir de ces règles. D'après ce point de vue, des propriétés qualifiées d'« émergentes » existent, c'est-à-dire des propriétés apparaissant dans des systèmes complexes comme quelque chose de *nouveau* qui ne peut pas être déduit des propriétés de leurs parties et de leurs interactions. (La toile de fond idéologique relative à cette idée est évidente, ce fut la dernière tentative pour lutter contre le déterminisme.) L'étude de l'auto-organisation a définitivement tranché ce débat. Les propriétés des molécules d'eau doivent nous autoriser à prédire les chutes du Niagara*. De manière identique, la diffusion des molécules messagères détermine le développement d'une cellule unique dans un corps humain tout entier : en particulier, des phénomènes coopératifs déterminent les emplacements où les bras et les jambes sont formés. Ils garantissent la symétrie droite-gauche (approximative) des corps humains, évitent les amalgames dans les connexions lorsque les cellules de la rétine sont reliées au cerveau, et expliquent les motifs présents sur la fourrure des zèbres et des léopards, pour ne citer que quelques exemples. De la même manière, les mécanismes à l'origine du battement du cœur et de nombreux autres cycles ont été déchiffrés.

Défi 538 pe L'auto-organisation fournit des préceptes généraux qui nous permettent en principe de prédire le comportement d'un système complexe, quel qu'il soit. Ils sont actuellement appliqués au système le plus complexe connu dans l'univers : le cerveau humain. Les particularités de la manière dont il apprend à coordonner le mouvement du corps, et dont il extrait l'information à partir des images situées dans l'œil sont en train d'être examinées intensivement. Le travail en cours dans ce domaine est passionnant. Si vous projetez de devenir un scientifique, envisagez de prendre cette voie.

Toutes ces études apportent l'argument décisif qui confirme ce que J. Offrey de la Mettrie explorait et disséquait dans son célèbre ouvrage *L'homme machine* en 1748 : les êtres humains sont des machines complexes. En réalité, nos lacunes sur la compréhension des systèmes complexes, par le passé, étaient dues principalement à l'enseignement restrictif de l'étude du mouvement, qui se concentrait généralement – comme nous le faisons dans cette promenade – sur des exemples du mouvement dans des systèmes *simples*. Bien que le sujet de l'auto-organisation fournisse des perspectives séduisantes, et continuera

Réf. 232 * Déjà, des versions réduites des chutes du Niagara, à savoir des robinets d'eau qui fuient, dévoilent une grande étendue de phénomènes coopératifs, incluant la chute chaotique, c'est-à-dire non périodique, des gouttes d'eau. Cela se produit lorsque l'écoulement de l'eau possède la bonne valeur, comme vous pouvez le vérifier dans votre propre cuisine. Plusieurs phénomènes coopératifs fluides ont été simulés même au niveau moléculaire.

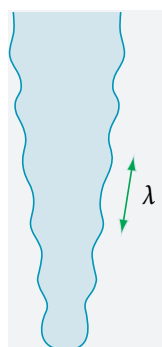


FIGURE 146 La surface ondulée des pics de glace.



FIGURE 147 Des perles d'eau.

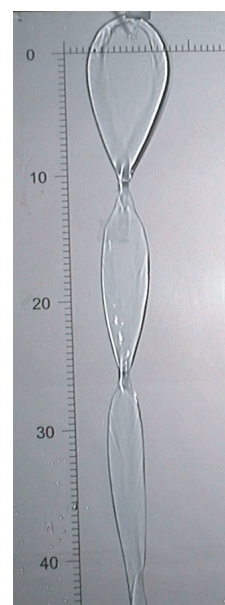


FIGURE 148 Un ruissellement d'eau en forme de tresses. (© Vakhtang Putkaradze)

d'en faire autant pendant les années à venir, nous le laissons maintenant de côté. Nous poursuivons notre aventure destinée à l'exploration des fondamentaux du mouvement*.

„Ich sage euch : man muss noch Chaos in sich haben, um einen tanzenden Stern gebären zu können. Ich sage euch : ihr habt noch Chaos in euch**.“
Friedrich Nietzsche, *Also sprach Zarathustra*.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR L' AUTO-ORGANISATION

Tous les pics de glace possèdent une surface ondulée, avec une distance entre deux crêtes d'environ 1 cm, comme indiqué sur la Figure 146. La distance est déterminée par l'influence réciproque qui existe entre l'écoulement de l'eau et le refroidissement de la surface. Comment ?

Défi 539 pe

* *

Lorsque l'on fait tourner du vin dans un verre à pied, après que le mouvement s'est adouci, le vin qui coule vers le bas le long de la paroi du verre forme des petits arcs. Pouvez-vous expliquer en quelques mots ce qui provoque cet effet ?

Défi 540 pe

* *

Réf. 233 * Un exemple important d'auto-organisation est l'humour.

** Je vous le dis : on doit encore avoir le chaos en nous-mêmes pour pouvoir naître d'une étoile dansante. Je vous le dis : vous avez encore le chaos en vous-mêmes.

Défi 541 d Comment la distance moyenne entre des véhicules stationnés le long d'une rue change-t-elle au cours du temps, en supposant qu'il y ait un taux constant de véhicules qui arrivent et qui partent ?

* *

Défi 542 d Lorsqu'un délicat filet d'eau coule d'un robinet, mettre un doigt dans le ruissellement provoque l'apparition d'une forme ondulée, telle que représentée sur la Figure 147. Pourquoi ?

* *

Réf. 234 Quand de l'eau émerge d'une ouverture oblongue, l'écoulement produit un motif en forme de tresses, comme indiqué sur la Figure 148. Cet effet résulte de l'action mutuelle et de la compétition entre l'inertie et la tension de surface : l'inertie tend à élargir le flot, alors que la tension de surface tend à le resserrer. La prédiction de la distance qui existe entre une région rétrécie et la suivante constitue toujours un domaine de recherche.

Défi 543 pe Si l'expérience est menée à l'air libre, sans récipient, nous observons généralement un effet supplémentaire : il y a un tressage *chiral* au niveau des zones resserrées, induit par les asymétries de l'écoulement de l'eau. Vous pouvez observer cet effet dans les toilettes lorsque vous urinez ! La curiosité scientifique ne connaît pas de limites : êtes-vous un tresseur à droite, à gauche ou les deux à la fois ? Tous les jours ?

* *

Réf. 235 Gerhard Müller a découvert une voie magnifique mais élémentaire pour observer l'auto-organisation dans les solides. Son système fournit également un modèle pour un processus géologique très connu : la formation de colonnes hexagonales dans les basaltes, comme dans le Devil's Staircase (l'Escalier du Diable) en Écosse. Des formations identiques sont repérées dans de nombreux autres endroits sur la Terre. Prenez simplement de la poudre de riz ou de la fécule de maïs, mélangez-la avec à peu près la moitié de cette quantité en eau, déposez ce mélange dans une casserole et asséchez-le avec une chandelle. Des colonnes hexagonales se forment. L'analogie fonctionne parce que l'assèchement de l'amidon et le refroidissement de la lave volcanique sont des processus diffusifs gouvernés par les mêmes équations, parce que les conditions limites sont les mêmes, et parce que les deux matières réagissent avec une diminution modérée du volume.

Défi 544 e

* *

L'écoulement de l'eau dans des tuyaux peut être laminaire (continu) ou turbulent (irrégulier et désordonné). La transition dépend du diamètre d du tuyau et de la vitesse v de l'eau. La transition se produit généralement lorsque le *nombre de Reynolds* – défini comme étant égal à $R = vd/\eta$ (η étant la viscosité cinématique de l'eau, valant approximativement $1 \text{ mm}^2/\text{s}$) – devient supérieur à environ 2 000. Toutefois, des expériences attentives montrent qu'avec une manipulation adéquate des écoulements laminaires peuvent être produits jusqu'à $R = 100\,000$. Une analyse linéaire des équations du mouvement du fluide, les équations de Navier-Stokes, prédit même la stabilité de l'écoulement laminaire pour *tous* les nombres de Reynolds. Ce n'est que dans les années 2003 et 2004 que cette énigme fut résolue. Premièrement, une analyse mathématique complexe indiqua que cet écoulement laminaire n'est pas toujours stable, et que la transition vers la turbulence

dans un long tuyau survient lorsque des ondes se propagent. C'est alors qu'en 2004 des expériences méticuleuses montrèrent que ces ondes de propagation apparaissent en fait lorsque de l'eau s'écoule à travers un tuyau avec de grands nombres de Reynolds.

Réf. 236

* *

Pour voir quelques images magnifiques de l'auto-organisation dans les fluides, consultez le site Web <http://serve.me.nus.edu.sg/limtt>. Entre autres, il montre qu'un tourbillon circulaire peut être « aspiré » dans un second situé juste derrière lui, et que ce processus peut alors se répéter.

* *

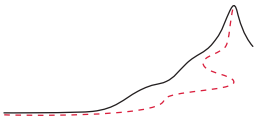
La *danse*, aussi, est un exemple d'auto-organisation. L'auto-organisation prend sa source dans le cerveau. Comme pour tous les gestes compliqués, l'apprentissage est alors souvent un défi. De nos jours il existe des livres admirables qui disent comment la physique peut vous aider à améliorer votre habileté à la danse et votre grâce dans les mouvements.

Réf. 237

* *

Voulez-vous vous amuser pendant vos études en doctorat de physique ? Allez dans un magasin de jouets scientifiques et cherchez un objet qui se déplace d'une manière particulièrement complexe. Il y a de fortes chances que ce mouvement soit chaotique, explorez ce mouvement et présentez une thèse sur celui-ci. (Ou plus simplement explorez le mouvement d'un câble suspendu dont l'extrémité supérieure est remuée par une source externe.)





CHAPITRE 14

DES FRONTIÈRES DE LA PHYSIQUE AUX LIMITES DU MOUVEMENT

“ Tout ce que je sais, c’est que je ne sais rien.
Socrate, cité par Platon ”

La sentence de Socrate s’applique également à la physique galiléenne, en dépit de son large succès triomphant dans les applications techniques et dans la description de la vie quotidienne. Nous allons maintenant donner un court aperçu des lacunes existant dans ce domaine.

THÈMES DE RECHERCHE EN DYNAMIQUE CLASSIQUE

Bien que la science de la mécanique soit maintenant vieille de plusieurs centaines d’années, la recherche dans la compréhension de ses rouages est toujours en cours.

Réf. 238

- Nous avons déjà mentionné ci-dessus le problème de la stabilité du Système solaire. L’avenir à long terme des planètes est inconnu. En général, le comportement des systèmes à quelques corps qui interagissent à travers la gravitation est encore un sujet d’investigations de la physique mathématique. La recherche de la réponse à la question simple de savoir combien de temps un ensemble donné de corps gravitant les uns autour des autres restent ensemble est un défi fantastique. L’histoire de ce *problème à plusieurs corps* est ancienne et compliquée. Des progrès intéressants ont été accomplis, mais la réponse définitive nous échappe toujours.
- De nombreuses questions demeurent sans réponse dans le domaine de l’auto-organisation, des équations d’évolution non linéaires, et du mouvement chaotique. Elles motivent un grand nombre de chercheurs en mathématiques, physique, chimie, biologie, médecine, et dans les autres disciplines scientifiques.

QU’EST-CE QUE LE CONTACT ?

“ Démocrite proclamait qu’il n’existe qu’une
espèce de mouvement : celui qui découle de la
collision.
Simplicius de Cilicie, *Commentaire sur la
Physique d’Aristote*, 42, 10 ”

Réf. 239

De toutes les questions sans réponse de la physique classique, celles sur les détails du contact et des collisions se situent parmi les plus pressantes. En réalité, nous avons défini la masse en termes de variations de vitesse durant des collisions. Mais pourquoi

Page 72

les objets changent-ils leur mouvement dans de telles occasions ? Pourquoi des collisions entre deux boules faites en chewing-gum diffèrent-elles de celles entre deux boules en acier inoxydable ? Que se passe-t-il pendant ces instants où le contact est établi ?

Le contact est associé aux propriétés matérielles, qui influencent à leur tour le mouvement d'une manière complexe. La complexité est telle que les sciences qui étudient les propriétés de la matière se développèrent indépendamment du reste de la physique pendant très longtemps. Par exemple, les techniques de la métallurgie (fréquemment citée comme étant la plus ancienne de toutes les sciences), de la chimie et de la cuisine ne furent rapprochées des propriétés du mouvement qu'au vingtième siècle, après avoir été exercées de manière indépendante pendant des centaines d'années. Puisque les propriétés matérielles déterminent l'essence même du contact, nous *avons besoin* de la connaissance de la matière et des matériaux pour comprendre la notion de masse, et donc celle du mouvement. La seconde partie de notre escalade de la montagne lèvera le voile sur ces relations.

PRÉCISION ET EXACTITUDE

Lorsque nous avons commencé à escalader la Montagne Mouvement, nous avons déclaré que pour gagner de l'altitude il fallait accroître la *précision* dans notre description de la nature. Pour rendre cette formulation elle-même encore plus précise, nous faisons une distinction entre deux termes : la *précision* est le degré de reproductibilité, l'*exactitude* représente le degré de conformité à la situation réelle. Ces deux notions s'appliquent aux mesures*, aux énoncés et aux concepts physiques.

Appendix B

En ce moment, le record du nombre de chiffres mesurés pour une quantité physique est de 14. Pourquoi si peu ? La physique classique ne fournit pas de réponse. Quel est le nombre maximum de chiffres que nous pouvons attendre des mesures, qu'est-ce qui le détermine, et comment pouvons-nous espérer l'atteindre ? Ces questions sont toujours sans réponses à ce niveau de notre ascension, elles seront abordées dans la seconde partie de celle-ci.

Défi 545 s

D'un autre côté, les énoncés ayant une fausse exactitude abondent. Que devrions-nous penser d'un constructeur automobile – Ford – qui revendique que le coefficient de traînée c_w d'un de ses modèles est de 0,375 ? Ou de l'affirmation officielle que le record mondial de la consommation de carburant pour des véhicules est de 2 315,473 km/l ? Ou de l'allégation que 70,3 % de tous les citoyens partagent une certaine opinion ? Une leçon que nous avons apprise des recherches sur les erreurs de mesures est que nous ne devrions jamais fournir plus de chiffres concernant un résultat donné que celui dont nous sommes sûrs et certains.

Défi 546 s

Est-il possible de dessiner ou de produire un rectangle pour lequel le rapport des longueurs est un nombre réel, par exemple 0,131520091514001315211420010914..., dont les chiffres pourraient crypter un livre entier ? (Une méthode simple pourrait encoder un espace comme 00, la lettre « a » comme 01, « b » comme 02, « c » comme 03, etc. De façon encore plus intéressante, le nombre pourrait-il être imprimé à l'intérieur du livre qu'il code ?)

* Pour les mesures, la précision et l'exactitude sont toutes les deux mieux décrites par leur *écart-type*, comme expliqué dans l'Annexe B, à la page 312.

Dans notre promenade, nous aspirons à toujours plus de précision et d'exactitude, tout en évitant en même temps la fausse exactitude. Donc, les concepts doivent en premier lieu être *précis* et les descriptions doivent être *exactes*. N'importe quelle inexactitude est une preuve du manque de connaissance. Pour le dire sans ambages, « inexact » signifie *faux*. L'augmentation de l'exactitude et de la précision de notre description de la nature nous suggère de laisser derrière nous toutes les erreurs que nous avons faites jusqu'à présent. Ce sera notre objectif pour la suite.

EST-CE QUE TOUTE LA NATURE PEUT ÊTRE DÉCRITE DANS UN LIVRE ?

Amusons-nous avec un casse-tête relatif à notre aventure. La parution d'un ouvrage de physique parfait, celui qui décrirait toute la nature, pourrait-elle se produire ? Si elle le pouvait, le livre devrait également se décrire lui-même, sa propre construction – en incluant ses lecteurs et son auteur – et, le plus important de tout, son propre contenu. Un tel livre peut-il exister ? En utilisant le concept d'information, nous pouvons établir que ce livre devrait inclure toute l'information contenue dans l'univers. Est-ce possible ? Examinons les possibilités.

Si la nature avait besoin d'un livre *infiniment* long pour être entièrement décrite, une telle publication ne pourrait évidemment pas exister. Dans ce cas, seules des descriptions approximatives de la nature seraient possibles, et un livre exhaustif de physique ne pourrait être concevable.

Si la nature avait besoin d'une quantité *finie* d'information pour sa description, deux voies possibles se présentent. La première est que l'information de l'univers ne pourrait pas être récapitulée dans un livre, donc un livre de physique parfait serait une nouvelle fois impossible. L'autre option est que l'univers doit contenir une quantité finie d'information et qu'il peut être résumé en quelques petites formules. Cela impliquerait que le reste de l'univers n'ajouterait pas d'information à celle déjà contenue dans ce livre complet sur la physique. Dans ce cas, il apparaît que l'entropie du livre et l'entropie de l'univers devraient être identiques. Ceci semble tout à fait improbable.

Nous remarquons que la réponse à cette énigme fournit également la réponse à une autre énigme : celle de savoir si un cerveau peut contenir une description complète de la nature. En d'autres termes, la véritable question est : pouvons-nous comprendre la nature ? Notre excursion jusqu'au sommet de la Montagne Mouvement est-elle possible ? En général, nous le croyons. Finalement, nous croyons en quelque chose qui est plutôt improbable : nous croyons que l'univers ne contient pas plus d'information que ce que notre cerveau peut contenir ou même contient déjà.

Avons-nous fait une erreur dans notre raisonnement ? Oui. Les mots « univers » et « information » ne sont pas correctement utilisés dans l'analyse qui précède, comme vous devriez pouvoir le vérifier. Nous trouverons une solution à ce casse-tête plus tard dans notre aventure. En attendant, creusez-vous la tête pour vous en faire une idée.

POURQUOI LA MESURE EST-ELLE POSSIBLE ?

Dans la description de la gravitation brossée jusqu'à présent, l'information que chacun a apprise – ou devrait avoir apprise – à l'école, est que l'accélération est reliée à la masse et à la distance par $a = GM/r^2$. C'est tout. Mais cette simplicité est trompeuse. Afin de vérifier si cette description est correcte, nous devons mesurer des longueurs et des

Défi 548 s durées. Cependant, il est *impossible* de mesurer des longueurs et des intervalles de temps avec une horloge quelconque ou une règle quelconque fondées uniquement sur l'interaction gravitationnelle ! Essayez de concevoir un tel dispositif et vous serez inévitablement déçu. Vous avez toujours besoin d'une méthode non gravitationnelle pour actionner et arrêter le chronomètre. De manière similaire, lorsque vous mesurez une longueur, par exemple celle d'une table, vous devez disposer une règle ou tout autre dispositif à proximité de celle-ci. L'interaction nécessaire pour aligner la règle et la table ne peut pas être gravitationnelle.

Défi 549 s Une limitation identique s'applique même aux mesures des masses. Tentez de peser une masse en utilisant seulement la gravitation. Toute bascule ou balance nécessite d'autres interactions – généralement mécaniques, électromagnétiques ou optiques – pour remplir son rôle. Pouvez-vous confirmer que la même chose s'applique à la vitesse et aux mesures des angles ? En résumé, quelle que soit la méthode que nous utilisons, *pour mesurer la vitesse, la longueur, le temps et la masse, des interactions autres que la gravité sont nécessaires*. Notre capacité à faire des mesures montre que la gravité n'est pas la seule à agir.

Défi 550 s

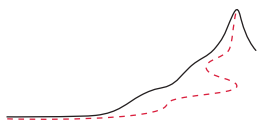
LE MOUVEMENT EST-IL ILLIMITÉ ?

La physique galiléenne n'explique pas notre aptitude à faire des mesures. En réalité, elle n'explique pas non plus l'existence des étalons de mesure. Pourquoi les objets possèdent-ils des longueurs fixes ? Pourquoi les horloges fonctionnent-elles comme des métronomes ? La physique galiléenne ne parvient pas à expliquer ces observations.

Elle ne formule également aucune explication évidente sur l'univers de manière générale. Elle semble suggérer qu'il est infini. La finitude ne s'ajuste pas avec la description galiléenne du mouvement. Celle-ci n'est donc que partielle dans ses explications parce qu'elle ne tient pas compte des limites du mouvement.

Nous remarquons également que l'existence de vitesses infinies dans la nature ne nous permettrait pas de définir des tranches de temps. La conception des horloges serait alors impossible. En d'autres termes, une description de la nature qui autorise des vitesses illimitées n'est pas du tout précise. La précision requiert des limites. Pour atteindre la plus haute précision possible, nous avons besoin de découvrir toutes les limites relatives au mouvement. Jusqu'à présent, nous n'en avons découvert qu'une seule : il existe une entropie minimale. Nous nous tournons dorénavant vers une autre limite, plus saisissante : celle de la vitesse. Pour appréhender cette limite, nous allons explorer le mouvement le plus rapide que nous connaissions : le mouvement de la lumière.





ANNEXE A

NOTATION ET CONVENTIONS

Nous avons introduit puis défini, dans ce texte, des concepts nouveaux qui sont notés en *italique*. Ces nouvelles définitions sont également signalées dans l'index par des numéros de page en italique. Naturellement, nous employons les unités du SI partout dans ce livre, celles-ci sont définies dans l'Annexe B. Les résultats expérimentaux sont cités avec une précision limitée, généralement à deux chiffres significatifs seulement, puisque la plupart du temps cela est suffisant pour notre discussion. Des valeurs de référence, de précision plus élevées, peuvent être consultées dans les annexes B et ??.

Réf. 240 En relativité nous utilisons la convention de genre temps, où la métrique possède la signature $(+ - - -)$. 70 % environ de la littérature dans le monde entier l'utilise. Nous notons i, j, k , les indices des trivecteurs et a, b, c , etc. les indices des quadrivecteurs. D'autres conventions spécifiques à la relativité générale sont expliquées lorsqu'elles sont mentionnées dans cet ouvrage.

L'ALPHABET LATIN

Réf. 241

« Ce qui est rédigé sans effort est lu, en général, sans plaisir. »

Samuel Johnson

Les livres sont des collections de symboles. *L'écriture* fut probablement inventée entre 3400 et 3300 av. J.-C. par les Sumériens, en Mésopotamie (bien que d'autres éventualités soient également discutées). Il fallut alors plus de mille ans pour que les gens commencent à utiliser des symboles pour représenter des sons en lieu et place des concepts : c'est de cette manière que le premier alphabet fut créé. Cela s'est produit entre 2000 et 1600 av. J.-C. (peut-être en Égypte) et a marqué l'avènement de l'alphabet sémitique. L'usage de cet alphabet offrit tant d'avantages qu'il fut immédiatement adopté dans toutes les cultures avoisinantes, sous différentes formes cependant. Par conséquent, l'alphabet sémitique est l'ancêtre de tous les alphabets utilisés dans le monde.

Ce livre est rédigé en utilisant l'alphabet latin. Au premier abord, cela semble vouloir dire que sa prononciation *ne peut être* expliquée par écrit, contrairement à la prononciation d'autres alphabets ou de l'Alphabet Phonétique International (API). (Celles-ci peuvent être expliquées en utilisant l'alphabet du texte fondateur.) Néanmoins, il est possible en principe d'écrire un texte qui décrit exactement comment remuer les lèvres, la bouche et la langue pour chaque lettre, en faisant appel à des concepts physiques, lorsque cela s'avère nécessaire. Les descriptions des prononciations que nous trouvons dans les dictionnaires utilisent indirectement ce procédé : ils se réfèrent à la mémoire des mots

ou des sons prononcés, que l'on rencontre dans la nature.

Historiquement, l'alphabet latin a été dérivé de l'alphabet étrusque, qui constitue lui-même une dérivation de l'alphabet grec. Il en existe deux principales variantes.

L'alphabet latin *archaïque*,

utilisé à partir du sixième siècle av. J.-C. :

A B C D E F Z H I K L M N O P Q R S T V X

L'alphabet latin *classique*,

utilisé du deuxième siècle av. J.-C. jusqu'au onzième siècle :

A B C D E F G H I K L M N O P Q R S T V X Y Z

La lettre G fut ajoutée au cours du troisième siècle av. J.-C., par le premier romain qui ouvrit une école où il fallait s'acquitter d'une taxe, Spurius Carvilius Ruga. Il ajouta une barre horizontale à la lettre C et substitua cette nouvelle lettre à la lettre Z, qui n'était plus utilisée en latin. Au cours du deuxième siècle av. J.-C., après la conquête de la Grèce, les romains inclurent les lettres Y et Z de l'alphabet grec à la fin du leur (réintroduisant donc effectivement le Z) afin de pouvoir écrire les mots grecs. Cet alphabet latin classique demeura inchangé pendant le millénaire suivant*.

L'alphabet latin classique a été diffusé à travers l'Europe, l'Afrique et l'Asie par les romains pendant leurs conquêtes. Grâce à sa simplicité, il commença à être utilisé pour l'écriture dans de nombreuses autres langues. La plupart des alphabets « latins » modernes comportent quelques autres lettres. La lettre W fut introduite au onzième siècle en français et fut alors adoptée dans la majorité des langues européennes. La lettre U fut introduite au milieu du quinzième siècle en Italie, la lettre J à la fin de ce siècle-là en Espagne, pour faire la distinction entre certains sons qui étaient précédemment représentés par V et I. Cette distinction démontra son utilité et était déjà courante dans la plupart des langues européennes, au seizième siècle. Les contractions æ et œ datent du Moyen Âge. D'autres alphabets latins comportent des lettres supplémentaires, comme le *scharfes S* allemand, noté ß, une contraction de « ss » ou « sz », the et les lettres nordiques *thorn*, écrites Þ ou þ, et *eth*, notée Ð ou ð, tirées du futhark**, plus d'autres signes.

Les lettres minuscules n'étaient pas utilisées en latin classique, elles datent du Moyen Âge seulement, de l'époque de Charlemagne. Comme la plupart des accents, tels que ê, ç ou ä, lesquels furent également utilisés pour la première fois au Moyen Âge, les lettres minuscules furent introduites pour économiser la surface du papier, très cher à l'époque, en raccourcissant les mots écrits.

* Pour rencontrer des gens qui parlent et qui écrivent en latin, allez sur www.alcuinus.net.

** L'écriture runique, également appelée *futhark* ou *futhorc*, un type d'alphabet utilisé au Moyen Âge dans les territoires germaniques, anglo-saxons et nordiques, dérive probablement aussi de l'alphabet étrusque. La désignation est issue des six premières lettres : f, u, th, a (ou o), r, k (ou c). La troisième lettre est la lettre *thorn* mentionnée ci-dessus, elle est souvent écrite « Y » en ancien anglais, comme dans « Ye Olde Shoppe ». L'ancien anglais a également emprunté à l'alphabet runique la lettre *wyn* pour représenter le son « w », et le *eth* déjà mentionné. (Les autres lettres utilisées en ancien anglais – qui ne sont pas issues du futhorc – furent le *yogh*, une vieille variante du g, et les ligatures æ ou Æ, appelées *ash*, et œ ou OE, appelées *ethel*.)

« En dehors du chien, le livre est le meilleur ami de l'homme. À l'intérieur du chien, il fait trop sombre pour lire. »
Groucho Marx

TABLEAU 36 Les alphabets grecs archaïque et classique, et la correspondance avec le latin et le système de numération indienne.

ARCH. CLASS. NOM CORRESP.						ARCH. CLASS. NOM CORRESP.					
A	A	α	alpha	a	1	N	N	ν	nu	n	50
B	B	β	bêta	b	2	Ξ	Ξ	ξ	xi	x	60
Γ	Γ	γ	gamma	g, n ¹	3	O	O	ο	omicron	o	70
Δ	Δ	δ	delta	d	4	Π	Π	π	pi	p	80
E	E	ε	epsilon	e	5	Ϟ	Ϟ, ϙ		koppa ³	q	90
F	Ϝ, Ϛ		digamma, stigma ²	w	6	P	P	ρ	rhô	r, rh	100
						Σ	Σ	σ, Ϛ	sigma ⁴	s	200
Z	Z	ζ	zêta	z	7	T	T	τ	tau	t	300
H	H	η	êta	e	8		Υ	υ	upsilon	y, u ⁵	400
Θ	Θ	θ	thêta	th	9		Φ	φ	phi	ph, f	500
I	I	ι	iota	i, j	10		X	χ	chi	ch	600
K	K	κ	kappa	k	20		Ψ	ψ	psi	ps	700
Λ	Λ	λ	lambda	l	30		Ω	ω	oméga	o	800
M	M	μ	mu	m	40	Α	Ϻ		sampi ⁶	s	900

Les lettres archaïques régionales yot, sha et san ne sont pas incluses dans ce tableau. La lettre san était l'ancêtre de sampi.

1. Seulement s'il est avant les vélaires, c'est-à-dire avant kappa, gamma, xi et chi.

2. « Digamma » est la désignation employée pour la variante en forme de F. Il était principalement utilisé comme lettre (mais aussi parfois, dans sa variante minuscule, en tant que nombre), alors que le tracé et le terme « stigma » sont employés uniquement pour désigner le nombre 6. Ces deux désignations ont été dérivées des tracés respectifs, en réalité le stigma est une variante médiévale et onciale de digamma. Le nom « stigma » découle du fait que cette lettre ressemble à un sigma avec un tau attaché en dessous – bien que malheureusement ce ne soit pas le cas dans toutes les polices de caractère modernes. Le nom original de la lettre, donnant aussi sa prononciation, était « waw ».

3. La version de koppa qui ressemble à un z inversé et incliné est toujours utilisée de manière occasionnelle en grec moderne. La norme Unicode appelle cette variante « koppa ».

4. La deuxième variante de sigma est employée uniquement à la fin des mots.

5. Upsilon correspond au « u » seulement en tant que seconde lettre dans les diphtongues.

6. Jadis, la lettre sampi était positionnée entre pi et koppa.

L' ALPHABET GREC

L'alphabet latin est dérivé de l'étrusque, et l'étrusque du grec. L'alphabet grec fut lui-même issu de l'alphabet phénicien ou d'un alphabet, similaire, sémitique du nord au cours du dixième siècle av. J. - C. L'alphabet grec, pour la première fois, comportait aussi des lettres pour représenter les voyelles, ce qui n'était pas le cas des alphabets sé-

Réf. 245

mitiques (lesquels en trahissent encore souvent l'absence). Dans l'alphabet phénicien et dans un grand nombre de ses dérivés, comme l'alphabet grec, chaque lettre possède une dénomination propre. Cela est en contradiction avec les alphabets étrusque et latin. Le nom des deux premières lettres grecques sont, bien évidemment, à l'origine du terme *alphabet* lui-même.

Au dixième siècle av. J. - C., le ionien ou alphabet grec (oriental) *archaïque* était constitué des lettres majuscules uniquement. Au sixième siècle av. J. - C. plusieurs lettres furent abandonnées, tandis que quelques nouvelles lettres et les versions en minuscule furent introduites, donnant naissance à l'alphabet grec *classique*. Par la suite, les accents, les indices et les aspirées furent introduits. Le [Tableau 36](#) donne également les valeurs indiquées par ces lettres lorsqu'elles étaient utilisées comme nombre. Pour cet usage particulier, les anciennes lettres obsolètes furent conservées pendant la période classique, elles se sont ainsi également vues attribuer des formes minuscules.

La correspondance latine dans le tableau est celle classique, qui est utilisée de manière standard pour la transcription des mots grecs. La question de la *prononciation* correcte du grec a été ardemment débattue dans les cercles de spécialistes, la *prononciation érasmienn*e traditionnelle ne correspond ni aux résultats de la recherche linguistique, ni au grec moderne. En grec classique, le bêlement de la brebis s'écrit βη-βη. (La prononciation érasmienne insiste à tort sur un η plus court, la prononciation du grec moderne est différente pour β, lequel est dorénavant prononcé « v », et pour η, qui est maintenant prononcé comme « i : » – un long « i ».) La prononciation du grec a manifestement varié au cours du temps et d'une région à l'autre. Pour le grec attique, le principal dialecte parlé dans la période classique, la question est dorénavant tranchée. La recherche linguistique a montré que chi, phi et thêta étaient moins aspirés que tel qu'ils sont généralement prononcés en français, et sonnent plus comme le son initial de « cartable », « parfait » et « tintin ». De surcroît, le zêta semble avoir été prononcé plus comme « zd » tel que dans le mot « mazdéen ». De même que pour les voyelles, contrairement à la tradition, epsilon est fermé et court alors que êta est ouvert et long, omicron est fermé et court tandis que oméga est large et long, et upsilon est en vérité un son « ou » comme dans « mou », et ne ressemble pas au « u » français ou au « ü » allemand.

Les voyelles grecques peuvent avoir des *aspirées* rudes ou douces, des *indices*, et des *accents* circonflexes ou diérèses aigus et graves. Les aspirées – utilisées également pour ρ – déterminent si la lettre est prononcée en expirant l'air. Les accents, qui étaient interprétés avec une idée d'insistance dans la prononciation érasmienne, représentaient en fait la hauteur des intonations. Le grec classique pouvait avoir jusqu'à trois de ces signes supplémentaires par lettre, le grec moderne n'en a jamais plus d'un.

L'*alphabet cyrillique* est un autre descendant de l'alphabet grec*, il est employé avec

* L'alphabet grec est également à l'origine de l'*alphabet gotique*, qui a été défini au quatrième siècle par Wulfila pour la langue gotique, en utilisant également quelques signes provenant de l'écriture latine et du futhorc.

L'alphabet gotique ne doit pas être confondu avec ce que nous appelons l'*écriture gothique*, un style de l'alphabet *latin* utilisé dans toute l'Europe à partir du onzième siècle. Dans les territoires latins, les lettres gothiques furent remplacées au seizième siècle par l'*Antiqua*, l'ancêtre de la fonte sur laquelle s'appuie ce texte. Dans d'autres pays, l'écriture gothique resta en usage pendant plus longtemps. Elle était utilisée dans l'imprimerie et dans les manuscrits en Allemagne jusqu'en 1941, date où le gouvernement nazi l'a subitement abolie, afin de se conformer à une forte demande de la population. Elle fit l'objet d'un usage sporadique

des légères variantes dans de nombreuses langues slaves, comme le russe et le bulgare. Néanmoins, il n'existe aucune transcription standard du cyrillique au latin, de telle sorte que souvent, le même nom russe est épilé différemment dans des pays différents ou encore dans le même pays à différentes occasions.

TABLEAU 37 Les débuts de l'abjad hébreu.

LETTRE	NOM	CORRESPONDANCE	
א	aleph	a	1
ב	beth	b	2
ג	gimel	g	3
ד	daleth	d	4
etc.			

ALPHABET HÉBREU ET AUTRES ÉCRITURES

Réf. 246
Page ?? L'alphabet phénicien est aussi à l'origine de l'alphabet hébraïque à base de consonnes ou *abjad*. Ses premières lettres sont données dans le Tableau 37. Seule la lettre aleph est communément utilisée en mathématiques, bien que d'autres aient été proposées.

Une centaine de systèmes d'écriture environ sont utilisés partout dans le monde. Les spécialistes les classent en cinq groupes. Les *alphabets phonématiques*, tels que le latin ou le grec, possèdent un signe pour chaque consonne et chaque voyelle. Les *abjads* ou alphabets consonantiques, tels que l'hébreu ou l'arabe, ont un signe pour chaque consonne (en incluant parfois quelques voyelles, comme aleph), et ne transcrivent pas (toutes) les voyelles, la plupart des abjads sont écrits de la droite vers la gauche. Les *abugidas*, également dénommés alphabets syllabiques ou alphasyllabaires, tels que le balinaï, le birman, le devanagari, le tagalog, le thaïlandais, le tibétain ou le laotien, écrivent des consonnes et des voyelles. Chaque consonne possède une voyelle par défaut qui peut être changée en une autre à l'aide d'un signe diacritique. Les *syllabaires*, tels que le hiragana ou le guèze, possèdent un signe pour chaque syllabe de la langue. Finalement, des écritures complexes, comme le chinois, les hiéroglyphes mayas ou égyptiens, utilisent des signes qui possèdent à la fois un son et une signification. Les systèmes d'écriture peuvent avoir un texte qui se lit de droite à gauche, et de bas en haut, et peuvent ainsi numéroter les pages d'un livre dans le sens opposé à ce livre.

Réf. 247 Bien qu'il y ait environ 7 000 langues sur Terre, il n'existe à peu près qu'une centaine de systèmes d'écriture seulement en usage aujourd'hui. Cinquante autres systèmes d'écritures environ ne sont plus utilisés*. Pour les formules physiques et mathématiques, cependant, le système de symboles utilisé dans ce texte, basé sur des lettres latines et grecques, écrit de la gauche vers la droite et de haut en bas, est un standard employé partout dans le monde. Il est utilisé de manière indépendante du système d'écriture du texte

à travers l'Europe. Dans de nombreux livres de physique et de mathématiques, les lettres gothiques sont utilisées pour symboliser des quantités vectorielles.

* Le site www.omniglot.com est un site Web bien conçu sur ce sujet. Les principaux systèmes d'écriture passés et actuels sont encodés en Unicode standard, qui englobe à présent 52 systèmes d'écriture. Consultez www.unicode.org.

qui le contient.

CHIFFRES ET NOMBRES

Les chiffres et la méthode utilisée dans ce livre pour écrire les nombres sont tous deux originaires de l'Inde. Ils furent véhiculés jusqu'à la méditerranée par les mathématiciens arabes pendant le Moyen Âge. Le système de numération employé dans cet ouvrage est ainsi beaucoup plus récent que l'alphabet*. Les nombres indiens furent popularisés en Europe par Léonard de Pise, appelé Fibonacci**, dans son ouvrage *Liber Abaci* ou « Le livre des calculs », qu'il publia en 1202. Ce chef-d'œuvre révolutionna les mathématiques. Quiconque avait une feuille de papier et une plume (le crayon n'avait pas encore été inventé) était dorénavant capable d'évaluer et de noter des nombres aussi grands que lui permettait son imagination, ou plus grands encore, et d'effectuer des calculs avec eux. Le livre de Fibonacci commençait ainsi :

Novem figure indorum he sunt 9 8 7 6 5 4 3 2 1. Cum his itaque novem figuris, et cum hoc signo 0, quod arabice zephirum appellatur, scribitur quilibet numerus, ut inferius demonstratur***.

La méthode indienne pour écrire les nombres est constituée d'une grande innovation, la notation positionnelle, et d'une petite, le chiffre zéro. La notation positionnelle, comme elle fut décrite par Fibonacci, était tellement plus efficace qu'elle remplaça entièrement le système de numération romain antérieur, qui écrivait 1996 comme IVMM ou MCMIVC ou MCMXCVI, ainsi que le système de numération grec, dans lequel les lettres grecques étaient employées comme nombres de la manière indiquée dans le [Tableau 36](#), écrivant donc 1996 ainsi : ,αϠϥζ'. Par rapport à ces systèmes, les chiffres indiens sont beaucoup plus perfectionnés. En vérité, le système indien s'avéra être si pratique que les calculs effectués sur une feuille évincèrent complètement l'usage impérieux du *boulier*, qui tomba par conséquent en désuétude. Le boulier est toujours utilisé, seulement dans les régions qui n'emploient pas une notation positionnelle pour écrire les nombres. (Le système indien élimina également la nécessité d'avoir des systèmes pour représenter les nombres à l'aide des doigts. De tels systèmes, qui peuvent représenter des nombres allant jusqu'à 10 000 et plus, n'ont laissé qu'une seule trace : le mot anglais qui veut dire chiffre, « digit », dérive du mot latin qui signifie doigt****.) De manière similaire, seul le système de numération

* L'histoire du développement des nombres est contée de façon très intéressante par G. IFRAH, *Histoire universelle des chiffres*, Seghers, 1981, qui a été traduit dans plusieurs langues. Il en synthétisa la généalogie en dix magnifiques tableaux, un pour chaque chiffre, à la fin de son livre. Néanmoins, il contient de nombreuses erreurs factuelles, comme expliqué dans les critiques www.ams.org/notices/200201/rev-dauben.pdf et www.ams.org/notices/200202/rev-dauben.pdf.

Il n'est pas exact de qualifier les chiffres de 0 à 9 d'*arabes*. Les véritables chiffres arabes et les chiffres utilisés dans les textes en latin, de même que le présent texte, dérivent tous des chiffres indiens. Seuls les chiffres 0, 2, 3 et 7 ressemblent à ceux utilisés dans l'écriture arabe, et alors seulement s'ils sont inclinés de 90° dans le sens horaire.

** Léonard de Pise, appelé Fibonacci (n. vers 1175 Pise, d. 1250 Pise), fut un mathématicien italien, et le plus important mathématicien de son époque.

*** « Les neuf figures des indiens sont : 9 8 7 6 5 4 3 2 1. Avec ces neuf figures, et avec ce signe 0 qui est appelé zephirum en arabe, n'importe quel nombre peut être écrit, comme nous le démontrerons ci-dessous. »

**** En français, le mot chiffre vient de l'arabe *sifr*, utilisé pour « zéro » et signifiant « le vide ». [N.D.T.]

à position permet les calculs mentaux et a rendu – et rend toujours – les prodiges du calcul possibles*.

LES SYMBOLES UTILISÉS DANS CE TEXTE

« Pour éviter la fastidieuse répétition de ces mots « est égal à » je poserais, comme je le fais souvent, une paire de parallèles, ou deux lignes jumelles de même longueur, donc « = », parce que rien n'est plus pareil que deux jumeaux. »

Robert Recorde**

Outre le texte et les nombres, les livres de physique contiennent d'autres symboles. La plupart de ces symboles ont été développés sur des centaines d'années, de telle façon que seuls les plus évidents et les plus simples d'entre eux sont maintenant utilisés. Dans cette ascension montagnaise, les symboles utilisés comme abréviations pour des quantités *physiques* sont tous empruntés aux alphabets latin et grec et sont toujours définis dans le contexte où ils sont employés. Les symboles désignant des unités, des constantes et des particules sont définis dans les Annexes B et ?? . Il existe une norme internationale pour leur usage (ISO 31), mais elle est en fait inaccessible, les symboles utilisés dans ce

Réf. 246 texte sont ceux qui sont couramment utilisés.

Les symboles *mathématiques* dont fait usage ce livre, en particulier ceux concernant les opérations et les relations, sont donnés dans la liste qui suit, en même temps que leurs

Réf. 249 origines. Leur genèse précise a été largement étudiée dans la littérature.

D'autres signes utilisés ici ont des origines plus compliquées. Le signe & est une

Réf. 250 contraction du latin *et*, comme cela se manifeste souvent plus clairement dans ses différentes déclinaisons, comme *et*, la forme italique commune.

Chacun des signes de ponctuation employés dans les phrases avec les alphabets latins modernes, tels que , . ; ! ? ' « » – () ... possède sa propre histoire. Nombre d'entre eux

Réf. 251 sont issus de la Grèce antique, mais le point d'interrogation provient du règne de Charlemagne, et le point d'exclamation apparaît pour la première fois au seizième siècle***. Le

Réf. 252 @ ou *arobase* émerge probablement d'une abréviation médiévale du latin *ad*, signifiant « à », de la même manière que le signe & évolua du latin *et*. Très récemment, le *smiley* :-) et ses diverses déclinaisons sont devenus populaires. Le *smiley* est en fait une nouvelle version du « point d'ironie » qui a été autrefois proposé, sans succès, par A. de Brahm (1868–1942).

Réf. 248 * Actuellement, le temps le plus court pour découvrir la treizième racine (entière) d'un nombre à cent chiffres, dont le résultat est à 8 chiffres, est de 11,8 secondes. Pour en savoir plus sur les récits et les méthodes des prodiges du calcul, consultez la bibliographie.

Réf. 249 ** Robert Recorde (vers 1510–1558) était un mathématicien et médecin anglais, il mourut en prison car il avait des dettes. Cette citation est tirée de son ouvrage *The Whetstone of Witte*, 1557. Une image indiquant cette phrase dans son manuscrit peut être consultée sur le site Web members.aol.com/jeff94100/witte.jpg. On propose en général que cette citation est la première introduction du signe égal, des revendications qui stipulent que les mathématiciens italiens employaient le signe égal avant Recorde, ne sont confirmés par aucun exemple convaincant.

*** Sur les parenthèses, lisez le magnifique ouvrage de J. LENNARD, *But I Digress*, Oxford University Press, 1991.

SYMBOLE	SIGNIFICATION	ORIGINE
$+, -$	plus, moins	J. Regiomontanus 1456 ; le signe plus est dérivé du latin « et »
$\sqrt{\quad}$	se prononce « racine carée »	utilisé par C. Rudolff en 1525 ; ce signe provient d'une déformation de la lettre « r », initiale du mot latin <i>radix</i>
$=$	égal à	R. Recorde 1557
$\{ \}, [], ()$	symboles de groupement	son usage commença au seizième siècle
$>, <$	plus grand que, plus petit que	T. Harriot 1631
$\times$	multiplié par, fois	W. Oughtred 1631
$:$	divisé par	G. Leibniz 1684
$\cdot$	multiplié par, fois	G. Leibniz 1698
a^n	puissance	R. Descartes 1637
x, y, z	coordonnées, inconnues	R. Descartes 1637
$ax + by + c = 0$	constantes et équations pour des inconnues	R. Descartes 1637
$d/dx, \int y dx$	dx , dérivée, différentielle, intégrale	G. Leibniz 1675
φx	fonction de x	J. Bernoulli 1718
$f x, f(x)$	fonction de x	L. Euler 1734
$\Delta x, \Sigma$	différence, somme	L. Euler 1755
$\neq$	est différent de	L. Euler dix-huitième siècle
$\partial/\partial x$	dérivée partielle, lire comme « d/dx »	il fut emprunté à une forme cursive de « d » ou de la lettre « de » de l'alphabet cyrillique par A. Legendre en 1786
Δ	opérateur laplacien	R. Murphy 1833
$ x $	valeur absolue	K. Weierstrass 1841
∇	prononcer « nabla » (ou « del »)	introduit par William Hamilton en 1853 et P.G. Tait en 1867, par analogie avec la forme d'un ancien instrument musical égyptien
$[x]$	l'unité de mesure d'une quantité x	vingtième siècle
∞	infini	J. Wallis 1655
π	$4 \arctan 1$	H. Jones 1706
e	$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} = \lim_{n \rightarrow \infty} (1 + 1/n)^n$	L. Euler 1736
i	$+\sqrt{-1}$	L. Euler 1777
$\cup, \cap$	union et intersection d'ensembles	G. Peano 1888
$\in$	élément de	G. Peano 1888
$\emptyset$	ensemble vide	André Weil en tant que membre du groupe N. Bourbaki au début du vingtième siècle
$\langle \psi , \psi \rangle$	vecteurs d'état bra et ket	Paul Dirac 1930
$\otimes$	produit dyadique, produit tensoriel ou produit de Kronecker	inconnue

Réf. 253 Le symbole paragraphe § apparut au treizième siècle en Italie du nord, comme le montra le paléographe allemand Paul Lehmann. Il fut dérivé de versions ornementales de la lettre capitale C pour *capitulum*, c'est-à-dire « petite tête » ou « chapitre ». Ce signe se manifesta pour la première fois dans les textes juridiques, où il est toujours d'usage aujourd'hui, puis se répandit dans d'autres domaines.

Le pied de mouche ¶ a été dérivé d'une forme ancienne plus simple ressemblant à la lettre grecque Γ, un signe qui était utilisé dans les manuscrits de la Grèce antique jusque tard au Moyen Âge, pour marquer le début d'un nouveau paragraphe de texte. Au Moyen Âge il prit sa forme moderne, probablement parce qu'une lettre c pour *caput* fut ajoutée devant lui.

Réf. 254 Un des plus importants symboles parmi tous, l'*espace blanc* qui sépare les mots, provient des influences celtiques et germaniques lorsque ces sociétés commencèrent à utiliser l'alphabet latin. Il devint d'usage commun entre le neuvième et le treizième siècle, en fonction de la langue considérée.

CALENDRIERS

Les multiples manières de conserver une trace du temps diffèrent grandement d'une civilisation à l'autre. Le calendrier le plus courant, et celui utilisé dans ce texte, est également l'un des plus insensé, puisqu'il constitue un compromis entre les diverses forces politiques qui s'efforcèrent de le façonner.

Jadis, des entités localement indépendantes, comme des tribus ou des villes, préféraient les calendriers *lunaires*, parce que la mesure du temps lunaire est localement facile à mettre en œuvre. Cela a conduit à l'usage du mois comme unité calendaire. Les états centralisés ont imposé des calendriers *solaires*, fondés sur l'année. Les calendriers solaires exigent des astronomes, et donc une autorité centrale pour les financer. Pour diverses raisons, les agriculteurs, les hommes politiques, les percepteurs des impôts, les astronomes, et certains groupes religieux, mais pas tous, voulaient que le calendrier suive l'année solaire aussi précisément que possible. Les ajustements nécessaires entre les jours et les années sont à l'origine des jours intercalaires. Les compromis indispensables entre les mois et l'année qui conduisirent aux longueurs variables des mois sont différents selon les calendriers. La structure année-mois la plus couramment employée fut aménagée il y a plus de 2 000 ans par Jules César, et est donc appelée le *calendrier julien*.

Ce système fut anéanti quelques années plus tard seulement : août fut allongé à 31 jours lorsqu'il fut baptisé d'après le nom de l'empereur Auguste. Initialement, ce mois ne comportait que 30 jours, mais afin de montrer qu'Auguste était aussi important que César, qui donna son nom à juillet, toutes les longueurs des mois de la seconde moitié de l'année furent modifiées, et février fut raccourci d'un jour supplémentaire.

Réf. 255 La *semaine* est une invention du royaume de Babylone. Une journée dans la semaine babylonienne était « malfaisante » ou « malchanceuse », donc il valait mieux ne rien faire ce jour-là. Le cycle moderne de la semaine, avec son jour de repos, est issu de cette superstition. (La manière dont la superstition astrologique et l'astronomie coopérèrent pour déterminer l'ordre des jours de la semaine est exposée dans la section sur la gravitation.)
Page 152 Bien qu'ayant à peu près trois mille ans d'âge, la semaine fut pleinement intégrée dans

le calendrier julien autour de l'an 300 environ, vers la fin de l'Empire romain d'Occident. L'ultime changement dans le calendrier julien se produisit entre 1582 et 1917 (en fonction du pays), lorsque des mesures plus précises de l'année solaire furent utilisées pour établir une nouvelle méthode permettant de déterminer les jours intercalaires, une procédure toujours utilisée aujourd'hui. Associé à une réinitialisation de la date et la détermination du rythme de la semaine, ce standard est appelé le *calendrier grégorien* ou plus simplement le *calendrier moderne*. Il est utilisé par la majorité de la population mondiale.

Malgré sa complexité, le calendrier moderne vous permet vraiment de déterminer le jour de la semaine d'une date donnée que vous auriez en tête. Exécutez simplement les six étapes qui suivent :

1. Prenez les deux derniers chiffres de l'année, et divisez par 4, mettez de côté toute fraction résiduelle ;
2. Ajoutez les deux derniers chiffres de l'année ;
3. Défaquez 1 pour janvier ou février ou une année bissextile ;
4. Ajoutez 6 pour les années 2000 ou 1600, 4 pour les années 1700 ou 2100, 2 pour les années 1800 ou 2200, et 0 pour les années 1900 ou 1500 ;
5. Ajoutez le jour du mois ;
6. Ajoutez la valeur clé correspondant au mois, à savoir 144 025 036 146 pour JFM AMJ JAS OND.

Le reste de la division par 7 donne le jour de la semaine, sachant que la correspondance 1-2-3-4-5-6-0 signifie Dimanche-Lundi-Mardi-Mercredi-Jeudi-Vendredi-Samedi*.

La manière de commencer à compter les années est une question de choix. La plus ancienne méthode non liée aux structures du pouvoir politique en place, est celle qui était utilisée dans la Grèce antique, les années étaient alors comptées à partir des premiers Jeux Olympiques. Les gens avaient l'habitude de dire, par exemple, qu'ils étaient nés dans la première année de la vingt-troisième olympiade. Par la suite, les forces politiques ont systématiquement imposé la numérotation des années à compter d'un certain événement important**. Peut-être qu'il serait digne d'envisager la réintroduction du comptage olympique ?

* Le fait de se souvenir du résultat intermédiaire pour l'année en cours peut simplifier encore plus les choses, en particulier puisque les dates 4.4, 6.6, 8.8, 10.10, 12.12, 9.5, 5.9, 7.11, 11.7 et le dernier jour de février tombent tous sur le même jour de la semaine, à savoir sur le résultat intermédiaire de l'année plus 4.

** La comptabilisation actuelle des années fut définie au Moyen Âge en fixant la date du fondement de Rome à l'an 753 av. J.-C., ou 753 *avant Jésus-Christ*, et en comptant donc en arrière, de telle sorte que les années av. J.-C. se comportent presque comme des nombres négatifs. Cependant, l'an 1 suit immédiatement l'an 1 av. J.-C. : il n'y a pas eu d'an 0.

Certains autres standards établis par l'Empire Romain expliquent plusieurs abréviations employées dans la littérature :

- c. est une abréviation latine pour *circa* et signifie « environ »,
- i.e. est une abréviation latine pour *id est* et signifie « c'est-à-dire »,
- e.g. est une abréviation latine pour *exempli gratia* et signifie « par la grâce de l'exemple »,
- ibid. est une abréviation latine pour *ibidem* et signifie « au même endroit »,
- inf. est une abréviation latine pour *infra* et signifie « (voir) ci-dessous »,
- op. cit. est une abréviation latine pour *opus citatum* et signifie « le travail cité »,
- et al. est une abréviation latine pour *et alii* et signifie « et les autres ».

Par ailleurs, *idem* signifie « le même » et *passim* veut dire « ça et là » ou « en tous sens ». De nombreuses expressions employées en physique, comme la fréquence, l'accélération, la vitesse, la masse, la force, la quan-

ABRÉVIATIONS ET ÉPONYMES OU CONCEPTS ?

Des propositions telle que celle qui suit sont une calamité pour la physique moderne :

Le paradoxe EPR dans la formulation de Bohm peut probablement être résolu en faisant appel à l'approche GRW, en utilisant l'approximation WKB de l'équation de Schrödinger.

L'usage de ce vocabulaire constitue la meilleure façon de rendre le discours inintelligible pour les profanes. En premier lieu, il utilise des abréviations, ce qui est une infamie. Par dessus tout, cette phrase utilise le nom d'individus pour caractériser des concepts, c'est-à-dire qu'elle utilise des *éponymes*. À l'origine, les éponymes étaient adressés comme hommages à d'éminents accomplissements. Aujourd'hui, alors que la formulation de nouvelles lois ou variables fondamentales est devenue pratiquement impossible, la diffusion d'éponymes, compréhensibles pour un nombre sans cesse décroissant de personnes, reflète simplement une course vers la renommée de plus en plus stérile.

Les éponymes représentent une preuve du manque d'imagination des scientifiques. Nous les évitons autant que possible dans notre promenade et donnons des noms *communs* aux équations ou entités mathématiques, partout où cela est possible. Les noms des personnes sont alors utilisés comme appositions à ces désignations. Par exemple, « l'équation du mouvement de Newton » n'est jamais appelée « l'équation de Newton », « les équations du champ d'Einstein » est cité au lieu des « équations d'Einstein » et « l'équation du mouvement de Heisenberg » est employé à la place de « l'équation de Heisenberg ».

Toutefois, certaines exceptions sont inévitables : quelques termes employés en physique moderne n'ont aucune véritable alternative. La constante de Boltzmann, l'échelle de Planck, la longueur d'onde de Compton, l'effet Casimir, les groupes de Lie et l'algèbre de Virasoro en sont des exemples. En compensation, ce texte s'assure que vous pouvez consulter les définitions de ces concepts grâce à l'index. De surcroît, celui-ci tente d'en rendre sa lecture très agréable.

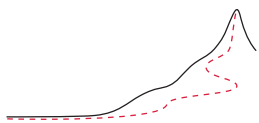
Réf. 257



tité de mouvement, l'inertie, la gravitation et la température, sont dérivées du latin. En réalité, l'idée selon laquelle la langue de la science a été le latin pendant plus de deux mille ans reste un sujet de controverses. À l'époque des romains c'était le vocabulaire latin avec la grammaire latine, à l'époque moderne elle se changea en vocabulaire latin avec grammaire française, puis pendant une brève période en vocabulaire latin avec grammaire allemande, après quoi elle se modifia en vocabulaire latin avec grammaire anglaise/américaine.

Un grand nombre d'unités de mesure date également de l'époque romaine, comme nous l'expliquerons dans le prochain annexe. Même l'engouement pour les termes techniques grecs, comme le montre l'invention des mots « gyroscope », « entropie » ou « proton », date de l'époque des romains.

Réf. 256



ANNEXE B

UNITÉS, MESURES ET CONSTANTES

MESURER consiste à comparer avec un étalon. Un étalon est basé sur une *unité*. Une multitude de systèmes d'unités différents ont été utilisés à travers le monde. La plupart des étalons confèrent du pouvoir à l'organisme qui en a la charge. Une telle autorité peut être utilisée abusivement : c'est le cas aujourd'hui, par exemple dans l'industrie informatique, et il en était de même jadis. La solution est identique dans les deux situations : mettre sur pied un étalon indépendant et général. Au sujet des unités, cela eut lieu au dix-huitième siècle : pour éviter des abus de la part d'institutions autoritaires, pour évincer les problèmes dus aux unités de référence différentes, variables et non reproductibles, et – ce n'est pas une blague – pour simplifier le recouvrement des impôts, un groupe de scientifiques, d'hommes politiques et d'économistes se sont mis d'accord sur un ensemble d'unités. On l'appelle le *Système International d'Unités*, *SI* en abrégé, et il est défini par un traité international, la « Convention du Mètre ». Les unités sont régies par un organisme international, la « Conférence Générale des Poids et Mesures », et ses organisations filles, la « Commission Internationale des Poids et Mesures » et le « Bureau International des Poids et Mesures » (BIPM), qui ont toutes vu le jour au même moment, juste avant la Révolution française.

Réf. 258

Toutes les unités du SI sont construites à partir de sept *unités de base*, dont les définitions officielles sont données ci-dessous, avec les dates de leurs formulations :

- « La *seconde* est la durée de 9 192 631 770 périodes de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamental de l'atome de césium 133 à une température de 0 kelvin. » (1967)*
- « Le *mètre* est la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant une durée de 1/299 792 458 seconde. » (1983)
- « Le *kilogramme* est l'unité de masse. Il est égal à la masse du prototype international du kilogramme. » (1901)*
- « L'*ampère* est l'intensité d'un courant constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de un mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force égale à $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur. » (1948)
- « Le *kelvin*, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau. » (1967)*
- « La *mole* est la quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaires qu'il y a d'atomes dans 0,012 kilogramme de carbone 12. » (1971)*
- « La *candela* est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont l'intensité

énergétique dans cette direction est de 1/683 watt par stéradian. » (1979)*

Notez que les unités de temps et de longueur sont toutes les deux définies à partir de certaines propriétés d'un modèle de référence du mouvement, à savoir la lumière. C'est une illustration supplémentaire qui souligne le fait que l'observation du mouvement, qui est le type fondamental de changement, est une *condition préalable* à la définition et à la construction du temps et de l'espace. Par ailleurs, l'emploi de la lumière dans les définitions avait déjà été proposé en 1827 par Jacques Babinet*.

À partir de ces unités de base, toutes les autres unités sont définies par multiplication et division. Ainsi, toutes les unités du SI possèdent les propriétés suivantes :

- Les unités du SI forment un système ayant la *précision de l'état de l'art* : toutes les unités sont définies avec une précision qui est supérieure à la précision des mesures couramment effectuées. De plus, la précision de ces définitions est régulièrement améliorée. L'incertitude relative actuelle dans la définition de la seconde se situe autour de 10^{-14} , 10^{-10} environ pour le mètre, 10^{-9} environ pour le kilogramme, 10^{-7} pour l'ampère, moins de 10^{-6} pour la mole, 10^{-6} pour le kelvin et 10^{-3} pour la candela.

- Les unités du SI forment un système *absolu* : toutes les unités sont définies de telle manière qu'elles puissent être reproduites dans tout laboratoire convenablement équipé, de manière indépendante, et avec une précision élevée. Cela permet d'éviter autant que possible tout abus de la part de l'organisation qui détermine les étalons. (Le kilogramme, toujours défini à l'aide d'un artéfact, est la dernière exception à cette exigence, une recherche intensive est en cours pour éliminer cet objet de la définition – une compétition internationale qui prendra encore quelques années. Il existe deux approches : dénombrer des particules ou fixer $\hbar$. La première peut être accomplie dans des cristaux, la dernière en utilisant n'importe quelle formule où $\hbar$ apparaît, comme la formule de la longueur d'onde de de Broglie ou celle de l'effet Josephson.)

- Les unités du SI forment un système *pratique* : les unités de base sont des quantités dont la grandeur est familière. Les unités couramment employées possèdent des dénominations et des abréviations standard. La liste complète inclut les sept unités de base, les unités supplémentaires, les unités dérivées et les unités admises.

Les unités *supplémentaires* du SI sont les deux suivantes : l'unité de l'angle (plan), défini comme étant le rapport de la longueur de l'arc au rayon, est le *radian* (rad). Pour l'angle solide, défini comme étant le rapport de la surface sous-tendue au carré du rayon, l'unité est le *stéradian* (sr).

Les unités *dérivées* ayant un nom spécial, dans leur désignation officielle en français, c'est-à-dire sans lettre capitale et sans accent, sont :

* Les symboles respectifs sont s, m, kg, A, K, mol et cd. Le prototype international du kilogramme est un cylindre en platine-iridium conservé au BIPM à Sèvres, en France. Pour obtenir plus de précisions sur les niveaux de l'atome de césium, consultez un livre sur la physique atomique. L'échelle Celsius d'une température θ est définie ainsi : $\theta/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273,15$, remarquez le minuscule écart avec le nombre apparaissant dans la définition du kelvin. Le SI stipule également : « Lorsqu'on emploie la mole, les entités élémentaires doivent être spécifiées et peuvent être des atomes, des molécules, des ions, des électrons, d'autres particules ou des groupements spécifiés de telles particules ». Dans la définition de la mole, nous sous-entendons que les atomes du carbone 12 sont non liés, au repos et dans leur état fondamental. Dans la définition de la candela, la fréquence de la lumière correspond à 555,5 nm, c'est-à-dire la couleur verte, qui est à peu près égale à la longueur d'onde où l'œil est le plus sensible.

* Jacques Babinet (1794–1874) fut un physicien français qui publia des travaux importants en optique.

N O M	S Y M B O L E
hertz	Hz = 1/s
pascal	Pa = N/m ² = kg/m s ²
watt	W = kg m ² /s ³
volt	V = kg m ² /As ³
ohm	Ω = V/A = kg m ² /A ² s ³
weber	Wb = Vs = kg m ² /As ²
henry	H = Vs/A = kg m ² /A ² s ²
lumen	lm = cd sr
becquerel	Bq = 1/s
sievert	Sv = J/kg = m ² /s ²

N O M	S Y M B O L E
newton	N = kg m/s ²
joule	J = Nm = kg m ² /s ²
coulomb	C = As
farad	F = As/V = A ² s ⁴ /kg m ²
siemens	S = 1/Ω
tesla	T = Wb/m ² = kg/As ² = kg/Cs
degré Celsius	°C (cf. définition du kelvin)
lux	lx = lm/m ² = cd sr/m ²
gray	Gy = J/kg = m ² /s ²
katal	kat = mol/s

Défi 551 pe

Nous remarquons que dans toutes les définitions de ces unités, le kilogramme n'apparaît qu'aux puissances 1, 0 et -1. L'explication finale de cette réalité n'est apparue que récemment. Pouvez-vous tenter d'en formuler la raison ?

Les unités admises non SI sont la *minute*, l'*heure*, le *jour* (pour le temps), le *degré* 1° = π/180 rad, la *minute* 1' = π/10 800 rad, la *seconde* 1'' = π/648 000 rad (pour les angles), le *litre* et la *tonne*. On doit éviter toutes les autres unités.

On rend plus pratiques toutes les unités du SI grâce à l'introduction de désignations et d'abréviations standard pour les puissances de dix, que nous appelons les *préfixes** :

10 ⁿ	N O M	S Y M B .	10 ⁿ	N O M	S Y M B .	10 ⁿ	N O M	S Y M B .	10 ⁿ	N O M	S Y M B .
10 ¹	déca	da	10 ⁻¹	déci	d	10 ¹⁸	exa	E	10 ⁻¹⁸	atto	a
10 ²	hecto	h	10 ⁻²	centi	c	10 ²¹	zetta	Z	10 ⁻²¹	zepto	z
10 ³	kilo	k	10 ⁻³	milli	m	10 ²⁴	yotta	Y	10 ⁻²⁴	yocto	y
10 ⁶	méga	M	10 ⁻⁶	micro	μ	non officiel :			Réf. 260		
10 ⁹	giga	G	10 ⁻⁹	nano	n	10 ²⁷	xenta	X	10 ⁻²⁷	xenno	x
10 ¹²	téra	T	10 ⁻¹²	pico	p	10 ³⁰	wekta	W	10 ⁻³⁰	weko	w
10 ¹⁵	péta	P	10 ⁻¹⁵	femto	f	10 ³³	vendekta	V	10 ⁻³³	vendeko	v
						10 ³⁶	udekta	U	10 ⁻³⁶	udeko	u

* Certains de ces noms sont inventés (yocto qui se prononce de manière presque identique au latin *octo* « huit », zepto qui se prononce presque comme le mot latin *septem*, yotta et zetta qui leur ressemblent, exa et péta qui se prononcent comme les mots grecs ἑξάκις et πεντάκις pour « six fois » et « cinq fois », ceux qui ne sont pas officiels se prononcent comme les mots grecs désignant neuf, dix, onze et douze). Certains sont issus du danois/norvégien (atto pour *atten* « dix-huit », femto pour *femten* « quinze »), certains proviennent du latin (de *mille*, de *centum* « cent », de *decem* « dix », de *nanus* « nain »), certains sont tirés de l'italien (de *piccolo* « petit »), certains sont grecs (micro provient de μικρός « petit », déca/déka de δέκα « dix », hecto de ἑκατόν « cent », kilo de χίλιοι « mille », méga de μέγας « grand », giga de γίγας « géant », téra de τέρας « monstre »).

Défi 552 e

Interprétez : J'étais bloqué dans un tel embouteillage que j'ai mis un microsiècle pour faire un picoparsec et que ma consommation de carburant fut de deux dixièmes d'un millimètre carré.

- Les unités du SI forment un système *exhaustif* : elles recouvrent de manière systématique l'ensemble complet des observables de la physique. Qui plus est, elles fixent également les unités de mesure de toutes les autres sciences.

- Les unités du SI forment un système *universel* : elles peuvent être utilisées dans le monde des affaires, dans l'industrie, dans le commerce, à la maison, dans l'enseignement et dans la recherche. Elles pourraient même être employées par des civilisations extraterrestres, si celles-ci existaient.

- Les unités du SI forment un système *cohérent* : le produit ou le quotient de deux unités du SI est aussi une unité du SI. Cela signifie qu'en principe, la même abréviation, « SI » par exemple, pourrait être utilisée pour chaque unité.

Les unités du SI ne constituent pas l'unique ensemble possible qui puisse vérifier toutes ces conditions, mais elles sont le seul système existant qui le fait*.

Rappelez-vous que puisque chaque mesure est une comparaison avec un étalon de référence, toute mesure exige de la matière pour réaliser l'étalon (oui, même pour la vitesse standard), et du rayonnement pour accomplir cette comparaison. Le concept de mesure suppose donc que la matière et le rayonnement existent et qu'ils peuvent être clairement dissociés l'un de l'autre.

Page ??

UNITÉS NATURELLES DE PLANCK

Puisque la forme exacte de nombreuses équations dépend du système d'unités utilisé, les physiciens théoriciens emploient souvent des systèmes d'unités optimisés pour produire des équations sous une forme simple. Les unités choisies et les valeurs des constantes de la nature sont reliées. En physique microscopique, le système des *unités naturelles de Planck* est souvent utilisé. Il est défini en posant $c = 1$, $\hbar = 1$, $G = 1$, $k = 1$, $\epsilon_0 = 1/4\pi$ et $\mu_0 = 4\pi$. Les unités de Planck sont donc définies à partir de combinaisons de constantes fondamentales, celles qui correspondent aux unités de base du SI sont données dans le [Tableau 39**](#). Ce tableau est également utile pour convertir des équations notées en unités naturelles aux unités du SI : substituez simplement chaque quantité X par X/X_{Pl} .

Défi 553 e

* La plupart des unités non SI qui sont toujours d'usage dans le monde sont d'origine romaine. Le mile provient de *milia passum*, qui était équivalent à mille (doubles) enjambées d'environ 1 480 mm chacune. Aujourd'hui un mile nautique, autrefois défini comme une minute d'arc à la surface de la Terre, vaut exactement 1 852 m. Le pouce vient de *uncia/onza* (un douzième – d'un pied actuel). La livre (de l'anglais « pound » qui vient de *pondere* « peser ») est employée comme une traduction de *libra* – balance – qui est à l'origine de son abréviation lb. Même la coutume de compter en douzaines au lieu de dizaines est d'origine romaine. Celles-ci et les autres unités toutes aussi cocasses – comme le système dans lequel toutes les unités commencent avec un « f », et qui utilise le furlong/quinze jours comme unité de vitesse – sont dorénavant officiellement définies comme des multiples des unités du SI.

** Les unités naturelles x_{Pl} données ici sont celles qui sont couramment utilisées aujourd'hui, c'est-à-dire celles définies en utilisant la constante $\hbar$, et non, comme le fit à l'origine Planck, en utilisant la constante $h = 2\pi\hbar$. Les unités électromagnétiques peuvent aussi être définies à l'aide d'autres facteurs que $4\pi\epsilon_0$ dans les expressions : par exemple, en utilisant $4\pi\epsilon_0\alpha$, avec la *constante de structure fine* α , on obtient $q_{\text{Pl}} = e$. Pour des explications sur les nombres situés entre parenthèses, les écarts types, lisez la [page 312](#).

TABLEAU 39 Les unités naturelles (non corrigées) de Planck.

NOM	DÉFINITION	VALEUR
Unités de base		
Longueur de Planck	$l_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$= 1,616\,0(12) \cdot 10^{-35} \text{ m}$
Durée de Planck	$t_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$= 5,390\,6(40) \cdot 10^{-44} \text{ s}$
Masse de Planck	$m_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c/G}$	$= 21,767(16) \mu\text{g}$
Courant de Planck	$I_{\text{Pl}} = \sqrt{4\pi\epsilon_0 c^6/G}$	$= 3,479\,3(22) \cdot 10^{25} \text{ A}$
Température de Planck	$T_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c^5/Gk^2}$	$= 1,417\,1(91) \cdot 10^{32} \text{ K}$
Unités triviales		
Vitesse de Planck	$v_{\text{Pl}} = c$	$= 0,3 \text{ Gm/s}$
Moment cinétique de Planck	$L_{\text{Pl}} = \hbar$	$= 1,1 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
Quantum d'action de Planck	$S_{\text{aPl}} = \hbar$	$= 1,1 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$
Entropie de Planck	$S_{\text{ePl}} = k$	$= 13,8 \text{ yJ/K}$
Unités dérivées		
Densité de Planck	$\rho_{\text{Pl}} = c^5/G^2\hbar$	$= 5,2 \cdot 10^{96} \text{ kg/m}^3$
Énergie de Planck	$E_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c^5/G}$	$= 2,0 \text{ GJ} = 1,2 \cdot 10^{28} \text{ eV}$
Quantité de mouvement de Planck	$p_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c^3/G}$	$= 6,5 \text{ Ns}$
Puissance de Planck	$P_{\text{Pl}} = c^5/G$	$= 3,6 \cdot 10^{52} \text{ W}$
Force de Planck	$F_{\text{Pl}} = c^4/G$	$= 1,2 \cdot 10^{44} \text{ N}$
Pression de Planck	$p_{\text{Pl}} = c^7/G\hbar$	$= 4,6 \cdot 10^{113} \text{ Pa}$
Accélération de Planck	$a_{\text{Pl}} = \sqrt{c^7/\hbar G}$	$= 5,6 \cdot 10^{51} \text{ m/s}^2$
Fréquence de Planck	$f_{\text{Pl}} = \sqrt{c^5/\hbar G}$	$= 1,9 \cdot 10^{43} \text{ Hz}$
Charge électrique de Planck	$q_{\text{Pl}} = \sqrt{4\pi\epsilon_0 c\hbar}$	$= 1,9 \text{ aC} = 11,7 \text{ e}$
Tension de Planck	$U_{\text{Pl}} = \sqrt{c^4/4\pi\epsilon_0 G}$	$= 1,0 \cdot 10^{27} \text{ V}$
Résistance de Planck	$R_{\text{Pl}} = 1/4\pi\epsilon_0 c$	$= 30,0 \Omega$
Capacité électrique de Planck	$C_{\text{Pl}} = 4\pi\epsilon_0 \sqrt{\hbar G/c^3}$	$= 1,8 \cdot 10^{-45} \text{ F}$
Inductance de Planck	$L_{\text{Pl}} = (1/4\pi\epsilon_0) \sqrt{\hbar G/c^7}$	$= 1,6 \cdot 10^{-42} \text{ H}$
Champ électrique de Planck	$E_{\text{Pl}} = \sqrt{c^7/4\pi\epsilon_0 \hbar G^2}$	$= 6,5 \cdot 10^{61} \text{ V/m}$
Densité du flux magnétique de Planck	$B_{\text{Pl}} = \sqrt{c^5/4\pi\epsilon_0 \hbar G^2}$	$= 2,2 \cdot 10^{53} \text{ T}$

Les unités naturelles sont importantes à un autre égard : à chaque fois qu'une quantité est imprudemment qualifiée d'« infiniment petite (ou grande) », l'expression correcte à considérer est « aussi petite (ou aussi grande) que l'unité de Planck corrigée correspondante ». Comme on l'explique tout au long de ce texte, et particulièrement dans la partie finale, cette substitution est possible parce que presque toutes les unités de Planck fournissent, dans la limite d'un facteur de correction de l'ordre de 1, la valeur extrême pour l'observable correspondante – certaines une borne supérieure et d'autres une

limite inférieure. Malheureusement, ces facteurs de correction ne sont pas encore largement déterminés. La valeur extrême exacte pour chaque observable dans la nature est obtenue lorsque G est remplacé par $4G$, $\hbar$ par $\hbar/2$, k par $k/2$ et $4\pi\epsilon_0$ par $8\pi\epsilon_0\alpha$ dans toutes les quantités de Planck. Ces valeurs extrêmes, ou *unités de Planck corrigées*, sont les *véritables unités naturelles*. Il est possible de dépasser les valeurs extrêmes, mais uniquement pour certaines quantités étendues. (Pouvez-vous deviner lesquelles?)

Défi 554 s

AUTRES SYSTÈMES D'UNITÉS

Un objectif central de la recherche en physique des hautes énergies est l'évaluation des intensités de toutes les interactions. Par conséquent il n'est pas pratique de fixer la constante de la gravitation G à un, comme dans le système des unités de Planck. Pour cette raison, les physiciens des hautes énergies fixent souvent $c = \hbar = k = 1$ et $\mu_0 = 1/\epsilon_0 = 4\pi^*$, laissant seulement la constante gravitationnelle G dans les équations.

Dans ce système, il n'y a qu'une seule unité fondamentale, mais son choix reste libre. Souvent, une longueur standard est choisie comme unité de base, longueur qui est l'archétype d'une quantité mesurée. Les observables physiques les plus importantes sont alors reliées par

$$\begin{aligned} 1/[l^2] &= [E]^2 = [F] = [B] = [E_{\text{électrique}}], \\ 1/[l] &= [E] = [m] = [p] = [a] = [f] = [I] = [U] = [T], \\ 1 &= [v] = [q] = [e] = [R] = [S_{\text{action}}] = [S_{\text{entropie}}] = \hbar = c = k = [\alpha], \quad (101) \\ [l] &= 1/[E] = [t] = [C] = [L] \quad \text{et} \\ [l]^2 &= 1/[E]^2 = [G] = [P] \end{aligned}$$

où nous avons noté $[x]$ l'unité de la quantité x . Cependant, l'utilisation de la même unité pour le temps, la capacité électrique et l'inductance n'est pas du goût de tout le monde, et par conséquent les électriciens n'utilisent pas ce système**.

Souvent, afin d'avoir un aperçu des énergies nécessaires pour observer un effet en cours d'étude, on choisit une énergie de référence comme unité fondamentale. En physique des particules l'unité d'énergie la plus courante est l'*électronvolt* (eV), défini comme étant l'énergie cinétique acquise par un électron lorsqu'il est accéléré par une

* Des définitions différentes pour les constantes de proportionnalité en électrodynamique conduisent, entres autres, au système d'unités gaussiennes souvent utilisé dans les calculs théoriques, au système d'unités de Heaviside-Lorentz, au système d'unités électrostatiques et au système d'unités électromagnétiques.

Réf. 261

** Dans cette liste, l est la longueur, E l'énergie, F la force, $E_{\text{électrique}}$ le champ électrique et B le champ magnétique, m la masse, p la quantité de mouvement, a l'accélération, f la fréquence, I l'intensité du courant électrique, U la tension, T la température, v la vitesse, q la charge électrique, R la résistance, P la puissance, G la constante de la gravitation.

La page Web www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/general/units_en.html fournit un outil pour convertir diverses unités l'une vers l'autre.

Les chercheurs en relativité générale emploient fréquemment un autre système, dans lequel le *rayon de Schwarzschild* $r_s = 2Gm/c^2$ est utilisé pour mesurer des masses, en posant $c = G = 1$. Dans ce cas, la masse et la longueur possèdent la même dimension, et $\hbar$ possède la dimension d'une surface.

Réf. 262

Déjà au dix-neuvième siècle, George Stoney avait suggéré d'utiliser comme unités de longueur, de temps et de masse les quantités $l_s = \sqrt{Ge^2/(c^4 4\pi\epsilon_0)} = 1,4 \cdot 10^{-36}$ m, $t_s = \sqrt{Ge^2/(c^6 4\pi\epsilon_0)} = 4,6 \cdot 10^{-45}$ s et $m_s = \sqrt{e^2/(G 4\pi\epsilon_0)} = 1,9$ μ g. Comment ces unités sont-elles reliées aux unités de Planck?

Défi 555 s

différence de potentiel électrique de 1 volt (« protonvolt » serait une désignation plus appropriée). Ainsi nous avons $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$, ou approximativement

$$1 \text{ eV} \approx \frac{1}{6} \text{ aJ} \quad (102)$$

ce qui est facile à mémoriser. La simplification $c = \hbar = 1$ donne $G = 6,9 \cdot 10^{-57} \text{ eV}^{-2}$ et nous permet aussi d'utiliser l'unité eV pour la masse, la quantité de mouvement, la température, la fréquence, le temps et la distance, à l'aide des correspondances respectives

Défi 556 e $1 \text{ eV} \equiv 1,8 \cdot 10^{-36} \text{ kg} \equiv 5,4 \cdot 10^{-28} \text{ Ns} \equiv 242 \text{ THz} \equiv 11,6 \text{ kK}$ et $1 \text{ eV}^{-1} \equiv 4,1 \text{ fs} \equiv 1,2 \mu\text{m}$.

Pour pouvoir se représenter l'unité eV, les relations qui suivent sont utiles. La température ambiante, généralement considérée comme étant de 20°C ou 293 K , correspond à une énergie cinétique par particule de $0,025 \text{ eV}$ ou $4,0 \text{ zJ}$. L'énergie la plus élevée d'une particule, mesurée jusqu'à présent, appartient à un rayon cosmique d'une énergie de $3 \cdot 10^{20} \text{ eV}$ ou 48 J . Ici bas, sur la Terre, nous avons construit un accélérateur capable de produire une énergie d'environ 105 GeV ou 17 nJ pour des électrons et des anti-électrons, et un autre capable de produire une énergie de 10 TeV ou $1,6 \mu\text{J}$ pour des protons sera bientôt achevé. Ils appartiennent tous les deux au CERN à Genève et possèdent une circonférence de 27 km .

Réf. 263

La température la plus basse mesurée jusqu'à présent est de 280 pK , dans un système de noyaux de rhodium maintenus par un procédé de refroidissement particulier. L'intérieur de ce cryostat serait même le point le plus froid de tout l'univers. L'énergie cinétique par particule correspondant à cette température est également la plus petite jamais mesurée : elle correspond à 24 feV ou $3,8 \text{ vJ} = 3,8 \cdot 10^{-33} \text{ J}$. Pour des particules isolées, le record semble être celui de neutrons : des énergies cinétiques aussi faibles que 10^{-7} eV ont été obtenues, ce qui correspond à des longueurs d'onde de de Broglie de 60 nm .

Réf. 264

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LES UNITÉS

Le fait de ne pas utiliser les unités du SI peut coûter cher. En 1999, la NASA a perdu un satellite sur Mars parce que certains programmeurs de logiciels avaient utilisé des unités impériales* à la place des unités du SI dans des lignes de code. En conséquence, Mars Climate Orbiter s'écrasa sur la planète, au lieu de graviter autour de celle-ci. La perte fut évaluée à 100 millions d'euros environ**.

* *

Le *gray* est la quantité de radioactivité qui dépose 1 J sur 1 kg de matière. Le *sievert* est l'unité de radioactivité adaptée aux êtres humains en pondérant chaque type de tissu humain à l'aide d'un facteur représentatif de l'impact que le rayonnement dépose sur celui-ci. Quatre à cinq sieverts constituent une dose létale pour les êtres humains. En comparaison, la radioactivité naturelle présente à l'intérieur du corps humain conduit à une dose de $0,2 \text{ mSv}$ par an. Une radiographie moyenne aux rayons X engendre une

Réf. 265 radiation de 1 mSv , un scanner, 8 mSv .

* Des unités de mesure anglo-saxonnes. [N.D.T.]

** Ce récit ranima une vieille (et fausse) rumeur qui affirme que seuls trois pays dans le monde n'utilisent pas les unités du SI : le Libéria, les États-Unis et la Birmanie.

TABLEAU 40 Quelques valeurs mesurées de puissances visibles (intensités lumineuses).

OBSERVATION	INTENSITÉ LUMINEUSE
Flamme de bougie	1 cd
Lampe de poche	2 cd
Feux de position d'une voiture	10 cd
Plein phare d'une voiture (avec réflecteur, centre du faisceau)	60 cd
Lampe de cinéma	1,5 kcd
Flash photographique	1 Mcd
Phare	2 Mcd
Les plus gros projecteurs	80 Mcd

* *

Vous êtes décontenancés par la candela ? La définition dit simplement que $683 \text{ cd} = 683 \text{ lm/sr}$ correspond à 1 W/sr . La candela est donc une unité de la puissance lumineuse par angle (solide), ou d'*intensité lumineuse*, mis à part qu'elle est corrigée pour s'ajuster à la sensibilité de l'œil : la candela mesure simplement la puissance *visible* par unité d'angle.

De manière similaire, $683 \text{ lm} = 683 \text{ cd sr}$ correspond à 1 W . Donc le lumen et le watt mesurent tous les deux de la puissance, ou du flux d'énergie, mais le lumen mesure uniquement la partie *visible* de la puissance ou flux énergétique. Cette différence est exprimée en insérant les qualificatifs « radiant » ou « lumineux » : ainsi, le watt mesure le flux *radiant*, tandis que le lumen mesure le flux *lumineux*.

Défi 557 e

Le facteur 683 est d'origine historique. Une chandelle ordinaire émet une intensité lumineuse d'environ une candela. Par conséquent, la nuit, une chandelle peut être vue jusqu'à une distance de 10 ou 20 kilomètres. Une ampoule à incandescence de 100 W produit 1 700 lm, et les diodes émettrices de lumière les plus brillantes environ 5 lm. Les projecteurs de cinéma produisent environ 2 Mlm, et les flashes les plus intenses, comme l'éclair, 100 Mlm.

L'*éclairement énergétique* de la lumière du soleil est d'environ $1\,300 \text{ W/m}^2$ lors d'une journée ensoleillée. Par ailleurs, l'*éclairement lumineux* n'est que de $120 \text{ klm/m}^2 = 120 \text{ klux}$ ou 170 W/m^2 . (Une journée d'été recouverte de nuages ou une journée d'hiver dégagée produit environ 10 klux. L'éclairement lumineux est principalement ce que nous appelons la « luminosité » dans la vie courante.) Ces nombres indiquent que la plupart de l'énergie du Soleil qui parvient à la Terre se situe en dehors du spectre visible.

Réf. 266

Sur un glacier, près de la côte, sur le sommet d'une montagne, ou lors de conditions météorologiques particulières, la luminosité peut atteindre 150 klux. Les lampes les plus brillantes, celles utilisées pendant les opérations chirurgicales, produisent 120 klux. Les hommes ont besoin d'environ 30 lux pour une lecture confortable. Les musées sont souvent maintenus dans l'obscurité parce que les peintures à l'eau sont dégradées par la lumière au-delà de 100 lux, et les peintures à l'huile au dessus de 200 lux. La pleine lune produit 0,1 lux, et le ciel lors d'une nuit sombre sans lune, environ 1 mlux. Les yeux conservent leur aptitude à distinguer les couleurs quelque part entre 0,1 lux et 0,01 lux,

TABLEAU 41 Quelques valeurs mesurées d'éclairements lumineux.

OBSERVATION	ÉCLAIREMENT LUMINEUX
Pâle étoile	0,1 nlx
Sirius	10 μ lx
Le phot (ancienne unité d'éclairement lumineux)	10 μ lx
Jupiter	20 μ lx
Pleine Lune	0,01 à 0,24 lx
La rue la nuit, faible trafic, faible éclairage	0,1 à 3 lx
La rue la nuit, fort trafic	10 à 30 lx
Pour la lecture	50 à 100 lx
Écran de cinéma	100 lx
Lieu de travail	0,2 à 5 klx
Journée nuageuse	1 klx
Journée ensoleillée	120 klx
Film dans un projecteur de cinéma	5 Mlx
Douloureux pour l'œil	100 Mlx

l'œil cesse de remplir sa fonction en deçà de 1 nlux. Les dispositifs techniques qui produisent des images dans l'obscurité, telles que les lunettes de vision nocturne, commencent à fonctionner à partir de 1 μ lux. Par ailleurs, le corps humain lui-même *brille* à environ 1 plux, une valeur trop faible pour pouvoir être décelée par l'œil, mais facilement mesurable à l'aide d'appareils spécialisés. La source de cette émission reste toujours du domaine de la recherche.

* *

Les plus fortes intensités lumineuses atteignent plus de 10^{18} W/m², soit plus de 15 ordres de grandeur au dessus de l'intensité de la lumière du soleil. Elles sont produites par des focalisations très étroites de lasers pulsés. Le champ électrique de ces impulsions lumineuses est du même ordre que le champ situé à l'intérieur des atomes, un tel faisceau ionise par conséquent toute la matière qu'il rencontre.

Réf. 267

* *

La *densité lumineuse* est une quantité qui est souvent utilisée par les spécialistes de la lumière. Son unité est 1 cd/m², que l'on désigne officieusement 1 Nit et abrégé 1 nt. Les yeux voient, uniquement avec les bâtonnets, de 0,1 μ cd/m² à 1 mcd/m², ils voient avec les cônes simplement au-dessus de 5 cd/m², la perception est meilleure entre 100 et 50 000 cd/m², et ils deviennent complètement éblouis au-delà de 10 Mcd/m² : soit une étendue totale de 15 ordres de grandeur.

* *

La longueur de Planck est approximativement égale à la longueur d'onde de de Broglie $\lambda_B = h/mv$ d'un homme marchant à son aise ($m = 80$ kg, $v = 0,5$ m/s), ce mouvement

Réf. 268

est par conséquent appelé à juste titre la « promenade de Planck ».

* *

La masse de Planck est égale à la masse d'environ 10^{19} protons. C'est approximativement la masse d'un embryon humain, à l'âge de dix jours environ.

* *

La seconde ne correspond plus à 1/86 400ème du jour, bien que ce fût le cas en l'an 1900. La Terre met maintenant environ 86 400,002 s pour effectuer une rotation, de telle sorte que le *Service international de la rotation terrestre* doit régulièrement introduire une seconde intercalaire pour s'assurer que le Soleil est à son plus haut niveau dans le ciel à midi tapante*. Le temps défini de cette manière est appelé *Temps Universel Coordonné*. La vitesse de rotation de la Terre varie également de manière irrégulière d'un jour à l'autre à cause des conditions météorologiques, la vitesse de rotation moyenne fluctue même entre l'hiver et l'été à cause des changements qui surviennent dans les calottes glaciaires polaires, et de surcroît cette moyenne diminue au cours du temps à cause du frottement engendré par les marées. La fréquence d'insertion de ces secondes intercalaires est par conséquent supérieure à une fois tous les 500 jours, et n'est pas constante dans le temps.

* *

Les quantités mesurées de la manière la plus précise dans la nature sont les fréquences de certains pulsars millisecondes**, la fréquence de certaines transitions atomiques étroites, et la constante de Rydberg de l'*hydrogène atomique*, qui peuvent toutes être mesurées aussi précisément qu'est définie la seconde. La transition du césium qui définit la seconde possède une largeur finie de sa raie spectrale, ce qui restreint la précision accessible : cette limite est d'environ 14 chiffres.

* *

Réf. 269 L'horloge la plus précise jamais réalisée, en utilisant des micro-ondes, possède une stabilité de 10^{-16} pendant une durée de fonctionnement de 500 s. Pour des durées plus longues, le record en 1997 fut d'environ 10^{-15} , mais des valeurs tournant autour de 10^{-17} semblent
Réf. 270 rester du domaine du technologiquement possible. La précision des horloges est limitée par le bruit pour des brèves durées de mesure, et pour des longues durées de mesure par des biais, c'est-à-dire par des effets systématiques. La région de la plus forte stabilité dépend du type d'horloge utilisée, elle se situe généralement entre 1 ms pour des horloges optiques et 5 000 s pour des masers. Les pulsars sont le seul type d'horloge pour lequel cette région n'est pas encore déterminée, elle se situe vraisemblablement à plus de 20 années, c'est-à-dire le temps qui s'est écoulé entre leur découverte et l'instant où nous écrivons ces lignes.

* *

* Leur site Web sur hpiers.obspm.fr donne plus de précisions sur les particularités de ces insertions, comme sur maia.usno.navy.mil, l'un des quelques sites Web militaires utiles. Consultez aussi www.bipm.fr, le site du BIPM.

** Un tour d'horizon de ce travail fascinant en est donné par J. H. TAYLOR, Pulsar timing and relativistic gravity, *Philosophical Transactions of the Royal Society, London A* 341, pp. 117–134, 1992.

Les durées les plus brèves qui ont été mesurées sont les durées de vie de certaines particules « élémentaires ». En particulier, la durée de vie de certains mésons D a été évaluée à moins de 10^{-23} s. De telles périodes sont mesurées en utilisant une chambre à bulles, dans laquelle la trace est photographiée. Pouvez-vous estimer quelle est la longueur de cette trajectoire ? (C'est une question trompeuse – si votre longueur ne peut pas être observée à l'aide d'un microscope optique, c'est que vous avez fait une erreur dans vos calculs.)

Réf. 271

Défi 558 s

* *

Les durées les plus longues que l'on rencontre dans la nature sont les durées de vie de certains isotopes radioactifs, plus de 10^{15} années, et la limite inférieure de certaines désintégrations de protons, soit 10^{32} années. Ces périodes sont donc beaucoup plus grandes que l'âge de l'univers, estimé à quatorze milliards d'années.

Réf. 272

* *

Les constantes fondamentales de la physique mesurées avec le moins de précision sont la constante de la gravitation G et la constante de couplage de l'interaction forte α_s . L'âge de l'univers et sa densité sont déterminés avec encore moins de précision (regardez le [Tableau 44](#)).

Page 315

* *

La précision des mesures de masse des solides est limitée par des effets simples tels que l'adsorption de l'eau. Pouvez-vous estimer la masse d'une monocouche d'eau – une couche ayant l'épaisseur d'une seule molécule – sur un métal pesant 1 kg ?

Défi 559 s

* *

Les variations des quantités sont souvent beaucoup plus faciles à mesurer que leurs valeurs. Par exemple, dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles, la sensibilité atteinte en 1992 était $\Delta l/l = 3 \cdot 10^{-19}$ pour des longueurs de l'ordre de 1 m. Autrement dit, pour un bloc de métal d'environ un mètre cube il est possible de mesurer des variations de longueur à peu près 3 000 fois plus petites que le rayon d'un proton. Ces dispositifs sont dorénavant en train d'être surpassés par les interféromètres en anneau. Des interféromètres en anneau mesurant des différences de fréquence de 10^{-21} ont déjà été construits, et ils sont toujours en cours de perfectionnement.

Réf. 273

Réf. 274

* *

L'astronome suédois Anders Celsius (1701–1744) fixa initialement le point de congélation de l'eau à 100 degrés et le point d'ébullition à 0 degré. Cette échelle fut inversée par la suite. Cependant, l'histoire ne se termine pas là. Avec la définition officielle du kelvin et du degré Celsius, à la pression standard de 1 013,25 Pa, l'eau bout à 99,974°C. Pouvez-vous expliquer pourquoi ce n'est plus 100°C ?

Réf. 275

Défi 560 s

* *

Au cours du millénaire précédent, on avait coutume de mesurer l'énergie thermique en utilisant la *calorie* comme unité, notée cal. 1 cal est l'énergie nécessaire pour réchauffer 1 g d'eau de 1 K. Pour compliquer les choses, 1 kcal était souvent noté 1 Cal. (Nous parlions également de grande et de petite calorie.) 1 kcal vaut 4,1868 kJ.

* *

Les unités du SI sont adaptées aux êtres humains : les valeurs du battement de cœur, de la taille humaine, du poids, de la température et de la quantité de substance d'un homme se rapprochent de la valeur unitaire à guère plus d'un couple d'ordres de grandeurs. Les unités du SI confirment donc (approximativement) ce que disait Protagoras il y a 25 siècles : « L'homme est la mesure de toutes choses ».

* *

Certains systèmes d'unités sont particulièrement mal adaptés aux hommes. Le plus infâme d'entre eux est la taille S des chaussures. C'est un nombre pur calculé ainsi :

$$\begin{aligned} S_{\text{France}} &= 1,5 \text{ cm}^{-1}(l + 1 \pm 1 \text{ cm}) \\ S_{\text{Europe centrale}} &= 1,5748 \text{ cm}^{-1}(l + 1 \pm 1 \text{ cm}) \\ S_{\text{Homme anglo-saxon}} &= 1,181 \text{ cm}^{-1}(l + 1 \pm 1 \text{ cm}) - 22 \end{aligned} \quad (103)$$

où l représente la longueur d'un pied et la correction de longueur dépend de l'entreprise de confection. De surcroît, la formule anglo-saxonne n'est pas valable pour les femmes et les enfants, où le premier facteur dépend, pour des raisons marketing, à la fois du fabricant et de la taille elle-même. Le standard ISO exige, de façon non surprenante, d'exprimer la longueur du pied en millimètres.

* *

Le tableau des préfixes du SI recouvre 72 ordres de grandeurs. Combien de préfixes supplémentaires seraient nécessaires ? Même une liste très longue n'incorporera qu'une partie infime de l'étendue infinie des possibilités. La Conférence Générale des Poids et Mesures devra-t-elle se poursuivre éternellement, pour définir un nombre infini de préfixes du SI ? Pourquoi ?

Défi 561 s

* *

Le philosophe français Voltaire, après avoir rencontré Newton, publia l'histoire maintenant célèbre qui raconte que la correspondance entre la chute des objets et le mouvement de la Lune fut découverte par Newton lorsqu'il vit une pomme tomber d'un arbre. Plus d'un siècle plus tard, juste avant la Révolution Française, un jury de scientifiques décida de prendre comme unité de la force précisément celle exercée par la gravité sur une *pomme étalon*, et de la baptiser du nom de ce scientifique anglais. Après une étude approfondie, on trouva que la masse de la pomme étalon était de 101,9716 g, son poids fut donc appelé 1 newton. Depuis lors, les visiteurs du musée à Sèvres près de Paris ont eu la possibilité d'admirer le mètre étalon, le kilogramme étalon et la pomme étalon*.

* Pour être franc, c'est une blague : il n'existe aucune pomme étalon. Par contre, ce qui suit n'est *pas* une plaisanterie : des propriétaires de plusieurs pommiers en Grande-Bretagne et aux États-Unis prétendirent descendre, suite à un déracinement, de l'arbre original sous lequel Newton eut son trait de génie. Des tests ADN ont même été réalisés pour décider s'ils dériveraient tous du même arbre. De façon non surprenante, le résultat a établi que l'arbre situé au MIT, contrairement à ceux de Grande-Bretagne, est un faux.

Réf. 276

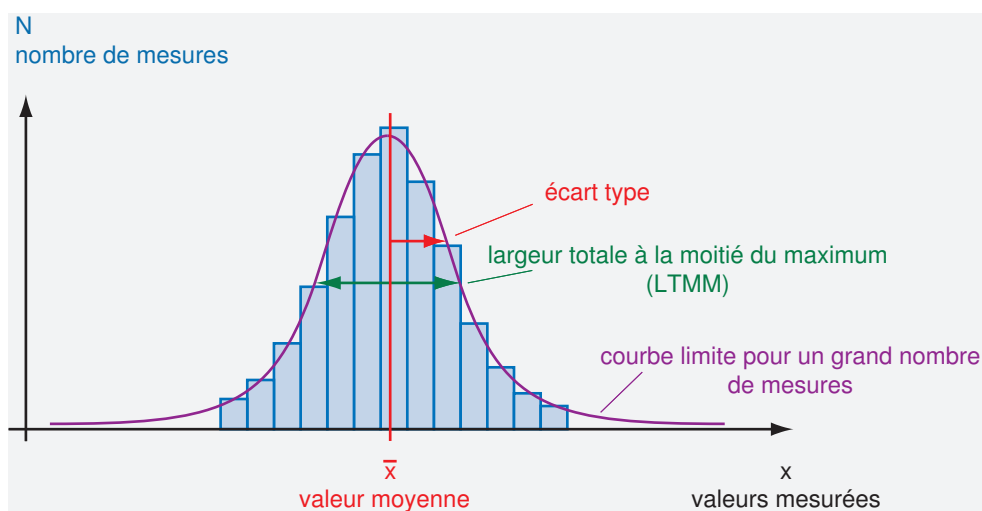


FIGURE 149 Une expérience de précision et sa distribution des mesures.

PRÉCISION ET EXACTITUDE DES MESURES

Comme nous l'avons expliqué à la [page 286](#), la *précision* exprime dans quelle mesure un résultat est bien reproduit lorsque l'évaluation est réitérée, l'*exactitude* est le degré de correspondance d'une mesure à la véritable valeur. Le manque de précision est dû à des *erreurs aléatoires* ou accidentelles, la meilleure façon de les quantifier consiste à évaluer l'*écart-type*, généralement noté σ , qui est défini par :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (104)$$

Défi 562 s où $\bar{x}$ représente la moyenne des mesures x_i . (Pouvez-vous imaginer pourquoi on utilise $n-1$ dans la formule au lieu de n ?)

Pour la plupart des expériences, la distribution des valeurs des mesures tend vers une loi normale, également appelée *loi de Laplace-Gauss*, à partir du moment où nous accroissons le nombre de mesures. La distribution, indiquée dans la [Figure 149](#), est décrite par l'expression

$$N(x) \approx e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}. \quad (105)$$

Défi 563 e Le carré de l'écart type, σ^2 , est également appelé la *variance*. Pour une loi gaussienne des valeurs de mesure, $2,35\sigma$ est la largeur totale de la courbe à la moitié du maximum.

Réf. 277 Le manque d'exactitude est dû à des *erreurs systématiques*, on ne peut généralement que les estimer, seulement. Cette estimation est souvent ajoutée aux erreurs aléatoires pour produire une erreur expérimentale *totale*, également parfois dénommée *incertitude totale*.

Réf. 278 Les tableaux qui suivent fournissent les valeurs des constantes physiques et des propriétés des particules les plus importantes, en unités du SI et dans quelques autres unités courantes, comme on les trouve dans les sources de référence. Ces valeurs sont les

moyennes mondiales des meilleures mesures effectuées jusqu'à présent. Comme d'habitude, les biais expérimentaux, incluant à la fois les erreurs aléatoires et les erreurs systématiques estimées, sont exprimées en donnant l'écart type dans les derniers chiffres, par exemple 0,31(6) signifie – *grosso modo* – $0,31 \pm 0,06$. En réalité, derrière chacun des nombres qui apparaissent dans les tableaux suivants se cache une longue histoire qu'il serait digne de conter, mais pour lesquelles nous n'avons pas suffisamment de place ici*.

Quelles sont les limites à l'exactitude et à la précision ? Il n'existe aucun procédé, même en principe, permettant de mesurer une longueur x jusqu'à une *précision* supérieure à environ 61 chiffres, parce que $\Delta x/x > l_{\text{Pl}}/d_{\text{horizon}} = 10^{-61}$. (Cela est-il également vrai pour la force ou pour le volume ?) Dans la dernière partie de notre texte, l'examen des horloges et des mètres étalons renforcera cette limite théorique.

Mais il n'est pas difficile de déduire des limites pratiques plus strictes. Aucune machine imaginable ne peut mesurer des quantités avec une précision plus élevée que la mesure du diamètre de la Terre à une incertitude près égale à la longueur la plus petite jamais mesurée, soit 10^{-19} m environ, c'est-à-dire environ 26 chiffres de précision. En utilisant une limite plus réaliste d'une machine d'une taille de 1 000 m, on obtient une limite de 22 chiffres. Si, comme nous l'avons prédit plus haut, les mesures du temps atteignent vraiment 17 chiffres de précision, alors elles seront proches de la limite pratique, parce que mis à part la taille, il existe une contrainte pratique supplémentaire : le coût. En réalité, un chiffre supplémentaire dans la précision d'une mesure signifie souvent qu'il faille un chiffre supplémentaire dans le coût de l'équipement.

CONSTANTES PHYSIQUES FONDAMENTALES

En principe, toutes les propriétés quantitatives de la matière peuvent être calculées avec la théorie quantique. Par exemple, la couleur, la densité et les propriétés élastiques peuvent être prédites en faisant appel aux valeurs des constantes qui suivent, en utilisant les équations du modèle standard de la physique des hautes énergies.

TABLEAU 42 Constantes physiques fondamentales.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT. ^a
nombre de dimensions d'espace-temps		3 + 1	0 ^b
vitesse de la lumière dans le vide ^c c		299 792 458 m/s	0
perméabilité magnétique du vide ^c μ_0		$4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m	0
		= 1,256 637 061 435 ... $\mu\text{H/m}$	0
permittivité diélectrique du vide ^c $\epsilon_0 = 1/\mu_0 c^2$		8,854 187 817 620 ... pF/m	0
constante de Planck originale	h	$6,626 068 76(52) \cdot 10^{-34}$ Js	$7,8 \cdot 10^{-8}$
constante de Planck réduite	$\hbar$	$1,054 571 596(82) \cdot 10^{-34}$ Js	$7,8 \cdot 10^{-8}$
charge du positron	e	0,160 217 646 2(63) aC	$3,9 \cdot 10^{-8}$

* Certains de ces récits peuvent être retrouvés dans l'ouvrage de N. W. WISE, *The Values of Precision*, Princeton University Press, 1994. Le domaine des mesures de haute précision, à partir duquel sont tirés les résultats de ces pages, est un monde à lui seul. Une magnifique introduction en est donnée par J. D. FAIRBANKS, B. S. DEEVER, C. W. EVERITT & P. F. MICHAELSON, eds., *Near Zero : Frontiers of Physics*, Freeman, 1988.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT. ^a
constante de Boltzmann	k	$1,380\,650\,3(24) \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$
constante gravitationnelle	G	$6,673(10) \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
constante de couplage gravit.	$\kappa = 8\pi G/c^4$	$2,076(3) \cdot 10^{-43} \text{ s}^2/\text{kg m}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
constante de structure fine ^d ,	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$	$1/137,035\,999\,76(50)$	$3,7 \cdot 10^{-9}$
constante de couplage e.m.	$= g_{\text{em}}(m_e^2 c^2)$	$= 0,007\,297\,352\,533(27)$	$3,7 \cdot 10^{-9}$
constante de couplage de Fermi ^d ,	$G_F/(\hbar c)^3$	$1,166\,39(1) \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$	$8,6 \cdot 10^{-6}$
constante de couplage faible	$\alpha_w(M_Z) = g_w^2/4\pi$	$1/30,1(3)$	$1 \cdot 10^{-2}$
angle de mélange électrofaible	$\sin^2 \theta_w(\overline{MS})$	$0,231\,24(24)$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
angle de mélange électrofaible	$\sin^2 \theta_w(\text{enveloppe})$	$0,2224(19)$	$8,7 \cdot 10^{-3}$
	$= 1 - (m_w/m_Z)^2$		
constante de couplage fort ^d	$\alpha_s(M_Z) = g_s^2/4\pi$	$0,118(3)$	$25 \cdot 10^{-3}$

a. Incertitude : écart-type des erreurs de mesure.

b. De 10^{-19} m et jusqu'à 10^{26} m, uniquement.

c. Définition numérique de la constante. (La permittivité diélectrique du vide est aussi appelée constante électrique et la perméabilité du vide, constante magnétique [N.D.T.].)

Page ??

d. Toutes les constantes de couplage dépendent du transfert du quadrivecteur impulsion, comme expliqué dans la section sur la renormalisation. La *constante de structure fine* est le nom traditionnel de la constante de couplage électromagnétique g_{em} dans le cas d'un transfert de quadrivecteur impulsion de $Q^2 = m_e^2 c^2$, ce qui est la valeur la plus petite possible. Pour des transferts d'impulsion plus élevés elle possède des valeurs plus grandes, par exemple $g_{\text{em}}(Q^2 = M_W^2 c^2) \approx 1/128$. La constante de couplage de l'interaction forte possède des valeurs supérieures pour des transferts d'impulsion moins importants, par exemple $\alpha_s(34 \text{ GeV}) = 0,14(2)$.

Pourquoi toutes ces constantes possèdent-elles les valeurs qu'elles ont ? La réponse est différente dans chacune des situations. Pour toute constante possédant une dimension, tel que le quantum d'action $\hbar$, la valeur numérique a seulement une signification historique. Elle est de $1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ à cause de la définition du SI du joule et de la seconde. La question de savoir pourquoi la valeur d'une constante dimensionnelle n'est pas plus grande ni plus petite nous oblige toujours à comprendre l'origine de certains nombres sans dimension qui donnent le rapport entre la constante et l'unité naturelle correspondante. La compréhension des tailles des atomes, des gens, des arbres et des étoiles, de la durée des processus moléculaires et atomiques, ou de la masse des noyaux et des montagnes, implique de comprendre les ratios entre ces valeurs et les unités naturelles correspondantes. La clé de la compréhension de la nature se trouve donc dans la compréhension de tous les ratios, et ainsi de toutes les constantes sans dimension. L'histoire des rapports les plus importants est contée dans la partie qui conclut cette aventure.

Les constantes fondamentales engendrent les observations utiles suivantes, de haute précision.

TABLEAU 43 Constantes physiques dérivées.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT.
impédance caractéristique du vide	$Z_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$	$376,730\,313\,461\,77\dots \Omega$	0
nombre d'Avogadro	N_A	$6,022\,141\,99(47) \cdot 10^{23}$	$7,9 \cdot 10^{-8}$
constante de Rydberg ^a	$R_\infty = m_e c \alpha^2 / 2\hbar$	$10\,973\,731,568\,549(83) \text{ m}^{-1}$	$7,6 \cdot 10^{-12}$

Q U A N T I T É	S Y M B O L E	V A L E U R U N I T É S S I	I N C E R T.
quantum de conductance	$G_0 = 2e^2/h$	77,480 916 96(28) μS	$3,7 \cdot 10^{-9}$
quantum du flux magnétique	$\varphi_0 = h/2e$	2,067 833 636(81) pWb	$3,9 \cdot 10^{-8}$
rapport de fréquence de Josephson	$2e/h$	483,597 898(19) THz/V	$3,9 \cdot 10^{-8}$
constante de von Klitzing	$h/e^2 = \mu_0 c/2\alpha$	25 812,807 572(95) Ω	$3,7 \cdot 10^{-9}$
magnéton de Bohr	$\mu_B = e\hbar/2m_e$	9,274 008 99(37) $\gamma\text{J/T}$	$4,0 \cdot 10^{-8}$
fréquence cyclotron de l'électron	$f_c/B = e/2\pi m_e$	27,992 4925(11) GHz/T	$4,0 \cdot 10^{-8}$
rayon classique de l'électron	$r_e = e^2/4\pi\epsilon_0 m_e c^2$	2,817 940 285(31) fm	$1,1 \cdot 10^{-8}$
longueur d'onde de Compton de l'électron	$\lambda_c = h/m_e c$ $\lambda_c = \hbar/m_e c = r_e/\alpha$	2,426 310 215(18) pm 0,386 159 264 2(28) pm	$7,3 \cdot 10^{-9}$ $7,3 \cdot 10^{-9}$
rayon de Bohr ^a	$a_\infty = r_e/\alpha^2$	52,917 720 83(19) pm	$3,7 \cdot 10^{-9}$
magnéton nucléaire	$\mu_N = e\hbar/2m_p$	$5,050 783 17(20) \cdot 10^{-27}$ J/T	$4,0 \cdot 10^{-8}$
rapport de masse proton-électron	m_p/m_e	1836,152 667 5(39)	$2,1 \cdot 10^{-9}$
constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma = \pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	56,704 00(40) nW/m ² K ⁴	$7,0 \cdot 10^{-6}$
constante de la loi du déplacement de Wien	$b = \lambda_{\max} T$	2,897 768 6(51) mmK	$1,7 \cdot 10^{-6}$
constante de conversion de bits en entropie		10^{23} bit = 0,956 994 5(17) J/K	$1,7 \cdot 10^{-6}$
contenu énergétique du TNT		de 3,7 à 4,0 MJ/kg	$4 \cdot 10^{-2}$

a. Pour une masse infinie du noyau.

Certaines propriétés générales de la nature sont énumérées dans le tableau qui suit. (Si vous voulez un défi, pouvez-vous déterminer si une quelconque propriété de l'Univers lui-même est listée ?)

Défi 565 s

TABLEAU 44 Constantes astrophysiques.

Q U A N T I T É	S Y M B O L E	V A L E U R
constante gravitationnelle	G	$6,672 59(85) \cdot 10^{-11}$ m ³ /kg s ²
constante cosmologique	Λ	env. $1 \cdot 10^{-52}$ m ⁻²
année tropicale en 1900 ^a	a	31 556 925,974 7 s
année tropicale en 1994	a	31 556 925,2 s
jour sidéral moyen	d	23 ^h 56'4,090 53''
année-lumière	al	9,460 528 173 ... Pm
unité astronomique ^b	ua	149 597 870,691(30) km
parsec	pc	30,856 775 806 Pm = 3,261 634 al
âge de l'Univers ^c	t_0	$4,333(53) \cdot 10^{17}$ s = 13,73(0,17) $\cdot 10^9$ a
(déterminé par l'espace-temps, via l'expansion, d'après la relativité générale)		
âge de l'Univers ^c	t_0	$3,5(4) \cdot 10^{17}$ s = 11,5(1,5) $\cdot 10^9$ a, au plus
(déterminé par la matière, via les galaxies et les étoiles, d'après la mécanique quantique)		
constante de Hubble ^c	H_0	$2,3(2) \cdot 10^{-18}$ s ⁻¹ = 0,73(4) $\cdot 10^{-10}$ a ⁻¹
	$H_0 = h_0 \cdot 100$ km/sMpc = $h_0 \cdot 1,0227 \cdot 10^{-10}$ a ⁻¹	

Q U A N T I T É	S Y M B O L E	V A L E U R
constante de Hubble réduite ^c	h_0	0,71(4)
paramètre de décélération	$q_0 = -(\ddot{a}/a)_0/H_0^2$	-0,66(10)
distance de l'horizon de l'Univers ^c	$d_0 = 3ct_0$	$40,0(6) \cdot 10^{26} \text{ m} = 13,0(2) \text{ Gpc}$
topologie de l'Univers		inconnue
nombre de dimensions spatiales		3, jusqu'à 10^{26} m de distance
densité critique de l'Univers	$\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$	$h_0^2 \cdot 1,878\,82(24) \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$ $= 0,95(12) \cdot 10^{-26} \text{ kg/m}^3$
paramètre de densité (totale) ^c	$\Omega_0 = \rho_0/\rho_c$	1,02(2)
paramètre de densité baryonique ^c	$\Omega_{B0} = \rho_{B0}/\rho_c$	0,044(4)
paramètre de densité de matière noire froide ^c	$\Omega_{\text{CDM}0} = \rho_{\text{CDM}0}/\rho_c$	0,23(4)
paramètre de densité des neutrinos ^c	$\Omega_{\nu 0} = \rho_{\nu 0}/\rho_c$	0,001 à 0,05
paramètre de densité de l'énergie sombre ^c	$\Omega_{X0} = \rho_{X0}/\rho_c$	0,73(4)
paramètre de l'équation d'état de l'énergie sombre	$w = p_X/\rho_X$	-1,0(2)
masse baryonique	m_b	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
densité baryonique		$0,25(1) \text{ /m}^3$
densité de matière lumineuse		$3,8(2) \cdot 10^{-28} \text{ kg/m}^3$
étoiles dans l'Univers	n_e	$10^{22 \pm 1}$
baryons dans l'Univers	n_b	$10^{81 \pm 1}$
température du fond diffus micro-onde ^d	T_0	$2,725(1) \text{ K}$
photons dans l'Univers	n_γ	10^{89}
densité d'énergie des photons	$\rho_\gamma = \pi^2 k^4/15 T_0^4$	$4,6 \cdot 10^{-31} \text{ kg/m}^3$
densité de photons		$410,89 \text{ /cm}^3$ ou $400 \text{ /cm}^3 (T_0/2,7 \text{ K})^3$
amplitude des perturbations de densité	$\sqrt{S}$	$5,6(1,5) \cdot 10^{-6}$
amplitude des ondes gravitationnelles	$\sqrt{T}$	$< 0,71\sqrt{S}$
fluctuations de masse sur 8 Mpc	σ_8	0,84(4)
indice spectral scalaire	n	0,93(3)
variation de l'indice spectral	$dn/d \ln k$	-0,03(2)
longueur de Planck	$l_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^3}$	$1,62 \cdot 10^{-35} \text{ m}$
temps de Planck	$t_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar G/c^5}$	$5,39 \cdot 10^{-44} \text{ s}$
masse de Planck	$m_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c/G}$	$21,8 \text{ } \mu\text{g}$
nombre d'instants dans l'histoire ^c	t_0/t_{Pl}	$8,7(2,8) \cdot 10^{60}$
points de l'espace-temps dans l'horizon ^c	$N_0 = (R_0/l_{\text{Pl}})^3 \cdot (t_0/t_{\text{Pl}})$	$10^{244 \pm 1}$
masse dans l'horizon	M	$10^{54 \pm 1} \text{ kg}$

- Défi 566 s**
Réf. 279
- Page 210**
- a. Définition de la constante, d'un équinoxe vernal à l'autre équinoxe vernal. Elle était autrefois utilisée pour définir la seconde. (Rappelez-vous : π secondes représentent à peu près un nanosiècle.) La valeur de 1990 compte environ 0,7 s de moins, correspondant à un ralentissement d'approximativement 0,2 ms/a. (Faites attention : pourquoi ?) Il existe même une formule empirique pour évaluer la variation de la durée de l'année au cours du temps.
- b. Distance moyenne Terre-Soleil. Cette précision vraiment stupéfiante de 30 m résulte des durées moyennes de propagation des signaux envoyés par les navettes spatiales Viking en orbite et les atterrisseurs martiens, récoltés durant une période de plus de vingt ans.
- c. L'indice 0 représente les valeurs d'aujourd'hui.
- d. Ce rayonnement fut produit lorsque l'Univers était âgé de 380 000 ans et avait une température d'environ 3 000 K. Les fluctuations ΔT_0 qui déclenchèrent la formation des galaxies sont aujourd'hui d'environ $16 \pm 4 \mu\text{K} = 6(2) \cdot 10^{-6} T_0$.

Soyez vigilants : dans l'ultime partie de cet ouvrage on montre qu'un grand nombre des constantes du **Tableau 44** ne sont pas des quantités physiquement raisonnables. Elles doivent être considérées avec beaucoup de circonspection. Les constantes plus spécifiques données dans le tableau qui suit sont toutes raisonnables, cependant.

TABLEAU 45 Constantes astronomiques.

Q U A N T I T É	S Y M B O L E	V A L E U R
masse de la Terre	$M_{\oplus}$	$5,972\,23(8) \cdot 10^{24} \text{ kg}$
longueur gravitationnelle de la Terre	$l_{\oplus} = 2GM/c^2$	8,870(1) mm
rayon de la Terre, à l'équateur ^a	$R_{\oplus\text{eq}}$	6 378,1367(1) km
rayon de la Terre, aux pôles ^a	$R_{\oplus\text{p}}$	6 356,7517(1) km
distance Équateur-pôle ^a		10 001,966 km (moyenne)
aplatissement de la Terre ^a	$e_{\oplus}$	1/298,25231(1)
densité moyenne de la Terre	$\rho_{\oplus}$	5,5 Mg/m ³
âge de la Terre	$T_{\oplus}$	4,55 Ga = 143 Ps
rayon de la Lune	$R_{\mathcal{L}\text{ v}}$	1 738 km dans la direction de la Terre
rayon de la Lune	$R_{\mathcal{L}\text{ h}}$	1 737,4 km dans les deux autres directions
masse de la Lune	$M_{\mathcal{L}}$	$7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$
distance moyenne de la Lune ^b	$d_{\mathcal{L}}$	384 401 km
distance de la Lune au périgée ^b		typiquement 363 Mm, minimum historique 359 861 km
distance de la Lune à l'apogée ^b		typiquement 404 Mm, maximum historique 406 720 km
taille angulaire de la Lune ^c		en moyenne $0,5181^\circ = 31,08'$, minimum $0,49^\circ$, maximum - ligne la plus courte $0,55^\circ$
densité moyenne de la Lune	$\rho_{\mathcal{L}}$	3,3 Mg/m ³
masse du Soleil	$M_{\odot}$	$1,988\,43(3) \cdot 10^{30} \text{ kg}$
longueur gravitationnelle du Soleil	$l_{\odot} = 2GM_{\odot}/c^2$	2,953 250 08 km
luminosité du Soleil	$L_{\odot}$	384,6 YW
rayon solaire équatorial	$R_{\odot}$	695,98(7) Mm

Q U A N T I T É	S Y M B O L E	V A L E U R
taille angulaire du Soleil		0,53° en moyenne; minimum le quatre juillet (aphélie) 1888'', maximum le quatre janvier (périhélie) 1952''
densité moyenne du Soleil	$\rho_{\odot}$	1,4 Mg/m ³
distance moyenne du Soleil	UA	149 597 870,691(30) km
âge du Soleil	$T_{\odot}$	4,6 Ga
vitesse solaire	$v_{\odot g}$	220(20) km/s
autour du centre de la galaxie		
vitesse solaire	$v_{\odot b}$	370,6(5) km/s
par rapport au fond diffus cosmologique		
distance au centre galactique		8,0(5) kpc = 26,1(1,6) kal
âge de la Voie lactée		13,6 Ga
taille de la Voie lactée		env. 10 ²¹ m ou 100 kal
masse de la Voie lactée		10 ¹² masses solaires, env. 2 · 10 ⁴² kg
masse de Jupiter	M_{J}	1,90 · 10 ²⁷ kg
rayon jovien équatorial	R_{J}	71,398 Mm
rayon jovien polaire	R_{J}	67,1(1) Mm
distance moyenne de Jupiter	D_{J}	778 412 020 km
au Soleil		
galaxie connue la plus éloignée	1835 IR1916	13,2 · 10 ⁹ al = 1,25 · 10 ²⁶ m, redshift 10

a. La forme de la Terre est décrite de la manière la plus précise par le Système géodésique mondial. La dernière édition date de 1984. Pour une présentation largement développée de ses contextes et de ses détails, consultez le site Web www.wgs84.com. L'Union Géodésique et Géophysique Internationale révisa les données en l'an 2000. Les rayons et l'aplatissement donnés ici sont ceux du système de marée « mean tide system ». Ils diffèrent de 0,7 m environ de ceux du système de marée « zero tide system » et de d'autres systèmes. Les particularités de ce domaine représentent une science à part.

b. Mesurée de centre à centre. Pour trouver la position précise de la Lune à une date donnée, consultez la page www.fourmilab.ch/earthview/moon_ap_per.html. Pour les planètes, consultez la page www.fourmilab.ch/solar/solar.html et les autres pages du même site.

c. Les angles sont définis comme suit : 1 degré = 1° = $\pi/180$ rad, 1 (première) minute d'arc = 1' = 1°/60, 1 seconde (minute) d'arc = 1'' = 1'/60. Les anciennes unités « tierce minute d'arc » et « quarte minute d'arc », valant chacune 1/60e de la précédente, ne sont plus utilisées. (« Minute » signifiait à l'origine « très petit », comme c'est toujours le cas dans l'anglais moderne.)

NOMBRES UTILES

Réf. 280

π	3, 14159 26535 89793 23846 26433 83279 50288 41971 69399 37510 ₅
e	2, 71828 18284 59045 23536 02874 71352 66249 77572 47093 69995 ₉
γ	0, 57721 56649 01532 86060 65120 90082 40243 10421 59335 93992 ₃
ln 2	0, 69314 71805 59945 30941 72321 21458 17656 80755 00134 36025 ₅
ln 10	2, 30258 50929 94045 68401 79914 54684 36420 76011 01488 62877 ₂
$\sqrt{10}$	3, 16227 76601 68379 33199 88935 44432 71853 37195 55139 32521 ₆

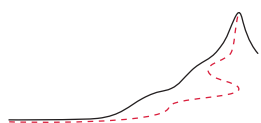
Si le nombre π est *normal*, c'est-à-dire si les chiffres et les combinaisons de chiffres

dans ses développements décimaux apparaissent tous avec la même fréquence limite, alors tous les textes qui ont été écrits ou qui vont l'être, de même que tous les mots qui ont été prononcés ou qui vont l'être, peuvent être retrouvés de manière codée dans ses suites. La propriété de normalité n'a pas encore été démontrée, bien qu'on suspecte qu'elle soit valide. Cela signifie-t-il que toute la science soit encodée dans le simple cercle ? Non. Cette propriété n'a rien de particulier : elle s'applique également au nombre 0,123456789101112131415161718192021.... et de nombreux autres. Pouvez-vous en citer quelques exemples ?

Défi 567 s

Par ailleurs, dans le graphe de la fonction exponentielle e^x , le point $(0,1)$ est le seul point ayant deux coordonnées rationnelles. Si vous vous imaginez colorier en bleu tous les points situés sur le plan et ayant deux coordonnées rationnelles, ce plan paraîtrait quasiment bleu. Néanmoins, le graphe passe par un de ces points seulement et parvient à éviter tous les autres.





ANNEXE C

SOURCES D'INFORMATION SUR LE MOUVEMENT

“ Nul lieu n’offre de la vanité des espérances humaines une preuve plus frappante qu’une bibliothèque publique. ”

Samuel Johnson

“ Dans une société de consommation il y a inévitablement deux formes d’esclavage : les prisonniers de la dépendance et les prisonniers de l’envie. ”

Ivan Illich*

DANS ce texte, on présente les ouvrages de référence et d’introduction aux domaines attenants, en note de bas de page. Les bibliographies en fin de chaque chapitre rassemblent les ressources générales afin de satisfaire une curiosité plus pointue à propos de ce qui est traité dans cette ascension montagnaise. Toutes les citations peuvent également être retrouvées en regardant dans l’index, au nom de l’auteur concerné. Pour obtenir des informations complémentaires, les bibliothèques et Internet peuvent être utiles.

Dans une bibliothèque, les articles de revue de la recherche en cours apparaissent dans des périodiques tels que *Reviews of Modern Physics*, *Reports on Progress in Physics*, *Contemporary Physics* et *Advances in Physics*. On trouve des excellentes introductions pédagogiques dans l’*American Journal of Physics*, l’*European Journal of Physics* et *Physik in unserer Zeit*. Une autre ressource très utile est *Living Reviews in Relativity*, consultable sur www.livingreviews.org.

Des synthèses sur les orientations de la recherche apparaissent occasionnellement dans des magazines tels que *Physics World*, *Physics Today*, *Europhysics Journal*, *Physik Journal* et *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde*. Pour une vue d’ensemble de toutes les sciences, les meilleures sources sont les revues *Nature*, *New Scientist*, *Naturwissenschaften*, *La Recherche* et *Science News*, qui est bon marché mais excellent.

Les articles de recherche sont principalement édités dans *Physics Letters B*, *Nuclear Physics B*, *Physical Review D*, *Physical Review Letters*, *Classical and Quantum Gravity*, *General Relativity and Gravitation*, *International Journal of Modern Physics* et *Modern Physics Letters*. On retrouve les résultats les plus récents et les conjectures spéculatives dans les comptes-rendus de conférence, tels que les *Nuclear Physics B Supplements*. Des articles de recherche apparaissent également dans *Fortschritte der Physik*, *Zeitschrift für*

* Ivan Illich (n. Vienne 1926, d. Brème 2002), fut un théologien, un penseur social et politique autrichien.

TABLEAU 46 La structure de l'archive de prépublications électroniques Arxiv pour la physique et les disciplines associées sur fr.arxiv.org.

DISCIPLINE	ABRÉVIATION
relativité générale et cosmologie quantique	gr-qc
astrophysique	astro-ph
physique expérimentale nucléaire	nucl-ex
physique théorique nucléaire	nucl-th
physique théorique des hautes énergies	hep-th
physique numérique des hautes énergies	hep-lat
physique phénoménologique des hautes énergies	hep-ph
physique expérimentale des hautes énergies	hep-ex
mécanique quantique	quant-ph
physique générale	physics
physique de la matière condensée	cond-mat
sciences non linéaires	nlin
physique mathématique	math-ph
mathématiques	math
informatique théorique	CoRR
biologie quantitative	q-bio

Pour recevoir des prépublications électroniques par courriel, envoyez un message électronique à une adresse de la forme `gr-qc@arxiv.org` (ou l'abréviation correspondante à la place de « gr-qc »), avec un objet composé simplement du mot « help », sans les guillemets.

Physik C, La Rivista del Nuovo Cimento, Europhysics Letters, Communications in Mathematical Physics, Journal of Mathematical Physics, Foundations of Physics, International Journal of Theoretical Physics et *Journal of Physics G*. Il existe aussi le *New Journal of Physics*, purement électronique, qui est consultable sur le site Web www.njp.org.

Les articles sur la description du mouvement sans le temps ni l'espace, qui sont apparus après que ce texte soit publié peuvent être trouvés via le *Scientific Citation Index*. Il est publié sous forme imprimée et sous forme de disque compact, et nous permet de rechercher toutes les publications qui citent un article donné. Ensuite, en utilisant le bimensuel *Physics Abstracts*, qui existe, lui aussi, à la fois sous forme papier et électronique, vous pouvez consulter le résumé de l'article et vérifier s'il est intéressant.

Mais la manière la plus efficace et la plus simple de rester en contact avec la recherche en cours sur le mouvement reste de loin l'usage d'*Internet*, la toile informatique mondiale. Pour quiconque ayant un ordinateur personnel connecté à une prise téléphonique, la majorité des articles de physique théorique est disponible gratuitement, sous la forme de *prépublications électroniques*, c'est-à-dire avant leur publication officielle et avant contrôle par un jury, sur le site Web fr.arxiv.org. Des détails sont fournis dans le **Tableau 46**. Un service permettant de retrouver des prépublications qui en citent une autre antérieure donnée, est également disponible.

Durant la dernière décennie du vingtième siècle, Internet s'est étendu à une combinaison de bibliothèque, de magasin de médias, de plateforme de discussion, de boutique en ligne, de collection de brochures et de passe-temps. Aujourd'hui, le commerce, la publicité et – de façon déplorable – les crimes de toutes sortes font également partie intégrante du Web. À l'aide d'un ordinateur personnel, d'un modem et d'un navigateur libre, nous pouvons consulter des informations situées dans des millions de pages de documents. Les diverses parties de ces documents sont localisées dans de nombreux ordinateurs répartis dans le monde, mais l'utilisateur final n'a pas besoin de s'en soucier*.

Pour commencer à surfer sur le Web, demandez à un ami qui connaît**. Rechercher sur le Web des auteurs, des organisations, des ouvrages, des publications, des sociétés ou de simples mots-clés en utilisant des moteurs de recherche peut vite se révéler être une expérience efficace ou une perte de temps. Une sélection des sites intéressants est donnée ci-dessous.

TABLEAU 47 Quelques sites intéressants sur le World Wide Web.

S U J E T	A D R E S S E D U S I T E W E B O U « U R L »
Sujets généraux	
Wikipédia	fr.wikipedia.org
Moteurs de recherche	www.altavista.com
d'information	www.metager.de www.google.fr

* Il y a plusieurs décennies, le livre provoquant d'IVAN ILLICH, *Deschooling Society*, Harper & Row, 1971, listait quatre ingrédients fondamentaux pour tout système d'éducation :

1. l'accès aux *ressources* nécessaires pour l'apprentissage, c'est-à-dire les livres, les accessoires, les examens, etc. à un prix abordable pour quiconque, à n'importe quel moment de sa vie ;
2. pour tous ceux qui veulent apprendre, établir un contact avec des *camarades* dans la même situation d'apprentissage, pour pouvoir discuter, confronter, coopérer et être en compétition ;
3. établir un contact avec des *ainés*, c'est-à-dire des professeurs, pour leur surveillance et leur critique envers ceux qui apprennent ;
4. établir des échanges entre les étudiants et les *acteurs* du domaine d'intérêt, de telle sorte que ces derniers peuvent être des modèles pour les premiers. Par exemple, il devrait y avoir la possibilité d'écouter des musiciens professionnels et de lire l'œuvre d'écrivains spécialistes. Cela donne aussi aux acteurs la possibilité de partager, de mettre en avant et d'utiliser leurs compétences.

Illich développe l'idée que si un tel système était informel – il l'appelle alors un « réseau d'apprentissage » ou « réseau d'opportunités » – il serait supérieur aux institutions formelles, financées par l'état, comme les écoles conventionnelles, en ce qui concerne le développement d'êtres humains mûrs. Ces idées sont approfondies dans ses travaux ultérieurs, *Deschooling Our Lives*, Penguin, 1976, et *Tools for Conviviality*, Penguin, 1973.

Aujourd'hui, n'importe quel ordinateur connecté fournit un ou plusieurs services parmi les suivants : le *courriel* (messagerie électronique), le FTP (transfert de fichier vers et depuis un autre ordinateur), accès au système *UseNet* (les groupes de discussion sur des sujets spécifiques, telle que la physique des particules), et le puissant *World Wide Web*. (On peut dire approximativement que chacun de ceux-ci incluent ceux d'avant.) D'une manière quelque peu inattendue, toutes ces facilités d'Internet l'ont transformé en l'épine dorsale du « réseau d'opportunités » mentionné par Illich. Cependant, comme dans toute école, le fait qu'Internet fournisse un véritable réseau d'apprentissage est fortement lié à la discipline de l'utilisateur.

** Il est également possible d'utiliser à la fois Internet et de télécharger des fichiers par FTP à l'aide du courriel seulement. Mais les outils changent trop souvent pour en fournir ici un guide stable. Demandez à un ami.

S U J E T	A D R E S S E D U S I T E W E B O U « U R L »
	www.yahoo.fr
Archives des groupes de discussion	groups.google.fr
Foires aux questions sur la physique et d'autres sujets	www.faqs.org
Bibliothèques en ligne	www.konbib.nl portico.bl.uk www.theeuropeanlibrary.org www.hero.ac.uk/uk/niss/niss_library4008.cfm www.bnf.fr www.grass-gis.de/bibliothek www.loc.gov
Physique	
Recherche, prépublications électroniques	fr.arxiv.org – voir la page 321
	www.slac.stanford.edu/spires
Données sur les particules	pdg.web.cern.ch/pdg
<i>Physics news</i> , hebdomadaire	www.aip.org/physnews/update
Journal de physique, quotidien	http://www.innovations-report.de/berichte/berichte_liste.php?show=18
Problèmes de physique de Yakov Kantor	star.tau.ac.il/QUIZ
Problèmes de physique de Henry Greenside	www.phy.duke.edu/~hsg/physics-challenges/challenges.html
La « question de la semaine » en physique	www.physics.umd.edu/lecDEM/outreach/QOTW/active
« Petits problèmes » de physique	www.nyteknik.se/miniproblemet
Site officiel des unités du SI	www.bipm.fr
Conversion d'unités	www.chemie.fu-berlin.de/chemistry/general/units.html
« Demandez aux experts »	www.sciam.com/askexpert_directory.cfm
Résumés d'articles de journaux de physique	www.osti.gov
<i>Science News</i>	www.sciencenews.org
Lauréats du Prix Nobel	www.nobel.se/physics/laureates
Portraits de physiciens	www.if.ufrj.br/famous/physlist.html
Journal sur la gravitation	www.phys.lsu.edu/mog/
<i>Living Reviews in Relativity</i>	www.livingreviews.org
Informations sur la relativité	math.ucr.edu/home/baez/relativity.html
Simulations et films relativistes	www.tat.physik.uni-tuebingen.de/~weiskopf

S U J E T	A D R E S S E D U S I T E W E B O U « U R L »
Organismes de physique	www.cern.ch www.hep.net www.nikhef.nl www.het.brown.edu/physics/review/index.html
Livres de physique sur le Web	www.plasma.uu.se/CED/Book www.biophysics.org/education/resources.htm www.lightandmatter.com www.motionmountain.eu
Trois magnifiques ensembles de notes françaises sur la mécanique classique et la physique des particules	feynman.phy.ulaval.ca/marleau/notesdecours.htm
L'excellent <i>Radical Freshman Physics</i> de David Raymond	www.physics.nmt.edu/~raymond/teaching.html
Notes de cours de physique du MIT	ocw.mit.edu/OcwWeb/web/courses/courses/index.htm#Physics
Notes de conférences en physique en allemand et en anglais	www.akleon.de
« World lecture hall »	www.utexas.edu/world/lecture
Formules et données pour l'ingénieur	www.efunda.com
La Science à l'école	www.wissenschaft-schulen.de
Mathématiques	
« Math forum » collection de ressources sur Internet	mathforum.org/library
Biographies de mathématiciens	www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/BiogIndex.html
Le problème de maths de la semaine de l'Université Purdue	www.math.purdue.edu/academics/pow
Le problème de maths de la semaine du Macalester College	mathforum.org/wagon
Formules mathématiques	dlnf.nist.gov
Fonctions	functions.wolfram.com
Intégration analytique	www.integrals.com
« Weisstein's World of Mathematics »	mathworld.wolfram.com
Curiosités	
Minéralogie	webmineral.com www.mindat.org
ESA	sci.esa.int

S U J E T	A D R E S S E D U S I T E W E B O U « U R L »
NASA	www.nasa.gov
Hubble, télescope spatial	hubble.nasa.gov
Sloan Digital Sky Survey	skyserver.sdss.org
Le « miroir cosmique »	www.astro.uni-bonn.de/~dfischer/mirror
Simulateur du Système solaire	space.jpl.nasa.gov
Satellites observables	liftoff.msfc.nasa.gov/RealTime/JPass/20
« Astronomy picture of the day »	antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/astropix.html
La Terre vue de l'espace	www.visibleearth.nasa.gov
From Stargazers to Starships	www.phy6.org/stargaze/Sintro.htm
Données solaires actualisées	www.n3kl.org/sun
Illusions d'optique	www.sandlotscience.com
Bandes dessinées scientifiques de Jean-Pierre Petit	www.jp-petit.org
Jouets en physique	www.e20.physik.tu-muenchen.de/~cucke/toylinke.htm
Humour en physique	www.dctech.com/physics/humor/biglist.php
Littérature sur la magie	www.faqs.org/faqs/magic-faq/part2
Surfaces algébriques	www.mathematik.uni-kl.de/~hunt/drawings.html
Confection d'avions en papier	www.pchelp.net/paper_ac.htm
	www.ivic.qc.ca/~aleexpert/aluniversite/klinevogelmann.html
Petits hélicoptères volants	pixelito.reference.be
Horloge de dix mille ans	www.longnow.org
Le « Gesellschaft Deutscher Naturforscher und Ärzte »	www.gdnae.de
Pseudo-science	suhep.phy.syr.edu/courses/modules/PSEUDO/pseudo_main.html
Cinglés	www.crank.net
Citations mathématiques	math.furman.edu/mwoodard/~mquot.html
Le « World Question Center »	www.edge.org/questioncenter.html
Plagiats	www.plagiarized.com
Canulars	www.museumofhoaxes.com

Voulez-vous étudier la physique sans véritablement vous rendre à l'université ? De nos jours il est possible de le faire via la messagerie électronique et Internet, en allemand, à l'université de Kaiserslautern*. Dans un avenir proche, un projet à l'échelle du territoire de la Grande-Bretagne devrait permettre la même chose pour les étudiants anglophones. En guise d'introduction, utilisez la dernière version de ce texte de physique !

“ Das Internet ist die offenste Form der geschlossenen Anstalt**.”
Matthias Deutschmann

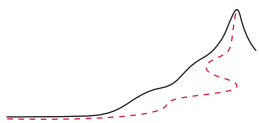
* Consultez le site Web www.fernstudium-physik.de.

** « Internet est la forme la plus ouverte d'institution fermée. »

“ Si tacuisses, philosophus mansisses*.
D’après Boèce. ”



* « Si tu t’étais tu, tu serais resté un philosophe. » D’après l’histoire que Boèce conte dans *Consolation de la philosophie*, 2.7, 67 ff.



BIBLIOGRAPHIE

“ Aiunt enim multum legendum esse, non multa. ”
Pline l'Ancien, *Epistulae*.*

- 1 Pour un historique des sciences pendant l'Antiquité, voir LUCIO RUSSO, *La rivoluzione dimenticata*, Feltrinelli 1996, également disponible dans plusieurs autres langues. Cité en page 14.
- 2 Un aperçu des illusions sur le mouvement peut être consulté sur l'excellent site Web <http://www.michaelbach.de/ot/>. Cité en page 15.
- 3 Un magnifique livre expliquant la physique et ses nombreuses applications dans la nature et la technologie de manière vivante et exhaustive : PAUL G. HEWITT & JOHN SUCHOCKI & LESLIE A. HEWITT, *Conceptual Physical Science*, Benjamin-Cummings, 1999.
Un ouvrage célèbre pour sa passion et sa curiosité est celui-ci : RICHARD P. FEYNMAN & R. B. LEIGHTON & M. SANDS, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison Wesley, 1977.
On peut en apprendre énormément sur le mouvement dans les livres de casse-tête. Un des meilleurs est la collection bien organisée de problèmes admirables qui ne nécessitent aucune mathématique, rédigée par JEAN-MARC LÉVY-LEBLOND, *La physique en questions – mécanique*, Vuibert, 1998.
Un autre recueil excellent d'énigmes se trouve dans YAKOV PERELMAN, *Oh, la physique*, Dunod, 2000, une traduction de l'original russe.
Le livre suivant est également une merveilleuse compilation de problèmes : W. G. REES, *Physics by Example : 200 Problems and Solutions*, Cambridge University Press, 1994.
Un bon historique des idées en physique est exposé dans l'excellent ouvrage de DAVID PARK, *The How and the Why*, Princeton University Press, 1988.
On trouve une admirable introduction à la physique dans ROBERT POHL, *Pohl's Einführung in die Physik*, Klaus Lüders & Robert O. Pohl editors, Springer, 2004, en deux volumes avec CD. C'est une nouvelle édition d'un livre vieux de plus de 70 ans, mais sa qualité pédagogique, en particulier concernant le côté expérimental de la physique, est sans égale. Cité aux pages 14, 90, 150 et 223.
- 4 Un principe bien connu en sciences sociales stipule que, étant donné une question, pour chaque réponse possible, aussi mystérieuse qu'elle puisse paraître, il y a un individu – et souvent même un groupe tout entier – qui la tient pour vraie. Nous avons simplement besoin de compulser la littérature (ou Internet) pour en avoir la confirmation.

* « Lisez beaucoup, mais pas n'importe quoi. » Ep. 7, 9, 15. Gaius Plinius Secundus (n. Novum Comum 23/4, d. éruption du Vésuve 79), auteur romain, notamment célèbre pour son œuvre scientifique majeure et monumentale, *Histoire naturelle*, qui a été traduite et est restée la référence principale durant presque 2 000 ans.

À propos des comportements grégaires en général, consultez R. AXELROD, *The Evolution of Cooperation*, Harper Collins, 1984. La diffusion et l'acceptation des idées, comme celles de la physique, sont également des exemples de la coopération humaine, avec tous les risques potentiels et les défauts qu'elle contient. Cité en page 16.

Page ??

- 5 Tous les textes connus de Parménide et d'Héraclite peuvent être trouvés dans JEAN-PAUL DUMONT, *Les écoles présocratiques*, Folio-Gallimard, 1988. Les visions sur l'inexistence du mouvement ont également été avancées par des auteurs beaucoup plus récents et beaucoup plus contestables, comme Berkeley en 1710. Cité en page 16.
- 6 Un exemple de la perplexité occasionnée par les idées de Zénon est donné par WILLIAM McLAUGHLIN, *Resolving Zeno's paradoxes*, *Scientific American* pp. 66-71, Novembre 1994. Le véritable argument ne concernait pas une main qui donnait une claque sur la joue, mais plutôt une flèche atteignant sa cible. Consultez aussi Réf. 44. Cité en page 16.
- 7 Le texte complet de *La Beauté* et les autres poèmes tirés des *Fleurs du mal*, un des meilleurs ouvrages de poésie jamais écrits, peuvent être lus sur le site Web <http://hypermedia.univ-paris8.fr/bibliotheque/Baudelaire/Spleen.html>. Cité en page 17.
- 8 Le texte le plus célèbre est JEARL WALKER, *The Flying Circus of Physics*, Wiley, 1975. Pour des conséquences physiques plus captivantes dans notre vie quotidienne, lisez ERWEIN FLACHSEL, *Hundertfünfzig Physikrätsel*, Ernst Klett Verlag, 1985. Ce livre cite également plusieurs énigmes d'horloges, dans les énigmes numéros 126 à 128. Cité en page 18.
- 9 Une introduction concise et instructive à l'histoire de la physique classique est fournie dans le premier chapitre du livre de F. K. RICHTMEYER, E. H. KENNARD & J. N. COOPER, *Introduction to Modern Physics*, McGraw-Hill, 1969. Cité en page 18.
- 10 Un bon tour d'horizon sur les arguments utilisés pour démontrer l'existence de Dieu à partir du mouvement est donné par MICHAEL BUCKLEY, *Motion and Motion's God*, Princeton University Press, 1971. L'intensité des luttes qui firent rage autour de ces tentatives avortées constitue un des chapitres tragiques de l'histoire. Cité en page 19.
- 11 THOMAS D'AQUIN, *Somme Théologique* ou *Summa Theologica*, 1265-1273, en ligne en latin sur <http://www.newadvent.org/summa>, en français sur le site Web <http://docteurangelique.free.fr/index.html>. Cité en page 19.
- 12 Pour une explication des mouvements « intérieurs », consultez le magnifique ouvrage de RICHARD SCHWARTZ, *Internal Family Systems Therapy*, The Guilford Press, 1995. Cité en page 19.
- 13 Lisez par exemple le texte fascinant de DAVID G. CHANDLER, *The Campaigns of Napoleon - The Mind and Method of History's Greatest Soldier*, Macmillan, 1966. Cité en page 19.
- 14 RICHARD MARCUS, *American Roulette*, St Martin's Press, 2003, un récit haletant tiré d'une histoire vraie. Cité en page 19.
- 15 Un livre agréable et divertissant sur le changement de comportement est le manuel connu de R. BANDLER, *Using Your Brain for a Change*, Real People Press, 1985. Consultez également RICHARD BANDLER & JOHN GRINDER, *Frogs into princes - Neuro Linguistic Programming*, Eden Grove Editions, 1990. Cité aux pages 20 et 28.
- 16 Le livre suivant est un livre admirable sur les mécanismes de la croissance humaine depuis la cellule originelle jusqu'à la taille définitive : LEWIS WOLPERT, *The Triumph of the Embryo*, Oxford University Press, 1991. Cité en page 20.
- 17 Sur le thème de la grâce et de l'équilibre, lisez par exemple les nombreux livres sur la technique Alexander, tels que M. GELB, *Body Learning - An Introduction to the Alexander Tech-*

nique, Aurum Press, 1981, et RICHARD BRENNAN, *Introduction to the Alexander Technique*, Little Brown and Company, 1996. Entre autres, l'idée de la technique Alexander est de revenir à la situation où les groupes de muscles nécessaires à la sustentation et ceux nécessaires au mouvement sont utilisés uniquement pour leurs fonctions respectives, et non l'inverse. Toute tension musculaire inutile, telle que le durcissement du cou, est un gaspillage d'énergie dû à l'usage de muscles de la sustentation pour le mouvement et de muscles du mouvement pour la sustentation. La technique enseigne la manière de revenir à l'usage naturel des muscles.

Le déplacement des animaux fut considérablement débattu déjà au dix-septième siècle par G. BORELLI, *De motu animalium*, 1680. Un exemple d'une approche plus moderne est J. J. COLLINS & I. STEWART, Hexapodal gaits and coupled nonlinear oscillator models, *Biological Cybernetics* 68, pp. 287–298, 1993. Voyez aussi I. STEWART & M. GOLUBITSKY, *Fearful Symmetry*, Blackwell, 1992. Cité aux pages 22 et 91.

- 18 Les résultats sur le développement des enfants mentionnés ici et dans les lignes suivantes ont été esquissés principalement à partir des recherches initiées par Jean Piaget. Pour plus de détails sur le développement de l'enfant, lisez l'intermède qui suit ce chapitre, à la page ?? Sur <http://www.piaget.org> vous pouvez découvrir le site Web maintenu par l'association Jean Piaget Society. Cité aux pages 22, 33 et 35.
- 19 Le cerveau reptilien (manger ? s'enfuir ? ignorer ?), appelé également l'archipallium ou R-complex, contient le tronc cérébral, le cervelet, les noyaux gris centraux et le thalamus. Le cerveau paléo-mammalien (émotions), appelé aussi système limbique, contient l'amygdale, l'hypothalamus et l'hippocampe. Le cerveau humain (et primate) (raisonnement logique), dit néo-mammalien ou néocortex, est constitué de la célèbre matière grise. Pour des images du cerveau, consultez l'atlas de JOHN NOLTE, *The Human Brain : An Introduction to its Functional Anatomy*, Mosby, fourth edition, 1999. Cité en page 23.
- 20 Le film du coin inférieur gauche peut être reproduit sur un ordinateur après avoir tapé les lignes suivantes dans le logiciel Mathematica : Cité en page 24.

```
« Graphics'Animation'
Nxpixels=72 ; Nypixels=54 ; Nframes=Nxpixels 4/3 ;
Nxwind=Round[Nxpixels/4] ; Nywind=Round[Nypixels/3] ;
front=Table[Round[Random[]],{y,1,Nypixels},{x,1,Nxpixels}] ;
back =Table[Round[Random[]],{y,1,Nypixels},{x,1,Nxpixels}] ;
frame=Table[front,{nf,1,Nframes}] ;
Do[ If[ x>n-Nxwind && x<n && y>Nywind && y<2Nywind,
      frame[[n,y,x]]=back[[y,x-n]] ],
    {x,1,Nxpixels}, {y,1,Nypixels}, {n,1,Nframes}] ;
film=Table[ListDensityPlot[frame[[nf]], Mesh-> False,
      Frame-> False, AspectRatio-> N[Nypixels/Nxpixels],
      DisplayFunction-> Identity], {nf,1,Nframes}]
ShowAnimation[film]
```

Mais notre système de détection du mouvement est beaucoup plus puissant que l'exemple montré dans les coins inférieurs gauches. Le film suivant, différent, souligne ce point.

```
« Graphics'Animation'
Nxpixels=72 ; Nypixels=54 ; Nframes=Nxpixels 4/3 ;
Nxwind=Round[Nxpixels/4] ; Nywind=Round[Nypixels/3] ;
front=Table[Round[Random[]],{y,1,Nypixels},{x,1,Nxpixels}] ;
back =Table[Round[Random[]],{y,1,Nypixels},{x,1,Nxpixels}] ;
```

```

frame=Table[front,{nf,1,Nframes}];
Do[ If[ x>n-Nxwind && x<n && y>Nywind && y<2Nywind,
      frame[[n,y,x]]=back[[y,x]] ],
    {x,1,Nxpixels}, {y,1,Nypixels}, {n,1,Nframes}];
film=Table[ListDensityPlot[frame[[nf]], Mesh-> False,
      Frame-> False, AspectRatio-> N[Nypixels/Nxpixels],
      DisplayFunction-> Identity], {nf,1,Nframes}]
ShowAnimation[film]

```

Des expériences identiques, par exemple en utilisant des motifs aléatoires se modifiant au hasard, montrent que l'œil perçoit le mouvement même dans les cas où toutes les composantes de Fourier de l'image sont pratiquement nulles. Un tel effet du mouvement est qualifié de *non-Fourier*. De nombreux exemples sont présentés dans J. ZANKER, Modelling human motion perception I : Classical stimuli, *Naturwissenschaften* 81, pp. 156–163, 1994, et J. ZANKER, Modelling human motion perception II : Beyond Fourier motion stimuli, *Naturwissenschaften* 81, pp. 200–209, 1994.

- 21 Une introduction à l'étude de la perception : BRUCE GOLDSTEIN, *Perception*, Books/Cole, 5th edition, 1998. Cité aux pages 19 et 24.
- 22 Toutes les citations d'Héraclite sont tirées de JOHN MANSLEY ROBINSON, *An Introduction to Early Greek Philosophy*, Houghton Muffin 1968, chapitre 5. Cité en page 25.
- 23 Une introduction à l'alchimie selon Newton se trouve dans les deux ouvrages de BETTY JO TEETER DOBBS, *The Foundations of Newton's Alchemy*, Cambridge University Press, 1983, et *The Janus Face of Genius*, Cambridge University Press, 1992. Newton y apparaît comme étant une sorte de magicien hautement intellectuel, cherchant désespérément des exemples de processus divins qui interagissent avec le monde matériel. C'est un récit profond mais tragique. Un bon aperçu en est donné par R. G. KEESING, Essay Review : Newton's Alchemy, *Contemporary Physics* 36, pp. 117–119, 1995.

La théologie puérile de Newton, caractéristique de ceux qui sont en quête de Dieu et qui ont grandi sans avoir de père, peut être relevée dans les nombreux livres récapitulant les échanges de lettres entre Clarke, son secrétaire, et Leibniz, le rival de Newton pour la renommée. Cité en page 30.

- 24 Une introduction à l'histoire de la mécanique classique, qui destitue également un certain nombre de légendes qui tournent autour d'elle – telles que l'idée que Newton pouvait résoudre des équations différentielles ou celle qu'il introduisit l'expression $F = ma$ – est contée par CLIFFORD A. TRUESDELL, *Essays in the History of Mechanics*, Springer, 1968. Cité aux pages 30, 130 et 156.
- 25 C. LIU, Z. DUTTON, C. H. BEHROOZI & L. VESTERGAARD HAU, Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses, *Nature* 409, pp. 490–493, 2001. Il existe aussi un commentaire sur cet article dans E. A. CORNELL, Stopping light in its track, 409, pp. 461–462, 2001. Toutefois, malgré la prétention, les pulsations lumineuses n'ont bien sûr *pas* été stoppées. Pouvez-vous en donner au moins deux raisons sans avoir lu cet article, et peut-être une troisième après l'avoir lu ?

Défi 568 s

Le travail était un perfectionnement d'une expérience précédente dans laquelle une vitesse de groupe de la lumière de 17 m/s a été atteinte, dans un gaz ultra-froid d'atomes de sodium, à des températures de l'ordre du nanokelvin. Ceci a été rapporté par L. VESTERGAARD HAU, S. E. HARRIS, Z. DUTTON & C. H. BEHROOZI, Light speed reduction to 17 meters per second in an ultracold atomic gas, *Nature* 397, pp. 594–598, 1999. Cité en page 33.

- 26 RAINER FLINDT, *Biologie in Zahlen – Eine Datensammlung in Tabellen mit über 10.000 Einzelwerten*, Spektrum Akademischer Verlag, 2000. Cité en page 33.
- 27 Deux jets cosmiques de cette vitesse ont été observés par I. F. MIRABEL & L. F. RODRÍGUEZ, A superluminal source in the Galaxy, *Nature* 371, pp. 46–48, 1994, en plus des commentaires de la p. 18. Cité en page 34.
- 28 Une admirable introduction aux mouvements les plus lents dans la nature, les modifications des paysages, est dans DETLEV BUSCHE, JÜRGEN KEMPF & INGRID STENGEL, *Landchaftsformen der Erde – Bildatlas der Geomorphologie*, Primus Verlag, 2005. Cité en page 32.
- 29 Une introduction à la perception du temps comme conséquence des horloges dans le cerveau est fournie dans R. B. IVRY & R. SPENCER, The neural representation of time, *Current Opinion in Neurobiology* 14, pp. 225–232, 2004. Les horloges chimiques qui se trouvent dans notre corps sont décrites dans JOHN D. PALMER, *The Living Clock*, Oxford University Press, 2002, ou dans A. AHLGREN & F. HALBERG, *Cycles of Nature : An Introduction to Biological Rhythms*, National Science Teachers Association, 1990. Consultez aussi le site Web <http://www.msi.umn.edu/~halberg/introd/>. Cité en page 36.
- 30 Ceci a été montré, entre autres, par le travail d'Anna Wierzbicka cité avec plus de détails dans l'intermède qui suit ce chapitre, à la page ?? Le best-seller passionné de l'auteur chomskien STEVEN PINKER, *The Language Instinct – How the Mind Creates Language*, Harper Perennial, 1994, discute également des sujets relatifs à cette question, réfutant entre autres à la page 63 l'affirmation fautive souvent réitérée que la langue *hopi* est une exception. Cité en page 37.
- 31 Aristote repoussait l'idée de l'écoulement du temps dans le chapitre IV de sa *Physique*. Lisez le texte complet sur le site Web <http://classics.mit.edu/Aristotle/physics.4.iv.html>. Cité en page 38.
- 32 Le livre le plus instructif de tous les livres sur la « flèche du temps » est probablement HANS DIETER ZEH, *The Physical Basis of the Direction of Time*, Springer Verlag, 4th edition, 2001. C'est toujours le meilleur livre sur le sujet. La plupart des autres textes – regardez sur le Web – manquent de clarté dans les idées.
Un compte rendu caractéristique de conférence est J. J. HALLIWELL, J. PÉREZ-MERCADER & WOJCIECH H. ZUREK, *Physical Origins of Time Asymmetry*, Cambridge University Press, 1994. Cité en page 39.
- 33 Sur le thème du mouvement absolu et relatif il existe de nombreux manuels qui traitent de certains problèmes. Par exemple JOHN BARBOUR, *Absolute or Relative Motion? Vol. 1 : A Study from the Machian Point of View of the Discovery and the Structure of Space-time Theories*, Cambridge University Press, 1989, JOHN BARBOUR, *Absolute or Relative Motion? Vol. 2 : The Deep Structure of General Relativity*, Oxford University Press, 2005, ou JOHN EARMAN, *World Enough and Spacetime : Absolute vs Relational Theories of Space-time*, MIT Press, 1989. Cité en page 43.
- 34 R. DOUGHERTY & M. FOREMAN, Banach-Tarski decompositions using sets with the property of Baire, *Journal of the American Mathematical Society* 7, pp. 75–124, 1994. Voir également ALAN L. T. PATERSON, *Amenability*, American Mathematical Society, 1998, et ROBERT M. FRENCH, The Banach-Tarski theorem, *The Mathematical Intelligencer* 10, pp. 21–28, 1998. Enfin, il y a les livres de BERNARD R. GELBAUM & JOHN M. H. OLMSTED, *counter-examples in Analysis*, Holden-Day, 1964, et leur *Theorems and counter-examples in Mathematics*, Springer, 1993. Cité en page 46.
- 35 Ce magnifique ouvrage, qui n'est pas facile à lire, est STAN WAGON, *The Banach Tarski Paradox*, Cambridge University Press, 1993. Cité aux pages 47 et 357.

- 36 À propos des formes des bactéries d'eau salée, lisez la section appropriée dans le livre captivant de BERNARD DIXON, *Power Unseen – How Microbes Rule the World*, W.H. Freeman, 1994. Le livre possède environ 80 sections, dans lesquelles plusieurs micro-organismes sont présentés de manière vivante. Cité en page 47.
- 37 Les distances les plus petites sont sondées dans les accélérateurs de particules, la distance peut être déterminée d'après l'énergie du flux des particules incidentes. En 1996, la valeur de 10^{-19} m (pour la limite supérieure à la taille des quarks) fut frôlée dans l'expérience décrite dans F. ABE & al., Measurement of dijet angular distributions by the collider detector at Fermilab, *Physical Review Letters* 77, pp. 5336–5341, 1996. Cité en page 51.
- 38 ALEXANDER K. DEWDNEY, *The Planiverse – Computer Contact with a Two-dimensional World*, Poseidon Books/Simon & Schuster, 1984. Plusieurs autres auteurs de fictions ont auparavant exploré la possibilité d'un univers bidimensionnel, répondant toujours, de manière incorrecte, par l'affirmative. Cité en page 56.
- 39 Il y a toute une histoire masquée derrière les variations de g . Elle peut être trouvée dans CHUJI TSUBOI, *Gravity*, Allen & Unwin, 1979, ou dans WOLFGANG TORGE, *Gravimetry*, de Gruyter, 1989, ou dans MILAN BURŠA & KAREL PĚČ, *The Gravity Field and the Dynamics of the Earth*, Springer, 1993. La variation de la hauteur du sol d'environ 0,3 m causée par la Lune est un des effets intéressants découverts par ces recherches. Cité aux pages 58 et 136.
- 40 ANDREA FROVA, *La fisica sotto il naso – 44 pezzi facili*, Biblioteca Universale Rizzoli, Milano, 2001. Cité en page 58.
- 41 L'étude des excréments projetés (c'est-à-dire, la merde) et de ses mécanismes forme une partie de la biologie moderne. Les raisons pour lesquelles les chenilles en font ainsi ont été déterminées par M. WEISS, Good housekeeping : why do shelter-dwelling caterpillars fling their frass ?, *Ecology Letters* 6, pp. 361–370, 2003, qui donne également le record actuel de 1,5 m pour des boulettes de 24 mg de *Epargyreus clarus*. La photographie des fèces volantes est tirée de S. CAVENEY, H. MCLEAN & D. SURRY, Faecal firing in a skipper caterpillar is pressure-driven, *The Journal of Experimental Biology* 201, pp. 121–133, 1998. Cité en page 60.
- 42 Ceci fut discuté dans le *Frankfurter Allgemeine Zeitung* du 2 août 1997, au même moment que le Championnat du monde d'athlétisme. Ces valeurs concernent la partie la plus rapide de la course d'un sprinteur du 100 m, les valeurs exactes citées furent qualifiées de records mondiaux de la course de vitesse en 1997, et sont données comme valant $12,048 \text{ m/s} = 43,372 \text{ km/h}$ par Ben Johnson pour les hommes, et $10,99 \text{ m/s} = 39,56 \text{ km/h}$ pour les femmes. Cité en page 60.
- 43 La littérature et les données sur le saut en longueur peuvent être consultées dans trois articles tous intitulés Is a good long jumper a good high jumper ?, dans *American Journal of Physics* 69, pp. 104–105, 2001. En particulier, les sauteurs en longueur de rang mondial courent à $9,35 \pm 0,15 \text{ m/s}$, avec une vitesse verticale de décollage de $3,35 \pm 0,15 \text{ m/s}$, fournissant des angles de décollage d'environ 20° (seulement). Une nouvelle technique pour atteindre des angles de décollage plus importants permettrait d'accroître considérablement le record mondial de saut en longueur. Cité en page 60.
- 44 Les hypothèses de Zénon peuvent être consultées dans ARISTOTE, *Physique*, VI, 9. On peut en trouver la traduction dans la plupart des langues. Le site Web <http://classics.mit.edu/Aristotle/physics.6.vi.html> en fournit une version en ligne en anglais. Cité aux pages 62 et 328.
- 45 L'étymologie peut se révéler être un domaine fascinant, par exemple lorsque des chercheurs découvrirent l'origine du mot allemand « Weib » (« femme », relié à la traduction anglaise de

« épouse », « wife »). Il a été découvert, via quelques textes en Tokharien – une langue indo-européenne éteinte issue d’une région située à l’intérieur de la Chine moderne –, qu’il signifiait à l’origine « honte ». Il était utilisé pour désigner la partie génitale de la femme dans une expression qui signifiait « zone de la honte ». Avec le temps, cette expression fut utilisée pour dire « femme » en général, tout en étant réduite au second terme uniquement. Ce lien de parenté fut découvert par le linguiste allemand Klaus T. Schmidt, il explique notamment pourquoi le mot n’est pas féminin mais neutre, c’est-à-dire pourquoi il utilise l’article allemand « das » (le) au lieu de « die » (la). (Julia Simon, communication privée.)

L’étymologie peut également être un divertissement simple et accessible, par exemple lorsque nous découvrons dans le dictionnaire *Oxford English Dictionary* que « testimony » (« témoignage ») et « testicle » (« testicule ») ont la même origine, c’est-à-dire qu’ils dérivent du même mot latin « testis » qui était utilisé pour les deux à la fois. Cité aux pages 65 et 73.

- 46 Une synthèse des derniers développements en est donnée par J. T. ARMSTRONG, D. J. HUNTER, K. J. JOHNSTON & D. MOZURKEWICH, Stellar optical interferometry in the 1990s, *Physics Today* pp. 42–49, Mai 1995. Plus de 100 diamètres stellaires étaient déjà recensés en 1995. Plusieurs instruments de haute précision spécialement dédiés ont été prévus. Cité en page 66.
- 47 Un excellent manuel de biologie sur la croissance : ARTHUR F. HOPPER & NATHAN H. HART, *Foundations of Animal Development*, Oxford University Press, 2006. Cité en page 66.
- 48 Ceci est discuté par exemple dans C. L. STONG, The amateur scientist – how to supply electric power to something which is turning, *Scientific American* pp. 120–125, décembre 1975. Il décrit également comment réaliser une image immobile d’un objet en rotation simplement en utilisant quelques prismes, que l’on appelle des *prismes de Dove*. D’autres exemples d’objets attachés à un corps en rotation sont donnés par E. RIEFLIN, Some mechanisms related to Dirac’s strings, *American Journal of Physics* 47, pp. 379–381, 1979. Cité en page 67.
- 49 JAMES A. YOUNG, Tumbleweed, *Scientific American* 264, pp. 82–87, mars 1991. Le buisson épineux est en réalité extrêmement rare, excepté dans les westerns de Hollywood, dans lesquels tous les metteurs en scène se sentent obligés de leur donner leur aspect si particulier. Cité en page 67.
- 50 Les premières expériences qui ont mis en évidence la rotation des flagelles étaient de M. SILVERMAN & M. I. SIMON, Flagellar rotation and the mechanism of bacterial motility, *Nature* 249, pp. 73–74, 1974. Pour voir quelques belles images des molécules impliquées, consultez K. NAMBA, A biological molecular machine : bacterial flagellar motor and filament, *Wear* 168, pp. 189–193, 1993, ou le site Web <http://www.nanonet.go.jp/english/mailmag/2004/011a.html>. Le record actuel de vitesse de rotation, 1 700 rotations par seconde, est signalé par Y. MAGARIYAMA, S. SUGIYAMA, K. MURAMOTO, Y. MAEKAWA, I. KAWAGISHI, Y. IMAE & S. KUDO, Very fast flagellar rotation, *Nature* 371, p. 752, 1994.
On peut en apprendre davantage sur les bactéries dans DAVID DUSENBERY, *Life at a Small Scale*, Scientific American Library, 1996. Cité en page 69.
- 51 Sur les ombres, lisez le texte populaire agréable de ROBERTO CASATI, *Alla scoperta dell’ombra – Da Platone a Galileo la storia di un enigma che ha affascinato le grandi menti dell’umanità*, Oscar Mondadori, 2000, et ses sites Web situés sur <http://www.shadowmill.com> et <http://roberto.casati.free.fr/casati/roberto.htm>. Cité en page 70.
- 52 Il y a également le magnifique ouvrage de PENELOPE FARRANT, *Colour in Nature*, Blandford, 1997. Cité en page 70.
- 53 Les « lois » de la physique des dessins animés peuvent aisément être débusquées en utilisant

- n'importe quel moteur de recherche sur Internet. Cité en page 70.
- 54 Pour les curieux, une vue d'ensemble des illusions utilisées au cinéma et à la télévision, qui conduisent à quelques-unes des étranges propriétés des images mentionnées ci-dessus, est donnée dans BERNARD WILKIE, *The Technique of Special Effects in Television*, Focal Press, 1993, et dans ses autres livres, ou dans le magazine *Cinefex*. Cité en page 71.
- 55 AETIUS, *Opinions*, I, XXIII, 3. Voir JEAN-PAUL DUMONT, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, p. 426, 1991. Cité en page 71.
- 56 GIUSEPPE FUMAGALLI, *Chi l'ha detto ?*, Hoepli, 1983. Cité aux pages 72 et 162.
- 57 Pour le rôle et la chimie de l'adénosine triphosphate (ATP) dans les cellules et dans les êtres vivants, lisez n'importe quel livre de biochimie, ou cherchez sur le Web. La révélation des mécanismes relatifs à l'ATP fut récompensée par des prix Nobel en chimie en 1978 et en 1997. Cité en page 80.
- 58 Une photographie de cette horloge unique au monde peut être trouvée dans l'article de A. GARRETT, Perpetual motion – a delicious delirium, *Physics World* pp. 23–26, décembre 1990. Cité en page 81.
- 59 Une étude de Shell a estimé la consommation mondiale totale d'énergie en l'an 2000 à 500 EJ. Le département américain de l'Énergie l'a estimée autour de 416 EJ. Nous avons pris ici la valeur la plus basse. Une discussion et une analyse de l'usage de l'électricité (14 EJ) et d'autres formes d'énergie, avec des variations par pays, peuvent être consultées dans S. BENKA, The energy challenge, *Physics Today* 55, pp. 38–39, avril 2002, et dans E. J. MONITZ & M. A. KENDERDINE, Meeting energy challenges : technology and policy, *Physics Today* 55, pp. 40–46, avril 2002. Cité en page 83.
- 60 Pour une synthèse, lisez l'article de J. F. MULLIGAN & H. G. HERTZ, An unpublished lecture by Heinrich Hertz : 'On the energy balance of the Earth', *American Journal of Physics* 65, pp. 36–45, 1997. Cité en page 85.
- 61 Pour une magnifique photographie de cette prouesse féline, regardez la couverture du journal et l'article de J. DARIUS, A tale of a falling cat, *Nature* 308, p. 109, 1984. Cité en page 90.
- 62 NATTHI L. SHARMA, A new observation about rolling motion, *European Journal of Physics* 17, pp. 353–356, 1996. Cité en page 91.
- 63 C. SINGH, When physical intuition fails, *American Journal of Physics* 70, pp. 1103–1109, 2002. Cité en page 91.
- 64 SERGE GRACOVETSKY, *The Spinal Engine*, Springer Verlag, 1990. Il est aussi maintenant établi que la démarche humaine est chaotique. Cela est expliqué par M. PERC, The dynamics of human gait, *European Journal of Physics* 26, pp. 525–534, 2005. Cité en page 92.
- 65 THOMAS HEATH, *Aristarchus of Samos – the Ancient Copernicus*, Dover, 1981, réimpression de l'édition originale de 1913. Le traité d'Aristarque est disponible en grec et en anglais. Aristarque fut le premier instigateur du système héliocentrique. Il avait mesuré la durée du jour (en fait, en déterminant le nombre de jours par an) à la précision ahurissante de moins d'une seconde. Cet excellent ouvrage fournit également un tour d'horizon de l'astronomie grecque avant Aristarque, décrite en détail pour chaque penseur grec. Le texte d'Aristarque est aussi reproduit dans ARISTARCHOS, On the sizes and the distances of the Sun and the Moon, v. 280 AV. J.-C. dans MICHAEL J. CROWE, *Theories of the World From Antiquity to the Copernican Revolution*, Dover, 1990, particulièrement aux pp. 27–29. Cité en page 94.
- 66 L'influence de la force de Coriolis sur les icebergs fut étudiée de manière plus approfondie par le physicien suédois qui devint océanographe par la suite Walfrid Ekman (1874–1954). Ce sujet fut suggéré par le grand explorateur Fridtjof Nansen, qui fit également les premières

- observations. En son honneur, nous parlons de la couche d'Ekman, du transport d'Ekman et des spirales d'Ekman. N'importe quel texte sur l'océanographie ou sur la géographie physique fournit plus d'informations à ce propos. Cité en page 96.
- 67 Une synthèse des conséquences de l'accélération de Coriolis $\mathbf{a} = -2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}$ dans le référentiel en rotation est donnée par EDWARD A. DESLOGE, *Classical Mechanics*, Volume 1, John Wiley & Sons, 1982. Même le courant dénommé *Gulf Stream*, ce courant d'eau chaude qui circule de la mer des Caraïbes vers la mer du Nord, est influencé par celui-ci. Cité en page 96.
- 68 La publication originale est de A. H. SHAPIRO, Bath-tub vortex, *Nature* 196, pp. 1080–1081, 1962. Il produisit aussi deux films de l'expérience. L'expérience a été reproduite de nombreuses fois dans les hémisphères Nord et Sud, où l'eau s'écoule dans le sens des aiguilles d'une montre. Le premier test dans l'hémisphère Sud a été fait par L.M. TREFETHEN & al., The bath-tub vortex in the southern hemisphere, *Nature* 201, pp. 1084–1085, 1965. Une bibliographie complète se trouve dans les notes aux éditeurs de *American Journal of Physics* 62, p. 1063, 1994. Cité en page 96.
- 69 Les astuces sont expliquées par RICHARD CRANE, Short Foucault pendulum : a way to eliminate the precession due to ellipticity, *American Journal of Physics* 49, pp. 1004–1006, 1981, et plus particulièrement dans RICHARD CRANE, Foucault pendulum wall clock, *American Journal of Physics* 63, pp. 33–39, 1993. Le pendule de Foucault a été également le sujet de la thèse de HEIKE KAMERLING ONNES, Nieuwe bewijzen der aswenteling der aarde, Universiteit Groningen, 1879. Cité en page 97.
- 70 La référence est J. G. HAGEN, La rotation de la terre : ses preuves mécaniques anciennes et nouvelles, *Sp. Astr. Vaticana Second. App.* Rome, 1910. Son autre expérience est publiée dans J. G. HAGEN, How Atwood's machine shows the rotation of the Earth even quantitatively, International Congress of Mathematics, août 1912. Cité en page 98.
- 71 R. ANDERSON, H. R. BILGER & G. E. STEDMAN, The Sagnac-effect : a century of Earth-rotated interferometers, *American Journal of Physics* 62, pp. 975–985, 1994.
Lisez également l'article exhaustif et limpide de G. E. STEDMAN, Ring laser tests of fundamental physics and geophysics, *Reports on Progress in Physics* 60, pp. 615–688, 1997. Cité en page 99.
- 72 À propos de la durée du jour, consultez le site Web <http://maia.usno.navy.mil> ou les livres de K. LAMBECK, *The Earth's Variable Rotation : Geophysical Causes and Consequences*, Cambridge University Press, 1980, et de W. H. MUNK & G. J. F. MACDONALD, *The Rotation of the Earth*, Cambridge University Press, 1960. Concernant une installation récente de laser en anneau, voyez <http://www.wttzell.ifag.de>. Cité aux pages 99 et 138.
- 73 Un exemple de données expérimentales se trouve dans C. P. SONETT, E. P. KVALE, A. ZAKHARIAN, M. A. CHAN & T. M. DEMKO, Late proterozoic and paleozoic tides, retreat of the moon, and rotation of the Earth, *Science* 273, pp. 100–104, 5 juillet 1996. Les auteurs concluent à partir des analyses de sédiments marins que les jours duraient 18 à 19 heures seulement durant le protérozoïque, c'est-à-dire il y a 900 millions d'années. Ils supposent que l'année est longue de 31 millions de secondes depuis cette période jusqu'à aujourd'hui. Une autre détermination fut donnée par G. E. WILLIAMS, Precambrian tidal and glacial clastic deposits : implications for precambrian Earth-Moon dynamics and palaeoclimate, *Sedimentary Geology* 120, pp. 55–74, 1998. En utilisant une configuration géologique appelée *rythmites tidales*, il déduisit qu'il y a environ 600 millions d'années il y avait 13 mois par an et que la journée comportait 22 heures. Cité en page 99.
- 74 Le récit de cette association entre l'histoire et l'astronomie est contée dans RICHARD STEPHENSON, *Historical Eclipses and Earth's Rotation*, Cambridge University

- Press, 1996. Cité en page 100.
- 75 Sur cette rotation et l'histoire du Système solaire, lisez S. BRUSH, Theories of the origin of the solar system 1956–1985, *Reviews of Modern Physics* 62, pp. 43–112, 1990. Cité en page 100.
- 76 Le site Web <http://maia.usno.navy.mil> montre le mouvement de l'axe de la Terre durant les dix dernières années. Le Service international des latitudes fondé par Küstner fait maintenant partie du Service international de la rotation terrestre, plus d'informations peuvent être trouvées sur le site Web <http://www.iers.org>. La dernière avancée est que les deux tiers de la composante circulaire du mouvement polaire, qui est dénommée « oscillation de Chandler » aux USA d'après la personne qui s'attribua la découverte de Küstner, sont dus aux fluctuations de la pression des océans au fond de ceux-ci et un tiers est dû aux variations de pression dans l'atmosphère terrestre. L'explication en est fournie par R. S. GROSS, The excitation of the Chandler wobble, *Geophysical Physics Letters* 27, pp. 2329–2332, 2000. Cité en page 101.
- 77 Pour avoir plus d'informations sur Alfred Wegener, lisez le texte (accessible) de KLAUS ROHRBACH, *Alfred Wegener – Erforscher der wandernden Kontinente*, Verlag Freies Geistesleben, 1993. À propos de la tectonique des plaques, allez sur le site Web <http://www.scotese.com>. Pour les séismes, voir les sites <http://www.geo.ed.ac.uk/quakex/quakes> et <http://www.iris.edu/seismon>. Consultez les sites <http://vulcan.wr.usgs.gov> et <http://www.dartmouth.edu/~volcano/> pour avoir plus d'informations sur les volcans. Cité en page 102.
- 78 J. D. HAYS, J. IMBRIE & N. J. SHACKLETON, Variations in the Earth's orbit : pacemaker of the ice ages, *Science* 194, pp. 1121–1132, 1976. Ils découvrirent ce résultat en s'enfonçant littéralement dans la vase qui recouvre le plancher des océans à certains endroits. Remarquez que le Web regorge d'informations sur les ères glaciaires. Tapez simplement « Milankovitch » dans un moteur de recherche. Cité en page 104.
- 79 ROBERTA HUMPHREYS & JEFFREY LARSEN, The sun's distance above the galactic plane, *Astronomical Journal* 110, pp. 2183–2188, novembre 1995. Cité en page 105.
- 80 C. L. BENNET, M. S. TURNER & M. WHITE, The cosmic rosetta stone, *Physics Today* 50, pp. 32–38, novembre 1997. Cité en page 105.
- 81 Un bon récit des prédictions sur le jeu de roulette des années 1970 est relaté par THOMAS A. BASS, *The Eudaemonic Pie* également publié sous le titre *The Newtonian Casino*, Backinprint, 2000. Un tour d'horizon jusqu'en 1998 en est donné dans l'article d'EDWARD O. THORP, The invention of the first wearable computer, *Proceedings of the Second International Symposium on Wearable Computers* (ISWC 1998), 19-20 octobre 1998, Pittsburgh, Pennsylvania, USA (IEEE Computer Society), pp. 4–8, 1998, téléchargeable sur <http://csdl.computer.org/comp/proceedings/iswc/1998/9074/00/9074toc.htm>. Cité en page 108.
- 82 Les articles originaux sont A. H. COMPTON, A laboratory method of demonstrating the Earth's rotation, *Science* 37, pp. 803–806, 1913, A. H. COMPTON, Watching the Earth revolve, *Scientific American Supplement* no. 2047, pp. 196–197, 1915, et A. H. COMPTON, A determination of latitude, azimuth and the length of the day independent of astronomical observations, *Physical Review* (second series) 5, pp. 109–117, 1915. Cité en page 98.
- 83 Ceci, ainsi que de nombreuses autres surprises en physique, est décrit dans la magnifique retranscription de la conférence de JOSEF ZWICK, *Physik im Alltag*, notes de ses cours qui se tinrent en 1999–2000 à l'université de Regensburg (Ratisbonne). Cité aux pages 109 et 113.
- 84 L'équilibre des navires, si primordial dans les car-ferries, est une partie captivante de la construction navale, une introduction en était déjà faite par LEONHARD EULER, *Scientia navalis*, 1749. Cité en page 110.

- 85 K. R. WENINGER, B. P. BARBER & S. J. PUTTERMAN, Pulsed Mie scattering measurements of the collapse of a sonoluminescing bubble, *Physical Review Letters* 78, pp. 1799–1802, 1997. Cité en page 110.
- 86 Sur le site <http://www.sff.net/people/geoffrey.landis/vacuum.html>, vous pourrez lire une description de ce qui se passe. Regardez aussi les sites <http://www.sff.net/people/geoffrey.landis/ebullism.html> et http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/ask_astro/answers/970603.html. Ils fournissent tous des détails sur les effets du vide sur les êtres humains. Cité en page 111.
- 87 R. MCN. ALEXANDER, Leg design and jumping technique for humans, other vertebrates and insects, *Philosophical Transactions of the Royal Society in London B* 347, pp. 235–249, 1995. Cité en page 117.
- 88 J. W. GLASHEEN & T. A. MCMAHON, A hydrodynamic model of locomotion in the basilisk lizard, *Nature* 380, pp. 340–342, Pour des photographies, consultez aussi *New Scientist*, p. 18, 30 mars 1996, ou *Scientific American*, pp. 48–49, septembre 1997, ou encore le site Web de l’auteur sur http://rjf2.biol.berkeley.edu/Full_Lab/FL_Personnel/J_Glasheen/J_Glasheen.html.
Divers limicoles* ont également l’aptitude à courir sur l’eau, en utilisant le même procédé. Cité en page 118.
- 89 A. FERNANDEZ-NIEVES & DE LAS NIEVES, About the propulsion system of a kayak and of *Basiliscus basiliscus*, *European Journal of Physics* 19, pp. 425–429, 1998. Cité en page 118.
- 90 M. WITTLINGER, R. WEHNER & H. WOLF, The ant odometer : stepping on stilts and stumps, *Science* 312, pp. 1965–1967, 2006. Cité en page 119.
- 91 Le débat sur cette histoire ténébreuse est tiré du livre de ROBERT M. PRYCE, *Cook and Peary*, Stackpole Books, 1997. Voir aussi WALLY HERBERT, *The Noose of Laurels*, Doubleday 1989. Le récit déplorable de Robert Peary est également relaté dans le numéro centenaire de *National Geographic*, septembre 1988. Comme la National Geographic Society avait financé l’effort de Peary et l’avait soutenu jusqu’à ce que le Congrès américain l’ait déclaré premier homme à avoir atteint le pôle, la rétractation (partielle) fut remarquée. (Le magazine changea d’avis une nouvelle fois un peu plus tard, pour vendre plus de numéros.) Par ailleurs, les photographies de Cook, qui prétendit avoir atteint le pôle Nord avant même Peary, ont le même problème de longueur d’ombre. L’histoire des deux hommes est truffée de duperies concernant leurs « exploits ». Par conséquent, le premier homme à avoir atteint le pôle Nord fut probablement Roald Amundsen, qui y arriva quelques années plus tard, et qui fut également le premier homme à rallier le pôle Sud. Cité en page 120.
- 92 L’histoire se trouve dans M. NAUENBERG, Hooke, orbital motion, and Newton’s Principia, *American Journal of Physics* 62, 1994, pp. 331–350. Cité en page 121.
- 93 Plus de détails sont donnés par D. RAWLINS, dans Doubling your sunsets or how anyone can measure the Earth’s size with wristwatch and meter stick, *American Journal of Physics* 47, 1979, pp. 126–128. Une autre évaluation simple du rayon de la Terre, en utilisant uniquement un sextant, est fournie par R. O’KEEFE & B. GHAVIMI-ALAGHA, dans The World Trade Centre and the distance to the world’s centre, *American Journal of Physics* 60, pp. 183–185, 1992. Cité en page 122.
- 94 Plusieurs informations sur les mesures de distances astronomiques peuvent être compulsées dans le merveilleux petit ouvrage de VAN HELDEN, *Measuring the Universe*, University of Chicago Press, 1985, et dans NIGEL HENBEST & HEATHER COOPER, *The Guide to the Galaxy*, Cambridge University Press, 1994. Cité en page 122.

* Oiseaux des marécages ou des rivages marins [N.D.T.].

- 95 Une foule de détails peut être relevée dans M. JAMMER, *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*, réimprimé par Dover, 1997, et dans *Concepts of Force, a Study in the Foundations of Mechanics*, Harvard University Press, 1957. Ces manuels éclectiques qui traitent le sujet de manière approfondie fournissent un grand nombre de détails et exposent divers points de vue philosophiques, mais manquent de formulations et de conclusions claires sur la description exacte de la nature, il n'apportent donc qu'une aide restreinte sur les problèmes fondamentaux.
Jean Buridan (v. 1295 à v. 1366) critiqua la distinction entre les mouvements sublunaires et supralunaires dans son œuvre *De Caelo*, un de ses nombreux travaux. Cité en page 122.
- 96 D. TOPPER & D. E. VINCENT, An analysis of Newton's projectile diagram, *European Journal of Physics* 20, pp. 59–66, 1999. Cité en page 122.
- 97 L'histoire insensée du mètre est relatée dans le roman historique de KEN ALDER, *The Measurement of All Things : The Seven-Year Odyssey and Hidden Error that Transformed the World*, The Free Press, 2003. Cité en page 125.
- 98 H. EDELMANN, R. NAPIWOTZKI, U. HEBER, N. CHRISTLIEB & D. REIMERS, HE 0437-5439 : an unbound hyper-velocity B-type star, *The Astrophysical Journal* 634, pp. L181–L184, 2005. Cité en page 145.
- 99 Ceci est exposé par exemple par D.K. FIRPIĆ & I.V. ANIÇIN, The planets, after all, may run only in perfect circles – but in the velocity space!, *European Journal of Physics* 14, pp. 255–258, 1993. Cité aux pages 145 et 378.
- 100 Concernant la mesure du nombre de dimensions spatiales via la gravité – et l'échec de la découverte d'un indice pour un nombre différent de trois –, lisez la revue de E.G. ADELBERGER, B.R. HECKEL & A.E. NELSON, Tests of the gravitational inverse-square law, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 53, pp. 77–121, 2003, aussi sur <http://www.arxiv.org/abs/hep-ph/0307284>, ou la revue de J.A. HEWETT & M. SPIROPULU, Particle physics probes of extra spacetime dimensions, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* 52, pp. 397–424, 2002, <http://www.arxiv.org/abs/hep-ph/0205106>. Cité en page 127.
- 101 Il existe de nombreux livres expliquant l'origine de la forme précise de la Terre, tel le livre de poche S. ANDERS, *Weil die Erde rotiert*, Verlag Harri Deutsch, 1985. Cité en page 128.
- 102 La forme de la Terre est décrite avec plus de précision à l'aide du Système géodésique mondial. Pour une présentation plus étendue, consultez le site <http://www.eurocontrol.be/projects/eatchip/wgs84/start.html>. Allez aussi sur le site du Service international de la rotation terrestre sur <http://hpiers.obspm.fr>. Cité en page 128.
- 103 W. K. HARTMAN, R. J. PHILLIPS & G. J. TAYLOR, editors, *Origin of the Moon*, Lunar and Planetary Institute, 1986. Cité en page 132.
- 104 Si vous désirez vous informer sur le mouvement de la Lune dans tous ses détails fascinants, jetez un œil sur MARTIN C. GUTZWILLER, Moon–Earth–Sun : the oldest three body problem, *Reviews of Modern Physics* 70, pp. 589–639, 1998. Cité en page 132.
- 105 DIETRICH NEUMANN, Physiologische Uhren von Insekten – Zur Ökophysiologie lunar-periodisch kontrollierter Fortpflanzungszeiten, *Naturwissenschaften* 82, pp. 310–320, 1995. Cité en page 132.
- 106 L'origine de la durée du cycle menstruel n'est pas encore déterminée avec exactitude, toutefois, nous avons des explications sur la façon dont elle se synchronise avec d'autres cycles. Pour un exposé général, lisez ARKADY PIKOVSKY, MICHAEL ROSENBLUM & JÜRGEN KURTHS, *Synchronization : A Universal Concept in Nonlinear Science*, Cambridge University Press, 2002. Cité en page 132.

- 107 J. LASKKAR, F. JOUTEL & P. ROBUTEL, Stability of the Earth's obliquity by the moon, *Nature* **361**, pp. 615–617, 1993. Cependant, ce sujet n'est pas entièrement compris, et d'autres opinions existent. Cité en page 132.
- 108 NEIL F. COMINS, *What if the Moon Did not Exist ? – Voyages to Earths that Might Have Been*, Harper Collins, 1993. Cité en page 132.
- 109 Lisez par exemple l'explication de J. J. LISSAUER, It is not easy to make the moon, *Nature* **389**, pp. 327–328, 1997. Cité en page 132.
- 110 PAUL A. WIEGERT, KIMMO A. INNANEN & SEPPO MIKKOLA, An asteroidal companion to the Earth, *Nature* **387**, pp. 685–686, 12 juin 1997, en même temps que le commentaire aux pp. 651–652. Des détails sur l'orbite et sur le fait que les points de Lagrange ne forment pas toujours des triangles équilatéraux peuvent être consultés dans F. NAMOUNI, A. A. CHRISTOU & C. D. MURRAY, Coorbital dynamics at large eccentricity and inclination, *Physical Review Letters* **83**, pp. 2506–2509, 1999. Cité en page 135.
- 111 SIMON NEWCOMB, *Astronomical Papers of the American Ephemeris* **1**, p. 472, 1882. Cité en page 136.
- 112 Une admirable introduction en est donnée dans le classique G. FALK & W. RUPPEL, *Mechanik, Relativität, Gravitation – ein Lehrbuch*, Springer Verlag, Dritte Auflage, 1983. Cité en page 136.
- 113 J. SOLDNER, *Berliner Astronomisches Jahrbuch auf das Jahr 1804*, 1801, p. 161. Cité en page 140.
- 114 L'équivalence fut testée avec précision d'abord par ROLAND VON E*TV*S, *Annalen der Physik & Chemie* **59**, p. 354, 1896, et par VON E*TV*S, V. PEKÀR & E. FEKETE, Beiträge zum Gesetz der Proportionalität von Trägheit und Gravität, *Annalen der Physik* **4, Leipzig** **68**, pp. 11–66, 1922. Il trouva un accord de 5 parties pour 10^9 . D'autres expériences furent réalisées par P. G. ROLL, R. KROTKOW & R. H. DICKE, The equivalence of inertial and passive gravitational mass, *Annals of Physics (NY)* **26**, pp. 442–517, 1964, un des articles de recherche les plus intéressants et les plus divertissants en physique expérimentale, et par V. B. BRAGINSKY & V. I. PANOV, *Soviet Physics – JETP* **34**, pp. 463–466, 1971. Des résultats récents, avec des erreurs de moins d'une partie pour 10^{12} , sont donnés par Y. SU & al., New tests of the universality of free fall, *Physical Review D* **50**, pp. 3614–3636, 1994. Diverses expériences ont été proposées pour tester l'équivalence dans l'espace à moins d'une partie pour 10^{16} . Cité en page 141.
- 115 Voir L. HODGES, Gravitational field strength inside the Earth, *American Journal of Physics* **59**, pp. 954–956, 1991. Cité en page 145.
- 116 P. MOHAZZABI & M. C. JAMES, Plumb line and the shape of the Earth, *American Journal of Physics* **68**, pp. 1038–1041, 2000. Cité en page 146.
- 117 De NEIL DE GASSE TYSON, *The Universe Down to Earth*, Columbia University Press, 1994. Cité en page 147.
- 118 C'est un petit exemple tiré du magnifique livre de MARK P. SILVERMAN, *And Yet It Moves : Strange Systems and Subtle Questions in Physics*, Cambridge University Press, 1993. C'est un véritable coffre au trésor pour quiconque est intéressé par les rouages de la physique. Cité en page 148.
- 119 G. D. QUINLAN, Planet X : a myth exposed, *Nature* **363**, pp. 18–19, 1993. Cité en page 148.
- 120 Voir http://en.wikipedia.org/wiki/90377_Sedna. Cité en page 148.
- 121 Voir ROBERT MATTHEWS, Not a snowball's chance..., *New Scientist* 12 juillet 1997, pp. 24–27. L'affirmation originale est due à LOUIS A. FRANK, J. B. SIGWARTH &

- J. D. CRAVEN, On the influx of small comets into the Earth's upper atmosphere, parts I and II, *Geophysical Research Letters* 13, pp. 303–306, pp. 307–310, 1986. Les dernières observations ont discrédité cette thèse. Cité en page 149.
- 122 La formulation par rayon est merveilleusement expliquée dans J. EVANS, The ray form of Newton's law of motion, *American Journal of Physics* 61, pp. 347–350, 1993. Cité en page 150.
- 123 G. -L. LESAGE, Lucrèce Newtonien, *Nouveaux Mémoires de l'Académie royale des sciences et belles-lettres* pp. 404–431, 1747, ou <http://www3.bbaw.de/bibliothek/digital/struktur/03-nouv/1782/jpg-0600/00000495.htm>. Cité en page 150.
- 124 J. LASKAR, A numerical experiment on the chaotic behaviour of the solar system, *Nature* 338, pp. 237–238, 1989, et J. LASKAR, The chaotic motion of the solar system – A numerical estimate of the size of the chaotic zones, *Icarus* 88, pp. 266–291, 1990. Le travail de Laskar fut développé plus tard par Jack Wisdom, en utilisant des ordinateurs spécialement conçus et en considérant uniquement les planètes, sans prendre en compte les corps plus petits. Pour plus de détails, consultez G. J. SUSSMAN & J. WISDOM, Chaotic Evolution of the Solar System, *Science* 257, pp. 56–62, 1992. Aujourd'hui, de tels calculs numériques peuvent être réalisés sur votre PC domestique à l'aide d'un programme source disponible gratuitement sur Internet. Cité en page 151.
- 125 B. DUBRULLE & F. GRANER, Titius-Bode laws in the solar system. 1 : Scale invariance explains everything, *Astronomy and Astrophysics* 282, pp. 262–268, 1994, et Titius-Bode laws in the solar system. 2 : Build your own law from disk models, *Astronomy and Astrophysics* 282, pp. 269–276, 1994. Cité en page 152.
- 126 M. LECAR, Bode's Law, *Nature* 242, pp. 318–319, 1973, et M. HENON, A comment on "The resonant structure of the solar system" by A.M. Molchanov, *Icarus* 11, pp. 93–94, 1969. Cité en page 152.
- 127 CASSIUS DIO, *Historia Romana*, v. 220, livre 37, 18. Pour une traduction anglaise, voir le site http://penelope.uchicago.edu/Thayer/E/Roman/Texts/Cassius_Dio/37*.html. Cité en page 153.
- 128 M. BEVIS, D. ALSDORF, E. KENDRICK, L. P. FORTES, B. FORSBERG, R. MALLEY & J. BECKER, Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response, *Geophysical Research Letters* 32, p. L16308, 2005. Cité en page 154.
- 129 D. HESTENES, M. WELLS & G. SWACKHAMER, Force concept inventory, *Physics Teacher* 30, pp. 141–158, 1982. Les auteurs ont développé des tests pour vérifier la compréhension du concept de force physique chez les étudiants ; ce travail a attiré beaucoup d'attention dans le champ de l'enseignement de la physique. Cité en page 157.
- 130 Pour une vue d'ensemble du frottement, de la physique aux sciences économiques, à l'architecture et à la théorie de l'organisation, lisez N. ÅKERMAN, editor, *The Necessity of Friction – Nineteen Essays on a Vital Force*, Springer Verlag, 1993. Cité en page 160.
- 131 Voir M. HIRANO, K. SHINJO, R. KANECKO & Y. MURATA, Observation of superlubricity by scanning tunneling microscopy, *Physical Review Letters* 78, pp. 1448–1451, 1997. Voir également la discussion de leurs résultats donnée par SERGE FAYEULLE, Superlubricity : when friction stops, *Physics World* pp. 29–30, mai 1997. Cité en page 160.
- 132 C. DONALD AHRENS, *Meteorology Today : An Introduction to the Weather, Climate, and the Environment*, West Publishing Company, 1991. Cité en page 161.
- 133 Ce thème est abordé avec clarté par J. R. MUREIKA, What really are the best 100 m performances ?, *Athletics : Canada's National Track and Field Running Magazine*, juillet 1997.

- L'article peut également être trouvé sur <http://www.arxiv.org/abs/physics/9705004>, avec d'autres articles du même auteur sur des sujets similaires. Cité en page 161.
- 134 F. P. BOWDEN & D. TABOR, *The Friction and Lubrication of Solids*, Oxford University Press, Part I, édition corrigée, 1954, et part II, 1964. Cité en page 161.
 - 135 Un livre saisissant sur la violence humaine de JAMES GILLIGAN, *Violence – Our Deadly Epidemic and its Causes*, Grosset/Putnam, 1992. Cité en page 162.
 - 136 Les principaux tests sur le hasard dans les séries numériques – et parmi eux le test du gorille – peuvent être trouvés dans l'article de référence de G. MARSAGLIA & W. W. TSANG, Some difficult-to-pass tests of randomness, *Journal of Statistical Software* 7, p. 8, 2002. Il peut aussi être téléchargé depuis l'adresse <http://www.jstatsoft.org/v07/i03/tufts.pdf>. Cité en page 165.
 - 137 Pour un aspect de ce problème, consultez par exemple le livre fascinant de BERT HELLINGER, *Zweierlei Glück*, Carl Auer Systeme Verlag, 1997. L'auteur explique comment vivre avec sérénité et avec la responsabilité la plus grande possible concernant nos agissements, en réduisant notre implication dans le destin des autres. Il décrit une technique simple et performante pour atteindre ce but.
Un point de vue complètement différent est donné par le lauréat du prix Nobel de la paix AUNG SAN SUU KYI, *Freedom from Fear*, Penguin, 1991. Cité en page 167.
 - 138 HENRIK WALTER, *Neurophilosophie der Willensfreiheit*, Mentis Verlag, Paderborn 1999. Également disponible en traduction anglaise. Cité en page 167.
 - 139 GIUSEPPE FUMAGALLI, *Chi l'ha detto ?*, Hoepli, 1983. Cité en page 168.
 - 140 La magnifique histoire de la charrette qui indique toujours le sud est contée dans l'Annexe B de JAMES FOSTER & J. D. NIGHTINGALE, *A Short Course in General Relativity*, Springer Verlag, 2nd edition, 1998. De telles charrettes ont existé en Chine, comme le grand sinologue Joseph Needham l'a indiqué, mais on ignore comment elles étaient construites. La charrette décrite par Foster et Nightingale est celle reconstruite en 1947 par George Lancaster, un ingénieur anglais. Cité en page 170.
 - 141 Voyez par exemple Z. GHAHRAMANI, Building blocks of movement, *Nature* 407, pp. 682–683, 2000. Les chercheurs qui étudient la commande des robots sont également intéressés par ces sujets. Cité en page 170.
 - 142 G. GUTIERREZ, C. FEHR, A. CALZADILLA & D. FIGUEROA, Fluid flow up the wall of a spinning egg, *American Journal of Physics* 66, pp. 442–445, 1998. Cité en page 171.
 - 143 Un compte rendu historique en est donné dans WOLFGANG YOURGRAY & STANLEY MANDELSTAM, *Variational Principles in Dynamics and Quantum Theory*, Dover, 1968. Cité aux pages 173 et 181.
 - 144 MAX PÄSLER, *Prinzip der Mechanik*, Walter de Gruyter & Co., 1968. Cité en page 179.
 - 145 Les relations entre les éventuels lagrangiens sont analysées dans HERBERT GOLDSTEIN, *Classical Mechanics*, 2nd edition, Addison-Wesley, 1980. Cité en page 180.
 - 146 C. G. GRAY, G. KARL & V. A. NOVIKOV, From Maupertuis to Schrödinger. Quantization of classical variational principles, *American Journal of Physics* 67, pp. 959–961, 1999. Cité en page 182.
 - 147 La déclaration de Hemingway est rappelée par Marlene Dietrich dans AARON E. HOTCHNER, *Papa Hemingway*, Random House, 1966, en partie 1, chapitre 1. Cité en page 182.
 - 148 J. A. MOORE, An innovation in physics instruction for nonscience majors, *American Journal of Physics* 46, pp. 607–612, 1978. Cité en page 182.

- 149 Consultez par exemple ALAN P. BOSS, Extrasolar planets, *Physics Today* 49, pp. 32–38. Septembre 1996. Les informations les plus à jour peuvent être consultées dans l'encyclopédie des planètes extrasolaires (« Extrasolar Planet Encyclopædia ») maintenue par Jean Schneider sur <http://www.obspm.fr/planets> à l'Observatoire de Paris. Cité en page 185.
- 150 Un bon article critique est DAVID W. HUGHES, Comets and Asteroids, *Contemporary Physics* 35, pp. 75–93, 1994. Cité en page 186.
- 151 G. B. WEST, J. H. BROWN & B. J. ENQUIST, A general model for the origin of allometric scaling laws in biology, *Science* 276, pp. 122–126, 4 avril 1997, avec un commentaire à la page 34 du même numéro. Les lois qui gouvernent les propriétés de ramification des vaisseaux sanguins, des systèmes lymphatiques et des systèmes vasculaires dans les plantes sont expliquées. Pour en savoir plus à propos des plantes, lisez également l'article de G. B. WEST, J. H. BROWN & B. J. ENQUIST, A general model for the structure and allometry of plant vascular systems, *Nature* 400, pp. 664–667, 1999. Cité en page 187.
- 152 J. R. BANAVAR, A. MARTIN & A. RINALDO, Size and form in efficient transportation networks, *Nature* 399, pp. 130–132, 1999. Cité en page 187.
- 153 N. MOREIRA, New striders - new humanoid robots with efficient gaits change the robotics landscape, *Science News Online*, 6 août 2005. Cité en page 188.
- 154 JOHN MANSLEY ROBINSON, *An Introduction to Early Greek Philosophy*, Houghton Mifflin 1968, chapitre 5. Cité en page 189.
- 155 Lisez par exemple B. BOWER, A child's theory of mind, *Science News* 144, pp. 40–41. Cité en page 191.
- 156 L'ouvrage le plus admirable sur le sujet est le texte de BRANKO GRÜNBAUM & G. C. SHEPHARD, *Tilings and Patterns*, W.H. Freeman and Company, New York, 1987. Il a été traduit dans plusieurs langues et réédité plusieurs fois. Cité en page 193.
- 157 U. NIEDERER, The maximal kinematical invariance group of the free Schrödinger equation, *Helvetica Physica Acta* 45, pp. 802–810, 1972. Consultez également l'introduction de O. JAHN & V. V. SREEDHAR, The maximal invariance group of Newton's equations for a free point particle, <http://arxiv.org/abs/math-ph/0102011>. Cité en page 199.
- 158 Ce récit est conté dans l'intéressante biographie d'Einstein écrite par A. PAIS, 'Subtle is the Lord...' – *The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press, 1982. Cité en page 200.
- 159 W. ZÜRN & R. WIDMER-SCHNIDRIG, Globale Eigenschwingungen der Erde, *Physik Journal* 1, pp. 49–55, 2002. Cité en page 207.
- 160 N. GAUTHIER, What happens to energy and momentum when two oppositely-moving wave pulses overlap?, *American Journal of Physics* 71, pp. 787–790, 2003. Cité en page 211.
- 161 On trouve un résumé récent et instructif sur la recherche actuelle concernant l'oreille et ses détails fonctionnels sur <http://www.physicsweb.org/article/world/15/5/8>. Cité en page 213.
- 162 A. L. HODGKIN & A. F. HUXLEY, A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve, *Journal of Physiology* 117, pp. 500–544, 1952. Cet article célèbre de biologie théorique contribua à l'attribution du prix Nobel de médecine aux auteurs en 1963. Cité en page 217.
- 163 T. FILIPPOV, *The Versatile Soliton*, Springer Verlag, 2000. Lisez aussi J. S. RUSSEL, Report of the Fourteenth Meeting of the British Association for the Advancement of Science, Murray, London, 1844, pp. 311–390. Cité aux pages 217 et 219.
- 164 N. J. ZABUSKY & M. D. KRUSKAL, Interaction of solitons in a collisionless plasma and the recurrence of initial states, *Physical Review Letters* 15, pp. 240–243, 1965. Cité en page 219.

- 165 O. MUSKENS, De kortste knal ter wereld, *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde*, pp. 70–73, 2005. Cité en page 219.
- 166 E. HELLER, Freak waves : just bad luck, or avoidable ?, *Europhysics News*, pp. 159–161, septembre-octobre 2005, téléchargeable sur www.europhysicsnews.org. Cité en page 221.
- 167 Pour en savoir plus sur le canal sonore océanique, lisez le roman de TOM CLANCY, *The Hunt for Red October*. Lisez également le manuscrit de physique de R. A. MULLER, Government secrets of the oceans, atmosphere, and UFOs, pour cela connectez-vous à l'adresse <http://web.archive.org/web/puisrecherchezhttp://muller.lbl.gov/teaching/Physics10/chapters/9-SecretsofUFOs.html>, 2001. Cité en page 222.
- 168 B. WILSON, R. S. BATTY & L. M. DILL, Pacific and Atlantic herring produce burst pulse sounds, *Biology Letters* 271, numéro S3, 7 février 2004. Cité en page 223.
- 169 Lisez par exemple l'article de G. FRITSCH, Infraschall, *Physik in unserer Zeit* 13, pp. 104–110, 1982. Cité en page 224.
- 170 Les transformations en ondelettes furent développées par les mathématiciens français Alex Grossmann, Jean Morlet and Thierry Paul. L'article fondateur est A. GROSSMANN, J. MORLET & T. PAUL, Integral transforms associated to square integrable representations, *Journal of Mathematical Physics* 26, pp. 2473–2479, 1985. Pour une introduction moderne, lisez STÉPHANE MALLAT, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, 1999. Cité en page 224.
- 171 JAY INGRAM, *The Velocity of Honey*, Viking, 2003. Cité en page 225.
- 172 M. BOITI, J. J. -P. LEON, L. MARTINA & F. PEMPINELLI, Scattering of localized solitons in the plane, *Physics Letters A* 132, pp. 432–439, 1988, A. S. FOKAS & P. M. SANTINI, Coherent structures in multidimensions, *Physics Review Letters* 63, pp. 1329–1333, 1989, J. HIETARINTA & R. HIROTA, Multidromion solutions to the Davey–Stewartson equation, *Physics Letters A* 145, pp. 237–244, 1990. Cité en page 225.
- 173 M. AUSLOOS, *Proceedings of the Royal Society in London A* 400, pp. 331–350, 1985. Cité en page 227.
- 174 T. A. MCMAHOB & J. TYLER BONNER, *Form und Leben – Konstruktion vom Reißbrett der Natur*, Spektrum Verlag, 1985. Cité en page 230.
- 175 G. W. KOCH, S. C. SILLETT, G. M. JENNINGS & S. D. DAVIS, The limits to tree height, *Nature* 428, pp. 851–854, 2004. Cité en page 230.
- 176 Un article élémentaire expliquant la hauteur des arbres est le suivant : A. MINEYEV, Trees worthy of Paul Bunyan, *Quantum* pp. 4–10, janvier-février 1994. (Paul Bunyan est un bûcheron et un géant légendaire, il est le héros des pionniers des premières frontières des États-Unis.) Remarquez que l'acheminement des liquides dans les arbres ne fixe aucune limite sur leur hauteur, puisque l'eau est puisée le long des troncs des arbres (excepté au printemps, lorsqu'elle est puisée à partir des racines) par l'évaporation au niveau des feuilles. Cela fonctionne principalement sans aucune limite parce que les colonnes d'eau, quand la nucléation est soigneusement évitée, peuvent être mises sous une tension élastique allant jusqu'à plus de 100 bars, équivalent à une hauteur de 1 000 m. Lisez aussi P. NOBEL, *Plant Physiology*, Academic Press, 2nd Edition, 1999. Cité en page 230.
- 177 De telles informations peuvent être recueillies à partir de l'excellent article synthétique de M. F. ASHBY, On the engineering properties of materials, *Acta Metallurgica* 37, pp. 1273–1293, 1989. Cet article détaille les divers critères généraux qui déterminent le choix des matériaux, et fournit de nombreux tableaux pour guider ce choix. Cité en page 231.
- 178 Pour une photographie d'un unique atome de baryum – appelé Astrid – lisez HANS DEHMELT, Experiments with an isolated subatomic particle at rest, *Reviews of*

- Modern Physics* 62, pp. 525–530, 1990. Pour une photographie antérieure d'un ion baryum, consultez W. NEUHAUSER, M. HOHENSTATT, P. E. TOSCHEK & H. DEHMELT, Localized visible Ba^+ mono-ion oscillator, *Physical Review A* 22, pp. 1137–1140, 1980. Cité en page 233.
- 179 Des hologrammes d'atomes furent d'abord réalisés par HANS-WERNER FINK & al., Atomic resolution in lens-less low-energy electron holography, *Physical Review Letters* 67, pp. 1543–1546, 1991. Cité en page 233.
- 180 Un laser à atome unique fut conçu en 1994 par K. AN, J. J. CHILDS, R. R. DASARI & M. S. FELD, Microlaser : a laser with one atom in an optical resonator, *Physical Review Letters* 73, p. 3375, 1994. Cité en page 233.
- 181 La photographie de la page 234 est la première image qui révéla les structures subatomiques (visibles comme des ombres sur les atomes). Elle fut publiée par F. J. GIESSIBL, S. HEMBACHER, H. BIELEFELDT & J. MANNHART, Subatomic features on the silicon (111)-(7x7) surface observed by atomic force microscopy, *Science* 289, pp. 422–425, 2000. Cité en page 233.
- 182 Consultez par exemple C. SCHILLER, A. A. KOOMANS, VAN ROOY, C. SCHÖNENBERGER & H. B. ELSWIJK, Decapitation of tungsten field emitter tips during sputter sharpening, *Surface Science Letters* 339, pp. L925–L930, 1996. Cité en page 234.
- 183 U. WEIERSTALL & J. C. H. SPENCE, An STM with time-of-flight analyzer for atomic species identification, MSA 2000, Philadelphia, *Microscopy and Microanalysis* 6, supplément 2, p. 718, 2000. Cité en page 234.
- 184 L'état actuel de notre compréhension de la turbulence est décrit dans ... Cité en page 237.
- 185 K. WELTNER, A comparison of explanations of aerodynamical lifting force, *American Journal of Physics* 55, pp. 50–54, 1987, K. WELTNER, Aerodynamic lifting force, *The Physics Teacher* 28, pp. 78–82, 1990. Allez aussi sur les sites <http://user.uni-frankfurt.de/~weltner/Flight/PHYSIC4.htm> et <http://www.av8n.com/how/htm/airfoils.html>. Cité en page 237.
- 186 LYDÉRIC BOCQUET, The physics of stone skipping, *American Journal of Physics* 17, pp. 150–155, 2003. Le détenteur du record actuel est Kurt Steiner, avec 40 ricochets. Consultez <http://pastoneskipping.com/steiner.htm> et <http://www.stoneskipping.com>. Le site <http://www.yeeha.net/nassa/guin/g2.html> est relatif à un recordman mondial antérieur, Jerdome Coleman–McGhee. Cité en page 239.
- 187 S. F. KISTLER & L. E. SCRIVEN, The teapot effect : sheetforming flows with deflection, wetting, and hysteresis, *Journal of Fluid Mechanics* 263, pp. 19–62, 1994. Cité en page 241.
- 188 E. HOLLANDER, Over trechters en zo ..., *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde* 68, p. 303, 2002. Cité en page 241.
- 189 P. KREHL, S. ENGEMANN & D. SCHWENKEL, The puzzle of whip cracking – uncovered by a correlation of whip-tip kinematics with shock wave emission, *Shock Waves* 8, pp. 1–9, 1998. Les auteurs ont utilisé des caméras ultra-rapides pour étudier le mouvement du fouet. Une nouvelle perspective a été dévoilée par A. GORIELY & T. McMILLEN, Shape of a cracking whip, *Physical Review Letters* 88, p. 244301, 2002. Cet article se concentre sur la forme effilée du fouet. Toutefois, le désintérêt pour la houppe – une partie située à l'extrémité du fouet qui est nécessaire pour le faire claquer – dans le dernier article indique qu'il reste encore beaucoup de choses à découvrir. Cité en page 245.
- 190 S. DORBOLO, H. CAPS & N. VANDEWALLE, Fluid instabilities in the birth and death of antibubbles, *New Journal of Physics* 5, p. 161, 2003. Cité en page 243.
- 191 Z. SHENG & K. YAMAFUJI, Realization of a Human Riding a Unicycle by a Robot, *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1319–

- 1326, 1995. Cité en page 247.
- 192 Sur l'utilisation humaine du monocycle, lisez JACK WILEY, *The Complete Book of Unicycling*, Lodi, 1984, et SEBASTIAN HOEHER, *Einradfahren und die Physik*, Reinbeck, 1991. Cité en page 247.
- 193 W. THOMSON, Lecture to the Royal Society of Edinburgh, 18 février 1867, *Proceedings of the Royal Society in Edinburgh* 6, p. 94, 1869. Cité en page 247.
- 194 T. T. LIM, A note on the leapfrogging between two coaxial vortex rings at low Reynolds numbers, *Physics of Fluids* 9, pp. 239–241, 1997. Cité en page 244.
- 195 D. KARSTÄDT, F. PINNO, K. P. MÖLLMANN & M. VOLLMER, Anschauliche Wärmelehre im Unterricht : ein Beitrag zur Visualisierung thermischer Vorgänge, *Praxis der Naturwissenschaften Physik* 5-48, pp. 24–31, 1999, K. -P. MÖLLMANN & M. VOLLMER, Eine etwas andere, physikalische Sehweise - Visualisierung von Energieumwandlungen und Strahlungsphysik für die (Hochschul-)lehre, *Physikalische Blätter* 56, pp. 65–69, 2000, D. KARSTÄDT, K. P. MÖLLMANN, F. PINNO & M. VOLLMER, There is more to see than eyes can detect : visualization of energy transfer processes and the laws of radiation for physics education, *The Physics Teacher* 39, pp. 371–376, 2001, Cité en page 251.
- 196 F. HERRMANN, Mengenartige Größen im Physikunterricht, *Physikalische Blätter* 54, pp. 830–832, septembre 1998. Consultez également ses notes de cours d'introduction à la physique générale sur le site Web <http://www-tfp.physik.uni-karlsruhe.de/~didaktik>. Cité aux pages 249 et 254.
- 197 La thermostatique est difficile à apprendre aussi parce qu'elle ne fut pas explorée de manière systématique. Lisez C. TRUESDELL, *The Tragicomical History of Thermodynamics 1822–1854*, Springer Verlag, 1980. Un excellent ouvrage qui approfondit la thermostatique et la thermodynamique est LINDA REICHL, *A Modern Course in Statistical Physics*, Wiley, 2nd edition, 1998. Cité en page 250.
- 198 L'expansion des gaz fut la principale méthode utilisée pour la définition de l'échelle de température officielle. Ce n'est qu'en 1990 que d'autres méthodes furent officiellement introduites, telles que la thermométrie à rayonnement total (dans l'intervalle de 140 K à 373 K), la thermométrie à bruit (2 K à 4 K et 900 K à 1 235 K), la thermométrie acoustique (autour de 303 K), la thermométrie magnétique (0,5 K à 2,6 K) et la thermométrie à rayonnement optique (plus de 730 K). La thermométrie à rayonnement constitue toujours une méthode primordiale dans l'intervalle situé autour de 3 K à 1 000 K. Tout cela est expliqué en détail dans R. L. RUSBY, R. P. HUDSON, M. DURIEUX, J. F. SCHOOLEY, P. P. M. STEUR & C. A. SWENSON, The basis of the ITS-90, *Metrologia* 28, pp. 9–18, 1991. Sur le point d'ébullition de l'eau voyez également la page 351. Cité en page 250.
- 199 Consultez par exemple le texte captivant de GINO SEGRÈ, *A Matter of Degrees : What Temperature Reveals About the Past and Future of Our Species, Planet and Universe*, Viking, New York, 2002. Cité en page 251.
- 200 B. POLSTER, What is the best way to lace your shoes ?, *Nature* 420, p. 476, 5 décembre 2002. Cité en page 255.
- 201 Consultez par exemple l'article de H. PRESTON-THOMAS, The international temperature scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia* 27, pp. 3–10, 1990, et les errata de H. PRESTON-THOMAS, The international temperature scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia* 27, p. 107, 1990, Cité en page 259.
- 202 Pour un tour d'horizon, lisez CHRISTIAN ENSS & SIEGFRIED HUNKLINGER, *Low-Temperature Physics*, Springer, 2005. Cité en page 259.

- 203** Le célèbre article sur le mouvement brownien qui a tant contribué à la renommée d'Einstein est le suivant : A. EINSTEIN, Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen, *Annalen der Physik* 17, pp. 549–560, 1905. Durant les années qui suivirent, Einstein écrivit une série d'autres articles plus développés sur ce sujet. Par exemple, il publia sa thèse de doctorat de 1905 : A. EINSTEIN, Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen, *Annalen der Physik* 19, pp. 289–306, 1906, et il corrigea une petite erreur dans A. EINSTEIN, Berichtigung zu meiner Arbeit : 'Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen', *Annalen der Physik* 34, pp. 591–592, 1911, où, en utilisant des données récentes à l'époque, il trouva la valeur de $6,6 \cdot 10^{23}$ pour le nombre d'Avogadro. Cité en page 259.
- 204** Les premiers tests de cette prédiction furent réalisés par J. PERRIN, *Comptes rendus de l'Académie des sciences* 147, pp. 475–476, et pp. 530–532, 1908. D'une main de maître, il résuma toute cette discussion dans JEAN PERRIN, *Les atomes*, Librairie Félix Alcan, Paris, 1913. Cité en page 261.
- 205** PIERRE GASPARD & al., Experimental evidence for microscopic chaos, *Nature* 394, p. 865, 27 août 1998. Cité en page 261.
- 206** Ces points sont courageusement et clairement abordés, de par son style, par VAN KAMPEN, Entropie, *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde* 62, pp. 395–396, 3 décembre 1996. Cité en page 262.
- 207** C'est un résultat décevant pour tous les efforts accomplis jusqu'à présent, comme Grégoire Nicolis le souligne toujours dans ses cours universitaires. Seth Lloyd a réuni une liste de 31 définitions proposées pour la complexité, contenant entre autres, la dimension fractale, la complexité grammaticale, la complexité calculatoire, la profondeur thermodynamique. Lisez-en, par exemple, un bref résumé dans *Scientific American* p. 77, juin 1995. Cité en page 263.
- 208** L'entropie minimum est discutée par L. SZILARD, Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen, *Zeitschrift für Physik* 53, pp. 840–856, 1929. Cet article incontournable peut également être trouvé en langue anglaise dans ses travaux rassemblés. Cité en page 263.
- 209** G. COHEN-TANNOUDJI, *Les constantes universelles*, Pluriel, Hachette, 1998. Lisez aussi L. BRILLOUIN, *Science and Information Theory*, Academic Press, 1962. Cité aux pages 263 et 264.
- 210** Regardez par exemple A. E. SHALYT-MARGOLIN & A. YA. TREGUBOVICH, Generalized uncertainty relation in thermodynamics, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0307018>, ou J. UFFINK & VAN LITH-VAN DIS, Thermodynamic uncertainty relations, *Foundations of Physics* 29, p. 655, 1999. Cité en page 264.
- 211** H. W. ZIMMERMANN, Particle entropies and entropy quanta IV : the ideal gas, the second law of thermodynamics, and the P-t uncertainty relation, *Zeitschrift für physikalische Chemie* 217, pp. 55–78, 2003, et H. W. ZIMMERMANN, Particle entropies and entropy quanta V : the P-t uncertainty relation, *Zeitschrift für physikalische Chemie* 217, pp. 1097–1108, 2003. Cité en page 264.
- 212** B. LAVENDA, *Statistical Physics : A Probabilistic Approach*, Wiley-Interscience, New York, 1991. Cité en page 264.
- 213** Cette citation est relevée dans l'introduction donnée par George Wald au texte de LAWRENCE J. HENDERSON, *The Fitness of the Environment*, Macmillan, New York, 1913, réimpression de 1958. Cité en page 265.

- 214 L'ouvrage suivant est une introduction captivante à la chimie : JOHN EMSLEY, *Molecules at an Exhibition*, Oxford University Press, 1998. Cité en page 265.
- 215 Une excellente introduction à la physique de la chaleur se trouve dans le livre de LINDA REICHL, *A Modern Course in Statistical Physics*, Wiley, 2nd edition, 1998. Cité en page 267.
- 216 ÉMILE BOREL, *Introduction géométrique à la physique*, Gauthier-Villars, 1912. Cité en page 268.
- 217 Consultez V. L. TELEGGI, Enrico Fermi in America, *Physics Today* 55, pp. 38–43, juin 2002. Cité en page 268.
- 218 K. SCHMIDT-NIELSEN, *Desert Animals : Physiological Problems of Heat and Water*, Oxford University Press, 1964. Cité en page 269.
- 219 CHARLES H. BENNETT & ROLF LANDAUER, Fundamental Limits of Computation, *Scientific American* 253 :1, pp. 48–56, 1985, explique pourquoi de l'entropie est générée lorsque de l'information est effacée, mais pas quand elle est acquise. La conclusion est : nous devrions payer pour jeter la revue, non pour l'acheter. Cité en page 271.
- 220 Lisez par exemple G. SWIFT, Thermoacoustic engines and refrigerators, *Physics Today* 48, pp. 22–28, juillet 1995. Cité en page 274.
- 221 Cité dans D. CAMPBELL, J. CRUTCHFIELD, J. FARMER & E. JEN, Experimental mathematics : the role of computation in nonlinear science, *Communications of the Association of Computing Machinery* 28, pp. 374–384, 1985. Cité en page 275.
- 222 Pour en savoir plus à propos des formes des flocons de neige, lisez l'ouvrage de référence de W. A. BENTLEY & W. J. HUMPHREYS, *Snow Crystals*, Dover Publications, New York, 1962. Cette seconde édition de l'original de 1931 laisse une large place au résultat de la passion de Bentley qui l'a occupé toute sa vie, à savoir plusieurs milliers de photos de flocons de neige. Cité en page 275.
- 223 K. SCHWENK, Why snakes have forked tongues, *Science* 263, pp. 1573–1577, 1994. Cité en page 275.
- 224 P. B. UMBANHOWAR, F. MELO & H. L. SWINNEY, Localized excitations in a vertically vibrated granular layer, *Nature* 382, pp. 793–796, 29 août 1996. Cité en page 276.
- 225 D. K. CAMPBELL, S. FLACH & Y. S. KIVSHAR, Localizing energy through nonlinearity and discreteness, *Physics Today* 57, pp. 43–49, janvier 2004. Cité en page 277.
- 226 B. ANDREOTTI, The song of dunes as a wave-particle mode locking, *Physical Review Letters* 92, p. 238001, 2004. Cité en page 277.
- 227 K. KÖTTER, E. GOLES & M. MARKUS, Shell structures with 'magic numbers' of spheres in a swirled disk, *Physical Review E* 60, pp. 7182–7185, 1999. Cité en page 277.
- 228 Une bonne introduction est l'ouvrage de DANIEL WALGRAEF, *Spatiotemporal Pattern Formation, With Examples in Physics, Chemistry and Materials Science*, Springer 1996. Cité en page 278.
- 229 Pour un bon aperçu, lisez la thèse de doctorat de JOCELINE LEGA, *Défauts topologiques associés à la brisure de l'invariance de translation dans le temps*, université de Nice, 1989. Cité en page 279.
- 230 Une idée des mécanismes fascinants à la base du battement du cœur est fournie par A. BABLOYANTZ & A. DESTEXHE, Is the normal heart a periodic oscillator ?, *Biological Cybernetics* 58, pp. 203–211, 1989. Cité en page 280.
- 231 Pour un bref survol actualisé du phénomène de la turbulence, lisez L. P. KADANOFF, A model of turbulence, *Physics Today* 48, pp. 11–13, septembre 1995. Cité en page 281.

- 232** Pour une introduction limpide, regardez T. SCHMIDT & M. MAHRL, A simple mathematical model of a dripping tap, *European Journal of Physics* 18, pp. 377–383, 1997. Cité en page 281.
- 233** Un aperçu de l’humour en science peut être compulsé dans la célèbre anthologie compilée par R. L. WEBER, édité par E. MENDOZA, *A Random Walk in Science*, Institute of Physics, 1973. Elle est également disponible dans de nombreuses traductions. Cité en page 282.
- 234** K. MERTENS, V. PUTKARADZE & P. VOROBIEFF, Braiding patterns on an inclined plane, *Nature* 430, p. 165, 2004. Cité en page 283.
- 235** G. MÜLLER, Starch columns : analog model for basalt columns, *Journal of Geophysical Research* 103, pp. 15239–15253, 1998. Cité en page 283.
- 236** B. HOF, VAN DOORNE, J. WESTERWEEL, F. T. M. NIEUWSTADT, H. WEDIN, R. KERSWELL, F. WALEFFE, H. FAISST & B. ECKHARDT, Experimental observation of nonlinear traveling waves in turbulent pipe flow, *Science* 305, pp. 1594–1598, 2004. Cité en page 284.
- 237** Un livre éblouissant à ce sujet est KENNETH LAWS & MARTHA SWOPE, *Physics and the Art of Dance : Understanding Movement*, Oxford University Press 2002. Cité en page 284.
- 238** J. J. LISSAUER, Chaotic motion in the solar system, *Reviews of Modern Physics* 71, pp. 835–845, 1999. Cité en page 285.
- 239** Lisez JEAN-PAUL DUMONT, *Les écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, 1991, p. 426. Cité en page 285.
- 240** Pour avoir une synthèse claire des diverses conventions de signe en relativité générale, lisez la première de couverture de CHARLES W. MISNER, KIP S. THORNE & JOHN A. WHEELER, *Gravitation*, Freeman, 1973. Nous employons les conventions de signe de la gravitation de HANS C. OHANIAN & REMO RUFFINI, *Gravitazione e spazio-tempo*, Zanichelli, 1997. Cité en page 289.
- 241** GEORGE BIRKBECK NORMAN HILL, *Johnsonian Miscellanies*, Clarendon Press, 1897, dans *Seward’s Biographiana*. Cité en page 289.
- 242** Le premier enregistrement écrit de la lettre U semble être celui de LEON BATTISTA ALBERTI, *Grammatica della lingua toscana*, 1442, la première grammaire d’une langue moderne (non latine), rédigée par un génie qui était à la fois intellectuel, architecte et le père de la cryptologie. Le premier enregistrement écrit de la lettre J semble être celui de ANTONIO DE NEBRIJA, *Gramática castellana*, 1492. Avant de l’écrire, Nebrija vécu pendant dix ans en Italie, de telle sorte qu’il est possible que la distinction I/J soit aussi d’origine italienne. Nebrija était l’un des savants espagnols les plus importants. Cité en page 290.
- 243** Pour avoir plus d’informations concernant les lettres thorn et eth, jetez un œil sur le vaste exposé qui peut être consulté sur le site Web www.everytype.com/standards/wynnyogh/thorn.html. Cité en page 290.
- 244** Pour un récit historique moderne de la langue anglaise, lisez DAVID CRYSTAL, *The Stories of English*, Allen Lane, 2004. Cité en page 290.
- 245** HANS JENSEN, *Die Schrift*, Berlin, 1969, traduit en anglais dans *Sign, Symbol and Script : an Account of Man’s Efforts to Write*, Putnam’s Sons, 1970. Cité en page 291.
- 246** DAVID R. LIDE, éditeur, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 78th edition, CRC Press, 1997. Cette œuvre classique de référence paraît chaque année dans une nouvelle édition. L’alphabet hébreu complet en est donné à la page 2-90. La liste des abréviations des quantités physiques utilisées dans les formules, et approuvée par l’ISO, l’UIPPA et l’UICPA, peut également y être trouvée là.

- Cependant la norme internationale ISO 31, qui définit ces abréviations, coûte environ mille euros, n'est pas disponible sur Internet, et par conséquent peut être ignorée sans aucun problème, de même que toutes les normes qui sont supposées être utilisées dans l'enseignement, mais qui restent inaccessibles aux enseignants. Cité aux pages 293 et 295.
- 247 Lisez le texte formidable de PETER T. DANIELS & WILLIAM BRIGHT, *The World's Writing Systems*, Oxford University Press, 1996. Cité en page 293.
- 248 Lisez par exemple l'ouvrage fascinant de STEVEN B. SMITH, *The Great Mental Calculators – The Psychology, Methods and Lives of the Calculating Prodigies*, Columbia University Press, 1983. Ce livre expose également les techniques qu'ils utilisent, et que n'importe qui d'autre peut utiliser pour les imiter. Cité en page 295.
- 249 Consultez par exemple l'article « Mathematical notation » dans l'*Encyclopedia of Mathematics*, 10 volumes, Kluwer Academic Publishers, 1988–1993. Mais avant tout, jetez un œil sur le magnifique site Web très instructif members.aol.com/jeff570/mathsym.html. La principale source de référence de tous ces résultats est le vaste travail exemplaire de recherche de FLORIAN CAJORI, *A History of Mathematical Notations*, 2 volumes, The Open Court Publishing Co., 1928–1929. Le symbole racine carrée est employé dans CHRISTOFF RUDOLFF, *Die Coss*, Vuolfius Cephaleus Joanni Jung : Argentorati, 1525. (Le titre complet était *Behend vnnd Hubsch Rechnung durch die kunstreichen regeln Algebre so gemeinlicklich die Coss genent werden. Darinnen alles so treülich an tag gegeben, das auch allein auss vleissigem lesen on allen mündtlichẽ vntrricht mag begriffen werden, etc.*) Cité en page 295.
- 250 J. TSCHICHOLD, *Formenwamdlungen der et-Zeichen*, Stempel AG, 1953. Cité en page 295.
- 251 MALCOLM B. PARKES, *Pause and Effect : An Introduction to the History of Punctuation in the West*, University of California Press, 1993. Cité en page 295.
- 252 Cela est expliqué par BERTHOLD LOUIS ULLMAN, *Ancient Writing and its Influence*, 1932. Cité en page 295.
- 253 PAUL LEHMANN, *Erforschung des Mittelalters – Ausgewählte Abhandlungen und Aufsätze*, Anton Hiersemann, 1961, pp. 4–21. Cité en page 297.
- 254 BERNARD BISCHOFF, *Paläographie des römischen Altertums und des abendländischen Mittelalters*, Erich Schmidt Verlag, 1979, pp. 215–219. Cité en page 297.
- 255 HUTTON WEBSTER, *Rest Days : A Study in Early Law and Morality*, MacMillan, 1916. La découverte du jour de malchance dans le royaume de Babylone fut effectuée en 1869 par George Smith, qui redécouvrit aussi la célèbre *Épopée de Gilgamesh*. Cité en page 297.
- 256 Les corrélations entre des racines grecques et de nombreux termes français – et par conséquent de nombreux mots anglais – peuvent être mises à profit pour construire rapidement un vocabulaire du grec ancien sans faire un travail intense, comme l'indique la collection pratique de J. CHAINEUX, *Quelques racines grecques*, Wetteren – De Meester, 1929. Lisez aussi DONALD M. AYERS, *English Words from Latin and Greek Elements*, University of Arizona Press, 1986. Cité en page 299.
- 257 Afin d'écrire correctement, lisez WILLIAM STRUNK & E. B. WHITE, *The Elements of Style*, Macmillan, 1935, 1979, ou WOLF SCHNEIDER, *Deutsch für Kenner – Die neue Stilkunde*, Gruner und Jahr, 1987. Cité en page 299.
- 258 Le Système International d'Unités, Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, Parc de Saint Cloud, 92310 Sèvres, France. Tous les nouveaux développements concernant les unités du SI sont publiés dans la revue *Metrologia*, éditée par ce même organisme. Preuve du lent cheminement d'une vieille institution, le BIPM inaugura son site Web en 1998 seulement, il est dorénavant accessible sur www.bipm.fr. Consultez également la page Web www.utc.fr/~tthomass/Themes/Unites/index.html, elle présente les biographies

- des personnes qui ont donné leur nom aux diverses unités employées. Le site de son homologue britannique, www.npl.co.uk/npl/reference, est nettement mieux : il fournit de nombreux détails ainsi que la version en langue anglaise des définitions des unités du SI. Cité en page 300.
- 259** La bible dans le domaine de la mesure du temps est représentée par l'œuvre magistrale en deux volumes de J. VANIER & C. AUDOIN, *The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards*, Adam Hilge, 1989. Un compte-rendu populaire se trouve dans TONY JONES, *Splitting the Second*, Institute of Physics Publishing, 2000.
Le site opdaf1.obspm.fr/www/lexique.html donne un glossaire des termes employés dans cette discipline. Sur les mesures de longueur, voir ... Sur les mesures de précision du courant électrique, voir ... Sur les mesures de masse, notamment atomique, voir la page 61. Sur les mesures de haute précision de la température, voir la page 345. Cité en page 301.
- 260** Les préfixes non officiels furent proposés pour la première fois dans les années 1990 par Jeff K. Aronson de l'Université d'Oxford, et devraient se généraliser à l'avenir. Cité en page 302.
- 261** Pour plus d'informations sur les systèmes d'unités électromagnétiques, consultez le livre de référence de JOHN DAVID JACKSON, *Classical Electrodynamics*, 3ème édition, Wiley, 1998. Cité en page 305.
- 262** G. J. STONEY, On the physical units of nature, *Philosophical Magazine* 11, pp. 381–391, 1881. Cité en page 305.
- 263** D.J. BIRD & al., Evidence for correlated changes in the spectrum and composition of cosmic rays at extremely high energies, *Physical Review Letters* 71, pp. 3401–3404, 1993. Cité en page 306.
- 264** P. J. HAKONEN, R. T. VUORINEN & J. E. MARTIKAINEN, Nuclear antiferromagnetism in rhodium metal at positive and negative nanokelvin temperatures, *Physical Review Letters* 70, pp. 2818–2821, 1993. Lisez également son article dans *Scientific American*, janvier 1994. Cité en page 306.
- 265** G. CHARPAK & R. L. GARWIN, The DARI, *Europhysics News* 33, pp. 14–17, janvier/février 2002. Cité en page 306.
- 266** Les valeurs mesurées des quantités physiques et les plages de valeurs qu'elles prennent sont assemblées dans HORST VÖLZ & PETER ACKERMANN, *Die Welt in Zahlen*, Spektrum Akademischer Verlag, 1996. Cité en page 307.
- 267** Lisez par exemple K. CODLING & L. J. FRASINSKI, Coulomb explosion of simple molecules in intense laser fields, *Contemporary Physics* 35, pp. 243–255, 1994. Cité en page 308.
- 268** A. ZEILINGER, The Planck stroll, *American Journal of Physics* 58, p. 103, 1990. Pouvez-vous découvrir un autre exemple similaire ? Cité en page 308.
- 269** L'horloge la plus précise construite en 2004, une horloge à fontaine atomique au césium, avait une précision d'une partie pour 10^{15} . Une précision plus élevée a été prévue comme étant bientôt possible, entre autres par M. TAKAMOTO, F.-L. HONG, R. HIGASHI & H. KATORI, An optical lattice clock, *Nature* 435, pp. 321–324, 2005. Cité en page 309.
- 270** J. BERGQUIST, ed., *Proceedings of the Fifth Symposium on Frequency Standards and Metrology*, World Scientific, 1997. Cité en page 309.
- 271** Consultez les informations sur les mésons $D_s^\pm$, données par le « particle data group » sur pdg.web.cern.ch/pdg. Cité en page 310.
- 272** Au sujet de la longue durée de vie du tantale 180, lisez D. BELIC & al., Photoactivation of $^{180}\text{Ta}^m$ and its implications for the nucleosynthesis of nature's rarest naturally occurring isotope, *Physical Review Letters* 83, pp. 5242–5245, 20 décembre 1999. Cité en page 310.

- 273** Consultez l'étude donnée par L. JU, D. G. BLAIR & C. ZHAO, The detection of gravitational waves, *Reports on Progress in Physics* **63**, pp. 1317–1427, 2000. Cité en page 310.
- 274** Lisez l'article clair et approfondi de G. E. STEDMAN, Ring laser tests of fundamental physics and geophysics, *Reports on Progress in Physics* **60**, pp. 615–688, 1997. Cité en page 310.
- 275** D'après une communication privée de Richard Rusby, c'est la valeur de 1997, alors qu'elle était estimée à 99.975°C en 1989, comme l'indiquent GARETH JONES & RICHARD RUSBY, Official : water boils at 99.975°C, *Physics World* **2**, pp. 23–24, septembre 1989, et R. L. RUSBY, Ironing out the standard scale, *Nature* **338**, p. 1169, mars 1989. Pour plus d'informations sur les mesures de température, lisez la page 345. Cité en page 310.
- 276** J. SHORT, Newton's apples fall from grace, *New Scientist*, **2098**, p. 5, 6 septembre 1997. Vous trouverez plus de détails dans R. G. KEESING, The history of Newton's apple tree, *Contemporary Physics* **39**, pp. 377–391, 1998. Cité en page 311.
- 277** Ces divers concepts font même l'objet d'une norme internationale distincte, l'ISO 5725, dont la désignation est *Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure*. Une excellente introduction en est donnée par JOHN R. TAYLOR, *An Introduction to Error Analysis : the Study of Uncertainties in Physical Measurements*, 2nd edition, University Science Books, Sausalito, 1997. Cité en page 312.
- 278** P. J. MOHR & B. N. TAYLOR, CODATA recommended values of the fundamental physical constants : 1998, *Reviews of Modern Physics* **59**, p. 351, 2000. C'est la compilation des constantes résultant d'un ajustement international et recommandée pour l'usage international par le Comité de données pour la Science et la Technologie (CODATA), un membre du Conseil international pour la science, lequel compte également l'Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA), l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC) et d'autres organisations. Le site Web de l'UIPPA est www.iupac.org. Cité aux pages 312 et 313.
- 279** Les détails sont fournis dans la célèbre référence astronomique, KENNETH SEIDELMANN, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, 1992. Cité en page 317.
- 280** Pour plus d'informations concernant le nombre π , ainsi que d'autres constantes, la page Web oldweb.ccm.sfu.ca/pi/pi.html donne une grande quantité de données et de références. Elle possède également un lien vers la synthèse qui en est faite sur mathworld.wolfram.com/Pi.html et vers de nombreux autres sites sur ce sujet. Voici quelques formules simples sur π :

$$\pi + 3 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n 2^n}{\binom{2n}{n}} \quad (106)$$

ou l'élégante formule découverte en 1996 par Bailey, Borwein et Plouffe :

$$\pi = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{16^n} \left(\frac{4}{8n+1} - \frac{2}{8n+4} - \frac{1}{8n+5} - \frac{1}{8n+6} \right). \quad (107)$$

Ce site développe aussi les nouvelles méthodes découvertes pour pouvoir calculer des chiffres binaires, choisis au préalable, de π sans avoir à évaluer tous les précédents. En outre, le nombre de chiffres (consécutifs) connus en 1999 était de plus de 1,2 million de millions, tel que le cite *Science News* **162**, p. 255, 14 décembre 2002. Ces méthodes passent avec succès tous les tests aléatoires, comme l'explique le site Web mathworld.wolfram.com/PiDigits.html. Cependant, cette propriété, désignée *normalité*, n'a jamais reçu de démonstration, c'est la plus grande question qui demeure ouverte au sujet de π . Il est probable que la théorie de la dynamique du chaos conduise vers une solution à cette énigme dans les années à venir.

Une autre méthode permettant de calculer π ainsi que d'autres constantes a été découverte et publiée par D. V. CHUDNOVSKY & G. V. CHUDNOVSKY, The computation of classical constants, *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)* 86, pp. 8178–8182, 1989. Les frères Chudnowsky avaient mis au point un supercalculateur dans l'appartement de Gregory avec environ 70 000 euros, et détinrent pendant plusieurs années le record du calcul du plus grand nombre de chiffres de π . Ils engagèrent une rude compétition durant plusieurs décennies avec Kanada Yasumasa, qui a battu le record en 2000, en effectuant le calcul sur un supercalculateur de l'industrie. De nouvelles formules pour calculer π sont toujours occasionnellement découvertes.

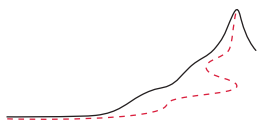
Pour le calcul de la constante d'Euler γ lisez aussi D. W. DE TEMPLE, A quicker convergence to Euler's constant, *The Mathematical Intelligencer*, pp. 468–470, mai 1993.

Remarquez que nous en savons peu concernant les propriétés élémentaires de certains nombres, par exemple nous ne savons toujours pas si $\pi + e$ est un nombre rationnel ou pas ! (On pense qu'il ne l'est pas.) Voulez-vous devenir un mathématicien ? Cité en page 318.

Défi 570 r

Défi 571 s





INDICES ET SOLUTIONS DES DÉFIS

“ N’effectuez jamais un calcul avant que vous en connaissiez la réponse. ”

Devise de John Wheeler

John Wheeler voulait que les gens évaluent, testent et devinent, mais il ne le disait pas ouvertement. Une estimation correcte renforce l’inclination pour la physique, tandis qu’une erronée nous entraîne dans le plaisir de la découverte.

Challenge ??, page ??: Ces sujets sont tous repris plus loin dans le texte.

Challenge 1, page 9: N’hésitez pas à être revendicatif et strict. La prochaine version en bénéficiera forcément.

Challenge 2, page 16: Il existe de nombreuses façons de distinguer le véritable mouvement d’une illusion de mouvement : par exemple, seul le mouvement réel peut être utilisé pour mettre quelque chose d’autre en mouvement. De plus, les illusions de mouvement des figures font preuve d’un défaut important : rien ne bouge si la tête et la feuille restent fixes l’une par rapport à l’autre. Autrement dit, l’illusion *amplifie* seulement le mouvement existant, il ne *créé* pas de mouvement à partir de rien.

Challenge 3, page 16: Sans faire des expériences précises et détaillées, ces deux positions peuvent trouver des exemples permettant de démontrer la validité de leur point de vue. La création est soutenue par l’apparition de moisissures ou de bactéries dans un verre d’eau, elle est également appuyée par son contraire, à savoir la disparition sans laisser de trace, telle que la disparition du mouvement. Cependant, la conservation est soutenue, et la création contredite, par toutes les investigations qui explorent avec beaucoup de soin des situations présumées d’apparition ou de disparition.

Challenge 5, page 18: Les partis politiques, les sectes, les organismes d’aide et les thérapeutes de toutes sortes ont typiquement ce genre de comportement.

Challenge 6, page 22: Ce problème n’est pas encore entièrement résolu pour le mouvement de l’espace vide, comme dans le cas des ondes gravitationnelles. De toute façon, le vide n’est pas constitué de minuscules particules de taille finie, puisque cela contredirait la propriété de transversalité des ondes gravitationnelles.

Challenge 7, page 24: Cette définition récursive est la suivante : les objets sont définis comme étant ce qui bouge par rapport à la toile de fond de l’espace, et l’arrière-plan est défini comme étant ce qui reste immuable lorsque les objets changent. Nous reviendrons à plusieurs reprises sur cette question primordiale, au cours de notre aventure. Il faudra, malgré tout, une certaine dose de patience pour la résoudre.

Challenge 8, page 26: Les trous ne sont pas des systèmes physiques, parce qu’en général ils ne peuvent pas être traqués.

Challenge 9, page 26: Regardez la [page ??](#).

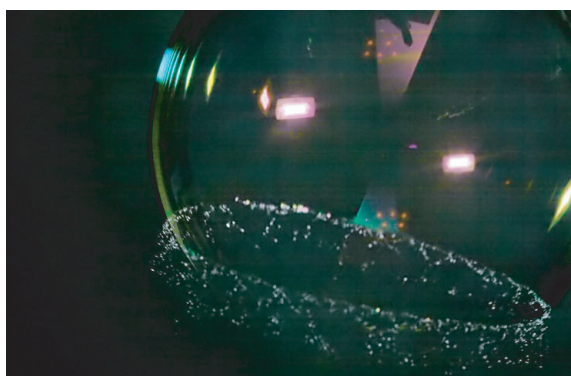


FIGURE 150 Une bulle de savon pendant qu'elle éclate. (© Peter Wienerroither)

Challenge 10, page 26: Un fantôme peut être une image en mouvement, il ne peut pas être un objet en mouvement, car les objets ne peuvent pas s'interpénétrer. Regardez la page ??.

Challenge 11, page 27: Indice : oui, il existe un tel point.

Challenge 12, page 27: Si quelque chose pouvait cesser d'être en mouvement, le mouvement pourrait disparaître sans laisser de trace. Pour une démonstration précise, nous devrions montrer que tous les atomes ne se déplacent plus. Jusqu'à présent, cela n'a jamais été observé : le mouvement est conservé. (Rien dans la nature ne peut disparaître sans laisser de trace.)

Challenge ??, page ??: Consultez la Figure 150 pour en voir une image intermédiaire. Une bulle éclate à partir d'un point, puis le bord du trou s'agrandit très rapidement, jusqu'à ce qu'il disparaisse aux antipodes. Pendant ce processus, le reste de la bulle garde sa forme sphérique, comme indiqué dans la figure. Pour voir un film de ce processus, regardez www.youtube.com/watch?v=SpcXtmkk26Q. Autrement dit, les dernières gouttelettes qui sont éjectées proviennent du point de la bulle qui est à l'opposé du point de crevaisson, elles ne sont jamais éjectées depuis le centre de la bulle.

Challenge 13, page 27: Cela signifierait en réalité que l'espace est infini, cependant il est impossible d'observer que quelque chose se déplace « pour toujours » : personne ne vit assez longtemps.

Challenge 14, page 27: Comment mesureriez-vous ceci ?

Challenge 15, page 27: Le nombre de chiffres fiables dans un résultat de mesure est une quantification élémentaire de la précision. Vous trouverez plus de détails en cherchant à « écart-type » dans l'index.

Challenge 16, page 27: Non, la mémoire est nécessaire pour l'observation et les mesures. C'est le cas pour les êtres humains et les dispositifs de mesure. La théorie quantique rendra cette affirmation particulièrement claire.

Challenge 17, page 27: Remarquez que vous n'avez jamais observé une vitesse nulle. Il y a toujours une certaine marge d'erreur dans la mesure qui nous empêche d'affirmer que quelque chose vaut zéro. Aucune exception !

Challenge 18, page 28: $(2^{64} - 1) = 18\,446\,744\,073\,700\,551\,615$ grains de riz, étant donné une récolte mondiale de 500 millions de tonnes par an, représentent à peu près 4 000 ans de récoltes de riz. Ce calcul est simplifié par l'utilisation de la formule $1 + m + m^2 + m^3 + \dots + m^n = (m^{n+1} - 1) / (m - 1)$, donnant la somme de ce que l'on appelle la *série géométrique*. (Cette désignation est historique et est utilisée pour faire la distinction avec la *série arithmétique* $1 + 2 + 3 + 4 + 5 + \dots + n = n(n + 1)/2$.) Pouvez-vous démontrer ces deux expressions ?

Challenge 19, page 28: Dans des expériences parfaites, la flamme s'incline vers l'intérieur.

Mais de telles expériences ne sont pas faciles à réaliser, et parfois la flamme penche vers l'extérieur. Essayez-le, tout simplement. Pouvez-vous expliquer ces deux observations ?

Challenge 20, page 28: Les accéléromètres sont les détecteurs de mouvement les plus simples. Ils existent sous la forme de dispositifs piézo qui produisent un signal à chaque fois que la boîte est accélérée et peuvent coûter un euro seulement. Un autre accéléromètre qui pourrait avoir du succès à l'avenir est un accéléromètre à interférence qui tire profit du mouvement d'une grille d'interférences, ce dispositif pourrait être intégré dans du silicium. D'autres accéléromètres plus précis utilisent des gyroscopes ou des rayons lasers en boucle.

Les velocimètres et les détecteurs de position peuvent aussi déceler le mouvement, ils requièrent une roue ou, du moins, un procédé optique permettant d'avoir une vision de l'extérieur de la boîte. Les tachygraphes dans les véhicules sont des exemples de velocimètres, les souris d'ordinateurs sont des exemples de détecteurs de position.

Un dispositif assez bon marché serait idéal pour mesurer la vitesse des skieurs ou des patineurs. Aucun appareil de ce type n'existe encore.

Challenge 21, page 28: La balle roule vers le centre de la table, puisque ce point est légèrement plus proche du centre de la Terre que le rebord, puis la balle prend de l'élan et effectue une oscillation autour de ce centre. La période est de 84 min, comme l'indique le défi 300. (Cela n'a jamais été observé jusqu'à présent. Pourquoi ?)

Challenge 22, page 28: Seulement si l'accélération ne s'annule jamais. Les accélérations peuvent être ressenties. Les accéléromètres sont des dispositifs qui mesurent les accélérations et déduisent alors la position. On les utilise dans les avions lors des vols qui traversent l'atlantique. Si la boîte n'est pas accélérée, il est impossible de dire si elle bouge ou reste sur place. Il est même impossible de dire dans quelle direction nous nous déplaçons. (Fermez vos yeux dans un train la nuit pour vous en rendre compte.)

Challenge 23, page 28: La longueur de corde nécessaire est nh , où n représente le nombre de roues ou de poulies.

Challenge 24, page 28: Le bloc se déplace deux fois plus rapidement que les cylindres, indépendamment de leur rayon.

Challenge 25, page 28: On sait que cette méthode fonctionne, de la même manière, pour d'autres craintes.

Challenge 26, page 29: Il faut 11 passages pour trois couples. Il en faut 5 pour deux couples. Pour quatre couples ou plus il n'y a pas de solution. Quelle est la solution s'il y a n couples et $n - 1$ places sur le bateau ?

Challenge 79, page 54: Indice : il existe un nombre infini de telles formes. Ces courbes sont aussi appelées *courbes de Reuleaux*. Autre indice : les pièces de 20 p et 50 p en Grande-Bretagne possèdent de telles formes. Eh oui, des formes autres que des cylindres sont également possibles : considérez un cylindre carré torsadé, par exemple.

Challenge 27, page 30: Dans la vie quotidienne, cela est correct. Qu'est-ce qui se passe lorsque les effets quantiques sont pris en considération ?

Challenge 28, page 31: Il n'y a qu'une seule possibilité : comparer la vitesse qui doit être mesurée avec la vitesse de la lumière. En réalité, presque tous les manuels de physique, que ce soit pour le collège et pour l'université, commencent par la définition de l'espace et du temps. Des manuels sur la relativité, excellents par ailleurs, ont des difficultés à se débarrasser de cette habitude, même ceux qui introduisent le *k-calculus* dorénavant standard (lequel constitue, en réalité, l'approche mentionnée ici). L'approche la plus logiquement claire consiste à commencer avec la notion de vitesse.

Challenge 29, page 33: Considérez la variation moyenne de distance entre deux atomes voisins

situés dans un morceau de quartz durant le dernier million d'années. Connaissez-vous quelque chose d'encore plus lent ?

Challenge ??, page ??: Il n'existe aucune manière de ressentir notre propre mouvement si nous sommes dans le vide. Aucune manière en principe. On baptise souvent ce résultat le *principe de relativité*.

En fait, il existe une façon de mesurer notre mouvement dans l'espace (même si ce n'est pas le vide) : mesurez votre vitesse par rapport au rayonnement fossile de fond diffus. Ainsi nous devons être prudents avec ce que nous voulons dire.

Challenge ??, page ??: La charge alaire P/A , le rapport entre le poids P et la surface de portance A , est manifestement proportionnelle à la racine cubique du poids. (En réalité, $P \sim l^3$, $A \sim l^2$, l étant la dimension de l'objet volant.) Cette relation explique la ligne verte de tendance principale.

La charge alaire P/A est, comme toutes les forces dans les fluides, proportionnelle au carré de la vitesse de croisière v : nous avons $P/A = v^2 0,38 \text{ kg/m}^3$. Le facteur inexpliqué englobe la densité de l'air et un coefficient numérique général qui est difficile à évaluer. Cette relation relie les échelles horizontales supérieure et inférieure dans le graphique.

Par conséquent, la vitesse de croisière est équivalente à la *racine sixième* du poids : $v \sim P^{1/6}$. Autrement dit, un Airbus A380 est 750 000 millions de fois plus lourd qu'une mouche drosophile, mais seulement une centaine de fois plus rapide.

Challenge 30, page 34: De manière équivalente : les points dans l'espace existent-ils ? L'ultime étape de notre ascension examinera ce problème en détail, regardez la [page ??](#).

Challenge 31, page 35: Toutes les sources d'électricité doivent utiliser la même phase lorsqu'elles fournissent de la puissance électrique dans le réseau. Les horloges des ordinateurs sur Internet doivent être synchronisées.

Challenge 32, page 36: Remarquez que ce décalage augmente quadratiquement avec le temps, mais pas linéairement.

Challenge 33, page 36: Le temps naturel est mesuré avec le mouvement naturel. Le mouvement naturel est le mouvement de la lumière. Le temps naturel est celui défini à l'aide du mouvement de la lumière.

Challenge 34, page 37: Galilée mesurait le temps avec une balance (et d'autres dispositifs). Son chronomètre était un tube rempli d'eau, dirigé vers un seau, qu'il maintenait fermé avec son pouce. Pour démarrer le chronomètre, il retirait son pouce, pour l'arrêter, il le remettait dessus. Le volume d'eau dans le seau lui donnait alors une mesure de la durée écoulée. Cela est expliqué dans son célèbre ouvrage GALILEO GALILEI, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica e i movimenti locali*, généralement simplement appelé les « Discours », qu'il publia en 1638 avec Louis Elsevier à Leyde aux Pays-Bas.

Challenge 35, page 38: Il n'existe aucune manière de définir un temps local aux pôles qui soit cohérent avec tous les points voisins. (Pour les curieux, vérifiez-le sur le site Web www.arctic.noaa.gov/gallery_np.html.)

Challenge 37, page 40: La forêt est emplie de lumière et donc de rayons lumineux : ils sont droits, comme l'indiquent les rayons de soleil de la [Figure 151](#).

Challenge 38, page 40: Une paire de muscles déplace le cristallin le long du troisième axe en déformant l'œil d'une forme oblongue en une forme sphérique, ou aplatie aux pôles.

Challenge 39, page 41: Vous pouvez résoudre cela en tentant de penser en quatre dimensions. Essayez d'imaginer comment permuter la séquence lorsque deux objets traversent une région. Remarque : il est généralement *incorrect*, dans ce domaine, d'utiliser le temps à la place d'une quatrième dimension *spatiale* !

Challenge 40, page 42: Mesurez les distances en utilisant la lumière.



FIGURE 151 Rayons de soleil dans une forêt. (© Fritz Bieri et Heinz Rieder)

Challenge 43, page 45: Il est plus facile de travailler avec le tore unité. Considérez l'intervalle unitaire $[0, 1]$ et assimilez tous les points extrémaux à un seul point. Définissez un ensemble B dont les éléments sont un nombre réel b donné, issu de cet intervalle, plus tous les nombres qui diffèrent de ce réel par un nombre rationnel. Le cercle unité peut être imaginé comme étant l'union de tous les ensembles B . (En réalité, chaque ensemble B est un exemplaire décalé de l'ensemble $\mathbb{Q}$ des nombres rationnels.) Maintenant construisez un ensemble A en prélevant un élément de chaque ensemble B . Construisez alors la famille d'ensembles constituée de l'ensemble A et de ses copies A_q décalées d'un nombre rationnel q . L'union de tous ces ensembles est le tore unité. Cette famille d'ensembles est infiniment dénombrable. Divisez-la alors en *deux* familles d'ensembles infiniment dénombrables. Il est facile de voir que chacune de ces deux familles peut être renumérotée et ses éléments décalés de telle façon que chacune des deux familles forme un tore unité.

Réf. 35 Les mathématiciens disent qu'il n'existe pas de mesure additive infiniment dénombrable de $\mathbb{R}^n$ ou que les ensembles tel que A ne sont pas mesurables. En raison de cette existence, la « démultiplication » des longueurs est possible. Nous chercherons plus tard à savoir si le pain ou l'or peuvent être démultipliés de cette manière.

Challenge 44, page 45: Astuce : commencez avec les triangles.

Challenge 45, page 45: La région située entre l'axe des x et la courbe de la fonction qui assigne 1 à chaque nombre transcendant et 0 à chaque nombre non-transcendant en constitue un exemple.

Challenge 46, page 46: Utilisons la définition de la fonction donnée dans le texte. L'angle dièdre d'un tétraèdre régulier est un multiple irrationnel de π , donc le tétraèdre possède un invariant de Dehn non nul. Le cube possède un angle dièdre de $\pi/2$, donc l'invariant de Dehn du cube est 0. Par conséquent, le cube n'est pas équidécomposable avec le tétraèdre régulier.

Challenge 47, page 47: Si vous pensez que vous pouvez montrer que l'espace vide est continu, vous avez tort. Vérifiez bien vos arguments. Si vous pensez que vous pouvez démontrer le contraire, vous *devez* avoir raison – mais seulement si vous connaissez déjà ce qui sera expliqué dans la dernière partie de ce livre. Si ce n'est pas le cas, vérifiez votre argumentation. (Par la suite, nous découvrirons que le vide possède un contenu en énergie fini. Si le vide était continu, le paradoxe de Banach–Tarski pourrait être mis à profit pour démultiplier l'énergie.)

Challenge 48, page 47: Bien évidemment, nous utilisons la lumière pour vérifier que le fil à plomb est droit, donc les deux définitions doivent être équivalentes. Cela est vrai parce que les lignes du champ de la gravité sont également des trajectoires possibles pour le mouvement de la

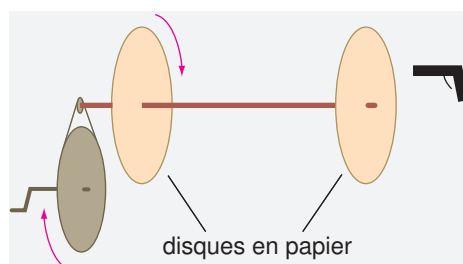


FIGURE 152 Un moyen élémentaire de mesurer la vitesse des balles.

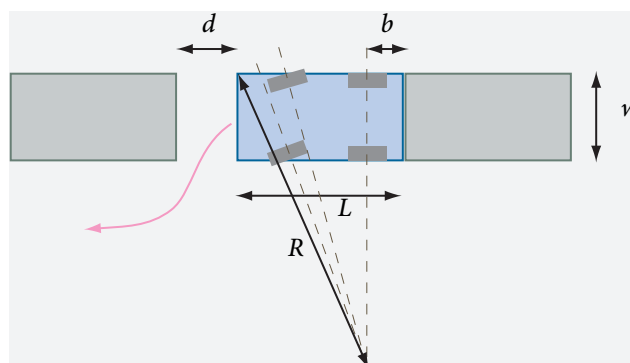


FIGURE 153 Quitter une place de parking – le rayon externe de manœuvre.

lumière. Toutefois, ce n'est pas toujours le cas : pouvez-vous en repérer les exceptions ?

La surface d'une mer calme constitue une autre manière de contrôler la rectitude.

Un troisième procédé moins précis consiste à faire usage des détecteurs de rectitude situés dans le cerveau. Le cerveau humain possède une faculté innée permettant de déterminer si un objet vu avec les yeux est droit. Il y a des cellules spécifiques dans le cerveau qui s'activent lorsque c'est le cas. N'importe quel ouvrage sur la perception visuelle fournit plus de renseignements sur ce sujet.

Challenge 49, page 48: La théorie de la Terre creuse est correcte si la formule des distances est utilisée de manière cohérente. En particulier, nous devons faire l'hypothèse que les objets deviennent plus petits lorsqu'ils s'approchent du centre de la sphère creuse. De bonnes explications de tous les phénomènes se trouvent sur www.geocities.com/inversedearth. Quelques supports peuvent être trouvés sur Internet, également sous les désignations de système géocentrique, théorie du monde intérieur ou théorie de la Terre concave. Il n'existe aucun argument pour préférer une description plutôt que l'autre, excepté peut-être pour des raisons de simplicité et de facilité intellectuelle.

Challenge 51, page 49: Un indice est donné dans la Figure 152. Pour la mesure de la vitesse de la lumière avec une méthode pratiquement identique, consultez la page 19.

Challenge ??, page ??: L'ours est blanc parce que la maison est évidemment située au Pôle Nord. Mais il existe une infinité d'emplacements supplémentaires (sans présence d'ours) à proximité du Pôle Sud : pouvez-vous les repérer ?

Challenge ??, page ??: Appelons L la longueur initiale du ruban élastique, v la vitesse de l'escargot par rapport au ruban et V la vitesse du cheval par rapport au sol. La vitesse de l'escargot par rapport au sol est donnée par

$$\frac{ds}{dt} = v + V \frac{s}{L + Vt} . \quad (108)$$

C'est ce que nous appelons une *équation différentielle* pour la position inconnue de l'escargot $s(t)$. Vous pouvez vérifier – simplement en l'introduisant – que sa solution est donnée par

$$s(t) = \frac{v}{V}(L + Vt) \ln(1 + Vt/L). \quad (109)$$

Par conséquent, l'escargot rattrape le cheval en un temps

$$t_{\text{rattrapage}} = \frac{L}{V}(e^{V/v} - 1) \quad (110)$$

qui est fini pour toute valeur de L , V et v . Vous pouvez vérifier néanmoins que cette durée est, en vérité, extrêmement grande, si des valeurs relativistes pour les vitesses sont utilisées.

Challenge 52, page 49: La couleur est une propriété qui s'applique uniquement aux objets, et non aux frontières des objets. Cette question montre qu'il est facile de poser des questions qui n'ont aucun sens, même en physique.

Challenge 53, page 49: Vous pouvez facilement le faire vous-même. Vous pouvez même trouver des sites Web sur ce sujet.

Challenge 57, page 50: Horloges avec deux aiguilles : 22 fois. Horloges avec trois aiguilles : 2 fois.

Challenge 58, page 50: Pour deux aiguilles, la réponse est 143 fois.

Challenge 59, page 50: La Terre tourne de 15 minutes par minute.

Challenge 60, page 50: Vous pourriez être étonnés, mais aucune donnée fiable n'existe sur cette question. La vitesse la plus élevée concernant un lancer mesuré jusqu'à présent semble être celle d'une balle de cricket à 45 m/s. De l'autre côté, il y a beaucoup plus d'informations disponibles concernant des vitesses atteintes à l'aide de raquettes. Le smash rapide du badminton d'environ 70 m/s semble être un bon candidat pour le record de vitesse à l'aide d'une raquette, les balles de golf atteignent des vitesses similaires.

Challenge 61, page 50: Oui, elle le peut. En réalité, de nombreux chats peuvent également se glisser en dessous.

Challenge 62, page 51: 1,8 km/h ou 0,5 m/s.

Challenge 64, page 51: Cet usage inhabituel reflète l'idée que nous sommes nous-mêmes capables de déterminer notre position, mais pas l'instant auquel nous nous situons. La section sur le déterminisme montrera comment cette distinction est erronée.

Challenge 65, page 51: Oui. Cependant, cela n'est pas évident puisque ceci implique que l'espace et le temps ne sont pas continus, contrairement à ce que nous apprenons au collège. Nous trouverons la réponse dans la dernière partie de cet ouvrage.

Challenge 66, page 51: Pour une courbe, utilisez le rayon de courbure, défini en chaque point, du cercle qui se rapproche de la courbe en ce point. Pour une surface, définissez deux directions en chaque point et utilisez également deux cercles le long de ces directions.

Challenge 67, page 51: Elle se déplace d'environ 1 cm en 50 ms.

Challenge 68, page 52: La surface du poumon est comprise entre 100 et 200 m², en fonction de la source littéraire, et celle des intestins est comprise entre 200 et 400 m².

Challenge 81, page 55: Une telle limite n'existe pas en physique classique. Néanmoins, il y en a une dans la nature, qui émerge dès que les effets quantiques sont pris en considération.

Challenge 69, page 52: La forme finale est un cube plein sans aucun trou.

Challenge 54, page 50: La distance requise est

$$= \sqrt{(L - b)^2 - w^2 + 2w\sqrt{R^2 - (L - b)^2}} - L + b, \quad (111)$$

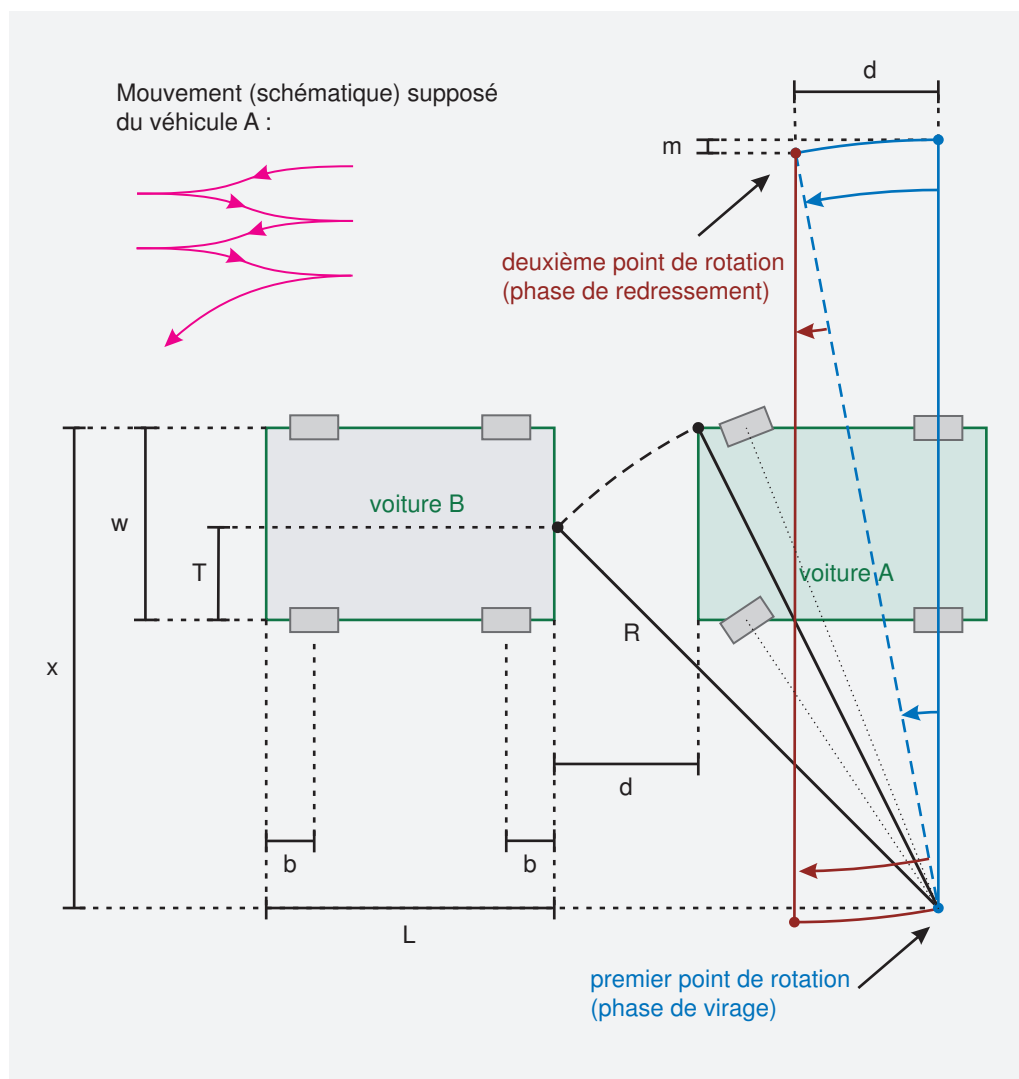


FIGURE 154 Solution de l'énigme du stationnement du véhicule. (© Daniel Hawkins)

comme nous pouvons le déduire de la Figure 153.

Challenge 55, page 50: Un espacement minimum n'existe pas : n'importe quelle valeur conviendra ! Pouvez-vous expliciter cela ?

Challenge 56, page 50: La solution qui suit a été proposée par Daniel Hawkins.

Supposez que vous soyez assis dans une voiture A, stationnée derrière le véhicule B, comme indiqué sur la Figure 154. Il y a deux méthodes élémentaires pour quitter une place de stationnement tout en utilisant la marche arrière : en faisant tourner la voiture pour éloigner le centre de rotation (vers la droite) par rapport à la voiture B et en décalant latéralement la voiture pour éloigner le centre de rotation (plus loin sur le côté) par rapport à la voiture B. La première méthode exige que la voiture A soit partiellement en diagonale, ce qui signifie que cette méthode ne fonctionnera pas pour d inférieur à une certaine valeur, essentiellement celle donnée ci-dessus, lorsque la marche arrière n'est pas requise. Nous nous pencherons donc sur la seconde méthode

(dessinée), laquelle fonctionnera pour une valeur infinitésimale de d .

Dans le cas où la distance d est inférieure à la distance minimale requise pour quitter la place de stationnement sans utiliser la marche arrière, pour une géométrie donnée L, w, b, R , un essai pour sortir de la place de parking entraînera que le coin de la voiture A touche la voiture B à une distance T du côté de la voiture B, comme il est indiqué dans la Figure 154. Cette distance T représente la grandeur par laquelle le véhicule A doit être décalé en translation afin de parvenir à quitter l'emplacement de parking.

Le procédé permettant de quitter la place de stationnement, indiqué dans le coin supérieur gauche de la Figure 154, nécessite deux phases pour réussir : la **phase de virage** initiale et la **phase de redressement**. En tournant et en redressant, nous réalisons un décalage vertical vers le bas et un décalage horizontal vers la gauche, tout en préservant l'orientation d'origine. La dernière partie est cruciale parce que si nous tentions de tourner jusqu'à ce que le coin de la voiture A touche la voiture B, celle-ci serait inclinée et toute tentative de redressement suivrait précisément la même trajectoire arquée, vers l'arrière, jusqu'à la position de départ, tandis que le fait de tourner le volant dans l'autre direction permettrait de faire tourner davantage la voiture, comme dans la première méthode décrite ci-dessus.

Notre but est de tourner aussi loin que nous le pouvons et de toujours être capable de redresser complètement avant que le véhicule A ne touche la voiture B. Pour analyser précisément quelle devrait être la grandeur de ce virage, nous devons d'abord examiner les propriétés d'une voiture qui tourne.

L'épure d'Ackermann est le principe qui établit que pour qu'une voiture tourne sans glissement, les quatre roues doivent tourner autour du même point. Cette idée fut brevetée par Rudolph Ackermann en 1817. Certaines propriétés de l'épure d'Ackermann qui sont reliées à ce problème sont les suivantes :

- Les roues arrière restent alignées, mais les roues avant (que nous contrôlons), doivent être inclinées d'un angle différent pour tourner autour du même centre.
- Les centres de rotation pour les virages à gauche et à droite sont situés sur des côtés opposés par rapport à la voiture.
- Pour des grandeurs équivalentes de virages à gauche et à droite, les centres de rotation sont équidistants du côté le plus proche de la voiture. La Figure 154 le montre de façon plus évidente.
- Tous les centres de rotation possibles sont situés sur la même ligne, qui passe aussi toujours par les roues arrière.
- Lorsque les roues arrière sont « droites » (ce qui signifiera par la suite qu'elles possèdent la même orientation qu'en position initiale), elles seront verticalement alignées avec les centres de rotation.
- Lorsque la voiture est en train de tourner autour d'un centre, par exemple celui associé au virage à gauche maximal, alors le centre potentiel associé au virage à droite maximal tournera en même temps que la voiture. De manière similaire, lorsque le véhicule tourne autour du centre droit, le centre gauche tourne.

Maintenant que nous connaissons les propriétés de l'épure d'Ackermann, nous pouvons dire que pour maximiser le décalage vers le bas tout en préservant l'orientation, nous devons tourner à gauche autour du premier centre de telle façon que le second centre tourne d'une distance *horizontale* d , comme indiqué sur la Figure 154. Lorsque cela est fait, nous freinons puis tournons la direction vers le côté complètement opposé de telle manière que nous sommes dorénavant en train de tourner à droite autour du second centre. Parce que nous nous sommes décalés vers la gauche d'une distance d , nous serons parfaitement redressés au moment exact où le véhicule A vient en contact avec la voiture B. C'est ce que nous cherchions, un décalage vers le bas de m et un décalage vers la gauche de d tout en préservant l'orientation de la voiture A. Un procédé

analogue peut être exécuté à l'inverse pour accomplir un autre décalage vers le bas de m et un décalage *vers la droite* de d , déplaçant ainsi effectivement le véhicule A vers le bas d'une distance $2m$ à partir de sa position initiale (avant toute manœuvre) tout en retrouvant la même orientation. Ceci peut être réitéré à l'infini, ce qui explique pourquoi il est possible de quitter une place de stationnement avec une distance infinitésimale d entre les voitures A et B. Pour déterminer le nombre de fois où cette procédure (les deux opérations de contournement et de redressement) doit être réalisée, nous devons seulement diviser T (rappelez-vous que T est la distance à laquelle le véhicule A doit être décalé vers le bas afin de tourner définitivement pour quitter l'emplacement de parking) par $2m$, qui représente le décalage total vers le bas pour une itération de cette procédure. Symboliquement,

$$n = \frac{T}{2m}$$

Afin d'obtenir une formule où n est une fonction de la géométrie du véhicule, nous devons trouver une expression pour T et $2m$. Pour simplifier les dérivations nous définissons une nouvelle longueur x , également indiquée dans la [Figure 154](#) :

$$x = \sqrt{R^2 - (L - b)^2}$$

$$T + (x - w) = \sqrt{R^2 - (L - b + d)^2}$$

$$\begin{aligned} T &= \sqrt{R^2 - (L - b + d)^2} - x + w \\ &= \sqrt{R^2 - (L - b + d)^2} - \sqrt{R^2 - (L - b)^2} + w \end{aligned}$$

$$(x + (x - w)) - m = \sqrt{(x + (x - w))^2 - d^2}$$

$$m = 2x - w - \sqrt{(2x - w)^2 - d^2}$$

$$= 2\sqrt{R^2 - (L - b)^2} - w - \sqrt{(2\sqrt{R^2 - (L - b)^2} - w)^2 - d^2}$$

$$= 2\sqrt{R^2 - (L - b)^2} - w - \sqrt{4(R^2 - (L - b)^2) - 4w\sqrt{R^2 - (L - b)^2} + w^2 - d^2}$$

$$= 2\sqrt{R^2 - (L - b)^2} - w - \sqrt{4R^2 - 4(L - b)^2 - 4w\sqrt{R^2 - (L - b)^2} + w^2 - d^2}$$

$$2m = 4\sqrt{R^2 - (L - b)^2} - 2w - 2\sqrt{4R^2 - 4(L - b)^2 - 4w\sqrt{R^2 - (L - b)^2} + w^2 - d^2}$$

$$n = \frac{T}{2m}$$

$$= \frac{\sqrt{R^2 - (L - b + d)^2} - \sqrt{R^2 - (L - b)^2} + w}{4\sqrt{R^2 - (L - b)^2} - 2w - 2\sqrt{4R^2 - 4(L - b)^2 - 4w\sqrt{R^2 - (L - b)^2} + w^2 - d^2}}$$

La valeur de n doit toujours être arrondie à l'entier *supérieur* pour déterminer le nombre de fois où nous devons avancer puis reculer pour parvenir à quitter l'emplacement de parking.

Challenge 63, page 51: Rien, ni une preuve ni une réfutation.

Challenge 70, page 52: Regardez la [page 20](#).

Challenge 71, page 52: Un indice pour trouver la solution est donné par la [Figure 155](#).

Challenge 72, page 52: Parce qu'ils sont ou ont été liquides.

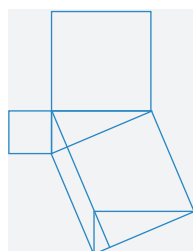


FIGURE 155 Un dessin élémentaire qui démontre le théorème de Pythagore.

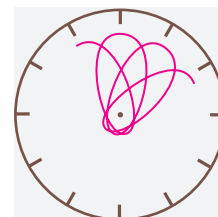


FIGURE 156 La trajectoire du point situé au milieu des deux extrémités des aiguilles d'une horloge.

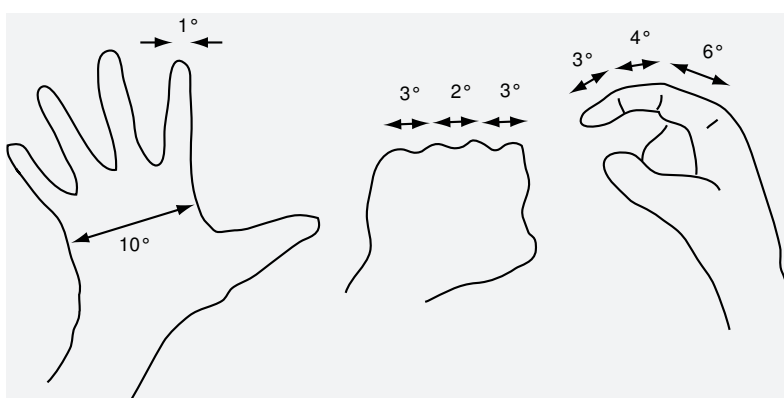


FIGURE 157 Les angles définis par les mains placées vers le ciel, lorsque les bras sont tendus.

Challenge 73, page 52: La forme est indiquée dans la Figure 156 : elle possède onze lobes.

Challenge 74, page 53: L'angle conique φ , c'est-à-dire l'angle entre l'axe et le bord du cône (ou de manière équivalente, la moitié de l'angle apical du cône) est relié à l'angle solide Ω par la relation $\Omega = 2\pi(1 - \cos \varphi)$. Invoquez l'aire d'une calotte sphérique pour confirmer ce résultat.

Challenge 76, page 53: Regardez la Figure 157.

Challenge 78, page 53: Astuce : dessinez tous les objets concernés.

Challenge 80, page 54: Cette courbe est bien évidemment appelée caténaire, du latin « catena » qui signifie chaîne. La formule d'une caténaire est $y = a \cosh(x/a)$. Si vous approchez la chaîne par des courts segments droits, vous pouvez fabriquer une arche constituée de blocs en bois qui peuvent se maintenir en place sans recourir à de la colle. L'arche de Saint Louis dans le Missouri a la forme d'une caténaire. Un pont suspendu possède la forme d'une caténaire avant qu'il soit chargé, c'est-à-dire avant que la voie soit attachée à celui-ci. Lorsque le pont est achevé, la forme se situe entre une caténaire et une parabole.

Challenge 82, page 55: L'inverse des rayons, ou courbures, vérifient $a^2 + b^2 + c^2 + d^2 = (1/2)(a + b + c + d)^2$. Cette formule fut découverte par René Descartes. Si nous continuons à placer des cercles dans les espaces vacants, nous obtenons ce que nous appelons des arrangements compacts de cercles, un admirable domaine des mathématiques récréatives. Ils possèdent de nombreuses propriétés surprenantes, telles que les relations intrigantes entre les coordonnées des centres des

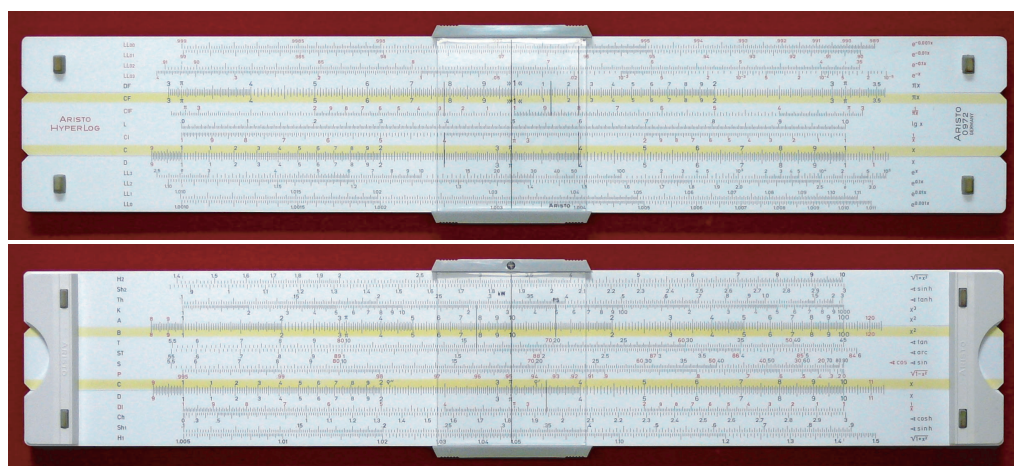


FIGURE 158 Une règle à calcul de haute précision, autour de 1970. (© Jörn Lütjens)

cercles et leurs courbures.

Challenge ??, page ??: Il y a deux solutions. (Pourquoi ?) Ce sont les deux solutions positives de $l^2 = (b + x)^2 + (b + b^2/x)^2$, la hauteur est alors donnée par $h = b + x$. Les deux solutions sont 4,84 m et 1,26 m. Il existe des formules explicites pour ces solutions : pouvez-vous les découvrir ?

Challenge ??, page ??: La meilleure méthode consiste d'abord à calculer la hauteur B à laquelle l'échelle bleue touche le mur. Elle est donnée comme étant une solution de $B^4 - 2hB^3 - (r^2 - b^2)B^2 + 2h(r^2 - b^2)B - h^2(r^2 - b^2) = 0$. Les solutions à valeurs entières sont discutées dans MARTIN GARDNER, *Mathematical Circus*, Spectrum, 1996.

Challenge 83, page 55: Une possibilité : utilisez l'analogie tridimensionnel du théorème de Pythagore. La réponse est 9.

Challenge 84, page 55: Dessinez une échelle logarithmique, c'est-à-dire placez chaque nombre à une distance correspondant à son logarithme népérien. Un tel dispositif, appelé *règle à calcul*, est montré sur la Figure 158. Les règles à calcul furent les précurseurs des calculatrices, elles étaient employées partout dans le monde aux époques préhistoriques, c'est-à-dire jusqu'à environ 1970. Consultez également la page Web www.oughtred.org.

Challenge 85, page 55: Deux fois plus. Construisez vous-même une maquette du Soleil et de la Terre pour le vérifier.

Challenge 86, page 55: Le Soleil est exactement dans le dos de l'observateur, il se couche, les rayons proviennent de l'arrière et pénètrent très profondément dans le ciel, dans la direction opposée à celle du Soleil. Une situation légèrement différente – utile également pour se familiariser avec le dessin en perspective – surgit lorsque vous avez un phare dans votre dos. Pouvez-vous l'esquisser ?

Challenge ??, page ??: Le volume est donné par $V = \int_{-1}^1 4(1 - x^2)dx = 16/3$.

Challenge ??, page ??: Oui. Essayez-le avec un modèle en papier.

Challenge 87, page 56: Des problèmes surgissent lorsque les effets quantiques sont ajoutés. Un univers bidimensionnel n'aurait pas de matière, puisque la matière est faite de particules de spin $1/2$. Mais celles-ci n'existent pas en deux dimensions. Pouvez-vous repérer d'autres raisons ?

Challenge ??, page ??: Deux dimensions ne permettent pas d'ordonner des événements. Il devient impossible de dire « avant » et « après ». Dans la vie courante et tous les domaines accessibles aux mesures, le temps est certainement unidimensionnel.

Challenge 88, page 58: D'après $x = gt^2/2$ vous obtenez la règle suivante : portez le nombre de secondes au carré, multipliez par cinq et vous obtenez la profondeur en mètres.

Challenge 89, page 58: Expérimentez-le justement.

Challenge 90, page 58: Les académiciens suspendirent un boulet de canon à l'aide d'un mince fil de fer juste en face de l'ouverture du canon. Lorsque le coup de feu fut tiré, le second boulet de canon volant percuta le fil métallique, assurant ainsi que les deux boulets partaient en même temps. Un observateur situé très loin tentait alors de déterminer si les deux boulets touchaient la terre au même instant. Cette expérience n'est pas facile, des minuscules erreurs sur l'angle et dans la résistance de l'air faussent les résultats.

Challenge 91, page 59: Une parabole possède ce que nous dénommons un foyer ou point focal. Toute la lumière émise de ce point, et réfléchi, part dans la même direction : tous les rayons lumineux sont émis parallèlement. Le terme « foyer » – du mot latin *focus* qui désigne cheminée – exprime le fait que c'est le point le plus chaud lorsqu'un miroir parabolique est illuminé. Où se trouve le foyer de la parabole $y = x^2$? (Les ellipses possèdent deux foyers, avec une définition cependant légèrement différente. Pouvez-vous les trouver ?)

Challenge 92, page 60: En négligeant la résistance de l'air et en estimant l'angle à 45° , nous obtenons $v = \sqrt{dg}$, ou environ 3,8 m/s. Cette vitesse est engendrée par un mécanisme de pression intégré, qui utilise la pression sanguine, et qui est soudainement relâché grâce à un système mécanique situé à l'extrémité du tube digestif. La référence citée donne plus d'informations.

Challenge 93, page 60: Sur un sol horizontal, pour une vitesse v et un angle α par rapport à l'horizontale, en négligeant la résistance due à l'air et la hauteur du lanceur, la distance d est donnée par $d = v^2 \sin 2\alpha / g$.

Challenge 94, page 60: Marchez ou courez sous la pluie, mesurez votre vitesse v , et l'angle α selon lequel la pluie semble tomber par rapport à la verticale. La vitesse de la pluie est alors $v_{\text{pluie}} = v / \tan \alpha$.

Challenge 95, page 60: Vérifiez votre calcul grâce à l'information que le record mondial de jonglage en 1998 s'est fait avec 9 balles.

Challenge 96, page 60: Le record du saut en longueur pourrait certainement être amélioré en abandonnant le mètre-ruban sur le sable et en mesurant la véritable distance de saut à l'aide d'un appareil photographique, cela permettrait aux athlètes de courir au plus près de leur vitesse maximale. Le record pourrait également être amélioré par une petite marche inclinée ou par une planche suspendue à un ressort à l'emplacement du décollage, afin d'augmenter l'angle de l'élan.

Challenge 97, page 60: On dit que c'est vrai, puisque les gouttes d'eau seraient alors des sphères de glace et tomberaient avec une vitesse élevée.

Challenge 98, page 60: On trouve des affirmations contradictoires dans la littérature. Le fait est que des gens ont été à l'hôpital parce qu'ils ont reçu une balle en chute libre, qui est allée se loger directement dans leur crâne. (Voyez S. MIRSKY, It is high, it is far, *Scientific American* p. 86, février 2004.) De surcroît, le plomb contenu dans les balles est mauvais pour l'environnement.

Challenge 424, page 230: Pour qu'un animal de masse m puisse sauter, l'énergie E nécessaire est donnée par $E = mgh$, et le travail disponible pour un muscle est approximativement proportionnel à sa masse $W \sim m$. Nous obtenons donc que la hauteur h est indépendante de la masse de l'animal. Autrement dit, l'énergie mécanique spécifique des animaux est de l'ordre de $1,5 \pm 0,7 \text{ J/kg}$.

Challenge 99, page 60: Les pierres ne suivent jamais des paraboles : lorsque nous l'étudions scrupuleusement, c'est-à-dire lorsque la variation de g avec la hauteur est prise en considération, leur trajectoire précise se révèle être une ellipse. Cette courbe apparaît de la manière la plus flagrante pour des longs lancers, comme les lancers autour d'une partie significative de la Terre, ou

pour des objets gravitants. En bref, les pierres suivent des paraboles uniquement si on présume que la Terre est plate. Si sa courbure est prise en compte, elles suivent des ellipses.

Challenge 101, page 63: Un bon candidat d'une accélération faible pour un système physique pourrait être l'accélération mesurée par les détecteurs d'ondes gravitationnelles. Elles sont inférieures à 10^{-13} m/s^2 .

Challenge 103, page 64: L'ensemble de toutes les rotations autour d'un point dans un plan constitue véritablement un espace vectoriel. Qu'en est-il de l'ensemble de toutes les rotations autour de *tous* les points situés dans un plan ? Et qu'en est-il concernant les situations tridimensionnelles ?

Challenge 104, page 64: Le produit scalaire entre deux vecteurs **a** et **b** est donné par

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = ab \cos \angle(\mathbf{a}, \mathbf{b}) . \quad (112)$$

En quoi cette forme diffère-t-elle du produit vectoriel ?

Challenge ??, page ??: En chute libre (lorsque l'air n'est pas présent) ou à l'intérieur d'une station spatiale gravitant autour de la Terre, nous sommes accélérés mais nous ne ressentons rien du tout. En réalité, cette non-différenciation ou cette équivalence entre l'accélération et « l'absence de sensation » a constitué une étape cruciale pour Albert Einstein dans son développement de la relativité générale.

Challenge 105, page 64: Le professeur à l'élève : Quelle est la dérivée de la vitesse ? L'accélération ! Quelle est la dérivée de l'accélération ? Je ne sais pas. Le *jerk* ! Les dérivées quatrième, cinquième et sixième de la position sont parfois dénommées *snap*, *crackle* et *pop*.

Challenge 107, page 66: Nous pouvons argumenter que toute source de lumière doit avoir une taille finie.

Challenge 109, page 66: Ce que l'œil nu humain perçoit comme étant un minuscule point noir est généralement un point de $50 \mu\text{m}$ environ de diamètre.

Challenge 110, page 66: Voyez la page ??.

Challenge 111, page 66: Nous devons vérifier attentivement si les étapes conceptuelles qui nous ont conduit à extirper la notion de point à partir des observations sont correctes. Nous verrons dans l'ultime partie de cette aventure que ce n'est pas le cas.

Challenge 112, page 67: Nous pouvons faire tourner la main d'une manière telle que le bras décrive le mouvement détaillé. Regardez également la page ??.

Challenge 113, page 67: N'importe quel nombre, sans restriction.

Challenge 114, page 67: La circulation sanguine et nerveuse ne serait pas possible si la roue avait un essieu. La méthode indiquée pour éviter d'emmêler les connexions fonctionne uniquement lorsque la partie en rotation *ne* possède *pas* d'essieu : la « roue » doit flotter ou être maintenue en place par d'autres procédés. Il devient donc impossible de concevoir un *essieu* de roue en utilisant un simple morceau de membrane. Et si une roue sans essieu pouvait être construite (ce qui pourrait être possible), alors la roue écraserait régulièrement la connexion. Une telle connexion sans essieu pourrait-elle servir à réaliser une hélice ?

Par ailleurs, il est toujours concevable que des animaux possèdent des roues sur des essieux, si la roue est un objet « inerte ». Même si des technologies d'alimentation sanguine comme les réacteurs à flux continu étaient employés, les animaux ne pourraient pas faire croître une telle roue détachée d'une manière adaptée au reste du corps et ils rencontreraient des difficultés pour reconstituer une roue endommagée. Les roues détachées ne peuvent pousser sur les animaux : elles doivent être inertes.

Challenge 115, page 68: Le cerveau dans le crâne, les fabriques de sang dans les os ou la croissance de l'œil en sont des exemples.

Challenge ??, page ?? : En 2007, les plus vastes grandes roues de fête foraine permettant de transporter des passagers faisaient environ 150 m de diamètre. Les plus grandes éoliennes font environ 125 m de diamètre. Les fours à ciment sont les plus longues roues : elles peuvent faire plus de 300 m le long de leur axe.

Challenge ??, page ?? : La résistance de l'air réduit la distance maximale, laquelle est atteinte pour un angle d'environ $\pi/4 = 45^\circ$, de $v^2/g = 91,7$ m environ jusqu'à autour de 50 m.

Challenge 116, page 70 : Nous pouvons ajouter également le Soleil, le ciel et le paysage à cette liste.

Challenge 117, page 71 : Les fantômes, les hallucinations, les apparitions d'Elvis ou les extraterrestres doivent tous être l'un ou l'autre. Il n'y a pas de troisième alternative. Même les ombres sont simplement des types particuliers d'images.

Challenge 118, page 71 : Ce problème fut ardemment débattu au dix-septième siècle, même Galilée postulait que c'était des images. Cependant, ce sont des objets, puisqu'elles peuvent entrer en collision avec d'autres objets, comme l'a montré la collision spectaculaire qui eut lieu entre Jupiter et la comète Shoemaker-Levy 9 en 1994. Depuis ce temps, on a vu des satellites heurter des comètes et elles ont même été prises pour cibles (et frappées).

Challenge 119, page 72 : La vitesse minimale est approximativement celle à laquelle il est possible de rouler sans les mains. Si vous faites ainsi, et que vous poussez alors *délicatement* le guidon, vous pouvez reproduire l'expérience décrite ci-dessus. Soyez prudents : une poussée trop forte vous fera gravement chuter.

Challenge 120, page 75 : Si la boule en mouvement n'est pas en rotation, après la collision les deux boules repartiront en faisant un angle *droit* entre elles.

Challenge 121, page 76 : Une partie de l'énergie est convertie en chaleur, le reste est transféré au bloc de béton sous forme d'énergie cinétique. Comme le bloc est massif, sa vitesse est petite et facilement encaissée par le corps humain. Il paraît que cet effet fonctionne aussi avec des enclumes. Dans une autre variante courante, l'individu n'est pas couché sur des clous, mais est suspendu en l'air : il se maintient horizontalement seulement, avec la tête et les épaules placées sur une chaise, et les pieds sur une autre.

Challenge 122, page 76 : Oui, la masse demeure valide aussi pour le magnétisme, parce que la condition exacte n'est pas que l'interaction soit centrale, mais plutôt qu'elle réalise une condition plus générale, qui engendre des accélérations telles que celles produites par le magnétisme. Pouvez-vous déduire cette condition à partir de la définition de la masse ?

Challenge 123, page 78 : Le poids décroît à cause de l'eau évaporée, évacuée par la transpiration et, à une échelle plus petite, à cause du carbone expiré qui était lié au dioxyde de carbone.

Challenge 124, page 78 : Plutôt que d'utiliser les effets inertiels de la Terre, il est plus facile d'en déduire sa masse à partir de ses effets gravitationnels. Regardez le défi 235.

Challenge 128, page 79 : À première vue, la relativité implique que les tachyons possèdent une masse imaginaire. Cependant, ce facteur imaginaire peut être retiré de la relation masse-énergie et masse-quantité de mouvement, de telle sorte que nous pouvons définir une valeur de masse réelle pour les tachyons. Par conséquent plus les tachyons sont rapides et moins ils possèdent d'énergie et de quantité de mouvement. La quantité de mouvement et l'énergie peuvent toutes les deux prendre une valeur négative quelconque.

Challenge 129, page 80 : Les jambes n'étant jamais parfaitement verticales, elles glissent immédiatement vers l'extérieur. Une fois que le félicé ou la personne se trouve sur le sol, il est presque impossible de rester debout plus longtemps.

Challenge 130, page 80 : La conservation de la quantité de mouvement (du centre de masse) impliquerait que l'environnement tout entier puisse être accéléré dans la direction opposée. La

conservation de l'énergie entraînerait qu'une quantité colossale d'énergie puisse être transférée entre les deux emplacements, anéantissant tout ce qui se trouve entre eux. La téléportation contredirait donc la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement.

Challenge 131, page 81: La fraction des marées due à l'effet du Soleil, du vent solaire et des interactions entre les deux champs magnétiques est un exemple de mécanisme de frottement qui existe entre la Terre et le Soleil.

Challenge 132, page 82: Avec ce facteur $1/2$, l'augmentation de l'énergie (physique) cinétique est équivalente au travail (physique) exercé sur un système : l'énergie totale est donc conservée uniquement si nous lui adjoignons le facteur $1/2$.

Challenge 134, page 83: C'est une application astucieuse de la conservation de la quantité de mouvement.

Challenge 135, page 83: Ni l'un ni l'autre. Avec les freins serrés, les dégâts sont plus importants, mais toujours répartis de manière équitable entre les deux véhicules.

Challenge 136, page 84: Les appareils de chauffage, les locomotives, les moteurs dans les usines, les fabriques d'acier, les centrales électriques recouvrant les pertes dans le réseau électrique, etc. Par ailleurs, les pays les plus riches dans le monde, tels que la Suède ou la Suisse, consomment moitié moins d'énergie par habitant que les États-Unis. Ce gaspillage constitue une des raisons du niveau de vie moyen inférieur aux États-Unis.

Challenge 138, page 86: Si jamais la Terre voyait sa vitesse de rotation se modifier légèrement et continuellement, nous marcherions penchés, l'eau des océans s'écoulerait vers le nord, les conditions atmosphériques seraient constamment orageuses et des tremblements de terre apparaîtraient à cause de la modification de la forme du globe.

Challenge 140, page 88: Jetez-le simplement en l'air et comparez la dextérité nécessaire pour le faire tourner autour de divers axes.

Challenge 141, page 88: Utilisez la définition du moment d'inertie et le théorème de Pythagore pour chaque élément de masse du corps étudié.

Challenge 142, page 88: Suspendez ce corps en attachant la corde en deux points distincts. Le point de croisement des lignes prolongées de la corde représente le centre de masse.

Challenge 143, page 88: Les sphères possèdent une orientation, parce que nous pouvons toujours ajouter un minuscule point de repère sur leur surface. Cette possibilité n'est pas offerte pour des objets microscopiques, et nous étudierons cette situation dans la partie concernant la théorie quantique.

Challenge 146, page 90: Regardez les tableaux 15 et 16.

Challenge 147, page 90: Le mouvement rectiligne autopropulsé contredit la conservation de la quantité de mouvement, le changement autopropulsé d'orientation (à condition encore une fois que le mouvement cesse) ne contredit aucune loi de conservation. Mais l'explication profonde et ultime de la différence sera dévoilée dans la dernière partie de notre aventure.

Challenge 148, page 90: Oui, le singe peut atteindre la banane. Il a juste besoin de tourner sur lui-même. À chaque tour, le plateau tournera un petit peu plus en direction de la banane. Bien sûr, d'autres méthodes, comme le fait de souffler, d'uriner, etc. dans une direction à angle droit par rapport à l'axe, sont également possibles.

Challenge 150, page 91: Les points qui se déplacent exactement le long de la direction radiale de la roue forment un cercle situé sous l'axe et au-dessus de la jante. Ce sont les points qui sont nets dans la Figure 44 de la page 91.

Challenge 151, page 91: Utilisez la conservation du moment cinétique autour du point de contact. Si on suppose que toute la masse de la roue est située dans la jante, alors la vitesse finale de rotation est la moitié de celle initiale ; elle est indépendante du coefficient de frottement.

Challenge 154, page 96: La force de Coriolis peut être perçue comme étant la somme de deux effets distincts, d'intensité égale. Le premier effet est le suivant : dans un référentiel en rotation, la vitesse change dans le temps. Ce qu'un observateur inertiel (qui n'est pas en rotation) considère être une vitesse constante sera considérée par l'observateur en rotation comme une vitesse qui varie avec le temps. L'accélération mesurée par l'observateur en rotation est négative, et proportionnelle à la fréquence angulaire et à la vitesse.

Le deuxième effet est la variation de la vitesse dans l'espace. Dans un référentiel en rotation, des points distincts possèdent des vitesses différentes. Cet effet est négatif et proportionnel à la fréquence angulaire et à la vitesse.

Au final, l'accélération de Coriolis (qui est la force de Coriolis divisée par la masse) est donc $\mathbf{a}_C = -2\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}$.

Challenge 155, page 97: Un pendule court de longueur L qui se balance en deux dimensions (avec une amplitude ρ et une orientation φ) fait apparaître deux termes supplémentaires dans le lagrangien $\mathcal{L}$:

$$\mathcal{L} = T - V = \frac{1}{2}m\dot{\rho}^2\left(1 + \frac{\rho^2}{L^2}\right) + \frac{l_z^2}{2m\rho^2} - \frac{1}{2}m\omega_0^2\rho^2\left(1 + \frac{\rho^2}{4L^2}\right) \quad (113)$$

où comme d'habitude la fréquence fondamentale est $\omega_0^2 = g/L$ et le moment cinétique est $l_z = m\rho^2\dot{\varphi}$. Ces deux termes auxiliaires disparaissent lorsque $L \rightarrow \infty$. Dans cette situation, si le système oscille en formant une ellipse de demi axes a et b , cette ellipse est figée dans l'espace, et la fréquence est ω_0 . Pour un pendule de longueur finie L , la fréquence s'exprime plutôt comme

$$\omega = \omega_0\left(1 - \frac{a^2 + b^2}{16L^2}\right) \quad ; \quad (114)$$

qui plus est, l'ellipse tourne avec une fréquence

$$\Omega = \omega \frac{3}{8} \frac{ab}{L^2} . \quad (115)$$

(Ces formules peuvent être dérivées en utilisant le principe de moindre action, comme l'ont indiqué C. G. GRAY, G. KARL & V. A. NOVIKOV, Progress in classical and quantum variational principles, arxiv.org/abs/physics/0312071.) Autrement dit, un pendule court en mouvement elliptique dénote une précession même *sans* la force de Coriolis. Puisque cette fréquence de précession diminue avec $1/L^2$, cet effet est imperceptible pour des pendules longs, où seule la force de Coriolis demeure. Pour observer l'effet de la force de Coriolis sur un pendule court, nous devons donc faire attention qu'il ne commence pas à osciller selon une orbite elliptique en ajoutant un procédé qui annule ce mouvement elliptique.

Challenge 156, page 97: L'accélération de Coriolis constitue l'explication de la déviation par rapport à la ligne droite. Elle est due à la variation de la vitesse avec la distance à l'axe de rotation. Maintenant imaginez un pendule, situé à Paris, qui se balance dans la direction Nord-Sud avec une amplitude A . À l'extrémité méridionale de cette oscillation, le pendule est éloigné de l'axe d'une distance $A \sin \varphi$, où φ représente la latitude. À ce point de l'oscillation, le pivot du support central dépasse le plan d'oscillation du pendule avec une vitesse horizontale relative donnée par $v = 2\pi A \sin \varphi / 23 \text{ h } 56 \text{ min}$. La période de la précession est donnée par $T_F = v / 2\pi A$, où $2\pi A$ est la circonférence de l'enveloppe de la trajectoire du pendule (relativement à la Terre). Cela conduit à $T_F = 23 \text{ h } 56 \text{ min} / \sin \varphi$. Pourquoi la valeur qui apparaît dans la formule n'est-elle pas 24 h, mais 23 h 56 min ?

Challenge 157, page 97: L'axe demeure figé par rapport aux étoiles éloignées, non par rapport à l'espace absolu (qui est une entité qui ne peut absolument pas être observée).

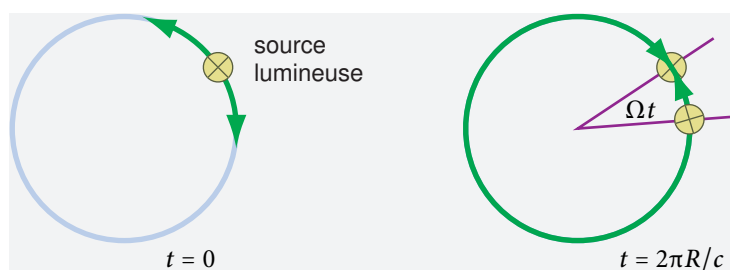


FIGURE 159 Déduction de l'expression de l'effet Sagnac.

Challenge 158, page 98: La rotation entraîne une variation minuscule de la fréquence et donc de la couleur pour la lumière qui circule.

Challenge 159, page 98: Le poids change en allant vers l'est ou lors du déplacement vers l'ouest à cause de l'accélération de Coriolis. Si la vitesse de rotation coïncide avec la fréquence d'oscillation de la balance, cet effet est amplifié par résonance. Cette astuce était également employée par Eötvös.

Challenge 160, page 98: L'accélération de Coriolis fait tourner la barre, car chaque corps en mouvement est dévié vers le côté, et les deux déviations s'additionnent dans ce cas. La direction de la déviation dépend de l'endroit où l'expérience est réalisée, dans l'hémisphère nord ou sud.

Challenge 161, page 98: Lorsqu'on le tourne d'un angle π autour d'un axe Est-Ouest, la force de Coriolis produit une vitesse de dérive du liquide autour du tube. Elle possède la valeur

$$v = 2\omega r \sin \theta, \quad (116)$$

tant que le frottement reste négligeable. Ici ω représente la vitesse angulaire de la Terre, θ la latitude et r le (plus grand) rayon du tore. Pour un tube de 1 m de diamètre en Europe continentale, cela donne une vitesse d'environ $6,3 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Les mesures peuvent être facilitées si le tube voit son diamètre se restreindre à un unique point, car alors la vitesse augmente dans cette situation. Une diminution de la surface d'un facteur 100 accroît la vitesse du même facteur. Lorsque cette expérience est réalisée, nous devons soigneusement écarter tous les autres effets qui obligent l'eau à se mouvoir, comme par exemple des gradients de température à travers le système.

Challenge 162, page 99: Imaginez que de la lumière décrive une trajectoire circulaire (par exemple, dans une boucle en fibre de verre) et que deux faisceaux se déplacent dans des directions opposées, comme indiqué dans la Figure 159. Si la fibre tourne avec une fréquence de rotation Ω , nous pouvons en déduire que, après un tour, la différence ΔL dans la longueur de la trajectoire est

$$\Delta L = 2R\Omega t = \frac{4\pi R^2 \Omega}{c}. \quad (117)$$

La différence de phase est donc

$$\Delta \varphi = \frac{8\pi^2 R^2}{c \lambda} \Omega \quad (118)$$

si l'indice de réfraction est égal à 1. C'est la formule requise pour l'étude du principal cas de l'effet Sagnac.

Challenge ??, page ??: La tige métallique est légèrement plus longue sur un côté de l'axe. Lorsque le fil qui le maintient est brûlé avec une bougie, son moment d'inertie décroît d'un facteur 10^4 , donc il commence à tourner avec une période de rotation (idéalement) de 10^4 fois celle

de la Terre, une cadence qui est aisément visible en envoyant un rayon lumineux sur le miroir et en observant comment sa réflexion varie sur la paroi.

Challenge 163, page 102: Le résultat original de Bessel était 0,3136'', ou 657,7 mille rayons orbitaux, ce qui l'amena à penser qu'elle était à 10,3 années-lumière ou 97,5 Pm.

Challenge 165, page 105: La galaxie forme une bande laiteuse dans le ciel. Elle est donc une structure aplatie. Cela est encore plus flagrant dans l'infrarouge, comme le montre plus clairement la Figure 73 à la page 197. À partir de cet aplatissement (et de sa symétrie circulaire) nous pouvons en déduire que la galaxie doit être en rotation. Donc il doit y avoir d'autre matière dans l'univers.

Challenge 166, page 106: L'auteur voulait probablement parler du « reste de l'univers ». En réalité, une partie en mouvement ne déplace jamais le centre de gravité d'un système fermé. Mais l'Univers est-il fermé ? Ou est-il un système ? L'ultime partie de notre aventure répondra à ces questions.

Challenge 167, page 106: Indice : une énergie par unité de distance est une force.

Challenge 170, page 106: La balance réagit à votre battement de cœur. Le poids est majoritairement constant au cours du temps, excepté lorsque le cœur bat : pendant une brève durée, le poids est dans une certaine mesure diminué à chaque battement. Cela est apparemment dû au sang qui heurte l'arche aortique lorsque le cœur le pompe vers le haut. La vitesse du sang est d'environ 0,3 m/s lors de la contraction maximale du ventricule gauche. La distance à l'arche aortique est de quelques centimètres. Le temps qui s'écoule entre la contraction et le renversement de la direction est d'environ 15 ms.

Challenge 171, page 107: La conservation du moment cinétique sauve le verre. Essayez-le.

Challenge 172, page 107: Avant toutes choses, les données expérimentales de MacDougall sont déficientes. Dans les six cas que MacDougall examina, il ne connaissait pas l'instant exact du décès. Sa revendication d'une décroissance de la masse ne peut pas être déduite de ses propres informations. Des mesures récentes sur des moutons mourants, qui possèdent à peu près la même masse que les êtres humains, n'ont fait ressortir aucune variation de masse, mais des fluctuations incontestables du poids de quelques douzaines de grammes lorsque le cœur s'arrête. Cette diminution temporaire du poids pourrait s'expliquer par l'exhalation de l'air ou d'humidité, par la relaxation des muscles ou par l'arrêt de la circulation sanguine. Cette question n'est pas élucidée.

Challenge 173, page 107: En considérant une montagne rectangulaire, la hauteur h au-dessus de la croûte attenante et la profondeur d en dessous sont reliées par

$$\frac{h}{d} = \frac{\rho_m - \rho_c}{\rho_c} \quad (119)$$

où ρ_c est la densité de la croûte et ρ_m représente la densité du manteau. Pour les valeurs de densité citées, le rapport est 6,7, conduisant à une profondeur supplémentaire de 6,7 km sous la montagne.

Challenge 177, page 108: Le comportement des sphères peut être expliqué simplement en remarquant que des ondes élastiques se propagent à travers la série de boules. Seule la propagation de ces ondes élastiques, en particulier leur réflexion à l'extrémité de la chaîne, explique que le même nombre de boules qui tapent d'un côté sont soulevées de l'autre. Pour des durées plus longues, le frottement fait que toutes les sphères oscillent en phase. Pouvez-vous confirmer ceci ?

Challenge 178, page 109: Lorsque le cylindre court frappe le long, deux ondes de compression commencent à se propager, à partir du point de contact, à travers les deux cylindres. Lorsque chaque onde de compression parvient à l'extrémité, elle est réfléchie comme une onde d'expansion. Si la géométrie est soigneusement sélectionnée, l'onde d'expansion qui rebrousse chemin dans le cylindre court peut se poursuivre dans le long (lequel est toujours dans sa phase de compression). Pour des temps de contact suffisamment longs, les ondes provenant du cylindre court

peuvent donc déposer une grande quantité de leur énergie dans le cylindre long. La quantité de mouvement est conservée, comme l'énergie. Le cylindre long voit sa longueur osciller lorsqu'il se détache, de telle sorte que toute son énergie n'est pas de l'énergie de translation. Cette oscillation est alors exploitée pour enfoncer des clous ou des forets dans des murs en pierre. Dans les perceuses à percussion du marché, des rapports de longueur de 1 pour 10 sont couramment exploités.

Challenge 179, page 109: Le transfert de quantité de mouvement au mur est double quand la balle rebondit parfaitement.

Challenge 180, page 109: Si le bouchon se trouve dans sa position normale : ôtez le couvercle plastique du bouchon, placez le chiffon autour de la bouteille (c'est uniquement pour des raisons de protection) et frappez plusieurs fois la bouteille sur le plancher ou sur une paroi de manière inclinée, comme indiqué sur la Figure 38 de la page 79. À chaque coup donné, le bouchon sortira un petit peu plus.

Si le bouchon est tombé dans la bouteille : placez la moitié du chiffon à l'intérieur de celle-ci, secouez jusqu'à ce que le bouchon tombe sur le chiffon. Tirez ce dernier vers l'extérieur : d'abord lentement, jusqu'à ce qu'il recouvre presque tout le bouchon, puis alors vigoureusement.

Challenge 182, page 110: Le microscope à force atomique.

Challenge 183, page 110: Utilisez la Figure 48 de la page 95 pour la seconde moitié de la trajectoire, puis réfléchissez soigneusement à la première moitié.

Challenge 184, page 110: Indice : le fait de lancer des fusées depuis l'équateur permet d'économiser beaucoup d'énergie, donc du carburant et du poids.

Challenge 185, page 111: Pour un homme qui court : $E \approx 0,5 \cdot 80 \text{ kg} \cdot (5 \text{ m/s})^2 = 1 \text{ kJ}$; pour une balle de fusil : $E \approx 0,5 \cdot 0,04 \text{ kg} \cdot (500 \text{ m/s})^2 = 5 \text{ kJ}$.

Challenge 186, page 111: La flamme s'incline vers l'intérieur.

Challenge 187, page 111: La balle avance dans la direction vers laquelle elle est accélérée. Par conséquent, nous pourrions imaginer que la balle placée dans un verre au repos est tirée vers le haut parce que le plancher est accéléré vers le haut. Nous reviendrons sur cette question dans la section sur la relativité générale.

Challenge 188, page 111: Il double pratiquement de taille.

Challenge 189, page 112: Pour votre examen il vaut mieux dire que la force centrifuge n'existe pas. Mais puisque dans chaque système stationnaire il y a un équilibre entre les forces, cette discussion est en quelque sorte une diversion.

Challenge 191, page 112: Placez les tasses pleines de thé sur une planche et attachez celle-ci à quatre longues cordes que vous gardez en main.

Challenge 192, page 112: Le frottement si les marées sur Terre en constituent la principale cause.

Challenge ??, page ??: Au point le plus haut, l'accélération est $g \sin \alpha$, où α représente l'angle que fait le pendule au point le plus élevé. Au point le plus bas, l'accélération est v^2/l , où l est la longueur du pendule. La conservation de l'énergie implique que $v^2 = 2gl(1 - \cos \alpha)$. Donc ce problème exige que $\sin \alpha = 2(1 - \cos \alpha)$. Cela aboutit à $\cos \alpha = 3/5$.

Challenge ??, page ??: Nous avons besoin de l'équation de la variation de la masse $dm/dt = \pi \rho_{\text{vapeur}} r^2 |v|$ due à la vapeur et de l'évolution de la vitesse de la goutte $m dv/dt = mg - v dm/dt$. Ces deux équations conduisent à

$$\frac{dv^2}{dr} = \frac{2g}{C} - 6 \frac{v^2}{r} \quad (120)$$

où $C = \rho_{\text{vapeur}}/4\rho_{\text{eau}}$. L'astuce consiste à montrer que ceci peut se réécrire ainsi

$$r \frac{d}{dr} \frac{v^2}{r} = \frac{2g}{C} - 7 \frac{v^2}{r}. \quad (121)$$

Pour des durées assez longues, toutes les solutions physiquement raisonnables s'approchent de $v^2/r = 2g/7C$, cela implique que pour des durées assez longues,

$$\frac{dv}{dt} \frac{v^2}{r} = \frac{g}{7} \quad \text{et} \quad r = \frac{gC}{14} t^2. \quad (122)$$

Concernant ce fameux problème, consultez par exemple B. F. EDWARDS, J. W. WILDER & E. E. SCIME, Dynamics of falling raindrops, *European Journal of Physics* 22, pp. 113–118, 2001.

Challenge 195, page 113: Un tremblement de terre ayant une magnitude de Richter de 12 représente 1 000 fois l'énergie du séisme chilien de 1960 d'une magnitude de 10. Ce dernier fut provoqué par une fissure, qui se manifesta sur les 40 km de la croûte terrestre, sur une longueur de 1 000 km, le long de laquelle les deux flancs glissèrent de 10 m l'un par rapport à l'autre. Seul l'impact d'une météorite pourrait conduire à des valeurs supérieures à 12.

Challenge 196, page 113: Ce n'est pas facile : le rôle est joué par une association de frottements et de couples. Lisez par exemple l'article J. SAUER, E. SCHÖRNER & C. LENNERZ, Real-time rigid body simulation of some classical mechanical toys, 10th European Simulation and Symposium and Exhibition (ESS '98) 1998, pp. 93–98, ou www.lennerz.de/paper_ess98.pdf.

Challenge 198, page 113: Si une alliance de mariage tourne autour d'un axe qui n'est pas un axe principal, le moment cinétique et la vitesse ne sont pas parallèles.

Challenge 199, page 113: Oui, cela se produit deux fois par an. Pour minimiser les dommages, les paraboles devraient être de couleur noire.

Challenge 200, page 113: Un missile tiré vers l'arrière constituerait un moyen de défense parfait contre les avions qui attaqueraient par l'arrière. Cependant, lorsqu'il est lancé, le missile est réellement en train de voler à reculons par rapport à l'air, ainsi il se retourne et devient alors une menace pour l'avion qui l'a tiré. Les ingénieurs qui n'avaient pas pensé à cet effet ont failli tuer un pilote au cours du premier test de ce type.

Challenge 202, page 114: Quoi que fasse le singe, qu'il grimpe ou qu'il descende ou même qu'il se laisse chuter, il reste à la même hauteur que la masse. Maintenant, que se passe-t-il s'il y a du frottement au niveau de la poulie ?

Challenge 204, page 114: Pesez la balle de munition et tirez-la contre une masse suspendue au plafond. Nous pouvons déterminer la quantité de mouvement de la balle à partir de la masse et de son angle de déviation.

Challenge 206, page 114: Oui, s'il se déplace à un angle suffisamment grand par rapport à la direction de mouvement du bateau.

Challenge 208, page 115: Le moment d'inertie est $\Theta = \frac{2}{5}mr^2$.

Challenge 209, page 115: Les moments d'inertie sont égaux aussi pour le cube, mais les valeurs sont $\Theta = \frac{1}{6}ml^2$. Les efforts nécessaires pour mettre une sphère et un cube en rotation sont donc différents.

Challenge 210, page 115: Lisez l'article de C. UCKE & H. -J. SCHLICHTING, Faszinierendes Dynabee, *Physik in unserer Zeit* 33, pp. 230–231, 2002.

Challenge 211, page 115: Lisez l'article de C. UCKE & H. -J. SCHLICHTING, Die kreisende Büroklammer, *Physik in unserer Zeit* 36, pp. 33–35, 2005.

Challenge 212, page 115: Oui. Pouvez-vous imaginer ce qui se passe pour un observateur situé à l'équateur ?

Challenge 213, page 115: Une ligne droite au zénith, et des cercles de plus en plus petits de chaque côté. Un exemple peut être consulté sur le site Web antwpr.gsfc.nasa.gov/apod/ap021115.html.

Challenge ??, page ??: La courbe décrite par le milieu d'une échelle qui glisse le long d'un mur est un cercle.

Challenge 216, page 116: Ce plan est spécifié dans les sites Web mentionnés, pour un homme debout ce plan est le plan vertical contenant les deux yeux.

Challenge ??, page ??: Ces interrupteurs exploitent la puissance qui est absorbée lorsque l'interrupteur est enfoncé et alimentent ainsi un minuscule émetteur qui actionne une télécommande à haute fréquence pour allumer la lumière.

Challenge ??, page ??: Elle tire profit d'un ingénieux arrangement de couches bimétalliques. Celles-ci se meuvent chaque fois que la température change entre le jour et la nuit – et vice-versa – et enroulent un ressort d'horloge. L'horloge elle-même est une horloge mécanique ayant une faible consommation d'énergie.

Challenge 217, page 118: Comme nous l'avons dit, les jambes sont plus faciles à faire croître, à entretenir et à réparer que les roues. De surcroît, les jambes n'ont pas forcément besoin de surfaces plates (ce que nous appelons des « rues ») pour agir.

Challenge 218, page 119: La formule de l'escalier est un résultat empirique dévoilé par l'expérience, et est utilisée par les ingénieurs du monde entier. Son origine et son explication paraissent historiquement confuses.

Challenge 219, page 119: La nature classique, ou telle que nous la connaissons dans la vie courante, possède une symétrie droite-gauche et exige donc un nombre pair de jambes. Pour pouvoir marcher sur des surfaces bidimensionnelles il faut naturellement au minimum quatre jambes.

Challenge 221, page 120: La durée du jour varie avec la latitude. De même que la longueur d'une ombre ou la hauteur des étoiles la nuit, des réalités qui sont facilement vérifiées en téléphonant à un ami. Les navires qui émergent de l'horizon font d'abord apparaître leurs mâts. Ces arguments, ajoutés à l'ombre ronde de la Terre au cours d'une éclipse de lune et à l'observation que, quelque soit le lieu, toutes les choses chutent vers le bas, étaient tous déjà consignés par Aristote dans son œuvre *Traité du ciel*. Nous avons dorénavant acquis la certitude que tout le monde au cours des 2 500 dernières années savait que la Terre est sphérique. La légende qui stipule que de nombreux individus continuaient à croire dans une Terre plate fut diffusée dans le monde – comme controverse rhétorique – par Copernic. Ce récit continua alors à être de plus en plus exagéré pendant les siècles qui suivirent, parce qu'un nouveau procédé pour diffuser les mensonges venait juste d'être inventé : l'imprimerie. En vérité, depuis 2 500 ans, l'immense majorité des gens sait que la Terre est une sphère.

Challenge 222, page 120: Robert Peary avait oublié qu'à la date où il prétendit se trouver au Pôle Nord, le 6 avril 1909, le Soleil était très bas à l'horizon, il projetait des ombres très longues, d'environ dix fois la hauteur des objets. Mais sur sa photographie les ombres sont beaucoup plus courtes. (En réalité, la photo est prise de manière à masquer toutes les ombres aussi soigneusement que possible.) De façon intéressante, il parvint même à persuader, en 1911, le congrès américain de le déclarer officiellement comme étant le premier homme à se rendre au Pôle Nord. (Un concurrent avait proclamé l'avoir atteint auparavant, mais sa photographie révélait la même erreur.) Peary fraudait également sur les distances parcourues les quelques jours précédents l'arrivée, il négligea aussi de mentionner que durant les derniers jours il était tiré par son partenaire Matthew Henson, parce qu'il n'était plus capable de marcher. En réalité Matthew Henson avait plus

Page ??

de mérite pour cette aventure que Peary. Henson, toutefois, ne savait pas que Peary mentait sur la position qu'ils avaient atteint.

Challenge 223, page 120: Oui, cet effet a été mesuré pour des gratte-ciels. Pouvez-vous en estimer les grandeurs ?

Challenge 224, page 122: La pointe du vecteur vitesse, lorsque son évolution dans le temps est dessinée, engendre un cercle autour du centre de mouvement.

Challenge ??, page ??: Dessinez une figure de cette situation.

Challenge ??, page ??: Encore une fois, dessinez une figure de cette situation.

Challenge 227, page 122: La valeur du produit GM pour la Terre est $4,0 \cdot 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$.

Challenge 228, page 122: Tous les points peuvent être atteints pour des inclinaisons en général, mais lorsqu'on tire horizontalement dans une direction donnée, seuls les points situés sur la première moitié de la circonférence peuvent être atteints.

Challenge 230, page 123: Sur la Lune, l'accélération gravitationnelle est de $1,6 \text{ m/s}^2$, environ un sixième de la valeur sur Terre. Les valeurs de l'accélération gravitationnelle à la surface des planètes peuvent être trouvées sur de nombreux sites Internet.

Challenge 231, page 123: La réponse est la machine d'Atwood : deux masses pratiquement égales m_1 et m_2 sont reliées par une ficelle enroulée autour d'une poulie bien graissée, de masse négligeable. La masse la plus lourde chute très lentement. Pouvez-vous montrer que l'accélération a de cette chute « non libre » est donnée par $a = g(m_1 - m_2)/(m_1 + m_2)$? Autrement dit, plus la différence de masse est petite, plus la chute est lente.

Challenge 232, page 124: Vous devriez impérativement essayer de comprendre l'origine de cette expression. Elle permet d'appréhender un grand nombre de concepts essentiels de la mécanique. L'idée est que pour des petites amplitudes, l'accélération d'un pendule de longueur l est causée par la gravité. Le dessin d'un diagramme des forces agissant sur un pendule à un angle quelconque α révèle que

$$\begin{aligned} ma &= -mg \sin \alpha \\ ml \frac{d^2 \alpha}{dt^2} &= -mg \sin \alpha \\ l \frac{d^2 \alpha}{dt^2} &= -g \sin \alpha . \end{aligned} \quad (123)$$

Pour les petites amplitudes dont nous avons fait allusion (en deçà de 15°), nous pouvons faire l'approximation

$$l \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = -g \alpha . \quad (124)$$

C'est l'équation d'une oscillation harmonique (c'est-à-dire d'une oscillation sinusoïdale). Le mouvement qui en résulte est :

$$\alpha(t) = A \sin(\omega t + \varphi) . \quad (125)$$

L'amplitude A et la phase φ dépendent des conditions initiales, toutefois la fréquence d'oscillation est déterminée par la longueur du pendule et l'accélération de la gravité (vérifiez-le !) :

$$\omega = \sqrt{\frac{l}{g}} . \quad (126)$$

(Pour des amplitudes arbitraires, la relation est beaucoup plus complexe : consultez Internet ou des ouvrages spécialisés de mécanique pour plus de détails.)

Challenge 233, page 124: La vitesse de la marche est proportionnelle à l/T , ce qui fait qu'elle est proportionnelle à $l^{1/2}$.

Challenge 235, page 125: Cavendish suspendit une tige horizontale dotée d'une masse à chaque extrémité, avec un long fil métallique. Il approcha alors une grosse masse à ce pendule de torsion, en éliminant soigneusement tous les courants d'air, et mesura de quel angle la tige avait tourné.

Challenge 236, page 125: L'accélération due à la gravité est $a = Gm/r^2 \approx 5 \text{ nm/s}^2$ pour une masse de 75 kg. Pour une mouche de masse $m_{\text{mouche}} = 0,1 \text{ g}$ qui se pose sur une personne avec une vitesse $v_{\text{mouche}} = 1 \text{ cm/s}$ et qui déforme la peau (sans perte d'énergie) de $d = 0,3 \text{ mm}$, une personne serait accélérée de $a = (v^2/d)(m_{\text{mouche}}/m) = 0,4 \mu\text{m/s}^2$. La perte d'énergie due à la collision inélastique réduit cette valeur au moins d'un facteur dix.

Challenge 238, page 127: La manière la plus facile de se le représenter consiste à imaginer la gravité comme un flux qui émane d'une sphère. Cela donne une dépendance en $1/r^{d-1}$ pour la force et donc une dépendance en $1/r^{d-2}$ pour le potentiel.

Challenge 240, page 129: Puisque les trajectoires de la chute libre sont des ellipses, lesquelles sont des courbes contenues dans un plan, cela est trivial.

Challenge 242, page 131: La faible accélération gravitationnelle de la Lune, $1,6 \text{ m/s}^2$, implique que des molécules de gaz aux températures courantes peuvent échapper à son attraction.

Challenge 243, page 132: Un flash lumineux est envoyé vers la Lune, où plusieurs réflecteurs ont été installés par les missions Lunokhod et Apollo. La précision de la mesure du temps que met un flash pour aller et revenir est suffisante pour évaluer la variation de la distance de la Lune. Pour plus d'informations, allez au défi 8.

Challenge ??, page ??: Les points de Lagrange L4 et L5 sont situés sur l'orbite, à 60° devant et derrière le corps qui gravite. Ils sont stables si le rapport entre la masse du corps central et celui du corps gravitant est suffisamment grand (supérieur à 24,9).

Challenge ??, page ??: Le point de Lagrange L3 est situé sur l'orbite, mais exactement de l'autre côté du corps central. Le point de Lagrange L1 est placé sur la ligne qui rejoint la planète au corps central, tandis que L2 se tient à l'extérieur de l'orbite, sur la même ligne. Si R est le rayon de l'orbite, la distance entre le corps qui gravite et le point L1 ou L2 est $\left(\frac{m}{3M}\right)^{1/3} R$, ce qui donne environ 4 fois la distance de la Lune pour le système Soleil-Terre. L1, L2 et L3 sont des points instables, mais des orbites stables existent effectivement autour d'eux. De nombreux satellites tirent profit de ces propriétés, y compris le célèbre satellite WMAP qui a mesuré les fluctuations du Big Bang, qui est situé au point L2.

Challenge 250, page 136: C'est un effet de résonance, de la même manière que la petite vibration d'une ficelle peut engendrer une grande oscillation de l'air et faire caisse de résonance dans une guitare.

Challenge ??, page ??: L'expression de la grandeur des marées, à savoir $2GM/d^3$, peut être réexprimée ainsi : $(8/3)\pi G\rho(R/d)^3$. Maintenant, R/d est approximativement identique pour le Soleil et pour la Lune, comme le montre chaque éclipse. Donc la densité ρ doit être beaucoup plus élevée pour la Lune.

Challenge 252, page 138: Le moment cinétique total de la Terre et de la Lune doit demeurer constant.

Challenge 451, page 241: Soit ils sont tombés sur des pentes inclinées de montagnes enneigées, soit ils sont tombés dans des arbres très hauts ou d'autres structures molles. Le record fut de plus de 7 km de chute libre sans dommages. Une affaire récente fit la une en 2007 et est contée dans www.bbc.co.uk/jersey/content/articles/2006/12/20/michael_holmes_fall_feature.shtml.



FIGURE 160 La célèbre « comète des vomissements », un KC-135, qui réalise un vol parabolique. (NASA)

Challenge ??, page ?? : Pour quelques milliers d'euros, vous pouvez ressentir la gravité zéro dans un vol parabolique, tel que celui indiqué dans la **Figure 160**. (De nombreuses « photographies » de vols paraboliques glanées sur Internet sont en réalité des images virtuelles. Qu'en est-il de celle-ci ?)

Challenge 258, page 143 : Le centre de masse d'un balai chute en suivant l'accélération habituelle, l'extrémité chute donc plus rapidement.

Challenge 259, page 143 : Utilisez simplement la conservation de l'énergie pour les deux masses, celle du sauteur et celle de la corde. Pour plus de détails, y compris la confrontation de la théorie aux mesures expérimentales, consultez N. DUBELAAR & R. BRANTJES, De valversnelling bij bungee-jumping, *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde* 69, pp. 316–318, octobre 2003.

Challenge 260, page 143 : Environ 1 tonne.

Challenge 261, page 144 : Environ 5 g.

Challenge 262, page 144 : Votre poids est approximativement constant, donc la Terre doit être ronde. Sur une Terre plate, le poids varierait d'un endroit à l'autre, en fonction de votre distance à la bordure.

Challenge 263, page 144 : Jamais personne n'a affirmé que le centre de masse est la même chose que le centre de gravité ! L'attraction de la Lune est négligeable à la surface de la Terre.

Challenge 265, page 144 : C'est la masse de la Terre. Retournez tout simplement la table sur sa tête.

Challenge ??, page ?? : Oui ! Considérez les formules des marées, et utilisez le fait que la Lune et le Soleil possèdent la même taille apparente dans le ciel.

Challenge 268, page 144 : La Lune sera éloignée d'environ 1,25 fois la distance actuelle. Le Soleil ralentira alors la fréquence de rotation du système Terre–Lune, cette fois à cause du frottement de marée beaucoup plus faible au niveau de la déformation du Soleil. Par conséquent, la Lune recouvrera des distances de plus en plus petites à la Terre. Néanmoins, d'ici là, le Soleil sera devenu une géante rouge, après avoir ingurgité à la fois la Terre et la Lune.

Challenge 270, page 145 : Comme Galilée l'a déterminé, pour une oscillation (d'une demi-période) le rapport est $\sqrt{2}/\pi$. (Regardez le défi 232.) Mais nous ne pouvons calculer de cette manière guère plus de deux décimales, peut-être trois, du nombre π .

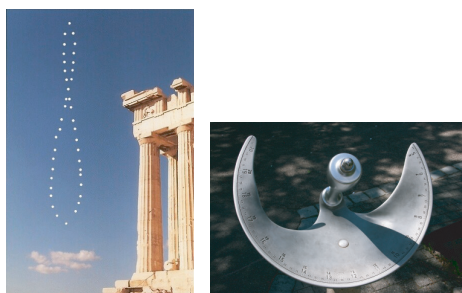


FIGURE 161 L'analemme photographié, à l'heure locale de midi, de Janvier à Décembre 2002, au Parthénon sur l'Acropole d'Athènes. (© Anthony Ayiomamitis)

Challenge 271, page 145: La conservation de la quantité de mouvement n'est pas un obstacle, étant donné que n'importe quelle raquette de tennis a le même effet sur une balle de tennis.

Challenge 272, page 145: En fait, dans l'espace des vitesses, les mouvements elliptique, parabolique et hyperbolique sont tous décrits par des cercles. Dans tous les cas, l'hodographe est un cercle.

Réf. 99

Challenge 273, page 145: Cette question est ancestrale (elle était déjà soulevée du temps de Newton) et profonde. Une raison est que les astres restent séparés par la rotation autour de la galaxie. L'autre est que les galaxies restent distantes par la quantité de mouvement qu'elles ont acquies lors du Big Bang. Sans ce dernier, toutes les étoiles se seraient effondrées les unes dans les autres. En ce sens, le Big Bang peut être déduit de l'attraction de la gravitation et du ciel immuable la nuit. Nous apprendrons plus tard que l'obscurité du ciel nocturne apporte une deuxième pièce à conviction à l'existence du Big Bang.

Challenge 274, page 145: À cause de la présence du plateau, la masse effective de la Terre est supérieure.

Challenge 275, page 145: L'alternative est claire dès que vous remarquez qu'il n'y a pas de section de l'orbite qui soit concave en direction du Soleil. Pouvez-vous montrer cela ?

Challenge 276, page 146: Il serait alors un trou noir : aucune lumière ne peut s'en échapper. Nous discutons en détail des trous noirs dans le chapitre sur la relativité générale.

Challenge 277, page 146: Une tige reliée à deux corps.

Challenge 280, page 146: En utilisant une hauteur maximale de saut de $h = 0,5 \text{ m}$ sur Terre et une densité estimée pour l'astéroïde de $\rho = 3 \text{ Mg/m}^3$, nous obtenons un rayon maximal de $R^2 = 3gh/4\pi G\rho \approx 703 \text{ m}$.

Challenge ??, page ??: La forme d'une analemme à l'heure locale de midi est montrée dans la Figure 161. L'extension verticale de l'analemme est due à l'obliquité de l'écliptique sur l'équateur (elle est de $23,45^\circ$), et l'extension horizontale est due à l'ellipticité de l'orbite autour du Soleil.

Challenge 281, page 148: Pour chaque paire d'éléments opposés de la coquille (dessinés en jaune), les deux attractions se compensent.

Challenge 282, page 148: Il n'existe aucun procédé applicable. Si les masses sur la coquille pouvaient se déplacer le long de la surface (de la même manière que les charges peuvent se mouvoir dans un métal) cela pourrait être possible, à condition qu'une masse suffisante soit disponible.

Challenge 283, page 149: La capture d'un corps fluide reste possible s'il est étiré par des forces de marée.

Challenge 284, page 149: Ce tunnel serait une ellipse allongée située dans le plan de l'équateur, s'étalant d'un point de l'équateur au point situé aux antipodes. Le temps nécessaire pour effec-

tuer une révolution ne changerait pas, comparé à une Terre non-rotative. Lisez A. J. SIMONSON, Falling down a hole through the Earth, *Mathematics Magazine* 77, pp. 171–188, juin 2004.

Challenge 286, page 149: Le centre de masse du Système solaire peut être éloigné du double du rayon du Soleil à partir de son centre, il peut donc être situé à l'extérieur du Soleil.

Challenge 287, page 150: *Primo*, au cours de la période estivale nordique, la Terre se déplace plus rapidement autour du Soleil que pendant la période hivernale nordique. *Secundo*, les orbites solaires peu profondes dans le ciel donnent des jours plus longs grâce à la lumière qui provient du Soleil lorsqu'il est situé sous l'horizon.

Challenge 288, page 150: Mis à part la visibilité de la Lune, aucun effet sur les êtres humains n'a jamais été décelé. Les effets gravitationnels – y compris les forces de marée – les effets électriques, magnétiques et les variations dans le rayonnement cosmique sont tous largement noyés par d'autres effets. En réalité, la gravité exercée par les camions qui circulent, les champs électromagnétiques des usines, les intempéries et les variations du cycle solaire ont des répercussions plus profondes que la Lune sur les êtres humains. L'ajustement du cycle menstruel avec la phase lunaire est un pur effet de l'imagination.

Challenge 289, page 150: Il était ardu de mesurer les distances. Nous observons sans problème qu'une planète se trouve devant le Soleil, mais il est difficile de vérifier si une planète est située derrière le Soleil.

Challenge 290, page 150: Consultez la référence mentionnée.

Challenge 291, page 150: C'est vrai.

Challenge 295, page 151: Jamais. La Lune montre toujours la même face à la Terre. La Terre change légèrement de position, à cause de l'ellipticité de l'orbite de la Lune. Évidemment, la Terre exhibe des phases.

Challenge ??, page ??: Oui nous le pourrions, et cela a été maintes et maintes fois imaginé, à commencer par Jules Verne. La vitesse nécessaire dépend de la direction du tir par rapport à la rotation de la Terre.

Challenge 297, page 151: Ce qui compte c'est la verticalité *locale*. Par rapport à celle-ci, la rivière s'écoule toujours en descendant.

Challenge 298, page 151: Il n'existe pas de tels corps, comme le démontrera le chapitre sur la relativité générale.

Challenge 300, page 154: Cette oscillation est une oscillation purement harmonique ou sinusoïdale, puisque la force de rappel augmente linéairement avec la distance au centre de la Terre. La période T pour une Terre homogène est $T = 2\pi\sqrt{R^3/GM} = 84$ min.

Challenge 301, page 154: La période est la même pour tous les tunnels de ce type et donc, en particulier, elle est identique car la période de 84 min est valide également pour le tunnel allant d'un pôle à l'autre. Lisez par exemple, R. H. ROMER, The answer is forty-two – many mechanics problems, only one answer, *Physics Teacher* 41, pp. 286–290, Mai 2003.

Challenge 302, page 154: Il n'y a pas de réponse simple : la vitesse dépend de la latitude et d'autres paramètres.

Challenge ??, page ??: La force centrifuge doit être égale à la force gravitationnelle. Notons d la densité linéaire constante et l la longueur inconnue. Nous avons alors $GMd \int_R^{R+l} dr/r^2 = \omega^2 d \int_R^{R+l} r dr$. Cela donne $GMd l / (R^2 + Rl) = (2Rl + l^2)\omega^2 d / 2$, entraînant $l = 0,14$ Gm.

Challenge ??, page ??: Les anneaux intérieurs doivent tourner plus vite que les anneaux extérieurs. Si ceux-ci étaient solides, ils se déchireraient. Mais ce raisonnement est correct uniquement si les anneaux sont situés en deçà d'une certaine limite, que nous appelons la *limite de Roche*. La

limite de Roche représente le rayon pour lequel la force gravitationnelle F_g contrebalance la force de marée F_m à la surface du satellite. Pour un satellite de masse m et de rayon r , gravitant autour d'une masse centrale M à une distance d , étudions les forces qui agissent sur une petite masse μ située sur sa surface. Nous obtenons la condition $Gm\mu/r^2 = 2GM\mu r/d^3$. Avec un peu de calcul algébrique, nous obtenons la limite de Roche

$$d_{\text{Roche}} = R \left(2 \frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{1/3}. \quad (127)$$

En dessous de cette distance à une masse centrale M , les satellites fluides ne peuvent subsister. Le calcul exposé ici n'est qu'une approximation, la véritable limite de Roche est égale à environ deux fois cette valeur.

Challenge 304, page 157: En réalité les muscles maintiennent un objet au-dessus du sol en le soulevant et en le relâchant continuellement : cela requiert de l'énergie et du travail.

Challenge 305, page 157: La consommation électrique d'un escalier roulant qui monte s'accroît en vérité lorsque la personne située dessus marche vers le haut. Mais de combien ?

Challenge 306, page 157: La connaissance c'est le pouvoir, donc la puissance. Le temps c'est de l'argent. Maintenant, la puissance est définie comme étant le travail effectué par unité de temps. En insérant les équations précédentes et en effectuant la transformation appropriée nous obtenons

$$\text{argent} = \frac{\text{travail}}{\text{connaissance}}, \quad (128)$$

ce qui démontre que moins vous savez, plus vous gagnez de l'argent. Cela explique pourquoi les scientifiques ont des salaires bas.

Challenge 309, page 158: L'absence de frottement statique empêcherait le fait que le fluide environnant s'accroche au corps, ce que nous dénommons la couche limite n'existerait plus. Les ailes n'auraient alors plus aucun effet.

Challenge 310, page 161: Vrai ?

Challenge 314, page 161: En partant de $dv/dt = g - v^2(1/2c_w A \rho/m)$ et en utilisant la notation $c = 1/2c_w A \rho$, nous pouvons résoudre l'équation pour $v(t)$ en plaçant tous les termes qui contiennent la variable v d'un côté, tous les termes en t de l'autre, et en intégrant des deux côtés de l'équation. Nous obtenons $v(t) = \sqrt{gm/c} \tanh \sqrt{cg/m} t$.

Challenge 316, page 163: L'espace des phases possède $3N$ coordonnées de position et $3N$ coordonnées de quantité de mouvement.

Page ?? **Challenge 317**, page 163: Le moulin à lumière en représente un exemple.

Challenge 318, page 163: La charge électrique.

Challenge 319, page 164: Si vous avez trouvé des raisons pour répondre par l'affirmative, quelque chose vous a échappé. Approfondissez vos arguments et vérifiez si les concepts que vous utilisez s'appliquent à l'Univers. Définissez soigneusement, également, ce que vous entendez par « Univers ».

Challenge 321, page 165: L'existence d'un système qui exhibe un mouvement d'énergie ou de matière plus rapide que la lumière entraînerait que, pour de tels systèmes, il existe des observateurs pour lesquels l'ordre entre la cause et l'effet est inversé. Un diagramme d'espace-temps (et un peu d'exercice tiré de la section sur la relativité restreinte) montre cela.

Challenge 322, page 166: Si la reproductibilité n'existait pas, nous aurions des difficultés à vérifier les observations. La lecture d'une horloge est également une observation. La correspondance entre la reproductibilité et le temps deviendra cruciale dans la dernière partie de notre aventure.

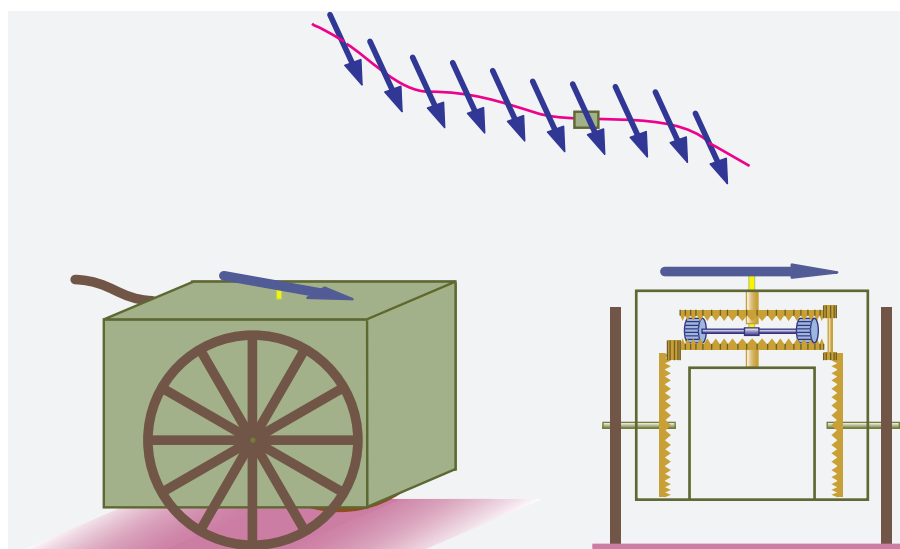


FIGURE 162 Le mécanisme situé à l'intérieur du chariot qui indique le sud.

Challenge 323, page 167: Même si les surprises étaient rares, chacune d'elle ferait qu'il est impossible de définir le temps juste avant et juste après elle.

Challenge 326, page 167: Bien sûr, les lois morales sont des condensés de ce que les autres pensent ou feront à propos des agissements personnels.

Challenge 327, page 168: L'espace-temps est défini en faisant appel à la matière, la matière est définie en faisant usage de l'espace-temps.

Challenge 328, page 168: En réalité la physique a été fondée sur une définition récursive pendant des centaines d'années. Il est donc possible malgré tout de bâtir une science exacte sur des fondements instables. Néanmoins, l'élimination de cette boucle est un objectif important.

Challenge 568, page 330: Par exemple, la vitesse à l'intérieur des matériaux est diminuée, mais entre les atomes, la lumière voyage toujours à la vitesse qu'elle a dans le vide.

Challenge 331, page 170: La Figure 162 révèle la reconstitution la plus vraisemblable d'un chariot qui pointe vers le sud.

Challenge 332, page 171: L'eau se redresse le long des côtés de l'œuf en rotation. La manière la plus rapide de vider une bouteille d'eau consiste à mettre l'eau en rotation tout en la déversant.

Challenge 333, page 171: La bonne réponse est celle où la cheminée tombe comme un V, et non pas comme un V inversé. Regardez le défi 258 sur les balais qui chutent en guise d'inspiration sur la manière de déduire la solution. Il s'avère que la cheminée se brise (si elle n'est pas scellée à sa base) à une hauteur comprise dans la moitié ou les deux tiers de la hauteur totale, en fonction de l'angle auquel cette chute se produit. Pour une solution exhaustive à ce problème, lisez l'excellent article de G. VARESCHI & K. KAMIYA, Toy models for the falling chimney, *American Journal of Physics* 71, pp. 1025–1031, 2003.

Challenge 341, page 180: En une dimension, l'expression $F = ma$ peut être réécrite $-dV/dx = m d^2x/dt^2$. Et cela peut se réexprimer ainsi $d(-V)/dx = d/dt[d/dx(\frac{1}{2}m\dot{x}^2)] = 0$. Nous pouvons extrapoler ce résultat en $\partial/\partial x(\frac{1}{2}m\dot{x}^2 - V(x)) - d/dt[\partial/\partial \dot{x}(\frac{1}{2}m\dot{x}^2 - V(x))] = 0$, ce qui représente l'équation de Lagrange appliquée à cette situation.

Challenge 343, page 181: Ne vous affligez pas. Jusqu'à présent, personne n'a été capable d'imaginer un univers (ce qui n'est pas nécessairement la même chose qu'un « monde ») différent de

celui que nous connaissons. Jusque là, ces tentatives ont toujours abouti à des incohérences logiques.

Challenge 345, page 182: Les deux sont équivalents puisque les équations du mouvement découlent du principe de moindre action et, parallèlement, le principe de moindre action dérive des équations du mouvement.

Challenge 347, page 183: Pour la gravitation, les trois phénomènes existent : rotation dans les galaxies, pression dans les planètes et pression de dégénérescence de Pauli dans les astres. Contrairement à l'interaction forte, le principe de Pauli agit dans les noyaux et dans les étoiles à neutron. Dans ces dernières il est probable que la rotation et la pression complètent également la pression de Pauli. Mais pour l'interaction électromagnétique il n'y a pas de composés autres que notre matière de la vie courante, laquelle est organisée uniquement par le principe de Pauli.

Challenge 349, page 186: Le moment cinétique est la variation par rapport à l'angle, tandis que l'énergie cinétique de rotation est, une nouvelle fois, la variation par rapport au temps, comme toute forme d'énergie.

Challenge 350, page 186: Pas de cette manière. Un minuscule changement peut avoir un effet gigantesque, comme l'indique chaque interrupteur. Mais un minuscule changement dans le cerveau peut être transmis vers l'extérieur, et cela se produira approximativement avec une dépendance en $1/r^2$. Cela rend les effets si imperceptibles, que même avec les interrupteurs les plus sensibles – lesquels de toute façon n'existent pas pour la pensée – aucun effet ne peut être accompli.

Challenge 354, page 188: La relation est

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{\sin \alpha_1}{\alpha_2} . \quad (129)$$

Le rapport spécifique des vitesses entre l'air (ou le vide, ce qui est à peu près la même chose) et un matériau donne l'*indice de réfraction* n :

$$n = \frac{c_1}{c_0} = \frac{\sin \alpha_1}{\alpha_0} . \quad (130)$$

Challenge 355, page 188: Les gaz sont essentiellement constitués de vide. Leur indice de réfraction est proche de un.

Challenge 356, page 188: Les diamants étincellent aussi parce qu'ils agissent comme les prismes : des couleurs différentes possèdent des indices de réfraction distincts. Donc leur éclat est également dû à leur dispersion, par conséquent il est un mélange de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.

Challenge 357, page 188: Le principe sous-jacent à la croissance des arbres est simplement celui du minimum de l'énergie potentielle, puisque l'énergie cinétique est négligeable. La croissance des vaisseaux sanguins dans le corps des animaux est minimisée pour l'énergie de transport : c'est encore une fois un principe minimal. La réfraction de la lumière est la trajectoire du temps le plus court, donc elle minimise aussi le changement, si nous nous représentons la lumière comme des entités mobiles qui se meuvent, sans que l'on fasse appel à l'énergie potentielle.

Challenge 358, page 188: La relativité restreinte requiert l'existence d'une mesure invariante de l'action. Elle est présentée plus loin dans cette excursion.

Challenge 359, page 188: L'Univers n'est pas un système physique. Nous discuterons en détail de ce problème plus tard.

Challenge ??, page ??: Utilisez soit la substitution $u = \tan t/2$ ou employez l'astuce historique suivante $\sec \varphi = \frac{1}{2} \left(\frac{\cos \varphi}{1 + \sin \varphi} + \frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \right)$.

Challenge 360, page 189: Nous parlons à une personne parce que nous savons que quelqu'un peut nous comprendre. Donc nous supposons d'une certaine manière qu'elle perçoit les mêmes choses que nous. Cela signifie que l'observation est partiellement indépendante du point de vue. Donc la nature est symétrique.

Challenge 361, page 190: La mémoire fonctionne parce que nous savons reconnaître des situations. Cela est possible car des situations demeurent identiques au cours du temps. La mémoire n'aurait jamais évolué sans cette reproductibilité.

Challenge 362, page 191: Les différences de goût ne sont pas fondamentales, mais dues à des points de vue différents et – principalement – aux expériences disparates des observateurs. La même chose reste valable pour les sentiments et les jugements, comme le confirmera n'importe quel psychologue.

Challenge 363, page 193: Les nombres entiers sous l'addition forment un groupe. L'ensemble des couleurs de peinture sur la palette d'un peintre, doté de l'opération de mélange, forme-t-il un groupe ?

Challenge 364, page 193: Il n'y a qu'une seule opération de symétrie : une rotation de π environ autour du point central. C'est la raison pour laquelle on appellera plus tard le groupe D_4 groupe de symétrie approximatif.

Challenge 370, page 197: Un scalaire représente la grandeur de tout vecteur, donc la grandeur du vecteur-vitesse, définie comme étant $v = |\mathbf{v}|$, est un scalaire, alors que le vecteur vitesse $\mathbf{v}$ ne l'est pas. Ainsi la longueur d'un vecteur (ou pseudo-vecteur) quelconque, tel que la force, l'accélération, le champ magnétique ou le champ électrique, est un scalaire, tandis que le vecteur lui-même n'est pas un scalaire.

Challenge 373, page 198: La distribution de charge d'un corps étendu peut être vue comme la somme d'une charge, d'une charge dipolaire, d'une charge quadrupolaire, d'une charge octupolaire, etc. Le quadrupôle est décrit par un tenseur.

Faites le rapprochement : l'inertie, qui s'oppose au mouvement, d'un corps étendu peut être vue comme la somme d'une masse, d'une masse dipolaire, d'une masse quadrupolaire, d'une masse octupolaire, etc. La masse quadrupolaire est décrite par le moment d'inertie.

Challenge 377, page 201: La charge conservée pour l'invariance par rotation est le moment cinétique.

Challenge 380, page 205: Une oscillation possède une période dans le temps, c'est-à-dire une symétrie de translation discrète du temps. Une onde possède à la fois une symétrie de translation discrète du temps et de translation discrète de l'espace.

Challenge 381, page 205: Le renversement du mouvement est une symétrie pour tout système fermé. En dépit des observations de la vie courante, des formulations de la thermodynamique et de la conviction de plusieurs physiciens célèbres (qui forment cependant une minorité), tous les systèmes idéalement fermés sont réversibles.

Challenge 390, page 211: L'énergie potentielle provient de la « courbure » du milieu : un simple déplacement ne produit aucune courbure et donc ne contient pas d'énergie. Seul le gradient renferme la notion de courbure.

Challenge 392, page 211: La phase change de π .

Challenge 394, page 212: Les ondes peuvent être amorties jusqu'à des intensités extrêmement faibles. Si cela n'est pas possible, alors l'objet de l'observation n'est pas une onde.

Challenge 395, page 213: La manière d'observer la diffraction et l'interférence avec vos mains nues est explicitée à la page ??.

Challenge 401, page 220: Si la distance à l'amplificateur est de quelques mètres, et la distance

à l'orchestre de 20 m, comme pour ceux qui peuvent se le permettre, l'auditeur situé chez lui l'entend le premier.

Challenge 403, page 220: Une ellipse (comme pour les planètes autour du Soleil) avec le point d'attache pour centre (contrairement aux planètes, où le Soleil est situé à l'un des foyers de l'ellipse).

Challenge 406, page 221: La détonation du tonnerre ou le brouhaha de la circulation automobile voit sa fréquence se réduire de plus en plus avec l'augmentation de la distance.

Challenge 408, page 221: Ni l'une ni l'autre, ces deux possibilités vont à l'encontre des propriétés de l'eau : dans les vagues de surface, les molécules d'eau se déplacent en cercles.

Challenge 409, page 222: Les nageurs sont capables de parcourir une distance de 100 m en 48 s, soit légèrement mieux que 2 m/s. Avec une longueur corporelle d'environ 1,9 m, la vitesse critique est 1,7 m/s. Cela explique pourquoi pour une courte distance de natation, l'entraînement est important. Pour des distances plus longues la technique joue un rôle prépondérant, car la vitesse critique n'a pas encore été atteinte. Cette formule prédit également que sur une distance de 1 500 m, un nageur de 2 m de hauteur possède un avantage potentiel de plus de 45 s sur un autre d'une hauteur corporelle de 1,8 m. De surcroît, les nageurs plus hauts possèdent un privilège supplémentaire : ils nagent sur des distances plus courtes (pourquoi ?). On prévoit donc que les champions de la nage de longue distance deviendront de plus en plus grands au cours du temps. C'est déplorable pour un sport qui a pu jusqu'à présent se vanter d'avoir eu des champions de toutes les tailles et carrures corporelles, contrairement à de nombreux autres sports.

Challenge 411, page 223: Pour atténuer les réflexions sonores et donc les effets de résonance. Ils diffusent efficacement les fronts d'ondes qui s'approchent.

Challenge 413, page 223: Les vagues dans une rivière ne sont jamais elliptiques, elles restent circulaires.

Challenge 414, page 223: La lentille est un coussin de matériau qui est « transparent » au son. La vitesse du son est plus rapide dans ce coussin que dans l'air, contrairement à une lentille optique, où la vitesse de la lumière est inférieure dans le verre. La forme est donc différente : le coussin doit ressembler à une lentille biconcave.

Challenge 416, page 223: Le Soleil se trouve toujours à une position différente de celle où nous le voyons. Quel en est l'écart, mesuré en diamètres angulaires du Soleil ?

Challenge 417, page 223: Le cube $3 \times 3 \times 3$ possède un système rigide de trois axes perpendiculaires, sur lequel un carré peut tourner sur chacune des 6 extrémités. Les autres carrés sont fixés à des pièces se déplaçant autour de ces axes. Le cube $4 \times 4 \times 4$ est différent cependant, vérifiez-le. Jusqu'ici, la limite sur le nombre de segments semble être de 6. Un cube $7 \times 7 \times 7$ nécessite des segments de forme variable. Mais nous ne trouvons pas dans les magasins de cubes supérieurs à $5 \times 5 \times 5$. En contrepartie, le site Web www.oinkleburger.com/Cube/applet permet de jouer avec des cubes virtuels pouvant aller jusqu'à $100 \times 100 \times 100$ voire plus.

Challenge 419, page 224: Un tour d'horizon des systèmes en cours de test en ce moment peut être lu dans K. - U. GRAW, Energiereservoir Ozean, *Physik in unserer Zeit* 33, pp. 82–88, février 2002. Lisez aussi Oceans of electricity – new technologies convert the motion of waves into watts, *Science News* 159, pp. 234–236, avril 2001.

Challenge 420, page 225: Dans la vie quotidienne, cette supposition est généralement justifiée, puisque chaque point peut être approximativement représenté par un atome, et les atomes peuvent être pistés. Cette hypothèse est discutable dans les situations telle que la turbulence, où tous les points ne peuvent être assimilés à des atomes, et par dessus tout, dans le cas du mouvement du vide lui-même. Autrement dit, pour les ondes gravitationnelles, et en particulier pour la théorie quantique des ondes gravitationnelles, cette supposition n'est pas justifiée.

Challenge 422, page 227: Il y en a plein. L'une d'elles serait que la transmission et donc le coefficient de réflexion pour des ondes serait à peu près indépendant de la longueur d'onde.

Challenge 423, page 228: Une goutte d'un diamètre de 3 mm recouvrirait une surface de $7,1 \text{ m}^2$ d'un film de 2 nm.

Challenge 426, page 231: La hauteur critique d'une colonne de matière est donnée par $h_{\text{crit}}^4 = \frac{\beta}{4\pi g} m \frac{E}{\rho^2}$, où $\beta \approx 1,9$ est la constante déterminée par le calcul lorsqu'une colonne cède sous son propre poids.

Challenge 429, page 233: Une possibilité consiste à décrire les particules que nous voyons comme des objets étendus, donc comme des nuages. Une autre en est donnée dans la dernière partie de ce texte.

Challenge 431, page 237: Cette constante k découle de la conservation de l'énergie et de celle de la masse : $k = \sqrt{2/(\rho(A_1^2/A_2^2 - 1))}$. Les sections efficaces sont notées A , l'indice 1 se réfère à n'importe quel point éloigné du rétrécissement, et l'indice 2 au rétrécissement.

Challenge ??, page ??: Des personnes constatent que dans certaines situations le frottement est trop important, et commencent à aspirer par une extrémité du tube pour faire en sorte que l'écoulement s'initie, ce faisant elles peuvent inhaler ou avaler de l'essence, ce qui est toxique.

Challenge 433, page 238: Jeter la pierre fait baisser le niveau, jeter l'eau ou le morceau de bois le laisse inchangé.

Challenge 434, page 238: Le navire s'élève plus haut vers le ciel. (Pourquoi ?)

Challenge 467, page 244: Aucun fil métallique ne permet de construire un câble aussi long. Seule l'idée des nanotubes de carbone a fait ressurgir cet espoir, certains rêvent de voir un matériau de câble fondé sur eux, plus solide que n'importe quel matériau connu jusqu'à présent. Néanmoins, on ne connaît pas encore de matériau ayant cette propriété. Ce système s'expose à de nombreux dangers, tels que les défauts de fabrication, les éclairs, les tempêtes, les météorites et les débris spatiaux. Ils conduiraient tous à la rupture des câbles – si de tels câbles pouvaient exister. Mais le risque le plus important serait le manque de financement pour les construire.

Challenge 438, page 238: La pompe fonctionne en succion, mais la pression de l'air autorise une différence de hauteur de 10 m seulement pour de tels systèmes.

Challenge 439, page 238: Cet argument est compréhensible uniquement lorsque nous nous rappelons que « le double de la quantité » signifie « deux fois plus de molécules ».

Challenge 440, page 239: L'alcool est congelé et le chocolat est placé autour de lui.

Challenge 441, page 239: L'auteur avait suggéré dans une édition plus ancienne qu'une machine pourrait être fondée sur des dispositifs tels que ceux qui lancent les pigeons d'argile utilisés dans les disciplines sportives de tir et de ball trap. Depuis, Lydéric Bocquet et Christophe Clanet ont construit une telle machine, mais en utilisant une conception différente, un schéma peut être consulté sur le site Web lpmcn.univ-lyon1.fr/%7Elbocquet.

Challenge 442, page 239: La troisième composante de l'air est l'argon, un gaz noble, qui en constitue environ 1 %. Le reste est composé de dioxyde de carbone, de vapeur d'eau et d'autres gaz. Ces pourcentages sont-ils des pourcentages en volume ou en poids ?

Challenge ??, page ??: La plèvre située entre les poumons et le thorax est constamment en dessous de la pression atmosphérique. Un trou dans celle-ci, formé par exemple par une balle de fusil, une épée ou lors d'un accident, conduit à un affaissement des poumons – ce que l'on dénomme le *pneumothorax* – et provoque souvent la mort. Des opérations à poitrine ouverte sur des patients sont devenues possibles, seulement depuis que le chirurgien Ferdinand Sauerbruch comprit en 1904 comment faire face à ce problème. De nos jours, les chirurgiens maintiennent les poumons sous une pression inférieure à la pression atmosphérique jusqu'à ce que tout soit refermé.

Challenge 443, page 240: Elle tire profit de la pression d'air engendrée par l'eau qui s'écoule vers le bas.

Challenge 444, page 240: Oui. L'ampoule ne résistera pas à deux véhicules identiques, cependant.

Challenge ??, page ??: Le radon est environ 8 fois plus lourd que l'air, c'est le gaz le plus dense qui soit connu. En comparaison, Ni(CO) est 6 fois plus lourd que l'air, SiCl₄ 4 fois. La vapeur de mercure (qui est évidemment aussi un gaz) est 7 fois plus lourde que l'air. En comparaison, la vapeur de brome est 5,5 fois plus lourde que l'air.

Challenge 447, page 240: Aucune.

Challenge 448, page 240: Il passa les cordes dans la cabine en les faisant traverser du mercure liquide.

Challenge 449, page 240: La pression détruit les poumons.

Challenge ??, page ??: Il n'existe aucune solution officielle concernant ces questions. Contrôlez simplement vos hypothèses et vos calculs, soigneusement. Internet regorge d'estimations de ce type.

Challenge 452, page 241: La pression sanguine dans les pieds d'un homme debout est d'environ 27 kPa, le double de la pression au niveau du cœur.

Challenge 453, page 241: Le calcul donne $N = J/j = 0,0001 \text{ m}^3/\text{s} / (7 \mu\text{m}^2 \cdot 0,0005 \text{ m/s})$, ou environ $6 \cdot 10^9$. En réalité, ce nombre est beaucoup plus important, puisque la plupart des capillaires sont fermés à un instant donné. Le rougissement du visage montre ce qui se passe lorsque tous les petits vaisseaux sanguins sont ouverts en même temps.

Challenge 454, page 241: Le savon s'écoule vers le bas de la bulle, la rendant plus épaisse à sa base et plus fine à son sommet, jusqu'à ce qu'elle éclate.

Challenge 469, page 244: Un tremblement de terre d'amplitude moyenne serait engendré.

Challenge 470, page 245: Une stalactite contient un mince canal le long de son axe, à travers duquel l'eau s'écoule, tandis qu'une stalagmite est entièrement pleine.

Challenge 471, page 245: Environ une partie pour mille.

Challenge 456, page 241: Pour que ceci puisse se produire, il faudrait que le frottement puisse exister à l'échelle microscopique et que l'énergie puisse disparaître.

Challenge 457, page 241: L'entonnoir le plus long se vide avant celui qui est plus court. (Si vous ne croyez pas en cela, essayez-le.) Dans le cas où la quantité d'eau qui se trouve dans le tube de l'entonnoir peut être négligée, nous pouvons utiliser la conservation de l'énergie pour le mouvement fluide. Cela fait apparaître la célèbre équation de Bernoulli $p/\rho + gh + v^2/2 = \text{const}$, où p représente la pression, ρ la densité de l'eau et g vaut $9,81 \text{ m/s}^2$. Par conséquent, la vitesse v est supérieure pour des longueurs h plus grandes du tube de l'entonnoir : l'entonnoir le plus long se vide le premier.

Mais cela est étonnant : la formule donne une simple relation de chute libre, puisque la pression de l'air est la même au-dessus et en dessous et s'annule dans le calcul. L'expression de la vitesse est donc indépendante du fait qu'un tube soit présent ou non. La véritable explication pour le vidage plus prompt de ce tube est donc que sa présence oblige qu'il y ait plus d'eau qui s'écoule qu'en son absence. Sans tube, le diamètre de l'écoulement d'eau *diminue* pendant la chute. Avec un tube, il demeure *constant*. Cette différence conduit à une évacuation plus rapide.

D'autre part, vous pouvez porter votre attention sur la valeur de la pression de l'eau à l'intérieur de l'entonnoir. Vous découvrirez que la pression de l'eau est inférieure au début du tube d'évacuation. Cette pression interne de l'eau est plus basse pour des tubes plus longs et aspire l'eau plus rapidement dans ces situations.

Challenge 458, page 242: Les yeux des poissons sont positionnés de telle manière que la diminution de pression due à l'écoulement soit compensée par l'augmentation de pression de leur emplacement. Par ailleurs, le cœur est positionné de telle manière qu'il profite de la pression moindre.

Challenge 460, page 242: Le verre se fracasse, le verre est élastique, le verre témoigne de la présence d'ondes sonores transversales, le verre ne s'écoule pas (contrairement à ce que de nombreux ouvrages profèrent), pas même à l'échelle séculaire, les molécules du verre sont figées dans l'espace, le verre est cristallin aux distances faibles, une vitre en verre soutenue à ses extrémités ne se courbe pas en son milieu.

Challenge 461, page 242: Cette prouesse a été accomplie pour des montagnes plus petites, tel que le Mont Blanc dans les Alpes. Aujourd'hui toutefois, il n'existe aucune manière de planer en toute sécurité aux altitudes culminantes des montagnes de l'Himalaya.

Challenge 463, page 242: Pressez le mouchoir dans le fond du verre, et abaissez celui-ci dans l'eau en présentant d'abord son ouverture, tout en maintenant cette ouverture horizontale. Cette méthode est également employée pour faire descendre des individus sous la mer.

Challenge ??, page ??: Si vous soufflez dans une bouteille contenant une balle en papier, celle-ci volera vers vous. Le fait de souffler dans un entonnoir laissera irrémédiablement la balle de ping-pong à sa place, et plus vous soufflez fort plus elle se maintient. Le fait de souffler à travers un entonnoir en direction d'une chandelle fera incliner sa flamme dans votre direction.

Challenge 472, page 245: Bien que le noyau en fer de la Terre se soit formé de la manière décrite, en collectant le fer issu des astéroïdes qui se sont écrasés puis qui ont sombré vers le centre de la Terre, ce processus ne fonctionnera pas aujourd'hui : dans sa jeunesse, la Terre était beaucoup plus liquide que de nos jours. Il est fort probable que le fer ne coulera pas. De plus, nous ne connaissons aucun procédé permettant de concevoir la sonde de mesure qui pourrait envoyer des ondes sonores assez puissantes pour cette entreprise. La résistance due à la température est également un problème, mais il pourrait être levé.

Challenge 474, page 247: Les atomes ne sont pas infiniment durs, comme le montre la théorie quantique. Ils sont davantage assimilables à des nuages déformables.

Challenge 476, page 253: Dans 5 milliards d'années, la situation actuelle cessera, et le Soleil deviendra une géante rouge. Mais après cela, il continuera de brûler pendant une période encore plus longue.

Challenge 480, page 257: Nous découvrirons plus tard que l'Univers n'est pas un système physique, donc le concept d'entropie ne peut s'y appliquer. Ainsi l'Univers n'est ni isolé ni fermé.

Challenge 483, page 258: La réponse dépend de la taille des ballons, puisque la pression n'est pas une fonction monotone de la taille. Si le ballon le plus petit n'est pas trop petit, celui-ci gagne.

Challenge 485, page 259: Mesurez l'aire de contact entre les pneus et la route (pour tous les quatre) et multipliez alors par 200 kPa, la pression habituelle d'un pneu. Vous obtenez le poids du véhicule.

Challenge 489, page 261: Si la moyenne du carré du déplacement est proportionnelle au temps, la matière est constituée de particules élémentaires. Ceci fut confirmé par les expériences de Jean Perrin. L'étape suivante consiste à déduire le nombre de ces particules à partir de la constante de proportionnalité. Cette constante, définie par $\langle d^2 \rangle = 4Dt$, est appelée la constante de diffusion (le facteur 4 est valide pour un mouvement aléatoire en deux dimensions). Cette constante de diffusion peut être déterminée en observant le mouvement d'une particule au microscope.

Étudions une particule brownienne de rayon a . En deux dimensions, son déplacement au carré est donné par

$$\langle d^2 \rangle = \frac{4kT}{\mu} t, \quad (131)$$

où k représente la constante de Boltzmann et T la température. Cette relation se retrouve en analysant le mouvement d'une particule ayant une force de trainée $-\mu v$ et qui est soumise à des collisions aléatoires. Le coefficient de trainée linéaire μ d'une sphère de rayon a est donné par

$$\mu = 6\pi\eta a. \quad (132)$$

Autrement dit, nous avons

$$k = \frac{6\pi\eta a}{4T} \frac{\langle d^2 \rangle}{t}. \quad (133)$$

Toutes les quantités situées à droite peuvent être mesurées, permettant ainsi de déterminer la constante de Boltzmann k . Puisque la relation du gaz parfait montre que la constante du gaz parfait R est reliée à la constante de Boltzmann par $R = N_A k$, le nombre d'Avogadro N_A , qui donne le nombre de molécules dans une mole, est également déterminé de cette manière.

Challenge 496, page 268: Oui, cet effet est facilement perceptible.

Challenge 498, page 269: L'air chaud est moins dense et cherche donc à s'élever.

Challenge 499, page 269: Gardez le papier toujours humide.

Challenge 501, page 269: L'air doit être déshumidifié.

Challenge 502, page 269: De manière générale, il est impossible de dessiner une droite passant par trois points. Puisque le zéro absolu et le point triple de l'eau ont leurs grandeurs fixées, on peut parier qu'à coup sûr le point d'ébullition ne vaudra pas précisément 100°C.

Challenge 503, page 269: Non, car une molécule d'eau est plus lourde que cette marge. Cependant, si l'on considère de l'eau contenant des impuretés, c'est possible. Qu'advient-il si le quantum d'action est pris en considération ?

Challenge 504, page 270: Le danger ne provient pas de la quantité d'énergie, mais est dû à la durée à laquelle elle devient disponible.

Challenge 505, page 270: Il y a plein de solutions sur Internet.

Challenge 507, page 271: Uniquement si c'est un système isolé. L'Univers est-il un système fermé ? Est-ce un système ? Nous discuterons de cela dans l'ultime partie de l'ascension montagnaise.

Challenge 510, page 271: Pour des animaux si petits la température corporelle deviendrait trop faible. Ils ne pourraient pas s'alimenter suffisamment rapidement pour obtenir l'énergie nécessaire afin de se réchauffer.

Challenge 519, page 272: Elle est d'environ 10^{-9} fois celle de la Terre.

Challenge 521, page 273: L'épaisseur des sillons dans le cerveau, les bulles dans les poumons, la densité des vaisseaux sanguins et la taille des cellules biologiques.

Challenge 522, page 273: La vapeur de mercure qui surplombe le liquide devient saturée.

Challenge 523, page 273: Un projet dédié de la NASA a étudié cette question. La Figure 163 donne un exemple de comparaison. Vous pouvez trouver plus de détails sur leur site Web.

Challenge 524, page 273: Les dangers sont dus aux orages et les risques financiers sont trop importants.

Challenge 525, page 274: Le tourbillon à l'intérieur du tube est froid près de son axe et chaud dans les régions éloignées de l'axe. Par le truchement de la membrane située au milieu du tube (indiquée dans la Figure 139 à la page 273) l'air issu de la région proche de l'axe est envoyé à une extrémité et l'air provenant de la région extérieure, à l'autre extrémité. Le réchauffement de la zone extérieure provient du travail que l'air qui tourne à l'intérieur a dû effectuer sur l'air extérieur pour obtenir une rotation qui consomme du moment cinétique. Pour une explication

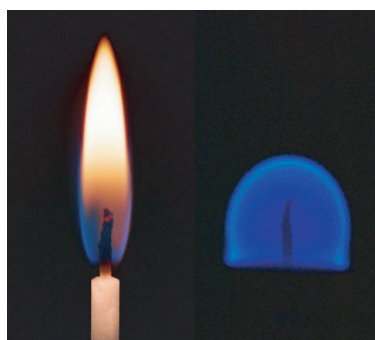


FIGURE 163 Une bougie sur Terre et une en microgravité. (NASA)

détaillée, compulsez le magnifique livre de MARK P. SILVERMAN, *And Yet it Moves : Strange Systems and Subtle Questions in Physics*, Cambridge University Press, 1993, p. 221.

Challenge 526, page 274: Le blanc d'œuf durcit à 70°C, le jaune d'œuf de 65 à 68°C. Cuisinez un œuf à cette dernière température, et l'exploit devient possible.

Challenge ??, page ??: Dans le cas de l'eau, après avoir effectué plusieurs tours, l'encre est mélangée, et le fait de tourner en sens inverse accroît le mélange. Dans le cas de la glycérine, le fait d'effectuer quelques tours *semble* mélanger l'encre, et le fait de tourner en sens inverse annule ce mélange.

Challenge ??, page ??: Les températures négatives représentent un artifice conceptuel définissable uniquement pour les systèmes ayant quelques états discrets. Ce ne sont pas de véritables températures, parce qu'elles ne décrivent pas des états d'équilibre, et en réalité ne s'appliquent jamais aux systèmes constitués d'un continuum d'états.

Challenge 530, page 275: Cela est également vrai pour la forme des corps humains, le contrôle par le cerveau du mouvement de l'homme, la croissance des fleurs, les vagues de la mer, la formation des nuages, les processus sous-jacents aux éruptions volcaniques, etc.

Challenge 535, page 280: Il y a beaucoup plus de papillons que de tornades. De surcroît, la croyance dans l'effet papillon masque totalement un aspect de la nature qui est essentiel pour l'auto-organisation : le frottement et la dissipation. L'effet papillon, en faisant la supposition qu'il puisse exister, exige que la dissipation soit négligée. Il n'existe aucun fondement expérimental pour cet effet, puisqu'il n'a jamais été observé.

Challenge 545, page 286: Ces trois déclarations sont toutes des balivernes. Un coefficient de traînée implique que la surface d'exposition de la voiture soit connue avec la même précision. C'est réellement extrêmement difficile à mesurer et à maintenir à une valeur constante. En fait, la valeur de 0,375 pour la Ford Escort était une absurdité, comme l'ont montré de nombreuses autres mesures. La consommation de carburant est encore plus ridicule, puisqu'elle implique que les volumes de carburant et les distances peuvent être mesurés avec la même précision. Les sondages sont collectés en téléphonant à 2 000 personnes au maximum, à cause des difficultés pour sélectionner le bon échantillon représentatif, cela donne une précision de 3 % au plus.

Challenge 546, page 286: Non. La nature ne permet pas d'avoir plus de 20 chiffres de précision environ, comme nous le découvrirons plus tard dans notre promenade. Ce n'est pas suffisant pour un livre ordinaire. La question de savoir si un tel nombre peut représenter une partie de son propre livre disparaît donc.

Challenge 548, page 288: Chaque mesure est une comparaison avec un étalon de référence, chaque comparaison requiert de la lumière ou un certain autre champ électromagnétique. Cela est également vrai pour les mesures de durées.

Challenge 549, page 288: Chaque mesure de masse est une comparaison avec un étalon standard, chaque comparaison requiert de la lumière ou un certain autre champ électromagnétique.

Challenge 550, page 288: Les mesures angulaires ont les mêmes propriétés que les mesures de longueur ou de durée.

Challenge 554, page 305: Les limites de Planck peuvent être dépassées pour des observables étendues pour lesquelles des systèmes à nombreuses particules peuvent dépasser les limites d'une particule unique, comme la masse, la quantité de mouvement, l'énergie ou la résistance électrique.

Challenge 558, page 310: N'oubliez pas la dilatation relativiste du temps.

Challenge 559, page 310: Environ 10 μg .

Challenge 560, page 310: Puisque la température du point triple de l'eau est fixée, la température du point d'ébullition est également figée. Historiquement, la valeur du point triple n'a pas été convenablement choisie.

Challenge 561, page 311: Il est probable que la quantité ayant la plus grande variation soit la masse, où un préfixe pour $1 \text{ eV}/c^2$ serait utile, de même que pour la masse totale présente dans l'Univers, qui est environ 10^{90} fois plus grande.

Challenge 562, page 312: La formule avec $n - 1$ est un choix plus convenable. Pourquoi ?

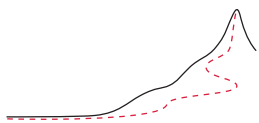
Challenge 565, page 315: Non, seulement les propriétés des parties de l'Univers. L'Univers lui-même ne possède aucune propriété, comme indiqué à la page ??.

Challenge 566, page 317: Ce ralentissement progresse en *proportion quadratique* avec le temps, parce que chaque nouveau ralentissement s'ajoute au précédent !

Challenge 567, page 319: Le double de ce nombre, le nombre constitué de la suite de tous les nombres pairs, etc.

Challenge 570, page 352: Cela pourrait être résolu avec une astuce similaire à celle utilisée pour l'irrationalité de chacun des deux termes de la somme, mais personne n'en a décelée une.

Challenge 571, page 352: Il y a toujours de nombreuses découvertes qui attendent d'être révélées en mathématiques modernes, particulièrement en topologie, en théorie des nombres et en géométrie algébrique. Les mathématiques ont un avenir radieux.



CRÉDITS

REMERCIEMENTS

Nombreux sont ceux qui ont su entretenir leur don de curiosité et qui ont apporté leur soutien afin de mener à bien ce projet. Par-dessus tout, Saverio Pascasio a été – présent ou non – une référence constante pour ce projet. Fernand Mayné, Anna Koolen, Ata Masafumi, Roberto Crespi, Serge Pahaut, Luca Bombelli, Herman Elswijk, Marcel Krijn, Marc de Jong, Martin van der Mark, Kim Jalink, mes parents Peter et Isabella Schiller, Mike van Wijk, Renate Georgi, Paul Tegelaar, Barbara et Edgar Augel, M. Jamil, Ron Murdock, Carol Pritchard, Richard Hoffman, Stephan Schiller et, avant toutes choses, ma femme Britta ont tous apporté de précieux conseils et encouragements.

De nombreuses personnes ont aidé ce projet grâce à leurs précieuses informations. Parmi les plus pertinentes, il y a celles de Mikael Johansson, Bruno Barberi Gnecco, Lothar Beyer, les innombrables améliorations apportées par Bert Sierra, les suggestions détaillées de Claudio Farnati, les nombreuses améliorations d'Eric Sheldon, les avis développés d'Andrew Young, l'aide persévérante et les conseils de Jonatan Kelu, les corrections d'Elmar Bartel, et en particulier l'aide considérable, passionnée et consciencieuse d'Adrian Kubala.

Des renseignements importants ont été fournis par Bert Peeters, Anna Wierzbicka, William Beaty, Jim Carr, John Merrit, John Baez, Frank DiFilippo, Jonathan Scott, Jon Thaler, Luca Bombelli, Douglas Singleton, George McQuarry, Tilman Hausherr, Brian Oberquell, Peer Zalm, Martin van der Mark, Vladimir Surdin, Julia Simon, Antonio Fermani, Don Page, Stephen Haley, Peter Mayr, Allan Hayes, Norbert Dragon, Igor Ivanov, Doug Renselle, Wim de Muynck, Steve Carlip, Tom Bruce, Ryan Budney, Gary Ruben, Chris Hillman, Olivier Glassey, Jochen Greiner, squark, Martin Hardcastle, Mark Biggar, Pavel Kuzin, Douglas Brebner, Luciano Lombardi, Franco Bagnoli, Lukas Fabian Moser, Dejan Corovic, Steve Carlip, Corrado Massa, Tom Helmond, Gary Gibbons, Heinrich Neumaier, Peter Brown, Paul Vannoni, John Haber, Saverio Pascasio, Klaus Finkenzeller, Leo Volin, Jeff Aronson, Roggie Boone, Lawrence Tuppen, Quentin David Jones, Arnaldo Uguzzoni, Frans van Nieuwpoort, Alan Mahoney, Britta Schiller, Petr Danecek, Ingo Thies, Vitaliy Solomatin, Carl Offner, Nuno Proença, Elena Colazingari, Paula Henderson, Daniel Darre, Wolfgang Rankl, John Heumann, Joseph Kiss, Martha Weiss, Antonio González, Antonio Martos, André Slabber, Ferdinand Bautista, Zoltán Gácsi, Pat Furrie, Michael Reppisch, Enrico Pasi, Thomas Köppe, Martin Rivas, Herman Beeksma, Tom Helmond, John Brandes, Vlad Tarko, Nadia Murillo, Ciprian Dobra, Romano Perini, Harald van Lintel, Andrea Conti, François Belfort, Dirk Van de Moortel, Heinrich Neumaier, Jarosław Królikowski, John Dahlman, Fathi Namouni, Paul Townsend, Sergei Emelin, Freeman Dyson, S.R. Madhu Rao, David Parks, Jürgen Janek, Daniel Huber, Alfons Buchmann, William Purves, Pietro Redondi, Sergei Kopeikin, et de nombreuses autres personnes qui souhaitent rester dans l'anonymat.

Les outils logiciels ont été affinés grâce à l'aide considérable de Michael Zedler et Achim Bluemensath sur les polices et la mise en page, et avec l'assistance répétée et précieuse de Donald Arseneau. L'aide provient également de Ulrike Fischer, Piet van Oostrum, Gerben Wierda, Klaus

Böhncke, Craig Upright, Herbert Voss, Andrew Trevorrow, Danie Els, Heiko Oberdiek, Sebastian Rahtz, Don Story, Vincent Darley, Johan Linde, Joseph Hertzlinger, Rick Zaccane, John Warkentin, Ulrich Diez, Uwe Siart, Will Robertson, Joseph Wright Enrico Gregorio, Rolf Niepraschk et Alexander Grahn.

Toutes les illustrations et animations dans ce texte ont été mises à disposition par leurs détenteurs des droits d'auteurs. Je les remercie tous chaleureusement. Ils sont cités dans les sections des crédits photographiques et filmographiques. Plus particulièrement, Lucas Barbosa et José Antonio Díaz Navas ont produit des animations spécialement pour ce livre, et Luca Gastaldi, Antonio Martos et Ulrich Kolberg ont composé des images spécifiquement pour celui-ci. La mise en page et le design de ce livre sont dus à la consultation professionnelle de Ulrich Dirr. Les suggestions et l'assistance de ma femme Britta comptent également pour beaucoup dans le design de l'ouvrage et de son site Web.



Depuis Mai 2007, la Klaus Tschira Foundation supporte généreusement l'édition et la publication électronique du livre *Motion Mountain*.

CRÉDITS FILMOGRAPHIQUES

L'animation claire d'une toupie suspendue, indiquée à la page ??, fut réalisée pour cet ouvrage par Lucas V. Barbosa. La ravissante animation de la lunaison à la page 130 fut calculée à partir de données astronomiques récentes, est protégée par les droits d'auteur et est aimablement fournie par Martin Elsässer. Elle peut être retrouvée sur son site Web www.mondatlas.de/lunation.html. Les films des solitons à la page 219 et ceux des dromions à la page 226 sont protégés par les droits d'auteur et sont gracieusement fournis par Jarmo Hietarinta. Ils peuvent être consultés sur son site Web users.utu.fi/hietarin. La vidéo des anneaux tourbillonnants qui s'enchevêtrent à la page 243 est protégée par les droits d'auteur et est aimablement fournie par Lim Tee Tai. Elle peut être retrouvée via son site Web sur la dynamique des fluides serve.me.nus.edu.sg. Le film de la croissance d'un flocon de neige à la page 278 est la propriété de Kenneth Libbrecht, qui l'accorde aimablement. Il peut être consulté sur son site Web www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals.

CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

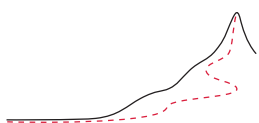
La photographie de la montagne en couverture est aimablement fournie et est protégée par les droits d'auteur de Dave Thompson (www.daveontrek.co.uk). La photographie de l'éclair à la page 13 est la courtoisie de Harald Edens qui en détient les droits d'auteur, et peut être retrouvée sur les sites Web www.lightningsafety.noaa.gov/photos.htm et www.weather-photography.com. L'illusion du mouvement à la page ?? est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par Michael Bach, on la retrouve sur son site Web www.michaelbach.de/ot/mot_rotsnake/index.html. C'est une variante de l'illusion de Kitaoka Akiyoshi que l'on trouve sur www.ritsumei.ac.jp/~akitaoka et utilisée ici avec sa permission. Les figures des pages 17, 46 et 142 ont été réalisées spécialement pour cet ouvrage et sont la propriété de Luca Gastaldi. Les photographies à haute résolution temporelle du rebond d'une balle de tennis à la page ?? sont la propriété de la Fédération Internationale de Tennis, et ont été aimablement fournies par Janet Page. Les représentations de l'Etna aux pages ?? et 137 sont protégées par les droits d'auteur et aimablement accordées par Marco Fulle, elles sont tirées du magnifique site Web www.stromboli.net. La célèbre photographie de la pointe des Poulains et de son phare de Philip Plisson à la page 21 est aimablement fournie et protégée par les droits d'auteur par Pêcheurs d'Images, consultez les sites Web www.plisson.com et www.pecheurs-d-images.com. On la trouve également dans le *Magnum opus* de Plisson *La Mer*, un livre renversant sur les photographies de la mer. L'image à la page ?? d'Alexander Tsukanov qui saute d'une roue ultime (un monocycle sans selle et sans fourche [N.D.T.]) à une

autre est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par le Cirque de Moscou. La photographie d'une gazelle à la page ?? est protégée par les droits d'auteur et aimablement accordée par Tony Rodgers, elle est tirée de son site Web www.flickr.com/photos/moonm. Le graphique de la page ?? a été redessiné et traduit du merveilleux livre de HENK TENNEKES, *De wetten van de vliegkunst - Over stijgen, dalen, vliegen en zweven*, Aramith Uitgevers, 1993. Les photographies de la balle de ping-pong à la page 34, du robinet qui fuit à la page 236 et du tournesol à la page ?? sont protégées par les droits d'auteur et aimablement accordées par Andrew Davidhazy et sont retrouvées sur son site Web www.rit.edu/~andpph. La photographie du cadran solaire de précision à la page ?? est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par Stefan Pietrzik, on la trouve sur commons.wikimedia.org/wiki/Image:Präzissions-Sonnenuhr_mit_Sommerwalze.jpg. Le graphique sur l'échelle des rythmes biologiques à la page ?? est aimablement fourni et appartient à Enrique Morgado. Les illustrations du pied à coulisse à vernier et de la vis micrométrique aux pages ?? et 54 sont protégées par les droits d'auteur de Medien Werkstatt, aimablement accordées par Stephan Bogusch, et sont tirées de leurs cours d'enseignement situés sur leur site Web www.medien-werkstatt.de. La photo du tigre à la page ?? est la propriété du zoo de Naples (en Floride, pas en Italie), et est aimablement fournie par Tim Tetzlaff, visitez leur site Web sur www.napleszoo.com. Les autres instruments de mesure de longueur à la page ?? sont la propriété de Keyence et Leica Geosystems, et aimablement fournis par eux, que l'on retrouve sur www.leica-geosystems.com. La photographie du cristal de gauche à la page ?? est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par Stephan Wolfsried, on la trouve sur le site Web www.mindat.org. La photographie du cristal de droite à la page ?? est aimablement fournie par Tullio Bernabei, sous la protection des droits d'auteur de Arch. Speleoresearch & Films/La Venta, et on la trouve sur les sites Web www.laventa.it et www.naica.com.mx. La figure de la Terre creuse aux pages 49 et 264 sont aimablement fournies par Helmut Diel et furent dessinées par Isolde Diel. Les photographies de la Lune aux pages 54 et ??, ainsi que les analemmes à la page 147 et à la page 378, sont la propriété et aimablement accordées par Anthony Ayiomamitis, le récit de ces photographies est conté sur son merveilleux site Web www.perseus.gr. La photographie anticrépusculaire à la page 55 est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par Peggy Peterson. La figure de la chenille catapulte, à la page 59 est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par Stanley Caveney. La photographie d'un capteur d'airbag à la page ?? est la propriété et aimablement accordée par Bosch ; l'image de l'accéléromètre est la propriété et aimablement accordée par Rieker Electronics ; les trois dessins de l'oreille humaine sont la propriété de l'université du Northwestern et sont aimablement fournis par Tim Hain, on les retrouve sur son site Web www.dizziness-and-balance.com/disorders/bppv/otoliths.html. La photographie d'Orion à la page 65 est la propriété et aimablement accordée par Matthew Spinelli. La photographie de *N. decemspinosus* à la page 68 est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par Robert Full, on la trouve sur son site Web rjf9.biol.berkeley.edu/twiki/bin/view/PolyPEDAL/LabPhotographs. La photographie de *P. ruralis* à la page 68 est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par John Brackenbury, et fait partie de sa magnifique collection sur le site Web www.sciencephoto.co.uk. La photographie du mille-pattes à la page 68 est la propriété et aimablement accordée par David Parks, on la trouve sur son site Web www.mobot.org/mobot/madagascar/image.asp?relation=A71. La photographie du gecko qui grimpe sur la fenêtre du bus à la page 68 est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par Marcel Berendsen, on la retrouve sur sa page Web www.flickr.com/photos/berendm. La photographie de la comète McNaught à la page ?? est la propriété et aimablement accordée par son découvreur Robert McNaught, elle est tirée de son site Web www.mso.anu.edu.au/~rmn mais on la trouve aussi sur antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap070122.html. La photographie du kilogramme étalon à la page 72 est la propriété et aimablement fournie par le Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). La photographie de la balance de Mendeleïev à la page ?? est la propriété de Thinktank Trust et aimablement

fournie par Jack Kirby, elle peut être retrouvée sur le site Web www.birminghamstories.co.uk. La photographie de la balance de laboratoire à la page ?? est sous la protection des droits d'auteur et aimablement fournie par Mettler-Toledo. Le graphique de la décomposition de la marche humaine à la page 92 est protégé par les droits d'auteur et aimablement accordé par Ray McCoy. La photographie du gyroscope de Foucault à la page 97 est aimablement fournie et est la propriété du musée du CNAM, le Conservatoire National des Arts et Métiers à Paris, dont le site Web est www.arts-et-metiers.net. La photographie du gyroscope laser à la page 97 est aimablement fournie et est la propriété du JAXA, le Japan Aerospace Exploration Agency, on la retrouve sur leur site Web jda.jaxa.jp. Le dessin du gyroscope laser de haute précision à la page ?? est aimablement fourni et est la propriété du Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. La photographie de l'instrument est aimablement fournie et est la propriété de Carl Zeiss. Cette machine est située au Fundamentaltstation Wettzell, et l'adresse de son site Web est www.wettzell.ifag.de. L'image sur la sonoluminescence à la page 111 est gracieusement fournie par Detlev Lohse qui en détient les droits d'auteur. La Figure 67 à la page 116 est aimablement fournie et est la propriété du projet international Gemini (Gemini Observatory/Association d'Universités pour la Recherche en Astronomie) sur www.ausgo.unsw.edu.au et www.gemini.edu. La photographie de l'horloge qui n'a pas besoin d'être remontée, à la page ??, est sous la protection des droits d'auteur de Jaeger-LeCoultre et aimablement fournie par Ralph Stieber. Son fonctionnement et son histoire sont décrits en détail dans la brochure disponible chez cette compagnie. Son site Web est www.Jaeger-LeCoultre.com. Le basilic qui court sur l'eau, à la page 117 et en dernière de couverture, est aimablement fourni et est la propriété du groupe belge TERRA vzw, on le retrouve sur leur site Web www.terra.vzw.org. La photographie de l'araignée d'eau à la page 118 est gracieusement fournie et est la propriété de Charles Lewallen. La photographie du robot sur l'eau à la page 118 est gracieusement fournie et est la propriété de l'American Institute of Physics. La photographie de l'horloge à pendule de haute précision à la page ?? est sous la protection des droits d'auteur de Erwin Sattler OHG, et aimablement fournie par Mme Stéphanie Sattler-Rick, on peut la trouver sur le site Web www.erwinsattler.de. La figure de la triangulation du méridien de Paris à la page 124 est la propriété et est aimablement fournie par Ken Alder, on la trouve sur son site Web www.kenalder.com. Le géoïde de la page 127 est aimablement fourni et est la propriété de GFZ Potsdam, que l'on retrouve sur www.gfz-potsdam.de. La photographie des satellites de Galilée à la page ?? est aimablement fournie et est la propriété de Robin Scagell, elle est tirée de son site Web www.galaxypix.com. Les cartes lunaires à la page 131 sont aimablement fournies par l'USGS Astrogeology Research Program, astrogeology.usgs.gov, en particulier Mark Rosek et Trent Hare. Les photographies de la marée à la page ?? sont protégées par les droits d'auteur et sont aimablement fournies par Gilles Régnier, on les retrouve sur son site Web www.gillesregnier.com; celui-ci montre également une animation de cette marée pendant toute une journée. Les images des descentes rapides sur la neige à la page ?? sont la propriété et sont aimablement accordées par Simone Origone, www.simoneorigone.it, et par Éric Barone, www.ericbarone.com. Les images des éclipses solaires à la page 153 sont aimablement fournies et sont la propriété du Centre National d'Études Spatiales, sur www.cnes.fr, et de Laurent Laveder, d'après son magnifique site www.PixHeaven.net. Les images des marguerites à la page 171 sont protégées et sont aimablement fournies par Giorgio Di Iorio, que l'on trouve sur son site Web www.flickr.com/photos/gioischia, et Thomas Luethi, que l'on trouve sur son site Web www.tiptom.ch/album/blumen/. La photographie des feux d'artifices à Chantilly à la page ?? est aimablement fournie, est protégée par Christophe Blanc et est tirée de son magnifique site Web sur christopheblanc.free.fr. La figure des myosotis à la page 190 est aimablement fournie et est la propriété de Markku Savela. Les figures d'interférences à la page ?? sont la propriété et sont aimablement fournies par Rüdiger Paschotta, on les retrouve sur son encyclopédie libre sur les lasers sur www.rp-photonics.com. L'image du soliton dans le canal à la page 218 est la propriété et est aimablement fournie par Dugald Duncan, elle est tirée de sa page Web www.ma.hw.

ac.uk/solitons/soliton1.html. La montagne fractale à la [page 228](#) est aimablement fournie et est la propriété de Paul Martz, qui explique sur son site Web www.gameprogrammer.com/fractal.html comment programmer de telles images. Les photographies du carbure de silicium à la [page ??](#) sont la propriété et aimablement fournies par Dietmar Siche. La photographie d'un MFA à la [page 234](#) est la propriété de Nanosurf (allez sur www.nanosurf.ch) et est utilisée avec l'aimable permission de Robert Sum. L'image au MFA du silicium à la [page 234](#) est la propriété de l'Universität Augsburg et est reproduite avec l'aimable autorisation de German Hammerl. La figure des atomes d'hélium sur du métal à la [page 234](#) est protégée par les droits d'auteur et aimablement fournie par IBM. La photographie d'un unique ion baryum à la [page ??](#) est sous la protection des droits d'auteur et aimablement fournie par Werner Neuhauser de l'Universität Hamburg. Les photographies du mouvement fluide à la [page 236](#) sont protégées et aimablement accordées par John Bush, Massachusetts Institute of Technology, et sont tirées de sa page Web www-math.mit.edu/~bush. La photographie de l'anneau de fumée sur l'Etna à la [page ??](#) est aimablement fournie et est la propriété de Daniela Szczepanski, on la retrouve sur ses grands sites Web www.vulkanarchiv.de et www.vulkane.net. La photographie de l'Atomium à la [page 247](#) est aimablement fournie, est la propriété de l'Asbl Atomium Vzw et est reproduite ici avec leur permission, en coopération avec la SABAM en Belgique. L'image et l'Atomium lui-même sont tous les deux sous la protection des droits d'auteur. Les photographies du jet granulaire dans le sable à la [page 276](#) sont la propriété et sont aimablement fournies par Amy Shen, qui découvrit ce phénomène avec Sigurdur Thoroddsen. La photographie de l'excavatrice à roue à godets à la [page ??](#) est la propriété et est aimablement fournie par RWE et peut être retrouvée sur leur site Web www.rwe.com. Les images thermographiques d'un vélo qui freine à la [page 251](#) sont la propriété de Klaus-Peter Möllmann et Michael Vollmer, Fachhochschule Brandenburg/Allemagne, et sont aimablement fournies par Michael Vollmer et Frank Pinno. La photographie de la montgolfière à la [page ??](#) est la propriété de Johan de Jong et est aimablement fournie par le Dutch Balloon Register que l'on retrouve sur www.dutchballoonregister.nl. L'image de l'or au microscope à effet tunnel à la [page 266](#) est aimablement fournie par Sylvie Rousset et est la propriété du CNRS. Les photographies et la figure à la [page ??](#) sont protégées et aimablement accordées par Ernesto Altshuler, Claro Noda et leurs collègues, on les retrouve sur leur site Web www.complexperiments.net. La photo des plissements sur la route à la [page ??](#) est gracieusement accordée par David Mays et est tirée de son article ?. L'image des ondes solitaires à la [page 277](#) est aimablement fournie et est protégée par Paul Umbanhowar. Le dessin des sphères qui tournent à la [page 277](#) est gracieusement fourni et est la propriété de Karsten Kötter. La photo du fluide qui s'écoule sur un plateau incliné à la [page 282](#) est aimablement fournie et est la propriété de Vakhtang Putkaradze. Les photographies des colonnes rigides à la [page ??](#) sont protégées par les droits d'auteur de Gerhard Müller (1940–2002), et sont mises à disposition par Ingrid Hörnchen. La photographie des rayons de soleil à la [page 357](#) est protégée et aimablement fournie par Fritz Bieri et Heinz Rieder, on la trouve sur leur site Web www.beatenbergbilder.ch. Le dessin à la [page 360](#) est gracieusement fourni et est la propriété de Daniel Hawkins. La photographie d'une règle à calcul à la [page 364](#) est aimablement fournie et est la propriété de Jörn Lütjens, on la retrouve sur son site Web www.joernluetjens.de. La photographie de la bulle de savon qui éclate, à la [page 354](#), est protégée par les droits d'auteur, est aimablement fournie par Peter Wienerroither et on la retrouve sur sa page Web homepage.univie.ac.at/Peter.Wienerroither. Les portraits historiques des physiciens dans ce texte ne sont pas protégés par des droits d'auteur, sauf lorsque c'est mentionné. Tous les dessins qui ne sont pas explicitement cités sont sous la protection des droits d'auteur © 1997 – 2010 Christoph Schiller. Si vous soupçonnez qu'un droit d'auteur est attribué ou obtenu de manière incorrecte, cela n'est pas intentionnel et vous êtes aimablement invités à en faire part à l'auteur.





INDEX DES NOMS

A

A B E

Les numéros de page en caractères *italiques* se réfèrent aux pages où la personne est présentée plus en détail.

A

Abe, F. 332
Ackermann, Peter 350
Ackermann, Rudolph 361
Adelberger, E.G. 338
Adenauer, Konrad 142
Aetius 71, 334
Ahlgren, A. 331
Ahrens, C. Donald 340
Aigler, M. 46
Åkerman, N. 340
Alder, Ken 338, 394
Alighieri, Dante 120
Alsdorf, D. 340
Altshuler, Ernesto 395
Amundsen, Roald 120, 337
An, K. 344
Anders, S. 338
Anderson, R. 335
Andreotti, B. 347
Aniçin, I.V. 338
Arch. Speleoresearch &
Films/La Venta 393
Archimède 72
Aristarchos 334
Aristarque de Samos 94, 102,
334
Aristote 32, 38, 122, 332
Armstrong, J.T. 333
Aronson, Jeff 391
Aronson, Jeff K. 350
Arseneau, Donald 391
Ashby, M.F. 343
Astérix 244
Ata Masafumi 391

Atomium - SABAM 395
Atomium – SABAM 247
Audoin, C. 350
Augel, Barbara et Edgar 391
Ausloos, M. 343
Avogadro, Amadeo 233
Axelrod, R. 328
Ayiomamitis, Anthony 378,
393

B

Babinet, Jacques 301
Babloyantz, A. 347
Bach, Michael 392
Baez, John 391
Bagnoli, Franco 391
Banach, Stefan 45, 46, 228
Banavar, J.R. 342
Bandler, R. 328
Bandler, Richard 168, 328
Baptista van Helmont, Johan
258
Barber, B.P. 337
Barberi Gnecco, Bruno 391
Barbosa, Lucas 392
Barbosa, Lucas V. 392
Barbour, John 331
Barone, Éric 394
Bartel, Elmar 391
Battista Guglielmini,
Giovanni 94
Batty, R.S. 343
Baudelaire, Charles 17
Bautista, Ferdinand 391
Beaty, William 391

Becker, J. 340
Beeksmas, Herman 391
Behroozi, C.H. 330
Bekenstein, Jakob 274
Belfort, François 391
Belic, D. 350
Benka, S. 334
Bennet, C.L. 336
Bentley, W.A. 347
Berendsen, Marcel 393
Bergquist, J. 350
Bernabei, Tullio 393
Bernoulli, Daniel 258
Bernoulli, J. 296
Bessel 101
Bevis, M. 340
Beyer, Lothar 391
Bielefeldt, H. 344
Bieri, Fritz 357, 395
Biggar, Mark 391
Bilger, H.R. 335
Bird, D.J. 350
Bischoff, Bernard 349
Blagden, Charles 269
Blair, D.G. 351
Blanc, Christophe 394
Blumensath, Achim 391
Bocquet, Lydéric 344, 385
Bogusch, Stephan 393
Bohr, Niels 264
Boiti 225
Boiti, M. 343
Boltzmann, Ludwig 179, 260
Bombelli, Luca 391
Boone, Roggie 391

B

BOREL

Borel, Émile 268
 Borel, Émile 347
 Borelli, G. 329
 Bosch 393
 Bourbaki, N. 296
 Bowden, F.P. 341
 Bower, B. 342
 Boèce 326
 Brackenbury, John 393
 Bradley, James 103, 103
 Braginsky, V.B. 339
 Brahe, Tycho 120, 121
 Brahm, A. de 295
 Brandes, John 391
 Brantjes, R. 377
 Brebner, Douglas 391
 Brennan, Richard 329
 Bright, William 349
 Brillouin, L. 346
 Brillouin, Léon 263
 Brooks, Mel 254
 Brouwer, Luitzen 40
 Brown, J.H. 342
 Brown, Peter 391
 Brown, Robert 259
 Bruce, Tom 391
 Brush, S. 336
 Buchmann, Alfons 391
 Buckley, Michael 328
 Budney, Ryan 391
 Bundesamt für Kartographie
 und Geodäsie 394
 Bunyan, Paul 343
 Buridan, Jean 122, 338
 Burša, Milan 332
 Busche, Detlev 331
 Bush, John 236, 395
 Böhncke, Klaus 391

C

Cajori, Florian 349
 Calzadilla, A. 341
 Campbell, D. 347
 Campbell, D.K. 347
 Caps, H. 344
 Carl Zeiss 394
 Carlip, Steve 391
 Carlyle, Thomas 106
 Carnot, Sadi 84

Carr, Jim 391
 Carroll, Lewis, ou Charles
 Lutwidge Dogson 264
 Cartesius 42
 Casati, Roberto 333
 Cassus Dio 153
 Cauchy, Augustin-Louis 193
 Cavendish, Henry 125
 Caveney, S. 332
 Caveney, Stanley 59, 60, 393
 Cayley, Arthur 193
 Celsius, Anders 310
 Chaîneux, J. 349
 Chan, M.A. 335
 Chandler, Seth 101
 Charlemagne 295
 Charpak, G. 350
 Childs, J.J. 344
 Chomsky, Noam 331
 Christlieb, N. 338
 Christou, A.A. 339
 Chudnovsky, D.V. 352
 Chudnovsky, G.V. 352
 Cirque de Moscou 393
 Clancy, Tom 343
 Clanet, Christophe 385
 Clarke 330
 Clausius, Rudolph 254, 260
 Clavius, Christophorus 55
 Cléobule 42
 CNAM 394
 CNRS 266, 395
 Codling, K. 350
 Cohen-Tannoudji, G. 346
 Cohen-Tannoudji, Gilles 264
 Colazingari, Elena 391
 Coleman-McGhee, Jerdome
 344
 Colladon, Daniel 240
 Collins, J.J. 329
 Compton, A.H. 336
 Compton, Arthur 98
 Conkling, J.A. 57
 Conservatoire National des
 Arts et Métiers 394
 Conti, Andrea 391
 Cooper, Heather 337
 Cooper, J.N. 328
 Coriolis, Gustave-Gaspard 81,

95

Cornell, E.A. 330
 Corovic, Dejan 391
 Costabel, Pierre 229
 Craven, J.D. 340
 Crespi, Roberto 391
 Crutchfield, J. 347
 Crystal, David 348
 César, Jules 297

D

d'Aquin, Thomas 328
 Dahlman, John 391
 Daneczek, Petr 391
 Daniel Titius, Johann 152
 Dante Alighieri 120
 Darius, J. 334
 Darley, Vincent 392
 Darre, Daniel 391
 Dasari, R.R. 344
 Davidhazy, Andrew 236, 393
 Davis, S.D. 343
 de Vries 218
 Deaver, B.S. 313
 Dehmelt, H. 344
 Dehmelt, Hans 343
 Dehn, Max 46
 Demko, T.M. 335
 Denis Poisson, Siméon 126
 Descartes, R. 296
 Descartes, René 42, 363
 Destexhe, A. 347
 DeTemple, D.W. 352
 Deutschmann, Matthias 325
 Dewdney, Alexander 56
 Dicke, R.H. 339
 Diehl, Helmut 49
 Diel, Helmut 393
 Diel, Isolde 393
 Diez, Ulrich 392
 DiFilippo, Frank 391
 Dill, L.M. 343
 Dio, Cassius 340
 Dirac, Paul 205, 296
 Dirr, Ulrich 392
 Dixon, Bernard 332
 Di Iorio, Giorgio 394
 Dobra, Ciprian 391
 Dorbolo, S. 344

D

DORBOLO

Dorbolo, Stéphane 243
 Dougherty, R. 331
 Doyle, Arthur Conan 228
 Dragon, Norbert 391
 Dubelaar, N. 377
 Dubrulle, B. 340
 Dumont, Jean-Paul 328, 334, 348
 Duncan, Dugald 218, 394
 Durieux, M. 345
 Dusenbery, David 333
 Dutton, Z. 330
 Dyson, Freeman 391
 Díaz Navas, José Antonio 392
 Démocrite 232

E
 Eötvös, Roland von 98
 Earman, John 331
 Eckhardt, B. 348
 Eddington, Arthur 79
 Edelmann, H. 338
 Edens, Harald 392
 Edwards, B.F. 373
 Einstein, A. 346
 Einstein, Albert 17, 136, 139, 140, 181, 197, 200, 205, 259, 261
 Ekman, Walfrid 334
 Elert Bode, Johann 152
 Els, Danie 392
 Elsevier, Louis 356
 Elswijk, H.B. 344
 Elswijk, Herman B. 391
 Elsässer, Martin 130, 392
 Emelin, Sergei 391
 Emerson, Ralph Waldo 220
 Emsley, John 347
 Engels, Friedrich 164
 Engemann, S. 344
 Enquist, B.J. 342
 Enss, Christian 345
 Erdős, Paul 46
 Erwin Sattler OHG 394
 Euclide 31
 Eukleidés 31
 Euler, L. 296
 Euler, Leonhard 101, 153, 156, 336

Evans, J. 340
 Everitt, C.W. 313

F
 Fairbanks, J.D. 313
 Faisst, H. 348
 Falk, G. 339
 Farinati, Claudio 391
 Farmer, J. 347
 Farrant, Penelope 333
 Fatio de Duillier, Nicolas 150
 Fayeulle, Serge 340
 Fehr, C. 341
 Fekete, E. 339
 Feld, M.S. 344
 Fermani, Antonio 391
 Fernandez-Nieves, A. 337
 Feynman, Richard P. 327
 Fibonacci 294
 Figueroa, D. 341
 Filippov, T. 342
 Fink, Hans-Werner 344
 Finkenzeller, Klaus 391
 Firpić, D.K. 338
 Fischer, Ulrike 391
 Flach, S. 347
 Flachsel, Erwein 328
 Flindt, Rainer 330
 Fokas 225
 Fokas, A.S. 343
 Foreman, M. 331
 Forsberg, B. 340
 Fortes, L.P. 340
 Foster, James 341
 Foucault, Jean Bernard Léon 96
 Franklin, Benjamin 229
 Frasiniski, L.J. 350
 Fray Richardson, Lewis 44
 Frenzel 110
 Fresnel, Augustin 214
 Friedman, David 156
 Friedrich Benzenberg, Johann 95
 Fritsch, G. 343
 Frova, Andrea 332
 Full, Robert 393
 Fulle, Marco 392
 Fumagalli, Giuseppe 334, 341

Fundamentalstation Wettzell 394
 Furrie, Pat 391
 Fédération Internationale de Tennis 392

G
 Gabriel Stokes, George 237
 Galilei, Galileo 30, 37, 54, 57, 58, 84, 94, 124, 141, 144, 145, 229, 230, 232, 356, 367
 Galilée 94
 Galois, Évariste 193
 Gardner, Martin 364
 Garrett, A. 334
 Garwin, R.L. 350
 Gaspard, Pierre 261, 346
 Gastaldi, Luca 392
 Gauthier, N. 342
 Gelb, M. 328
 Geng, Tao 188
 Georgi, Renate 391
 Ghahramani, Z. 341
 Ghavimi-Alagha, B. 337
 Gibbons, Gary 391
 Giessibl, F.J. 344
 Gilligan, James 341
 Glassey, Olivier 391
 Gold, Tommy 213
 Goldstein, Herbert 341
 Goles, E. 347
 Golubitsky, M. 329
 González, Antonio 391
 Goriely, A. 344
 Gottlieb Leidenfrost, Johann 241
 Gracovetsky, Serge 92, 334
 Grahn, Alexander 392
 Graner, F. 340
 Graw, K.-U. 384
 Gray, C.G. 341, 369
 Greenside, Henry 323
 Gregorio, Enrico 392
 Greiner, Jochen 391
 Grimaldi, Francesco 221
 Grinder, John 168, 328
 Gross, R.S. 336
 Grossmann, A. 343

G

GRÜNBAUM

Grünbaum, Branko 342
 Gutierrez, G. 341
 Gácsi, Zoltán 391

H

Haber, John 391
 Hagen, J.G. 335
 Hagen, John 98
 Hain, Tim 393
 Hakonen, P.J. 350
 Halberg, F. 331
 Haley, Stephen 391
 Halley, Edmund 133
 Halliwell, J.J. 331
 Hamilton, William 296
 Hammerl, German 395
 Hardcastle, Martin 391
 Hardy, Godfrey H. 130
 Hare, Trent 394
 Harriot, T. 296
 Harris, S.E. 330
 Hartman, W.K. 338
 Hausherr, Tilman 391
 Hawkins, Daniel 360, 395
 Hayes, Allan 391
 Hays, J.D. 336
 Heath, Thomas 334
 Heber, U. 338
 Heckel, B.R. 338
 Heisenberg, Werner 237, 264
 Heller, E. 343
 Hellinger, Bert 341
 Helmholtz, Hermann von 253
 Helmond, Tom 391
 Hembacher, S. 344
 Henbest, Nigel 337
 Henderson, Paula 391
 Henon, M. 340
 Henson, Matthew 374
 Hentig, Hartmut von 7
 Herbert, Wally 337
 Herrmann, F. 345
 Herschel, William 104
 Hertz, H.G. 334
 Hertz, Heinrich 179
 Hertzlinger, Joseph 392
 Hestenes, D. 340
 Heumann, John 391
 Hewett, J.A. 338

Hewitt, John Suchocki &
 Leslie A. 327
 Hewitt, Paul G. 327
 Hietarinta 225
 Hietarinta, J. 343
 Hietarinta, Jarmo 219, 226, 392
 Higashi, R. 350
 Hilbert, David 181, 200
 Hillman, Chris 391
 Hipparque 101
 Hirano, M. 340
 Hirota 225
 Hirota, R. 343
 Hodges, L. 339
 Hodgkin 217
 Hodgkin, A.L. 342
 Hoeher, Sebastian 345
 Hof, B. 348
 Hohenstatt, M. 344
 Hollander, E. 344
 Hong, F.-L. 350
 Hooke 130
 Hooke, Robert 121, 206
 Horace, Quintus Horatius
 Flaccus 162
 Huber, Daniel 391
 Hudson, R.P. 345
 Humphreys, Roberta 336
 Humphreys, W.J. 347
 Hunklinger, Siegfried 345
 Hunter, D.J. 333
 Huxley 217
 Huxley, A.F. 342
 Huygens, Christiaan 74, 122,
 214
 Huygens, Christiaan 123
 Héraclite 16
 Héraclite d'Éphèse 25, 189
 Hörnchen, Ingrid 395

I

IBM 234
 Ifrah, G. 294
 Illich, Ivan 320, 322
 Imae, Y. 333
 Imbrie, J. 336
 Ingram, Jay 343
 Ivanov, Igor 391
 Ivry, R.B. 331

J

Jacobi, Carl 180
 Jaeger-LeCoultre 394
 Jahn, O. 342
 Jalink, Kim 391
 James, M.C. 339
 Jamil, M. 391
 Jammer, M. 338
 Janek, Jürgen 391
 Japan Aerospace Exploration
 Agency 394
 JAXA 394
 Jeffreys, Harold 99
 Jen, E. 347
 Jennings, G.M. 343
 Jensen, Hans 348
 Johansson, Mikael 391
 Johnson, Ben 60, 332
 Johnson, Samuel 289, 320
 Johnston, K.J. 333
 Jones, Gareth 351
 Jones, H. 296
 Jones, Quentin David 391
 Jones, Tony 350
 Jong, Johan de 395
 Jong, Marc de 391
 Joule, James 253
 Joutel, F. 339
 Ju, L. 351
 Jules Verne 180
 Jürgens, H. 279
 Jürgens, Hartmut 44

K

Köppe, Thomas 391
 Kadanoff, L.P. 347
 Kamiya, K. 381
 Kanada Yasumasa 352
 Kanecko, R. 340
 Kant, Emmanuel 139
 Kantor, Yakov 323
 Karl, G. 341, 369
 Karstädt, D. 345
 Katori, H. 350
 Kawagishi, I. 333
 Keesing, R.G. 330, 351
 Kelu, Jonatan 391
 Kelvin 253
 Kemp, David 213

K

KEMPF

Kempff, Jürgen 331
 Kenderdine, M.A. 334
 Kendrick, E. 340
 Kennard, E.H. 328
 Kepler 129, 130
 Kepler, Johannes 120, 129
 Kerswell, R. 348
 Keyence 393
 Kirby, Jack 394
 Kirchhoff, Gustav 214
 Kiss, Joseph 391
 Kistler 241
 Kistler, S.F. 344
 Kitaoka Akiyoshi 392
 Kivshar, Y.S. 347
 Klaus Tschira Foundation 392
 Koch, G.W. 343
 Kolberg, Ulrich 392
 Koolen, Anna 391
 Koomans, A.A. 344
 Kopeikin, Sergei 391
 Korteweg 218
 Krehl, P. 344
 Krehl, Peter 245
 Krijn, Marcel 391
 Krotkow, R. 339
 Kruskal, M.D. 342
 Kruskal, Martin 219
 Królikowski, Jarosław 391
 Kubala, Adrian 391
 Kudo, S. 333
 Kurths, Jürgen 338
 Kuzin, Pavel 391
 Kvale, E.P. 335
 Kötter, K. 347
 Kötter, Karsten 277, 395
 Küstner 336
 Küstner, Friedrich 101

L

La Caille 121
 Lagrange 186
 Lagrange, Joseph-Louis 175
 Lalande 121
 Lambeck, K. 335
 Lancaster, George 341
 Landauer, Rolf 347
 Lang, K.R. 65
 Larsen, Jeffrey 336

Laskar, J. 340
 Laskar, Jacques 151
 Laskkar, J. 339
 Laurent de Lavoisier, Antoine 74
 Laveder, Laurent 394
 Lavenda, B. 346
 Laws, Kenneth 348
 Le Verrier, Urbain 136
 Lecar, M. 340
 Lega, Joceline 347
 Legendre, A. 296
 Lehmann, Paul 297, 349
 Leibniz 81, 130, 173, 180, 330
 Leibniz, G. 296
 Leibniz, Gottfried 175
 Leica Geosystems 393
 Lennard, J. 295
 Lennerz, C. 373
 Leon 225
 Leon, J. J.-P. 343
 Lesage, G.-L. 340
 Leucippe d'Élée 232
 Lewallen, Charles 394
 Libbrecht, Kenneth 278, 392
 Lichtenberg, Georg Christoph 30
 Lim Tee Tai 243, 244, 392
 Lim, T.T. 345
 Linde, Johan 392
 Lintel, Harald van 391
 Lissauer, J.J. 339, 348
 Liu, C. 330
 Lloyd, Seth 346
 Lodge, Oliver 99
 Lodovico Lagrangia, Giuseppe 175
 Lohse, Detlev 394
 Lombardi, Luciano 391
 Loschmidt, Joseph 229
 Louis Lesage, Georges 150
 Louis Moreau de Maupertuis, Pierre 94
 Luca Bombelli 391
 Lucretius Carus, Titus 233
 Lucretius Carus, Titus 32
 Lucrèce 32, 233
 Luethi, Thomas 394
 Luke, Lucky 244

Léonard de Pise 294
 Lévy-Leblond, Jean-Marc 90, 150, 327
 Lüders, Klaus 327
 Lütjens, Jörn 364, 395

M

MacDonald, G.J.F. 335
 MacDougalls, Duncan 107
 Mach, Ernst 76
 Maekawa, Y. 333
 Magariyama, Y. 333
 Mahoney, Alan 391
 Mahrl, M. 348
 Malin, D. 65
 Mallat, Stéphane 343
 Malley, R. 340
 Mandelbrot, Benoît 44, 227
 Mandelstam, Stanley 341
 Mannhart, J. 344
 Marcus, Richard 328
 Mark, Martin van der 270
 Mark, Martin van der 391
 Markus, M. 347
 Marsaglia, G. 341
 Martikainen, J.E. 350
 Martin, A. 342
 Martina 225
 Martina, L. 343
 Martos, Antonio 391, 392
 Martz, Paul 228, 395
 Marx, Groucho 291
 Massa, Corrado 391
 Matthews, Robert 339
 Maupertuis 94
 Maynard, Finian 33
 Mayné, Fernand 391
 Mayr, Peter 391
 Mays, David 395
 McCoy, Ray 92, 394
 McLaughlin, William 328
 McLean, H. 332
 McMahon, T.A. 343
 McMillen, T. 344
 McNaught, Robert 393
 McQuarry, George 391
 Medien Werkstatt 393
 Melo, F. 347
 Mendoza, E. 348

M

MERCKX

Merckx, Eddy 85
 Merrit, John 391
 Mertens, K. 348
 Mettler-Toledo 394
 Mettrie, J. Offrey de la 281
 Michaelson, P.F. 313
 Michel, Stanislav 81
 Michell, John 125
 Michelson, Albert 98
 Mikkola, Seppo 339
 Milankovitch, Milutin 103
 Mineyev, A. 343
 Mirabel, I.F. 331
 Mirsky, S. 365
 Mohazzabi, P. 339
 Mohr, P.J. 351
 Monitz, E.J. 334
 Moore, J.A. 341
 Moortel, Dirk Van de 391
 Moreira, N. 342
 Morgado, Enrique 393
 Morlet, J. 343
 Moser, Lukas Fabian 391
 Mozurkewich, D. 333
 Muller, R.A. 343
 Mulligan, J.F. 334
 Munk, W.H. 335
 Muramoto, K. 333
 Murata, Y. 340
 Murdock, Ron 391
 Mureika, J.R. 340
 Murillo, Nadia 391
 Murphy, R. 296
 Murray, C.D. 339
 Muskens, O. 343
 Muynck, Wim de 391
 Möllmann, K.-P. 345
 Möllmann, K.P. 345
 Möllmann, Klaus-Peter 251, 395
 Müller, G. 348
 Müller, Gerhard 283, 395

N

Namba, K. 333
 Namouni, F. 339
 Namouni, Fathi 391
 Nanosurf 234
 Nansen, Fridtjof 334

Napiwotzki, R. 338
 Napoléon 135
 Nassau, K. 70
 Nauenberg, M. 337
 Navier, Claude 237
 Needham, Joseph 341
 Nelson, A.E. 338
 Neuhauser, W. 344
 Neuhauser, Werner 395
 Neumaier, Heinrich 391
 Neumann, Dietrich 132, 338
 Newcomb, Simon 136, 339
 Newton 130, 311, 330
 Newton, Isaac 30, 94, 121
 Nicolis, Grégoire 346
 Niederer, U. 199, 342
 Niepraschk, Rolf 392
 Nieuwpoort, Frans van 391
 Nieuwstadt, F.T.M. 348
 Nightingale, J.D. 341
 Nobel, P. 343
 Noda, Claro 395
 Noether, Emmy 200
 Nolte, John 329
 Nonnius, Peter 54
 Novikov, V.A. 341, 369
 Nuñez, Pedro 54

O

O'Keefe, R. 337
 Oberdiek, Heiko 392
 Oberquell, Brian 391
 Offner, Carl 391
 Offrey de la Mettrie, J. 281
 Oostrum, Piet van 391
 Oppenheimer, Robert 182
 Origone, Simone 394
 Oughtred, W. 296

P

Page, Don 391
 Page, Janet 392
 Pahaut, Serge 391
 Pais, A. 342
 Panov, V.I. 339
 Pappus 72
 Park, David 327
 Parks, David 391, 393
 Parlett, Beresford 23

Parménide 17, 62
 Parménide d'Élée 16
 Pascazio, Saverio 391
 Paschotta, Rüdiger 394
 Pasi, Enrico 391
 Paul, T. 343
 Peano, G. 296
 Peary, Robert 120, 337, 374
 Pěč, Karel 332
 Peeters, Bert 391
 Peitgen, H.-O. 279
 Peitgen, Heinz-Otto 44
 Pekàr, V. 339
 Pempinelli, F. 343
 Perc, M. 334
 Perelman, Yakov 223, 327
 Perini, Romano 391
 Perrin, J. 346
 Perrin, Jean 261, 346, 387
 Peterson, Peggy 55, 393
 Petit, Jean-Pierre 325
 Phillips, R.J. 338
 Piaget, Jean 329
 Piccard, Auguste 240
 Pietrzik, Stefan 393
 Pikovsky, Arkady 338
 Pinker, Steven 331
 Pinno, F. 345
 Pinno, Frank 395
 Planck, Max 262
 Platon 232, 285
 Pline l'Ancien, Gaius Plinius Secundus 327
 Plisson, Philip 21, 392
 Plutarque 168
 Pohl, Robert 327
 Pohl, Robert O. 327
 Poincaré, Henri 105
 Poinso, Louis 98
 Polster, B. 345
 Pompeius, Gnaeus 168
 Prescott Joule, James 253
 Preston-Thomas, H. 345
 Price, R.H. 78
 Pritchard, Carol 391
 Proença, Nuno 391
 Protagoras 311
 Ptolémée 53
 Purves, William 391

P

PUTKARADZE

Putkaradze, V. 348
 Putkaradze, Vakhtang 282, 395
 Putterman, S.J. 337
 Pythagore 220
 Päsler, Max 341
 Pérez-Mercader, J. 331

Q

Quinlan, G.D. 339

R

Rahtz, Sebastian 392
 Ramanujan, Srinivasa 130
 Randi, James 21
 Rankl, Wolfgang 391
 Rawlins, D. 337
 Raymond, David 324
 Recorde, R. 296
 Recorde, Robert 295
 Redondi, Pietro 30, 229, 391
 Rees, W.G. 327
 Regiomontanus, J. 296
 Reichl, Linda 345, 347
 Reimers, D. 338
 Renselle, Doug 391
 Reppisch, Michael 391
 Richtmeyer, F.K. 328
 Rieder, Heinz 357, 395
 Riefelin, E. 333
 Rieker Electronics 393
 Rinaldo, A. 342
 Rindt, Jochen 31
 Rivas, Martin 391
 Robert Mayer, Julius 84, 251
 Robertson, Will 392
 Robutel, P. 339
 Rodgers, Tony 393
 Rodin, Auguste 123
 Rodríguez, L.F. 331
 Rohrbach, Klaus 336
 Roll, P.G. 339
 Romer, R.H. 379
 Rosek, Mark 394
 Rosenblum, Michael 338
 roue ultime 392
 Rousset, Sylvie 395
 Ruben, Gary 391
 Rudolf Hertz, Heinrich 162
 Rudolff, C. 296

Rudolff, Christoff 349
 Ruffini, Remo 348
 Ruga, Spurius Carvilius 290
 Ruppel, W. 339
 Rusby, R.L. 345, 351
 Rusby, Richard 351
 Russel, Bertrand 177
 Russel, J.S. 342
 Russo, Lucio 327
 Rutherford, Ernest 22
 RWE 395
 Régnier, Gilles 394

S

S.R. Madhu Rao 391
 Sade, Donatien de 162
 Sagnac, Georges 99
 Sanctorius de Padoue 78
 Sands, R.B. Leighton & M. 327
 Santini 225
 Santini, P.M. 343
 Santorio Santorio 78
 Santorre Santorio 78
 Sattler OHG, Erwin 394
 Sattler-Rick, Stéphanie 394
 Sauer, J. 373
 Sauerbruch, Ferdinand 385
 Saupe, D. 279
 Saupe, Dietmar 44
 Savela, Markku 190, 394
 Scagell, Robin 394
 Schiller, Britta 391, 392
 Schiller, C. 344
 Schiller, Christoph 194, 395
 Schiller, Isabella 391
 Schiller, Peter 391
 Schiller, Stephan 391
 Schlichting, H.-J. 373
 Schmidt, Klaus T. 333
 Schmidt, T. 348
 Schmidt-Nielsen, K. 347
 Schneider, Jean 342
 Schneider, Wolf 349
 Schooley, J.F. 345
 Schulte 110
 Schwartz, Richard 328
 Schwenk, K. 347
 Schwenkel, D. 344
 Schönenberger, C. 344
 Schörner, E. 373
 Scime, E.E. 373
 Scott Russell, John 217
 Scott, Jonathan 391
 Scriven 241
 Scriven, L.E. 344
 Segrè, Gino 345
 Sexl, Roman 48
 Shackleton, N.J. 336
 Shakespeare, William 21
 Shalyt-Margolin, A.E. 346
 Shapiro, A.H. 335
 Shapiro, Asher 96
 Sheldon, Eric 391
 Shen, Amy 395
 Sheng, Z. 344
 Shephard, G.C. 342
 Sherham, roi 27
 Shinjo, K. 340
 Short, J. 351
 Siart, Uwe 392
 Siche, Dietmar 395
 Sierra, Bert 391
 Sigwarth, J.B. 339
 Sillett, S.C. 343
 Silverman, M. 333
 Simon Laplace, Pierre 135
 Simon, Julia 391
 Simon, M.I. 333
 Simonson, A.J. 379
 Simplicius de Cilicie 285
 Singh, C. 334
 Singleton, Douglas 391
 Sissa Ben Dahir 27
 Slabber, André 391
 Smith, George 349
 Smoluchowski, Marian von 261
 Socrate 285
 Soldner, J. 339
 Soldner, Johann 140
 Solomatin, Vitaliy 391
 Sonett, C.P. 335
 Spence, J.C.H. 344
 Spencer, R. 331
 Spiderman 244
 Spinelli, Matthew 393
 Spiropulu, M. 338
 Sreedhar, V.V. 342

S

STEDMAN

Stedman, G.E. 335, 351
 Steiner, Kurt 344
 Stengel, Ingrid 331
 Stephenson, Richard 335
 Steur, P.P.M. 345
 Stewart, I. 329
 Stewart, Ian 47
 Stieber, Ralph 394
 Stoney, G.J. 350
 Stoney, George Johnston 305
 Stong, C.L. 333
 Story, Don 392
 Strunk, William 349
 Su, Y. 339
 Sugiyama, S. 333
 Sum, Robert 395
 Surdin, Vladimir 391
 Surry, D. 332
 Sussman, G.J. 340
 Swackhamer, G. 340
 Swenson, C.A. 345
 Swift, G. 347
 Swinney, H.L. 347
 Swope, Martha 348
 Szczepanski, Daniela 395
 Szilard, L. 346
 Szilard, Leo 263

T

Tabor, D. 341
 Tait, P.G. 296
 Takamoto, M. 350
 Talleyrand 124
 Tamman, Gustav 242
 Tarko, Vlad 391
 Tarski, Alfred 46, 228
 Tartaglia, Niccolo 29
 Taylor, B.N. 351
 Taylor, G.J. 338
 Taylor, J.H. 309
 Tegelaar, Paul 391
 Telegdi, V.L. 347
 Tennekes, Henk 393
 Tetzlaff, Tim 393
 Thaler, Jon 391
 Thies, Ingo 391
 Thinktank Trust 393
 Thompson, Dave 392
 Thomson (Kelvin), William

253

Thomson, W. 345
 Thomson-Kelvin 247
 Thoroddsen, Sigurdur 395
 Topper, D. 338
 Torge, Wolfgang 332
 Toschek, P.E. 344
 Townsend, Paul 391
 Trefethen, L.M. 335
 Tregubovich, A.Ya. 346
 Trevorrow, Andrew 392
 Truesdell, C. 345
 Truesdell, Clifford 30
 Tsang, W.W. 341
 Tschichold, J. 349
 Tsuboi, Chuji 332
 Tsukanov, Alexander 392
 Tucholski, Kurt 191
 Tuppen, Lawrence 391
 Turner, M.S. 336
 Twain, Mark 91

U

Ucke, C. 373
 Uffink, J. 346
 Uguzzoni, Arnaldo 391
 Ulam, Stanislaw 275
 Umbanhowar, P.B. 347
 Umbanhowar, Paul 276, 277, 395
 Universität Augsburg 234
 université du Northwestern 393
 Upright, Craig 392

V

Vandeginste, Eric 245, 247
 Vandewalle, N. 344
 Vanier, J. 350
 Vannoni, Paul 391
 Vareschi, G. 381
 Verne, Jules 379
 Vernier, Pierre 54
 Vincent, D.E. 338
 Vitali, Giuseppe 44
 Viviani, Vincenzo 97
 Volin, Leo 391
 Vollmer, M. 345
 Vollmer, Michael 251, 395

Voltaire 153, 180, 311
 von Smoluchowski, Marian 259
 Vorobieff, P. 348
 Voss, Herbert 392
 Vuorinen, R.T. 350
 Völz, Horst 350

W

Wagon, Stan 47, 331
 Wald, George 265
 Waleffe, F. 348
 Walgraef, Daniel 347
 Walker, Jearl 328
 Wallis, J. 296
 Walter, Henrik 341
 Warkentin, John 392
 Weber, R.L. 348
 Webster, Hutton 349
 Wedin, H. 348
 Wegener, Alfred 101, 336
 Wehner, R. 337
 Weierstall, U. 344
 Weierstrass, K. 296
 Weil, André 296
 Weiss, M. 332
 Weiss, Martha 391
 Wells, M. 340
 Weltner, K. 344
 Weninger, K.R. 337
 West, G.B. 342
 Westerweel, J. 348
 Weyl, Hermann 39
 Wheeler, John 353
 White, E.B. 349
 White, M. 336
 Whitney, C.A. 65
 Widmer-Schmidrig, R. 342
 Wienerroither, Peter 354, 395
 Wierda, Gerben 391
 Wierzbicka, Anna 331, 391
 Wijk, Mike van 391
 Wilder, J.W. 373
 Wiley, Jack 345
 Wilhelm Bessel, Friedrich 102
 Wilhelm von Leibniz, Gottfried 62
 Wilkie, Bernard 334
 Williams, G.E. 335

W

WILSON

Wilson, B. 343
Wisdom, J. 340
Wise, N.W. 313
Wittgenstein, Ludwig 15, 23,
25, 38, 64, 86, 164, 168, 267
Wittlinger, M. 337
Wittlinger, Matthias 119
Wolf, H. 337
Wolfsried, Stephan 393
Wolpert, Lewis 328
Wright, Joseph 392
Wulfila 292

Y

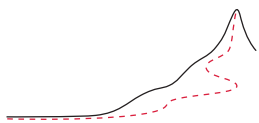
Yamafuji, K. 344
Young, Andrew 391
Young, Thomas 82
Yourgray, Wolfgang 341

Z

Zabusky, N.J. 342
Zabusky, Norman 219
Zaccone, Rick 392
Zakharian, A. 335
Zalm, Peer 391

Zanker, J. 330
Zedler, Michael 391
Zeilinger, A. 350
Zhao, C. 351
Ziegler, G.M. 46
Zimmermann, H.W. 346
Zimmermann, Herbert 264
zoo de Naples 393
Zweck, Josef 336
Zénon d'Élée 14, 16, 52, 62
Zürn, W. 342





INDEX DES SUJETS



Les numéros de page en caractères *italiques* se réfèrent aux pages où le mot-clé est défini ou présenté en détail. L'index des sujets joue donc le rôle d'un glossaire.

Symboles

(296
) 296
+ 296
- 296
· 296
× 296
: 296
< 296
= 296
> 296
≠ 296
 $\sqrt{\quad}$ 296
 ∇ 296
 Δ 296
 ∞ 296

A

@ (arobase) 295
a (année) 34
Abeilles à miel 77
aberration 94, 102
abjad 293
absolu, espace 97
abugida 293
abélien ou commutatif 193
Academia del Cimento 58
accents, dans la langue
grecque 292
accumulation 248
accélération 63
accélération angulaire 88
accélération centrifuge 112, 122
accélération de Coriolis 96,
335, 369

accélération de marée 137
accélération gravitationnelle,
standard 63
accélérations, maximales 110
accéléromètre 355
acier 245
acier inoxydable 246
aciers austénitiques 245
aciers ferritiques 245
aciers martensitiques 245
Acinonyx jubatus 33
acteurs 322
action 174, 197
action physique 173
action, principe de moindre
129
action, quantum 263
actionneurs 159
activité 19
activité tectonique 132
addition 193
additivité 32, 37, 41, 78
additivité de l'aire et du
volume 45
ADN 43, 311
ADN (humain) 185
adénosine triphosphate 334
affaire Roswell 223
âge de la Terre 317
âge de la Voie lactée 318
âge du Soleil 318
agrégats de matière 182
aiguille sur l'eau 243
aiguilles d'une horloge 50
ailes 237

air 385
Airbus 356
alchimie 30
Aldébaran 66, 186
aleph 293
Alice au pays des merveilles –
De l'autre côté du miroir
264
Alpes 128, 151
Alpha du Centaure 186
alphabet 292
alphabet cyrillique 292
alphabet gotique 292
alphabet grec 291
alphabet hébreu 293
alphabet latin 289
alphabet phonématique 293
Alphabet Phonétique
International 289
alphasyllabaires 293
Altair 185
aléatoire 165
amas de galaxies 184
Amazone 101, 221
âme 107
amortissement 158, 206, 212
amour 125
amplitude 208
ampoule, température 252
ampère 300
analemme 147
anges 19, 71
angle 88
angle apical 363
angle de mélange électrofaible

A

ANGLE

- 314
 angle zénithal 122
 angle, plan 52
 angle, solide 52
 angles dièdres 46
 angles entre les osselets 53
 anneaux, astronomiques, et marées 137
 année tropicale 315
 année, nombre de jours 138
 année-lumière 315
 Antarès 66, 186
 anti-bulles 243
 anti-hermitienne 195
 anti-unitaire 195
 antigravité 134, 143
 antimatière 79
 Antiqua 292
 antisymétrie 195
 aphrophore 63
 aphélie 318
 API 289
 aplatissement de la Terre 94
 apogée 317
 Apollo 376
 appareil photographique 52
 apprentissage 23
 apprentissage de la mécanique 157
 apprentissage, meilleure méthode 9
 approximation du continu 66
 arbre 311
 arbre, croissance 187
 arbre, généalogie 25
 arbre, hauteur limite 230
 arbres 230
 arbres et pompage de l'eau 343
 arc-en-ciel 198
 arche de Saint Louis 363
 archipallium 329
 arcs de vin 282
 Arcturus 186
 argent, définition humoristique 380
 argon 385
 Aristote 374
Armillaria ostoyae 43, 77
 arobase 295
 arrangements compacts de cercles 363
 arrière-plan 24, 25, 39
 artefact 68
 artilleurs et l'effet Coriolis 96
 artéfact 301
 arènes 38
 ascenseur spatial 244
 ash 290
 aspirées 292
 associativité 193
 astre, âge 35
 astres sombres 185
 Astrid, un atome 343
 astrologie 130, 147
 astronomes, les plus petits connus 132
 astronomy picture of the day 325
 astrophysique 321
 astéroïde 146
 astéroïdes 149, 186
 astéroïdes troyens 135
 atmosphère de la Lune 272
 atomes 233
 atomes, manipulation un à un 233
 atomique, microscope à force 234
 Atomium 247
 ATP 80, 334
 atto 302
 attraper la banane 90
 auto-adjointe 195
 auto-organisation 172
 auto-similarité 44
 avancée du périhélie 104, 134
 avant Jésus-Christ 298
 avions 76
 avions en papier 325
 axe de la Terre 103
 axe de la Terre, mouvement 101
 axe, impossible chez les êtres humains 366
 axe, Terre 103
 azote 239
 aînés 322
B
 Babylone 297
 Babyloniens 152
 bactérie 85
 bactéries 68
 baignoire, tourbillon 335
 balais 143, 381
 Balance 147
 balance 106, 245
 balance de salle de bains 106
 Baleine 147
 baleines 222, 224
 balle de cricket 359
 balle de ping-pong 111
 balles de golf 359
 ballons 258
 bandes dessinées 244
 barre de chocolat 227
 barycentre 149
 bases de lancement de fusées 110
 basilic 118
Basiliscus basiliscus 117, 118
 bateau 80
 bateau en papier, compétition 240
 bateaux, vitesse critique 222
 Beaufort 33
 beauté 17, 275, 279
 beauté, origine 275
 becquerel 302
 beer 243
 beth 293
 biche 23
 billard 75
 bimorphes 159
 biographies de mathématiciens 324
 biologie 159
 biologie quantitative 321
 Bip Bip 244
 BIPM 300, 301
 bismuth 35
 bobine 18
 Boraginaceae 190
 bouchon 80, 109
 bougie 28, 273
 boulier 294
 bouteille 80, 109

B

BOUTEILLE

bouteille de vin 80, 109
 bouteille pleine 171
 bouton futur 265
 boîtes de conserves de petits
 pois 114
 brebis, grec 292
 bruit 259
 bruit de grenaille 232
 bruit, (physique) 217
 buissons épineux 67
 bulles 241
 Bureau International des
 Poids et Mesures 300
 Bélier 147
 Bételgeuse 65, 186

C

c. 298
 cadrans solaires 38
 cailloux 65
 calcul des variations 180
 calcul lunaire 122
 calendrier 297, 298
 calendrier grégorien 298
 calendrier julien 297
 calendrier lunaire 35
 calendrier moderne 298
 calorie 310
Calpodes ethlius 60
 camarades 322
 caméscope 264
 canal sonore 222
 canards, nage 222
 Cancer 147
 candela 300
 Canopus 185
 canoë-kayak 118
 Capella 186
 Capricorne 147
 capture, gravitation
 universelle 149
 cartésiennes 42
Cataglyphis fortis 119
 caténaire 363
 causale 165
 causalité du mouvement 165
 cavitation 110
 ceinture de Kuiper 148, 184
 Celsius 250
 centi 302
 centre de gravité 146
 centre de masse 88, 146
 centre galactique 105
 cerveau 271
 cerveau et physique, paradoxe
 287
 Cetus 147
 chaleur 254
 chaleur & pression 159
 champ gravitationnel 127
 chandelle 307
 changement 25
 changement d'esprit 20
 chaos 278, 279, 280, 280
 chapitre, symbol 297
 charge 200
 charge de Noether 200
 charge du positron 313
 charges, petites 240
 charrette orientée vers le sud
 170
 chat 80
 Chaussée des Géants 47
 chaînette 54
 chenilles 60
 cheval-vapeur 85
 cheveux, diamètre 43
 chiffres arabes 294
 chiffres indiens 294, 294
 Chimborazo, mont 128
 chimie 286
 chocolat 239
 chocolat, ne dure pas pour
 toujours 228
 Chomolungma, Mont 242
 Chomolungma, mont 128
 chute 122
 chute d'une averse 60
 chute de la Lune 122
 chute et envol sont
 indépendants 58
 chute libre non verticale 95
 chute libre, vitesse 33
 chute parabolique 59
 chutes du Niagara 281
 ciel, en déplacement 101
 cinglés 325
 cinématique 57, 155

cinématique, viscosité 283
 cinétique, moment 88
 circalunaires 132
 circonspection 317
 circulation sanguine 67
 citations mathématiques 325
 claquement du fouet 245
 classique, mécanique 155
Clunio 132
 Coca Cola Light 243
 CODATA 351
 coefficient de traînée 161, 286
 coin, film inférieur gauche 24,
 25
 collisions 81, 159
 Commission Internationale
 des Poids et Mesures 300
 commune, mouche 125
 compacité 37, 41
 complexes, écritures 293
 complexité 263
 complétude 37, 41, 78
 comète 133
 comète, de Halley 133
 concaténation 192
 concepts 287
 conditions initiales 163
 configuration 25
 Conférence Générale des
 Poids et Mesures 300, 311
 connaissance, définition
 humoristique 380
 conservatifs 160
 conservation 78, 205
 conservation de l'énergie 84,
 128, 201
 conservation de la masse
 implique conservation de
 la quantité de mouvement
 76
 conservation de la quantité de
 mouvement 79
 conservation de la quantité de
 mouvement découle de la
 conservation de la masse
 76
 conservation du moment
 cinétique 129
 consommation de carburant

C

CONSOMMATION

- 286
 consommation énergétique
 des premiers pays du
 monde 84
 constance de la nature 16
 constante cosmologique 315
 constante de Boltzmann 258,
 259, 260, 263, 267, 314
 constante de couplage de
 Fermi 314
 constante de couplage fort 314
 constante de couplage gravit.
 314
 constante de Hubble 315
 constante de la loi du
 déplacement de Wien 315
 constante de Planck originale
 313
 constante de Planck réduite
 313
 constante de Rydberg 314
 constante de
 Stefan-Boltzmann 315
 constante de structure fine
 303, 314, 314
 constante du gaz parfait 250,
 388
 constante du ressort 206
 constante gravitationnelle 121
 constante magnétique 314
 constante électrique 314
 constellation du Serpenteaire
 147
 constellations 65, 147
 contenant 39
 continuité 23, 32, 37, 40, 41, 78,
 197
 contraintes 179
 contraintes anholonomiques
 179
 contraintes non
 holonomiques 179
 convection 256
 Convention du Mètre 300
 conversion de bits en entropie
 315
 coordonnées 41
 coordonnées généralisées 179,
 181
 coordonnées rationnelles 319
 Copernicus 334
 coquille, gravité intérieure 148
 corps 24
 corps connexes 67
 corps humain, émission de
 lumière 308
 corps, rigides 170
 corpuscule 65
 cortex 23
 cosmonautes 376
 cosmos 25
 couche d'Ekman 335
 couche limite 380
 couleur blanche ne persiste
 jamais 255
 coulomb 302
 couple 88
 couples 196
 courbe de sinus 206
 courbes de Reuleaux 355
 courbure 51
 courir diminue le poids 144
 courir sur l'eau 337
 courriel 322
 course cycliste 72
 course en arrière 115
 court, instant 16
 CPT 203
 crackle 366
 crayon, invention 30
 criquets 117
 croissance 20, 172, 275
 croissance capillaire 33
 croissance d'un nodule de
 manganèse en plaine
 abyssale 33
 croissance des arbres 33
 croissance du lichen 33
 croissance humaine 33
 croyances 21
 création 16
 création du mouvement 79
 créature vivante, la plus
 grande 43
 crête d'onde 212
 cuillère 113
 cuisine 286
 culture de l'esprit 139
 cumulonimbus 222
 curiosité 18, 167
 curiosités 26
 curvimètre 44
 cycle 216
 cycle menstruel 338
 cycles menstruels 132
 cémentite 246
 césium 35
- D**
 ∂ 296
 dx 296
 daleth 293
 dame, circonspecte 180
 de vision nocturne, lunettes
 308
 degré Celsius 302
 degré de liberté
 thermodynamique 267
 degré, unité d'angle 302
 densité baryonique 316
 densité de photons 316
 densité lumineuse 308
 densité moyenne de la Terre
 317
 dents 275
 description 57
 descriptions, exactitude des
 287
 dessins en coins 24
 diagramme d'espace des
 phases 59
 diagramme d'espace des états
 59
 diagramme d'espace-temps 59
 diamant 188
 diamant, brisure 244
 Dieu 106, 118, 135, 328, 330
 diffraction 212
 diffusion 271, 273
 différentielle 61
 digamma 291
 dilatations 199
 dimensionalité 32, 41
 dimensions 40
 direction 32
 discernement 32
 disparition du mouvement 79

D

DISPERSION

- dispersion 212, 213
 dispositifs antigravitants 143
 disques durs, frottements 162
 dissipatifs 160
 dissipatifs, systèmes 162
 distance 43
 distance moyenne de la Lune 317
 distinction 37, 41, 78
 distinguer 23
 distribution gaussienne 261
 distribution, normale gaussienne 261
 divergence 126
 doctorat, s'amuser pendant 284
 DoLittle 180
 données solaires 325
 double personnalité 166
 dromion 225
 durée 35
 durée du jour, passé 35
 Dutch Balloon Register 395
 duvet 256
 dx 296
 dyadique, produit 296
 dynabee 115
 dynamique 155
 déca 302
 déci 302
 découpage des volumes 46
 Défi sur le stationnement 50
 défi, classement 9
 défi, niveau 9
 défis 9, 16, 18, 22-24, 26-31, 33-56, 58-64, 66-68, 70-72, 75, 76, 78-86, 88-92, 95-99, 102, 103, 105-116, 118-120, 122-138, 140-146, 148-151, 153-155, 157-159, 161, 163-171, 174, 175, 177, 179-184, 186-191, 193-201, 205, 206, 208-214, 216, 217, 220-225, 227, 228, 230, 231, 233, 235, 237-245, 247, 251, 253, 255-266, 268-276, 279-283, 286-288, 302, 303, 305-307, 310-313, 315, 317, 319, 330, 350, 352
 dégénérescence 271
 déjections 60
 délibéré, mouvement 160
 démarche 92
 déplacement 19
 déplacement d'un spermatozoïde 33
 déplacement des continents 33, 101
 déplacement du ketchup 33
 dérivée 61
 dérivée en un point 61
 détecteurs de mouvement 28
 déterminisme 165, 166, 281
 déviation de la lumière à proximité d'une masse 140
 dévonienne 138
E
 e.g. 298
 eau 343
 eaux mortes 209
 écart-type 286, 312
 échappement, vitesse 146
 échelle de longueur 273
 échelle de Mercalli 113
 échelle de température 345
 écho 213
 éclair 307
 éclair, vitesse 34
 éclaircissement lumineux 307
 éclaircissement énergétique 307
 écliptique 129
 écoulement 248
 écoulement de l'énergie 79
 écoulement de la quantité de mouvement 79
 écoulement du temps 38
 écriture 289
 écriture gothique 292
 écriture runique 290
 effet catapulte 145
 effet de fronde gravitationnelle 145
 effet de serre 257
 effet Josephson 301
 effet Leidenfrost 241
 effet papillon 280
 effet photoacoustique 270, 271
 effet Sagnac 99, 370
 effets magnétiques 159
 effets électriques 159
 effort 156
 eicosane 261
 élasticité 159
 électromagnétisme 125
 électronvolt 305
 Élée 232
 élément d'un ensemble 32, 37, 41, 78
 élément inverse 193
 élément neutre 193
 éléments 25
 éléphants 222, 275
 ellipse 123, 133
 émergence 281
 émergentes, propriétés 281
 émettre des ondes 213
 EMS98 113
 énergie 81, 82, 82, 158, 186, 197
 énergie cinétique 81, 95
 énergie d'une onde 211
 énergie d'une vague 224
 énergie de rotation 89
 énergie mécanique spécifique 365
 énergie potentielle 127
 énergie thermique 251
 énergie, généralisation d'échelle 197
 énergie, indépendance pour l'observateur 197
 enfance 33, 39
 énigme de Peirce 49
 énigme des horloges 50
 énigme du mouvement circulaire 54
 énigmes d'horloges 328
 ensembles, connexes 62
 entonnoir 241, 243
 entropie 249, 254, 287
 entropie, minimale dans la nature 263
 entropie, quantum 264
 entropie, état de plus haute 274
Epargyreus clarus 60, 332
 épauls 92

 EPIDERME

- épiderme 67
 éponymes 299
 épouse 333
 EPR 299
 épure d'Ackermann 361
 équation de Bernoulli 235
 équation de
 Davey-Stewartson 225
 équation de Korteweg-de
 Vries 219
 équation de Poisson 126
 équation différentielle 359
 équations d'évolution 164
 équations de Lagrange du
 mouvement 180
 équations de Navier-Stokes
 237
 équilibre 254, 256
 ères glaciaires 336
 erreurs aléatoires 312
 erreurs systématiques 312
 ESA 324
 escaliers 38
Escherichia coli 68
 espace 168
 espace blanc 297
 espace des configurations 59,
 59
 espace des phases 25, 163
 espace euclidien 41, 41
 espace galiléen 41
 espace indispensable 42
 espace vectoriel 64
 espace vectoriel euclidien 31,
 32
 espace vectoriel, euclidien 64
 espace vide 126, 211
 espace, absolu 41
 espace, ascenseur 244
 espace, physique 39
 espace, relatif ou absolu 42
 espace-temps 25
 espace-temps, relatif ou
 absolu 43
 essieu de roue, effet 366
 et al. 298
 étalon, pomme 311
 état 163
 état d'une masse ponctuelle,
 complet 163
 état de mouvement 26
 état, physique 26
 états 25, 168
 étendue 235
 étendus non rigides, corps 170
 éternité 81
 eth 290, 348
 ethel 290
 éthique 167
 Étoile polaire 185
 étoile à neutrons 184
 étoile, classes 185
 étoiles 65, 185
 être vivant, le plus lourd 77
 étude de l'urine 283
 étude de Shell 334
 étude des toilettes 283
Eucalyptus regnans 230
 évaporation 271
 événement 34
 Everest, Mont 242
 Everest, mont 128
 évier, tourbillon 335
 évolution 25
 évolution biologique 20, 275
 évolution cosmique 20
 exa 302
 exactitude 286, 312
 excentricité 134
 excentricité de l'orbite de la
 Terre 104
 exclusif 163
 existence des nœuds 41
 expansion 250
 expansion de l'univers 105
 expansions 199
 explosions nucléaires 222
 exposant de Lyapounov 280
 expérience du film d'huile
 229
 expérience du seau, Newton
 106
 extinction des feux 215
 extrême 177
- F**
 facteur Q 206
Falco peregrinus 33
- familiarité 23
 fantômes 26, 71
 farad 302
 faucon pèlerin 33
 faux 287
 femmes 132, 332
 femmes, dangers de leur
 observation 116
 femto 302
 feuille, chute 243
 feuilles d'arbre et rotation de
 la Terre 99
 Fiat Cinquecento 240
 figures en coins 24
 fil à plomb 47
 filament incandescent 252
 film en coin, inférieur gauche
 24, 25
 film saccadé 24
 film saccadé, explication 57
 fini 267
 flagelles 68
 flamme 28, 111, 269
 flocon de neige, chute 33
 flocons de neige 347
 flux d'entropie 256
 flux d'énergie 307
 flèche du temps 39
 flûte 206
 fonction delta 215
 fonction lagrangienne 175
 fonctions de Bessel 102
 force 76, 88
 force atomique, microscope
 372
 force centrale 76
 force centrifuge 128
 force de Coriolis 334, 369
 force de traînée 158
 force, définition 156
 force, physique 156
 force, usage de 156
 Ford et la précision 286
 formation du système solaire
 100
 forme 41, 65, 235
 forme de la Terre 146
 forme de tresses 283
 forme, optimale 161

F

FORMULATION

formulation par rayon 150
 formule de l'escalier 119
 formule de Stirling 271
 formules, ISO 348
 formules, les aimer 28
 forêt 23
 fouet, vitesse 33
 four à ciment 367
 foyer 365
 fractales 44, 63, 227
 frontières 70
 frottement 80, 158, 158, 255, 265
 frottement d'adhérence 158
 frottement dynamique 160
 frottement entre les planètes et le Soleil 81
 frottement planète-Soleil 81
 frottement Soleil-planète 81
 frottement statique 158, 161
 frottement, importance du 255
 frottements produits par les marées 138
 Froude, nombre critique 222
 fréquence 208
 fréquence de rotation 87
 fumée 260
 futhark 290
 futhorc 290, 292
 futur, bouton 265
 futur, déterminé 165
 futur, se rappeler 264

G

Gaia 280
 galagos 117
 galette, pure 234
 galette, silicium 234
 galvanomètre 159
 gaussienne, distribution 261
 gaz 258
 gaz parfait 250, 258
Gerridae 118
 giga 302
 gimel 293
 gnomonique 36
 gnomons 36
 Gondwana 101
 goutte 161

gouttes de pluie 161
 GPS 35
 gradient 125
 Grande Grèce 232
 grandes marées 138
 grandeurs 197
 gravitation 120, 159
 gravitation et mesures 287
 gravitationnelle, masse 140
 gravité à l'intérieur des coquilles de matière 148
 gravité, action réciproque 125
 gravité, centre de 146
 gravité, essentiel 150
 gray 302, 306
 grec, alphabet 291
 groupe de galaxies 184
 groupe, mathématique 193
 gruyère 227
 grâce 91, 284, 328
 Gulf Stream 335
 GUT 204
 guépard 33, 63
 guépards 117
 gymnastes 90
 gyroscope 97
 géants 230
 Gémeaux 147
 générateurs 200
 géocentrique, système 150
 géodésiques 162
 géoïde 128

H

hanches 92
 hareng, pet 223
 harmonique, mouvement 206
 hasard 165
 haut-parleur avec laser 270
 haut-parleur invisible 270
 hecto 302
 Helmholtz 84
 henry 302
 hermitienne 195
 hertz 302
Hesperidae 60
 heure 302
 Himalaya, âge 35
 hodographe 59, 122, 145

Hollywood, films 173, 227, 333
 hollywoodien 180
 holonomiques 180
 holonomiques-rhéonomiques 179
 holonomiques-scléronomiques 179
 homogénéité 37, 41
 homomorphisme 195
 Hooke 129
 hopi 331
 horloge 36, 81, 124
 horloge, actionnée par la pression de l'air 81
 horloge, permutation des aiguilles 50
 horloges 36, 168
 houppe 344
 Hubble, télescope spatial 325
 huile 80, 241
 humour 282
 humour, physique 325
 hydrogène atomique 309
 hyperbole 133
 hyperbolique 133
 Hébreu, alphabet 293
 hélice 366
 hélices dans la nature 67
 hélicité des escaliers 38
 hélicoptère 242
 hélicoptères 325
 héliocentrique, système 150
 hélium 184, 252, 271
 hélium, superfluide 240
 hérésie 229

I

i.e. 298
 ibid. 298
 IBM 395
 iceberg 77
 idem 298
 idéal 42
 Île de l'Expérience 20
 Ile de l'Expérience 15
 Ile,Expérience 15
 illico presto 81
 illimité 197

ILLUSION

illusion sur la taille de la Lune 53
 Illusions d'optique 325
 image 71
 images 25
 imaginer 191
 imprévisible 165
 impulsion 202
 impédance caractéristique du vide 314
 impénétrabilité 78
 impénétrabilité de la matière 30
 incertitude totale 312
 inclinaison de l'orbite de la Terre 104
 indice de réfraction 188, 382
 indices 292
 inductions 201
 indépendance des points de vue 190
 inertie 71
 inertielle, masse 140
 inf. 298
 infini 32, 37, 41, 78
 infini en physique 62
 infinitude 32, 37, 41
 infinitude, ouverture 78
 information 262
 information, effacement 271
 information, quantum 264
 informatique théorique 321
 infrasons 224
 injectif 195
 inoxydable, acier 246
 insecte claqueur 117
 insectes 132, 273
 instabilité 23
 instant 30, 34
 instant humain 35
 Institut Clay de mathématiques 237
 intensité lumineuse 307
 interaction 25, 156
 interférence 211
 interféromètre 76, 98
 interféromètres 310
 interféromètres en anneau 310
 Internet 321, 322

intervalles de temps 37
 intégration 45, 175
 invariance 78, 192
 invariance d'échelle 230
 invariance par translation 37, 41
 invisibilité des objets 66
 invisible, haut-parleur 270
 Io 138
 ionosphère, ombre 115
 irréductible 195
 irréversibilité du mouvement 165
 irréversibles 255
 isolé, système 257
 isomorphisme 195
 isotoméographe 98
Istiophorus platypterus 33
 italique 289

J
 jambe 124
 jauge, changement 192
 jerk 163, 366
 jeter 347
 jeu 21
 jeu d'échecs 27
 jouets, physique 325
 Joule 84
 joule 302
 jour intercalaire 297
 jour sidéral 315
 jour, longueur 138
 jour, unité de temps 302
 journée ensoleillée 307
 jours de la semaine, ordre des 153
 Jupiter 150, 185
 juristes 72
 Jésus 118

K
 k-calculus 355
 katal 302
 Kelvin 84
 kelvin 300
 kilo 302
 kilogramme 300
 kilogramme standard 73

kilotonne 83
 Klitzing, von – constante 315
 koppa 291
 képhir 185
L
 l'infini 16
 l'Épi 185
 l'état permet la distinction 26
 la variation d'orientation ne nécessite pas de toile de fond 90
 lacets 40
 lacets des chaussures 255
 lagrangien 175
 lagrangien non unique 180
 laminarité 235
 lancer 22
 lancer, importance du 22
 langues sur Terre 293
 largeur totale de la courbe à la moitié du maximum 312
 laser en anneau 335
 laser, haut-parleur 270
 latin 299
 Latin, alphabet 289
 le mouvement 25
 le mouvement est le changement d'état des objets 26
 le mouvement est le changement de position dans le temps 57
 le temps est ce que nous lisons sur une horloge 36
 le temps est déduit en comparant des mouvements 35
 Lego 233
 les atomes ne sont pas indivisibles 268
 librations 131
 libre arbitre 166
 ligne droite 51
 limicoles 337
 limite de Roche 379
 Lion 147
 litre 302
 livre et physique, paradoxe

L

LIVRES

287
livres 289
livres, information et entropie 262
logarithmes 130
« loi » de Bernoulli 241
« loi » de Listing 116
« loi » de l'attraction universelle 122
« loi » universelle de la gravitation 121
loi de Bode 152
loi de Laplace–Gauss 312
loi de Titius 152
loi normale 261
longueur 40, 43, 64, 288
longueur d'onde 209, 212
longueur d'onde de Compton 315
longueur d'onde de de Broglie 301
longueur de côte infinie 44
longueur de la côte 44
longueur gravitationnelle de la Terre 317
longueur, saut 332
lumen 302
luminosité 307
luminosité du Soleil 317
lumière 159
lumière, vitesse de groupe lente 330
Lune 122
Lune, atmosphère 272
Lune, chute 122
Lune, dangers 138
Lune, phases 150
Lune, taille angulaire 53
lunes de Jupiter 152
lunettes de vision nocturne 308
Lunokhod 376
lustre 124
lux 302, 307
lévitation 134
lézard 118

M

M82, galaxie 63

mach 76
machine 68
machine d'Atwood 375
machine à mouvement perpétuel 81
machines à café 255
magie 325
magnitude de Richter 112
magnétisation des roches 101
magnétisme 76
magnéton nucléaire 315
marbre, recouvert d'huile 80
marche 255
marche, robot 188
Mars 306
marée, accélération 137
marées 96, 132, 136, 335
marées et frottements 138
masse 73, 78, 158, 288
masse conservée 74
masse de Jupiter 318
masse de la Lune 317
masse de la Voie lactée 318
masse du Soleil 317
masse gravitationnelle 140
masse inertielle 71, 140
masse ponctuelle 65
masse, centre de 146
masse, galiléenne 78
masse, négative 78, 79
masse, équivalence entre gravitationnelle et inertielle 141
mater les jolies filles 115
math forum 324
mathématiciens 324
mathématiques 31, 321
matins, quiétude 222
matière 65, 71
matière en forme de coquille, gravité intérieure 148
matière, impénétrabilité 30
matrice, adjointe 195
matrice, antisymétrique 195
matrice, conjuguée complexe 195
matrice, orthogonale 195
matrice, réelle 195
matrice, symétrique 195

matrice, transposée 195
Mentos 243
Mercure 136
merde 60, 332
mesurable 32, 37, 41, 78
mesure 31
mesure de Banach 45
mesure de la vitesse d'une balle 49
mesure de la vitesse de la lumière 49
mesures 288
mesures et gravitation 287
MFA, microscope à force atomique 234
micro 302
microscope à force atomique 234, 235, 372
microscopes à force atomique 162
microscopes à force latérale 162
mile 303
milieu ambiant 24
milli 302
minimale, vitesse 27
minuscules comètes 148
minute 302, 318
minéralogie 324
miroir cosmique 325
moindre effort 187
mois 297
mole 300
molécules 233
moment 36
moment cinétique 87, 88, 112
moment cinétique, extrinsèque 88
moment cinétique, intrinsèque 88
moment d'inertie 87, 88, 198, 205
moment d'inertie, extrinsèque 88
moment d'inertie, intrinsèque 88
monde 14, 25
monocycle 72, 247
Montagne Mouvement 15

M

MORALE

morale 167
 mort 14, 81, 168, 200, 229
 morts 87
 moteur de fusée 159
 moteur flagellaire 85
 moteur à ultrasons 159
 moteur, linéaire 159
 moteur, électrostatique 159
 moteurs 159
 moteurs thermoacoustiques 274
 motif aléatoire 24
 mouches 24
 moulin solaire 159
 mouvement 21, 168
 mouvement brownien 261
 mouvement comme illusion 16, 17
 mouvement de l'œil 40
 mouvement dû aux particules 22
 mouvement et contorsion de forme 67
 mouvement et unités de mesure 301
 mouvement fluide stationnaire 235
 mouvement fondé sur le frottement 158
 mouvement harmonique 206
 mouvement n'existe pas 16
 mouvement perpétuel 79
 mouvement perpétuel, première et seconde espèce 81
 mouvement polaire 101
 mouvement relatif 24
 mouvement volontaire 164
 mouvement, manifestations 15
 mouvement, non-Fourier 330
 mouvement, passif 21
 mouvement, simple 22
 mouvement, supraluminique 265
 mouvement, volontaire 21
 mouvements passifs 164
 mouvements volontaires 158
 moyenne 180
 multiplet 193

multiplication 192
 munition, vitesse 33
 myosotis 189
 mystère 15
 mystère du mouvement 14
 mètre 300
 mécanique 155
 mécanique classique 155
 mécanique des fluides 170
 mécanique des milieux continus 171
 mécanique quantique 155, 321
 mécanique statistique 171
 méga 302
 mégatonne 83
 mémoire 27, 255
 mémoriser 23
 méridien 124
 Mésopotamie 289
 métallurgie 286
 métrique 32, 37, 41, 78
 météorites 224

N

nabla 296
 naines 185
 naines brunes 185
 nano 302
Nanoarchaeum equitans 185
 NASA 306
 NASA 325
 natation, olympique 222
 nature 25
 naturel 42
 navigateur 322
 navigation 80
 navire 77, 238
 navires et relativité 84
 Neptune 148, 150
 neutrino 235
 Newton 38
 newton 302
 NGC 2240 252
 Niagara 228
 Nit 308
 niveaux des défis 16
 nombre d'Avogadro 229, 314
 nombre de Loschmidt 229
 nombre de Reynolds 283

nombre infini de préfixes du SI 311
 nombres 197
 nombres réels 37, 41
 non-causalité 165
 nonius 54
 normale, loi 312
 normalité 351
 normalité de π 319
 norme 64
 notation exponentielle 51
 notation positionnelle 294
 notes de cours 324
 nuage d'Oort 148, 184
 nucléaire 159
 nucléon 235
 numérotation Olympique des années 298
 nutation 103
 néocortex 329

O

Ø 296
 objet 24, 32, 71
 objets 25, 168
 obliquité 103
 observables 26, 197
 observables, discrètes 197
 observations physiques 191
 obturateur 52
 octet 196
 océanographie 225
 odomètre 44
 œil 24
 office des montgolfières, hollandais 395
 ohm 302
 ombre de l'ionosphère 115
 ombre de la Terre 115
 ombre de la Terre pendant une éclipse 122
 ombre des cadrans solaires 38
 ombres 70, 333
 ombres et attraction des corps 150
 onde statique 213
 onde, harmonique 208
 onde, linéaire 208
 onde, réflexion 211

O

ONDE

onde, sinusoïdales 208
 ondes de choc 225
 ondes de gravité 210
 ondes de tension superficielle 210
 ondes solitaires 218
 ondes, eau 210
 ondes, longitudinales 209
 ondes, transverses 209
 op. cit. 298
 Ophiuchus 147
 opérateur 126
 opérations de symétrie 192
 opérations à poitrine ouverte 385
 or 357
 ordinateurs 271
 ordre 37, 41, 78, 275
 oreille 40, 43, 213, 232, 342
 organisations croyantes 71
 originalité 26
 origine, humain 14
 Orion 65
 orthogonalité 64
 oscillation 206
 oscillation, harmonique ou linéaire 206
 oscillons 276
 osmose 159, 271
 otoacoustique 213
 OVNI 223
 oxygène 239

P

π et la gravité 123
 π , normalité de 318
 pain 229, 357
 parabole 54, 59, 123, 133
 parabolique 133
 parachutes 160
 paradoxe sur la physique des livres 287
 parallaxe 94, 102
 parallélépipède 89
 paramètre d'ordre 278
 parapluie 60
 pardon 22
 parenthèses 295
 paresse, universelle, loi de 177

paris, comment en gagner 98
 parsec 315
 particle data group 323
 particule 65
 particule ponctuelle 65
 parties 64, 266
 pascal 302
 passif, mouvement 160
 passim 298
 paupière 51
 peine de mort 229
 pendule 124
 pendule court 369
 perceuses à percussion 109
 perfectionné 294
 performance des jambes 117
 perles 244
 perlite 246
 permittivité diélectrique du vide 313
 perméabilité magnétique du vide 313
 pet comme moyen de communication 223
 petit pois, découpage 47
 petits pois 114
 petits pois ou raviolis 114
 phanérophyte, monopodiale 187
 phase 208, 209
Philaenus spumarius 63
 Phileas Fogg 180
 phot 308
 physiciens 323
 physique 14
 physique de la matière condensée 321
 physique des basses températures 259
 physique des dessins animés, 'lois' 70
 physique des milieux continus 247
 physique expérimentale des hautes énergies 321
 physique expérimentale nucléaire 321
 physique galiléenne 26, 30, 155
 physique générale 321

physique mathématique 321
 physique Newtonienne 30
 physique newtonienne 155
 physique numérique des hautes énergies 321
 physique phénoménologique des hautes énergies 321
 physique théorique des hautes énergies 321
 physique théorique nucléaire 321
 physique, définition périmée 21
 physique, problèmes 323
 physique, quotidien 26
 piccolissimi quanti 229
 pico 302
 pics de glace 245
 pied 241
 pierre celtique 113
 pierres 22, 34, 58, 60, 80, 95, 113, 121, 123, 143, 145, 153, 214, 223, 255
 pigeons 92
 pingouins 92
 piézoélectricité 159
 Planck, unités corrigées 305
 planète 81
 planètes extrasolaires 185
 planètes gazeuses 185
 planétoïdes 184, 186
 platitude 48
 plomb 240
 pluie, chute 33
 plus petit temps mesuré 35
 plus petite distance vérifiée expérimentalement 51
 Pluton 148
 plèvre 385
 pneumothorax 385
 poids 140, 158
 poids de la Lune 151
 point d'exclamation 295
 point focal 365
 point, mathématiques 41
 points 30, 66
 points de Lagrange 135
 points de libration 135
 points de vue 189

P

POINTS

points spatiaux 66
 Poissons 147
 poissons, yeux 242
 polarisation 212
 pomme étalon 311
 pommes 72
 pommiers 311
 ponctuel pour l'œil nu 66
 pop 366
 Pororoca 221
 position 25
 positions 64
 positivité 78
 potentiel, gravitationnel 125
 pouce 53
 poulie 159
 poulie composée 28
 pouls 124
 pralines 239
 pression 158, 232, 258
 pression de l'air 81
 pression sanguine 241
 principale découverte de la science moderne 265
 principe d'exclusion 183
 principe d'invariance de jauge 192
 principe de Bernoulli 258
 principe de Hamilton 173
 principe de Huygens 214
 principe de la trajectoire la plus courte 162
 principe de Mach 76
 principe de moindre action 129, 177
 principe de relativité 192, 356
 principe extrême 173
 principe variationnel 173, 177
 prisme 333
 prismes de Dove 333
 prix, un million de dollars 237
 prière, effets 186
 problème du mois en maths 324
 problème à plusieurs corps 285
 problèmes auditifs 224
 problèmes de Fermi 268
 problèmes de physique 323

processus 255
 processus, instantané 167
 Procyon 185
 prodiges 295
 prodiges du calcul 295
 produit de Kronecker 296
 produit du temps par la bande passante 216
 produit dyadique 296
 produit scalaire 41, 64
 produit tensoriel 296
 produit vectoriel 89
 profil aérodynamique 161
 promenade de Planck 309
 prononciation érasmiennne 292
 propriété immobile 72
 propriété invariante 189
 propriété mobile 72
 propriétés émergentes 281
 proton, âge 35
 protonvolt 306
 précession 103
 précession d'un pendule 97
 précession, équinoxes 101
 précision 18, 27, 31, 57, 286, 312, 313
 précision et plaisir 18
 préfixes 302, 350
 préfixes du SI 311
 préfixes, SI 302
 prépublications électroniques 321, 323
 pseudo-vecteur 112
 PSR 1257+12 185
 PSR 1913+16 35
 psychokinésie 21
 puces 117
 puissance 307
 puissance d'isolation 256
 puissance, définition humoristique 380
 puissance, physique 84, 157
 pulsar, période 35
 pulsation 213
 pyramide 89
 pèse-personne 245
 périgée 317
 périhélie 136, 318
 période 208

périodes glaciaires 103
 péta 302
 pôle Nord 38, 101, 128
 pôle Sud 128

Q
 quadruplets 196
 quantique, mécanique 155
 quantité de matière 74, 78
 quantité de mouvement 74, 79, 82, 158, 186, 211
 quantité de mouvement comme un liquide 156
 quantité de mouvement totale 74
 quantité de mouvement, écoulement 156
 quantités 197
 quantités conservées 16
 quantités extensibles 79
 quantités étendues 249
 quantités, conservées 16
 quantités, extensibles 79
 quantum d'entropie 264
 quantum d'information 264
 quantum de conductance 315
 quantum du flux magnétique 315
 quartz 207
 quasar 184
 qui glisse, échelle 109
 qui indique toujours le sud, charrette 341
 quiétude des matins 222

R
 R-complex 329
 radian 301
 radio speed 34
 radioactivité 306
 rang 198
 rapport de fréquence de Josephson 315
 rapport de masse proton-électron 315
 raviolis 114
 rayon classique de l'électron 315
 rayon de Bohr 315

R

RAYON

- rayon de la Lune 317
 - rayon de la Terre 317
 - rayon de Schwarzschild
 - comme unité de longueur 305
 - rayonnement 71, 256
 - rayons cosmiques 132
 - rayons de soleil 356
 - recherches 162
 - reconnaître 23, 23
 - recouvrement des impôts 300
 - rectitude 40, 47, 48
 - relation d'incertitude 216
 - relation d'incertitude de la thermodynamique 263
 - relation d'indétermination 216
 - relation d'indétermination de la thermodynamique 263
 - relations 25
 - relativité générale et cosmologie quantique 321
 - relativité restreinte avant quatre ans 191
 - relativité, principe galiléen 85
 - renversement d'espace 199
 - repos 17
 - repos, galiléen 61
 - reproductibilité 190
 - représentation 194
 - représentation des observables 198
 - représentations 193
 - ressort 206
 - ressources 322
 - Rigel 185
 - robinets d'eau 281
 - robot 341
 - robot, marche 188
 - roches sédimentaires 101
 - Rostock, Université de 240
 - rotation 90
 - rotation de la Terre 309
 - rotation de la Terre, variation 99
 - rotation des bras 105
 - rotation horaire 38
 - rotation, absolue ou relative 106
 - roue de Compton 98
 - roues chez les êtres vivants 67
 - roues en rotation 90
 - roues naturelles 68
 - roulette et mécanique Galiléenne 108
 - Rubik's Cube 223
 - rues 374
 - rugby 82
 - rythmes tidales 335
 - règle de la main droite 89
 - règle à calcul 129, 364
 - règles de calcul 55
 - règles graduées 168
 - réchauffement global 257
 - réipients 42
 - réductible 195
 - réflexion des ondes 211
 - réforme du Calendrier grégorien 55
 - réfraction 188, 212
 - référentiels 189
 - Régulus 185
 - réseau global d'infrason 224
 - résistance de l'air 161
 - réticence à tourner 87
 - réversibilité du mouvement 165
 - réversibles 255
 - rêves d'étoiles 325
- S**
- sable 276
 - Sagarmatha, mont 128, 242
 - Sagittaire 105, 147
 - saison 129
 - Salmonella* 68
 - sampi 291
 - san 291
 - sans dimension 314
 - satellite 66, 113
 - satellite, artificiel 66
 - satellites 149, 184
 - satellites géostationnaires 135
 - satellites observables 325
 - satellites Pioneer 63
 - Saturne 137, 149
 - saut 117
 - saut en longueur 60, 83, 332
 - savon, bulles 241
 - scalaire 190, 197
 - scharfes S 290
 - sciences non linéaires 321
 - Scorpion 147
 - seau 18
 - seconde 300, 302, 318
 - sections coniques 133
 - Sedna 148
 - semaine 297
 - sens de rotation sur la piste d'athlétisme 38
 - Sequoiadendron giganteum* 77
 - service au badminton, record 33
 - Service international de la rotation terrestre 309, 336, 338
 - Service international des latitudes 101, 336
 - sexe 14, 22, 125
 - sexisme en physique 233
 - sextant 337
 - sha 291
 - SI, unités 300
 - SI, unités supplémentaires 301
 - siemens 302
 - sievert 302, 306
 - significatif 18
 - Simon, Julia 333
 - simulateur du Système solaire 325
 - singulets 196
 - singulière 195
 - Sirius 66, 185
 - sirène 220
 - Sloan Digital Sky Survey 325
 - smash du badminton 359
 - smiley 295
 - snap 366
 - soirées, manque de quiétude 222
 - Soleil 77, 81, 150, 186
 - Soleil se lèvera vraiment demain 128
 - Soleil, arrêt 244
 - Soleil, taille angulaire 53
 - soliton 219
 - solitons 218

S

SONAR

sonar 225
 sonoluminescence 110
 soucoupes volantes 223
 source 126
 sources 126
 sous-marins 222
 sous-groupe 193
 spectre photoacoustique 271
 spineurs 197
 spirales d'Ekman 335
 spiritualité 167
 squark 391
 stalactite 245
 stalagmites 33
 stationnaire 177
 stationnaires 26
 stationnement de véhicule 50
 stigma 291
 Stoney, unités 305
 structures coopératives 278
 stéradian 301
 succession 34, 37, 41, 78
 sud, charrette orientée vers 170
 superamas galactique 184
 superfluidité 240
 supergéantes 186
 superlubrification 160
 supermarché 38
 supernovae 110
 superposition 211
 surf 221
 surface 40
 surface algébrique 325
 surjectif 195
 surprises 167, 201
 syllabaire 293
 syllabiques, alphabets 293
 symboles 295
 symétrie 192
 symétrie de permutation 192
 symétrie du lagrangien tout entier 198
 symétrie, basse 189
 symétrie, diagonale 195
 symétrie, discrète 192
 symétrie, externe 192
 symétrie, interne 192
 symétries de jauge 200

symétrique 189
 système célestiocentrique 358
 système d'unités de Heaviside-Lorentz 305
 système d'unités gaussiennes 305
 système d'unités électromagnétiques 305
 système d'unités électrostatiques 305
 système de numération grec 294
 système de numération romain 294
 système fermé 257
 système géocentrique 150
 Système géodésique mondial 318, 338
 système héliocentrique 150
 Système International d'Unités (SI) 300
 système isolé 255, 257
 système limbique 329
 système physique 26
 système solaire 184
 système solaire, avenir du 151
 systèmes conservatifs 179
 systèmes dissipatifs 162, 179, 278
 systèmes holonomiques 179
 systèmes simples 281
 systèmes, conservatifs 127
 séisme, déclenchement 244
 séismes 112, 336
 série arithmétique 354
 série géométrique 354

T

taille 39
 taille de la Lune, apparente 122
 taille de la Voie lactée 318
 taille des chaussures 311
 tantale 35
 taupin 117
 Taureau 147
 tectonique 336
 tectonique des plaques 101
 temps 26, 34, 168, 288
 temps absolu 37

temps crucial 37
 temps d'obturation 52
 temps des éphémérides 36
 temps galiléen 37
 temps local 35
 temps propre 36
 temps universel coordonné 35, 309
 temps, absolu 37
 temps, définition du 201
 temps, flèche 39
 temps, relatif ou absolu 42
 temps, écoulement 38
 température 249, 250, 250
 température absolue 250
 température du fond diffus micro-onde 316
 température la plus basse 251
 température, minimale dans l'univers 252
 tenseur 198, 198
 tenseur, ordre 198
 tension superficielle 161
 tensoriel, produit 296
 Terre 94, 256
 Terre vue de l'espace 325
 Terre, aplatie 94
 Terre, creuse 48
 Terre, découpage 47
 Terre, forme 128
 Terre, masse 125
 Terre, ombre 115
 Terre, plate 366
 Terre, rotation 309
 Terre, s'arrête de tourner 128
 Terre, vitesse 34
 Terre, âge 35
 tesla 302
 test du gorille pour les nombres aléatoires 165
 testicule 333
 thermodynamique 253
 thermodynamique, deuxième principe 271
 thermodynamique, premier « principe » de la 84
 thermodynamique, premier principe 253
 thermodynamique, principe

T

THERMODYNAMIQUE

zéro 250
 thermodynamique, relation
 d'incertitude 263
 thermodynamique, second
 « principe » de la 84
 thermodynamique, second
 principe 255
 thermodynamique, troisième
 principe 251
 thermométrie 345
 thermométrie acoustique 345
 thermométrie magnétique 345
 thermométrie à bruit 345
 thermométrie à rayonnement 345
 thermométrie à rayonnement
 optique 345
 thermostatique 253
 thorn 290, 290, 348
 thriller 180
 théière 241
 théorie de jauge 39
 théorie de la Terre concave 358
 théorie de la Terre creuse 48
 théorie du monde intérieur 358
 théorie quantique 24, 229
 théorème de Noether 200
 théorème de Pythagore 52
 théorème des axes parallèles
 de Steiner 88
 théorème ou paradoxe de
 Banach-Tarski 228
 théorème ou paradoxe de
 Banach-Tarski 46
 mesure du temps, idéal 36
 TNT, contenu énergétique 315
 tog 256
 tokamak 252
 Tokharien 333
 tonne 302
 topologie 41
 totale, énergie 127
 toucher 71
 tour de lumière 34
 tourbillon circulaire 284
 tourbillon dans une baignoire
 ou un évier 335
 tourbillon de baignoire 96

tourbillon en anneau 244
 tourbillonnement 105
 tourbillons 237
 tourbillons en anneaux
 imbriqués 244
 trajectoire 57
 trajectoire de la Lune autour
 du Soleil 145
 trajet 57
 transformations 20, 192
 transforme 80
 transformée de Fourier 224
 transformée en ondelettes 224
 translation du temps 199
 transport d'Ekman 335
 transsubstantiation 229
 travail 82, 95, 179
 travail, physique 157
 tremblement de terre 112, 368
 tremblement de terre,
 déclenché par les hommes 244
 tremblements de terre 112, 132, 336
 triboscopes 162
 tronc cérébral 23
 trous 26
 trous noirs 165
 troyen, astéroïde 135
 trépied 159
 tsunami 210
 tube de Compton 98
 tube de Venturi 237
 tube à tourbillons 274
 tube à tourbillons de
 Ranque-Hilsch 273
 TUC 35
 tunnel à travers la Terre 153
 turbulence 237, 281
Tyrannosaurus rex 118
 télescope 221
 télépathie 186
 téléphone, vitesse 34
 téléportation 80
 télévision 23
 témoignage 333
 téra 302
 tétraèdre 52, 89

U

udeko 302
 udekta 302
 UICPA 351
 UIPPA 351
 unicité 37, 41
 Unicode 293
 Union Géodésique et
 Géophysique
 Internationale 318
 unitaires 195
 unité 256, 300
 unité astronomique 315
 unités 41
 unités astronomiques 152
 unités de base 300
 unités de Planck corrigées 305
 unités de Stoney 305
 unités naturelles de Planck 303
 unités SI 312
 unités, non SI 303
 unités, véritables naturelles 305
 univers 25, 164
 univers bidimensionnel 56
 univers, bidimensionnel 56
 univers, description par la
 gravitation universelle 142
 universalité de la gravitation 135
 universelle, paresse, principe
 de 169
 URL 322
 UseNet 322
 UTC 35

V

vagues 210
 vagues océaniques, les plus
 hautes 220
 vagues, courtes 210
 vagues, longues 210
 vagues, peu profondes 210
 vagues, profondes 210
 vagues, vitesse de groupe 222
 valeurs propres 195
 variables 26
 variance 312
 variation de la quantité de

V

VARIATION

- mouvement 156
- variation de la rotation de la Terre 99
- Varuna 184
- vecteur 64, 198
- vendeko 302
- vendekta 302
- vernier 54
- verre 242
- Verseau 147
- vide 233
- vide, exposition humaine 111
- vie, la plus courte 35
- vieille dame circonspecte 180
- Vierge 147
- vin 229
- vis viva 81
- vision aristotélicienne 157
- vitesse 61, 208, 288
- vitesse angulaire 87, 88
- vitesse comme une dérivée 62
- vitesse d'oiseau 33
- vitesse d'échappement 146
- vitesse de l'électron 33
- vitesse de la lumière à l'intérieur du Soleil 33
- vitesse de la Terre dans l'univers 105
- vitesse de lancer, record 50
- vitesse de marche 124
- vitesse de rotation 87
- vitesse du lancer, record 33
- vitesse du signal nerveux 33
- vitesse du son 33, 76, 99
- vitesse galiléenne 31
- vitesse infinie 288
- vitesse n'est pas Galiléenne 32
- vitesse propre 34
- vitesse, la plus élevée 34
- voiles 237
- voilier 33
- voiture, poids 259
- volcans 336
- volt 302
- volume 46
- voyage dans l'espace 110
- voyages dans le temps 105
- Vulcain 136
- Vulcanoïdes 186
- Véga 185
- Véga au pôle Nord 101
- véhicules 286
- vélaires 291
- véliplanchistes 90
- vélo 71
- vélo, poids 259
- vélocimètre 355
- vérifier 191
- W**
- watt 302
- waw 291
- weber 302
- Weib 332
- weko 302
- wekta 302
- Wirbelrohr 273
- WMAP 376
- world question center 325
- World Wide Web 322
- wyn 290
- X**
- xenno 302
- xenta 302
- Y**
- yeux des poissons 242
- Yo-Yo 123
- yocto 302
- yogh 290
- yot 291
- yotta 302
- Z**
- zepto 302
- zetta 302
- zippo 280
- Zodiaque 129
- zénith 113
- zéro 294

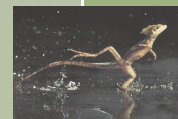


LA MONTAGNE MOUVEMENT

L'Aventure de la Physique – Vol. I

Chute, Flux et Chaleur

Pourquoi le changement et le mouvement existent-ils ?
Comment l'arc-en-ciel se forme-t-il ?
De tous les voyages possibles, lequel est le plus fantastique ?
L'« espace vide » est-il réellement vide ?
Comment pouvons-nous faire léviter des objets ?
À partir de quelle distance entre deux points
devient-il impossible d'en intercaler un troisième ?
Que signifie « quantique » ?
Quels problèmes demeurent sans réponse en physique ?



En répondant à ces questions ainsi qu'à d'autres sur le mouvement, cette collection constitue une introduction à la physique moderne qui se veut divertissante tout en mettant l'esprit à l'épreuve, chaque page proposant une surprise ou un défi à l'imagination.

En partant de la vie quotidienne, cette aventure donne un aperçu des derniers résultats en mécanique, thermodynamique, électrodynamique, relativité, mécanique quantique, gravité quantique et leur unification. Ce texte s'adresse aux étudiants du premier cycle universitaire et à tous ceux qui s'intéressent à la physique.

Christoph Schiller, titulaire d'un doctorat de l'Université Libre de Bruxelles, est physicien et vulgarisateur de la physique.

