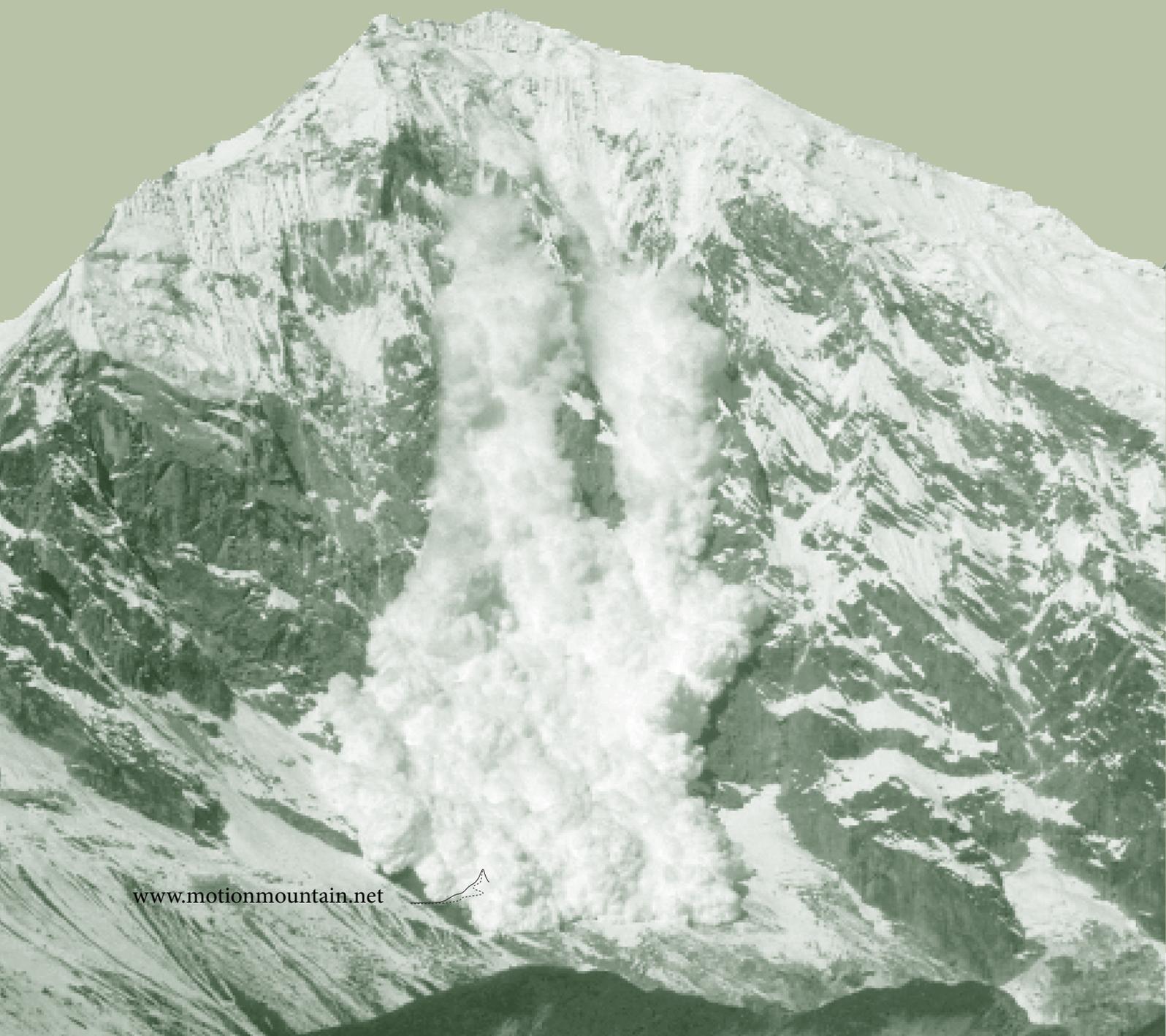


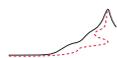
Christoph Schiller

LA MONTAGNE MOUVEMENT

L'AVENTURE DE LA PHYSIQUE – VOL. III

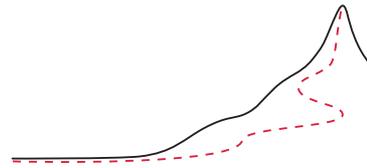
LUMIÈRE, CHARGES ET CERVEAU





Christoph Schiller

LA MONTAGNE MOUVEMENT



L'Aventure de la Physique
Volume III

Lumière, Charges et Cerveau

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.

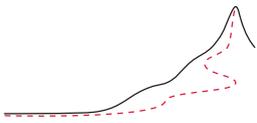


Ce fichier pdf est distribué sous licence Creative Commons
Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 3.0 Allemagne
dont le texte peut être consulté en intégralité sur la page
creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/deed.fr,
avec la restriction supplémentaire que toute reproduction,
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 celles que nous rencontrons lors de l'exploration de tout phénomène électrique. Cette histoire recouvre un vaste domaine qui va de la pesée du courant électrique, de l'utilisation des champs magnétiques, de la cicatrisation d'une fracture jusqu'à la compréhension du cerveau humain.

Dans le panorama de la physique, indiqué sur la [Figure 1](#), le mouvement engendré par l'électricité représente l'aspect le plus récent et le plus fascinant de notre point de départ. En vérité, presque tout, autour de nous, est dû à des processus électriques. Le présent volume – le troisième 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.

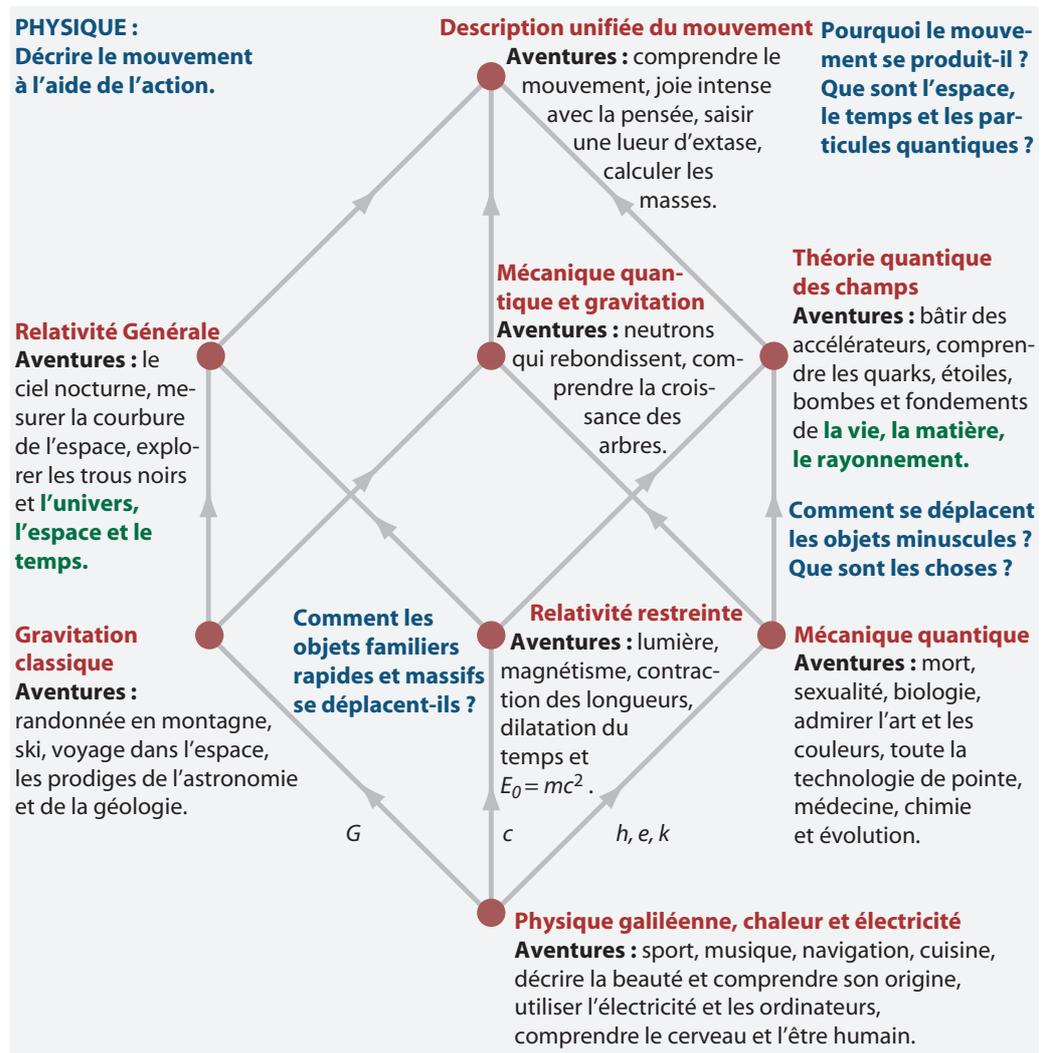


FIGURE 1 Une carte complète de la physique : les connexions sont définies par la vitesse de la lumière c , la constante de la gravitation G , la constante de Planck h , la constante de Boltzmann k et la charge élémentaire e .

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.

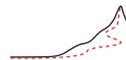
Les indices et solutions des *défis* sont donnés dans l'annexe. Les défis sont classés ainsi : niveau recherche (r), difficile (d), niveau étudiant standard (s) et facile (e). Les défis des types r, d ou s pour lesquels aucune solution n'a encore été incorporée dans le livre sont marqués (pe).

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 ?

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 !



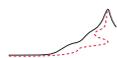


TABLE DES MATIÈRES

- 14 1 ÉLECTRICITÉ LIQUIDE, CHAMPS INVISIBLES ET VITESSE MAXIMALE
L'ambre, la pierre magnétique et les téléphones portables 15 • Comment peut-on reproduire l'éclair ? 18 • Charge électrique et champs électriques 21 • Pouvons-nous déceler l'inertie de l'électricité ? 26 • Subir les effets des champs électriques 29 • Aimants 30 • Les hommes peuvent-ils ressentir les champs magnétiques ? 31 • Comment pouvons-nous concevoir un générateur ? 32 • Champs magnétiques 34 • Champs électromagnétiques et Lagrangiens 38 • Comment les générateurs démontrent que la relativité est juste 39 • Trois réalités fondamentales concernant l'électricité 41 • Curiosités et défis amusants sur les objets électriques et magnétiques 42
- 53 2 DESCRIPTION DE LA DYNAMIQUE DU CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE
Collisions de particules chargées 56 • Le champ de jauge – potentiel vecteur du champ électromagnétique 57 • Énergie, quantité de mouvement et moment cinétique du champ électromagnétique 61 • Le lagrangien de l'électromagnétisme 62 • Symétries – le tenseur énergie-impulsion 63 • Qu'est-ce qu'un miroir ? 64 • Quelle différence y a-t-il entre les champs électrique et magnétique ? 66 • L'électrodynamique aurait-elle pu être différente ? 67 • Le défi le plus tenace de l'électrodynamique 68 • Curiosités et défis amusants sur l'électrodynamique 68
- 70 3 QU'EST-CE QUE LA LUMIÈRE ?
Polarisation et électromagnétisme 75 • La lenteur des progrès en physique 84 • Un autre regard sur le rayonnement électromagnétique 84 • À quoi ressemble le monde lorsque nous chevauchons un faisceau lumineux ? 86 • La lumière voyage-t-elle toujours en ligne droite ? 86 • La focalisation de la lumière 92 • Pouvons-nous palper la lumière ? 93 • Guerre, lumière et mensonges 97 • Qu'est-ce que la couleur ? 97 • Jouons avec les arcs-en-ciel 100 • Quelle est la vitesse de la lumière ? – Rétrospective 102 • 200 ans trop tard – indices de réfraction négatifs 105 • Métamatériaux 106 • Signaux et prédictions 107 • L'éther existe-t-il ? 108 • Curiosités et défis amusants concernant la lumière 109
- 110 4 LES IMAGES ET L'ŒIL – L'OPTIQUE
Comment démontrer que vous êtes sacré 110 • Voyons-nous ce qui existe ? 110 • Comment produisons-nous des images de l'intérieur de l'œil ? 114 • Comment réalisons-nous des hologrammes et autres images tridimensionnelles ? 115 • Imagerie optique 116 • Pourquoi pouvons-nous nous voir ? 118 • La lumière comme arme ? 120 • Curiosités et défis amusants sur l'œil et les images 121 • Les charges sont discrètes – Les limites de l'électrodynamique classique 123 • À quelle vitesse les charges se déplacent-elles ? 124 • Curiosités et défis amusants sur les charges discrètes 125
- 127 5 EFFETS ÉLECTROMAGNÉTIQUES
L'éclair est-il une décharge électrique ? – L'électricité dans l'atmosphère 127 • Les boules de feu existent-elles ? 130 • La gravité fait-elle rayonner les charges ? 131 • Questions de recherche 132 • Lévitiation 134 • Matière, lévitation et effets électromagnétiques 137 • Curiosités et défis amusants sur les effets électromagnétiques 146
- 150 6 TOUR D'HORIZON SUR L'ÉLECTRODYNAMIQUE CLASSIQUE ET SES LIMITES

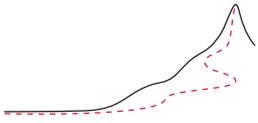
152	7	LA PHYSIQUE CLASSIQUE DANS UNE COQUILLE DE NOIX L'avenir de la planète Terre 154 • L'essence de la physique classique – l'infiniment petit et l'absence de surprises 156 • Pourquoi n'avons-nous pas encore atteint le sommet de la montagne? 157
159	8	L'HISTOIRE DU CERVEAU L'évolution et le cerveau 160 • Les enfants, les lois et la physique 161 • Électronique des polymères 164 • Pourquoi un cerveau? 165 • Qu'est-ce que l'information? 167 • Qu'est-ce que la mémoire? 168 • La puissance du cerveau 170
174	9	LA PENSÉE ET LE LANGAGE Qu'est-ce que le langage? 174 • Qu'est-ce qu'un concept? 178 • Que sont les ensembles? Que sont les relations? 180 • Infini 183 • Fonctions et structures 185 • Les nombres 186 • Pourquoi faire des mathématiques? 191 • Les mathématiques sont-elles un langage? 192 • Curiosités et défis amusants sur les mathématiques 193
196	10	CONCEPTS, MENSONGES ET MODÈLES DE LA NATURE Les concepts physiques sont-ils découverts ou inventés? 197 • Comment découvrons-nous les règles et les modèles de la physique? 199 • Qu'est-ce qu'un mensonge? 201 • Cette phrase est-elle vraie? 206 • Curiosités et défis amusants sur les mensonges 208
210		Observations Une quantité d'observations suffisante a-t-elle été relevée? 211 • Toutes les observables physiques sont-elles connues? 212 • Les observations prennent-elles du temps? 214 • L'induction est-elle un problème en physique? 215
217		La quête de précision et ses conséquences Que sont les interactions? – Aucune émergence 218 • Qu'est-ce que l'existence? 219 • Les choses existent-elles? 220 • Le néant existe-t-il? 221 • La nature est-elle infinie? 223 • L'Univers est-il un ensemble? 224 • L'Univers existe-t-il? 226 • Qu'est-ce que la création? 226 • La nature est-elle inventée? 228 • Qu'est-ce qu'une description? 230 • Motif, objectif et interprétation 231 • Unification et démarcation 232 • Les cochons, les singes et le principe anthropique 233 • Avons-nous besoin de causes et d'effets dans les explications? 235 • La conscience est-elle nécessaire? 236 • Curiosité 236 • Courage 239
241	A	UNITÉS, MESURES ET CONSTANTES Unités naturelles de Planck 244 • Autres systèmes d'unités 246 • Curiosités et défis amusants sur les unités 247 • Précision et exactitude des mesures 253 • Constantes physiques fondamentales 254 • Nombres utiles 259
261		BIBLIOGRAPHIE
283		INDICES ET SOLUTIONS DES DÉFIS
300		CRÉDITS Remerciements 300 • Crédits filmographiques 301 • Crédits photographiques 301





LUMIÈRE, CHARGES ET CERVEAU

Dans notre apprentissage du mouvement des objets, l'aventure de la randonnée et d'autres expériences nous conduisent à découvrir que des charges créent les images, qu'elles se déplacent, s'accroissent et interagissent, et qu'il existe une charge minimale dans la nature. Nous comprenons ce qui unit l'amour aux aimants et à l'ombre, pourquoi le cerveau est un instrument si intéressant, et ce qui distingue un bon mensonge d'un mauvais.



CHAPITRE 1

ÉLECTRICITÉ LIQUIDE, CHAMPS INVISIBLES ET VITESSE MAXIMALE

QU'EST-CE que la lumière ? La relativité nous a vraiment laissés sur notre faim, bien que nous ayons plongé dans celle-ci précisément pour découvrir une réponse à cette question. C'est vrai, nous avons appris comment le mouvement de la lumière se compare à celui des objets. Nous avons également compris que la lumière est une entité en mouvement qui ne peut pas être arrêtée, que celle-ci représente la vitesse limite pour tous les types d'énergie et qu'elle constitue notre étalon de mesure pour la vitesse. Cependant, nous n'avons rien appris concernant la nature de la lumière elle-même.

Une seconde question demeure ouverte : qu'est-ce que le *contact* ? Nous ne savons toujours pas. L'unique chose que nous avons apprise est que les interactions mécaniques n'existent pas. La réponse à ces anciennes interrogations n'émerge qu'avec l'étude des types de mouvement qui *ne* sont *pas* associés à la gravitation. Il apparaît que la compréhension des expédients dont usent les magiciens pour faire léviter des objets constitue la clé de ces réponses.

En revisitant la liste de toutes les forces motrices que nous rencontrons dans ce monde qui est le nôtre, nous remarquons que la gravitation a beaucoup de mal à décrire n'importe laquelle d'entre elles. Ni le mouvement des vagues océaniques, ni celui du feu et des séismes, ni celui d'une petite brise ne sont engendrés par la gravité. La même chose peut être affirmée concernant le mouvement des muscles. Avez-vous déjà écouté le battement de votre cœur avec un stéthoscope ? Si vous ne l'avez pas fait, vous ne pouvez prétendre avoir une intuition du mystère du mouvement. Votre cœur effectue environ 3 000 millions de battements au cours de votre vie. Et ensuite, il s'arrête.

Une des découvertes les plus bouleversantes de la science fut celle que les battements du cœur, les vagues océaniques et la majorité des autres cas de mouvements de la vie courante, de même que la nature de la lumière elle-même, ont un point commun avec les observations réalisées des milliers d'années auparavant concernant deux cailloux bizarres. Ces pierres montrent que tous les exemples de mouvement, qui sont qualifiés de *mécaniques* dans la vie quotidienne, sont, sans exception, d'origine *électrique*.

En particulier, la solidité, la malléabilité et l'impénétrabilité de la matière sont dues à l'électricité interne ; l'émission de la lumière est également un processus électrique. Puisque ces aspects représentent un pan entier de la vie quotidienne, nous laisserons de côté toutes les complications dues à la gravité et à l'espace-temps courbe. La manière la plus efficace d'étudier le mouvement électrique consiste à commencer, comme dans le cas de la gravité, avec les types de mouvement qui sont engendrés sans qu'il y ait le moindre contact entre les corps concernés.

Vol. II, page ??

Page 159

Défi 2 e

Réf. 1



FIGURE 2 Objets entourés par des champs : l'ambre (env. 1 cm), la pierre magnétique (env. 1 cm) et le téléphone portable (env. 10 cm). (© Philips)



FIGURE 3 Comment épater les enfants, particulièrement par temps sec. (photo © Robert Fritzius)

L'AMBRE, LA PIERRE MAGNÉTIQUE ET LES TÉLÉPHONES PORTABLES

L'histoire de l'électricité débute avec les arbres. Ceux-ci entretiennent une relation particulière avec l'électricité. Lorsque certains arbres sont coupés, une résine visqueuse apparaît. Avec le temps, elle se solidifie et, après des millions d'années, forme l'*ambre*. Lorsque l'ambre est frotté avec une fourrure de chat, il acquiert la capacité d'attirer des petits objets, tels que de la sciure de bois ou des bouts de papier. Thalès de Milet, l'un des sept sages originaux de la Grèce, le savait déjà au sixième siècle AV. J.-C. La même observation peut être réalisée avec de nombreuses autres combinaisons de polymères, par exemple avec des peignes et des cheveux, avec des semelles de chaussures sur de la moquette, ou avec un écran de télé et de la poussière. Les enfants sont toujours ébahis par l'influence, indiquée sur la [Figure 3](#), qu'un peigne frotté sur de la laine exerce sur un filet d'eau qui coule d'un robinet ouvert. Un autre effet captivant peut être observé lorsqu'un peigne frotté est placé près d'une bougie allumée. (Pouvez-vous imaginer ce qui se passe ?)

Défi 3 pe

Un autre chapitre de l'histoire de l'électricité concerne un minéral de fer déniché dans certaines cavernes dans le monde, plus précisément dans une région (toujours) appelée Magnésie et située dans la province grecque de Thessalie, et dans certaines régions d'Asie centrale. Lorsque deux pierres de ce minéral sont placées l'une à proximité de l'autre, elles s'attirent ou se repoussent, en fonction de leur orientation relative. De surcroît, ces

TABLEAU 1 Recherches de monopôles magnétiques, c'est-à-dire de charges magnétiques.

R E C H E R C H E	C H A R G E M A G N É T I Q U E
Charge magnétique minimale prévue par la théorie quantique	$g = \frac{h}{e} = \frac{eZ_0}{2\alpha} = 4,1 \text{ pWb}$
Recherche dans les minerais	aucune, dipôles seuls Réf. 2
Recherche dans les météorites	aucune, dipôles seuls Réf. 2
Recherche dans les rayons cosmiques	aucune, dipôles seuls Réf. 2
Recherche à l'aide d'accélérateurs de particules	aucune, dipôles seuls Réf. 2

pierres attirent des objets constitués de cobalt, de nickel ou de fer.

Aujourd'hui nous côtoyons également divers petits objets dans la nature qui possèdent des propriétés plus sophistiquées, comme l'indique la Figure 2. Certains objets vous permettent d'allumer la télévision, d'autres de déverrouiller les portières d'une voiture, d'autres encore vous permettent de discuter avec des amis éloignés.

Toutes ces observations montrent qu'il existe dans la nature des situations où des corps exercent une influence sur d'autres situés à une certaine distance. L'espace qui environne un corps exerçant une telle influence est dit contenir un champ. Un *champ (physique)* est donc une entité qui se dévoile elle-même en accélérant d'autres corps situés dans sa région de l'espace. Un champ est une certaine « étoffe » qui emplit l'espace. Des expériences démontrent que les champs n'ont pas de masse. Le champ entourant le minéral découvert en Magnésie est appelé un *champ magnétique*, et les pierres sont appelées des *aimants**. Le champ situé autour de l'ambre – appelé ἤλεκτρον en grec, d'après une racine signifiant « éclatant, brillant » – est appelé un *champ électrique*. Cette dénomination est due à une suggestion du célèbre Anglais partiellement physicien William Gilbert (1544–1603), qui était médecin de la reine Élisabeth I^{re}. Des objets entourés par un champ électrique permanent sont appelés des *électrets*. Ils sont beaucoup moins courants que les aimants ; ils sont utilisés, entre autres, dans certains systèmes de haut-parleurs**.

Le champ environnant un téléphone portable est appelé un champ *radio* ou, comme nous le verrons plus tard, un champ *électromagnétique*. Contrairement aux champs précédents, il oscille au cours du temps. Nous nous apercevrons plus tard que de nombreux autres objets sont entourés de tels champs, quoique ceux-ci soient souvent très faibles. Des objets qui émettent des champs oscillants, comme les téléphones portables, sont baptisés transmetteurs radio ou émetteurs radio.

Les champs influencent les corps à distance, sans aucun support matériel. Pendant longtemps, il a été difficile d'en trouver dans la vie courante, puisque la majorité des pays ont des lois qui restreignent les machines qui utilisent et produisent de tels champs. La législation exige que pour tous les appareils qui se déplacent, produisent du son ou créent des films, les champs restent confinés à l'intérieur de ceux-ci. C'est pour cette raison qu'un prestidigitateur qui fait bouger un objet sur une table au moyen d'un aimant dissimulé amuse et impressionne toujours son public. Pour ressentir plus fortement cette

* Le livre de JAMES D. LIVINGSTON, *Driving Force – the Natural Magic of Magnets*, Harvard University Press, 1996, est un merveilleux livre consacré à l'histoire du magnétisme et aux exaltations qu'il a suscitées.

** L'effet Kirlian, qui nous permet de réaliser de façon intrigante des photographies magnifiques, est causé par un champ électrique variable dans le temps.

TABLEAU 2 Quelques champs magnétiques observés.

OBSERVATION	CHAMP MAGNÉTIQUE
Champ magnétique mesuré le plus faible (ex. les champs des résonances de Schumann)	1 fT
Champ magnétique produit par les courants dans le cerveau	0,1 pT à 3 pT
Champs magnétiques intergalactiques	1 pT à 10 pT
Champ magnétique dans la cage thoracique humaine, dû aux courants cardiaques	100 pT
Champ magnétique produit par les muscles	...
Champ magnétique de notre galaxie	0,5 nT
Champ magnétique dû au vent solaire	0,2 à 80 nT
Champ magnétique situé directement sous une ligne électrique à haute tension	0,1 à 1 μ T
Champ magnétique terrestre	20 à 70 μ T
Champ magnétique dans un domicile ayant l'électricité	0,1 à 100 μ T
Champ magnétique près d'un téléphone portable	100 μ T
Champ magnétique qui détermine la qualité des images visuelles dans l'obscurité	100 μ T
Champ magnétique près d'un aimant en fer	100 mT
Taches solaires	1 T
Champs magnétiques près d'un aimant permanent de haute technologie	max. 1,3 T
Champs magnétiques qui produisent la sensation du froid chez les êtres humains	5 T ou plus
Champs magnétiques engendrés dans un accélérateur de particules	10 T
Champ magnétique statique maximal produit avec des solénoïdes supraconducteurs	22 T
Champs magnétiques statiques les plus puissants produits en laboratoire, à l'aide d'aimants hybrides	45 T
Champs magnétiques <i>pulsés</i> les plus puissants produits sans destruction de la bobine	76 T
Champs magnétiques pulsés engendrés, pendant environ 1 μ s, en utilisant des bobines qui implosent	1 000 T
Champ d'une naine blanche	10 ⁴ T
Champs produits dans les pulsations laser pétawatt	30 kT
Champ d'une étoile à neutrons	de 10 ⁶ T à 10 ¹¹ T
Champ magnétique critique quantique	4,4 GT
Champ le plus puissant jamais mesuré, sur le magnétar et sursauteur gamma mou SGR-1806-20	0,8 à 1 \cdot 10 ¹¹ T
Champ près du noyau d'un atome	1 TT
Champ magnétique (de Planck) maximal	2,2 \cdot 10 ⁵³ T



FIGURE 4 L'éclair : une photographie prise avec un appareil photo en mouvement, exhibant ses multiples flashes. (© Steven Horsburgh)

fascination pour les champs, il est préférable d'examiner plus profondément quelques résultats expérimentaux.

COMMENT PEUT-ON REPRODUIRE L'ÉCLAIR ?

Chacun a déjà aperçu le flash d'un éclair ou a pu observer l'effet saisissant qu'il peut avoir sur un arbre. Manifestement, l'éclair est un phénomène qui se déplace. Des photographies telles que celle de la **Figure 4** montrent que la pointe du flash d'un éclair avance à une vitesse moyenne d'environ 600 km/s. Mais *qu'est-ce qui se déplace ?* Pour le découvrir, nous devons trouver une manière de reproduire l'éclair par nous-mêmes.

En 1995, la compagnie automobile General Motors redécouvrit accidentellement une méthode ancienne et simple permettant de faire cela. Ses ingénieurs avaient par inadvertance construit un mécanisme de création d'étincelles dans leurs véhicules : lors du remplissage du réservoir à essence, des étincelles étaient produites, lesquelles provoquaient parfois l'explosion du carburant. Ils durent rappeler 2 millions de véhicules de la marque Opel.

Réf. 3

Quelle erreur les ingénieurs avaient-ils commise ? Ils avaient dupliqué inconsciemment les conditions requises pour mettre en œuvre un dispositif électrique que chacun peut construire chez soi et qui fut inventé à l'origine par William Thomson* : le *générateur de Kelvin*. Pour renouveler son expérience aujourd'hui, il nous suffit de prendre

* William Thomson (1824–1907) fut un éminent physicien, fervent défenseur du parti unioniste irlandais et professeur à l'université de Glasgow. Il travailla sur la détermination de l'âge de la Terre, démontrant qu'elle avait beaucoup plus de 6 000 ans, contrairement à ce que pensaient plusieurs sectes. Il influença fortement le développement de la théorie du magnétisme et de l'électricité, la description de l'éther et de la thermodynamique. Il contribua à généraliser l'emploi du mot « énergie » au sens où il est utilisé de nos jours, à la place de termes confus plus anciens. Il fut un des derniers scientifiques à diffuser les analogies mécaniques pour l'explication des phénomènes, s'opposant ainsi vigoureusement à la description de Maxwell de l'électromagnétisme. Ce fut principalement pour cette raison qu'il ne reçut jamais le prix Nobel. Il fut également l'un des concepteurs de la pose du premier câble télégraphique transatlantique. Victorien dans ses tripes,

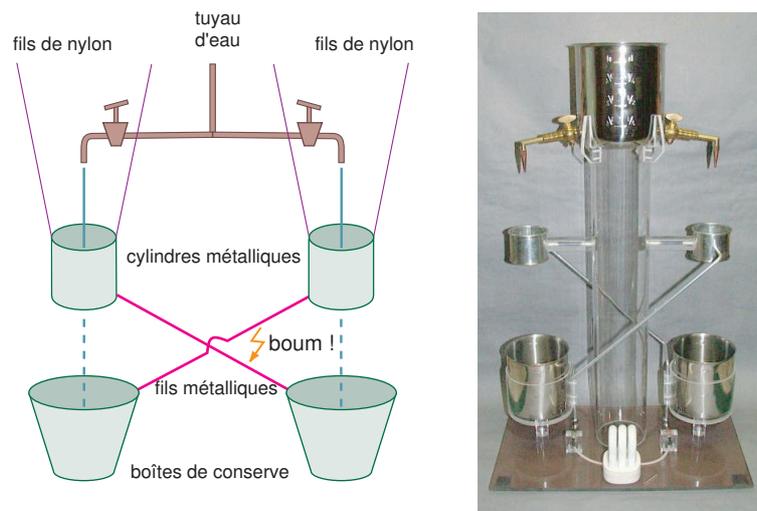


FIGURE 5 Un générateur de Kelvin élémentaire. (photographie © Harald Chmela)

deux robinets d'eau, quatre boîtes de conserve vides, que l'on doit ouvrir des deux côtés, un peu de fil de nylon et un morceau de fil métallique.

Réf. 4

En disposant tout cela comme indiqué sur la Figure 5 et en laissant couler l'eau, nous constatons un effet stupéfiant : de grandes étincelles se produisent de temps en temps entre les deux fils de cuivre à l'emplacement où ils sont le plus près l'un de l'autre, en émettant des bruits distincts. Pouvez-vous deviner quelle condition l'écoulement doit satisfaire pour que cela puisse marcher ? Et que fit Opel pour réparer les véhicules rapatriés ?

Défi 4 s

Si nous coupons les robinets juste avant que la prochaine étincelle se produise, nous remarquons que les deux récipients peuvent attirer de la sciure et des bouts de papier. Ce générateur agit donc de la même manière que l'ambre frotté, mais bien plus efficacement. Les deux récipients sont entourés de champs électriques. Le champ augmente avec le temps, jusqu'à ce que l'étincelle tressaille. Juste après celle-ci, les récipients sont (pratiquement) dépourvus de champ électrique. Évidemment, l'écoulement de l'eau fait que, d'une certaine manière, une entité s'accumule dans chaque récipient ; aujourd'hui nous appelons celle-ci la *charge électrique*. La charge peut s'écouler dans les métaux et, lorsque les champs sont suffisamment puissants, traverser l'air. Nous découvrons également que les deux récipients sont enveloppés par deux types distincts de champs électriques : les corps qui sont attirés par l'un des récipients sont repoussés par l'autre.

Toutes les autres expériences confirment qu'il existe *deux* types de charges. Benjamin Franklin (1706–1790), qui était un homme politique américain et également physicien, qualifiait l'électricité générée sur une baguette en verre frottée avec un linge sec de *positive*, et celle produite sur un morceau d'ambre de *negative*. (Auparavant, ces deux types de charges étaient qualifiés de « vitreux » et de « résineux ».) Des corps ayant des charges

il choisit, lorsqu'il fut anobli et fait chevalier, le nom d'un petit ruisseau qui coulait près de sa demeure comme nouveau nom, et devint baron Kelvin de Largs. C'est ainsi que l'unité de la température a tiré son nom d'une petite rivière écossaise.

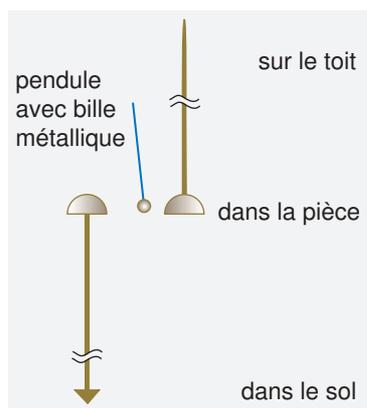


FIGURE 6 Le paratonnerre personnel de Benjamin Franklin.

de même signe se repoussent, des corps de charges opposées s'attirent, des charges de signe opposé s'écoulant ensemble s'annulent*.

En résumé, les champs électriques naissent des corps, pourvu qu'ils soient chargés. L'accumulation de charges peut être accomplie par le frottement et des processus similaires. La charge peut s'écouler : elle est alors appelée *courant* électrique. Les plus mauvais conducteurs du courant sont les polymères, ils sont qualifiés de matériaux *isolants* ou *diélectriques*. Une charge placée sur un isolant reste à l'endroit où elle a été positionnée. Au contraire, les métaux sont de bons conducteurs : une charge placée sur un conducteur se propage sur toute sa surface. Les meilleurs conducteurs sont l'argent et le cuivre. C'est la raison pour laquelle, en ce moment, après deux cents ans d'usage de la fée électricité, la plus forte concentration en cuivre du monde se trouve en dessous de la surface de Manhattan.

Bien entendu, nous devons vérifier si l'éclair naturel est véritablement d'origine électrique. En 1752, des expériences menées en France, d'après une recommandation de Benjamin Franklin publiée à Londres en 1751, ont montré que nous pouvons en réalité extraire de l'électricité d'un déluge d'éclairs, un jour d'orage, via une longue tige**. Ces expériences françaises rendirent Franklin mondialement célèbre ; elles constituèrent également le point de départ de l'utilisation des paratonnerres dans le monde entier. Plus tard, Franklin installa un paratonnerre dans sa propre propriété, mais d'un type quelque peu inhabituel, comme indiqué sur la Figure 6. Pouvez-vous deviner ce qu'il faisait dans sa pièce pendant l'orage, toutes les parties étant constituées de métaux ? (Ne reproduisez pas cette expérience : ce dispositif peut tuer.)

Réf. 5

Défi 5 s

* En réalité, il existe de nombreuses autres manières de produire des étincelles ou même des *arcs électriques*, c'est-à-dire des étincelles prolongées. Il existe même une frange entière de la population qui exerce chez soi ce passe-temps favori. Ceux qui possèdent un budget plus important le font de façon professionnelle, dans des accélérateurs de particules. Consultez le site Web www.kronjaeger.com/hv.

** Les particularités de la manière dont l'éclair est généré et de la manière dont il se propage constituent encore un domaine de recherches. Une introduction en est donnée à la page 127.

CHARGE ÉLECTRIQUE ET CHAMPS ÉLECTRIQUES

Si toutes les expériences avec la charge peuvent être expliquées en qualifiant les deux charges de positive et négative, cela suggère que certains corps possèdent plus de charges et d'autres corps moins de charges qu'un corps *neutre*, non chargé. L'électricité ne s'écoule donc que lorsque deux corps différemment chargés sont mis en contact. Maintenant, si la charge peut s'écouler et s'accumuler, nous devons être capables d'une manière ou d'une autre de mesurer sa quantité. Indubitablement, la *quantité* de charge qu'un corps possède, généralement notée q , est définie par l'intermédiaire de l'influence que ce corps, disons une particule de sciure de bois, ressent lorsqu'il est soumis à un champ. La charge est donc définie en la comparant à une charge standard de référence. Pour un corps chargé de masse m accéléré dans un champ, sa charge q est déterminée par la relation

$$\frac{q}{q_{\text{réf}}} = \frac{ma}{m_{\text{réf}}a_{\text{réf}}}, \quad (1)$$

c'est-à-dire en comparant ce corps avec l'accélération et la masse de la charge de référence. Cette définition reflète l'observation que la masse seule n'est pas suffisante pour caractériser complètement un corps. Pour une description complète du mouvement, nous avons besoin de connaître sa charge électrique : la charge est par conséquent la deuxième propriété intrinsèque des corps que nous découvrons dans notre promenade.

Actuellement, l'unité de la charge électrique, le *coulomb*, est définie par le truchement d'un écoulement standard à travers des fils métalliques, comme expliqué dans l'[Annexe B](#). C'est possible parce que toutes les expériences montrent que la charge est conservée, qu'elle s'écoule, qu'elle le fait de manière continue et qu'elle peut s'accumuler. La charge se comporte donc comme une substance fluide. Ainsi, nous sommes obligés d'employer une quantité scalaire q pour sa description, qui peut prendre une valeur positive, nulle ou négative.

En pratique, la charge électrique est mesurée par le biais d'*électromètres*. Quelques-uns de ces dispositifs sont présentés sur la [Figure 7](#). Des expériences menées à l'aide de ces appareils confirment avant tout que les charges s'écoulent et s'accumulent. Plus précisément, toutes les expériences indiquent que les charges sont conservées. Autrement dit, si la charge électrique d'un système physique change, la raison est toujours que de la charge s'écoule vers ou en dehors de ce système. Cela peut être facilement vérifié avec deux pots métalliques reliés à deux électromètres, comme indiqué sur la [Figure 8](#).

Réf. 6

Les principales propriétés expérimentales de la charge électrique qui ont été découvertes lors des expérimentations avec les électromètres sont listées dans le [Tableau 3](#). Ces propriétés décrivent le comportement des valeurs de la charge électrique. Cependant, comme dans le cas de tous les concepts classiques précédemment rencontrés, la majorité de ces résultats expérimentaux concernant la charge électrique se révéleront n'être qu'approximatifs. Des expérimentations plus précises nécessiteront une révision de plusieurs propriétés. Néanmoins, on remarque qu'aucun contre-exemple à la conservation de la charge n'a été observé jusqu'à maintenant.

Un objet chargé placé près d'un autre, neutre, le polarise. La *polarisation électrique* est la séparation entre les charges positives et négatives dans un corps. Pour cette raison, même les objets neutres, comme les cheveux, peuvent être attirés vers un corps chargé, comme un peigne. Généralement, les isolants et les conducteurs peuvent tous les deux



FIGURE 7 Divers électromètres : un électromètre artisanal basé sur un pot de confiture, un ancien électromètre Dolezalek (ouvert) de haute précision, les ampoules de Lorenzini d'un requin, et un électromètre numérique moderne. (© Harald Chmela, Klaus Jost - www.jostimages.com, Advantest)



FIGURE 8 Un dispositif simple pour confirmer la conservation de la charge électrique : si un chiffon frotté est déplacé du premier pot vers le second, la charge prélevée à partir du premier pot est transférée au second, comme l'indiquent les deux électromètres. (© Wolfgang Rueckner)

être polarisés ; cela se produit depuis les étoiles tout entières jusqu'aux simples molé-

TABLEAU 3 Propriétés de la charge électrique *classique* : une densité scalaire.

CHARGES ÉLECTRIQUES	PROPRIÉTÉ PHYSIQUE	DÉSIGNATION MATHÉMATIQUE	DÉFINITION
Peuvent être distinguées	discernement	élément d'un ensemble	Page 180
Peuvent être ordonnées	succession	ordre	Page ??
Peuvent être comparées	mesurabilité	métricité	Page ??
Peuvent varier graduellement	continuité	complétude	Page ??
Peuvent être ajoutées	accumulabilité	additivité	Page 64
Peuvent être séparées	séparabilité	positive ou négative	
Ne changent pas	conservation	invariance	$q = \text{const}$

TABLEAU 4 Valeurs de charge électrique observées dans la nature.

OBSERVATION	CHARGE
Plus petite charge mesurée non nulle	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Charge par bit dans une mémoire d'ordinateur	10^{-13} C
Charge dans un petit condensateur	10^{-7} C
Flux de charge dans un flash d'éclair moyen	1 C à 100 C
Charge stockée dans une batterie de voiture entièrement chargée	0,2 MC
Charge de la planète Terre	1 MC
Charge séparée par une usine électrique moderne en un an	$3 \cdot 10^{11} \text{ C}$
Charge totale de signe positif (ou négatif) observée dans l'Univers	$10^{62 \pm 2} \text{ C}$
Charge totale observée dans l'Univers	0 C

cules.

L'attraction est une forme d'accélération. Des expériences montrent que l'entité qui accélère des corps chargés, le *champ électrique*, se comporte comme une petite flèche fixée en chaque point x de l'espace; sa longueur et sa direction ne dépendent pas de l'observateur. En bref, le champ électrique $E(x)$ est un champ *vectoriel*. Les expériences indiquent que la meilleure façon de le définir est la relation

$$qE(x) = ma(x) \quad (2)$$

considérée en chaque point x de l'espace. La définition du champ électrique s'appuie donc sur la manière dont il *déplace* des charges*. Le champ est mesuré en multiples de l'unité N/C ou V/m.

Pour décrire totalement le mouvement engendré par l'électricité, nous avons besoin d'une relation qui explicite comment des charges *produisent* des champs électriques. Cette relation fut établie avec précision (mais pas pour la première fois) par Charles-

* La définition du champ électrique donnée ici présume-t-elle l'existence d'une vitesse pour la charge qui soit beaucoup moins grande que celle de la lumière?

Défi 7 e

Défi 6 s

TABLEAU 5 Quelques champs électriques observés.

OBSERVATION	CHAMP ÉLECTRIQUE
Champ situé à 1 m d'un électron dans le vide	Défi 8 s
Valeurs de champs perçus par les requins	jusqu'à 0,1 μV/m
Bruit cosmique	10 μV/m
Champ d'un émetteur radio FM de 100 W distant de 100 km	0,5 mV/m
Champ à l'intérieur des conducteurs, comme les fils de cuivre	0,1 V/m
Champ situé juste en dessous d'une ligne à haute tension	0,1 à 1 V/m
Champ d'une antenne GSM située à 90 m	0,5 V/m
Champ à l'intérieur d'une maison standard	1 à 10 V/m
Champ d'une ampoule de 100 W à une distance de 1 m	50 V/m
Champ terrestre dans l'atmosphère de la Terre	100 à 300 V/m
Champ dans les nuages orageux	jusqu'à plus de 100 kV/m
Champ électrique maximal dans l'air avant que des étincelles surgissent	1 à 3 MV/m
Champs électriques dans les membranes biologiques	10 MV/m
Champs électriques dans les condensateurs	jusqu'à 1 GV/m
Champs électriques dans les impulsions laser pétawatt	10 TV/m
Champs électriques dans les noyaux des ions U ⁹¹⁺	1 EV/m
Champ électrique utile maximal dans le vide, limité par la production de paires d'électrons	1,3 EV/m
Champ électrique maximal possible dans la nature (champ électrique de Planck corrigé)	2,4 · 10 ⁶¹ V/m

Augustin de Coulomb dans son domaine privé, au cours de la Révolution française**. Il découvre qu'autour de toute charge Q de petite taille ou sphérique, *au repos*, il y a un champ électrique. À la position \mathbf{r} , le champ électrique \mathbf{E} est donné par

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r} \quad \text{où} \quad \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9,0 \text{ GV m/C} . \quad (3)$$

Par la suite, nous étendrons cette relation pour une charge en mouvement. La constante de proportionnalité étrange, bâtie autour de la *permittivité du vide* ϵ_0 , est due à la manière historique dont l'unité de la charge fut initialement définie*. L'idée cruciale de la formule est la décroissance du champ avec le carré de la distance. Pouvez-vous imaginer quelle est l'origine de cette dépendance ?

Défi 9 s

** Charles-Augustin de Coulomb (n. Angoulême 1736, d. Paris 1806) était un physicien et ingénieur français. Ses expériences méticuleuses sur les charges électriques ont fourni des bases solides pour l'étude de l'électricité.

* Des définitions différentes de celle-ci et d'autres constantes de proportionnalité que l'on rencontrera plus tard sont possibles, elles conduisent à des *systèmes d'unités* différents du Système international employé ici. Le SI est présenté en détail dans l'Annexe B. Parmi les concurrents plus anciens, le système d'unités de Gauss souvent utilisé dans les calculs théoriques, le système d'unités de Heaviside-Lorentz, le système

TABLEAU 6 Propriétés du champ électrique : un vecteur (polaire).

LES CHAMPS ÉLECTRIQUES PEUVENT	PROPRIÉTÉ PHYSIQUE	DÉNOMINATION MATHÉMATIQUE	DÉFINITION
Attirer des corps	charges qui accélèrent	couplage	équation (3)
Repousser des corps	charges qui accélèrent	couplage	équation (3)
Être distingués	discernement	élément d'un ensemble	Page 180
Varié graduellement	continuum	espace vectoriel réel	Page 64, Page ??
Pointer quelque part	direction	espace vectoriel, nombre de dimensions	Page 64
Être comparés	mesurabilité	métricité	Page ??
Être ajoutés	additivité	espace vectoriel	Page 64
Avoir des angles définis	direction	espace vectoriel euclidien	Page 64
Dépasser toute limite	infini	infinitude	Page 181
Changer de direction sous la réflexion	polarisation	vecteur de parité impaire	
Conserver la direction sous le renversement du temps		vecteur temps pair	

Les deux équations précédentes nous permettent d'écrire l'interaction qui existe entre deux corps chargés, sous la forme

$$\frac{d\mathbf{p}_1}{dt} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r} = -\frac{d\mathbf{p}_2}{dt}, \quad (4)$$

où $d\mathbf{p}$ représente la variation de la quantité de mouvement, et \mathbf{r} est le vecteur reliant les deux centres de masse. Cette illustre expression qui décrit l'attraction et la répulsion électrostatique, également due à Coulomb, n'est valable que pour des corps chargés qui sont de petite taille ou sphériques, et par-dessus tout qui sont *au repos*.

Les champs électriques accélèrent des charges. Par conséquent, dans la vie courante, ils possèdent deux propriétés principales : ils contiennent de l'énergie et ils peuvent polariser les corps. Le contenu en énergie est dû à l'interaction électrostatique entre les charges. L'intensité de cette interaction est considérable. Par exemple, elle est le fondement de la force qu'exercent nos muscles. La force musculaire est un effet macroscopique de l'équation 4. La dureté matérielle de l'acier ou du diamant en représente un autre exemple. Comme nous le découvrirons, tous les atomes se retiennent ensemble par l'attraction électrostatique. Pour vous convaincre de la forte intensité de l'attraction électrostatique, répondez à la question suivante : quelle est la force qui s'exerce entre deux boîtes contenant un gramme de protons chacune, situées sur les deux pôles terrestres ? Essayez de deviner le résultat avant de calculer cette valeur surprenante.

Défi 10 s

Réf. 7 d'unités électrostatiques et le système d'unités électromagnétiques en sont les plus importants.

La relation de Coulomb pour le champ régnant autour d'une charge peut être reformulée d'une manière qui permette de la généraliser aux corps non sphériques. Prenez une surface fermée, c'est-à-dire une surface qui enveloppe un certain volume. Alors l'intégrale du champ électrique sur cette surface, le flux électrique, est la charge enveloppée Q divisée par ϵ_0 :

$$\int_{\text{surface fermée}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}. \quad (5)$$

Défi 11 s Cette relation mathématique, dénommée la « loi » de Gauss, découle du résultat de Coulomb. (Dans la forme simplifiée donnée ici, elle n'est valide que pour des situations statiques.) Puisqu'à l'intérieur des conducteurs le champ électrique est nul, la « loi » de Gauss implique, par exemple, que si une charge q est encerclée par une sphère métallique non chargée, alors la surface externe de la sphère métallique exhibe une charge identique q .

Défi 12 e

En raison de l'intensité des interactions électromagnétiques, il n'est pas aisé de dissocier les charges. C'est la raison pour laquelle les effets électriques n'ont été utilisés dans un but pratique, de manière répandue, que depuis une centaine d'années environ. Nous avons dû patienter avant que des dispositifs utiles et exploitables soient inventés pour séparer les charges et pour les mettre en mouvement. Bien évidemment, cela requiert de l'énergie. Les batteries, que l'on trouve dans les téléphones portables, utilisent de l'énergie chimique pour parvenir à cette fin*. Les éléments thermoélectriques, que l'on rencontre dans certaines montres, tirent profit de la différence de température entre le poignet et l'air pour séparer les charges, les cellules solaires emploient la lumière, et les dynamos ou les générateurs de Kelvin utilisent l'énergie cinétique disponible.

Défi 14 s

Les corps non chargés en attirent-ils d'autres ? En première approximation, ils ne le font pas. Mais lorsque nous examinons cette question plus attentivement, nous découvrons qu'ils peuvent en attirer d'autres. Pouvez-vous trouver quelles sont les conditions nécessaires pour que cela puisse se produire ? En fait, les conditions requises sont plutôt déterminantes, puisque notre propre chair, qui est constituée de molécules neutres, se maintient de cette manière.

Qu'est-ce alors que l'électricité ? La réponse est simple : *l'électricité ne désigne rien de particulier*. C'est le nom attribué à un domaine de recherche, mais non celui d'une quelconque observation ou effet explicite. L'électricité ne désigne ni le courant électrique, ni les charges électriques, ni le champ électrique. L'électricité n'est pas un terme spécifique, elle s'applique à *l'ensemble* de ces phénomènes. En fait, ce problème de terminologie masque une question plus profonde qui demeure sans réponse en ce début de vingt et unième siècle : quelle est la nature de la charge électrique ? Afin d'étudier cette énigme, nous allons commencer avec la question qui suit.

POUVONS-NOUS DÉCELER L'INERTIE DE L'ÉLECTRICITÉ ?

Si la charge électrique est réellement quelque chose qui s'écoule dans les métaux, nous devrions être capables d'observer les effets indiqués sur la **Figure 9**. Maxwell avait prédit la plupart de ces effets : la charge électrique devrait tomber, avoir une certaine inertie et

Défi 13 s

* À ce propos, les batteries sont-elles des sources émettant des charges ?

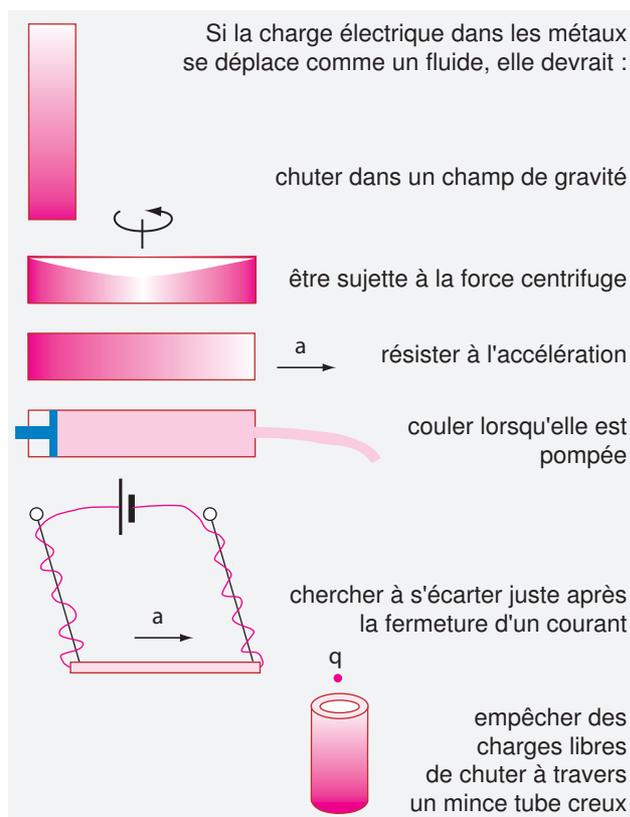


FIGURE 9 Conséquences de l'écoulement de l'électricité.

être séparable de la matière. En réalité, chacun de ces effets a été observé^{**}. Par exemple, lorsqu'une longue tige métallique est maintenue verticalement, nous pouvons mesurer une différence de potentiel électrique, une tension électrique, entre le sommet et la base. Autrement dit, nous pouvons mesurer le *poids* de l'électricité de cette manière. De façon similaire, nous pouvons mesurer la différence de potentiel entre les extrémités d'une tige en accélération. D'autre part, nous pouvons mesurer la différence de potentiel qui existe entre le centre et la bordure d'un disque métallique en rotation. En fait, c'est grâce à cette dernière expérience que le rapport q/m des courants dans les métaux fut mesuré avec précision pour la première fois. Le résultat donne

$$q/m = 1,8 \cdot 10^{11} \text{ C/kg} \quad (6)$$

pour tous les métaux, aux petites variations près dans le chiffre après la virgule. En bref, le courant électrique possède une masse. Par conséquent, à chaque fois que nous établissons un courant électrique, nous observons un *recul* du dispositif. Cet effet élémentaire peut facilement être mesuré et permet de confirmer le rapport charge sur masse que nous venons de citer. La production de courant dans l'air ou dans le vide est également obser-

^{**} Maxwell réalisa également des expériences pour détecter ces effets (excepté le dernier, qu'il n'avait pas prévu), mais ses appareils n'étaient pas assez sensibles.

vée ; en fait, chaque tube de téléviseur utilise ce principe pour créer le faisceau produisant l'image sur l'écran. Il fonctionne mieux pour des objets métalliques ayant des extrémités pointues et affilées. Les rayons créés de cette façon – nous pourrions dire qu'ils représentent de l'électricité « libre » – sont appelés *rayons cathodiques*. À quelques pour cent près, ils dénotent un rapport charge sur masse identique à l'expression (6). Cette coïncidence montre donc que les charges se déplacent presque aussi librement dans les métaux que dans l'air : c'est la raison pour laquelle les métaux sont de si bons conducteurs.

Réf. 10

Si la charge électrique *chute* à l'intérieur des tiges métalliques verticales, nous pouvons énoncer la déduction stupéfiante que les rayons cathodiques – comme nous le verrons plus tard, ils sont constitués d'électrons libres* – ne devraient pas être capables de chuter à travers un tube métallique vertical. Cela est dû à la compensation exacte entre l'accélération due au champ électrique engendré par l'électricité déplacée dans le tube et l'accélération de la gravité. Donc les électrons ne devraient pas pouvoir chuter à travers un cylindre long et fin. Ce ne serait pas le cas si l'électricité dans les métaux ne se comportait pas comme un fluide. En réalité, l'expérience a été effectuée, et une diminution de 90 % de l'accélération de la chute libre pour les électrons a été constatée. Pouvez-vous imaginer pourquoi la valeur idéale de 100 % n'est pas constatée ?

Défi 15 e

Réf. 11

Défi 16 s

Si le courant électrique se comporte comme un liquide, nous devrions être capables de mesurer sa vitesse. Le premier à l'avoir fait, en 1834, fut Charles Wheatstone. Dans une expérience restée célèbre, il utilisa un fil métallique d'un quart de mille de longueur (soit approximativement 400 mètres), pour produire trois étincelles : une au point de départ, une au milieu et une à l'extrémité finale. Il installa alors un miroir à mouvement rapide sur une montre mécanique. En notant la valeur à laquelle les trois images d'étincelles sur un écran étaient décalées l'une par rapport aux autres, il détermina que la vitesse valait 0,45 Gm/s, bien que la marge d'erreur fût considérable. Des relevés ultérieurs plus précis indiquèrent que la vitesse est toujours inférieure à 0,3 Gm/s, et qu'elle dépend du métal utilisé et de la technique d'isolation du câble. La valeur élevée de la vitesse convainquit de nombreuses personnes à employer l'électricité pour transmettre des messages. Une version moderne de l'expérience, pour les inconditionnels de l'informatique, utilise la commande « ping » tapée à partir d'un système d'exploitation UNIX. Cette commande mesure le temps que met un signal d'un ordinateur pour atteindre un autre ordinateur et revenir à l'expéditeur. Si la longueur du câble reliant deux machines est connue, la vitesse du signal peut être déduite. Essayez.

Réf. 12

Défi 17 e

Remarque : la vitesse de l'électricité est trop lente pour de nombreuses personnes. Les ordinateurs modernes qui sont connectés aux Bourses mondiales sont situés aussi près que possible de la Bourse, parce que le gain de temps qu'une distance de communication courte fournit est substantiel pour obtenir de bonnes performances financières sur certains marchés d'échange.

Réf. 13

* Le mot « électron » est dû à George Stoney. Les électrons sont les charges les plus petites et les plus légères qui se déplacent dans les métaux, ils représentent généralement – mais pas toujours – les « atomes » d'électricité, par exemple dans les éléments métalliques. Leur charge est minuscule, 0,16 aC, de telle sorte que les flux de charge caractéristiques de la vie quotidienne sont constitués d'énormes quantités d'électrons. Par conséquent, la charge électrique se comporte comme un fluide continu. Cette particule elle-même fut découverte et révélée en 1897 par le physicien prussien Johann Emil Wiechert (1861–1928) et de manière indépendante, trois mois plus tard, par le physicien anglais Joseph John Thomson (1856–1940).

TABLEAU 7 Quelques valeurs observées de courant électrique.

OBSERVATION	COURANT
Plus petit courant jamais mesuré (pour 3 aA un électron en mouvement)	
Signaux de nerfs humains	20 μ A
Courant mortel pour les êtres humains	aussi faible que 20 mA, typiquement 100 mA
Courant consommé par un moteur de train	600 A
Courant dans un éclair	10 à 100 kA
Courant le plus élevé produit par l'homme	20 MA
Courant à l'intérieur de la Terre	autour de 100 MA

TABLEAU 8 Quelques détecteurs de courant électrique.

MESURE	DÉTECTEUR	ÉTENDUE
Chute de tension due à une résistance	multimètre à 20 euros	jusqu'à env. 3 A
Contraction	muscles humains	ressentie à partir de 0,1 mA
Émission de fumée	muscles humains	à partir de 1 A
Variation du rythme Plantes	cœur humain	cesse à 20 mA

En résumé, les expériences montrent que toutes les charges possèdent une masse. Et comme tout corps massif, elles se déplacent moins vite que la lumière.

SUBIR LES EFFETS DES CHAMPS ÉLECTRIQUES

Pourquoi l'électricité est-elle dangereuse pour les hommes ? La principale raison est que le corps humain est lui-même contrôlé par des « fils électriques ». Ainsi, l'électricité externe interfère avec les signaux internes. Nous savons cela depuis 1789. Cette année-là, le médecin italien Luigi Galvani (1737–1798) découvrait que le courant électrique fait contracter les muscles d'un animal mort. La toute première expérience célèbre utilisait des cuisses de grenouilles : quand de l'électricité était appliquée, elles se convulsaient violemment. Des recherches ultérieures confirmèrent que tous les nerfs utilisent des signaux électriques. Les nerfs sont les « câbles de commande » des animaux. Cependant, ils ne sont pas en métal : les métaux ne sont pas assez flexibles. Par conséquent, les nerfs ne conduisent pas l'électricité en utilisant des électrons mais plutôt des *ions*. Ces particularités raffinées furent éclaircies au vingtième siècle seulement. Les signaux nerveux se propagent en utilisant le mouvement des ions sodium et potassium situés dans la membrane des cellules nerveuses. La vitesse du signal résultant de ce mouvement est comprise entre 0,5 m/s et 120 m/s, en fonction du type de nerf. Cette vitesse est suffisante pour la survie de la plupart des espèces – le signal ordonne au corps de s'enfuir en cas de danger.

Étant électriquement commandés, tous les mammifères peuvent ressentir les champs

électriques puissants. Les êtres humains peuvent ressentir des champs à partir de 10 kV/m environ, valeur pour laquelle les cheveux se hérissent. Au contraire, plusieurs animaux peuvent ressentir des champs électriques et magnétiques particulièrement faibles. Les requins, par exemple, peuvent déceler des champs aussi faibles que 1 $\mu\text{V}/\text{m}$ en tirant profit d'organes sensitifs spécifiques, les *ampoules de Lorenzini*, qui se trouvent autour de leur gueule. Les requins les utilisent pour détecter le champ engendré par leurs proies se déplaçant dans l'eau, et peuvent ainsi les repérer même dans l'obscurité. Plusieurs poissons d'eau douce, la salamandre et l'ornithorynque, le célèbre mammifère semi-aquatique à bec de canard, peuvent également ressentir des champs électriques. Comme les requins, ils les utilisent pour repérer leurs proies dans une eau qui est trop boueuse pour y voir clair. Certains poissons, que l'on appelle *poissons électriques*, produisent même un faible champ afin d'améliorer la détection des proies*.

Aucun animal terrestre ne possède de capteur particulier pour les champs électriques, parce que tout champ électrique aérien est fortement amorti lorsqu'il rencontre un corps animal empli d'eau. En réalité, l'atmosphère qui nous entoure possède un champ électrique d'environ 100 V/m ; à l'intérieur du corps humain ce champ s'atténue jusqu'aux échelles de quelques $\mu\text{V}/\text{m}$, ce qui est très inférieur aux champs électriques internes des animaux. En d'autres termes, les hommes ne sont pas affublés de capteurs pour les faibles champs électriques parce qu'ils sont des animaux terrestres. (Les hommes ont-ils l'aptitude à ressentir des champs électriques dans l'eau ? Il semble que personne ne le sache.) Néanmoins, il existe quelques exceptions. Sachez que certaines personnes âgées peuvent ressentir l'approche des orages, dans leurs articulations. Cela est dû à la coïncidence qui existe entre la fréquence du champ électromagnétique émis par les nuages lourdement chargés – autour de 100 kHz – et la fréquence de résonance des membranes des cellules nerveuses.

Défi 18 r

Page 80

Le contenu aqueux du corps humain signifie également que, dans la nature, les champs électriques que nous rencontrons dans l'air sont rarement dangereux pour les êtres humains. Dès que des hommes ressentent des champs électriques, comme lorsque des tensions élevées font hérissier les cheveux, la situation est potentiellement dangereuse.

La forte impédance de l'air signifie également que, dans le cas de champs électromagnétiques variables dans le temps, les hommes sont beaucoup plus enclins à être affectés par la composante magnétique que par la composante électrique.

AIMANTS

Réf. 14

L'étude du magnétisme a progressé à travers le monde indépendamment de l'étude de l'électricité. Vers la fin du douzième siècle, la boussole fut introduite en Europe. Cette époque vit naître des débats houleux concernant le fait de savoir si elle indiquait le nord ou le sud. En 1269, l'ingénieur militaire français Pierre de Maricourt (1219–1292) publia son travail sur les matériaux magnétiques. Il releva que chaque aimant possède deux points de plus forte aimantation, qu'il appela les *pôles*. Il remarqua que, même si un aimant est coupé, les morceaux résultants conservent toujours deux pôles : l'un pointe vers le nord et l'autre vers le sud lorsque la pierre est libre de tourner. Les aimants sont des

* Il a fallu attendre l'an 2000 pour que la technologie nous permette d'utiliser ce même effet. De nos jours, les détecteurs des airbags dans les voitures utilisent souvent des champs électriques pour détecter si la personne assise sur le siège est un enfant ou un adulte, modifiant ainsi la façon dont l'airbag agit lors d'un accident.

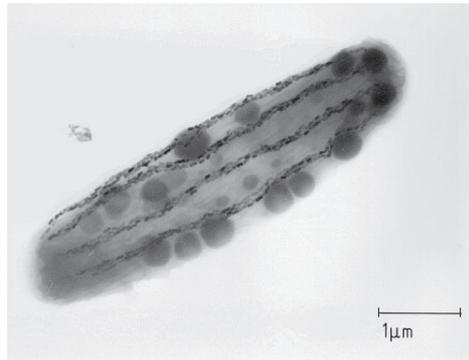


FIGURE 10 La bactérie magnétotactique *Magnetobacterium bavaricum* avec ses magnétosomes. (© Marianne Hanzlik)

dipôles. Les atomes sont soit dipolaires, soit non magnétisés. Il n'existe aucun monopôle magnétique. Malgré la promesse de renommée éternelle, aucun monopôle magnétique n'a été découvert jusqu'à présent, comme l'indique le [Tableau 1](#). De même que les pôles se repoussent, et qu'ils ne s'attirent pas.

Les aimants possèdent une deuxième propriété : ils transforment les matériaux non magnétiques en matériaux magnétiques. Il existe donc également une polarisation magnétique, analogue à la polarisation électrique. Contrairement à l'électricité, certains matériaux magnétiques conservent la polarisation magnétique induite : ils deviennent aimantés. Cela survient lorsque les atomes du matériau sont alignés par l'aimant externe.

LES HOMMES PEUVENT-ILS RESENTIR LES CHAMPS MAGNÉTIQUES ?

« Un imbécile peut poser à lui seul plus de questions que sept sages ensemble ne pourraient en résoudre. »

Antiquité

Réf. 15

Il est notoire que les abeilles, les requins, les pigeons, les saumons, les truites, les tortues de mer et certaines bactéries peuvent ressentir des champs magnétiques. Nous parlons dans ce cas de la capacité de magnétoréception. Toutes ces formes de vie font usage de cette aptitude pour la navigation. La méthode de détection la plus commune consiste à tirer profit de minuscules particules magnétiques situées à l'intérieur d'une cellule. La cellule perçoit alors comment ces petits aimants intégrés se disposent dans un champ magnétique. Ces aimants sont microscopiques, typiquement d'une taille d'environ 50 nm. Ceux-ci sont utilisés pour naviguer le long du champ magnétique de la Terre. Chez les animaux plus évolués, les variations du champ magnétique terrestre, de 20 à 70 μT , dessinent un paysage analogue à celui que les hommes perçoivent avec leurs yeux. Ils peuvent le mémoriser et l'utiliser pour la navigation.

Défi 19 r

Les êtres humains peuvent-ils percevoir les champs magnétiques ? Des matériaux magnétiques semblent être présents dans le cerveau humain, mais nous ne pouvons toujours pas définitivement répondre à cette question. Peut-être pouvez-vous concevoir une méthode permettant de le vérifier ?

Le magnétisme et l'électricité sont-ils reliés ? François Arago* découvrit qu'ils le sont.

* Dominique-François Arago (1786–1853) était un physicien français.

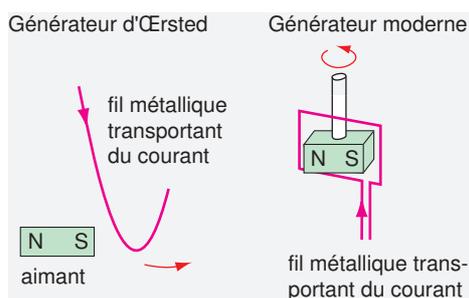


FIGURE 11 Une version ancienne, et une autre plus récente, d'un moteur électrique.

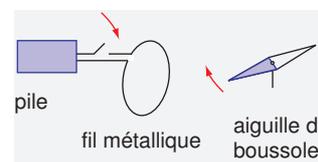


FIGURE 12 Un courant électrique engendre toujours un champ magnétique.

Il avait observé qu'un navire frappé par la foudre pendant un violent orage était dans l'obligation d'utiliser une nouvelle boussole. Donc la foudre possède l'aptitude de démagnétiser les boussoles. Arago savait, comme Franklin, que l'éclair est un phénomène électrique. Autrement dit, l'électricité et le magnétisme doivent être reliés. Plus exactement, le magnétisme doit être associé à l'électricité *en mouvement*.

COMMENT POUVONS-NOUS CONCEVOIR UN GÉNÉRATEUR ?

« Le communisme, c'est le pouvoir des soviets plus l'électrification du pays tout entier. »
Lénine*

L'explication de cette célèbre sentence de Lénine a trait à deux découvertes. L'une d'entre elles fut réalisée en 1820 par le physicien danois Hans Christian Ersted (1777–1851) et l'autre en 1831 par le physicien anglais Michael Faraday**. Les conséquences de ces expériences changèrent radicalement la face du monde en moins d'un siècle.

Le 21 juillet 1821, Ersted publia un feuillet, en latin, qui déchaîna toute l'Europe. Il avait trouvé (lors d'une conférence faite à ses étudiants) que, lorsqu'un courant est envoyé à travers un fil, un aimant situé à proximité est mis en mouvement. Autrement dit, il avait découvert que la circulation du courant électrique peut mettre des corps en mouvement.

Des expériences ultérieures démontrèrent que *deux* fils métalliques dans lesquels les charges s'écoulent s'attirent ou se repoussent l'un et l'autre, selon que les courants sont

* Lénine (n. Simbirsk 1870, d. Gorki 1924), fondateur de l'Union des républiques socialistes soviétiques, fit cette déclaration en 1920 comme point d'orgue de son plan de développement pour le pays. En Russie, les conseils ouvriers de l'époque étaient dénommés des soviets.

** Michael Faraday (n. Newington 1791, d. Londres 1867) fut élevé dans une famille modeste, sans recevoir d'éducation, et fut profondément imprégné d'idées religieuses. À l'adolescence, il devint assistant du plus célèbre chimiste de son temps, Humphry Davy (1778–1829). Il n'avait aucune formation mathématique, mais plus tard au cours de sa vie il devint membre de la Royal Society. Il déclina sans prétention durant sa vie tous les autres honneurs. Il travailla sur des sujets de chimie, sur la structure atomique de la matière et, par-dessus tout, il développa l'idée des champs (magnétiques) et des lignes du champ. Il utilisait les champs pour décrire ses nombreuses découvertes expérimentales concernant l'électromagnétisme, tel l'effet Faraday. Les champs furent ensuite décrits mathématiquement par Maxwell, qui était à cette époque la seule personne en Europe à saisir l'importance du concept de champ de Faraday.

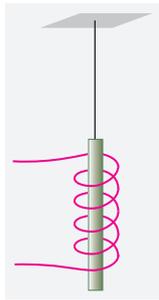


FIGURE 13 Le courant fait tourner une tige métallique.

parallèles ou antiparallèles. Ces expériences ainsi que d'autres révèlent que les fils dans lesquels l'électricité circule se comportent comme des aimants*. En d'autres termes, Ørsted avait mis la main sur la pièce à conviction décisive qui prouvait que l'électricité pouvait être transformée en magnétisme.

Peu de temps après, Ampère** découvrit que les *bobines métalliques* accroissent considérablement ces effets. Les bobines agissent comme des petits aimants. En particulier, celles-ci, comme les champs magnétiques, possèdent toujours deux pôles, généralement dénommés le pôle nord et le pôle sud. Des pôles opposés s'attirent, des pôles identiques se repoussent. Comme nous le savons tous, la Terre est elle-même un énorme aimant dont le pôle Nord magnétique est situé près de son pôle Sud géographique, et vice versa. (Le champ magnétique de la Terre n'est *pas* engendré par un aimant permanent solide qui serait situé à l'intérieur de celle-ci. Le cœur solide de la Terre est trop chaud pour être un aimant permanent ; au lieu de cela, ce champ magnétique est dû aux courants de convection qui se produisent dans le noyau externe, liquide.)

Une charge électrique mobile engendre des champs magnétiques. Ce résultat explique pourquoi les champs magnétiques ont toujours deux pôles. L'inexistence des monopôles magnétiques devient alors évidente. Mais une interrogation intrigante demeure : si les champs magnétiques sont dus au mouvement des charges, cela devrait également être le cas pour un aimant ordinaire. Cela peut-il être démontré ?

En 1915, deux hommes aux Pays-Bas mirent au jour un procédé élémentaire pour démontrer que, même dans un aimant, quelque chose est en mouvement. Ils suspendirent une tige métallique avec un mince fil accroché au plafond et placèrent alors une bobine tout autour de la tige, comme indiqué sur la [Figure 13](#). Ils prévoyaient que les courants

* En réalité, si nous imaginons que de minuscules courants se déplacent en formant des cercles à l'intérieur des aimants, nous obtenons une description unifiée pour tous les champs magnétiques observés dans la nature.

** André-Marie Ampère (n. Lyon 1775, d. Marseille 1836) était un physicien et mathématicien français. Autodidacte, il aurait lu la célèbre *Encyclopédie* dès son enfance. Dans une vie emplie de tragédies personnelles, il déambula entre les mathématiques, la chimie et la physique, travailla comme professeur de lycée, sans rien publier de significatif avant 1820. La découverte d'Ørsted se répandit alors dans toute l'Europe : le courant électrique peut faire dévier les aiguilles magnétiques. Ampère travailla pendant des années sur ce problème et publia en 1826 les résultats de ses recherches, ce qui conduisit Maxwell à le surnommer le « Newton de l'électricité ». Ampère identifia et développa plusieurs domaines de l'électrodynamique. En 1832, son technicien et lui construisirent également la première dynamo, ou générateur rotatif de courant électrique. Bien évidemment, l'unité du courant électrique est nommée en son honneur.

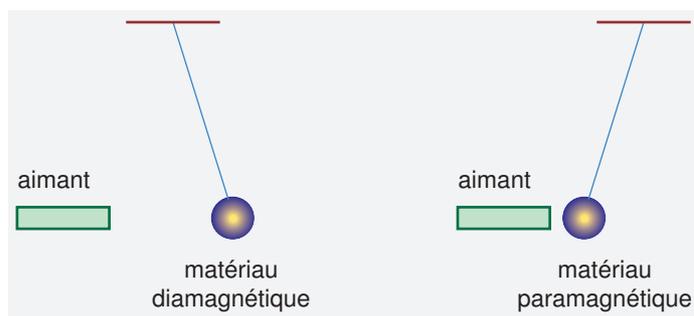


FIGURE 14 Les deux variantes élémentaires de comportement des matériaux magnétiques (dans un champ non homogène) : le diamagnétisme et le paramagnétisme.

infimes situés à l'intérieur de la tige seraient alignés par le champ magnétique de la bobine. Par conséquent, ils s'attendaient à ce qu'un courant traversant la bobine fît tourner la tige sur elle-même. Et en effet, lorsqu'ils envoyèrent un courant puissant dans la spirale, la tige tourna. (À cause du courant, la tige était aimantée.) Aujourd'hui, cet effet est appelé *effet Einstein-de Haas* d'après les deux physiciens qui l'imaginèrent, le quantifièrent et l'expliquèrent*. Cet effet montre donc que, même dans le cas d'un aimant permanent, le champ magnétique est engendré par le mouvement interne des charges. L'amplitude de cet effet indique également que les particules en mouvement sont des électrons. (Douze ans plus tard, il devint évident que le moment cinétique des électrons, responsable de cet effet, est un amalgame du moment cinétique de spin et du moment cinétique orbital, en fait le spin de l'électron joue un rôle primordial dans celui-ci.)

Réf. 16

Puisque le magnétisme est dû à l'alignement des mouvements microscopiques de rotation, on peut conjecturer l'existence d'un effet encore plus surprenant. Le simple fait de faire tourner un matériau ferromagnétique** devrait l'aimer, parce que les minuscules courants rotatifs seraient alors alignés avec l'axe de rotation. Cet effet a vraiment été observé : il est dénommé *effet Barnett*, d'après le nom de son découvreur. Comme l'effet Einstein-de Haas, l'effet Barnett peut aussi être employé pour déterminer le rapport gyromagnétique de l'électron. Il démontre ainsi également que les spins des électrons jouent (généralement) un rôle plus important dans le magnétisme que leurs moments cinétiques orbitaux.

Réf. 17

Page ??

CHAMPS MAGNÉTIQUES

Les expériences indiquent que le champ magnétique possède toujours une direction fixée dans l'espace, et une grandeur commune pour tous les observateurs (au repos), quelle que soit leur orientation. Nous sommes tentés de décrire le champ magnétique par un vecteur. Cependant, ce serait incorrect puisqu'un champ magnétique ne se comporte pas comme une flèche lorsqu'il est disposé devant un miroir. Imaginez qu'un système

* Wander Johannes de Haas (1878–1960) était un physicien hollandais. De Haas est mieux connu pour deux effets magnétoélectriques supplémentaires qui prirent son nom, l'effet Shubnikov-de Haas (la forte augmentation de la résistance magnétique du bismuth à basse température et dans des champs magnétiques puissants) et l'effet de Haas-Van Alphen (la susceptibilité diamagnétique du bismuth à basse température est une fonction périodique du champ magnétique).

** Un matériau ferromagnétique est un type particulier de matériau paramagnétique qui possède une aimantation permanente.

TABLEAU 9 Propriétés du champ magnétique : un vecteur axial.

LES CHAMPS MAGNÉTIQUES PEUVENT	PROPRIÉTÉ PHYSIQUE	DÉNOMINATION MATHÉMATIQUE	DÉFINITION
Attirer les courants	déviations de charges	couplage	équation (8)
Repousser les courants	déviations de charges	couplage	équation (8)
Être distingués	discernement	élément d'un ensemble	Page 180
Variation graduelle	continuum	espace vectoriel réel	Page 64, Page ??
Pointer quelque part	direction	espace vectoriel, nombre de dimensions	Page 64
Être comparés	mesurabilité	métricité	Page ??
Être ajoutés	additivité	espace vectoriel	Page 64
Avoir des angles définis	direction	espace vectoriel euclidien	Page 64
Dépasser toute limite	infini	infinitude	Page 181
Conservation de la direction sous la réflexion	axialité	vecteur de parité paire, pseudovecteur	
Changement de direction sous le renversement du temps	axialité	vecteur non apparié en fonction du temps	

Défi 20 e

produise un champ magnétique orienté vers la droite. Vous pouvez considérer n'importe quel système : une bobine, une machine, etc. Maintenant, construisez ou imaginez un deuxième système qui soit l'image exacte dans un miroir du premier : une bobine miroir, une machine miroir, etc. Le champ magnétique engendré par le système miroir n'est pas orienté vers la gauche, comme vous l'attendiez probablement : il pointe toujours vers la droite. (Vérifiez-le.) En termes simples, les champs magnétiques *ne* se conduisent pas comme les flèches.

Autrement dit, il n'est pas parfaitement correct de décrire un champ magnétique par un vecteur $\mathbf{B} = (B_x, B_y, B_z)$, car les vecteurs agissent comme des flèches. Nous parlons dans ce cas de *pseudovecteur* : le moment cinétique et le couple représentent également des exemples de ces quantités. La méthode rigoureuse consiste à décrire le champ magnétique par la quantité*

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & -B_z & B_y \\ B_z & 0 & -B_x \\ -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

que nous appelons un *tenseur antisymétrique*. En résumé, les *champs magnétiques* sont définis par l'accélération qu'ils communiquent à des charges en mouvement. Il apparaît

* La quantité \mathbf{B} n'était pas appelée « champ magnétique » jusqu'à récemment. Nous suivons ici la définition moderne, logique, qui remplace la traditionnelle, dans laquelle \mathbf{B} était appelé « densité du flux magnétique » ou « induction magnétique » et une autre quantité, \mathbf{H} , était dénommée – de manière incorrecte, mais durant plus d'un siècle – le champ magnétique. Cette quantité \mathbf{H} n'apparaîtra pas au cours de cette promenade, mais elle a un rôle prépondérant dans la description du magnétisme des matériaux.

TABLEAU 10 Quelques détecteurs du champ magnétique.

MESURE	DÉTECTEUR	ÉTENDUE
Tension	sonde de Hall	jusqu'à env. ... T
Stimulation de la croissance osseuse	piézoélectricité des os	à partir de ...
Force électromotrice induite (tension)	nerfs	à partir de 5 T ?
Sensations dans le thorax et les épaules	nerfs	gradients fortement variables
Plantes		

que cette accélération vérifie

$$\mathbf{a} = \frac{e}{m} \mathbf{v} \mathbf{B} = \frac{e}{m} \mathbf{v} \wedge \mathbf{B} \quad (8)$$

une relation que nous appelons souvent *accélération de Lorentz*, du nom de l'important physicien hollandais Hendrik Antoon Lorentz (n. Arnhem 1853, d. Haarlem 1928) qui la formula clairement pour la première fois*. (Cette relation est également appelée *accélération de Laplace*.) L'unité du champ magnétique est dénommée tesla et est notée T. Nous avons les égalités $1 \text{ T} = 1 \text{ N s/C m} = 1 \text{ V s/m}^2 = 1 \text{ V s}^2/\text{A m}$.

L'accélération de Lorentz est l'effet qui est à la base du fonctionnement de tout moteur électrique. Un moteur électrique est un appareil qui tire profit d'un champ magnétique le plus efficacement possible pour accélérer des charges circulant dans un fil métallique. Par le biais du mouvement des charges, le fil est alors également déplacé. L'électricité est ainsi transformée en magnétisme et ensuite en mouvement. Le premier moteur opérationnel a été construit en 1834.

Comme dans le cas de l'électricité, nous avons besoin de savoir comment la *puissance* d'un champ magnétique est déterminée. Des expériences telles que celle d'Ersted montrent que le champ magnétique est engendré par des charges en mouvement, et qu'une charge qui se déplace avec une vitesse \mathbf{v} produit un champ \mathbf{B} donné par

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} q \frac{\mathbf{v} \wedge \mathbf{r}}{r^3} \quad \text{où} \quad \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \text{ N/A}^2. \quad (9)$$

C'est ce que nous appelons le « *théorème* » d'Ampère. À nouveau, l'étrange facteur $\mu_0/4\pi$ est dû à la manière historique dont les unités électriques ont été définies. La constante μ_0 , qui est appelée la *perméabilité du vide*, est définie par la fraction du nombre de newtons par ampère au carré citée dans la formule. Il est facile de voir que le champ magnétique possède une intensité donnée par $\mathbf{v} \mathbf{E}/c^2$, où \mathbf{E} est le champ électrique mesuré par un observateur se déplaçant avec la charge. C'est le premier indice qui révèle que le magnétisme est un effet relativiste.

Défi 22 e

Défi 21 s

* La définition du champ magnétique donnée ici suppose-t-elle que la vitesse d'une charge soit beaucoup plus petite que celle de la lumière ?

Défi 23 s Nous remarquons que l'équation (9) n'est valide que pour des vitesses et des accélérations faibles. Pouvez-vous découvrir la formule générale?

En 1831, Michael Faraday dévoila une pièce supplémentaire du puzzle, une pièce qui avait même échappé au grand Ampère. Il découvrit qu'un aimant *en mouvement* pouvait engendrer l'apparition d'un courant dans un circuit électrique. Le magnétisme peut donc être transformé en électricité. Cette découverte cruciale a permis la production de courant électrique par des générateurs, les *dynamos*, en utilisant la puissance mécanique de l'eau, du vent ou de la vapeur. En réalité, la première dynamo fut construite en 1832 par Ampère et son technicien. Les dynamos sonnèrent l'avènement de l'utilisation de l'électricité à travers le monde. Quelque part, derrière chaque prise de courant électrique, il y a une dynamo.

Des expériences supplémentaires montrent que les champs magnétiques aboutissent aussi à des champs électriques lorsque nous nous plaçons dans un référentiel en mouvement. Vous devriez pouvoir le vérifier sur tous les exemples cités dans les Figures 11 à 26. *Le magnétisme est en réalité de l'électricité relativiste*. Les champs électrique et magnétique sont partiellement transformés l'un en l'autre lorsque nous basculons d'un référentiel inertiel à l'autre. Ceux-ci se comportent donc comme l'espace et le temps, qui sont également mélangés lorsque nous passons d'un référentiel inertiel à l'autre. La théorie de la relativité restreinte nous enseigne ainsi qu'il doit y avoir une entité unique, un *champ électromagnétique*, qui les décrit tous les deux. En examinant cela plus en détail, nous remarquons que le champ électromagnétique F entourant des corps chargés doit être décrit par un quadri-tenseur antisymétrique

$$F^{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & -E_x/c & -E_y/c & -E_z/c \\ E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix} \text{ ou } F_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 0 & E_x/c & E_y/c & E_z/c \\ -E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ -E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ -E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Défi 24 s Sans aucun doute, le champ électromagnétique F , et donc chaque composante de ces matrices, dépend de l'espace et du temps. Les matrices montrent que l'électricité et le magnétisme sont deux visages du même effet*. De surcroît, puisque les champs électriques n'apparaissent que dans la ligne du haut et dans la colonne la plus à gauche, ces expressions indiquent que dans la vie quotidienne, pour des vitesses faibles, l'électricité et le magnétisme *peuvent* être séparés. (Pourquoi?)

L'influence globale des champs électrique et magnétique sur des charges fixes ou en mouvement est alors donnée par l'expression suivante pour la relation relativiste force-

* En réalité, la formule du champ contient presque partout l'expression $1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$ au lieu de la vitesse de la lumière c . Nous expliciterons les raisons de cette substitution bientôt.

accélération $\mathbf{K} = m\mathbf{b}$:

$$\begin{aligned}
 m\mathbf{b} &= q\mathbf{F}u \quad \text{ou} \\
 m \frac{du^\mu}{d\tau} &= qF^\mu{}_\nu u^\nu \quad \text{ou} \\
 m \frac{d}{d\tau} \begin{pmatrix} \gamma c \\ \gamma v_x \\ \gamma v_y \\ \gamma v_z \end{pmatrix} &= q \begin{pmatrix} 0 & E_x/c & E_y/c & E_z/c \\ E_x/c & 0 & B_z & -B_y \\ E_y/c & -B_z & 0 & B_x \\ E_z/c & B_y & -B_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma c \\ \gamma v_x \\ \gamma v_y \\ \gamma v_z \end{pmatrix} \quad \text{ou} \\
 W &= q\mathbf{E}\mathbf{v} \quad \text{et} \quad d\mathbf{p}/dt = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \wedge \mathbf{B}), \quad (11)
 \end{aligned}$$

qui révèle comment le travail W et la tri-force $d\mathbf{p}/dt$ dépendent des champs électrique et magnétique. Ces quatre expressions décrivent la même chose ; la simplicité de la première explique pourquoi les matrices (10) du champ électromagnétique sont compliquées. En fait, la *relation de Lorentz* (11) étendue représente la *définition* du champ électromagnétique, puisque ce champ est défini comme étant cette « étoffe » qui accélère les charges. En particulier, tous les dispositifs qui mettent des charges en mouvement, tels que les batteries et les dynamos, ainsi que tous les dispositifs qui sont mis en mouvement par des flux de charges, tels que les moteurs électriques et les muscles, sont décrits par cette relation. C'est la raison pour laquelle celle-ci est généralement étudiée précocement, sous sa forme simple, dès le lycée. La relation de Lorentz décrit tous les cas dans lesquels le mouvement des objets peut être perçu à l'œil nu ou être ressenti par nos facultés sensorielles, comme le va-et-vient d'un moteur électrique dans un train à grande vitesse, dans un ascenseur ou dans une fraise dentaire, le mouvement de l'image générée par le faisceau d'électrons dans un tube de téléviseur, ou le voyage d'un signal électrique dans un câble et dans les nerfs du corps humain.

Réf. 18, Réf. 19

En résumé, nous remarquons que l'interaction qui a lieu entre les charges peut être décrite en deux phrases : *primo*, les charges sont affectées par les champs électriques et magnétiques, *secundo*, les charges produisent des champs électriques et magnétiques.

CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES ET LAGRANGIENS

Dans l'expression de l'accélération de Lorentz (11), quand l'indice d'une variable apparaît deux fois dans un terme, on sous-entend la sommation sur toutes les valeurs que peut prendre cet indice*. Le tenseur \mathbf{F} du champ électromagnétique est un quadritenseur *antisymétrique*. (Pouvez-vous développer la relation qui existe entre $F^{\mu\nu}$, $F_{\mu\nu}$ et $F^\mu{}_\nu$?) Comme n'importe quel tenseur de ce type, il possède deux invariants, c'est-à-dire deux propriétés déduites qui demeurent identiques pour chaque observateur : l'expression $B^2 - E^2/c^2 = \frac{1}{2}\text{tr } \mathbf{F}^2$ et le produit $4\mathbf{E}\mathbf{B} = -c \text{tr } \mathbf{F}^* \mathbf{F}$. (Pouvez-vous confirmer cela, en utilisant la définition de la trace comme étant la somme des éléments diagonaux ?)

Défi 25 pe

Défi 26 s

La première expression invariante, $B^2 - E^2/c^2 = \frac{1}{2}\text{tr } \mathbf{F}^2$, se révèle être proportionnelle au lagrangien du champ électromagnétique. C'est un scalaire et il implique que si E est soit plus grand, soit plus petit, soit égal à cB pour un observateur, il l'est également pour tous les autres observateurs. Ce lagrangien peut être utilisé pour définir l'action, laquelle

* C'est ce que l'on appelle la « convention d'Einstein ». [N.D.T.]

Défi 27 e

peut être employée pour décrire le mouvement du champ électromagnétique en tirant profit du principe de moindre action. Vous pouvez vérifier vous-même que ce lagrangien permet effectivement de décrire le changement provoqué par l'évolution des champs électromagnétiques. Cette approche constitue une autre manière de déduire les équations de Maxwell du champ de l'électromagnétisme.

Le deuxième invariant du tenseur du champ électromagnétique, $4\mathbf{E}\mathbf{B} = -c \operatorname{tr} \mathbf{F}^* \mathbf{F}$, est un pseudoscalaire. Il détermine si l'angle entre le champ électrique et le champ magnétique est aigu ou obtus pour tous les observateurs*.

L'application des effets électromagnétiques à la vie de tous les jours a permis de nous ouvrir à un monde que nous ne connaissions pas auparavant. La lumière électrique, les moteurs électriques, la radio, le téléphone, les rayons X, la télévision, et les ordinateurs ont radicalement bouleversé la société humaine en moins d'un siècle. Par exemple, l'installation de l'éclairage électrique dans les rues des grandes villes a pratiquement éradiqué les attaques nocturnes qui étaient auparavant si courantes. Tous les appareils électriques exploitent le fait que les charges peuvent circuler dans les métaux et, en particulier, que l'énergie électromagnétique peut être transformée :

- en énergie mécanique – comme dans les haut-parleurs, les moteurs, les cristaux piézo-électriques ;
- en lumière – comme dans les ampoules et les lasers ;
- en chaleur – comme dans les fours, les couvertures électriques et les théières ;
- en résultantes chimiques – comme dans l'hydrolyse, la charge des batteries et l'électrolyse ;
- en froid – comme dans les réfrigérateurs et les éléments Peltier ;
- en signaux de rayonnement – comme dans la radio et la télévision ;
- en information stockée – comme dans les mémoires magnétiques et dans les ordinateurs.

COMMENT LES GÉNÉRATEURS DÉMONTRENT QUE LA RELATIVITÉ EST JUSTE

« La seule opération mathématique que j'ai effectuée au cours de ma vie fut de tourner la manivelle d'un calculateur. »
Michael Faraday

* Il y a en réalité un troisième invariant de Lorentz, beaucoup moins connu. Il est spécifique au champ électromagnétique et c'est une combinaison du champ et de son potentiel vecteur :

$$\begin{aligned} \kappa_3 &= \frac{1}{2} A_\mu A^\mu F_{\rho\nu} F^{\nu\rho} - 2A_\rho F^{\rho\nu} F_{\nu\mu} A^\mu \\ &= (\mathbf{AE})^2 + (\mathbf{AB})^2 - |\mathbf{A} \wedge \mathbf{E}|^2 - |\mathbf{A} \wedge \mathbf{B}|^2 + 4\frac{\mathcal{Q}}{c} (\mathbf{AE} \wedge \mathbf{B}) - \left(\frac{\mathcal{Q}}{c}\right)^2 (E^2 + B^2). \end{aligned} \quad (12)$$

Réf. 20

Défi 28 s

Cette expression est un invariant (mais pas une jauge) de Lorentz ; le fait de savoir cela permet d'éclaircir des problèmes obscurs tels que l'inexistence d'ondes pour lesquelles les champs électrique et magnétique sont parallèles. En réalité, pour des ondes monochromatiques planes, les trois invariants s'annulent dans la jauge de Lorentz. Les quantités $\partial_\mu J^\mu$, $J_\mu A^\mu$ et $\partial_\mu A^\mu$ sont également des invariants de Lorentz. (Pourquoi ?) La dernière, l'indépendance par rapport au référentiel de la divergence du quadri-potentiel, reflète l'invariance par rapport au choix de la jauge. La jauge dans laquelle l'expression est fixée à zéro est appelée la *jauge de Lorentz*.

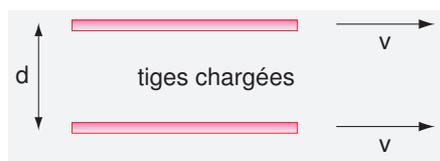


FIGURE 15 L'aspect relativiste du magnétisme.

Réf. 21

Tous les moteurs électriques sont fondés sur le fait que les courants électriques interagissent avec les champs magnétiques. L'exemple le plus élémentaire est l'attraction que subissent deux fils transportant des courants parallèles. Cette observation seule, faite en 1820 par Ampère, est suffisante pour montrer qu'un mouvement plus grand qu'une certaine vitesse maximale est impossible à atteindre.

Défi 29 e

Cette argumentation est admirablement simpliste. Modifions l'expérience originale et imaginons deux longues tiges électriquement chargées, de masse m , se déplaçant dans la même direction avec une vitesse v , et situées à une distance d l'une de l'autre. Un observateur avançant avec les tiges observerait une répulsion électrostatique entre celles-ci donnée par

$$ma_e = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\lambda^2}{d} \quad (13)$$

Défi 30 e

où λ représente la charge des tiges par unité de longueur. Un deuxième observateur *au repos* verrait deux effets : la répulsion électrostatique et l'attraction découverte par Ampère. Celui-ci remarque par conséquent que

$$ma_{em} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\lambda^2}{d} + \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{\lambda^2 v^2}{d}. \quad (14)$$

Cette expression doit rester cohérente avec l'observation du premier voyageur. C'est le cas uniquement si les deux observateurs notent la présence de répulsions. Il est facile de vérifier que le deuxième observateur constate, comme le premier, qu'il y a une répulsion si et seulement si

$$v^2 < \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}. \quad (15)$$

Cette vitesse maximale, d'une valeur de 0,3 GM/s, est donc valide pour un objet quelconque transportant des charges. Mais *tous* les objets quotidiens contiennent des charges : il existe donc une vitesse maximale pour la matière.

Défi 31 d

Êtes-vous capable d'extrapoler l'argument de l'existence d'une vitesse maximale également aux particules neutres ? Dans quelques instants, nous en découvrirons davantage au sujet de cette vitesse limite.

Voici à présent un autre argument qui assimile le magnétisme à un effet relativiste. Dans un fil où un courant électrique circule, la charge totale est nulle pour un observateur au repos par rapport au fil. L'explication en est que les charges entrent et sortent du fil au même moment pour cet observateur. Maintenant, imaginez un observateur qui voyage le long du fil. Les événements indiquant l'entrée et la sortie ne se produisent plus simultanément : le fil est chargé pour un observateur mobile. (Cette charge dépend de la

TABLEAU 11 Valeurs de tensions électriques observées dans la nature.

OBSERVATION	TENSION
Plus petite tension mesurée	env. 10 fV
Nerfs humains	70 mV
Pile de Volta	1 V
Cellule voltaïque (« pile électrique »)	1,5 V
Réseau électrique dans les foyers	230 V ou 110 V
Anguille électrique	100 à 600 V
Alimentation de tramway	500 V
Étincelles lorsque nous frotons un pull en polymère	1 kV
Clôture électrique	0,7 à 10 kV
Alimentation de train	15 kV
Bougie d'allumage dans les voitures	15 kV
Tube de téléviseur couleurs	30 kV
Tube à rayons X	30 à 200 kV
Microscope électronique	0,5 kV à 3 MV
Pistolet à impulsion électrique	65 à 600 kV
Coup de foudre	10 à 100 MV
Tension record d'accélérateur	1 TV
Tension de Planck, la valeur la plus élevée possible dans la nature	$1,5 \cdot 10^{27}$ V

direction du mouvement de l'expérimentateur.) En d'autres termes, si l'observateur lui-même était chargé, il ressentirait une certaine force. Les charges en mouvement subissent des forces de la part des fils qui transportent du courant. C'est précisément pour cette raison que les champs magnétiques ont été introduits : ils ne produisent des forces que sur des charges *en mouvement*. En bref, les fils métalliques dans lesquels circule un courant électrique sont entourés par des champs magnétiques.

Pour résumer, les effets électriques sont dus à la circulation de charges électriques et aux champs électriques, le magnétisme est engendré par le *déplacement* des charges électriques. Il n'est *pas* dû à des charges magnétiques*. La forte intensité du magnétisme, employée dans tout moteur électrique en fonctionnement, démontre que la relativité est juste : il existe une vitesse maximale dans la nature pour toutes les masses et charges. Les champs électrique et magnétique transportent tous les deux de l'énergie et de la quantité de mouvement. Ils constituent les deux faces d'une seule et même pièce de monnaie.

TROIS RÉALITÉS FONDAMENTALES CONCERNANT L'ÉLECTRICITÉ

Les expériences que nous avons retracées jusqu'ici révèlent trois relations fondamentales :

- ▷ Les charges électriques exercent des forces sur les autres charges.

Page 124 * « Les électrons se déplacent dans les métaux à une vitesse d'environ $1 \mu\text{m/s}$, donc si je marche à la même vitesse le long d'un câble dans lequel circule un courant continu, je ne devrais pas être en mesure de détecter un quelconque champ magnétique. » Qu'est-ce qui est faux dans cette affirmation ?

- ▷ Les charges électriques sont conservées.
- ▷ Les charges, comme toute matière, se déplacent plus lentement que la lumière.

À partir de ces trois affirmations – la définition de la charge, la conservation de la charge et l'invariance de la vitesse de la lumière –, nous pouvons déduire chaque aspect de l'électrodynamique classique. (L'inexistence de la charge magnétique est une hypothèse supplémentaire.) En particulier, on peut déduire les équations de Maxwell du champ de l'électrodynamique à partir de ces trois postulats. Les équations du champ décrivent la manière dont les charges *engendrent* un champ électromagnétique.

Réf. 22 La démonstration de la relation qui existe entre la conservation de la charge et les équations du champ peut être donnée mathématiquement ; nous ne la présenterons pas ici, parce que l'algèbre sous-jacente est quelque peu compliquée. La relation essentielle est que toute l'électrodynamique découle des propriétés des charges que nous avons découvertes jusqu'à maintenant.

Réf. 23

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LES OBJETS ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES

« Et facta mirati, et intellecta assecuti*.
Augustin d'Hippone »

Avant d'étudier plus en détail la dynamique d'un champ électromagnétique, amusons-nous avec l'électricité.

* *

De nos jours, il est simple de se divertir avec les étincelles. Les bobines Tesla, du nom de Nikola Tesla**, sont les dispositifs les plus simples qui permettent de produire de grandes étincelles chez soi. Attention : c'est dangereux, c'est la raison pour laquelle nous ne pouvons (pratiquement) pas nous procurer de tels dispositifs dans le commerce. Le schéma de base et un exemple sont indiqués sur la [Figure 16](#). Les bobines Tesla ressemblent à de grands champignons métalliques (pour éviter d'avoir des décharges accidentelles), des plans pour leur construction peuvent être consultés sur de nombreux sites Web ou obtenus dans les nombreux clubs de passionnés, par exemple www.stefan-kluge.de.

* *

Défi 33 s En 1722, George Graham découvrit, en observant une aiguille de boussole, que le champ magnétique de la Terre révèle des variations journalières. Pouvez-vous imaginer pourquoi ces fluctuations se produisent ?

* *

Si le fait même de frapper sur une porte en bois représente un effet électrique, nous de-

* « Admirer les miracles, et s'efforcer de comprendre. » Saint Augustin, sermon 98, § 3.

** Никола Тесла (Smiljan 1856–New York 1943) était un inventeur et ingénieur serbe. Il conçut et promut le système de courant alternatif polyphasé, le générateur électrique de courant alternatif, les communications sans fil, l'éclairage fluorescent et de nombreuses autres applications de l'électricité. Il est également un des pionniers de la radio. L'unité SI du champ magnétique est baptisée en son honneur. Personnage extravagant, ses idées étaient parfois irréalistes : par exemple, il pensait que les bobines Tesla pourraient être utilisées pour les transmissions électriques à distance.

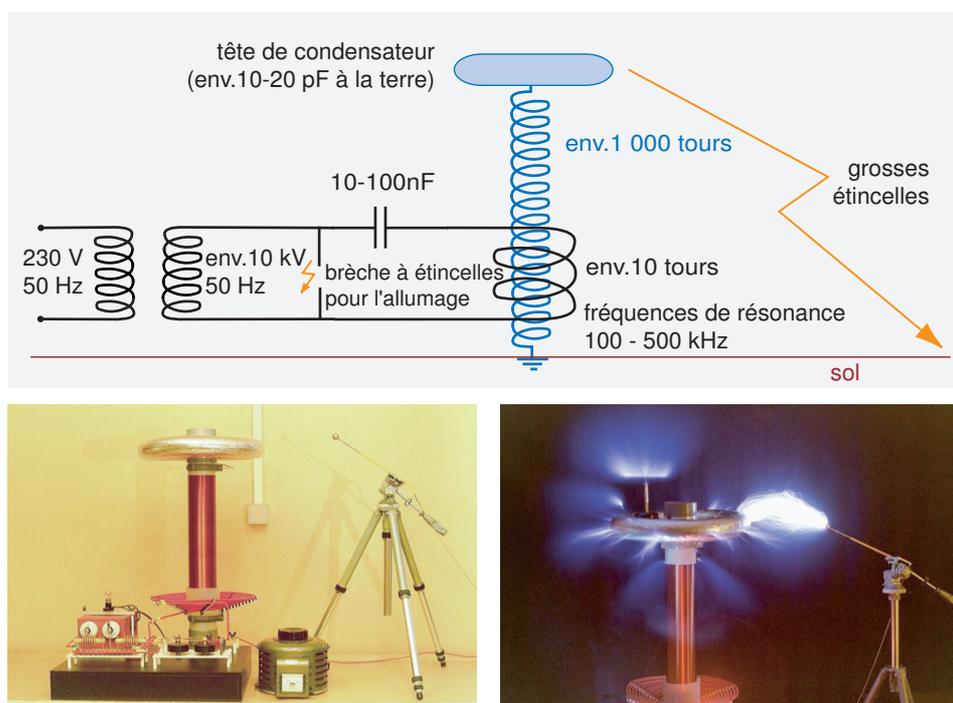


FIGURE 16 Le schéma, la mise en œuvre et le fonctionnement d'une bobine Tesla, faisant apparaître l'étincelle et la couronne de décharges. (photographies © Robert Billon)

Défi 34 d vrons être capables de déceler des champs lorsque nous le faisons. Pouvez-vous concevoir une expérience qui le vérifie ?

* *

Les oiseaux ne subissent aucune lésion lorsqu'ils se posent sur des lignes électriques non protégées. Néanmoins, nous n'observons presque jamais d'oiseaux sur les lignes à très haute tension de 100 kV ou plus, qui transportent l'électricité sur les longues distances.

Défi 35 s Pourquoi ?

* *

Défi 36 d Qu'est-ce qui se passe sur la Figure 17 ? Pourquoi la plupart de ces photographies sont-elles prises par beau temps et avec des enfants blonds ?

* *

Défi 37 s Comment pouvez-vous distinguer un aimant d'une barre métallique non aimantée de même taille et de même composition matérielle, en n'utilisant aucun procédé externe ?

* *

Défi 38 s Comment brancheriez-vous une ampoule sur le réseau électrique ainsi que trois interrupteurs de telle façon que la lumière puisse être allumée à l'aide de n'importe quel interrupteur et éteinte avec n'importe quel autre ? Et avec quatre interrupteurs ? Personne ne prendra au sérieux un physicien capable de retrouver les équations de Maxwell mais



FIGURE 17 Un effet courant dans les terrains de jeu. (© Evan Keller)

incapable de résoudre ce petit problème.

* *

Les premiers instruments construits pour générer des courants électriques furent les grosses machines à frottement. Ensuite, en 1799, le scientifique italien Alessandro Volta (1745–1827) inventa un nouveau dispositif pour générer l'électricité qu'il baptisa *pile*. Aujourd'hui, on l'appelle *cellule (voltaïque)*, *cellule primaire** ou, de manière moins appropriée, *batterie*. (À proprement parler, une batterie est un ensemble de cellules, comme celle que l'on trouve dans une voiture.) Les cellules voltaïques sont fondées sur des processus chimiques, elles fournissent beaucoup plus de courant et sont plus petites et plus faciles à manipuler que les machines électrostatiques. L'invention de la batterie bouleversa si profondément la recherche sur l'électricité que Volta devint mondialement célèbre. Finalement, une source élémentaire et fiable d'électricité était disponible pour la réalisation des expérimentations. Contrairement aux machines à frottement, les piles sont compactes, fonctionnent sous toutes les conditions atmosphériques et ne font pas de bruit.

Une pomme ou une pomme de terre avec un morceau de cuivre et un autre de zinc insérés à l'intérieur représente une des cellules voltaïques les plus simples possibles. Elle fournit une tension d'environ 1 V et peut être utilisée pour alimenter des horloges numériques ou pour produire des cliquetis dans les écouteurs. Volta fut également celui qui découvrit la loi de la charge électrique $q = CU$ des condensateurs (C étant la capacité électrique et U la tension), et fut l'inventeur de l'électromètre à condensateur ultrasensible. Bien qu'étant un homme modeste, l'unité de la différence de potentiel électrique, ou « tension » comme Volta avait l'habitude de la désigner, fut déduite de son propre nom**. Une « batterie » est constituée d'un grand nombre de cellules voltaïques : ce terme pro-

* Une *cellule secondaire* est une cellule rechargeable.

** En anglais, la tension électrique se dit « voltage ». [N. D. T.]

vient d'un usage plus récent et pratiquement exclusivement militaire*. Une batterie de téléphone portable constitue tout simplement un agencement plus élaboré d'un certain nombre de pommes ou de pommes de terre.

* *

Défi 40 s Un PC ou un téléphone peut communiquer sans câble, en utilisant des ondes radio. Pourquoi ceux-ci, ainsi que les autres appareils électriques, ne sont-ils pas capables d'obtenir leur *alimentation électrique* via les ondes radio, éliminant ainsi les câbles électriques ?

* *

Défi 41 s Les objets qui ne possèdent pas de symétrie droite-gauche sont qualifiés de *chiraux*, d'après le mot grec signifiant « main ». Pouvez-vous réaliser un miroir qui ne permute pas la chiralité (c'est-à-dire qui « ne permute pas la droite et la gauche ») ? De deux manières différentes ?

* *

Un rouleau de ruban adhésif est un dispositif redoutable. Si vous tirez vivement le rouleau, vous pouvez provoquer une émission de lumière (par le biais de la triboluminescence) et de petites étincelles. On soupçonne que plusieurs explosions dans des mines furent déclenchées parce qu'une telle étincelle a enflammé un mélange de gaz combustible.

* *

Défi 42 s Prenez une enveloppe, mouillez-la et cachez-la. Après l'avoir laissée sécher pendant une journée ou plus, ouvrez-la dans l'obscurité. À l'emplacement où les deux côtés du papier sont en train d'être séparés l'un de l'autre, l'enveloppe émet une lueur bleutée. Pourquoi ? Est-il possible d'accélérer cette expérience en utilisant un sèche-cheveux ?

* *

L'électromagnétisme est plein d'effets étonnants et arbore de nombreuses réalisations qui peuvent être reproduites à la maison. Internet regorge de descriptions permettant de construire des bobines Tesla pour engendrer des étincelles, des canons magnétiques ou des canons électriques pour projeter des objets, des machines électrostatiques pour faire hérissier vos cheveux, des bocaux en verre avec décharges tactiles et beaucoup d'autres encore. Si vous aimez expérimenter, effectuez simplement une recherche sur ces termes.

* *

Une haute tension peut engendrer une circulation de courant à travers l'air, parce que l'air devient conducteur dans des champs électriques puissants. Lors de telles décharges, les molécules de l'air sont mises en mouvement. Par conséquent, nous pouvons faire en sorte que des objets, qui sont fixés à une source pulsée de haute tension, s'élèvent en l'air si nous optimisons ce mouvement de l'air de telle façon qu'il soit dirigé partout

* Une pile faite de successions de plaques de zinc, de feuilles de papier buvard imbibées d'eau salée et de pièces en cuivre est aisée à construire chez soi et à tester avec une calculatrice ou une montre à affichage numérique.

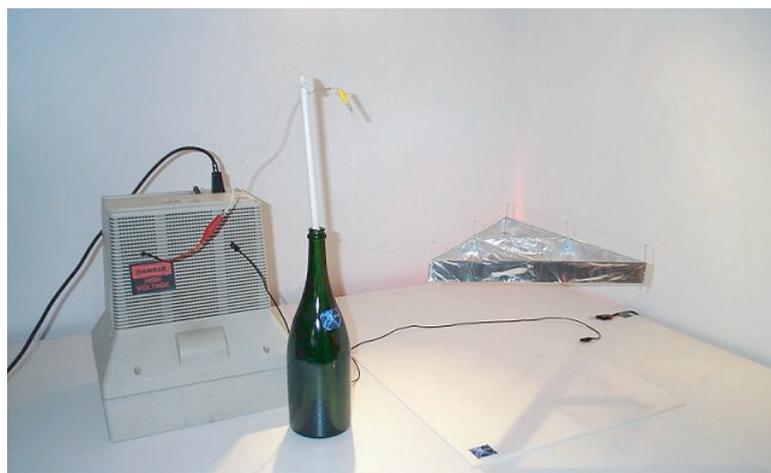


FIGURE 18
Soulèvement d'un objet léger – recouvert d'une feuille d'aluminium – en utilisant une décharge de haute tension. (© Jean-Louis Naudin sur www.jlnlabs.org)

vers le bas. Cette haute tension est donc effectivement utilisée pour accélérer l'air ionisé dans une direction. Par conséquent, un objet se déplacera dans la direction opposée, en employant le même principe qu'une fusée. Un exemple, qui utilise l'alimentation électrique d'un écran d'ordinateur, est indiqué sur la [Figure 18](#). (Soyez prudents : danger !) Une foule de sites Web expliquent comment construire ces ascenseurs chez soi. Sur la [Figure 18](#), la bouteille et la bougie sont utilisées comme isolants de haute tension pour maintenir l'un des deux minces fils de haute tension (non visible sur la photographie) suffisamment haut en l'air, afin d'éviter que les décharges ne se produisent dans l'environnement ou n'interfèrent avec le mouvement de l'ascenseur. Malheureusement, la plupart des sites Web – pas tous – fournissent des explications erronées ou confuses de ce phénomène. Ces sites Web représentent donc un excellent exercice afin que nous apprenions à discerner la réalité de la spéculation.

Défi 43 e

* *

Les effets électriques produits par le frottement et par l'écoulement liquide sont généralement insignifiants. Cependant, dans les années 1990, un nombre important de pétroliers sombrèrent subitement. Les marins avaient lavé les réservoirs de pétrole en arrosant les parois des cuves avec de l'eau de mer. L'arrosage conduisit au chargement en électricité des réservoirs, une décharge provoqua alors l'inflammation des vapeurs de pétrole contenues dans les cuves. Cela déclencha une explosion, suite à quoi les pétroliers coulèrent. Des accidents analogues se produisent aussi régulièrement lorsque des produits chimiques sont transvasés d'une citerne à une autre.

* *

En frottant une cuillère en plastique avec un morceau de laine, celle-ci se charge. Une telle cuillère chargée peut être utilisée pour extraire du poivre d'un mélange sel-poivre en tenant la cuillère au-dessus du mélange. Pourquoi ?

Défi 44 s

* *

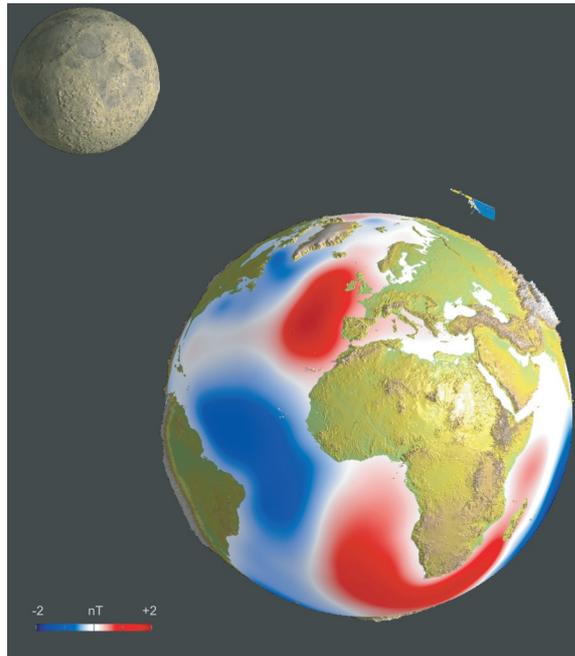


FIGURE 19 Le champ magnétique dû aux marées. (© Stefan Maus)

Lorsque des charges se déplacent, elles engendrent un champ magnétique. En particulier, lorsque des ions situés à l'intérieur de la Terre se déplacent à cause des mouvements de convection, ils donnent naissance au champ magnétique terrestre. Quand les ions situés très haut dans l'atmosphère sont déplacés par l'action du vent solaire, un orage géomagnétique surgit. L'intensité de son champ peut être aussi importante que celle de la Terre elle-même. En 2003, un mécanisme supplémentaire fut découvert. Lorsque les marées déforment la surface de l'eau des océans, les ions contenus dans l'eau de mer produisent un minuscule champ magnétique, qui peut être mesuré par des magnétomètres ultrasensibles embarqués dans les satellites gravitant autour de la Terre. Après deux années de mesures effectuées par un petit satellite, il a été possible de réaliser un magnifique film des flux océaniques. La Figure 19 en donne un exemple.

Réf. 24

* *

Les termes électrode, électrolyte, ion, anode et cathode ont été suggérés par William Whewell (1794–1866) à la demande de Michael Faraday. Ce dernier n'ayant pas d'éducation formelle, il avait demandé à son ami Whewell de forger deux mots d'origine grecque pour lui. Pour anode et cathode, Whewell considéra des mots qui signifient littéralement « rue ascendante » et « rue descendante ». Faraday vulgarisa alors ces termes, comme les autres mots mentionnés ci-dessus.

* *

Défi 45 s L'impulsion lumineuse la plus courte produite jusqu'à présent a une longueur de 100 as. À combien de longueurs d'onde de lumière verte celle-ci correspond-elle ?

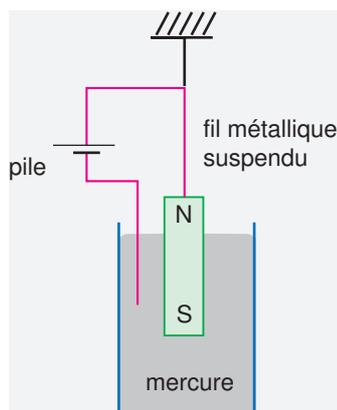


FIGURE 20 Un moteur unipolaire.

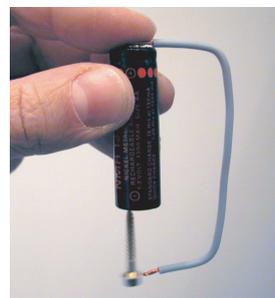


FIGURE 21 Le moteur le plus simple. (© Stefan Kluge)

* *

Défi 46 s Pourquoi voyons-nous souvent les ombres des maisons et les ombres des arbres, mais jamais les ombres des câbles électriques suspendus au-dessus des rues ?

* *

Défi 47 s Comment mesureriez-vous la vitesse de la pointe d'un coup de foudre ? Quelle plage de valeurs attendriez-vous ?

* *

Réf. 25 Un des moteurs électriques les plus simples possibles fut découvert par Faraday en 1831. Un aimant suspendu dans du mercure va commencer à tourner sur lui-même si un courant circule à travers lui. (Regardez la Figure 20.) De surcroît, lorsque nous obligeons l'aimant à tourner, le dispositif (également souvent dénommé roue de Barlow) fonctionne aussi comme un générateur de courant. D'aucuns ont même tenté de produire du courant domestique avec un tel système ! Pouvez-vous préciser son fonctionnement ?

Défi 48 s

La version moderne de ce moteur fonctionne avec une pile, un fil métallique, un aimant conducteur au samarium-cobalt et une vis. Le résultat est indiqué sur la Figure 21.

* *

Réf. 26 Le champ magnétique de la Terre possède une intensité dipolaire de $7,8 \cdot 10^{22} \text{ A m}^2$. Il nous protège, comme l'atmosphère, des particules issues du rayonnement cosmique et du vent solaire fatals, en les déviant vers les pôles. Aujourd'hui, une absence de champ magnétique entraînerait une forte exposition aux rayonnements lors des journées ensoleillées mais, par le passé, son absence aurait empêché l'évolution des espèces humaines. Nous devons notre existence au champ magnétique.

* *

L'ionosphère qui entoure la Terre possède une fréquence de résonance de 7 Hz. Pour cette raison, tout appareil mesurant des basses fréquences détecte toujours un signal fort

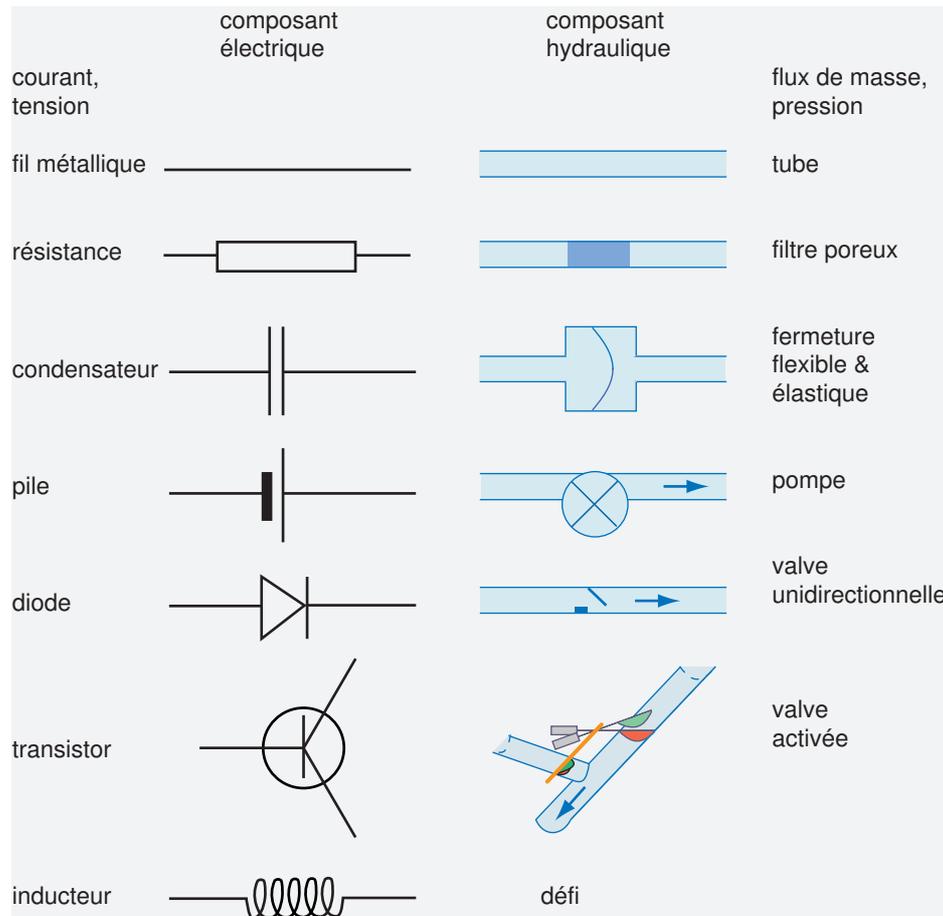


FIGURE 22 La correspondance entre l'électronique et l'écoulement de l'eau.

Défi 49 s à cette valeur. Pouvez-vous fournir une explication de cette fréquence ?

* *

Le Soleil est visible à l'œil nu jusqu'à une distance de 50 années-lumière seulement. Est-ce vrai ?

Défi 50 s

* *

À la maison, l'électricité est principalement utilisée sous la forme de courant alternatif. Autrement dit, aucun électron ne circule vraiment à travers les fils, puisque la vitesse de dérive des électrons dans les fils de cuivre est de l'ordre de $1 \mu\text{m/s}$; ceux-ci se déplacent simplement d'avant en arrière de 20 nm. Rien ne rentre ni ne sort des câbles ! Pourquoi les entreprises de production d'électricité exigent-elles un véritable flux d'argent en compensation, au lieu de se satisfaire d'un aller et retour monétaire ?

Défi 51 e

* *

La comparaison entre l'électricité et l'eau constitue une bonne manière de comprendre

l'électronique. La [Figure 22](#) montre quelques exemples que même un adolescent peut manipuler. Pouvez-vous compléter cette correspondance pour la bobine, donc pour un transformateur ?

Défi 52 s

* *

Les électrons et les protons ont-ils la même charge ? Des expériences montrent que les valeurs sont équivalentes à au moins vingt chiffres près. Comment pourriez-vous le vérifier ?

Défi 53 pe

* *

La charge est également indépendante de la vitesse. Comment pourriez-vous le vérifier ?

Défi 54 pe

* *

Les aimants peuvent être utilisés, même par des écoliers, pour grimper le long de parois métalliques. Jetez un œil au site Web www.physicslessons.com/TPNN.htm.

Page 76

Des champs magnétiques extrêmement puissants révèlent des effets étranges. Pour des champs de 10^{10} T, le vide devient significativement biréfringent, des photons peuvent se séparer et fusionner, et les atomes sont comprimés. On estime que les atomes d'hydrogène, par exemple, sont deux cents fois plus proches les uns des autres dans une direction donnée. Par chance, ces conditions extrêmes n'existent que dans des étoiles à neutrons particulières, appelées *magnétars*.

* *

Une bonne façon de faire des affaires consiste à produire de l'électricité et à la vendre. En 1964, une méthode complètement inédite fut inventée par Fletcher Osterle. Cette méthode fut présentée à un large public lors d'une admirable expérience en 2003. Nous pouvons prendre une plaque de verre, y ajouter des couches conductrices de chaque côté, puis graver quelque cent mille canaux minuscules à travers la plaque, chacun d'un diamètre d'environ $15 \mu\text{m}$. Lorsque de l'eau s'écoule à travers ces canalisations, un courant est produit. Les contacts au niveau des deux plaques conductrices peuvent être utilisés comme bornes de batterie.

Réf. 27

Ce dispositif élémentaire tire profit du fait que le verre, comme la plupart des isolants, est recouvert d'une couche chargée lorsqu'il est plongé dans un liquide. Pouvez-vous imaginer pourquoi un courant est généré ? Malheureusement, le rendement de cette production électrique n'est que de 1 % environ, rendant cette méthode beaucoup moins intéressante qu'une simple roue à auge actionnant une dynamo.

Défi 55 s

* *

Pour visualiser de magnifiques animations sur les champs magnétique et électrique, consultez le site web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations.

* *

Les semi-conducteurs à arséniure de gallium peuvent être modélés sous la forme de nanocristaux (ou particules quantiques) et de contacts ponctuels quantiques. Ces structures

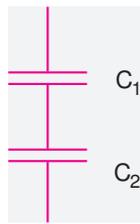


FIGURE 23
Condensateurs en série.

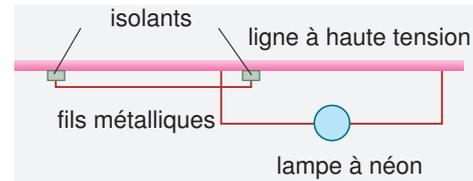


FIGURE 24 Une lampe à néon suspendue sous une ligne à haute tension.

permettent de compter les électrons un à un, ce qui est désormais réalisé de manière routinière dans plusieurs laboratoires dans le monde.

* *

La loi d'Ohm, l'observation selon laquelle pour la majorité des matériaux l'intensité du courant est proportionnelle à la tension, est due à un professeur. Georg Simon Ohm* explora très profondément cette question. Si à l'époque de telles mesures étaient difficiles à réaliser, cela a changé maintenant. Récemment, la résistance électrique d'atomes uniques a même été mesurée : dans le cas du xénon, elle se révèle être d'environ $10^5 \Omega$. Il est également apparu que des atomes de plomb sont dix fois plus conducteurs que des atomes d'or. Pouvez-vous imaginer pourquoi ?

Réf. 87

Défi 56 pe

* *

Les charges contenues dans deux condensateurs montés en série ne sont généralement pas égales, comme le laisserait entendre une théorie naïve. Idéalement, pour des condensateurs parfaits, sans pertes, le rapport des tensions est donné par le rapport inverse des capacités $V_1/V_2 = C_2/C_1$, à cause de l'égalité entre les charges électrostatiques emmagasinées. On déduit facilement cela de la Figure 23. Cependant, en pratique, ce n'est correct que pour des durées allant de quelques minutes à quelques douzaines de minutes. Pourquoi ?

Réf. 88

Défi 57 s

* *

Sur certaines lignes principales à haute tension qui traversent le paysage, des petites lampes à néon brillent lorsque le courant circule, comme indiqué sur la Figure 24. (Vous pouvez les voir depuis le train lorsque vous voyagez de Paris à l'aéroport de Roissy.) Comment cela est-il possible ?

Défi 58 pe

* *

La *polarisabilité électrique* est la propriété de la matière responsable de la déviation de l'écoulement de l'eau d'un robinet, provoquée par un peigne chargé. Elle est définie comme étant l'intensité du dipôle électrique induit par un champ électrique appliqué.

Page 15

* Georg Simon Ohm (n. Erlangen 1789, d. Munich 1854) était un physicien et professeur bavarois. Ses efforts furent reconnus tard seulement dans sa vie, et il devint en fin de compte professeur à l'université de Munich. Par la suite, l'unité de la *résistance électrique*, le facteur de proportionnalité entre la tension et l'intensité, fut nommée en son honneur.

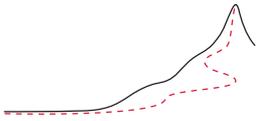
La définition traduit simplement le fait que de nombreux objets acquièrent une charge lorsqu'un champ électrique leur est appliqué. À ce propos, la manière précise dont les peignes se chargent lorsqu'ils sont frottés, un phénomène appelé *électrification*, constitue toujours une des énigmes de la science moderne.

* *

Un champ magnétique pur ne peut pas être transformé en un champ électrique pur par un changement de référentiel d'observation. Le mieux que nous puissions obtenir est un état similaire à un mélange équilibré de champs magnétique et électrique. Pouvez-vous fournir un argument qui éclaire ce phénomène ?

Défi 59 pe





CHAPITRE 2

DESCRIPTION DE LA DYNAMIQUE DU CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Page ??

Entre les années 1861 et 1865, considérant en détail toutes les expériences qui lui étaient connues, James Clerk Maxwell produisit une description de l'électromagnétisme qui forme l'un des piliers de la physique*. Maxwell prit en considération tous les résultats expérimentaux et extirpa leurs principes fondamentaux communs, comme indiqué sur les Figures 25 et 26. Vingt ans plus tard, Heaviside et Hertz extrayaient les points essentiels des idées de Maxwell, baptisant leur synthèse la *théorie de Maxwell du champ électromagnétique*. Elle est composée de deux équations (quatre dans le cas non relativiste).

La première équation représente la formulation précise qui stipule que les champs électromagnétiques *naissent des charges*, et de nulle part ailleurs. L'équation correspondante s'écrit sous différentes formes**

$$\begin{aligned}
 d\mathbf{F} &= j \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad \text{ou} \\
 d^{\nu}F_{\mu\nu} &= j^{\mu} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad \text{ou} \\
 (\partial_t/c, -\partial_x, -\partial_y, -\partial_z) \begin{pmatrix} 0 & E_x/c & E_y/c & E_z/c \\ -E_x/c & 0 & -B_z & B_y \\ -E_y/c & B_z & 0 & -B_x \\ -E_z/c & -B_y & B_x & 0 \end{pmatrix} &= \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} (\rho, j_x/c, j_y/c, j_z/c) \quad \text{ou} \\
 \nabla \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \text{et} \quad \nabla \wedge \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= \mu_0 \mathbf{j}.
 \end{aligned} \tag{16}$$

Chacune des quatre manières équivalentes d'écrire cette équation fait une constatation élémentaire : *la charge électrique porte le champ électromagnétique*. Cette remarque, et

* James Clerk Maxwell (n. Édimbourg 1831, d. Cambridge 1879) était un physicien écossais. Il fonda l'électromagnétisme en unifiant de manière théorique l'électricité et le magnétisme, comme il est décrit dans ce chapitre. Son œuvre sur la thermodynamique forme le second pilier de ses activités. De plus, il étudia la théorie des couleurs et développa le triangle des couleurs (également appelé « triangle de Maxwell » [N.D.T.]). Il fut l'un des premiers à réaliser des photographies en couleurs. Il est considéré par beaucoup comme le plus grand physicien ayant existé. « Clerk » et « Maxwell » forment tous les deux ses noms de famille.

** Maxwell généralisa cette équation aux situations où les charges ne sont pas entourées par du vide, mais situées à l'intérieur de la matière. Nous n'explorerons pas ces cas durant notre promenade parce que, comme nous le verrons au cours de notre ascension montagneuse, le cas apparemment particulier du vide décrit en réalité toute la nature.

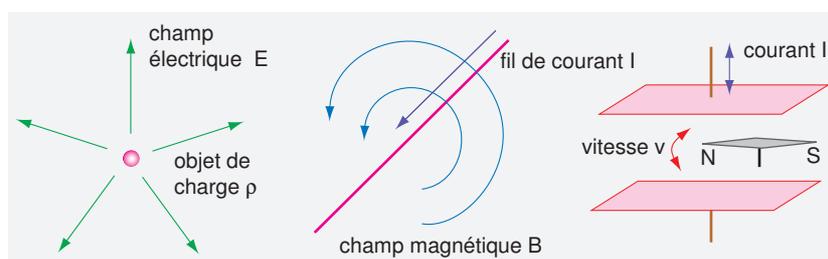


FIGURE 25 La première équation de Maxwell.



FIGURE 26 La deuxième équation de Maxwell.

également ses équations, est équivalente aux trois observations fondamentales de la **Figure 25**. Elle décrit la relation de Coulomb, la relation d'Ampère, et la manière dont la variation des champs électriques induit les effets magnétiques, comme vous devriez pouvoir le vérifier vous-même.

Défi 60 pe

La deuxième moitié de la dernière forme de l'équation (16) fait appel à la règle de la main droite pour les champs magnétiques situés autour des fils, à travers le produit vectoriel. L'équation établit également que la variation des champs électriques induit des champs magnétiques. Cet effet est crucial dans l'enroulement primaire des transformateurs. Le facteur $1/c^2$ implique que cet effet est petit ; c'est pourquoi des bobines ayant un grand nombre d'enroulements ou des courants électriques puissants sont nécessaires pour le déceler. À cause du produit vectoriel, toutes les lignes du champ magnétique induit sont des lignes fermées.

Défi 61 e

Le deuxième fruit du travail de Maxwell concerne la description détaillée de la manière dont les champs électriques oscillants créent des champs magnétiques, et vice versa. En particulier, un champ électrique peut exhiber des tourbillons uniquement lorsqu'il y a un champ magnétique variable. De surcroît, elle exprime le fait observable que dans la nature il n'existe pas de charges magnétiques, c'est-à-dire que les champs magnétiques n'ont pas de source. Tous ces résultats sont décrits par la relation suivante que l'on trouve

sous différentes formes

$$\begin{aligned}
 d {}^* \mathbf{F} = 0 \quad \text{avec} \quad {}^* \mathbf{F}^{\rho\sigma} &= \frac{1}{2} \varepsilon^{\rho\sigma\mu\nu} \mathbf{F}_{\mu\nu} \quad \text{ou} \\
 \varepsilon_{\mu\nu\rho} \partial_\mu \mathbf{F}_{\nu\rho} &= \partial_\mu \mathbf{F}_{\nu\rho} + \partial_\nu \mathbf{F}_{\rho\mu} + \partial_\rho \mathbf{F}_{\mu\nu} = 0 \quad \text{ou} \\
 \begin{pmatrix} \gamma \frac{1}{c} \partial_t \\ \gamma \partial_x \\ \gamma \partial_y \\ \gamma \partial_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & B_x & B_y & B_z \\ -B_x & 0 & -E_z/c & E_y/c \\ -B_y & E_z/c & 0 & -E_x/c \\ -B_z & -E_y/c & E_x/c & 0 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{ou} \\
 \nabla \mathbf{B} = 0 \quad \text{et} \quad \nabla \wedge \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}.
 \end{aligned} \tag{17}$$

Défi 62 pe

Cette relation exprime l'absence de sources pour le tenseur dual du champ, généralement noté ${}^* \mathbf{F}$: il n'y a pas de charges magnétiques, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de monopôles magnétiques dans la nature. En pratique, cette équation est toujours employée en association avec la précédente. Pouvez-vous voir pourquoi ?

Puisqu'il n'y a pas de charges magnétiques, les lignes du champ magnétique sont toujours fermées, elles ne possèdent aucun point de départ ou d'arrivée. Par exemple, les lignes du champ se prolongent à l'intérieur des aimants. On exprime souvent cela sous forme mathématique en stipulant que le flux magnétique traversant une surface fermée S – telle qu'une sphère ou un cube – s'annule toujours : $\int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$.

La seconde moitié de la dernière forme de l'équation (17), également indiquée sur la Figure 26, exprime l'idée que les variations dans les champs magnétiques produisent des champs électriques : cet effet est utilisé dans les enroulements secondaires des transformateurs et dans les dynamos. Le produit vectoriel présent dans cette expression implique qu'un champ électrique engendré de cette manière – également appelé *champ électromoteur* – ne possède aucune extrémité de départ ou d'arrivée. Les lignes du champ électromoteur dessinent donc des cercles : dans la majorité des situations concrètes, elles circulent le long des circuits électriques. Le signe moins est primordial pour assurer la conservation de l'énergie et possède une dénomination spécifique : c'est la *règle de Lenz*.

De même que l'équation d'évolution de Lorentz (11), qui décrit comment les charges se déplacent si nous connaissons le mouvement des champs, les équations d'évolution de Maxwell (16) et (17) décrivent tous les phénomènes électromagnétiques se produisant aux échelles de la vie courante, des téléphones portables et des batteries de voiture aux ordinateurs personnels, aux lasers, à l'éclair, aux hologrammes et aux arcs-en-ciel. Nous détenons dorénavant un système aussi structuré que l'expression $a = GM/r$ ou que les équations du champ d'Einstein pour la gravitation.

Nous n'étudierons pas les nombreuses applications des équations du champ, mais nous allons immédiatement poursuivre notre objectif qui est de comprendre le lien avec le mouvement quotidien et avec le mouvement de la lumière. En réalité, le champ électromagnétique possède une propriété importante que nous avons citée tout au départ : le champ lui-même peut se déplacer.

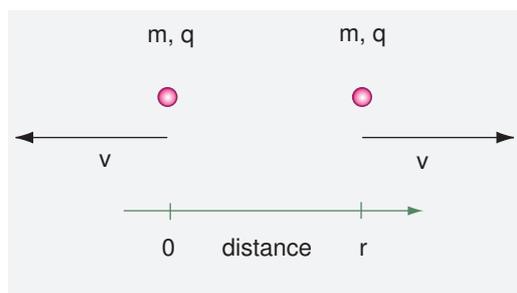


FIGURE 27 Particules chargées après une collision.

COLLISIONS DE PARTICULES CHARGÉES

Une expérience simple permet de clarifier les propriétés des champs électromagnétiques définies ci-dessus. Lorsque deux particules chargées se heurtent, leur quantité de mouvement totale *n'est pas* conservée.

Imaginez deux particules de masse identique et de charge égale juste après une collision, quand elles sont en train de s'éloigner l'une de l'autre. Imaginez également que les deux masses sont grandes, de telle sorte que l'accélération due à leur répulsion électrique soit petite. Pour un observateur situé en leur centre de gravité commun, chaque particule ressent une accélération provenant du champ électrique de l'autre particule. Le champ électrique E est donné par ce que nous appelons la *formule de Heaviside*

Défi 63 pe

$$E = \frac{q(1 - v^2/c^2)}{4\pi\epsilon_0 r^2} . \quad (18)$$

En d'autres termes, le système possède globalement une quantité de mouvement totale nulle.

Considérez un deuxième observateur, se déplaçant par rapport au premier avec une vitesse v , de telle sorte que la première charge sera au repos. L'expression (18) conduit à deux valeurs *différentes* des champs électriques, une à l'emplacement de chaque particule. Autrement dit, le système des deux particules n'est pas en mouvement inertiel, comme nous pourrions nous y attendre. La quantité de mouvement totale n'est pas conservée. Où s'est-elle enfuie ?

Réf. 28

Défi 64 s

Cet effet, au premier abord surprenant, a été érigé au rang de théorème par Van Dam et Wigner. Ils montrèrent que, pour un système de particules interagissant à distance, l'énergie-impulsion totale des particules ne peut pas demeurer constante dans un référentiel inertiel quelconque.

Réf. 29

La quantité de mouvement totale du système est conservée uniquement parce que le champ électromagnétique lui-même transporte aussi de l'impulsion. Si les champs électromagnétiques possèdent une quantité de mouvement, alors ils sont capables de *frapper* des objets et d'être frappés par ceux-ci. Comme nous allons le montrer ci-dessous, la lumière est également un champ électromagnétique. Ainsi, nous devrions être capables de déplacer des objets en les éclairant avec de la lumière. Nous devrions même être capables de suspendre des particules en l'air en leur envoyant de la lumière par-dessous. Ces deux prédictions s'avèrent exactes, et certaines expériences vont bientôt être présentées.

Nous concluons que n'importe quelle sorte de champ conduisant à des interactions entre particules doit transporter de l'énergie et de la quantité de mouvement, puisque cet argument s'applique à tous les cas de cette espèce. En particulier, il s'applique aux interactions nucléaires. En réalité, dans la partie quantique de notre ascension montagnaise nous découvrirons même un résultat complémentaire : tous les champs sont eux-mêmes constitués de particules. L'énergie et la quantité de mouvement des champs deviennent alors une manifestation évidente de leur présence.

LE CHAMP DE JAUGE – POTENTIEL VECTEUR DU CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE

L'étude de la dynamique des champs est dénommée la *théorie des champs*, l'électrodynamique en représentant un exemple manifeste. (L'autre exemple classique est la dynamique des fluides : les champs électromagnétiques en mouvement et le mouvement des fluides sont mathématiquement très similaires.) La théorie des champs est un sujet d'étude magnifique ; les lignes du champ, les lignes équipotentielles et les lignes tourbillonnaires constituent certains des concepts qui sont introduits dans ce domaine. Ils fascinent de nombreuses personnes*. Cependant, dans cette ascension montagnaise, nous focaliserons la discussion sur le mouvement.

Nous avons vu que les champs nous obligent à étendre notre conception du mouvement. Le mouvement ne représente pas seulement la modification de l'état des objets et de l'espace-temps, mais également la *variation de l'état des champs*. Nous avons par conséquent besoin d'une description précise et exhaustive de l'état des champs. Les observations concernant l'ambre et les aimants nous ont montré que *les champs possèdent de l'énergie et de la quantité de mouvement*. Ils peuvent en transmettre aux particules. Les expériences avec les générateurs électriques ont indiqué que les objets peuvent accroître l'énergie et la quantité de mouvement des champs. Nous devons donc déterminer une *fonction d'état* qui nous permette de définir l'énergie et la quantité de mouvement pour les champs électrique et magnétique. Puisque ceux-ci transportent de l'énergie, leurs mouvements respectent la vitesse limite de la nature.

Maxwell avait déterminé la fonction d'état de manière classique, en deux étapes. La première est la définition du *potentiel vecteur du champ magnétique*, qui décrit la quantité de mouvement par unité de charge que le champ fournit :

Réf. 30

$$\mathbf{A} = \frac{\mathbf{p}}{q}. \quad (19)$$

Lorsqu'une particule chargée se déplace à travers un potentiel magnétique $\mathbf{A}(\mathbf{x})$, son impulsion varie de $q\Delta\mathbf{A}$: elle varie de la différence qu'il y a entre les valeurs de potentiel aux points de départ et d'arrivée, multipliée par sa charge. En raison de cette définition,

Défi 65 s

* Quelle est la relation, pour des champs statiques, entre les lignes du champ et les surfaces (équi)potentielles ? Une ligne de champ peut-elle traverser deux fois une surface de potentiel ? Pour plus de détails sur ces sujets, consultez le livre *gratuit* de ΒΟ ΤΗΙΔÉ, *Electromagnetic Field Theory*, sur son site www.plasma.uu.se/CED/Book. Et, bien évidemment, lisez également les ouvrages, en langue anglaise, de Schwinger et de Jackson.

Réf. 1, Réf. 18

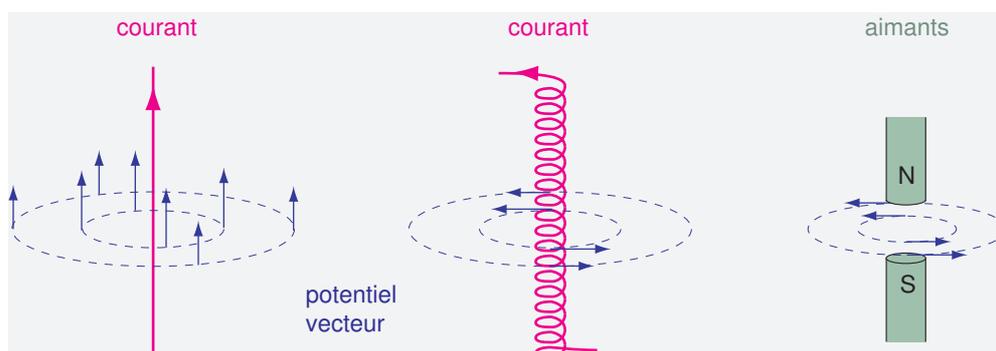


FIGURE 28 Potentiels vecteurs pour certaines situations sélectionnées.

le potentiel vecteur possède la propriété suivante

$$\mathbf{B} = \nabla \wedge \mathbf{A} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (20)$$

c'est-à-dire que le champ magnétique est le *rotationnel* du potentiel magnétique. En anglais, le rotationnel est noté « curl » mais, dans la plupart des langues, comme en français, il est noté « rot ». Pour visualiser ce que le rotationnel signifie, imaginez que les vecteurs du champ soient les vecteurs vitesse de l'écoulement de l'air. Maintenant, placez une minuscule éolienne en un point précis. Si elle tourne, le rotationnel n'est pas nul. La vitesse de rotation de l'éolienne est maximale dans une certaine direction de l'axe ; cette vitesse maximale définit à la fois la grandeur et la direction du rotationnel en ce point. (La règle de la main droite est implicitement requise.) Par exemple, le rotationnel des vecteurs vitesse d'un corps solide en rotation est partout de 2ω , soit le double de la vitesse angulaire.

Défi 66 pe

Réf. 31

Défi 67 pe

Le potentiel vecteur pour un long fil métallique droit transportant du courant est parallèle au fil, il possède la grandeur suivante

$$A(r) = -\frac{\mu_0 I}{4\pi} \ln \frac{r}{r_0}, \quad (21)$$

qui dépend de la distance radiale r au fil et d'une constante d'intégration r_0 . Cette expression du potentiel vecteur, représenté sur la Figure 28, indique comment le courant qui se déplace engendre une quantité de mouvement linéaire dans le champ (électro)magnétique qui l'entoure. Dans le cas d'un solénoïde, le potentiel vecteur « circule » autour du solénoïde. La grandeur vérifie

$$A(r) = -\frac{\Phi}{4\pi r}, \quad (22)$$

où Φ représente le flux magnétique situé à l'intérieur du solénoïde. Nous voyons qu'en général le potentiel vecteur est *entraîné dans le sillage* des charges en mouvement. Cet effet d'entraînement décroît pour des distances plus importantes. Cela s'accorde bien avec l'image du potentiel vecteur comme représentant la quantité de mouvement du

champ électromagnétique.

Ce comportement du potentiel vecteur autour des charges est évocateur de la manière dont le miel est entraîné dans le sillage d'une cuillère se déplaçant dans celui-ci. Dans les deux cas, cet effet d'entraînement décroît avec la distance. Toutefois, le potentiel vecteur, contrairement au miel, ne produit *aucun* frottement qui ralentit la charge en mouvement. Le potentiel vecteur se comporte donc comme un liquide sans frottement.

À l'intérieur du solénoïde, le champ magnétique est constant et uniforme. Pour un tel champ \mathbf{B} nous trouvons un potentiel vecteur

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = -\frac{1}{2}\mathbf{B} \wedge \mathbf{r} . \quad (23)$$

Dans ce cas, le potentiel magnétique s'accroît avec l'augmentation de la distance à l'origine*. Dans le centre du solénoïde, le potentiel s'annule. L'analogie avec le miel entraîné donne exactement le même comportement.

Cependant, il y a un piège. Le potentiel magnétique n'est *pas* défini de manière unique. Si $\mathbf{A}(\mathbf{x})$ représente un potentiel vecteur, alors le potentiel vecteur distinct

$$\mathbf{A}'(\mathbf{x}) = \mathbf{A}(\mathbf{x}) + \text{grad } \Lambda , \quad (24)$$

où $\Lambda(t, \mathbf{x})$ représente une certaine fonction scalaire, est *également* un potentiel vecteur caractérisant la même situation. (Le champ magnétique \mathbf{B} reste le même, cependant.) Pire, pouvez-vous confirmer que les valeurs (absolues) des quantités de mouvement correspondantes varient aussi ? Cette inévitable ambiguïté, appelée *invariance de jauge* ou *symétrie de jauge*, constitue une propriété cruciale du champ électromagnétique. Nous l'explorerons plus en détail ci-après.

Défi 69 pe

Non seulement la quantité de mouvement, mais également l'énergie du champ électromagnétique sont définies de manière équivoque. En réalité, la deuxième étape dans la spécification d'un état pour le champ électromagnétique est la définition du *potentiel électrique* comme étant l'énergie U par unité de charge :

Réf. 30

$$\varphi = \frac{U}{q} . \quad (25)$$

Autrement dit, le potentiel $\varphi(\mathbf{x})$ en un point \mathbf{x} est l'énergie nécessaire pour déplacer une charge unitaire jusqu'au point \mathbf{x} à partir d'un point où le potentiel est nul. L'énergie potentielle est donc donnée par $q\varphi$. À partir de cette définition, le champ électrique \mathbf{E} représente simplement la *variation* du potentiel avec la position, corrigée par la dépendance temporelle de la quantité de mouvement, c'est-à-dire

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi - \frac{\partial}{\partial t}\mathbf{A} . \quad (26)$$

* C'est uniquement possible tant que le champ est constant ; puisque tous les champs s'atténuent aux grandes distances – parce que l'énergie d'un champ est toujours limitée –, le potentiel vecteur aussi chute aux grandes distances.

Manifestement, il existe une liberté dans le choix de la définition du potentiel. Si $\varphi(\mathbf{x})$ est un potentiel possible, alors

$$\varphi'(\mathbf{x}) = \varphi(\mathbf{x}) - \frac{\partial}{\partial t}\Lambda \quad (27)$$

représente également une fonction du potentiel pour la même situation. Cette liberté est la généralisation de la liberté pour définir l'énergie à une constante près. Néanmoins, le champ électrique \mathbf{E} demeure le même pour tous les potentiels.

Réf. 30 Pour se convaincre que les potentiels représentent vraiment l'énergie et la quantité de mouvement du champ électromagnétique, nous remarquons que pour une charge en mouvement nous avons

Défi 70 pe

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}mv^2 + q\varphi\right) &= \frac{\partial}{\partial t}q(\varphi - \mathbf{v}\mathbf{A}) \\ \frac{d}{dt}(m\mathbf{v} + q\mathbf{A}) &= -\nabla q(\varphi - \mathbf{v}\mathbf{A}), \end{aligned} \quad (28)$$

ce qui indique que les variations de l'énergie et de la quantité de mouvement généralisées d'une particule (dans le membre de gauche) sont dues à la variation de l'énergie et de la quantité de mouvement du champ électromagnétique (dans le membre de droite*).

Dans la notation quadri-vectorielle relativiste, l'énergie et l'impulsion du champ apparaissent unifiées dans une seule quantité. La fonction d'état du champ électromagnétique devient

$$A^\mu = (\varphi/c, \mathbf{A}). \quad (29)$$

Il est facile de voir que la description du champ est complète puisque nous avons

$$F = dA \quad \text{ou} \quad F^{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu, \quad (30)$$

ce qui signifie que le champ électromagnétique F est complètement décrit par le quadri-vecteur potentiel A . Mais, comme nous l'avons mentionné, le quadri-vecteur potentiel lui-même *n'est pas* défini de manière unique. En réalité, n'importe quel autre quadri-vecteur potentiel équivalent A' est relié à A par la *transformation de jauge*

$$A'^\mu = A^\mu + \partial^\mu \Lambda \quad (31)$$

où $\Lambda = \Lambda(t, \mathbf{x})$ représente n'importe quel champ scalaire arbitrairement choisi. Le nouveau champ A' conduit au même champ électromagnétique, et aux mêmes accélérations et évolutions. Le potentiel A constitue donc une *surdescription* de la situation physique puisque plusieurs choix de jauges *différents* correspondent à la même situation physique**. Par conséquent nous devons vérifier que tous les résultats des mesures sont

* Cette correspondance indique également pourquoi l'expression $P^\mu - qA^\mu$ apparaît si régulièrement dans les formules. En réalité, elle joue un rôle majeur dans la théorie quantique d'une particule située dans le champ électromagnétique.

** Nous désignons souvent le fait de choisir une fonction Λ par *choisir une jauge*. Le quadri-vecteur potentiel

indépendants des transformations de jauge, c'est-à-dire que toutes les observables sont des quantités invariantes de jauge. De telles quantités invariantes de jauge sont, comme nous venons de le voir, les champs F et $*F$, et en général toutes les quantités classiques. Nous ajoutons que de nombreux physiciens théoriciens emploient le terme « champ électromagnétique » de manière imprécise à la fois pour désigner les quantités $F^{\mu\nu}$ et A_μ .

Il existe une image simple, due à Maxwell, pour aider à surmonter les difficultés conceptuelles introduites par le potentiel vecteur. Il apparaît que l'intégrale de A_μ sur une courbe fermée est invariante de jauge, parce que

$$\oint A_\mu dx^\mu = \oint (A_\mu + \partial_\mu \Lambda) dx^\mu = \oint A'_\mu dx^\mu . \quad (32)$$

En d'autres termes, si nous nous représentons le potentiel vecteur comme étant une quantité qui nous permet d'associer un nombre à une minuscule boucle en chaque point de l'espace, nous obtenons une bonne image invariante de jauge du potentiel vecteur*.

Maintenant que nous avons défini une fonction d'état qui décrit l'énergie et la quantité de mouvement du champ électromagnétique, regardons ce qui se passe plus précisément quand des champs électromagnétiques se déplacent.

ÉNERGIE, QUANTITÉ DE MOUVEMENT ET MOMENT CINÉTIQUE DU CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE

La description brossée jusqu'à présent nous permet de développer l'énergie *totale* E_{nergie} du champ électromagnétique comme

$$E_{\text{nergie}} = \frac{1}{8\pi} \int \epsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{\mu_0} dV . \quad (33)$$

L'énergie apparaît donc au second degré dans les champs.

Pour la quantité de mouvement totale nous obtenons

$$\mathbf{P} = \frac{\epsilon_0}{4\pi} \int \mathbf{E} \wedge \mathbf{B} dV . \quad (34)$$

Cette expression est également appelée *vecteur de Poynting***.

Pour le moment cinétique total, nous avons

$$\mathbf{L} = \frac{\epsilon_0}{4\pi} \int \mathbf{E} \wedge \mathbf{A} dV , \quad (35)$$

où \mathbf{A} représente le potentiel vecteur magnétique.

A est également appelé le *champ de jauge*. Cet usage curieux possède des raisons historiques et est maintenant commun à toute la physique.

Réf. 32 * Dans la partie de ce texte sur la théorie quantique, nous verrons que l'exposant de cette expression, à savoir $\exp(iq \oint A_\mu dx^\mu)/\hbar$, généralement dénommé le *facteur de phase*, peut en réalité être observé directement dans les expériences.

** John Henry Poynting (1852–1914) introduisit ce concept en 1884.

LE LAGRANGIEN DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME

Le mouvement des particules chargées et le mouvement du champ électromagnétique peuvent également être décrits en utilisant un lagrangien au lieu d'employer les trois équations données ci-dessus. Il n'est pas difficile de voir que l'action S_{EDC} pour une particule en électrodynamique classique peut être définie de manière symbolique par*

$$S_{\text{EDC}} = -mc^2 \int d\tau - \frac{1}{4\mu_0} \int \mathbf{F} \wedge \star \mathbf{F} - \int j \wedge A, \quad (36)$$

ce qui, en notation indicielle, devient

$$S_{\text{EDC}} = -mc \int_{-\infty}^{\infty} \sqrt{\eta_{\mu\nu} \frac{dx_n^\mu(s)}{ds} \frac{dx_n^\nu(s)}{ds}} ds - \int_{\mathbf{M}} \left(\frac{1}{4\mu_0} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + j_\mu A^\mu \right) d^4x, \quad (37)$$

ou, en notation 3-vectorielle

$$S_{\text{EDC}} = -mc^2 \int d\tau - \int q\varphi + \int qvA + \int \frac{\epsilon_0}{2} E^2 - \frac{1}{2\mu_0} B^2. \quad (38)$$

Ce qui est nouveau, c'est la mesure du changement (ou action) dû au champ électromagnétique. La variation pure du champ est donnée par le terme $\mathbf{F} \wedge \star \mathbf{F}$, et le changement dû à l'interaction avec la matière est représenté par le terme $j \wedge A$.

Le principe de moindre action, comme d'habitude, établit que le changement qui intervient dans un système est toujours aussi petit que possible. L'action S_{EDC} conduit aux équations d'évolution à condition que cette action soit stationnaire sous des variations δ et δ' des positions et des champs qui tendent vers 0 à l'infini. Autrement dit, le principe de moindre action exige que

$$\begin{aligned} \delta S = 0 \quad \text{quand} \quad x_\mu = x_\mu + \delta_\mu \quad \text{et} \quad A_\mu = A_\mu + \delta'_\mu, \\ \text{à condition que} \quad \delta x_\mu(\theta) \rightarrow 0 \quad \text{pour} \quad |\theta| \rightarrow \infty \\ \text{et que} \quad \delta A_\mu(x_\nu) \rightarrow 0 \quad \text{pour} \quad |x_\nu| \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (39)$$

Page 179 De la même façon que dans le cas de la mécanique, en utilisant la méthode variationnelle pour les deux variables A et x , nous retrouvons les équations d'évolution pour la particule et les champs

Défi 73 pe

$$b^\mu = \frac{q}{m} F_\nu^\mu u^\nu, \quad \partial_\mu F^{\mu\nu} = j^\nu \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}, \quad \text{et} \quad \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \partial_\nu F_{\rho\sigma} = 0, \quad (40)$$

que nous connaissons déjà. Évidemment, elles sont équivalentes au principe variationnel fondé sur S_{EDC} . Ces deux descriptions doivent être complétées en spécifiant les condi-

* Le produit décrit par le symbole \wedge , « coin » ou « chapeau », et l'opérateur dual \star possèdent une signification mathématique précise. Son contexte associé, le concept de *forme* (*mathématique*), nous éloigne beaucoup trop de notre promenade. (En français, on utilise le même symbole \wedge pour représenter le produit vectoriel. Voir par exemple les équations précédentes. [N.D.T.])

Réf. 33

tions initiales pour les particules et les champs, ainsi que les *conditions limites* pour ces dernières. Nous avons besoin des dérivées d'ordre un et zéro de la position des particules, et de la dérivée d'ordre zéro pour le champ électromagnétique.

La forme du lagrangien implique que l'électromagnétisme soit *réversible dans le temps*, ce qui signifie que chaque exemple du mouvement engendré par des causes électriques ou magnétiques peut également se produire à l'envers. Nous le déduisons aisément des propriétés du lagrangien. D'un autre côté, la vie quotidienne exhibe de nombreux effets électriques et magnétiques qui ne sont pas temporellement invariants, comme lorsque des corps se brisent ou quand des ampoules électriques grillent. Pouvez-vous expliquer comment tous ces éléments s'ajustent dans ce modèle ?

Défi 74 s

En résumé, avec le lagrangien (36) toute l'électrodynamique classique peut être décrite et comprise. Dans le reste de ce chapitre, nous étudions certains sujets particuliers tirés de ce vaste domaine.

SYMÉTRIES – LE TENSEUR ÉNERGIE-IMPULSION

Nous savons par la mécanique classique que nous retrouvons la définition du tenseur de l'énergie et de l'impulsion en tirant profit du théorème de Noether, si nous déterminons la quantité conservée à partir de la symétrie de Lorentz du lagrangien. Par exemple, nous remarquons que des particules relativistes possèdent un *vecteur* énergie-impulsion. Au point où la particule est située, il décrit l'énergie et la quantité de mouvement.

Puisque le champ électromagnétique n'est pas une entité localisée, comme une particule ponctuelle, mais une entité étendue, nous avons besoin de connaître le *flux* d'énergie et d'impulsion en chaque point de l'espace, *pour chaque direction* séparément. Tout cela fait qu'une description utilisant un *tenseur* est indispensable. Le résultat donne le *tenseur énergie-impulsion* du champ électromagnétique

Page 180

$$\begin{aligned}
 \mathbf{T}^{\mu\nu} &= \left(\begin{array}{c|c} \text{densité} & \text{flux d'énergie ou} \\ \text{d'énergie} & \text{densité de moment} \\ \hline \text{flux d'énergie ou} & \text{flux} \\ \text{densité de moment} & \text{de moment} \end{array} \right) \\
 &= \left(\begin{array}{c|c} u & \mathbf{S}/c = c\mathbf{p} \\ \hline c\mathbf{p} & T \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|c} 0 & \varepsilon_0 c \mathbf{E} \wedge \mathbf{B} \\ \hline \varepsilon_0 c \cdot & -\varepsilon_0 E_i E_j - B_i B_j / \mu_0 \\ \mathbf{E} \wedge \mathbf{B} & 1/2 \delta_{ij} (\varepsilon_0 E^2 + B^2 / \mu_0) \end{array} \right) \quad (41)
 \end{aligned}$$

Le tenseur énergie-impulsion montre à nouveau que l'électrodynamique est à la fois un invariant de Lorentz et de jauge.

Le lagrangien et le tenseur énergie-impulsion indiquent tous les deux que l'électrodynamique est symétrique sous des renversements du mouvement. Si toutes les charges modifient leurs directions de mouvement – une situation que nous dénommons souvent improprement le « renversement du temps » –, elles se déplacent alors à reculons en suivant exactement les trajectoires qu'elles ont empruntées lorsqu'elles se déplaçaient normalement.

Nous remarquons également que les charges et la masse violent une symétrie relative au vide que nous avons mentionnée en relativité restreinte : seul le vide est invariant sous des symétries conformes. En particulier, seul le vide est invariant sous la transformation



FIGURE 29 Lequel des deux est le paysage original ? (aimablement fourni par la NOAA)

spatiale $r \rightarrow 1/r$.

En bref, le mouvement électrodynamique, comme tous les autres exemples de mouvement que nous avons rencontrés jusqu'à présent, est déterministe, réversible et conservé. Cela ne constitue pas une énorme surprise. Néanmoins, deux symétries de l'électromagnétisme méritent une mention particulière.

QU'EST-CE QU'UN MIROIR ?

Nous allons étudier les propriétés étranges des miroirs à plusieurs reprises au cours de notre excursion. Commençons avec la plus simple d'entre elles. Chacun peut observer, en marquant chacune de ses mains d'une couleur différente, qu'un miroir n'échange *pas* la droite et la gauche, pas plus qu'il n'échange le haut et le bas. Cependant, un miroir intervertit un *manchot* de la main droite en un de la main gauche et vice versa. En fait, il agit de la même manière lorsqu'il échange l'avant et l'arrière.

L'électrodynamique apporte une seconde réponse : un miroir est un dispositif qui commute les pôles magnétiques nord et sud. Pouvez-vous confirmer cela à l'aide d'un

Défi 75 s

graphique ?
Mais est-il toujours possible de discerner la gauche de la droite ? Cela semble enfantin : ce paragraphe est complètement différent d'une version $\sigma\iota\omicron\delta\eta\tau$, comme le sont la plupart des autres objets dans notre environnement. Mais considérez un paysage simple. Êtes-vous capable de désigner laquelle des deux images de la Figure 29 est l'original ?

De façon surprenante, il est effectivement impossible de distinguer une image originale de la nature de son image dans un miroir, si elle ne contient aucune trace humaine. Autrement dit, la nature de tous les jours est d'une certaine manière symétrique par rapport à la droite-gauche. Cette observation est si évidente que toutes les exceptions potentielles, du mouvement de la mâchoire d'une vache en train de ruminer à la croissance hélicoïdale des plantes, comme le houblon, ou à la direction de la forme en spirale des coquilles d'escargots, ont été considérablement étudiées*. Pouvez-vous en citer quelques

Page ??

Réf. 34

* La plus célèbre est la position du cœur. Les mécanismes conduisant à cette disposition sont toujours en cours d'investigation. Des recherches récentes suggèrent que le mouvement orienté des cils sur les embryons, probablement dans la région appelée le *næud*, détermine l'asymétrie droite-gauche. Toutefois, l'origine profonde de cette asymétrie n'est pas encore élucidée.

Le corps humain présente majoritairement plus de muscles du côté droit chez les droitiers, tels Albert Einstein et Pablo Picasso, et du côté gauche chez les gauchers, tels Charlie Chaplin et Peter Ustinov. Cette

Défi 76 s autres ?

La symétrie droite-gauche de la nature émerge parce que la nature au quotidien est décrite par la gravitation et, comme nous le verrons, par l'électromagnétisme. Ces deux interactions partagent une propriété importante : le fait de substituer toutes les coordonnées dans leurs équations par les valeurs opposées correspondantes laisse les équations inchangées. Cela signifie que pour n'importe quelle solution de ces équations, c'est-à-dire pour n'importe quel système se produisant de manière naturelle, une image dans un miroir constitue une éventualité qui peut également se produire de manière naturelle. La nature de tous les jours ne peut donc pas faire une distinction entre la droite et la gauche. En réalité, il y a des droitiers *et* des gauchers, des gens ayant leur cœur à gauche *et* d'autres ayant leur cœur du côté droit, etc.

Pour explorer plus en avant cet aspect étrange de la nature, tentez l'expérience suivante : imaginez que vous êtes en train d'échanger des messages radio avec un Martien : êtes-vous capable de lui expliquer ce que sont la droite et la gauche, de telle façon que, lorsque vous vous rencontrez, vous êtes certains d'être en train de parler de la même chose ?

Défi 77 s

En fait, la symétrie miroir de la nature au quotidien – également appelée *invariance par parité* – est si répandue que la majorité des animaux ne peuvent pas distinguer la gauche de la droite de manière plus profonde. La plupart des animaux réagissent à des stimuli miroirs par des réactions miroirs. Il est difficile de leur enseigner les différentes manières de réagir, et cela n'est possible quasiment que pour les mammifères. Les nombreuses expériences réalisées dans ce domaine ont fait germer l'idée que les animaux possèdent des systèmes nerveux symétriques, et probablement seuls les hommes dénotent une *latéralisation*, c'est-à-dire une main privilégiée et des usages différents pour les parties droite et gauche du cerveau.

Réf. 35

Pour résumer cette digression, l'électrodynamique classique respecte la symétrie droite-gauche, ou l'invariance par parité. Pouvez-vous le montrer en utilisant son lagrangien ?

Défi 78 s

Un miroir concave montre une image renversée, comme le fait un miroir plat s'il est partiellement plié dans le sens horizontal. Que se passe-t-il si l'on tourne ce miroir autour de la ligne de visée ?

Défi 79 s

Pourquoi les métaux sont-ils de bons miroirs ? Les métaux sont de grands absorbeurs de lumière. Tout absorbeur puissant possède un éclat métallique. Cela est vrai pour les métaux, s'ils sont suffisamment épais, mais aussi pour les cristaux de peinture ou d'encre. N'importe quel matériau qui absorbe fortement une longueur d'onde de lumière réfléchit également celle-ci efficacement. La raison de cette forte absorption du métal est due aux électrons situés à l'intérieur : ils peuvent se déplacer presque librement et donc absorber la plupart des fréquences de la lumière visible.

asymétrie reflète une asymétrie du cerveau humain, appelée latéralisation, laquelle est essentielle à la nature humaine.

Une autre asymétrie du corps humain est représentée par le bouclage des cheveux sur la nuque, la majorité des hommes n'en ont qu'un seul, et dans 80 % des cas il tourne vers la gauche. Mais de nombreuses personnes en ont plus d'un.

QUELLE DIFFÉRENCE Y A-T-IL ENTRE LES CHAMPS ÉLECTRIQUE ET MAGNÉTIQUE ?

Bien sûr, la réponse courante consiste à dire que les champs électriques ont des sources, alors que les champs magnétiques n'en possèdent pas. De plus, les champs magnétiques sont des effets relativistes minuscules qui prédominent uniquement lorsque les vitesses des charges sont élevées ou lorsque les champs électriques s'annulent.

Page ?? Pour des situations impliquant de la matière, cette distinction claire est correcte. Jusqu'à ce jour, aucune particule ayant une charge magnétique, appelée un *monopôle magnétique*, n'a été décelée, bien que son existence soit rendue possible dans plusieurs modèles unifiés de la nature. Si elle est détectée, l'action (36) devrait être modifiée par l'adjonction d'un quatrième terme, à savoir la densité de courant magnétique. Cependant, aucune particule de ce type n'a encore été détectée, en dépit des efforts de recherche considérables.

Dans l'espace vide, lorsqu'il n'y a pas de matière au voisinage, il est possible d'avoir une conception radicalement différente. Dans l'espace vide, les champs électrique et magnétique peuvent être vus comme deux facettes de la même quantité, puisqu'une transformation telle que

$$\begin{aligned} E &\rightarrow c B \\ B &\rightarrow -E/c \end{aligned} \quad (42)$$

Défi 80 s – nommée transformation par *dualité* (électromagnétique) – transforme chaque équation du vide de Maxwell en l'autre. Le signe moins est nécessaire pour cela. (En réalité, il existe d'autres transformations de ce type, pouvez-vous les indiquer ?) Par ailleurs, la transformation par dualité convertit \mathbf{F} en ${}^*\mathbf{F}$. En d'autres termes, dans l'espace vide, nous *ne pouvons pas* distinguer les champs électriques des champs magnétiques.

La matière serait symétrique sous la dualité seulement si les charges magnétiques, également appelées monopôles magnétiques, existaient. Dans cette situation, la transformation (42) pourrait être étendue à

$$c\rho_e \rightarrow \rho_m \quad , \quad \rho_m \rightarrow -c\rho_e . \quad (43)$$

Page ?? La révélation qui suit constitue l'une des grandes découvertes de la physique théorique : bien que l'électrodynamique classique incluant la matière ne soit pas symétrique sous la dualité, la nature l'est. En 1977, Claus Montonen et David Olive ont montré que la théorie quantique autorise les transformations par dualité même *avec* l'inclusion de la matière. Nous savons depuis les années 1930 que la théorie quantique autorise l'existence des monopôles magnétiques. Nous découvrirons les implications majeures de ce résultat dans la dernière partie de cet ouvrage. Cette dualité se révèle être l'un des progrès essentiels qui conduisent à une description unifiée du mouvement. (Voici une question annexe quelque peu ardue : en étendant cette dualité à la théorie quantique, pouvez-vous déduire quelle transformation est constatée pour la constante de structure fine, et pourquoi elle est si intéressante ?)

Défi 81 d Par ailleurs, la dualité est une symétrie qui ne s'applique *que* dans l'espace-temps de Minkowski, c'est-à-dire dans les espaces-temps de 3+1 dimensions. Mathématiquement,

la dualité est étroitement reliée à l'existence des quaternions, à la possibilité d'interpréter les poussées de Lorentz comme des rotations dans 3+1 dimensions, et finalement à la possibilité de définir d'autres structures mathématiques uniformes que la structure usuelle de l'espace R^4 . Ces connexions mathématiques sont mystérieuses pour le moment ; elles soulignent d'une certaine manière le rôle particulier que les *quatre* dimensions d'espace-temps entretiennent dans la nature. Des détails supplémentaires deviendront évidents dans la dernière partie de notre ascension montagnaise.

L'ÉLECTRODYNAMIQUE AURAIT-ELLE PU ÊTRE DIFFÉRENTE ?

Toute interaction telle que la loi de Coulomb (3), qui agit, pour un observateur donné, entre deux particules indépendamment du vecteur vitesse, doit dépendre du vecteur vitesse pour d'autres observateurs inertiels*. Il apparaît qu'une telle interaction ne peut pas non plus être indépendante du quadrivecteur vitesse. Cette interaction, même si elle était vraiment dépendante du vecteur vitesse, modifierait la masse inertielle puisque le quadrivecteur accélération ne serait pas quadri-orthogonal au quadrivecteur vitesse.

Réf. 36 Le cas suivant le plus simple est celui pour lequel l'accélération est proportionnelle au quadrivecteur vitesse. En association avec l'assignation que l'interaction laisse la masse au repos constante, nous retrouvons alors l'électrodynamique.

En fait, les nécessités de symétrie de jauge et de symétrie de relativité font également en sorte qu'il est impossible de modifier l'électrodynamique. En bref, il ne semble pas possible d'obtenir un comportement différent de la loi en $1/r^2$ pour une interaction classique.

Réf. 37 Une dépendance en l'inverse du carré implique une masse évanescence pour la lumière et pour les particules de lumière, les photons. Cette masse est-elle réellement nulle ? Ce problème a été scrupuleusement étudié. Un photon massif conduirait à une dépendance en longueur d'onde de la vitesse de la lumière dans le vide, à des écarts par rapport à la « loi » de l'inverse du carré, à des déviations par rapport à la « loi » d'Ampère, à l'existence d'ondes électromagnétiques longitudinales et plus encore. Aucune évidence expérimentale concernant ces effets n'a été relevée. Une synthèse de ces études montre que la masse du photon est inférieure à 10^{-53} kg, ou peut-être 10^{-63} kg. Certains arguments n'étant pas unanimement acceptés, cette limite varie légèrement d'un chercheur à l'autre.

Réf. 37 Une minuscule masse non nulle pour le photon modifierait imperceptiblement l'électrodynamique. L'introduction d'une petite masse ne pose aucun problème particulier : le lagrangien correspondant, que nous appelons *lagrangien de Proca*, a déjà été étudié, au cas où.

À strictement parler, nous ne pouvons pas dire que la masse du photon est nulle. En particulier, un photon ayant une longueur d'onde de Compton comparable au rayon de l'univers visible ne peut pas être discerné d'un autre ayant une masse nulle, par le truchement de n'importe quelle expérience. Cela donne une masse de 10^{-69} kg pour le photon. Nous remarquons que les limites expérimentales sont encore beaucoup plus grandes. Des photons ayant une telle valeur imperceptible de masse n'infirmieraient pas l'électrodynamique comme nous la connaissons.

* Nous pouvons déduire cela de la relativité restreinte à partir du raisonnement de la page 40 ou à partir de la formule en note de la page 71.

De manière intéressante, une masse non nulle du photon implique l'inexistence de monopôles magnétiques, puisque la symétrie entre les champs électrique et magnétique est violée. Il est par conséquent primordial, d'une part, de tenter d'affiner la limite expérimentale de la masse et, d'autre part, d'explorer si la limite due à la taille de l'univers possède un quelconque rapport avec ce problème. Cette question est toujours ouverte.

LE DÉFI LE PLUS TENACE DE L'ÉLECTRODYNAMIQUE

L'électrodynamique fait face à un problème expérimental et théorique que les physiciens esquivent souvent. Le processus de la pensée est électrique dans la nature. La physique affronte deux défis dans ce domaine. Premièrement, les physiciens doivent découvrir des manières de modéliser le processus de la pensée. Deuxièmement, la technologie de la mesure doit être étendue afin de nous permettre de mesurer les courants qui circulent dans le cerveau.

Bien que d'importantes recherches aient été menées dans ces domaines, les chercheurs sont encore très loin d'une compréhension complète du phénomène. Des études utilisant la tomographie par ordinateur ont montré, par exemple, que la distinction entre le conscient et l'inconscient peut être mesurée et qu'elle possède des fondements biologiques. Des concepts psychologiques tels que le refoulement peuvent être observés dans de véritables radiographies du cerveau. Ceux qui élaborent les modèles des mécanismes du cerveau doivent donc apprendre à avoir le courage de considérer certains des concepts de la psychologie comme des descriptions de processus physiques concrets. Cette approche nous oblige à traduire la psychologie en modèles physiques, un procédé qui en est encore à ses balbutiements.

De manière analogue, la recherche sur les appareils de magnétoencéphalographie fait des progrès constants. Les champs magnétiques produits par les courants dans le cerveau sont aussi faibles que 10 fT, ce qui requiert des capteurs à la température de l'hélium liquide et une protection excellente contre le bruit ambiant. La résolution spatiale de ces systèmes doit également être améliorée.

Ce programme tout entier sera considéré comme achevé dès qu'il aura été possible, dans un avenir lointain, d'utiliser des dispositifs sensibles de mesure pour détecter ce qui se passe à l'intérieur du cerveau, et pour déduire ou « lire » les pensées d'un individu à partir de ces mesures. En réalité, ce défi pourrait être le plus complexe de tous ceux que la science a jamais affrontés. Sans aucun doute, cette expérience nécessitera une machinerie compliquée et coûteuse, de façon à ce qu'il n'y ait aucun danger dû à une mauvaise utilisation de cette technique. Il se pourrait aussi que la résolution spatiale nécessaire soit située au-delà des capacités de la technologie. Néanmoins, la compréhension et la modélisation du cerveau constitueront aussi une avancée utile pour d'autres aspects de la vie de tous les jours*.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR L'ÉLECTRODYNAMIQUE

Les animaux ne sont pas les seuls à pouvoir ressentir les champs électriques et magnétiques, les végétaux aussi. Au moins pour les champs magnétiques, les organes sensoriels

* Cette vision, formulée ici même en 2005, est si éloignée de toute réalisation qu'il n'est pas évident qu'elle puisse être vérifiée au cours du vingt et unième siècle ou dans un siècle ultérieur.

semblent utiliser des mécanismes très similaires à ceux utilisés par les animaux et les bactéries.

* *

Défi 82 s Si vous évaluez le vecteur de Poynting pour un aimant chargé – ou plus simplement pour une charge ponctuelle située à proximité d'un aimant –, vous obtenez un résultat stupéfiant : l'énergie électromagnétique circule en boucle autour de l'aimant. Comment est-ce possible ? D'où ce moment cinétique provient-il ?

Réf. 86 Pire, tout atome est un exemple d'un tel système – en fait, de deux systèmes de cette sorte. Pourquoi cet effet n'est-il pas pris en considération dans les calculs en théorie quantique ?

* *

Défi 83 s Des ondes électromagnétiques parfaitement sphériques sont impossibles dans la nature. Pouvez-vous le montrer en utilisant les équations de Maxwell de l'électromagnétisme, ou même sans elles ?

* *

Défi 84 pe Quel est le champ de Poynting le long d'un double fil métallique ? Autour d'un double fil avec résistance ?

* *

Défi 85 pe Quel est le champ de Poynting dans un transformateur ?

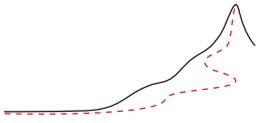
* *

Défi 86 pe Il existe une ambiguïté célèbre dans la définition de l'énergie électromagnétique. Richard Feynman discute de celle-ci dans ses *Lectures on Physics*, à la section 27-4. Pouvez-vous découvrir une expérience où cette ambivalence joue un rôle ?

* *

Défi 87 s N'importe quelle prise de courant murale est un dipôle alimenté par un champ électrique alternatif. Pourquoi une prise de courant, qui délivre 230 V ou 100 V à 50 Hz ou 60 Hz, n'émet-elle pas de champ électromagnétique ?





QU'EST-CE QUE LA LUMIÈRE ?

Réf. 38 L'essence de la lumière a fasciné les explorateurs de la nature au moins depuis l'époque de la Grèce antique. En 1865, Maxwell synthétisa toutes les données recueillies durant les 2 500 ans qui l'avaient précédé en déduisant une conséquence élémentaire des équations de l'électrodynamique. Il découvrit que, dans le cas de l'espace vide, les équations du champ électrodynamique peuvent être écrites ainsi

$$\square A = 0 \quad \text{ou, également} \quad \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 A_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial z^2} = 0. \quad (44)$$

Défi 88 e Cela est appelé une *équation d'onde*, parce qu'elle admet des solutions du type

$$A(t, \mathbf{x}) = A_0 \sin(\omega t - \mathbf{k}x + \delta) = A_0 \sin(2\pi f t - 2\pi x/\lambda + \delta), \quad (45)$$

qui sont communément appelées des *ondes planes*. Une telle onde satisfait l'équation (44) pour toute valeur d'*amplitude* A_0 , de *phase* δ , et de *fréquence angulaire* ω , étant donné que le *vecteur d'onde* \mathbf{k} vérifie la relation

$$\omega(\mathbf{k}) = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} k \quad \text{ou} \quad \omega(\mathbf{k}) = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \sqrt{\mathbf{k}^2}. \quad (46)$$

La relation $\omega(\mathbf{k})$ entre la fréquence angulaire et le vecteur d'onde, dite *relation de dispersion*, constitue la principale propriété de n'importe quelle sorte d'onde, qu'elle soit une onde sonore, une vague, une onde électromagnétique, ou toute autre espèce. La relation (46) caractérise plus particulièrement les ondes électromagnétiques dans le vide, et les distingue de tous les autres types d'ondes*.

L'équation (44) pour le champ électromagnétique est *linéaire* dans ce champ. Cela signifie que la somme de deux situations permises par celle-ci est elle-même une situation permise. Mathématiquement parlant, toute *superposition* de deux solutions est aussi une solution. Par exemple, cela indique que deux ondes peuvent se traverser sans se perturber mutuellement, et que des ondes peuvent voyager à travers des champs électromagnétiques statiques. La linéarité signifie également que toute onde électromagnétique peut être décrite comme une superposition d'ondes sinusoïdales pures, chacune d'entre elles

* Pour être exhaustif, nous rappelons qu'une *onde* en physique représente n'importe quelle perturbation en mouvement.

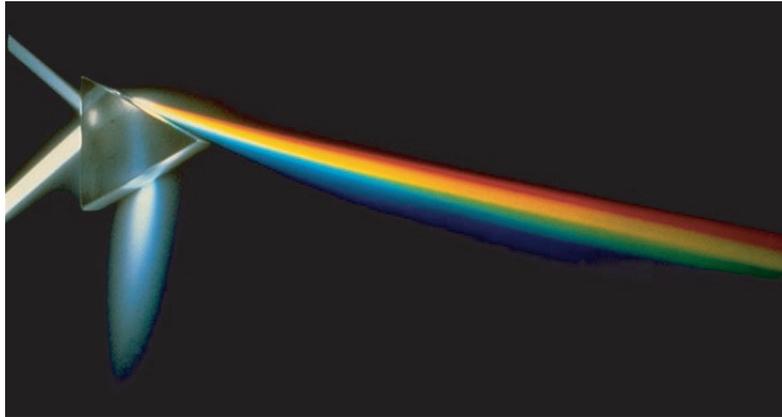


FIGURE 30 Lumière blanche traversant un prisme en verre. (photographie Susan Schwartzberg, © Exploratorium www.exploratorium.edu)



FIGURE 31 Heinrich Hertz.

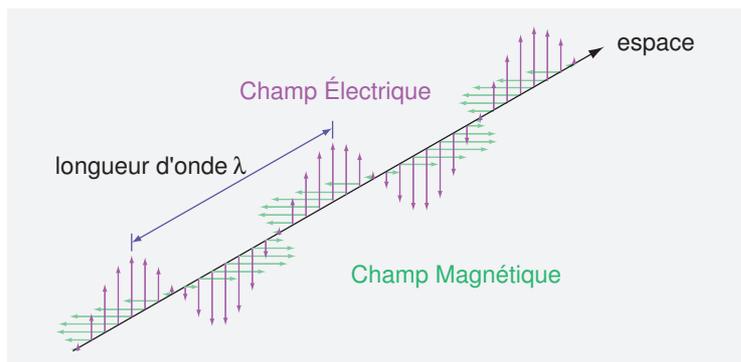


FIGURE 32 Structure générale d'une onde électromagnétique plane, monochromatique et linéairement polarisée, à un instant particulier.

Page 75

étant décrite par l'expression (45). L'onde électromagnétique la plus simple possible, une onde harmonique plane ayant une polarisation linéaire, est illustrée sur la Figure 32. Remarquez que, pour ces ondes de type élémentaire, les champs électrique et magnétique sont *en phase*. (Pouvez-vous démontrer cela expérimentalement et par le calcul ?) Les surfaces formées par tous les points où le champ est d'intensité maximale sont des plans parallèles, espacés de la moitié d'une longueur d'onde, qui se déplacent dans la direction de propagation.

Après que Maxwell eut prévu l'existence des ondes électromagnétiques, entre 1885 et 1889, Heinrich Hertz* les découvrit et les étudia. Il fabriqua un émetteur et un récepteur

* Heinrich Rudolf Hertz (n. Hambourg 1857, d. Bonn 1894) fut un important physicien expérimentateur et théoricien hambourgeois. L'unité de la fréquence est baptisée d'après son nom. Malgré son décès prématuré,

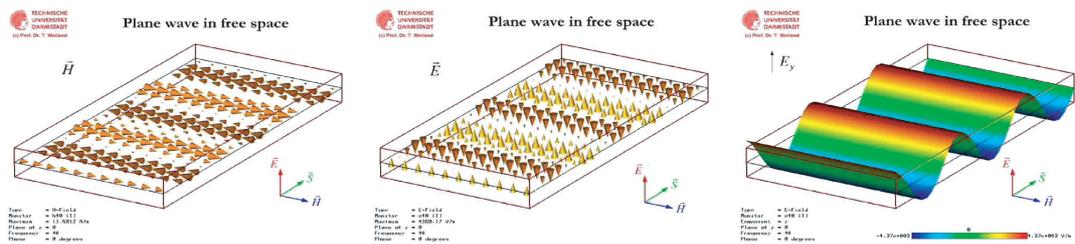


FIGURE 33 Une onde électromagnétique plane, monochromatique et linéairement polarisée, indiquant l'évolution du champ électrique, du champ magnétique, et à nouveau du champ électrique, par une seconde représentation. (© Thomas Weiland)



FIGURE 34 Une des premières antennes émettrices (à gauche) et réceptrices complètes (à droite) d'ondes électromagnétiques.

très simples pour des ondes de 2 GHz. Les ondes situées autour de cette fréquence sont utilisées dans la dernière génération de téléphones portables. Ces ondes sont maintenant appelées *ondes radio*, puisque les physiciens ont tendance à désigner par *rayonnement* tout champ de force en déplacement, recyclant de manière quelque peu incorrecte un mot grec qui signifiait au départ « émission de lumière ».

Aujourd'hui, l'expérience de Hertz peut être refaite d'une manière nettement plus simple. Comme l'indique la Figure 35, un budget de quelques euros est suffisant pour activer à distance une diode émettrice de lumière avec un allume-gaz. (Après chaque activation, il faut délicatement tapoter sur le détecteur d'ondes radio, afin d'être prêt pour l'activation suivante.) En attachant des fils métalliques plus longs comme antennes et pour la terre, on peut permettre à ce dispositif d'atteindre des distances de transmission allant jusqu'à 30 m.

Hertz mesura aussi la vitesse de ces ondes. En fait, vous pouvez également mesurer cette vitesse chez vous, avec une barre de chocolat et un (vieux) four à micro-ondes de cuisine. Un four à micro-ondes émet des ondes radio à 2,5 GHz – pas très loin de la grandeur de Hertz. À l'intérieur du four, celles-ci forment des ondes permanentes. Placez simplement la barre de chocolat (ou un morceau de fromage) dans le four et arrêtez-le dès que

Hertz fut une figure centrale dans le développement de l'électromagnétisme, dans l'interprétation de la théorie de Maxwell et dans la révélation de la technologie des communications radio. Vous en trouverez plus à son sujet à la page 162.

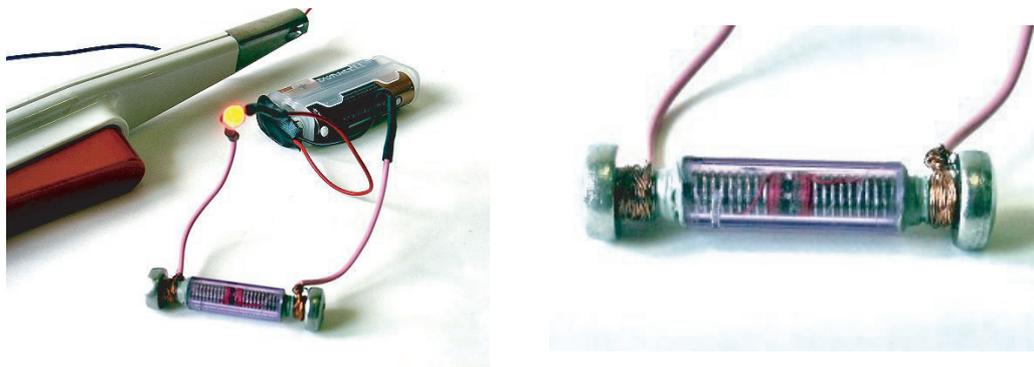


FIGURE 35 L'émetteur le plus simple possible : un allume-gaz et un fil métallique, et le récepteur le plus simple possible, construit avec un groupe de piles, une diode émettrice de lumière et un détecteur d'ondes radio élémentaire constitué d'un logement de stylo-bille, de deux vis et d'un peu de poudre métallique. (© Guido Pegna)

celle-ci commence à fondre. Vous remarquerez que la barre fond à des points régulièrement espacés. Ces emplacements sont distants de la moitié d'une longueur d'onde. Avec la valeur mesurée de la longueur d'onde et de la fréquence, la vitesse de la lumière et des ondes radio découle simplement du produit de ces deux quantités.

Si vous n'êtes pas convaincu, vous pouvez mesurer cette vitesse directement en téléphonant à un ami situé sur un autre continent, si vous pouvez vous assurer que vous utilisez bien une communication par satellite (choisissez un opérateur bon marché). Il y a environ une demi-seconde de délai supplémentaire entre la fin d'une phrase et la réponse de votre ami, comparé à une conversation normale. Durant cette demi-seconde, le signal monte jusqu'au satellite géostationnaire, redescend et emprunte au retour le même chemin. Cette demi-seconde donne une vitesse de $c \approx 4 \cdot 36\,000 \text{ km} / 0,5 \text{ s} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ km/s}$, ce qui est proche de la valeur exacte. Les radioamateurs qui réfléchissent leurs signaux sur la Lune peuvent réaliser la même expérience et parvenir à une précision accrue.

Mais Maxwell en fit davantage. Il entérina des prédictions antérieures qui stipulaient que la lumière elle-même est une solution de l'équation (45) et par conséquent une onde électromagnétique, quoique avec une fréquence beaucoup plus élevée. Regardons comment nous pouvons le vérifier.

Page ??

Il est facile de confirmer les propriétés *ondulatoires* de la lumière; en réalité, elles étaient déjà connues bien longtemps avant Maxwell. En fait, le premier à suggérer que la lumière est (en quelque sorte) une onde fut, autour de l'an 1678, l'immense physicien Christiaan Huygens. Vous pouvez confirmer que la lumière est une onde avec vos propres doigts. Placez simplement votre main à un ou deux centimètres de vos yeux, regardez en direction du ciel à travers la brèche située entre le majeur et l'index et laissez ces deux doigts en contact. Vous verrez un certain nombre de lignes sombres traversant cette ouverture. Ces lignes représentent le motif d'interférences formé par la lumière derrière la fente produite par les doigts. L'*interférence* est le nom donné aux variations d'amplitude qui surgissent lorsque plusieurs ondes se superposent*. Ces motifs d'interférences dépendent de l'espacement entre les doigts. Cette expérience vous permet donc d'esti-

Défi 89 s * Où l'énergie se retrouve-t-elle dans une figure d'interférences ?



FIGURE 36 Les arcs-en-ciel primaire et secondaire, et les arcs surnuméraires au-dessous de l'arc primaire. (© Antonio Martos et Wolfgang Hinz)

mer la longueur d'onde de la lumière, et ainsi, si vous connaissez sa vitesse, sa fréquence.

Défi 90 s Pouvez-vous y parvenir ?

Anciennement, un autre effet était central pour convaincre quiconque que la lumière est une onde : les arcs-en-ciel surnuméraires, ces arcs supplémentaires situés en dessous de l'arc-en-ciel principal ou primaire. Si nous observons attentivement un arc-en-ciel, sous l'arc principal rouge-jaune-vert-bleu-violet, nous remarquons des arcs supplémentaires plus minces vert, bleu et violet. En fonction de l'intensité de l'arc-en-ciel, plusieurs de ces arcs-en-ciel surnuméraires peuvent être perçus. Ils sont dus à un effet d'interférence, comme Thomas Young l'a montré autour de 1803*. En réalité, la distance de renouvellement des arcs supplémentaires dépend du rayon moyen des gouttelettes d'eau qui les engendrent. (Des détails concernant les arcs-en-ciel ordinaires sont fournis ci-dessous.) Les arcs-en-ciel surnuméraires représentaient une pièce à conviction majeure pour persuader les gens que la lumière est une onde. Il semble que, à cette époque, soit les scientifiques ne croyaient pas en leurs propres doigts, soit ils n'en avaient pas.

Réf. 39

Page 97

Il existe de nombreuses autres manières de rendre incontestable le caractère ondulatoire de la lumière. La plus magnifique est probablement une expérience dirigée par une équipe de physiciens hollandais en 1990. Ils quantifièrent tout simplement la lumière transmise à travers une *fente* située sur une plaque métallique. Il s'avéra que l'intensité diffusée dépendait de la largeur de cet interstice. Leur résultat étonnant est indiqué sur la Figure 37. Pouvez-vous expliquer l'origine des paliers d'intensité inattendus présents dans cette courbe ?

Réf. 40

Défi 91 pe

De nombreuses autres expériences concernant la création, la détection et la mesure des ondes électromagnétiques ont été réalisées au cours des dix-neuvième et vingtième

* Thomas Young (Milverton 1773–Londres 1829) lisait la Bible à deux ans, et parlait le latin à quatre ans. De docteur en médecine, il devint professeur de physique. Il introduisit le concept d'*interférence* en optique, donnant ainsi une explication aux anneaux de Newton et aux arcs-en-ciel surnuméraires. Il fut le premier à déterminer la *longueur d'onde* de la lumière, un concept qu'il introduisit également, et sa dépendance en fonction de la couleur. Il fut aussi le premier à déduire l'explication de la vision en trois couleurs de l'œil et, après avoir lu la découverte de la polarisation, interpréta la lumière comme une onde transversale. En bref, Young découvrit la plupart des choses que les étudiants apprennent au lycée concernant la lumière. Il possédait un talent universel : il travailla également sur le déchiffrement des hiéroglyphes, sur la construction des navires et sur des problèmes d'ingénierie. Young collabora avec Fraunhofer et Fresnel. En Grande-Bretagne, ses idées sur la lumière ne furent pas acceptées, car les partisans de Newton anéantissaient toutes les conceptions opposées. Vers la fin de sa vie, ses résultats furent finalement diffusés dans la communauté des physiciens par Fresnel et Helmholtz.

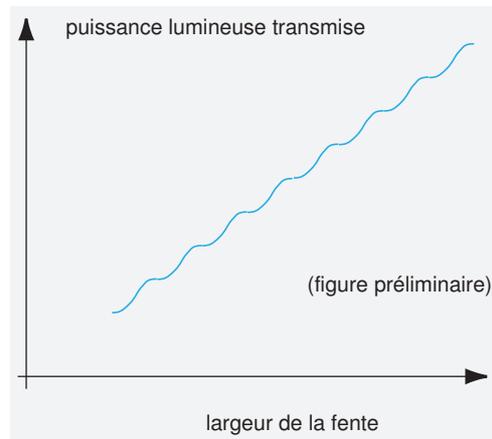


FIGURE 37 Puissance lumineuse transmise à travers une fente en fonction de sa largeur.

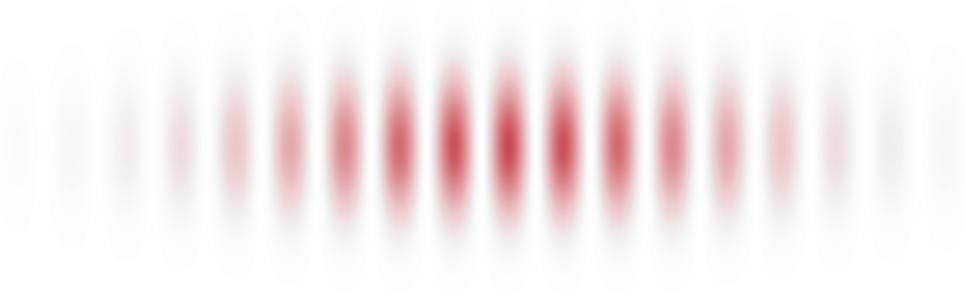


FIGURE 38 Deux faisceaux gaussiens qui interfèrent selon un angle donné. (© Rüdiger Paschotta)

Défi 92 s

siècles. Par exemple, en 1800, William Herschel découvrit la *lumière infrarouge* en utilisant un prisme et un thermomètre. (Pouvez-vous deviner comment ?) En 1801, Johann Wilhelm Ritter (1776–1810), une figure plus que colorée du romantisme naturel, découvrit la *lumière ultraviolette* en faisant usage de chlorure d'argent, AgCl, et également d'un prisme. Le résultat de toutes ces expériences établit que les ondes électromagnétiques peuvent être caractérisées essentiellement par leur longueur d'onde ou leur fréquence. Les principales catégories sont listées dans le [Tableau 12](#). Pour la lumière visible, la longueur d'onde se situe entre $0,4 \mu\text{m}$ (violet) et $0,8 \mu\text{m}$ (rouge).

Page 80

Réf. 41

À la fin du vingtième siècle, la confirmation définitive du caractère ondulatoire de la lumière devint possible. En menant des expériences plutôt sophistiquées, des chercheurs mesurèrent *directement* la fréquence d'oscillation de la lumière. Cette valeur, située entre 375 et 750 THz, est si élevée que sa détection demeura impossible pendant longtemps. Mais avec ces expériences modernes la relation de dispersion (46) de la lumière a finalement été confirmée dans tous ses aspects.

Réf. 42

POLARISATION ET ÉLECTROMAGNÉTISME

À ce point où nous sommes, il nous reste une question sur la lumière. Si celle-ci oscille, dans quelle direction le fait-elle ? La réponse est dissimulée dans le paramètre A_0 de l'expression (45). Les ondes électromagnétiques oscillent dans des directions *perpen-*



FIGURE 39 Le même arc-en-ciel dans le domaine visible et dans l'infrarouge, révélant que l'infrarouge vient avant le rouge. (© Stefan Zeiger)

diculaires à leur propagation. Par conséquent, même pour une fréquence et une phase identiques, les ondes peuvent encore différer sur un point : elles peuvent avoir des directions de *polarisation* distinctes. Par exemple, la polarisation des émetteurs radio détermine si les antennes radio des récepteurs doivent être positionnées horizontalement ou verticalement. La polarisation est facilement perçue, également pour la lumière, par exemple en la révélant à travers un film plastique tendu. Lorsque la polarisation de la lumière fut découverte en 1808 par le physicien français Louis Malus (1775–1812), celle-ci établit de manière définitive la nature ondulatoire de la lumière. Malus la découvrit alors qu'il était en train d'étudier les images doubles mystérieuses engendrées par la calcite, un cristal transparent que l'on trouve dans de nombreux minerais. La calcite (CaCO_3) sépare les faisceaux lumineux en deux – il est *biréfringent* – et les polarise différemment. C'est la raison pour laquelle la calcite possède une place particulière dans chaque collection minéralogique.

Si jamais vous parvenez à détenir un morceau de calcite transparent, ne ratez surtout pas l'occasion de regarder un texte écrit à travers celui-ci. La **Figure 40** en illustre deux exemples. (Pouvez-vous montrer que la *triréfringence*, si elle est définie comme étant la création de trois images, ne peut pas exister ?)

Défi 93 d

Par ailleurs, l'œil humain est pratiquement incapable de détecter la polarisation, contrairement aux yeux de nombreux insectes, araignées et certains oiseaux. Les abeilles communes tirent profit de la polarisation pour déduire la position du Soleil, même s'il est caché derrière les nuages, et utilisent cet effet pour se déplacer. Certains scarabées du genre *Scarabeus* emploient même la polarisation du clair de lune pour pouvoir se repérer, et de nombreux insectes utilisent la polarisation de la lumière du soleil pour distinguer les surfaces des points d'eau des mirages. (Pouvez-vous deviner comment ?) Mais en

Réf. 43

Défi 94 s

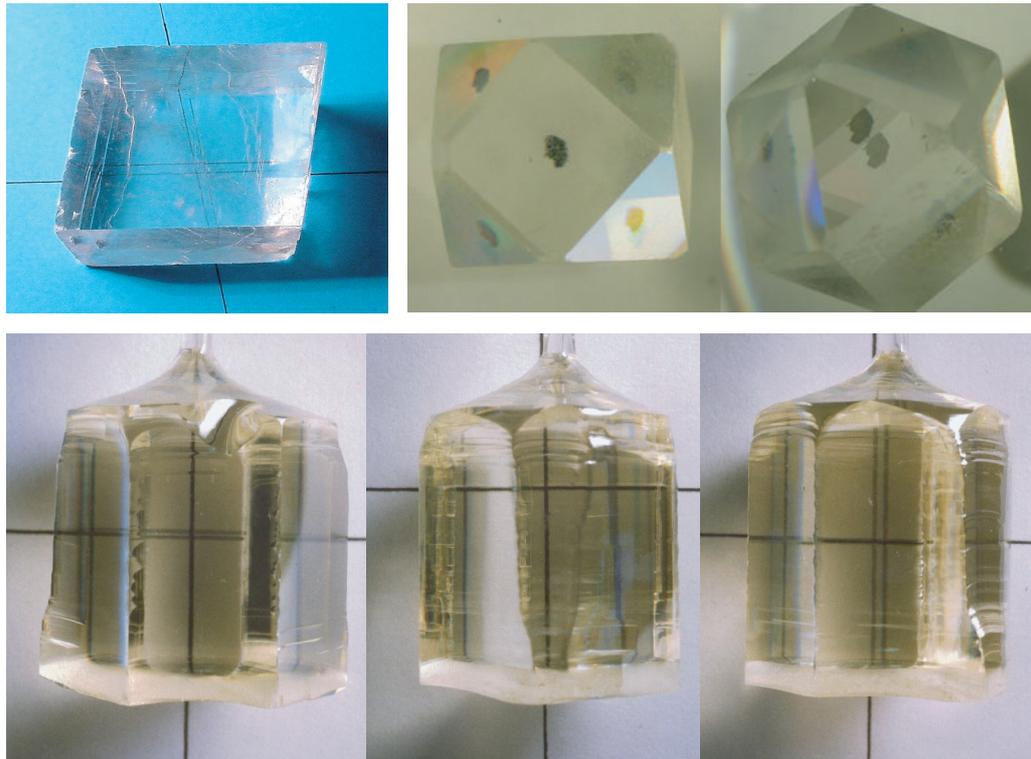


FIGURE 40 La biréfringence dans les cristaux : calcite posée sur des lignes croisées (en haut à gauche, cristal de 4 cm environ) ; rutile posé sur une tache d'encre, photographié le long de l'axe optique (milieu) et selon un angle donné (en haut à droite, cristal d'une taille d'environ 1 cm) ; et cristal de vanadate de sodium octogonal dopé au manganèse, exhibant *trois* comportements distincts (en bas, cristal d'un diamètre de 1,9 cm). (© Roger Weller/Cochise College, Brad Amos, Martin Pietralla)

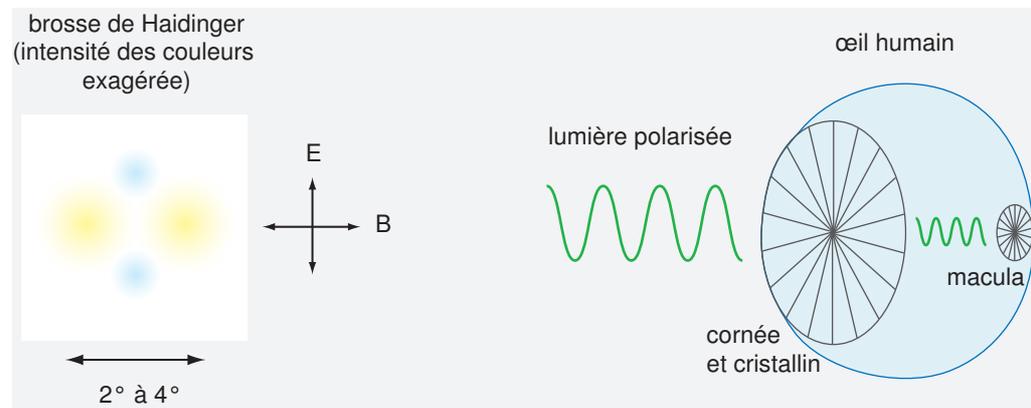


FIGURE 41 La brosse de Haidinger et son origine située dans l'œil humain.

Réf. 44 1844, le minéralogiste autrichien Wilhelm Haidinger découvrit que l'œil humain possède la même aptitude : il existe une manière d'observer la polarisation de la lumière à l'aide de celui-ci sans aucun appareil. La meilleure façon de remarquer cet effet consiste à observer, à une distance équivalente à une longueur de bras environ, un écran LCD

Réf. 45

blanc et à incliner lentement votre tête. Vous remarquerez la présence d'un motif jaune ou bleu-jaune *extrêmement pâle*, large d'environ deux doigts, qui est superposé au fond blanc. Ce motif est appelé *brosse de polarisation* ou *brosse de Haidinger*. Une illustration approximative en est donnée par la [Figure 41](#). Cet effet ténu disparaît après quelques secondes si la tête cesse de tourner le long de la ligne de visée. La brosse de Haidinger est due à la biréfringence de la cornée et du cristallin de l'œil humain, et également à la morphologie de la *macula lutea*. La cornée agit comme un polariseur radialement orienté et dépendant de la couleur, puisque la tache jaune agit comme un analyseur radialement orienté. En bref, l'œil humain est véritablement capable de détecter les directions dans lesquelles les champs électrique et magnétique de la lumière oscillent.

Étant jaune, la brosse de Haidinger est également visible avec le ciel bleu, à condition que le temps soit clair. (En réalité, elle est rapidement noyée par les multiples diffusions, et par conséquent elle fournit un test de la transparence de l'atmosphère.) Dans le ciel, la brosse de Haidinger est à peine de la taille de l'ongle du pouce, à la distance du bras. (Cette taille angulaire est égale à la taille angulaire de la macula.) L'axe jaune de cette croix indique la direction du Soleil, si vous regardez dans une direction située à 90° de celui-ci, haut dans le ciel. Pour le constater vraiment clairement, tenez un Polaroid (ou des lunettes de soleil Polaroid) de façon à regarder au travers, et tournez-le autour de la ligne de visée.

Défi 95 pe

Remarquez que toutes les polarisations possibles de la lumière forment un ensemble continu. Cependant, une onde plane générale peut être vue comme la superposition de deux ondes orthogonales linéairement polarisées ayant des amplitudes distinctes et des phases différentes. La plupart des livres montrent des images d'ondes planes électrodynamiquement linéarisées. De manière fondamentale, les champs électriques ressemblent à des vagues généralisées aux trois dimensions, de même que pour les champs magnétiques, et les deux sont perpendiculaires entre eux. Pouvez-vous entériner cette idée ?

De manière intéressante, une onde plane polarisée en général peut aussi être vue comme la superposition d'*ondes de polarisation circulaire* droite et gauche. Une illustration d'une onde de polarisation circulaire est donnée sur la [Figure 42](#).

Jusqu'ici, il est flagrant que la lumière est une onde. Il est plus compliqué de confirmer que les ondes lumineuses sont en fait *électromagnétiques*. Le premier argument fut donné par Bernhard Riemann en 1858*, qui déduisit que toute onde électromagnétique doit se propager avec une vitesse c donnée par

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} . \quad (47)$$

Défi 96 pe

Déjà dix ans avant lui, en 1848, Kirchhoff avait remarqué que les valeurs mesurées de chaque côté de l'équation s'accordaient aux erreurs de mesure près. Quelques années plus tard, Maxwell en donnait une éclatante confirmation en déduisant cette expression de l'équation (46). Vous devriez être capable de réitérer cette prouesse. Remarquez que le membre de droite contient des quantités électrique et magnétique, et que le membre

* Bernhard Riemann (n. Breselenz 1826, d. Selasca 1866) fut un mathématicien allemand influent. Il étudia les espaces courbes, et développa plusieurs des fondements mathématiques et conceptuels de la relativité générale, mais il décéda à un âge précoce.

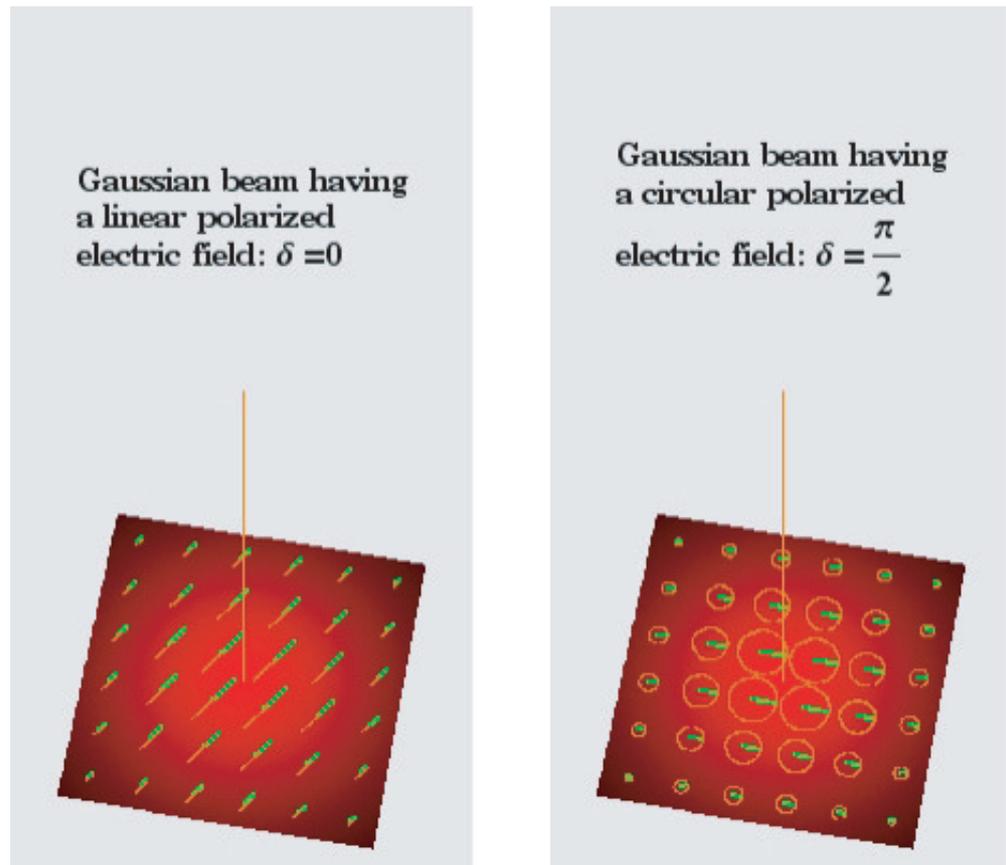


FIGURE 42 Le champ électrique d'une onde électromagnétique gaussienne, de polarisation rectiligne (un faisceau) à côté d'un faisceau gaussien de polarisation circulaire. (© José Antonio Díaz Navas)

de gauche représente une entité optique. L'expression de Riemann unifie ainsi l'électromagnétisme et l'optique.

Évidemment, les gens ne furent pas encore totalement convaincus. Ils recherchaient des moyens supplémentaires de démontrer que la lumière est de nature électromagnétique. Maintenant, puisque les équations d'évolution du champ électrodynamique sont linéaires, des champs électriques ou magnétiques additionnels tout seuls ne doivent pas influencer le mouvement de la lumière. D'autre part, nous savons que les ondes électromagnétiques sont émises uniquement par des charges accélérées, et que toute lumière est émise à partir de la matière. Il découle donc que la matière est emplie de champs électromagnétiques et de charges électriques accélérées. Il s'ensuit que l'influence de la matière sur la lumière peut être comprise à partir de ses champs électromagnétiques internes et, en particulier, que soumettre la matière à un champ électromagnétique *externe* devrait influencer sur la lumière qu'elle émet, sur la façon dont la matière interagit avec la lumière ou, plus généralement, sur les propriétés matérielles dans leur ensemble.

La recherche des effets de l'électricité et du magnétisme sur la matière a concentré les efforts des physiciens durant plus d'une centaine d'années. Par exemple, les champs élec-

Défi 97 e

Page 62

triques influencent la transmission de lumière dans l'huile, un effet découvert par John Kerr en 1875*. La révélation que certains gaz changent de couleur lorsqu'ils sont soumis à un champ entraîna l'attribution de plusieurs prix Nobel de physique. Avec le temps, on a découvert de nombreuses influences supplémentaires de la matière soumise aux champs sur les propriétés liées à la lumière. Une vaste liste en est donnée dans le tableau de la page 138. Il apparaît que, mis à part quelques exceptions, ces effets peuvent tous être décrits par le lagrangien électromagnétique (36) ou, de manière équivalente, par les équations de Maxwell (40). En résumé, l'électrodynamique classique unifie réellement la description de l'électricité, du magnétisme et de l'optique. Il s'avère que tous les phénomènes contenus dans ces champs, de l'arc-en-ciel à la radio et de l'éclair aux générateurs électriques, sont des facettes différentes de l'évolution du champ électromagnétique.

TABLEAU 12 Le spectre électromagnétique.

FRÉ- QUENCE D'ONDE	LONG. D'ONDE	NOM	PRINCI- PALES PROPRIÉTÉS	APPARITION	UTILISATION	
$3 \cdot 10^{-18}$ Hz	10^{26} m	limite des basses fréquences			lisez la section sur la cosmologie	
< 10 Hz	> 30 Mm	champs quasi statiques			champs intergalactique, galactique, stellaire et planétaire, cerveau, poisson électrique	transmission de l'électricité, accélération et déviation des rayons cosmiques
ondes radio						
10 Hz– 50 kHz	30 Mm– 6 km	ELF	fait le tour du globe, pénètre dans l'eau et le métal	appareils électroniques cellules nerveuses, dispositifs électromécaniques	transmission électrique, communication à travers des parois métalliques, communication avec des sous-marins www.vlf.it	
50 – 500 kHz	6 km– 0,6 km	LF	suit la courbure de la Terre, ressenti par les nerfs (les « nerfs annonceurs du mauvais temps »)	émis par les orages	communications radio, télégraphie, chauffage par induction	
500 – 1 500 kHz	600 m– 200 m	MF	réfléchi par le ciel nocturne		radio	

* John Kerr (1824–1907) fut un physicien écossais, ami et collaborateur de William Thomson.

FRÉ- QUENCE D'ONDE	LONG.	NOM	PRINCI- PALES PROPRIÉTÉS	APPARITION	UTILISATION
1,5 – 30 MHz	200 m–10 m	HF	fait le tour du monde s'il y a réflexion par l'ionosphère, détruit les dirigeables à air chaud	émis par les étoiles	transmissions radio, radioamateurs, espionnage
15 – 150 MHz	20 m–2 m	VHF	permet le fonctionnement d'émetteurs avec des piles	émis par Jupiter	télécommandes, réseaux privés, TV, radioamateurs, pilotage radio, armée, police, taxi
150 – 1 500 MHz	2 m–0,2 m	UHF	<i>idem</i> , propagation de la ligne de vision		radios, talkies-walkies, TV, téléphones portables, Internet par câble, communications satellite, indicateurs de vitesse de vélo
micro-ondes					
1,5 – 15 GHz	20 cm–2 cm	SHF	<i>idem</i> , absorbé par l'eau	ciel nocturne, émis par les atomes d'hydrogène	astronomie radio, utilisé en cuisine (2,45 GHz), télécommunications, radars
15 – 150 GHz	20 mm– 2 mm	EHF	<i>idem</i> , absorbé par l'eau		
		infra- rouge	permet la vision nocturne	émis par chaque objet chaud	photographie satellite de la Terre, astronomie
0,3 – 100 THz	1 000 –3 μm	IRC ou infra-rouge lointain		lumière du jour, êtres vivants	voir à travers les vêtements, les enveloppes et les dents
100 – 210 THz	3 μm– 1,4 μm	IRB ou infrarouge moyen		lumière du jour	utilisé pour les communications par fibre optique pour la téléphonie et la télé numérique par câble
210 – 384 THz	1 400– 780 nm	IRA ou infra-rouge proche	pénètre sur plusieurs centimètres dans la peau humaine	lumière du jour, rayonnement des corps chauds	guérison des blessures, rhumatisme, kinésithérapie du sport, rétroéclairage

FRÉ- QUENCE D'ONDE	LONG.	NOM	PRINCI- PALES PROPRIÉTÉS	APPARITION	UTILISATION
375 – 750 THz	800– 400 nm	lumière	pas (trop) absorbé par l'air, décelé par l'œil (jusqu'à 900 nm à une puissance suffisante)	chaleur (« lumière chaude »), lasers & réactions chimiques, p. ex. oxydation du phosphore, lucioles (« lumière froide »)	définition de la ligne droite, amélioration de la photosynthèse en agriculture, thérapie photodynamique, traitement de l'hyperbilirubinémie
384 – 484 THz	780–620 nm	rouge	pénètre dans la chair	sang	signal d'alarme, utilisé pour l'imagerie du sein Réf. 46
	700 nm	rouge primaire de laboratoire		lampe au tungstène filtré	couleur de référence pour l'impression, la peinture, l'éclairage et les affichages
484 – 511 THz	620–587 nm	orangé		divers fruits	attire les oiseaux et les insectes
511 – 525 THz	587–571 nm	jaune		la plupart des fleurs	<i>idem</i> , meilleure couleur d'arrière-plan pour la lecture d'un texte en noir
525 – 614 THz	571–488 nm	vert	sensibilité maximale de l'œil	algues et plantes	réponse maximale de l'efficacité lumineuse (« sensation de luminosité ») par unité d'énergie lumineuse pour l'œil humain
614 – 692 THz	546,1 nm	vert primaire de laboratoire		lampe à mercure	couleur de référence
	488–433 nm	bleu		ciel, gemmes, eau	
	435,8 nm	bleu primaire de laboratoire		lampe à mercure	couleur de référence
692 – 789 THz	433–380 nm	indigo, violet		fleurs, gemmes	
		ultraviolet			

FRÉ- QUENCE D'ONDE	LONG.	NOM	PRINCI- PALES PROPRIÉTÉS	APPARITION	UTILISATION
789 – 952 THz	380–315 nm	UVA	pénètre à 1 mm dans la peau, la bronze, produit de la vitamine D, réprime le système immunitaire, provoque des cancers de la peau, détruit le cristallin de l'œil	émis par le Soleil, les étoiles et les flammes	perçu par certains oiseaux, fabrication de circuits intégrés
0,95 – 1,07 PHz	315–280 nm	UVB	<i>idem</i> , détruit l'ADN, provoque des cancers de la peau	<i>idem</i>	<i>idem</i>
1,07 – 3,0 PHz	280–100 nm	UVC	forme les radicaux de l'oxygène dans l'air, tue les bactéries, pénètre à 10 µm dans la peau	émis par le Soleil, les étoiles et les postes de soudure à l'arc	stérilisation, purification de l'eau, retraitement des déchets, fabrication de circuits intégrés
3 –24 PHz	100–13 nm	EUV			cartes du ciel, lithographie sur silicium
		rayons X	pénètre dans les matériaux	émis par les astres, les plasmas et les trous noirs	imagerie du tissu humain
24 – 240 PHz	13–1,3 nm	rayons X mous	<i>idem</i>	rayonnement synchrotron	<i>idem</i>
> 240 PHz ou > 1 keV	< 1,2 nm	rayons X durs	<i>idem</i>	émis lorsque des électrons relativistes frappent la matière	cristallographie, détermination de la structure de la matière
> 12 EHz ou > 50 keV	< 24 pm	rayons γ	<i>idem</i>	radioactivité, rayons cosmiques	analyse chimique, stérilisation, astronomie
$2 \cdot 10^{43}$ Hz	$\approx 10^{-35}$ m	limite de Planck		consultez la dernière partie de ce texte	

LA LENTEUR DES PROGRÈS EN PHYSIQUE

L'expression que nous connaissons

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (48)$$

concernant la vitesse de la lumière est si étrange que nous devrions être intrigués lorsque nous la voyons. Il manque quelque chose d'essentiel.

En réalité, cette vitesse est *indépendante* du mouvement propre de l'observateur qui mesure le champ électromagnétique. Autrement dit, la vitesse de la lumière est indépendante de la vitesse de la source lumineuse et indépendante de la vitesse de l'observateur. Tout cela est implicitement contenu dans l'expression (48). De manière incroyable, durant cinq décennies, *personne* n'a exploré cette étrange conséquence. Résultat : la théorie de la relativité est restée occultée de 1848 à 1905. Comme dans de si nombreuses autres situations, l'avancée en physique fut beaucoup plus lente que nécessaire.

La constance de la vitesse de la lumière est l'idée essentielle qui distingue la relativité restreinte de la physique galiléenne. En ce sens, tout dispositif électromagnétique, faisant usage de l'expression (48), constitue une preuve tangible de la relativité restreinte.

UN AUTRE REGARD SUR LE RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Les ondes électromagnétiques de basse fréquence sont également utilisées de manière courante pour la transmission des communications des téléphones portables, ainsi que des programmes télévisés, radio et par satellites. Comme la lumière, les ondes radio sont dues au mouvement des électrons. Dans la vie de tous les jours, la lumière est (généralement) produite par des électrons accélérés à l'intérieur des atomes ou des molécules. Les ondes radio sont engendrées par des électrons qui sont accélérés dans les métaux.

Les ondes radio peuvent aisément transporter des signaux tout autour de la Terre. En réalité, il apparaît que celles-ci décroissent en intensité comme $1/r$, où r représente la distance à la source. Elles décroissent beaucoup plus lentement que les champs statiques, pour lesquels l'intensité décroît comme $1/r^2$.

La faible dépendance en $1/r$ peut être comprise de manière qualitative à partir du schéma indiqué par la Figure 43. Il retrace le champ électrique autour d'une particule chargée qui subit le mouvement accéléré le plus simple possible : un rebond sur un mur. En fait, le dernier diagramme est suffisant pour montrer que le champ transversal décroît comme $1/r$. Pouvez-vous déduire cette dépendance ?

Défi 98 d

Si nous dessinons cette construction pour une charge qui subit des rebonds répétés, nous obtenons un diagramme ayant des replis réguliers dans ses lignes du champ, qui s'éloignent de la source. Pour une charge éprouvant un mouvement harmonique, nous obtenons le mouvement indiqué sur la Figure 44. Elle montre le mécanisme de l'antenne (ou de la source lumineuse) la plus simple que nous puissions imaginer.

La grandeur du champ électrique transversal peut être utilisée pour déduire la relation entre l'accélération a d'une charge q et la puissance électromagnétique rayonnée P . Premièrement, le champ électrique transversal (calculé dans le dernier exercice) doit être mis au carré, pour donner la densité locale d'énergie électrique. Ensuite, il doit être mul-

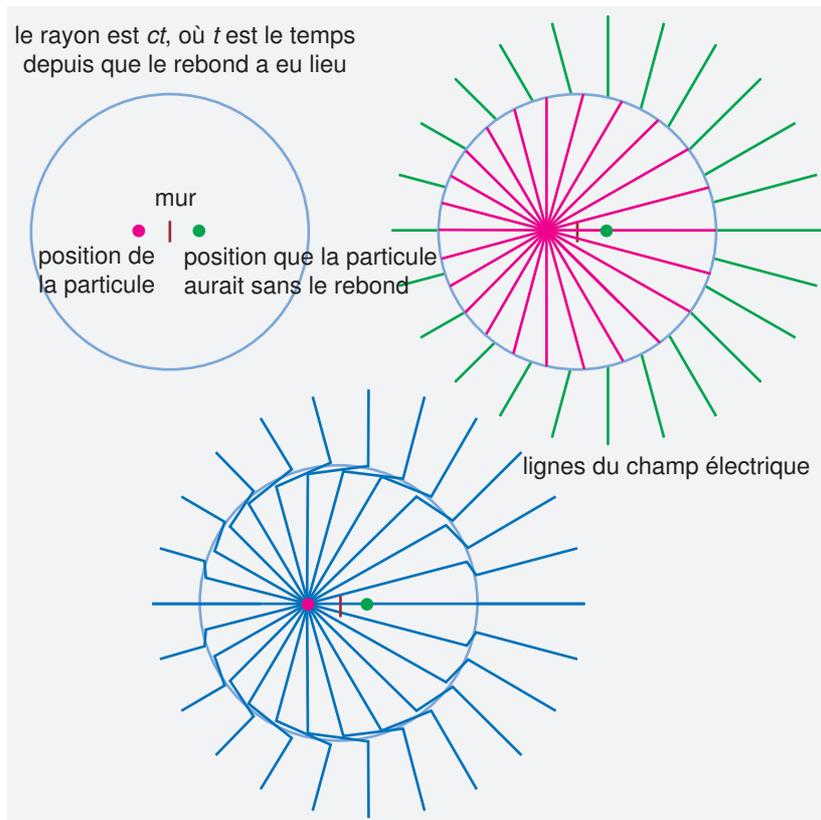


FIGURE 43 Comment confectionner, en trois étapes, le schéma du champ électrique régnant autour d'une particule ayant rebondi contre un mur.

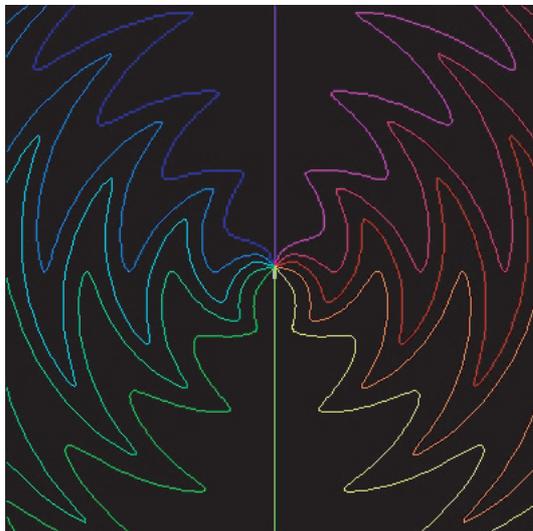


FIGURE 44 Champ électrique autour d'une particule oscillant dans la direction verticale. (© Daniel Schroeder)

multiplié par 2, pour inclure l'énergie magnétique. Enfin, nous devons intégrer sur l'angle total, ce qui donne un facteur égal à 2/3. Au final, nous obtenons

$$P = \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}. \quad (49)$$

La puissance rayonnée totale P dépend du carré de l'accélération et du carré de la charge qui est accélérée. C'est ce que nous appelons la *formule de Larmor*. Elle montre pourquoi les émetteurs radio ont besoin d'alimentations électriques.

À QUOI RESSEMBLE LE MONDE LORSQUE NOUS CHEVAUCHONS UN FAISCEAU LUMINEUX ?

À la fin du dix-neuvième siècle, le jeune Albert Einstein lut un livre discutant de la vitesse de la lumière. Cet ouvrage s'interrogeait sur ce qui se passerait si un observateur se déplaçait à la même vitesse que la lumière*. Einstein avait beaucoup réfléchi à ce problème, et il se demanda en particulier quelle sorte de champ électromagnétique il observerait dans ce cas. Il expliqua plus tard que cette expérience de pensée le convainquit déjà dès son jeune âge que *rien* ne pourrait voyager à la vitesse de la lumière, puisque le champ observé aurait une propriété que l'on ne rencontre pas dans la nature. Pouvez-vous découvrir de laquelle il voulait parler ?

Défi 99 s

Le fait de chevaucher un rayon lumineux conduirait à d'étranges conséquences.

- Vous n'auriez aucune image dans un miroir, comme un vampire.
- La lumière ne serait pas oscillante, mais serait un champ statique.
- Rien ne bougerait, comme dans le conte de la Belle au bois dormant.

Mais, à des vitesses *proches* de la vitesse de la lumière, les observations seraient également intéressantes.

- Vous observeriez une grande quantité de lumière arrivant devant vous et pratiquement aucune lumière des côtés ou de l'arrière ; le ciel serait bleu/blanc devant vous et rouge/noir derrière.
- Vous remarqueriez que tout défile très très lentement autour de vous.
- Vous ressentiriez l'effet de la plus petite particule de poussière comme celui d'une balle mortelle.

Défi 100 s Pouvez-vous méditer sur des conséquences plus étranges encore ? Il est plutôt rassurant que notre chère planète se déplace relativement lentement à travers son environnement.

LA LUMIÈRE VOYAGE-T-ELLE TOUJOURS EN LIGNE DROITE ?

Habituellement la lumière avance en ligne droite. En réalité, nous utilisons même la lumière pour *définir* « ce qui est droit ». Cependant, il existe un grand nombre d'exceptions que chaque expert du mouvement devrait connaître.

Réf. 47

* C'était la série d'ouvrages en vingt volumes d'Aaron Bernstein, *Naturwissenschaftliche Volksbücher*, Duncker, 1873-1874. Durant son adolescence, Einstein les lut, entre 1892 et 1894, avec une « attention palpante », comme il l'écrivit plus tard.

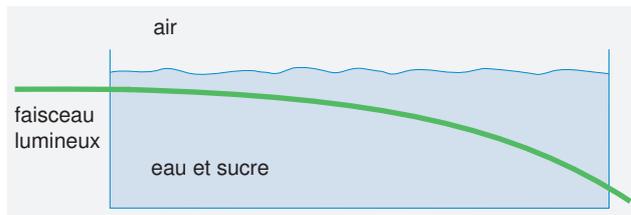


FIGURE 45 L'eau sucrée courbe la lumière.

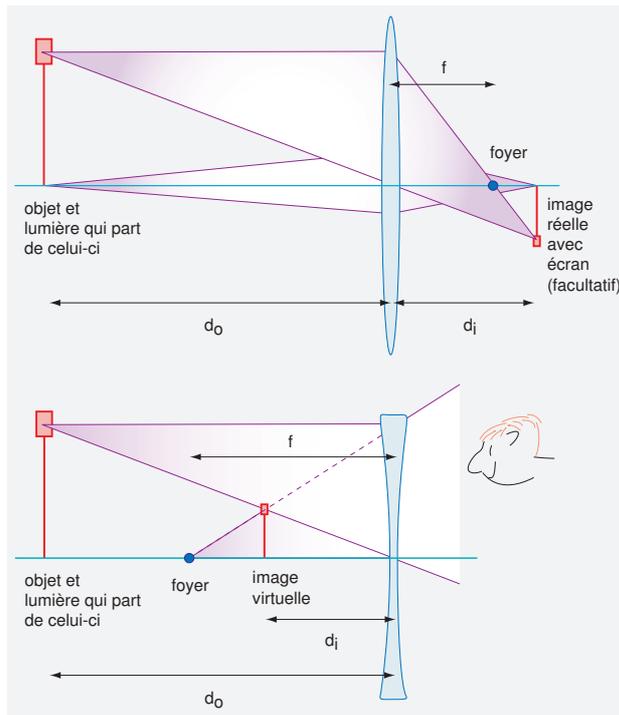


FIGURE 46 L'image réelle produite par une lentille convergente (si elle est utilisée comme ci-dessus) et l'image virtuelle produite par une lentille divergente.

Dans du sirop contenant du sucre dilué, les rayons lumineux se courbent, comme indiqué sur la **Figure 45**, si la concentration de sucre varie avec la profondeur. En fait, les rayons lumineux fléchissent à chaque fois qu'ils rencontrent des variations matérielles. Cet effet, appelé *réfraction*, modifie également l'aspect de la forme de nos pieds lorsque nous sommes dans notre bain et fait en sorte que les aquariums paraissent moins profonds qu'ils ne le sont réellement. La réfraction est une conséquence de la variation de la vitesse de la lumière d'un matériau à un autre. Êtes-vous capable d'expliquer la réfraction, et donc d'interpréter l'effet du sirop ?

Défi 101 s

La réfraction est avant tout employée dans la conception des lentilles. En utilisant du verre au lieu de l'eau, nous pouvons produire des surfaces courbées de telle façon que la lumière puisse être *focalisée*. Les dispositifs de focalisation peuvent être employés pour produire des images. Les deux principaux types de lentilles, avec leurs foyers (points de convergence des rayons lumineux) et les images qu'elles produisent, sont indiqués sur la **Figure 46**. Lorsqu'un objet est placé entre une lentille convergente et son foyer,

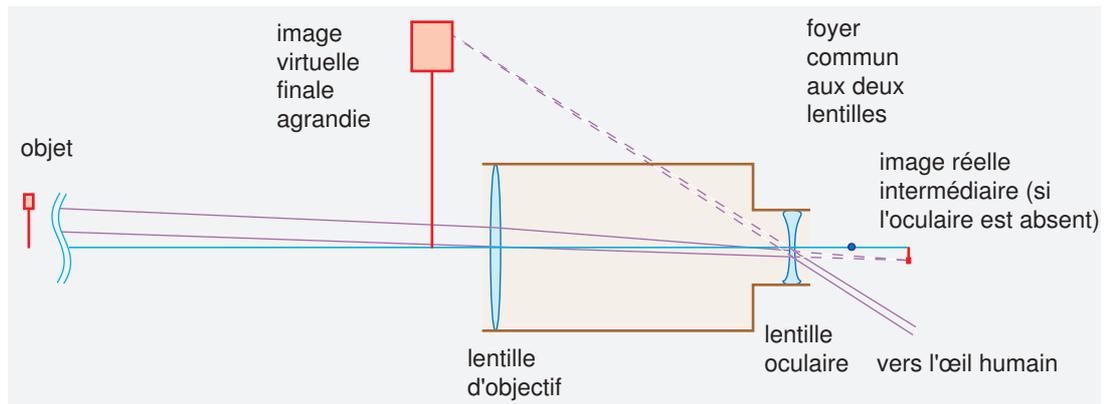


FIGURE 47 La réfraction comme fondement du télescope – indiqué ici selon sa conception hollandaise originale.

celle-ci agit comme une *loupe*. La lentille produit alors une image *réelle*, c'est-à-dire une image qui peut être projetée sur un écran. Dans toutes les autres situations, les lentilles engendrent des images *virtuelles* : de telles images peuvent être vues par l'œil mais ne peuvent pas être projetées sur un écran. La Figure 46 nous permet également de déduire l'équation des lentilles minces qui relie les longueurs d_o , d_i et f . Quelle est-elle ?

Défi 102 s

Bien que les lunettes et les lentilles fussent connues depuis l'Antiquité, il fallut attendre le Moyen Âge pour que deux lentilles fussent combinées afin de produire des instruments optiques plus élaborés. Le *télescope* fut inventé en 1608, ou juste avant, par le polisseur de lentilles germano-hollandais Johannes Lipperhey (vers 1570–1619), qui fit fortune en le vendant à l'armée hollandaise. Lorsque Galilée eut écho de cette découverte, il s'en empara immédiatement et l'améliora. En 1609, Galilée réalisa les premières observations astronomiques, qui le rendirent mondialement célèbre. Le modèle du *télescope hollandais* possède un tube court produisant une image brillante et verticale, et son grossissement est égal au rapport des distances focales des deux lentilles. Il est encore utilisé aujourd'hui dans les jumelles de théâtre. Un grand nombre de constructions alternatives de télescopes ont été développées au cours du temps*.

Défi 103 e

Une autre manière d'agencer les deux lentilles conduit au *microscope*. Pouvez-vous expliquer à un non-physicien comment fonctionne un microscope** ? Werner Heisenberg rata son examen de doctorat principalement parce qu'il n'y parvint pas. Ce problème n'est pas ardu, cependant. En réalité, l'inventeur du microscope était un autodidacte

Défi 104 s

* Un tour d'horizon fascinant à propos de ce que les gens ont accompli dans ce domaine jusqu'à ce jour est développé par PETER MANLY, *Unusual Telescopes*, Cambridge University Press, 1991, et HENRY C. KING, *The History of the Telescope*, Dover, 2003.

Des images peuvent également être réalisées avec des miroirs. Puisque les miroirs sont plus économiques et plus faciles à fabriquer pour des reproductions d'images de haute précision, la majorité des grands télescopes ont un miroir à la place de la lentille primaire.

Par ailleurs, les télescopes existent également dans la nature. De nombreuses araignées possèdent deux types d'yeux. Les plus gros, conçus pour la vision de loin, possèdent deux lentilles agencées de la même manière que dans les télescopes.

** Si vous ne le pouvez pas, lisez le magnifique ouvrage d'ELIZABETH M. SLATER & HENRY S. SLATER, *Light and Electron Microscopy*, Cambridge University Press, 1993.



FIGURE 48 L'observation de ce graphique sous des grossissements plus importants révèle la dispersion de l'œil humain : les lettres flottent à différentes profondeurs.

du dix-septième siècle : le technicien hollandais Antoni Van Leeuwenhoek (1632–1723) gagna sa vie en vendant plus de cinq cents exemplaires de son microscope à ses contemporains. (Cela est un petit peu exagéré : Van Leeuwenhoek n'utilisait qu'une lentille.)

Aucun schéma du trajet d'un rayon, fût-il celui d'une simple lentille, d'un télescope ou d'un microscope, n'est véritablement complet si l'œil, intégrant son cristallin et sa rétine, est absent. Pouvez-vous conclure et vous convaincre que ces dispositifs fonctionnent vraiment ?

Défi 105 pe

La réfraction est généralement dépendante de la couleur. Pour cette raison (et afin de compenser les autres erreurs dans la formation des images par la lentille, que nous appelons *aberrations*) les microscopes ou les appareils photographiques possèdent plusieurs lentilles, constituées de matériaux différents. Elles compensent les effets sur la couleur, qui sinon engendrent la coloration de la bordure des images. La dépendance en fonction de la couleur de la réfraction dans les gouttelettes d'eau est également à la base de l'arc-en-ciel, comme indiqué plus bas. La réfraction dans les cristaux de glace situés dans l'atmosphère constitue le fondement des halos lumineux et de nombreux autres phénomènes lumineux que l'on aperçoit souvent autour du Soleil et de la Lune.

Page 97

Réf. 48

L'œil humain possède aussi une réfraction dépendante de la couleur. (Nous savons que, pour le fonctionnement de l'œil, la courbure de la cornée est plus importante que la puissance réfringente du cristallin, parce que celui-ci est immergé dans un milieu ayant quasiment le même indice de réfraction, limitant ainsi les effets de la réfraction.) La réfraction dépendante de la couleur n'est pas corrigée dans l'œil, mais dans le cerveau. En fait, la dispersion due au cristallin peut être remarquée si cette correction est rendue impossible, par exemple lorsque des lettres rouges ou bleues sont imprimées sur un fond noir, comme indiqué sur la **Figure 48**. Nous avons l'impression que les lettres rouges flottent devant les lettres bleues. Pouvez-vous montrer comment la dispersion conduit à cet effet de flottaison ?

Défi 106 s

Une deuxième observation importante est que la lumière peut traverser les interfaces et se propager d'un milieu à un autre. Cet effet fut dénommé *diffraction* par Francesco Grimaldi dans son ouvrage *Physico-mathesis de lumine*, publié en 1665. Grimaldi étudia très attentivement les ombres. Il découvrit ce que chacun apprend dorénavant au lycée : la lumière se propage d'un milieu à un autre de la même manière que le son, et la diffraction de la lumière est due à la nature ondulatoire de cette dernière. (Newton s'intéressa à l'optique après avoir lu Grimaldi ; il récusa alors à tort ses conclusions.)

Réf. 49

À cause de la diffraction, il est impossible de produire des faisceaux lumineux strictement parallèles. Par exemple, chaque rayon laser diverge d'une certaine quantité minimale, appelée *limite de la diffraction*. Peut-être savez-vous que les réflecteurs les plus coûteux au monde sont situés sur la Lune, où ils ont été déposés par les missions Lunokhod



FIGURE 49 Dans certains matériaux, les rayons lumineux peuvent spiraler l'un autour de l'autre.

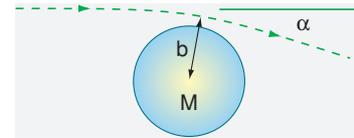


FIGURE 50 Les masses courbent la lumière.

Réf. 50 et Apollo. Pouvez-vous déterminer ce que devient la largeur d'un rayon laser ayant une divergence minimale quand il parvient à la Lune et retourne vers la Terre, en supposant qu'il avait une largeur de 1 m lorsqu'il a quitté la Terre ? De quelle largeur serait-il à son retour s'il l'avait été de 1 mm au départ ? En bref, la diffraction et l'existence impossible des faisceaux parallèles confirment que la lumière est une onde.

Défi 107 s

La diffraction implique que les images parfaitement tranchées n'existent pas : il y a une *limite sur la résolution*. Cela est vrai pour chaque instrument optique, y compris l'œil. La résolution de l'œil est comprise entre une et deux minutes d'arc, c'est-à-dire entre 0,3 et 0,6 mrad. Cette limite est en partie due à la taille finie de la pupille. (C'est pourquoi le fait de fermer légèrement les paupières permet de voir de manière plus claire.) En pratique, la résolution de l'œil est souvent limitée par les aberrations chromatiques et par les imperfections dans la forme de la cornée et du cristallin. (Pouvez-vous vérifier ces grandeurs et leurs interprétations par le calcul ? Est-il vrai que le nombre de cônes présents dans l'œil est finement ajusté à sa résolution ?) Par conséquent, il existe par exemple une distance maximale pour laquelle les hommes parviennent encore à distinguer les deux phares d'une voiture. Pouvez-vous l'évaluer ?

Défi 108 d

Défi 109 s

Les limites sur la résolution font également qu'il est impossible de voir la Grande Muraille au nord de la Chine depuis la Lune, contrairement à ce qu'on affirme souvent. Dans les quelques parties qui ne sont pas encore en ruines, le mur fait environ 6 mètres de large, et même s'il projette une ombre assez vaste durant la matinée ou la soirée, l'angle qu'il sous-tend est depuis la Lune de moins d'une seconde d'arc, de telle façon qu'il est parfaitement invisible pour l'œil humain. En réalité, trois cosmonautes différents qui ont voyagé jusqu'à la Lune ont attentivement scruté la Terre et ont confirmé que cette affirmation est absurde. Ce récit est l'un des canulars les plus persistants. (Est-il possible de voir la Muraille depuis la Station spatiale ?) Les objets les plus vastes construits par l'homme sont les polders des terres conquises sur la mer aux Pays-Bas ; ils sont visibles depuis l'espace proche de l'atmosphère. La plupart des grandes mégalopoles le sont également, de même que les autoroutes de Belgique la nuit, leur luminosité éclatante font qu'elles se détachent très nettement du côté obscur de la Terre.

Réf. 51
Défi 110 pe

La réfraction conduit aussi à un célèbre effet où la lumière semble contourner les obstacles : le *mirage*. La Figure 52 montre des photographies d'un mirage *supérieur* inversé et d'un mirage *inférieur* droit. Le mirage inférieur inversé, plus commun, est souvent aperçu sur des routes brûlantes. On rencontre également des mirages supérieurs droits. Ils sont tous engendrés par la réfraction et leur apparition dépend du profil de température présent dans l'air.

Réf. 52

La diffraction signifie également que, derrière un petit disque éclairé le long de son axe, le centre de la zone ombragée révèle, contre toute attente, un point lumineux comme

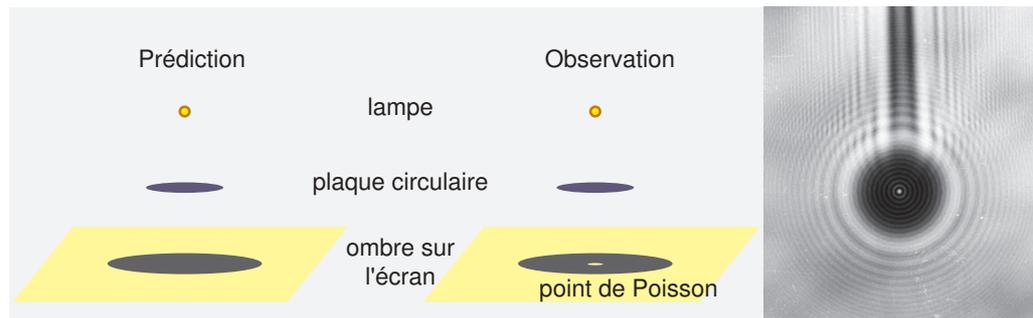


FIGURE 51 Les ombres indiquent que la lumière est une onde : l'attente naïve (à gauche), négligeant l'aspect ondulatoire, et la véritable observation (à droite) de l'ombre d'un objet circulaire. (© Christopher Jones)

indiqué sur la [Figure 51](#). Ce « trou » dans l'ombre fut prédit en 1819 par Denis Poisson (1781–1840) afin de démontrer à quelles conséquences absurdes la théorie ondulatoire de la lumière pouvait conduire. Il avait juste lu la description mathématique de la diffraction développée par Augustin Fresnel* sur la base de la description ondulatoire de la lumière. Mais peu après, François Arago (1786–1853) observa réellement le point de Poisson, ridiculisant ainsi Poisson, rendant Fresnel célèbre et amorçant l'approbation générale concernant les propriétés ondulatoires de la lumière.

Réf. 53

Des champs électromagnétiques additionnels n'influencent généralement pas directement la lumière, puisque la lumière ne possède pas de charge et parce que les équations de Maxwell sont linéaires. Mais dans certains matériaux les équations sont non linéaires, et ce n'est alors plus la même histoire. Par exemple, dans certains matériaux photoréfringents, deux faisceaux lumineux proches peuvent *s'entortiller* l'un autour de l'autre, comme le montrèrent Segev et ses collègues en 1997.

Page 239

Un ultime expédient permettant de courber la lumière est la gravité, comme il a déjà été discuté dans les chapitres traitant de la gravitation universelle et de la relativité générale. Les effets de la gravité qui agit entre deux rayons lumineux y ont également été traités.

En guise de remarque, la lumière qui est réfléchiée ou diffusée par des objets ne peut pas être considérée comme étant courbée, elle est mieux décrite comme étant de la lumière qui est absorbée puis réémise. Cependant, la diffusion représente un mécanisme prépondérant de modification de la direction de la lumière : sans la diffusion, nous ne verrions presque rien. La vue est la détection de la lumière diffusée.

En résumé, la lumière voyage en ligne droite uniquement si elle voyage *loin de toute matière*. Dans la vie quotidienne, « loin » signifie plus de quelques millimètres seulement, parce que tous les effets gravitationnels et électromagnétiques sont négligeables à ces distances, principalement à cause de la vitesse réellement supersonique de la lumière.

* Augustin Jean Fresnel (1788–1827), ingénieur et occasionnellement physicien. Il publia en 1818 son article majeur sur la théorie ondulatoire pour laquelle il obtint le prix de l'Académie française des sciences en 1819. (Le « s » de son nom ne se prononce pas.) Pour améliorer sa situation financière, il travailla dans la commission chargée des phares, dans laquelle il développa les lentilles de Fresnel désormais connues. Il mourut prématurément, en partie d'épuisement dû à son surcroît de travail.

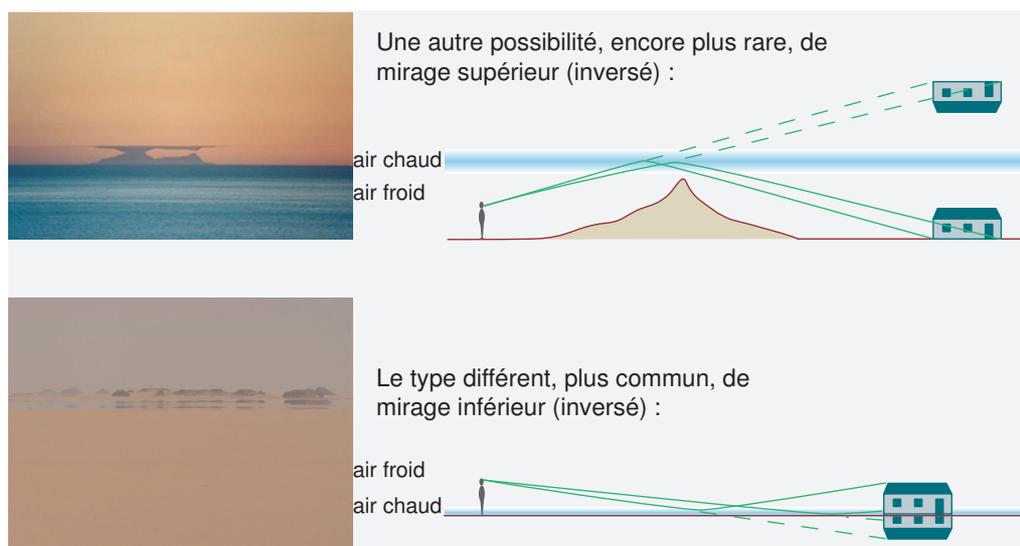


FIGURE 52 Une réflexion efficace, due à la réfraction dans une couche d'air chaud, est à la base des mirages et peut conduire à des effets saisissants, tels que le mirage supérieur inversé (en haut à gauche et à droite), le mirage inférieur droit (en bas à gauche) et le mirage inférieur inversé (en bas à droite). (photographies © Thomas Hogan et Andy Barson)



FIGURE 53 Le dernier miroir de la fournaise solaire d'Odeillo, dans les Pyrénées. (© Gerhard Weinrebe)

LA FOCALISATION DE LA LUMIÈRE

Si nous construisons une grosse lentille ou un miroir incurvé, nous pouvons collecter la lumière du Soleil et la focaliser en un unique point. Chacun dans son enfance a utilisé une lentille convergente pour réaliser de cette manière, par incandescence, des points noirs sur des journaux. En Espagne, des chercheurs dotés de moyens ont même construit un miroir courbe aussi grand qu'une habitation, afin d'étudier l'utilité de l'énergie solaire et le comportement des matériaux à haute température. De façon élémentaire, le miroir fournit une manière économique de réaliser un four incandescent en son foyer. (Et « foyer », au sens de point focal ou « focus », est le mot latin désignant « foyer », au sens de cheminée.)

Les enfants découvrent assez rapidement que des grosses lentilles leur permettent de brûler des choses plus facilement que des petites. Il est évident que le site espagnol est le détenteur du record dans ce domaine. Cependant, il n'est pas sensé de bâtir un miroir

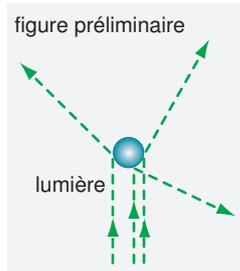


FIGURE 54 Lévitation d'une petite bille de verre à l'aide d'un laser.

Réf. 95

Défi 111 pe

encore plus vaste. Quelle que puisse être sa taille, un tel dispositif ne peut pas atteindre une température plus élevée que celle de la source lumineuse d'origine. La température de surface du Soleil est d'environ 5 800 K; en réalité, la température la plus élevée atteinte jusqu'à présent est d'à peu près 4 000 K. Êtes-vous capable de montrer que cette restriction découle de la deuxième loi de la thermodynamique ?

En bref, la nature livre une *limite* à la concentration d'énergie lumineuse. En fait, nous rencontrerons des limites supplémentaires au cours de notre exploration.

POUVONS-NOUS PALPER LA LUMIÈRE ?

Si une petite bille de verre est placée sur la tête d'un laser puissant, la bille reste suspendue en l'air, comme indiqué sur la Figure 54*. Cela signifie que la lumière possède une quantité de mouvement. Par conséquent, contrairement à ce que nous avons affirmé au début de notre ascension montagnaise, les images *peuvent* être palpées ! En fait, la facilité avec laquelle les objets peuvent être poussés possède même un nom particulier. Pour les étoiles, nous la dénommons l'*albédo*, et pour des objets en général on l'appelle la *réflectance*, notée r .

Défi 112 e

Comme chaque type de champ électromagnétique, et comme chaque variété d'onde, la lumière transporte de l'énergie. Le flux d'énergie T par unité de surface et de temps est

$$\mathbf{T} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \wedge \mathbf{B} \quad \text{donnant une moyenne} \quad \langle T \rangle = \frac{1}{2\mu_0} E_{\max} B_{\max} . \quad (50)$$

Évidemment, la lumière possède également une quantité de mouvement P . Elle est reliée à l'énergie E par

$$P = \frac{E}{c} . \quad (51)$$

Défi 113 e

En conséquence, la pression p exercée par la lumière sur un corps est donnée par

$$p = \frac{T}{c} (1 + r) \quad (52)$$

* L'objet le plus lourd qui a été mis en lévitation avec un laser pesait 20 g. Le laser employé était énorme, et la méthode tirait également profit de quelques effets complémentaires, tels que les ondes de choc, pour maintenir cet objet en l'air.



FIGURE 55 La queue de la comète McNaught, photographiée en Australie en 2007. (© Flagstaffotos)

Défi 114 s

où pour des corps noirs nous avons une réflectance $r = 0$ et pour des miroirs $r = 1$, les autres corps possédant des valeurs situées dans cet intervalle. À combien estimez-vous la quantité de pression due à la lumière du Soleil agissant sur une surface noire d'un mètre carré ? Est-ce pour cette raison que nous ressentons plus de pression dans la journée que dans la nuit ?

Défi 115 e

En fait, un équipement particulièrement délicat est nécessaire pour détecter la quantité de mouvement de la lumière ou, autrement dit, sa pression de rayonnement. Déjà en 1619, Johannes Kepler avait suggéré dans *De cometis* que les queues des comètes existent uniquement parce que la lumière du Soleil frappe les minuscules particules de poussière qui se détachent de celles-ci. Pour cette raison, la queue est toujours dirigée *du côté opposé* au Soleil, comme vous pourrez le vérifier lorsque la prochaine occasion se présentera. Aujourd'hui, nous savons que Kepler avait raison, mais il n'est pas facile de démontrer cette hypothèse.

Défi 116 s

En 1873, William Crookes* inventa le *radiomètre de Crookes* ou *moulin à lumière*. Il avait pour objectif de démontrer l'existence de la pression de rayonnement de la lumière. Le moulin à lumière est constitué de quatre minces ailettes, avec une face noire et l'autre réfléchissante, qui sont montées sur un axe vertical, comme indiqué sur la Figure 56. Cependant, lorsque Crookes acheva sa construction – elle était analogue à celles qui sont vendues dans les magasins aujourd'hui –, il découvrit comme tout le monde qu'elle tournait dans la mauvaise direction, à savoir que le côté brillant tournait vers la lumière ! (Pourquoi cette direction est-elle surprenante ?) Vous pouvez le vérifier

* William Crookes (n. Londres 1832, d. *id.* 1919) fut un chimiste et physicien anglais, président de la Royal Society, découvreur du thallium, et adepte du spiritualisme.

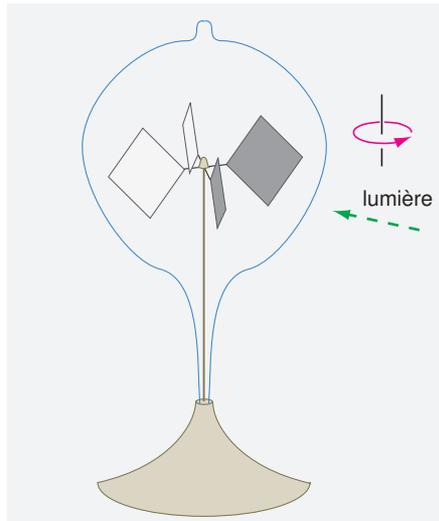


FIGURE 56 Un moulin à lumière du commerce tourne contre la lumière.

par vous-même en dirigeant la pointe d'un laser dessus. Ce comportement est demeuré énigmatique pendant quelque temps. Son explication fait appel à la minuscule quantité de gaz résiduel situé dans la sphère en verre, et nous emmènerait trop loin du sujet qui nous préoccupe. Ce ne fut qu'en 1901, avec l'avènement de pompes beaucoup plus performantes, que le physicien russe Pyotr/Peter Lebedew parvint à créer un vide suffisamment poussé pour lui permettre de mesurer la pression lumineuse avec un tel radiomètre amélioré et véritable. Lebedew confirma également la valeur conjecturée pour la pression de la lumière et démontra la justesse de l'hypothèse de Kepler concernant les queues des comètes. Aujourd'hui, il est même possible de concevoir de minuscules hélices qui commencent à tourner lorsqu'elles sont éclairées par la lumière, exactement comme le vent fait tourner les pales des moulins à vent.

Mais la lumière ne peut pas seulement toucher et être touchée, elle peut également *saisir*. Dans les années 1980, Arthur Ashkin et son groupe de recherche développèrent de véritables *pincettes optiques* qui nous permettent de manipuler, suspendre et déplacer des petites sphères transparentes de 1 à 20 μm de diamètre en utilisant des rayons laser. Il est possible de le faire par l'intermédiaire d'un microscope, de telle sorte que nous pouvons également observer en temps réel ce qui se passe. Cette technique est maintenant employée de manière routinière dans la recherche en biologie, partout dans le monde; elle a été utilisée, par exemple, pour mesurer la force de fibres musculaires uniques, en fixant chimiquement leurs extrémités à des sphères en verre ou en Téflon, et en exerçant sur elles une traction à l'aide de ces pincettes optiques.

Mais ce n'est pas tout. Dans la dernière décennie du vingtième siècle, plusieurs groupes sont même parvenus à *faire tourner* des objets, réalisant ainsi de véritables *clés à molette optiques*. Elles sont capables de faire tourner des particules dans une direction ou dans l'autre suivant notre point de vue, en modifiant les propriétés optiques du rayon laser employé pour piéger la particule.

En fait, il n'y a pas à réfléchir énormément pour déduire que si la lumière possède une quantité de mouvement (moment de translation), la lumière circulairement polarisée

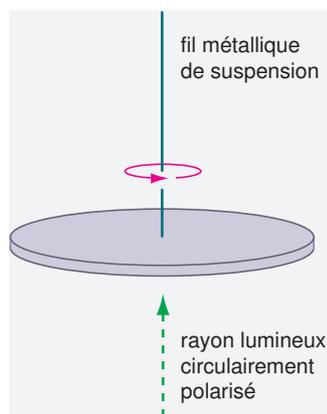


FIGURE 57 La lumière peut faire tourner des objets.

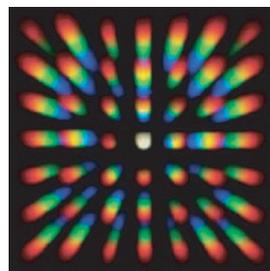


FIGURE 58 Les parapluies décomposent la lumière blanche.

possède aussi un moment *cinétique* (moment de rotation). En réalité, pour une telle onde, le moment cinétique L est donné par

$$L = \frac{E_{\text{énergie}}}{\omega} . \quad (53)$$

De façon équivalente, le moment cinétique d'une onde est égal à sa quantité de mouvement fois $\lambda/2\pi$. Pour la lumière, ce résultat était déjà confirmé au tout début du vingtième siècle : un faisceau lumineux peut mettre certains matériaux (lesquels ?) en rotation, comme indiqué sur la Figure 57. Bien évidemment, tout cela fonctionne encore mieux avec un rayon laser. Dans les années 1960, une magnifique démonstration fut menée avec des micro-ondes. Un rayon micro-onde circulairement polarisé engendré par un maser – l'équivalent micro-onde d'un laser – peut mettre une pièce métallique qui l'absorbe en rotation. En réalité, pour un faisceau de symétrie cylindrique, en fonction du sens de rotation, le moment cinétique est soit parallèle soit antiparallèle à la direction de propagation. Toutes ces expériences confirment que la lumière emporte également du moment cinétique, un effet qui jouera un rôle important dans la partie quantique de notre ascension montagnaise.

Nous remarquons que le fait que le moment cinétique soit de l'énergie divisée par la vitesse angulaire ne s'applique pas à toutes les ondes. C'est uniquement le cas pour des ondes constituées de ce qu'en théorie quantique nous qualifierons de particules de spin 1. Par exemple, pour les ondes gravitationnelles le moment cinétique est le *double* de cette valeur, et on s'attend par conséquent à ce qu'elles soient constituées de particules de spin 2.

Qu'est-ce que cela implique pour les queues des comètes mentionnées ci-dessus ? Ce problème fut définitivement tranché en 1986. Un satellite fut propulsé à une altitude de 110 000 km où on lui fit libérer un nuage de baryum. Ce nuage, visible depuis la Terre, développa rapidement une queue qui était discernable depuis le sol : c'était la première comète artificielle. Il apparaît que la forme des queues des comètes est en partie due aux

Défi 117 e
Réf. 58
Défi 118 pe

Réf. 59

chocs avec les photons, en partie au vent solaire, et également aux champs magnétiques.

En résumé, la lumière peut toucher et être palpée. Manifestement, si la lumière peut faire tourner des corps, elle peut aussi *être* mise en rotation. Pouvez-vous imaginer comment cela peut être accompli ?

Défi 119 s

GUERRE, LUMIÈRE ET MENSONGES

À partir des minuscules effets de l'équation (52) concernant la pression lumineuse, nous déduisons que la lumière n'est pas un outil efficace pour frapper des objets. D'autre part, la lumière est capable de réchauffer des objets, comme nous pouvons le ressentir au soleil ou quand la peau est mise en contact avec un rayon laser d'environ 100 mW ou plus. Pour la même raison, les pointeurs laser bon marché sont également dangereux pour l'œil.

Dans les années 1980, et à nouveau en 2001, un groupe d'individus, qui avaient lu un nombre excessif de romans de science-fiction, parvint à persuader l'armée – qui se laisse facilement bernier, aussi, dans ces situations – que des lasers pourraient être employés pour abattre des missiles, et qu'une grande partie de l'argent des contribuables devait être dépensée pour développer de tels lasers. En utilisant la définition du vecteur de Poynting et en considérant un délai de frappe d'environ 0,1 s, êtes-vous capable d'estimer le poids et la taille de la batterie nécessaire pour qu'un tel appareil puisse fonctionner ? Que se passerait-il par temps nuageux ou pluvieux ?

Défi 120 pe

D'autres personnes ont tenté de convaincre la NASA d'étudier la faisabilité de la propulsion d'une fusée en utilisant de la lumière émise au lieu de gaz éjectés. Êtes-vous capable d'estimer si cela est éventuellement possible ?

Défi 121 pe

QU'EST-CE QUE LA COULEUR ?

Nous avons vu que les ondes électromagnétiques de certaines fréquences sont visibles. Dans cette étendue, des fréquences différentes correspondent à des couleurs distinctes. (Êtes-vous capable de convaincre un ami à ce propos ?) Mais l'histoire ne s'arrête pas là. De nombreuses couleurs peuvent être produites soit par une longueur d'onde unique, c'est-à-dire par de la lumière *monochromatique*, soit par un *mélange* de plusieurs couleurs différentes. Par exemple, le jaune primaire peut être, s'il est pur, engendré par un faisceau électromagnétique de 575 nm de longueur d'onde ou peut être réalisé par un mélange de vert primaire de 546,1 nm et de rouge primaire de 700 nm. L'œil ne peut pas faire la différence entre ces deux cas, seuls les spectromètres le peuvent. Dans la vie quotidienne, toutes les couleurs se révèlent être des mélanges, à l'exception de celles des réverbères jaunes, des rayons laser et de l'arc-en-ciel. Vous pouvez le vérifier en utilisant un parapluie ou un disque compact : ils décomposent les mélanges de lumière, mais pas les couleurs pures.

Défi 122 s

Défi 123 e

En particulier, la lumière blanche est un mélange d'une gamme continue de couleurs ayant une intensité donnée par longueur d'onde. Pour vérifier que la lumière blanche est bien un mélange de couleurs, tenez simplement la partie gauche de la [Figure 59](#) si près de votre œil que vous ne puissiez plus distinguer clairement les raies. Les bordures floues des bandes blanches possèdent une nuance de rose ou de vert. Ces couleurs sont provoquées par les imperfections de l'œil humain, dites *aberrations chromatiques*. Les aberrations conduisent au fait que toutes les fréquences de la lumière ne suivent pas le même trajet à

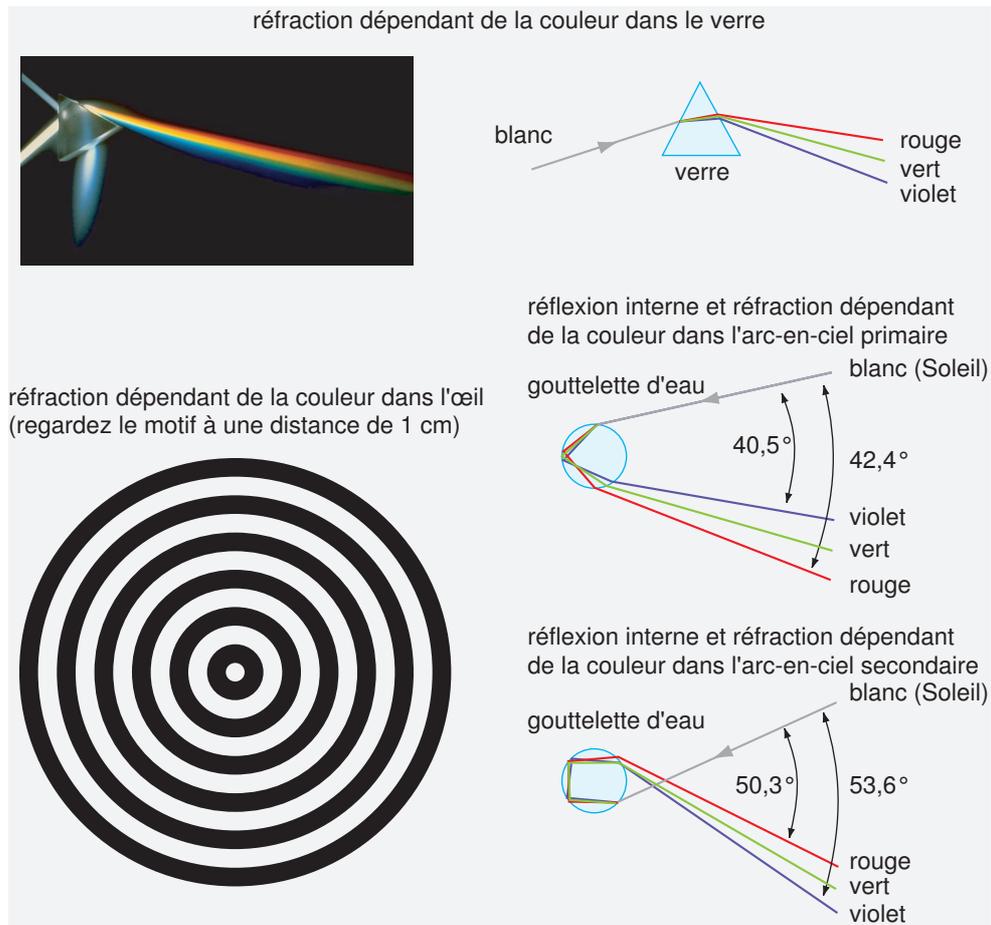


FIGURE 59 La preuve que la lumière blanche est un mélange de couleurs (avec des différences d'angles exagérées). (photographie Susan Schwartzberg, © Exploratorium www.exploratorium.edu)

travers le cristallin de l'œil, et par conséquent qu'elles heurtent la rétine à des emplacements différents. C'est le même effet qui se produit dans les prismes ou dans les gouttes d'eau à l'origine d'un arc-en-ciel. Par ailleurs, la forme de l'arc-en-ciel nous renseigne sur la forme des gouttelettes d'eau. Pouvez-vous expliciter cette correspondance?

Défi 124 s

La partie droite de la **Figure 59** explique comment les arcs-en-ciel se forment. L'idée centrale est que la réflexion interne qui se produit à l'intérieur des gouttelettes d'eau dans le ciel est responsable de la projection en arrière de la lumière provenant du Soleil, vu que la réfraction, qui est dépendante de la longueur d'onde, à l'interface air-eau est responsable des différentes trajectoires suivies par chaque couleur. Les deux premières personnes qui ont vérifié cette explication furent Theodoricus Teutonicus de Vriberg (v. 1240 à v. 1318) entre 1304 et 1310 et, simultanément, le mathématicien persan Kamal al-Din al-Farisi. Pour contrôler cette interprétation, ils firent quelque chose de simple et élégant, que n'importe qui peut reproduire chez soi. Ils façonnèrent une gouttelette d'eau agrandie en emplissant un mince récipient en verre sphérique (ou cylindrique) avec de l'eau, puis ils envoyèrent un faisceau de lumière blanche dedans. Theodoricus et

Réf. 60

Défi 125 e

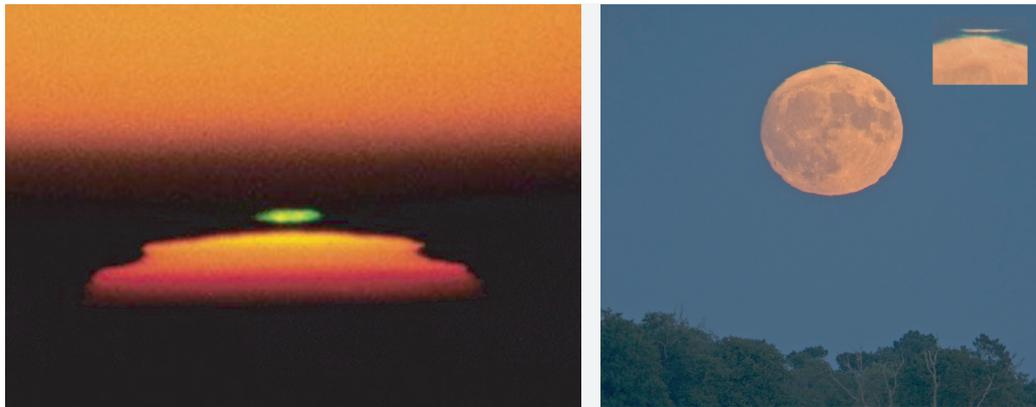


FIGURE 60 Un flash vert situé au-dessus du soleil couchant et un autre au-dessus de la Lune, indiquant aussi le changement de couleur du contour de la Lune. (© Andrew Young et Laurent Laveder/PixHeaven.net)

Page 74

al-Farisi relevèrent exactement ce qui est indiqué sur la [Figure 59](#). Avec cette expérience, chacun d'entre eux était capable de reproduire l'angle de l'arc-en-ciel principal ou primaire, sa succession de couleurs, ainsi que l'existence d'un arc-en-ciel secondaire, son angle observé et sa succession de couleurs inversée*. Tous ces arcs sont visibles sur la [Figure 36](#). L'admirable expérience de Theodoricus est parfois considérée comme la plus importante contribution dans l'étude de la nature au Moyen Âge.

À ce propos, l'explication de la [Figure 59](#) n'est pas complète. Elle est dessinée de telle sorte que le rayon de lumière frappe la gouttelette d'eau à un emplacement particulier. Si ce rayon lumineux heurte la gouttelette en d'autres points, les arcs-en-ciel apparaissent à des angles différents, mais alors tous les autres arcs-en-ciel qui sont situés là s'effacent. Seul l'arc-en-ciel visible persiste, car ses angles de déviation sont extrémaux.

Réf. 62

Par ailleurs, au coucher du soleil, l'atmosphère elle-même agit aussi comme un prisme, ou plus précisément comme une lentille cylindrique affectée par le sphérochromatisme. Cela signifie que le Soleil est scindé en différentes images, une pour chaque couleur, qui sont légèrement décalées les unes par rapport aux autres, le décalage total étant égal à environ 1% du diamètre. Ainsi, la bordure du Soleil s'en trouve colorée. Si le temps est favorable, si l'air est limpide jusqu'à l'horizon et au-delà de celui-ci, et si le profil de température adéquat est présent dans l'atmosphère, un mirage qui varie en fonction de la couleur apparaîtra. Par conséquent, pendant à peu près une seconde, il sera possible de voir, juste après ou à proximité des images rouge, orange et jaune du soleil couchant, l'image vert-bleu, parfois même bien distincte. C'est le fameux *flash vert* décrit par Jules Verne dans son roman *Le Rayon vert*. Il est fréquemment observé sur les plages tropicales, par exemple à Hawaï, et depuis les ponts des navires qui croisent dans les eaux chaudes.

Réf. 63

Réf. 62, Réf. 64

Défi 126 pe

Réf. 61

* Pouvez-vous deviner où les arcs-en-ciel tertiaire et quaternaire doivent être observés? Il existe de rares observations rapportées à leur sujet. La chasse pour le signalement de l'arc-en-ciel du cinquième ordre est toujours ouverte. (En laboratoire, nous avons observé des arcs, entourant des gouttelettes, allant jusqu'au treizième ordre.) Pour plus de détails, consultez le magnifique site Web sur www.atoptics.co.uk. Il existe plusieurs formules concernant les angles des divers ordres des arcs-en-ciel, qui découlent directement de considérations géométriques mais sont trop compliquées pour être citées ici.



FIGURE 61 Du lait et de l'eau simulent le ciel du soir. (© Antonio Martos)

Même l'air pur décompose la lumière blanche. Cependant, ce phénomène n'est pas engendré par la dispersion, mais par la diffusion. La diffusion, qui dépend de la longueur d'onde, constitue la raison qui fait que le ciel et les montagnes lointaines paraissent bleus ou que le Soleil paraît rouge au coucher et au lever. (Le ciel paraît noir même pendant le jour sur la Lune.) Vous pouvez reproduire cet effet en regardant à travers de l'eau devant une surface noire ou une ampoule. En ajoutant quelques gouttes de lait dans l'eau, on observe que la lampe devient jaune puis rouge, et que la surface noire devient bleue (comme le ciel vu depuis la Terre en comparaison du ciel observé depuis la Lune), comme l'indique la Figure 61. Plus on ajoute de lait, plus l'effet augmente. Pour cette même raison, les couchers du soleil sont particulièrement rouges après les éruptions volcaniques.

Pour éclaircir la différence qui existe entre les couleurs en physique et la couleur dans la perception humaine et dans le langage, une célèbre découverte linguistique mérite d'être mentionnée : les couleurs dans le langage humain possèdent un *ordre* naturel. Les couleurs sont ordonnées par tous les individus peuplant le monde, qu'ils soient issus de la mer, du désert ou des régions montagneuses, dans l'ordre suivant : 1. noir et blanc, 2. rouge, 3. vert et jaune, 4. bleu, 5. marron, 6. mauve, rose, orange, gris et parfois un douzième terme qui diffère d'une langue à l'autre. (Les couleurs qui se réfèrent à des objets, telles que aubergine ou sépia, ou les couleurs qui ne sont pas applicables de manière générale, telles que blond, sont exclues de cette discussion.) Cette découverte précise est la suivante : si une langue particulière possède un mot pour désigner n'importe laquelle de ces couleurs, alors elle possède aussi un mot pour désigner toutes celles qui précèdent. Ce résultat implique également que les gens emploient ces catégories de couleurs élémentaires même si leur langue *ne* contient *pas* un mot pour chacune d'entre elles. Ces affirmations profondes ont été confirmées pour plus de cent langues.

Réf. 65

JOUONS AVEC LES ARCS-EN-CIEL

La largeur courante de l'arc-en-ciel primaire est de $2,25^\circ$, pour l'arc-en-ciel secondaire elle est du double environ de cette valeur (ce qui explique pourquoi il est moins

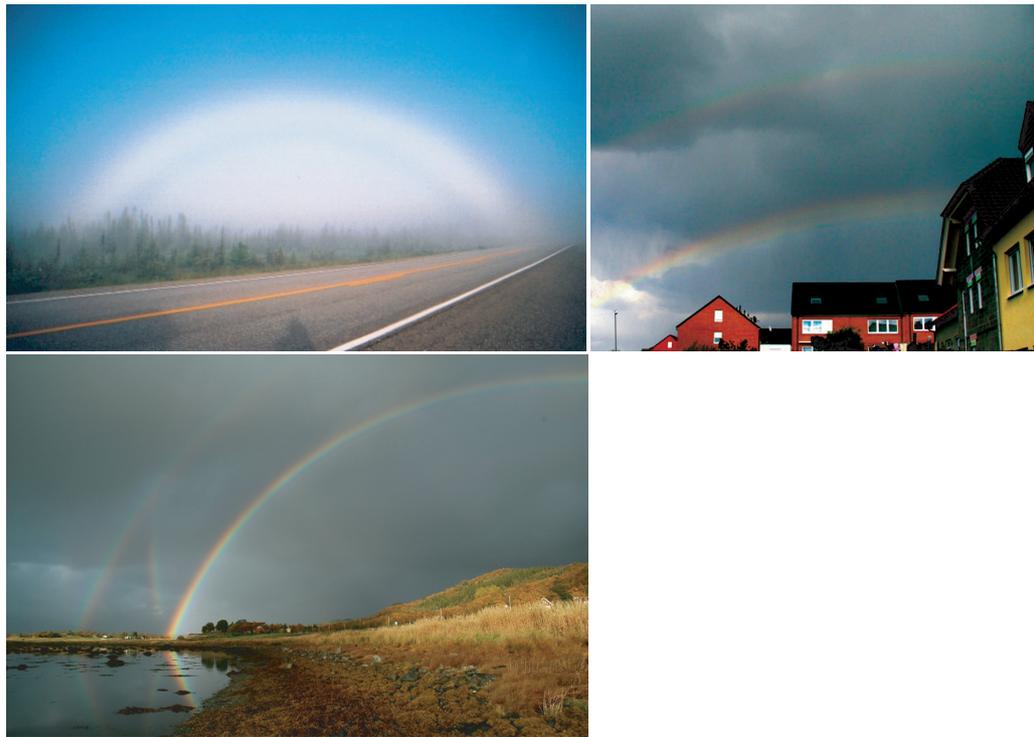


FIGURE 62 Un arc blanc (en haut à gauche), un rare arc-en-ciel fendu irrégulier dans une situation venteuse (en haut à droite, montré avec une augmentation de la saturation en couleur), et un arc-en-ciel à six bras. (© Michel Tournay, Eva Seidenfaden et Terje Nordvik)

brillant). La largeur est plus importante que l'écart en angle de dispersion donné sur la [Figure 59](#) parce que la taille angulaire du Soleil, environ $0,5^\circ$, doit (approximativement) être ajoutée en plus de la différence d'angle.

Si les gouttelettes sont très fines, l'arc-en-ciel devient blanc : il est alors appelé un *arc blanc*. De tels arcs sont fréquemment aperçus depuis les avions. Si les gouttelettes ne sont pas rondes, par exemple à cause d'un vent fort, nous pouvons obtenir ce que nous appelons un *arc-en-ciel irrégulier* ou *apparié*. Un exemplaire en est montré sur la [Figure 62](#).

La lumière issue de l'arc-en-ciel est polarisée de façon tangentielle. Vous pouvez facilement le vérifier avec des lunettes de soleil polarisantes. Pendant la réflexion à l'intérieur des gouttelettes d'eau, puisque l'angle de réflexion est très proche de l'angle par lequel la réflexion totale se produit, la lumière devient polarisée. (Pourquoi cela conduit-il à la polarisation ?) Nous en dirons plus sur la polarisation dans la prochaine section.

Si l'air est saturé en cristaux de glace au lieu de gouttelettes, la situation change radicalement, une nouvelle fois. Nous pouvons alors avoir des images supplémentaires du Soleil dans sa direction. Nous appelons chacune de ces images un *parhélie* (ou « faux soleil » ou « soleil double », ou « œil de bouc » dans l'Ouest canadien, ou encore « sundog » – chien du soleil – en anglais). Cela se produit de manière flagrante lorsqu'il n'y a pas de vent, si les cristaux sont tous orientés dans la même direction. Dans ce cas, nous pouvons prendre des photographies telles que celle de la [Figure 63](#).

Défi 127 e

Défi 128 pe



FIGURE 63 Une photographie composite qui montre les parhélies, les colonnes lumineuses, le halo et l'arc tangent supérieur formés par les cristaux de glace dans l'air, s'ils sont tous orientés dans la même direction. (© Phil Appleton)

QUELLE EST LA VITESSE DE LA LUMIÈRE ? – RÉTROSPECTIVE

Page ??

La physique parle du mouvement. Nous pouvons converser grâce à un échange sonore, et le son est un exemple de signal. Un *signal (physique)* représente l'acheminement de l'information en utilisant le transport de l'énergie. Il n'y a aucun signal sans un mouvement énergétique. En réalité, il n'existe aucune méthode pour stocker de l'information sans emmagasiner de l'énergie. Nous pouvons donc attribuer à n'importe quel signal une vitesse de propagation. La vitesse de signal la plus élevée possible est également la vitesse maximale des actions générales à distance, ou, pour employer un langage plus approximatif, la vitesse maximale avec laquelle les effets émanent des causes.

Si le signal est transporté par de la matière, comme un texte écrit dans une lettre, la vitesse du signal est alors égale à la vitesse du messenger matériel, et les expériences montrent qu'elle est limitée par la vitesse de la lumière.

Pour un transport ondulatoire, tels les vagues sur l'eau, le son, la lumière ou les ondes radio, la situation est moins évidente. Quelle est la vitesse d'une onde ? La première réponse qui vient à l'esprit est la vitesse à laquelle les crêtes d'une onde sinusoïdale se déplacent. Cette *vitesse de phase*, que nous avons déjà introduite, est donnée par le rapport entre la fréquence et la longueur d'onde d'une onde monochromatique, c'est-à-dire par

$$v_{\text{ph}} = \frac{\omega}{k} . \quad (54)$$

Défi 129 s

Par exemple, la vitesse de phase détermine les phénomènes relatifs aux interférences. La lumière dans le vide possède la même vitesse de phase $v_{\text{ph}} = c$ pour toutes les fréquences. Êtes-vous capable d'imaginer une expérience permettant de tester cela avec une grande précision ?

Réf. 66

D'autre part, il existe des situations où la vitesse de phase est plus importante que c , plus particulièrement lorsque la lumière voyage dans une substance absorbante et qu'au même moment sa fréquence est située près d'un maximum d'absorption. Dans ces cas, les expériences montrent que la vitesse de phase *n'est pas* identique à la vitesse du signal. Pour de telles situations, une meilleure approximation de cette vitesse de signal est représentée par la *vitesse de groupe*, c'est-à-dire la vitesse à laquelle voyagera le maximum des

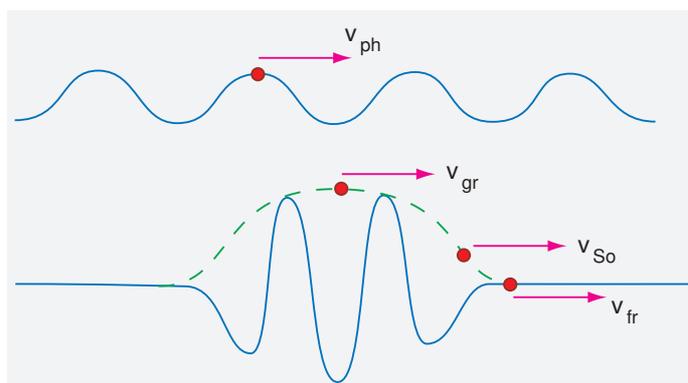


FIGURE 64 Définition des vitesses importantes dans les phénomènes ondulatoires.

groupes d'ondes. Cette vitesse est donnée par

$$v_{gr} = \left. \frac{d\omega}{dk} \right|_{k_0}, \quad (55)$$

où k_0 représente la longueur d'onde centrale du paquet d'ondes. Nous observons alors que $\omega = c(k)k = 2\pi\nu_{ph}/\lambda$ implique la relation

$$v_{gr} = \left. \frac{d\omega}{dk} \right|_{k_0} = v_{ph} - \lambda \frac{dv_{ph}}{d\lambda}. \quad (56)$$

Cela signifie que le signe du dernier terme détermine si la vitesse de groupe est plus grande ou plus petite que la vitesse de phase. Pour un groupe d'ondes qui avance, comme indiqué par les lignes en pointillé de la Figure 64, cela corrobore le fait que des nouveaux maxima surgissent soit à la fin, soit à l'avant du groupe. Les expériences révèlent que cela n'est valable que pour de la lumière *traversant la matière*. Pour la lumière *dans le vide*, la vitesse de groupe possède la valeur identique $v_{gr} = c$ pour toutes les valeurs du vecteur d'onde k .

Vous devez être avertis que de nombreuses publications diffusent toujours l'affirmation incorrecte que la vitesse de groupe *dans un matériau* n'est jamais supérieure à c , la vitesse de la lumière dans le vide. En réalité, la vitesse de groupe dans la matière peut être nulle, infinie, voire négative, ce qui se produit lorsque l'impulsion lumineuse est extrêmement courte, c'est-à-dire lorsqu'elle incorpore une grande variété de fréquences, ou encore lorsque la fréquence est proche d'une transition d'absorption. Dans de nombreuses situations (mais pas toutes), on remarque que le groupe d'ondes s'élargit substantiellement ou même se divise, ce qui rend ardu le fait de définir précisément le maximum du groupe et ainsi sa vitesse. Un grand nombre d'expériences ont confirmé ces prédictions. Par exemple, la vitesse de groupe dans certains matériaux a été mesurée comme étant égale à *dix fois* celle de la lumière. L'indice de réfraction est alors plus petit que 1. Néanmoins, dans toutes ces occasions, la vitesse de groupe *n'est pas* identique à la vitesse de signal*.

Défi 130 pe

Réf. 67

* En mécanique quantique, Schrödinger démontra que la vitesse d'un électron est donnée par la vitesse de

Quelle est alors la meilleure vitesse qui décrit la propagation du signal ? Le physicien allemand Arnold Sommerfeld* résolut presque entièrement ce problème majeur au début du vingtième siècle. Il définit la vitesse de signal comme étant la vitesse v_{s_0} de la pente frontale de l'impulsion, comme indiqué sur la Figure 64. La définition ne peut pas être synthétisée dans une formule, mais elle doit avoir la propriété de bien décrire la propagation du signal pour pratiquement toutes les expériences, en particulier celles dans lesquelles les vitesses de groupe et de phase sont plus grandes que la vitesse de la lumière. En étudiant ses propriétés, nous avons constaté qu'il n'existe aucun matériau pour lequel la vitesse de signal de Sommerfeld est plus grande que la vitesse de la lumière dans le vide.

Réf. 66

Parfois, il est conceptuellement plus facile de décrire la propagation du signal à l'aide de la vitesse de l'énergie. Comme nous l'avons mentionné auparavant, chaque signal transporte de l'énergie. La *vitesse de l'énergie* v_{en} est définie comme étant le rapport entre la densité du flux de puissance \mathbf{P} , c'est-à-dire le vecteur de Poynting, et la densité d'énergie W , considérées toutes les deux dans la direction de propagation. Pour des champs électromagnétiques – les seuls suffisamment rapides pour être intéressants pour d'éventuels signaux supraluminiques – ce rapport est

$$v_{en} = \frac{\text{Re}(\mathbf{P})}{W} = \frac{2c^2 \mathbf{E} \wedge \mathbf{B}}{\mathbf{E}^2 + c^2 \mathbf{B}^2}. \quad (57)$$

Cependant, comme dans le cas de la vitesse frontale, pour la vitesse de l'énergie nous devons préciser si nous sous-entendons que l'énergie est transportée par l'impulsion principale ou par le front de celle-ci. Dans le vide, absolument rien n'est plus grand que la vitesse de la lumière**. (En général, la vitesse de l'énergie dans la matière possède une valeur légèrement différente de la vitesse de signal de Sommerfeld.)

Réf. 66

Au cours de ces dernières années, les progrès dans la technologie des détecteurs de lumière, qui nous permettent de débusquer même les énergies les plus ténues, ont obligé les scientifiques à considérer les plus rapides de toutes ces vitesses énergétiques pour décrire la vitesse de signal. En tirant profit des détecteurs ayant la sensibilité la plus élevée possible, nous pouvons utiliser comme signal le premier point du train d'ondes dont l'amplitude est différente de zéro, c'est-à-dire la première quantité minuscule d'énergie qui s'approche. La vitesse de ce point, conceptuellement similaire à la vitesse de signal de Sommerfeld, est communément appelée la *vitesse de front* ou, pour la distinguer encore plus nettement de la situation de Sommerfeld, la *vitesse précurseur*. Elle est simplement

groupe de sa fonction d'onde. Par conséquent, la même discussion resurgit en théorie quantique, comme nous le découvrirons dans la prochaine partie de notre ascension montagnaise.

* Arnold Sommerfeld (n. Königsberg 1868, d. Munich 1951) joua un rôle central dans l'extension de la relativité restreinte et générale, de la théorie quantique, et de leurs applications. Professeur à Munich, excellent enseignant et auteur d'ouvrages, il travailla sur la théorie atomique, sur la théorie des métaux et sur l'électrodynamique. Il fut le premier à saisir l'importance et le mystère régnant autour de la « célèbre constante de structure fine de Sommerfeld ».

** Les signaux ne transportent pas seulement de l'énergie, ils emportent également une entropie négative (l'« information »). L'entropie d'un émetteur s'accroît pendant la transmission. Le récepteur voit son entropie diminuer (mais moins que l'augmentation de l'émetteur, bien évidemment).

Réf. 68

Réf. 69

Remarquez que la vitesse de groupe négative implique un transport d'énergie qui va à l'encontre de la vitesse de propagation de la lumière, ce qui est possible uniquement dans les matériaux *chargés en énergie*.

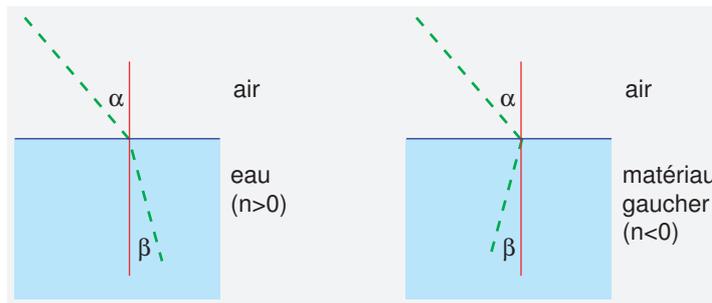


FIGURE 65 Indices de réfraction positif et négatif.

Défi 131 s donnée par

$$v_{\text{fr}} = \lim_{\omega \rightarrow \infty} \frac{\omega}{k}. \quad (58)$$

La vitesse précurseur n'est *jamais* plus grande que la vitesse de la lumière dans un espace vide, de même que dans la matière. En fait, elle est précisément égale à c parce que, pour des fréquences extrêmement élevées, le rapport ω/k est indépendant du matériau, et les propriétés relatives au vide l'emportent. La vitesse précurseur est la véritable vitesse de signal ou la *véritable vitesse de la lumière*. En l'utilisant, toutes les discussions sur la vitesse de la lumière deviennent claires et univoques.

Défi 132 s Pour achever cette section, voici deux défis pour vous. Laquelle de toutes les vitesses de la lumière est-elle mesurée dans les expériences qui déterminent celle-ci, par exemple quand la lumière est envoyée sur la Lune et réfléchi vers l'expéditeur ? Et maintenant un autre plus difficile : pourquoi la vitesse de signal de la lumière est-elle plus faible à l'intérieur de la matière, comme le montrent toutes les expériences ?

Défi 133 s

200 ANS TROP TARD – INDICES DE RÉFRACTION NÉGATIFS

En 1968, le physicien soviétique Victor Veselago fit une étrange prédiction : l'indice de réfraction pourrait avoir des valeurs *négatives* sans invalider une quelconque loi connue de la physique. Un indice négatif signifie qu'un rayon est réfracté du même côté que le rayon incident, comme indiqué sur la Figure 65. Par conséquent, des lentilles concaves faites avec ces matériaux focalisent les rayons parallèles et les lentilles convexes les font diverger, contrairement aux matériaux communs utilisés pour les lentilles.

Réf. 70 En 1996, John Pendry et son équipe ont proposé des moyens de réaliser de tels matériaux. En 2000, une première confirmation expérimentale pour la réfraction micro-onde fut publiée, mais elle rencontra un fort scepticisme. En 2002, le débat battait son plein. On a argumenté que des indices de réfraction négatifs entraînent l'existence de vitesses supérieures à celle de la lumière et qu'ils ne sont possibles que pour une vitesse de phase ou une vitesse de groupe, mais pas pour la véritable vitesse de signal ou de l'énergie. Les problèmes conceptuels surgiraient uniquement parce, que dans certains systèmes physiques, les angles de réfraction pour le mouvement de la phase et pour le mouvement de l'énergie seraient différents.

Réf. 71 Entre-temps, des indices de réfraction négatifs ont été réellement observés à plusieurs reprises, les systèmes associés ayant été intensivement étudiés partout dans le monde. Les

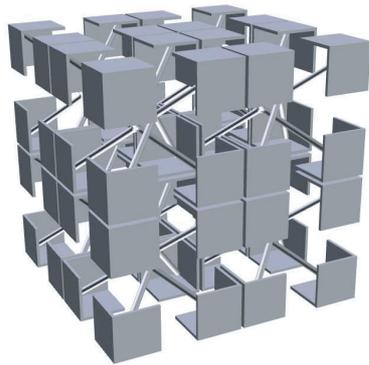


FIGURE 66 Un exemple de métamatériau isotrope. (M. Zedler et al., © 2007 IEEE)

systèmes dotés d'un indice de réfraction négatif existent réellement. Les matériaux exhibant cette propriété sont qualifiés de *gauchers*. La raison est que les vecteurs du champ électrique, du champ magnétique et le vecteur d'onde forment un triplet gaucher, au contraire du vide et de la plupart des matériaux courants, où le triplet est droitier. De tels matériaux possèdent en toute logique une perméabilité magnétique *négative* et un coefficient diélectrique (permittivité) *négatif*.

Réf. 72

Mis à part ces propriétés de réfraction inhabituelles, les matériaux gauchers ont des vitesses de phase négatives, c'est-à-dire une vitesse de phase opposée à la vitesse de l'énergie. Ils révèlent aussi des effets Doppler inversés et produisent des angles obtus dans l'effet Vavilov-Çerenkov (en émettant un rayonnement Vavilov-Çerenkov vers l'arrière au lieu de la direction avant).

Réf. 73

Mais, de façon plus intrigante, on prévoit que les matériaux à réfraction négative permettent de concevoir des lentilles qui sont parfaitement plates. De surcroît, au cours de l'année 2000, John Pendry attira l'attention de toute la communauté mondiale des physiciens en prédisant que les lentilles faites avec ces matériaux, en particulier pour $n = -1$, seraient *parfaites*, surpassant ainsi la limite classique de la diffraction. Cela se produirait parce qu'une telle lentille reproduit également les parties évanescentes des ondes, en les amplifiant de manière appropriée. Les premières expériences semblent confirmer cette prédiction. Ce sujet reste encore largement débattu.

Réf. 72

Défi 134 pe

Pouvez-vous expliquer comment la réfraction négative se démarque de la diffraction ?

MÉTAMATÉRIAUX

La réalisation la plus simple de systèmes gauchers est représentée par les métamatériaux. Les *métamatériaux* (gauchers) sont des structures conçues en métal isolant qui sont gauchères pour une certaine étendue de longueurs d'onde, généralement dans le domaine radio ou micro-onde.

Réf. 74

Actuellement, il existe deux approches fondamentales pour réaliser des métamatériaux. La première consiste à construire un métamatériau à partir d'une vaste matrice de circuits (LC) résonants contenant une bobine et un condensateur. La deuxième approche consiste à les produire à partir de lignes de transmission résonantes. Cette dernière approche possède un meilleur rendement et une étendue spectrale plus large. Un exemple en est indiqué sur la Figure 66.

Réf. 75

La plupart des métamatériaux sont conçus pour le domaine micro-onde. On a récemment identifié des cristaux qui agissent comme des matériaux gauchers dans le domaine optique, bien que ce soit pour certaines fréquences seulement, et dans une seule dimension uniquement.

La recherche sur ce sujet est actuellement en pleine effervescence. Les applications industrielles des (méta-)matériaux gauchers sont attendues pour la conception des antennes : par exemple, le dipôle de l'antenne pourrait être situé juste au-dessus d'un métamatériau, permettant des antennes directionnelles plates. Les gens les plus irréalistes sont ceux qui affirment que des *manteaux d'invisibilité* peuvent être réalisés à l'aide de métamatériaux. Bien que cela constitue un excellent slogan marketing pour attirer des fonds, ce n'est pas réaliste à cause des pertes inévitables de signaux dans les matériaux, de la dispersion, de la taille finie des cellules, etc. Jusqu'ici, tous les avions qu'on a prétendu être invisibles pour certaines fréquences (radar) se sont révélés finalement être visibles. Mais les sources des financements militaires sont connues pour entretenir une relation distante avec la réalité.

SIGNAUX ET PRÉDICTIONS

Lorsqu'une personne lit un texte par téléphone à un voisin qui l'écoute et, éventuellement, le répète, nous parlons de communication. Pour toute tierce personne, la vitesse de la communication est toujours inférieure à la vitesse de la lumière. Mais si le voisin connaît déjà le texte, il peut le réciter sans avoir entendu la voix du lecteur. Pour le troisième observateur, une telle situation semble impliquer l'existence d'un mouvement qui est plus rapide que la lumière. La prédiction peut ainsi *imiter* la communication et, en particulier, elle peut imiter la communication plus rapide que la lumière (supraluminique). Une telle situation fut démontrée de la façon la plus spectaculaire en 1994 par Günter Nimtz, qui transportait apparemment de la musique – toute musique est prévisible sur des échelles de temps courtes – par le truchement d'un système « plus rapide que la lumière ». Pour faire la distinction entre les deux situations, nous remarquons que, dans le cas de la prédiction, aucun transport d'énergie n'a lieu, contrairement au cas de la communication. Autrement dit, la définition d'un signal comme étant un messenger de l'information n'est plus aussi fonctionnelle et précise que la définition du signal comme *transporteur d'énergie*. Dans l'expérience mentionnée ci-dessus, aucune énergie n'était transportée plus vite que la lumière. La même distinction entre la prédiction, d'une part, et la propagation du signal ou de l'énergie, d'autre part, sera utilisée plus tard pour éclair-

Réf. 76

TABLEAU 13 Propriétés expérimentales du vide (plat) et de l'« éther ».

PROPRIÉTÉ PHYSIQUE	VALEUR EXPÉRIMENTALE
perméabilité	$\mu_0 = 1,3 \mu\text{H/m}$
permittivité	$\epsilon_0 = 8,9 \text{pF/m}$
impédance/résistance d'onde	$Z_0 = 376,7 \Omega$
invariance conforme	s'applique
dimensionnalité spatiale	3
topologie	\mathbb{R}^3
contenu en masse et énergie	non décelable
frottement sur des corps mobiles	non décelable
mouvement par rapport à l'espace-temps	non décelable

cir certaines expériences célèbres en mécanique quantique.

« Si l'allure de la physique continue d'augmenter, les revues de physique rempliront bientôt les étagères des bibliothèques plus vite que la vitesse de la lumière. Cela ne violera pas la relativité puisque aucune information pertinente ne sera transmise. »

David Mermin

L'ÉTHER EXISTE-T-IL ?

Les rayons gamma, la lumière et les ondes radio sont des ondes électromagnétiques en mouvement. Ils existent tous dans l'espace vide. Qu'est-ce qui oscille lorsque la lumière voyage ? Maxwell appela lui-même *éther* le « milieu » dans lequel cela se produit. Les propriétés de l'éther mesurées dans les expériences sont listées dans le [Tableau 13](#).

Page 301
Réf. 77

Bien sûr, les valeurs de la perméabilité et de la permittivité du vide sont liées à la définition des unités henry et farad. Le dernier élément du tableau est le plus important : malgré des efforts considérables, personne n'a été capable de détecter un quelconque *mouvement* de l'éther. Autrement dit, bien que l'on suppose que l'éther oscille, il ne se déplace pas. Avec les autres données, tous ces résultats peuvent être résumés en une seule phrase : il n'existe aucune manière de distinguer l'éther du vide : ils représentent une seule et même entité.

Défi 135 s

Parfois, nous entendons dire que certaines expériences, ou même que la théorie de la relativité, montrent que l'éther n'existe pas. Cela n'est pas strictement vrai. En fait, les expériences montrent quelque chose de plus important. Tous les relevés indiquent que l'éther est indiscernable du vide. Effectivement, si nous utilisons la variation de la courbure comme représentant la définition du mouvement pour le vide, le vide *peut* bouger, comme nous l'avons découvert dans la section sur la relativité générale, mais l'éther demeure toujours impossible à dissocier de celui-ci*.

Réf. 78

* En réalité, le mot « éther » a été employé comme une expression décrivant plusieurs idées différentes, en fonction de leurs auteurs. En premier lieu, il fut utilisé pour représenter l'idée qu'un vide n'est pas vide, mais *plein* ; deuxièmement, que cette plénitude peut être décrite par des *modèles mécaniques*, tels que des

Plus tard, nous découvrirons même que l'aptitude du vide à permettre la propagation de la lumière et sa capacité à permettre la propagation des particules sont équivalentes : les deux requièrent les mêmes propriétés. Par conséquent, l'éther demeurera *indiscernable* du vide pour le reste de notre promenade. Autrement dit, l'éther est un concept superflu et nous l'omettrons dorénavant dans notre excursion. En dépit de ce résultat, nous n'avons pas encore achevé l'étude du vide, qui nous occupera encore longtemps, à commencer par le chapitre qui suit. Qui plus est, un bon nombre des aspects mentionnés dans le **Tableau 13** nécessiteront quelques corrections par la suite.

Réf. 78

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS CONCERNANT LA LUMIÈRE

Puisque la lumière est une onde, quelque chose doit se produire si elle est dirigée vers un trou de diamètre plus petit que sa longueur d'onde. Qu'est-ce qui se passe exactement ?

Défi 136 s

* *

L'électrodynamique montre que les faisceaux lumineux poussent toujours, ils ne tirent jamais. Pouvez-vous confirmer que les « rayons à traction » sont impossibles dans la nature ?

Défi 137 e

* *

Il est notoire que le matériau brillant situé dans les ampoules électriques est un fil de tungstène plongé dans un gaz inerte. Ce fut le résultat d'une série d'expériences qui commencèrent avec le grand-père de toutes les ampoules, à savoir le cornichon. Les générations anciennes savent qu'un cornichon, lorsqu'il est relié au réseau électrique à 230 V, brille avec une lueur verte éclatante. (Soyez prudents, l'expérience est salissante et quelque peu dangereuse.)

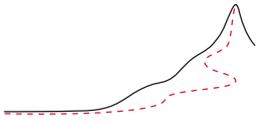
* *

Si la lumière émise par les phares des voitures était polarisée du bas à gauche vers le haut à droite (vue du siège du conducteur), nous pourrions considérablement améliorer la qualité de la conduite nocturne : nous pourrions ajouter un polariseur au pare-brise, orienté dans la même direction. Ainsi, un conducteur verrait la réflexion de sa propre lumière, mais la lumière provenant des véhicules en sens inverse serait significativement atténuée. Pourquoi cela n'est-il pas mis en place dans les véhicules modernes ?

Défi 138 pe



rouages, des petites sphères, des tourbillons, etc. ; troisièmement, on a imaginé qu'un vide est *similaire à la matière*, qu'il est constitué du même substrat. De manière intéressante, certains de ces problèmes resurgiront dans la dernière partie de notre ascension montagnaise.



CHAPITRE 4

LES IMAGES ET L'ŒIL – L'OPTIQUE

COMMENT DÉMONTRER QUE VOUS ÊTES SACRÉ

La réflexion de la lumière et la réfraction sont responsables de nombreux effets. Le symbole à l'origine indien de la sainteté, maintenant employé à travers la majeure partie du monde, est l'*auréole*, également appelée *halo* ou *Heiligenschein* (mot allemand signifiant « auréole » [N.D.T.]), un anneau de lumière surplombant la tête. Vous pouvez facilement l'observer autour de votre propre tête. Vous avez juste besoin de vous lever tôt le matin et de regarder l'herbe humide tout en tournant votre dos au Soleil. Vous verrez une auréole autour de votre ombre. Cet effet est dû à la rosée du matin située sur l'herbe, qui réfléchit la lumière vers l'arrière principalement dans la direction de la source lumineuse, comme esquissé sur la [Figure 67](#). Le jeu amusant est que si vous le faites en groupe, vous verrez l'auréole autour de *vo*tre tête seulement.

Réf. 79

La peinture rétro-réfléchissante fonctionne de la même manière : elle contient de minuscules billes de verre qui jouent le rôle de la rosée. Une large surface de peinture rétro-réfléchissante, un panneau de signalisation par exemple, peut également révéler votre auréole si la source de lumière est suffisamment éloignée. La « lueur » bien connue des yeux d'un chat la nuit est également due au même effet, elle est visible uniquement si vous regardez le chat avec une source de lumière située derrière vous. Par ailleurs, les catadioptrés (« Cat's-eyes » en anglais, ou « yeux de chat » [N.D.T.]) fonctionnent-ils comme les yeux d'un chat ?

Réf. 80

Défi 139 s

VOYONS-NOUS CE QUI EXISTE ?

Nous voyons parfois *moins* de choses qu'il n'y en a. Fermez votre œil gauche, observez le point blanc dans la [Figure 68](#), rapprochez lentement la page de votre œil, et faites attention à la ligne du milieu. À une distance d'environ 15 à 20 cm, cette ligne médiane paraîtra ininterrompue. Pourquoi ?

Défi 140 s

D'un autre côté, nous voyons parfois *plus* de choses qu'il n'y en a vraiment, comme les figures [69](#) et [70](#) l'indiquent. La première montre que des lignes parallèles peuvent paraître obliques, et la seconde montre ce que nous appelons une *grille de Hermann*, baptisée d'après son découvreur*. La grille de Hermann de la [Figure 70](#), révélée par Elke Lingelbach en 1995, est particulièrement saisissante. Des variantes de ces grilles sont dorénavant employées pour comprendre les mécanismes qui fondent la vision humaine. Par exemple, elles peuvent être utilisées pour déterminer combien de cellules sensibles

Réf. 81

* Ludimar Hermann (1838–1914) était un physiologiste suisse. Ses grilles sont souvent dénommées à tort « grilles de Hering » d'après celui qui rendit la découverte de Hermann célèbre.

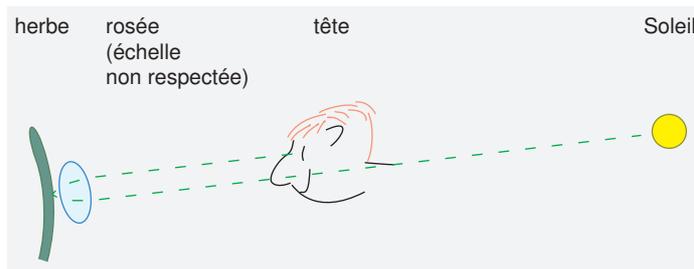


FIGURE 67 La trajectoire de la lumière pour la rosée sur l'herbe est responsable de l'aurole.



FIGURE 68 Une limitation de l'œil.

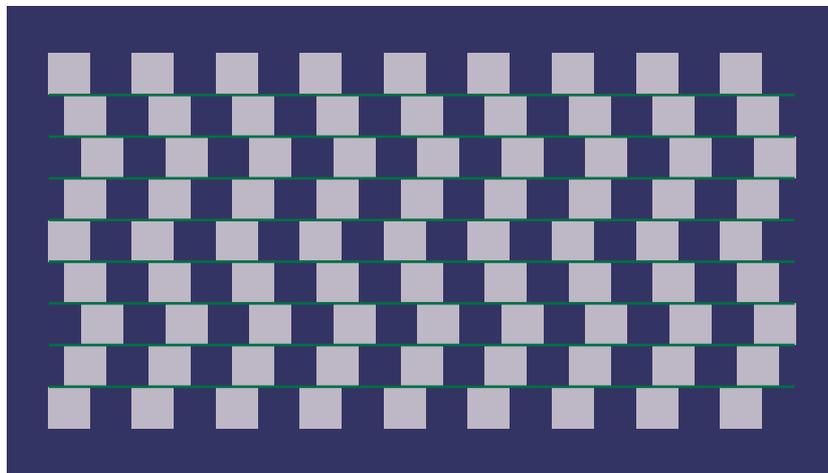


FIGURE 69 Quel est l'angle entre les lignes vertes adjacentes ?

à la lumière, dans la rétine, sont associées à une voie de transmission vers le cerveau. Les illusions sont dépendantes de l'angle parce que ce nombre est également variable en fonction de l'angle.

Nos yeux « voient » aussi des choses *différemment* : la rétine capte une image *inversée*

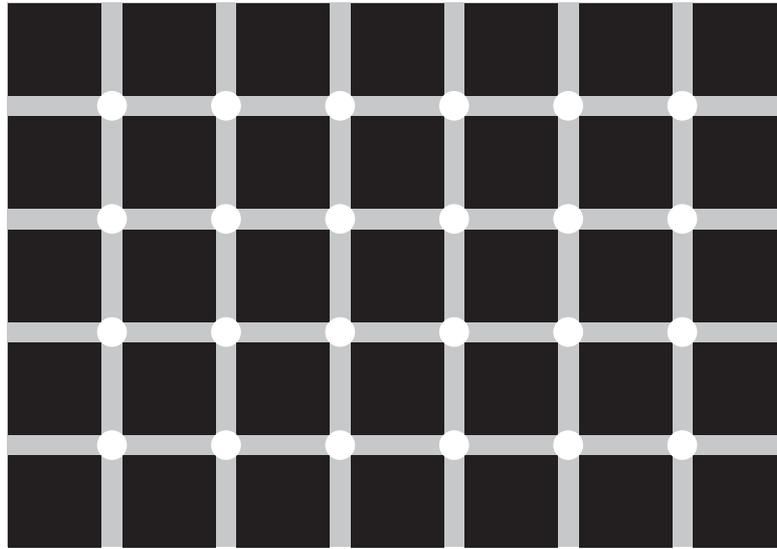


FIGURE 70 La grille de Lingelbach : voyez-vous des points blancs, gris ou noirs ?

du monde. Il existe une méthode élémentaire, due à Helmholtz, pour le montrer*. Vous avez juste besoin d'une aiguille et d'un morceau de papier, par exemple cette page de texte. Utilisez l'aiguille pour faire deux trous à l'intérieur de deux lettres « oo ». Laissez alors la page aussi près que possible de votre œil, regardez à travers les deux trous en direction du mur, en maintenant l'aiguille verticalement, quelques centimètres derrière la feuille. Vous verrez deux images de l'aiguille. Si vous recouvrez maintenant le trou de gauche avec votre doigt, l'aiguille de droite disparaîtra, et vice versa. Cette expérience montre que l'image située dans l'œil, sur la rétine, est inversée. Pouvez-vous parachever cette démonstration ?

Défi 141 pe

Deux autres expériences permettent de produire le même résultat. Si vous appuyez très légèrement vers l'intérieur de votre œil (faites attention !), vous verrez un point sombre apparaître à l'extérieur de votre champ de vision. Et si vous vous tenez dans une pièce obscure et que vous demandez à un ami de fixer une bougie allumée, scrutez son œil : vous verrez trois images réfléchies : deux à l'endroit, réfléchies par la cornée et le cristallin, et une troisième estompée, à l'envers, réfléchi par la rétine.

Une autre raison qui nous explique pourquoi nous ne percevons pas l'image complète de la nature est que nos yeux possèdent une sensibilité limitée. Cette sensibilité culmine à environ 560 nm. En dehors de l'étendue délimitée par le rouge et le violet, l'œil ne détecte pas de rayonnement. Nous apercevons donc une partie seulement de la nature.

* Lisez HERMANN VON HELMHOLTZ, *Handbuch der physiologischen Optik*, 1867. Ce célèbre classique est disponible en anglais sous le titre *Handbook of Physiological Optics*, Dover, 1962. Ce physicien, médecin et politicien prussien né sous le nom de Hermann Helmholtz (n. Potsdam 1821, d. Charlottenburg 1894) fut célèbre pour ses travaux sur l'optique, l'acoustique, l'électrodynamique, la thermodynamique, l'épistémologie et la géométrie. Il fonda plusieurs instituts de physique à travers l'Allemagne. Il fut l'un des premiers à avoir diffusé l'idée de la conservation de l'énergie. Son autre ouvrage majeur, *Die Lehre von den Tonempfindungen*, publié en 1863, pose les bases de l'acoustique et, en tant que manuel de référence, mérite toujours d'être lu.



FIGURE 71 Un exemple de photographie infrarouge, délicatement mixée avec une image colorée. (© Serge Augustin)



FIGURE 72 Comment l'aspect d'un tournesol change avec la longueur d'onde : comment il apparaît à l'œil humain, à quoi il devrait ressembler pour un oiseau, et comment il apparaît dans l'ultraviolet. (© Andrew Davidhazy)

Par exemple, des photographies infrarouges de la nature, telle celle représentée sur la [Figure 71](#), sont intéressantes parce qu'elles nous montrent quelque chose de différent de ce que nous percevons habituellement.

Réf. 82 Chaque spécialiste du mouvement devrait également savoir que la sensibilité de l'œil *ne* correspond *pas* à la partie la plus brillante de la lumière du soleil. Ce mythe a été diffusé tout autour du monde par un grand nombre de manuels qui ont été copiés les uns à partir des autres. Selon que nous utilisons la fréquence, la longueur d'onde ou le logarithme de la longueur d'onde, le spectre solaire culmine respectivement à 500 nm, 880 nm ou 720 nm. La sensibilité spectrale de l'œil humain, de même que la sensibilité complètement différente des oiseaux ou des grenouilles, est déterminée par les composés chimiques employés pour la détection. En bref, l'œil humain ne peut être appréhendé que par une analyse minutieuse de l'histoire de son évolution particulière.

Une rumeur, répandue par de nombreux médecins et sages-femmes à ce jour, précise

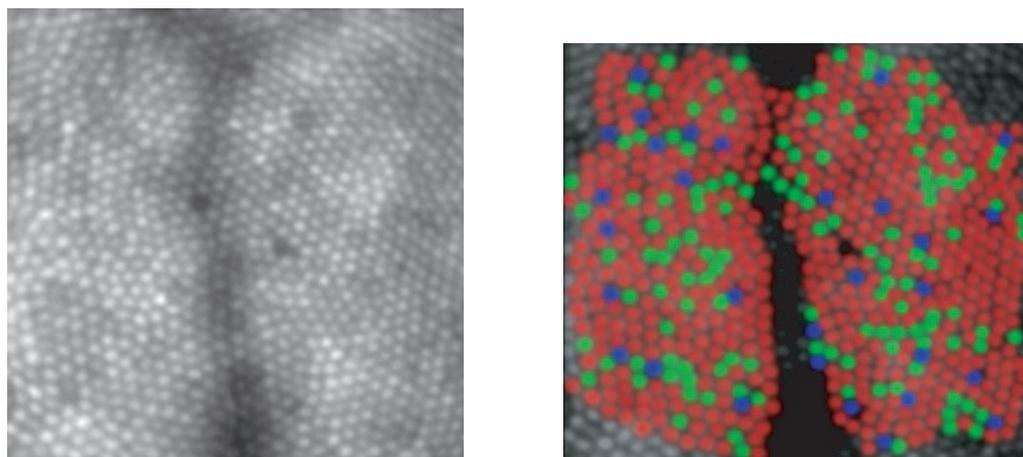


FIGURE 73 Une photographie en haute résolution d'une rétine humaine en vie, comprenant une indication mesurée (en fausses couleurs) de la sensibilité de chaque cône. (© Austin Roorda)

Défi 142 s

que les nouveau-nés voient tout à l'envers. Pouvez-vous expliquer pourquoi cette affirmation est fautive ?

En résumé, nous devons être prudents lorsque nous soutenons que voir signifie observer. Des exemples tels que ceux que nous venons de mentionner nous amènent à nous demander s'il existe d'autres limitations de nos facultés sensorielles qui seraient moins flagrantes. Et notre promenade en révélera en réalité plusieurs.

COMMENT PRODUISONS-NOUS DES IMAGES DE L'INTÉRIEUR DE L'ŒIL ?

Réf. 83

Les représentations les plus saisissantes réalisées jusqu'à présent concernant une rétine humaine *vivante*, telle celle de la **Figure 73**, furent effectuées par le groupe de David Williams et Austin Roorda de l'université de Rochester dans l'État de New York. Ils utilisèrent l'optique adaptative, une technique qui modifie la forme des lentilles qui produisent les images afin de compenser la variation de forme du cristallin de l'œil humain*.

Page 97

Les yeux perçoivent les couleurs en moyennant l'intensité parvenant aux cônes sensibles au rouge, au bleu et au vert. Cela explique la possibilité, mentionnée plus haut, de percevoir la même impression de couleur, par exemple du jaune, soit par le biais d'un rayon laser de jaune pur, soit par un mélange convenable de lumière rouge et verte.

Mais si la lumière est focalisée sur un cône seulement, l'œil fait des confusions. Si, en utilisant cette optique adaptative, un rayon laser rouge est focalisé de telle façon qu'il frappe un cône vert seulement, une chose étrange se produit : bien que la lumière soit *rouge*, l'œil voit une couleur *verte* !

Défi 143 s

Par ailleurs, la **Figure 73** est plutôt déconcertante. Dans l'œil humain, les vaisseaux sanguins sont situés *devant* les cônes. Pourquoi n'apparaissent-ils pas dans l'image ? Et pourquoi ne nous perturbent-ils pas dans la vie quotidienne ? (La figure ne montre pas

* La nature utilise une autre astuce pour obtenir la résolution maximale : l'œil exécute continuellement des petits mouvements, appelés *micronystagmus*. Il oscille sans cesse autour de la direction de la vision à une fréquence d'environ 40 à 50 Hz. De surcroît, ce mouvement est également mis à profit pour permettre aux cellules de la rétine de se recharger.

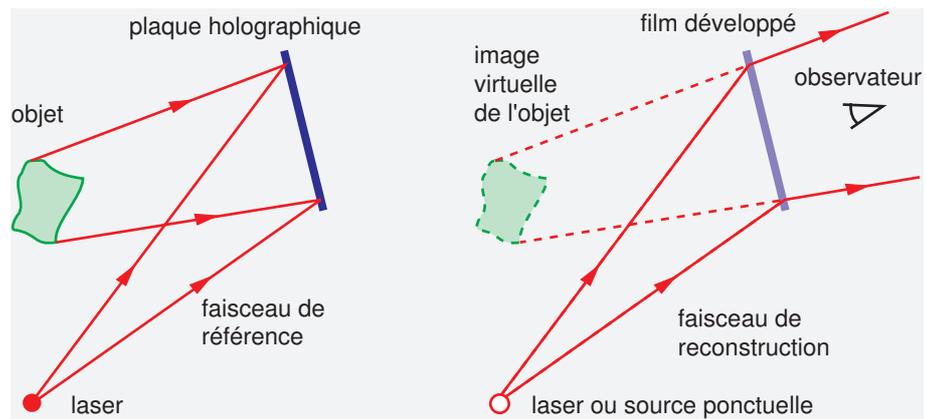


FIGURE 74 L'enregistrement et l'observation d'un hologramme.

l'autre type de cellules sensibles à la lumière, les *bâtonnets*, parce que le sujet était plongé dans la lumière ambiante. Les bâtonnets ne font surface sur la rétine que dans l'obscurité, et ils produisent alors des images en noir et blanc.)

De tous les mammifères, seuls les primates peuvent percevoir les *couleurs*. Les taureaux, par exemple, ne le peuvent pas ; ils ne peuvent pas distinguer le rouge du bleu. Par ailleurs, les meilleurs percepteurs des couleurs parmi tous sont les oiseaux. Ils possèdent des récepteurs coniques pour le rouge, le bleu, le vert, l'UV et, selon le volatile, pour jusqu'à trois ensembles supplémentaires de couleurs. Un certain nombre d'oiseaux (mais ils ne sont pas nombreux) possèdent également une meilleure résolution oculaire que les humains. Plusieurs volatiles ont aussi une résolution temporelle plus élevée : les hommes perçoivent un mouvement continu lorsque les images se déroulent à une vitesse allant de 30 à 70 Hz (selon le contenu du film), certains insectes peuvent distinguer des images jusqu'à 300 Hz.

COMMENT RÉALISONS-NOUS DES HOLOGRAMMES ET AUTRES IMAGES TRIDIMENSIONNELLES ?

Notre sens de la vue nous donne l'impression de profondeur principalement à cause de trois effets. Premièrement, les deux yeux perçoivent des images différentes. Deuxièmement, les images formées dans les yeux dépendent de la position. Troisièmement, notre œil a besoin de se focaliser différemment pour des distances différentes.

Une simple photographie ne reproduit aucun de ces trois effets. Une photographie correspond à l'image prise par un seul œil, à partir d'un emplacement particulier et pour une focalisation particulière. En fait, tous les appareils photo sont essentiellement des imitations d'un œil statique unique.

N'importe quel système cherchant à reproduire la perception de la profondeur doit inclure au moins l'un des trois effets mentionnés ci-dessus. Dans tous les systèmes existants, le troisième effet, le plus ténu, la variation du point focal avec la distance, n'est jamais utilisé parce qu'il est trop faible. Les systèmes de photographie stéréo et de réalité virtuelle utilisent intensivement le premier effet, en envoyant deux images distinctes aux yeux. Certaines cartes postales et écrans d'ordinateurs aussi sont recouverts par de minces lentilles cylindriques qui nous permettent d'envoyer deux images différentes aux

deux yeux, engendrant ainsi la même impression de perspective.

Mais évidemment, l'effet le plus spectaculaire est obtenu à chaque fois que des images qui dépendent de la position peuvent être engendrées. Certains systèmes de réalité virtuelle imitent cet effet en utilisant un capteur fixé sur la tête, et en créant des images générées par ordinateur qui varient selon cette position. Néanmoins, de tels systèmes ne sont pas capables de reproduire des situations réelles, et ainsi s'inclinent lorsqu'ils sont comparés à l'impression produite par des hologrammes.

Les hologrammes reproduisent tout ce qui est perçu à partir de n'importe quel point d'une région de l'espace. Un *hologramme* est donc un ensemble mémorisé d'images d'un objet dépendantes de la position. Il est produit en stockant l'amplitude *et la phase* de la lumière émise par cet objet. Pour y parvenir, l'objet est éclairé avec une source lumineuse *cohérente*, comme un laser, et le motif d'interférences est mémorisé. En éclairant le film photographique développé avec une source lumineuse cohérente, nous pouvons alors voir une image entièrement tridimensionnelle. En particulier, à cause de la reproduction de la position, l'image semble flotter librement dans l'espace. Les hologrammes furent développés en 1947 par le physicien hongrois Dennis Gabor (1900–1979), qui reçut le prix Nobel de physique en 1971 pour son travail.

Les hologrammes peuvent être mis en œuvre pour fonctionner en réflexion ou en transmission. Les hologrammes les plus simples utilisent une seule longueur d'onde. La plupart des hologrammes multicolores sont des hologrammes arc-en-ciel, qui exhibent des fausses couleurs sans rapport avec les objets d'origine. Les véritables hologrammes multicolores, constitués de trois lasers différents, sont rares mais réalisables.

Est-il possible de réaliser des hologrammes *en mouvement* ? Oui, mais les dispositifs techniques demeurent toujours extrêmement coûteux. Pour l'instant, il n'en existe que dans quelques laboratoires seulement et ils coûtent des millions d'euros. Par ailleurs, pouvez-vous définir comment vous distingueriez un hologramme mobile d'un corps réel si jamais vous en rencontriez un par hasard, sans le toucher ?

Défi 145 s

IMAGERIE OPTIQUE

La production d'images constitue une activité importante de notre société moderne. La qualité des images dépend de l'usage intelligent qui est fait de l'optique, de l'électronique, de l'informatique et des sciences de la matière. En dépit d'une longue expérience dans ce domaine, il y a toujours de nouveaux résultats dans ce champ d'investigations. Les images, c'est-à-dire les reproductions bi ou tridimensionnelles, peuvent être prises par le biais d'au moins six groupes de techniques :

- La *photographie*, qui utilise une source lumineuse, des lentilles et une pellicule ou un autre détecteur de surface assez large. Elle peut être utilisée en réflexion, en transmission, avec une dépendance en phase, avec diverses intensités lumineuses, avec des détecteurs sensibles à diverses longueurs d'onde et de nombreuses autres façons.
- La *microscopie optique* utilise une source lumineuse, des lentilles et un film (ou un autre détecteur de surface assez large). Si l'illumination se produit à travers l'échantillon (c'est-à-dire que l'échantillon est éclairé par-dessous et observé par-dessus [N.D.T.]), en transmission, nous parlons de *microscopie en champ clair* (des variantes utilisent des filtres de couleurs ou polarisants). Si l'illumination est latérale, nous par-

lons de *microscopie oblique*. Si l'illumination est confinée à un anneau extérieur de lumière, nous parlons de *microscopie en champ sombre*. Un système d'illumination encore plus élaboré, utilisant des ondes planes, permet la *microscopie à contraste de phase*. (Inventée par Frits Zernike dans les années 1930, elle lui permit de recevoir le prix Nobel de physique en 1953.) Si nous séparons un faisceau polarisé d'illumination en deux composantes qui traversent l'échantillon en des emplacements proches (mais pas identiques), puis que nous les recombinaons par la suite, nous parlons de *microscopie à contraste d'interférence différentielle*. Si un échantillon est traité avec une teinture fluorescente, la lumière issue du faisceau éclairant est filtrée, et seule la fluorescence est observée, nous parlons de *microscopie à fluorescence*. La qualité des images des microscopes onéreux peut être encore améliorée à l'aide d'un ordinateur, par des techniques de déconvolution.

- L'*holographie*, qui emploie des lasers et des détecteurs de surface assez large, comme expliqué dans la section précédente. L'holographie permet de prendre des images tridimensionnelles des objets. Elle est généralement utilisée en réflexion, mais peut également être utilisée en transmission.
- Les *techniques de balayage* construisent des images point par point par le biais du mouvement du détecteur, de la source lumineuse ou des deux. Il existe également plusieurs techniques de microscopie à balayage : la *microscopie confocale à balayage laser*, la *microscopie en champ proche à balayage optique* basée sur l'utilisation de fibres, et des combinaisons de celles-ci avec les techniques de fluorescence ou diverses techniques de déconvolution. Nombre de ces techniques de microscopie à balayage permettent d'atteindre des résolutions beaucoup plus fines que la longueur d'onde de la lumière, ce qui est impossible avec la microscopie optique classique.
- La *tomographie*, généralement réalisée en transmission, utilise une source et une rangée de détecteurs qui tournent toutes les deux autour d'un objet. Cela permet de produire des images des coupes transversales des matériaux.
- La *télescopie* est utilisée principalement en géodésie et en astronomie. Les télescopes astronomiques les plus perfectionnés peuvent corriger les images stellaires des effets dus à la turbulence de l'atmosphère, ils peuvent aussi prendre des images à diverses longueurs d'onde, recouvrant les fréquences radio, infrarouge, visible, ultraviolet et les rayons X. Les télescopes à rayons X doivent être utilisés en dehors de l'atmosphère, pour éviter l'absorption de l'air, sur des fusées, des satellites ou des ballons atmosphériques, par exemple.

Dans toutes ces méthodes, la course est dans l'obtention d'images ayant la plus haute résolution possible. Les techniques de production d'images ayant une résolution *inférieure* à la longueur d'onde de la lumière ont connu un grand essor ces dernières années.

Une technique récente, appelée *microscopie à déplétion par émission stimulée* (STED), permet d'obtenir des largeurs de point de taille moléculaire. La limite conventionnelle sur la diffraction pour les microscopes est

$$d \geq \frac{\lambda}{2n \sin \alpha}, \quad (59)$$

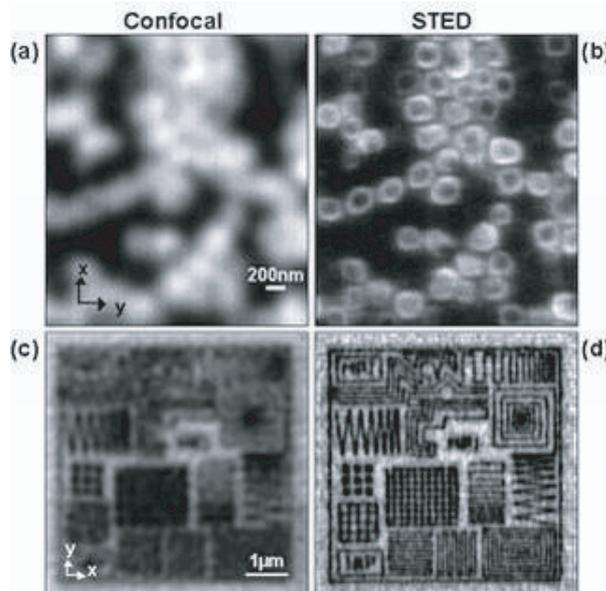


FIGURE 75 Microscopie optique sous-longueur d'onde utilisant la déplétion par émission stimulée (droite) comparée à la microscopie confocale conventionnelle (gauche). (© MPI für biophysikalische Chemie/Stefan Hell)

où λ est la longueur d'onde, n l'indice de réfraction et α représente l'angle d'observation. Cette nouvelle technique, un type particulier de microscopie à fluorescence développé par Stefan Hell, transforme cette expression en

$$d \geq \frac{\lambda}{2n \sin \alpha \sqrt{I/I_{\text{sat}}}}, \quad (60)$$

de telle sorte qu'une intensité de saturation convenablement choisie nous permet de réduire la limite sur la diffraction à des valeurs arbitrairement basses. Aujourd'hui, la microscopie optique avec une résolution de 16 nm a été réalisée, comme l'indique la [Figure 75](#). Elle devrait, avec des techniques analogues, devenir banale dans un avenir proche.

Réf. 84

POURQUOI POUVONS-NOUS NOUS VOIR ?

Les physiciens font un usage bien curieux du terme « noir ». La plupart des corps à la température à laquelle ils sont chauffés au rouge, ou même encore plus chauds, constituent d'excellentes approximations de corps noirs. Par exemple, le tungstène des ampoules électriques à incandescence, à environ 2 000 K, émet un rayonnement de corps noir pratiquement pur. Toutefois, le verre absorbe dans ce cas une grande partie des composantes ultraviolette et infrarouge. Les corps noirs sont également utilisés pour définir la couleur *blanche*. Ce que nous appelons communément le blanc parfait correspond à la couleur émise par un corps noir de 6 500 K, à savoir le Soleil. Cette définition est employée à travers le monde entier, par exemple par la Commission internationale de l'éclairage. Des corps noirs plus ardents sont bleuâtres, des corps plus froids sont jaunes,

Réf. 136

orange ou rouges*. Les astres qui brillent dans le ciel sont catalogués de cette manière, comme résumé à la page 185.

Faisons un rapide tour d'horizon du rayonnement de corps noir. Celui-ci possède deux propriétés importantes : premièrement, la puissance lumineuse émise augmente avec la puissance quatrième de la température. Avec cette seule relation, vous pouvez vérifier la valeur de la température du Soleil, citée ci-dessus, simplement en comparant sa taille avec la largeur de votre pouce quand votre bras est tendu devant vous. Êtes-vous capable de le faire ? (Astuce : utilisez l'excellente approximation que la température moyenne terrestre, d'environ 14,0°C, est due à l'exposition au Soleil.)

Défi 146 d
Réf. 137

L'expression explicite pour la densité d'énergie émise u par fréquence ν peut être déduite de la loi du rayonnement pour les corps noirs, découverte par Max Planck**

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} . \tag{61}$$

Il fit cette découverte majeure, que nous discuterons plus en détail dans la partie quantique de notre ascension montagnaise, simplement en comparant cette courbe avec l'expérience. Il apparaît que la nouvelle constante h , le *quantum d'action* ou la *constante de Planck*, possède la valeur de $6,6 \cdot 10^{-34}$ Js, et est cruciale pour toute la théorie quantique, comme nous le verrons. L'autre constante que Planck introduisit, la constante de Boltzmann k , apparaît comme un facteur préliminaire de la température dans toute la thermodynamique et agit comme une unité de conversion entre la température et l'énergie.

Page ??

Défi 147 pe

La loi du rayonnement donne, pour la densité d'énergie émise totale, l'expression

$$u(T) = T^4 \frac{8\pi^5 k^4}{15c^3 h^3} \tag{62}$$

Défi 148 pe

à partir de laquelle nous déduisons l'équation (70) en utilisant $I = uc/4$. (Pourquoi ?)

La deuxième propriété du rayonnement du corps noir concerne la valeur de la longueur d'onde de crête, c'est-à-dire la longueur d'onde émise avec l'intensité maximale. Celle-ci détermine sa couleur, et on déduit de l'équation (61) qu'elle vaut

Défi 149 pe

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{4,956 k T} = \frac{2,90 \text{ mm K}}{T} \quad \text{mais} \quad h\nu_{\max} = 2,82 kT/h = (5,9 \cdot 10^{10} \text{ Hz/K}) \cdot T . \tag{63}$$

* La majorité des corps ne sont pas noirs, parce que la couleur n'est pas seulement déterminée par l'émission, mais également par l'absorption de la lumière.

** Max Planck (1858–1947), professeur de physique à Berlin, fut une personnalité centrale en thermostatique. Il découvrit et baptisa la *constante de Boltzmann* k et le *quantum d'action* h , souvent dénommé constante de Planck. Son introduction de l'hypothèse quantique donna naissance à la théorie quantique. Il fit également connaître les travaux d'Einstein dans la communauté des physiciens, et plus tard lui trouva un emploi à Berlin. Il reçut le prix Nobel de physique en 1918. Importante figure dans les institutions scientifiques allemandes, il fut également l'une des très rares personnes qui eut le courage d'affronter Adolf Hitler *en face à face* et de lui signifier que l'idée d'incinérer les professeurs juifs était répugnante (il obtint un déchaînement de colère en guise de réponse). Très modeste, ayant connu de nombreuses tragédies dans sa vie personnelle, il était respecté par chaque personne qui le connaissait.

Chacune de ces expressions est dénommée *déplacement de couleur de Wien*, du nom de son inventeur*. La modification de la couleur avec la température est mise à profit dans les thermomètres optiques ; c'est également de cette manière que la température des astres est mesurée. Pour 37°C, la température du corps humain, elle donne un pic de longueur d'onde à 9,3 μm ou 115 THz, qui est par conséquent la couleur de la partie principale du rayonnement émis par chaque être humain. (Le pic en longueur d'onde ne correspond pas au pic en fréquence. Pourquoi ?) D'autre part, d'après la législation sur les télécommunications de nombreux pays, tout émetteur de rayonnement doit détenir une licence pour pouvoir fonctionner ; il s'ensuit en toute rigueur qu'en France seules les personnes décédées sont légales, et uniquement si leur corps est à la température du zéro absolu !

Défi 150 s

Remarquez qu'un corps noir ou une étoile peut être bleu, blanc, jaune, orange ou rouge. Il n'est jamais vert. Pouvez-vous expliquer pourquoi ?

Défi 151 pe

Nous avons stipulé plus haut que n'importe quel matériau constitué de charges émet du rayonnement. Êtes-vous capable de découvrir un argument simple montrant que le rayonnement thermique représente ou pas ce rayonnement, prédit de manière classique ?

Défi 152 pe

Mais revenons à la question du titre de cette section. L'existence du rayonnement thermique implique que tout corps chaud se refroidira, même s'il est entreposé dans le milieu le plus isolant qui existe, à savoir le vide. Plus précisément, si le vide est entouré d'une paroi, la température d'un corps situé dans le vide s'approchera graduellement de celle de la paroi.

De manière intéressante, lorsque les températures de la paroi et du corps à l'intérieur sont devenues identiques, quelque chose d'étrange se produit. Cet effet est difficile à vérifier chez soi, mais des photographies impressionnantes peuvent être trouvées dans la littérature.

Réf. 138

Une situation dans laquelle les parois et les objets situés à l'intérieur de celles-ci sont à la même température est celle du *four*. Il se révèle qu'il est *impossible* de voir des objets dans un four en utilisant la lumière provenant du rayonnement thermique. Par exemple, si un four et tout son contenu sont chauffés au rouge, prendre une photo de l'intérieur du four (sans flash !) ne révélera rien du tout. Il n'existe aucune variation de contraste ou de luminosité qui nous permette de distinguer les objets des parois ou de leur environnement. Pouvez-vous expliquer cette découverte ?

Défi 153 s

En bref, nous sommes capables de nous voir uniquement parce que les sources lumineuses que nous utilisons sont à des températures *différentes* de la nôtre. Nous pouvons nous voir seulement parce que nous *ne vivons pas* en équilibre thermique avec notre environnement.

LA LUMIÈRE COMME ARME ?

De nombreux pays affectent plus d'argent à l'étude de l'armement offensif qu'à l'accroissement du niveau d'éducation et de santé de leurs citoyens. Plusieurs types d'armes

* Wilhelm Wien (n. Fischhausen 1864, d. Munich 1928), physicien de Prusse orientale, reçut le prix Nobel de physique en 1911 pour la découverte de cette relation.

Remarquez que la valeur qui apparaît dans la règle de Wien peut seulement être calculée à partir de l'équation (61), mais ne peut pas être exprimée analytiquement. En réalité, la constante de Wien est solution de l'équation $x = 5(1 - e^{-x})$.

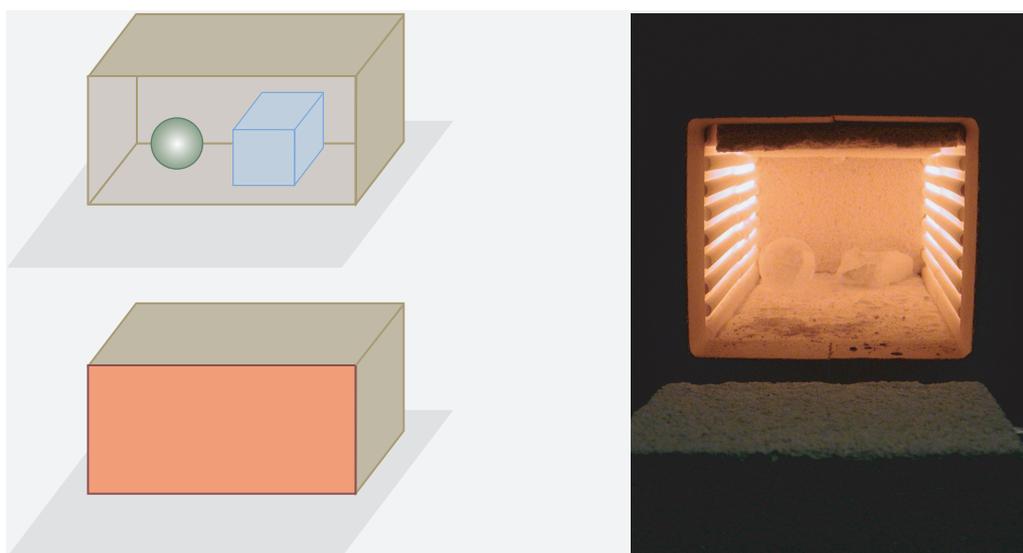


FIGURE 76 Des corps à l'intérieur d'un four à température ambiante n'ont pas la même couleur, contrairement aux corps à haute température. (© Wolfgang Rueckner)

d'assaut utilisant le rayonnement électromagnétique ont été étudiés. Deux d'entre eux sont particulièrement avancés.

La première arme est un camion doté d'une antenne parabolique orientable située sur son toit, d'une taille de 1 m environ, qui émet un faisceau micro-onde (95 GHz) de forte puissance (quelques kW). Celui-ci, comme tous les rayons micro-ondes, est invisible. En fonction de la puissance et de la forme du faisceau, il est douloureux voire meurtrier, jusqu'à une distance de 100 m. Ce dispositif terrible, avec lequel l'opérateur peut faire de très nombreuses victimes sans même se faire remarquer, était opérationnel en 2006. (Qui s'attend à ce qu'une antenne parabolique soit dangereuse ?) Des efforts pour l'interdire à travers le monde sont en train de gagner lentement du terrain.

La deuxième arme en cours de développement est dénommée *laser pulsé à impulsion mortelle*. L'idée consiste à prendre un laser qui émet du rayonnement qui ne soit pas absorbé par l'air, le brouillard ou des obstacles similaires. Un laser pulsé au fluorure de deutérium qui fonctionne à 3,5 μm en constitue un exemple. Ce laser brûle toute la matière qu'il rencontre. De surcroît, l'évaporation du plasma produit par la combustion engendre un fort impact, de telle sorte que les personnes frappées par ce laser sont heurtées et blessées en même temps. Par chance, il est toujours difficile de concevoir un tel dispositif suffisamment robuste pour un usage pratique. Mais les experts s'attendent à ce que des lasers de combat apparaissent bientôt. En bref, il est probable que des armes basées sur du rayonnement soient présentées dans les années à venir*.

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR L'ŒIL ET LES IMAGES

Réf. 89 L'herbe est généralement plus verte lorsqu'on la regarde à l'extérieur de la clôture.

* Ce qu'un homme travaillant sur ces développements raconte à ses enfants, lorsqu'il rentre le soir à la maison, n'est pas crédible.



FIGURE 77 Comment les couleurs naturelles (en haut) changent pour trois types de daltoniens : deutan, protan et tritan. (© Michael Douma)

Défi 154 s Pouvez-vous donner une explication, fondée sur des observations, concernant cette affirmation ?

* *

Défi 155 s On entend dire que les astronomes ont des télescopes si puissants qu'ils peuvent voir si quelqu'un craque une allumette sur la Lune. Cela peut-il être vrai ?

* *

Réf. 92 Lorsque deux rayons laser se croisent en formant un petit angle, ils peuvent engendrer des impulsions lumineuses qui semblent se déplacer plus vite que la lumière. Cela contredit-il la relativité restreinte ?

Défi 156 s

* *

Défi 157 pe Le daltonisme fut découvert par le grand scientifique anglais John Dalton (1766–1844) – sur lui-même. Pouvez-vous imaginer comment il s'en est aperçu ? Il affecte, toutes formes confondues, un homme sur vingt. Dans de nombreuses langues, un homme qui ne distingue pas certaines couleurs est dit *daltonien*. Les femmes ne sont presque jamais daltoniennes, puisque cette caractéristique est reliée aux défauts situés sur le chromosome X. Si vous êtes daltonien, vous pouvez savoir de quel type de daltonisme vous faites partie à l'aide de la **Figure 77**.

Réf. 94

* *

Les rayons lumineux, tels ceux émis par les lasers, sont généralement représentés sous forme de lignes. Toutefois, les rayons lumineux peuvent également être des *tubes*. Les rayons laser tubulaires, ou faisceaux de Bessel d'ordre supérieur, sont utilisés dans la recherche moderne pour guider des canaux plasma.

* *

Défi 158 s Est-il réellement possible de voir les étoiles depuis le fond d'un puits ou d'une fosse profonde, même pendant le jour, comme on l'affirme souvent ?

* *

Réf. 95 L'imagerie occupe une place prépondérante dans l'industrie moderne. Sans les imprimantes laser, les photocopieurs, les lecteurs CD, les lecteurs DVD, les microscopes, les appareils photo numériques, les caméscopes numériques, les machines lithographiques pour la production des circuits intégrés, les télescopes, les projecteurs vidéo, notre monde paraîtrait beaucoup plus ennuyeux. Et les spécialistes qui travaillent dans ce domaine fascinant ne sont pas assez nombreux dans le monde.

* *

Page 196 Les systèmes d'imagerie les plus simples sont les lunettes. Un enfant qui n'aurait pas les verres correcteurs appropriés pourrait manquer une expérience importante : la contemplation des étoiles. Ce serait une perte considérable : un tel enfant ne comprendrait pas le sens de la phrase d'Emmanuel Kant, citée ci-dessus : « Deux choses remplissent le cœur d'une admiration et d'une vénération toujours nouvelles et toujours croissantes, à mesure que la réflexion s'y attache et s'y applique : le ciel étoilé au-dessus de moi et la loi morale en moi. »

LES CHARGES SONT DISCRÈTES – LES LIMITES DE L'ÉLECTRODYNAMIQUE CLASSIQUE

Un des résultats les plus importants de la physique est le suivant : la *charge électrique est discrète*, comme nous l'avons déjà mentionné à plusieurs reprises. La charge ne fluctue pas continûment, mais varie par paliers bien précis. Non seulement la nature exhibe une valeur minimale pour l'entropie et des quantités minimales de matière, mais elle révèle également l'existence d'une charge minimale. La charge électrique est quantifiée.

Dans les métaux, la quantification de la charge est perceptible dans le flux des électrons. Dans les électrolytes, c'est-à-dire les liquides électriquement conducteurs, la quantification de la charge survient dans le flux des atomes chargés, généralement appelés *ions*. Toutes les batteries renferment des électrolytes, l'eau aussi est un électrolyte, bien qu'elle soit faiblement conductrice. Dans les plasmas, comme le feu ou les ampoules fluorescentes, les ions et les électrons se déplacent et révèlent tous les deux le caractère discret de la charge. Dans le rayonnement également – des faisceaux d'électrons à l'intérieur des téléviseurs, des rayons canalisés formés dans des tubes spéciaux en verre, et du rayonnement cosmique jusqu'à la radioactivité – les charges sont quantifiées.

Dans toutes les expériences connues, la même valeur minimale pour la variation de la charge a été relevée. Le résultat est

$$\Delta q \geq e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} . \quad (64)$$

En bref, la circulation d'électricité est due, de même que tous les courants présents dans la nature, à un courant de particules discrètes.

Une variation minimale de la charge entraîne une conséquence élémentaire : l'élec-

trodyamique classique est *fausse*. Une charge minimale implique qu'aucune charge de référence infiniment petite ne peut exister. Mais de telles charges infiniment réduites sont nécessaires pour définir les champs électrique et magnétique. La limite sur la taille de la charge entraîne aussi qu'il n'existe aucune manière correcte de définir un courant électrique instantané et, par conséquent, que les valeurs du champ électrique et magnétique sont pertinemment floues. Les équations d'évolution de Maxwell ne sont donc qu'approximatives.

Page ?? Nous étudierons les principaux effets du caractère discret de la charge dans la partie sur la théorie quantique. Seuls quelques effets de la quantification de la charge peuvent être traités en physique classique. En voici un exemple didactique.

À QUELLE VITESSE LES CHARGES SE DÉPLACENT-ELLES ?

Défi 159 s Dans le vide, comme à l'intérieur d'un téléviseur couleur, les particules chargées accélérées par une tension de 30 kV se déplacent au tiers de la vitesse de la lumière. Dans les accélérateurs de particules modernes, les charges filent si rapidement que leur vitesse est, à titre pratique, indiscernable de celle de la lumière.

Dans un métal, les signaux électriques se déplacent à des vitesses de l'ordre de la vitesse de la lumière. La valeur exacte dépend de la capacité électrique et de l'impédance du câble : elle est généralement située dans l'intervalle de $0,3c$ à $0,5c$. Cette vitesse élevée est due à l'aptitude des métaux à assimiler rapidement des charges en arrivée et à évacuer avec facilité les autres. Cette potentialité de réaction rapide est engendrée par la forte mobilité des charges situées à l'intérieur des métaux, ce qui est en fait dû à la masse et à la taille minuscules de ces charges, les électrons.

La vitesse de signal élevée dans les métaux semble contredire une autre constatation. La vitesse de dérive des électrons dans un fil métallique vérifie manifestement

$$v = \frac{I}{Ane}, \quad (65)$$

où I représente le courant, A la surface d'une section du fil, e la charge d'un unique électron et n la densité numérique d'électrons. La densité d'électrons dans le cuivre est de $8,5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$. En utilisant un courant caractéristique de 0,5 A et une surface de section typique d'un millimètre carré, nous obtenons une vitesse de dérive de $0,37 \mu\text{m/s}$. Autrement dit, les électrons se déplacent des milliers de fois plus lentement que du ketchup dans sa bouteille. Pire, si une lampe de salon utilisait du courant continu au lieu du courant alternatif, les électrons mettraient plusieurs jours pour aller de l'interrupteur à l'ampoule ! Cependant, la lampe s'allume et s'éteint presque instantanément après que l'interrupteur a été actionné. De manière similaire, les électrons associés à un courriel transporté avec du courant continu parviendraient à leur destinataire beaucoup plus tard qu'une lettre envoyée au même moment. Pourtant, on constate que le courriel arrive rapidement. Êtes-vous capable d'expliquer la contradiction apparente qui existe entre la vitesse de dérive et la vitesse du signal ?

Défi 160 s

Dans les liquides, les charges se déplacent à une vitesse différente de celle à l'intérieur des métaux, et leur rapport charge sur masse est également différent. Nous en avons tous conscience par le résultat d'expériences directes. Nos *nerfs* fonctionnent en utilisant des

signaux électriques et mettent (seulement) quelques millisecondes pour réagir à un stimulus, bien qu'ils fassent plusieurs mètres de long. Une vitesse analogue est observée dans les semi-conducteurs et dans les batteries. Dans tous ces systèmes, la charge en mouvement est transportée par des *ions* : ce sont des atomes chargés. Les ions, comme les atomes, sont de grandes entités composées, contrairement aux minuscules électrons.

Dans d'autres systèmes, les charges se déplacent à la fois comme les électrons et les ions. Les lampes à néon, le feu, les plasmas et le Soleil en sont des exemples. Dans les atomes, les électrons se comportent de manière encore plus étrange. Nous avons tendance à penser qu'ils gravitent autour du noyau (comme nous le verrons plus tard) à une vitesse plutôt élevée, puisque le rayon orbital est vraiment petit. Cependant, il apparaît que dans la plupart des atomes de nombreux électrons ne tournent pas du tout autour du noyau. Cette histoire déroutante dissimulée derrière les atomes et leur structure sera contée dans la partie quantique de notre ascension montagneuse.

Page ??

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LES CHARGES DISCRÈTES

Défi 161 s Comment pourriez-vous montrer de manière expérimentale que la charge électrique se manifeste en fragments élémentaires ?

* *

Défi 162 pe Le caractère discret de la charge implique que nous pouvons évaluer la taille des atomes en observant la déposition galvanique. Comment ?

* *

Page ??

Réf. 85

Défi 163 pe

Les rayons cosmiques sont constitués de particules chargées qui heurtent la Terre. (Nous en discuterons plus en détail ultérieurement.) Les astrophysiciens expliquent que ces particules sont accélérées par les champs magnétiques régnant autour de la Galaxie. Cependant, l'expression de l'accélération de Lorentz indique que les champs magnétiques peuvent modifier uniquement la direction de la vitesse d'une charge, et non sa grandeur. Comment la nature peut-elle néanmoins engendrer une accélération ?

* *

Défi 164 s Quel serait le potentiel en volt de la Terre si nous pouvions extirper tous les électrons d'une goutte d'eau ?

* *

Lorsqu'une tension est appliquée à une résistance, combien de temps faut-il pour atteindre la valeur finale du courant, donnée par la « loi » d'Ohm ? Le premier à avoir répondu à cette question fut Paul Drude* autour des années 1900. Il raisonna ainsi : lorsque le courant est activé, la vitesse v d'un électron augmente selon $v = (eE/m)t$, où E est le champ électrique, e la charge et m la masse de l'électron. Le modèle de Drude suppose que l'accroissement de la vitesse électronique cesse lorsque l'électron heurte un atome,

* Paul Karl Ludwig Drude (1863–1906) fut un physicien allemand. Une conséquence de son modèle de gaz d'électrons pour les métaux fut la prédiction, approximativement correcte, que le rapport entre la conductivité thermique et la conductivité électronique à une température donnée devrait être identique pour tous les métaux. Drude introduisit également la notation c pour la vitesse de la lumière.

perd de son énergie et commence à nouveau à être accéléré. Drude déduit que le temps moyen τ s'écoulant jusqu'à la collision est relié à la résistance spécifique par

$$\rho = \frac{E}{j} = \frac{E}{env} = \frac{2m}{\tau e^2 n}, \quad (66)$$

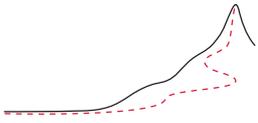
n représentant la densité numérique d'électrons. Le membre de droite ne dépend plus de E : c'est une constante. Drude avait ainsi expliqué la *relation d'Ohm* $U = RI$ (ou $E = j\rho$) à partir des propriétés de la matière, en supposant que la résistance est due aux électrons en mouvement qui entrent continuellement en collision puis accélèrent à nouveau. En remplaçant par les valeurs relatives au cuivre ($n = 10,3 \cdot 10^{28} / \text{m}^{-3}$ et $\rho = 0,16 \cdot 10^{-7} \Omega \text{m}$), nous trouvons un temps $\tau = 42 \text{ ps}$. Cette durée est si brève que le processus d'activation peut généralement être négligé.

* *

Est-il sensé d'écrire les équations de Maxwell pour le vide ? Les champs électrique et magnétique requièrent tous les deux des charges pour pouvoir être mesurés. Mais dans le vide il n'y a plus de charges. Pire, les champs sont définis en faisant appel à des charges de référence infiniment petites. Mais de telles charges n'existent pas. En réalité, seule la théorie quantique démêle cette contradiction apparente. Êtes-vous capable d'imaginer comment ?

Défi 165 d





CHAPITRE 5

EFFETS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

L'ÉCLAIR EST-IL UNE DÉCHARGE ÉLECTRIQUE ? – L'ÉLECTRICITÉ DANS L'ATMOSPHÈRE

En observant attentivement l'atmosphère, on remarque qu'elle est remplie d'effets électriques. Le phénomène électrique le plus impressionnant que nous relevons, l'éclair, est dorénavant raisonnablement bien compris. Dans un nuage orageux, particulièrement dans les nuages* *cumulonimbus* de grande taille, les charges sont séparées par les collisions survenant entre les gros « grêlons » de cristaux de glace, qui chutent à cause de leur poids, et les petits « granules » de glace cristallisée s'élevant grâce à la convection thermique dirigée vers le haut. Puisque la collision participe à la création d'un champ électrique, les charges sont séparées de manière similaire au mécanisme présent dans le générateur de Kelvin. Les décharges se produisent lorsque le champ électrique devient trop élevé ; elles empruntent une trajectoire étrange influencée par les ions produits dans l'air par les rayons cosmiques. Il semble que les rayons cosmiques soient, au moins en partie, responsables de la forme en zigzag de l'éclair.

Réf. 96

Réf. 98

Page 19

Les flashes des éclairs possèdent d'étranges propriétés. *Primo*, ils apparaissent dans des champs avoisinant les 200 kV/m (à faible altitude) au lieu des 2 MV/m pour les étincelles normales. *Deusio*, les éclairs émettent des pulsations radio. *Tertio*, ils émettent des rayons gamma. Des chercheurs russes, à partir de 1992, ont expliqué ces trois effets grâce à un mécanisme de décharge nouvellement découvert. À des échelles de longueur de 50 m et plus, les rayons cosmiques peuvent déclencher l'apparition de l'éclair, l'énergie relativiste de ces rayons autorisant la production d'un mécanisme de décharge qui n'existe pas pour des électrons de basse énergie. Aux énergies relativistes, ce que nous appelons une avalanche électronique provoque des décharges dans des champs beaucoup plus faibles que les étincelles courantes de laboratoire. La multiplication de ces électrons relativistes conduit également aux émissions observées de rayons gamma et radio.

Réf. 99

* Les nuages ont des noms latins, introduits en 1802 par l'explorateur anglais Luke Howard (1772–1864). Il découvrit que tous les nuages peuvent être vus comme des variantes de trois types de base, qu'il dénomma *cirrus*, *cumulus* et *stratus*. Il appela la combinaison des trois, le nuage de pluie, *nimbus* (signifiant en latin « gros nuage »). Aujourd'hui, le consensus sur le système internationalement accepté a été légèrement ajusté et distingue les nuages en fonction de la hauteur de leur base. Les nuages qui apparaissent au-dessus d'une altitude de 6 km sont les cirrus, les cirrocumulus et les cirrostratus ; ceux qui s'élèvent à des altitudes comprises entre 2 et 4 km sont les altocumulus, les altostratus et les nimbostratus ; les nuages que l'on trouve en dessous d'une altitude de 2 km sont les stratocumulus, les stratus et les cumulus. Le nuage d'averse ou d'orage, qui s'étend sur toutes ces altitudes, est aujourd'hui appelé *cumulonimbus*. Pour des représentations magnifiques de nuages, consultez les sites Web www.goes.noaa.gov et www.osei.noaa.gov.

Réf. 97



FIGURE 78 Cumulonimbus vus du sol et de l'espace. (NASA)

Par ailleurs, vous avez 75 % de chance de survivre après avoir été frappé par la foudre, surtout si vous êtes complètement mouillé, puisque dans cette situation le courant s'écoulera en dehors de la peau. Généralement, les personnes humides qui sont électrocutées perdent tous leurs vêtements, car l'eau qui s'évapore les arrache. Une réanimation urgente est primordiale pour sauver quelqu'un après un coup de foudre*.

En remarque, vous devriez savoir comment mesurer la distance d'un éclair en comptant les secondes écoulées entre l'éclair et le tonnerre et en multipliant cela par la vitesse du son, 330 m/s. Nous savons beaucoup moins que nous pouvons estimer la *longueur* de l'éclair en mesurant la *durée* du tonnerre et en la multipliant par le même facteur.

Au cours des années 1990, nous avons collecté plus d'informations sur le phénomène électrique accompagnant les orages. Les pilotes de ligne et les passagers observent parfois des émissions de lumière faible et colorée qui se propagent au sommet des nuages orageux. Il en existe divers types : les *jets* bleus et principalement les *sylphes* rouges (également dénommés farfadets ou sprites) et les *elfes* (ou halos), qui sont d'une manière ou d'une autre causés par les champs électriques situés entre la cime du nuage et l'ionosphère. Les détails sont toujours en cours de recherche, et les mécanismes sous-jacents ne sont pas encore élucidés**.

Toutes ces particularités font partie intégrante du circuit électrique qui siège tout autour de la Terre. Ce domaine fascinant de la géophysique nous conduirait trop loin de notre objectif relatif à cette ascension montagnaise. Mais chaque physicien devrait savoir qu'il existe un champ électrique vertical ambiant compris entre 100 et 300 V/m lors d'une journée dégagée, comme cela avait déjà été découvert en 1752. (Pouvez-vous deviner pourquoi nous ne nous en apercevons pas dans la vie quotidienne ? Et pourquoi, en dépit de sa valeur, il ne peut pas être mis à profit pour produire de grosses quantités d'énergie ?) Ce champ est orienté de l'ionosphère vers le bas, en direction du sol. En réalité, la Terre est constamment chargée négativement, et par temps clair le courant

Défi 166 s

* Si jamais vous êtes frappé par la foudre et que vous survivez, allez à l'hôpital ! Beaucoup de personnes sont décédées trois jours après avoir négligé de le faire. Un coup de foudre entraîne souvent des effets de coagulation dans le sang. Ces substances obstruent les reins, et nous pouvons mourir trois jours plus tard à cause de dysfonctionnements rénaux. Le remède consiste à subir un traitement par dialyse.

** Pour des images, jetez un œil sur les sites Web captivants elf.gi.alaska.edu/, www.fma-research.com/spriteres.htm et pasko.ee.psu.edu/Nature/.

circule vers le bas à travers l'atmosphère dégagée, tentant ainsi de *décharger* électriquement notre planète. Ce courant d'environ 1 kA est diffusé sur la planète entière, ce qui demeure possible grâce aux ions formés par le rayonnement cosmique. (La résistance entre la terre et l'ionosphère est de 200 Ω environ, donc la chute de tension totale est d'à peu près 200 kV.) En même temps, la Terre est constamment *chargée* par plusieurs effets : un effet dynamo dû aux forces de marée agissant sur l'atmosphère, et des courants induits par la magnétosphère. Mais l'effet le plus important reste l'éclair. En d'autres termes, contrairement à ce que nous pouvons penser, l'éclair ne décharge pas le sol, en réalité

Réf. 100

il le recharge* ! Bien évidemment, l'éclair doit décharger la différence de potentiel qui existe entre le nuage et la terre, mais ce faisant il transmet en fait une charge négative à la Terre tout entière. Les nuages d'orage sont des batteries, l'énergie issue de ces batteries provient des mouvements de convection thermique, dirigés vers le haut et mentionnés ci-dessus, qui transportent la charge à *l'encontre* du champ électrique global ambiant.

En utilisant quelques stations de mesures électriques qui relèvent les variations du champ électrique de la Terre, il est possible de localiser tous les éclairs qui descendent sur la Terre à un instant donné. De cette manière, des recherches actuelles espèrent également mesurer l'activité des sylphes et des elfes électriques correspondants.

Réf. 101

Les ions présents dans l'air jouent un rôle dans le chargement des nuages d'orage via le chargement des cristaux de glace et des gouttes de pluie. En général, toutes les minuscules particules dans l'air sont électriquement chargées. Lorsque des avions et des hélicoptères volent, ils frappent généralement plus de particules d'une charge donnée que d'autres. Par conséquent, ceux-ci se chargent au cours du vol. Quand un hélicoptère est utilisé pour sauver des gens situés sur un radeau en pleine mer, la corde qui tire les personnes vers le haut doit avant tout être reliée à la terre en la laissant pendre dans l'eau. Si ce n'est pas le cas, les personnes situées sur le radeau peuvent mourir de choc électrique en touchant la corde, comme cela s'est malheureusement déjà produit à plusieurs reprises par le passé.

Les charges présentes dans l'atmosphère offrent de nombreux autres effets. Des expériences récentes ont confirmé ce que l'on prédisait déjà au début du vingtième siècle : l'éclair émet des rayons X. Cette confirmation n'est pas aisée cependant, il est nécessaire de placer un détecteur près du flash de l'éclair. Pour y parvenir, l'éclair doit être attiré dans une région donnée. C'est possible en utilisant un missile qui tire un fil métallique, l'autre extrémité de celui-ci étant attachée au sol. Ces résultats expérimentaux sont maintenant en train d'être rassemblés pour façonner une nouvelle description de l'éclair qui explique également les farfadets rouge-bleu situés au-dessus des nuages. En particulier, ces processus impliquent aussi qu'à l'intérieur des nuages les électrons puissent être accélérés jusqu'à des énergies de quelques MeV.

Réf. 102

Réf. 103

Pourquoi les étincelles et les éclairs sont-ils bleus ? Il apparaît que cela est lié à une propriété matérielle : la couleur provient de la matière qui est excitée par l'énergie de la décharge, généralement l'air. Cette excitation est due à la température de 30 kK qui règne à l'intérieur de la cavité du flash d'un éclair caractéristique. Pour les étincelles courantes, la température est beaucoup plus basse. En fonction de la situation, la couleur peut émaner du gaz situé entre les deux électrodes, tel que l'oxygène ou l'azote, ou elle peut être due à la matière qui se volatilise sur les électrodes par la décharge électrique.

Défi 167 s

* La Terre est ainsi chargée à environ -1 MC. Pouvez-vous le confirmer ?

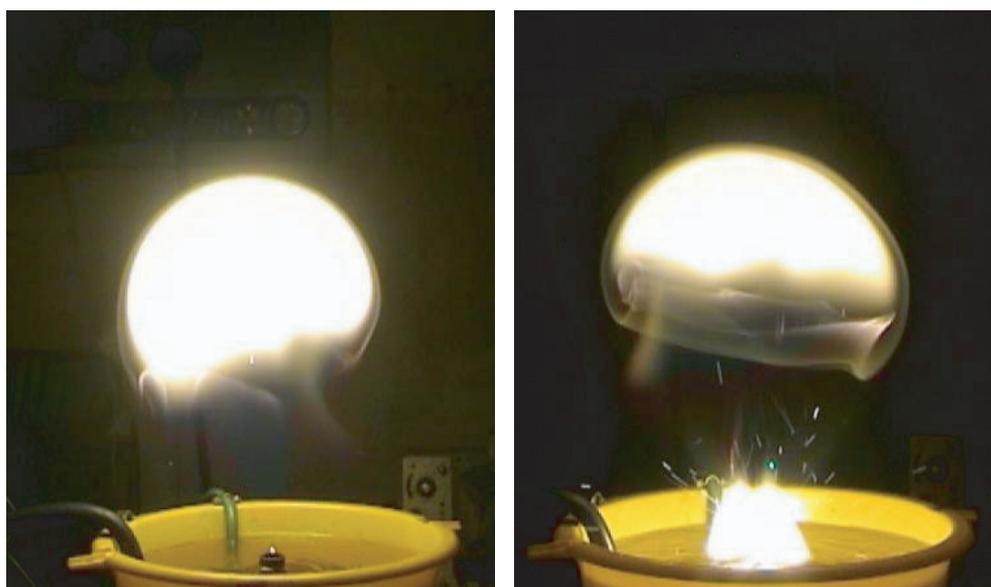


FIGURE 79 Un nuage de plasma flottant, produit en laboratoire. (© Sergei Emelin et Alexei Pirozerski)

Pour avoir une explication de ces couleurs, ainsi que pour l'explication de toutes les couleurs provenant de la matière, nous devons patienter jusqu'à la prochaine partie de notre promenade.

Mais il n'y a pas que les champs électriques qui soient dangereux. Les champs électromagnétiques qui varient dans le temps peuvent également l'être. En 1997, par un temps magnifiquement calme, une montgolfière hollandaise s'est approchée de l'émetteur radio puissant situé à Hilversum. Après avoir voyagé pendant quelques minutes près de l'antenne, la nacelle se détacha soudainement du ballon, tuant tous les passagers situés à l'intérieur.

Une équipe enquêta quelques semaines plus tard pour reconstituer les faits. Dans les montgolfières modernes, la nacelle est suspendue par des cordes en nylon de haute qualité. Pour éviter les accidents dus à l'orage et afin de contourner les problèmes de chargement en électricité statique, toutes ces cordes en nylon contiennent de minces fils métalliques qui forment une vaste surface équipotentielle autour du ballon tout entier. Malheureusement, face à l'émetteur radio, ces minuscules fils métalliques absorbèrent l'énergie radio transmise par l'émetteur, devinrent brûlants et firent fondre les fils en nylon. Ce fut la toute première observation de ce phénomène.

LES BOULES DE FEU EXISTENT-ELLES ?

Réf. 104 Durant des centaines d'années, des individus ont rapporté des observations concernant ce que nous appelons les *boules de feu*. Généralement, elles furent remarquées pendant des orages, souvent après qu'un éclair eut surgi du ciel. Excepté quelques cas, personne ne considéra ces signalements avec sérieux, parce qu'aucune donnée reproductible n'était disponible.

Lorsque les fours micro-ondes devinrent populaires, plusieurs méthodes permettant

de produire des décharges en forme de boule apparentent. Pour en observer une, enfoncez simplement un cure-dent dans une bougie, allumez le cure-dent et placez-le dans un four micro-ondes (d'une autre personne) à la puissance maximale. Ce dispositif produit une magnifique décharge en forme de boule. Cependant, les hommes ne vivent pas dans un four micro-ondes.

Cette situation expérimentale changea du tout au tout dans les années 1999 à 2001. Au cours de ces années-là, les physiciens russes Anton Egorov et Gennady Shabanov découvrirent une manière de produire des nuages de plasma, ou *plasmoides*, flottant en l'air, en employant trois ingrédients principaux : de l'eau, du métal et une haute tension. Si la haute tension est appliquée à des électrodes métalliques immergées de forme et de fabrication appropriées, des nuages de plasma, d'une taille d'environ 10 à 20 cm, émergent de l'eau, flottent au-dessus de la surface puis disparaissent après environ une demi-seconde. Deux exemples peuvent être observés sur la [Figure 79](#).

Le phénomène des plasmoides volants est toujours en cours d'étude. Il existe des variantes en forme, en couleur, en taille et en durée de vie. La panoplie des observations et des techniques se développera certainement dans les années à venir.

Un effet encore plus frappant fut publié en 2007. Une équipe brésilienne de chercheurs découvrit une manière de produire des décharges de la taille d'une balle de golf, qui semblent rouler sur le sol pendant une durée de 8 s. Leur méthode était merveilleusement simple : à l'aide d'une alimentation électrique de 25 V, ils envoyèrent un courant de 140 A à travers un arc à la surface d'une couche de silicium. Ils découvrirent que des petites particules de silicium se détachent puis s'écartent, tout en s'entourant d'un éclat lumineux. Ces nuages lumineux peuvent déambuler sur la table et le plancher du laboratoire, jusqu'à ce qu'ils s'éteignent.

Il semble que ces phénomènes pourraient donner une explication à un grand nombre d'observations fondées sur les boules de feu.

LA GRAVITÉ FAIT-ELLE RAYONNER LES CHARGES ?

Nous avons appris dans la section sur la relativité générale que la gravitation possède le même effet que l'accélération. Cela signifie qu'une charge qui demeure figée à une certaine hauteur est équivalente à une charge accélérée à $9,8 \text{ m/s}^2$, ce qui impliquerait qu'elle émette du rayonnement électromagnétique, puisque toute charge accélérée rayonne. Cependant, le monde qui nous entoure est empli de charges situées à des hauteurs fixes, et on ne détecte pas pour autant de rayonnement de ce type. Comment cela est-il possible ?

Cette question est restée un sujet de prédilection pendant de nombreuses années. D'une manière générale, le concept de rayonnement n'est pas invariant selon l'observateur : si un observateur détecte du rayonnement, un deuxième ne le fera pas nécessairement de façon identique. La manière exacte selon laquelle un champ de rayonnement varie d'un observateur à l'autre dépend du type de mouvement relatif et du champ lui-même.

Une solution exhaustive à ce problème montre que, pour une charge uniformément accélérée, un observateur subissant la même accélération détectera seulement un champ électrostatique. Au contraire, un observateur inertiel détectera un champ de rayonnement. Puisque la gravité est (à une précision élevée) équivalente à une accéléra-

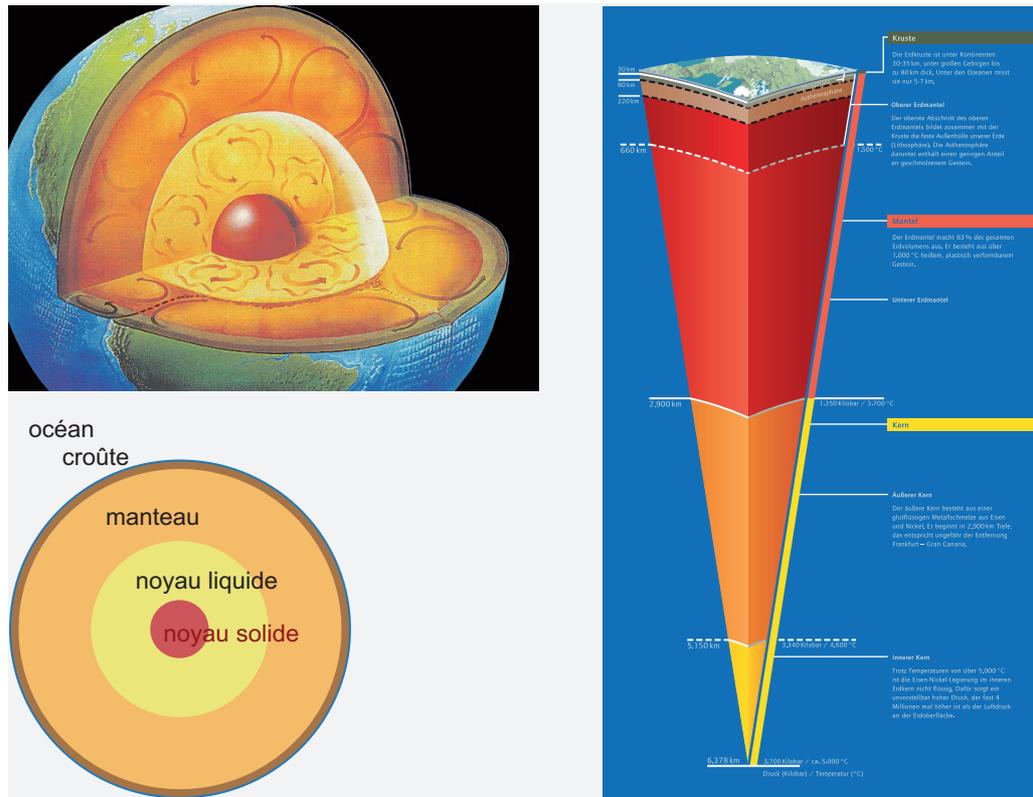


FIGURE 80 La structure de notre planète. (© MPI-Chemie, Mainz/GEO)

tion uniforme, nous en déduisons un résultat élémentaire : la gravité ne fait pas rayonner les charges électriques pour un observateur au repos par rapport aux charges, tel que nous l'observons. Ce résultat reste vrai également dans la description de la théorie quantique.

QUESTIONS DE RECHERCHE

La description classique de l'électrodynamique est cohérente et complète. Néanmoins, il existe toujours de nombreux sujets de recherche, et nous en donnons ici quelques-uns d'entre eux.

L'origine du champ magnétique de la Terre, des autres planètes, du Soleil et même de la Galaxie constitue un domaine fascinant. La manière dont la convection des fluides situés à l'intérieur des planètes génère les champs magnétiques, un problème intrinsèquement tridimensionnel, l'influence de la turbulence, des non-linéarités et du chaos font de ce sujet une question étonnamment complexe.

C'est seulement dans la seconde moitié du vingtième siècle que les détails de la création du champ magnétique terrestre, que l'on nomme habituellement la *géodynamo*, commencèrent à se dévoiler, lorsque la connaissance de l'intérieur de la Terre eut atteint un niveau suffisant. L'intérieur de la Terre commence à partir de la croûte terrestre. La *croûte* possède une épaisseur typique de 30 à 40 km (sous les continents), bien qu'elle soit

Réf. 26

Défi 168 d

plus épaisse sous les grandes chaînes de montagnes et plus fine près des volcans ou sous les océans. Comme nous l'avons déjà mentionné, la croûte est constituée de vastes fragments, les *plaques*, qui bougent les uns par rapport aux autres. La structure interne de la Terre est partagée entre le *manteau* – les 2 900 premiers kilomètres à partir de la surface – et le *noyau*. Le noyau est composé d'un noyau *externe* liquide, de 2 210 km d'épaisseur, et d'un noyau *interne* solide de 1 280 km de rayon. (La température du noyau est connue de manière approximative, nous pensons qu'elle se situe entre 6 et 7 kK. Pouvez-vous découvrir un procédé permettant de la mesurer ? Cette température a dû décroître de quelques centaines de kelvin au cours des 3 milliards d'années qui viennent de s'écouler.)

Le noyau de la Terre est principalement composé de fer, collecté à partir des astéroïdes qui sont entrés en collision avec celle-ci dans sa jeunesse. Il semble que le noyau externe liquide, conducteur électrique, agisse comme une dynamo qui entretient le champ magnétique. L'énergie magnétique provient de l'énergie cinétique de ce noyau externe, qui tourne à une vitesse différente de la surface terrestre. Le fluide peut agir comme une dynamo parce que, mis à part qu'il tourne, il subit également des mouvements de *convection*, depuis le cœur profond de la Terre jusqu'à des niveaux plus superficiels, mus par les gradients de température qui existent entre le noyau interne brûlant et le manteau tiède. Des courants électriques colossaux circulent de manière compliquée à travers ces couches liquides, entretenus par le frottement, et engendrent le champ magnétique. Le fait que ce champ change brusquement d'orientation à intervalles irréguliers compris entre quelques dizaines de milliers et quelques millions d'années, représente une des questions majeures. Les réponses sont difficiles, les expériences ne sont pas encore possibles ; 150 années de mesures constituent une courte durée lorsque nous la comparons à la dernière transition – il y a environ 730 000 ans – et les simulations par ordinateur sont extrêmement délicates. Depuis que les relevés du champ magnétique ont commencé, son moment dipolaire a diminué de manière stable, actuellement il est de 5 % par an, et le moment quadripolaire a continuellement augmenté. Peut-être sommes-nous en train d'assister à un revirement de situation*. (Par ailleurs, l'étude des champs magnétiques *galactiques* est encore plus complexe, et en est toujours à ses balbutiements.)

Réf. 110

Défi 169 e

Une autre énigme majeure concernant l'électricité résulte de l'équivalence entre la masse et l'énergie. Nous savons de manière certaine, par les expériences, que la taille d des électrons est inférieure à 10^{-22} m. Cela signifie que le champ électrique qui l'entoure possède un contenu énergétique E au minimum donné par

$$\begin{aligned} E_{\text{nergie}} &= \frac{1}{2} \varepsilon_0 \int E_{\text{lectrique du champ}}^2 dV = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \int_d^\infty \left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r^2} \right)^2 4\pi r^2 dr \\ &= \frac{q^2}{8\pi\varepsilon_0} \frac{1}{d} > 1,2 \mu\text{J} . \end{aligned} \quad (67)$$

D'un autre côté, la *masse* d'un électron, généralement fixée à $511 \text{ keV}/c^2$, correspond à une énergie de 82 fJ seulement, dix millions de fois *inférieure* à la valeur que nous venons de calculer. Autrement dit, l'électrodynamique classique a énormément de difficultés à décrire les électrons. En fait, une description cohérente des particules ponctuelles char-

Réf. 109

* En 2005, on a signalé que le noyau interne de la Terre semble tourner jusqu'à un demi-degré par an plus vite que la croûte continentale.

Réf. 111 gées dans le cadre de l'électrodynamique classique est impossible. Ce sujet admirable fait l'objet d'un intérêt plutôt sporadique – mais alors souvent enthousiaste – de nos jours, parce que cette énigme est résolue d'une manière différente dans la partie quantique, à venir, de notre ascension montagnaise.

Page 138 Bien que la période glorieuse des sciences de la matière soit maintenant révolue, les diverses propriétés électromagnétiques de la matière et leurs applications dans les dispositifs pratiques ne semblent pas encore être complètement explorées. À peu près une fois par an, un effet nouveau est découvert, lequel mérite d'être introduit dans la liste des propriétés électromagnétiques de la matière du [Tableau 14](#). Entre autres, certaines nouvelles technologies semi-conductrices auront toujours un impact sur l'électronique, telle la récente introduction de circuits intégrés de détection de lumière à faible coût construits en technologie CMOS (Complementary Metal Oxide Semi-conductor).

La conception de sources lumineuses de haute qualité a été un défi durant de nombreux siècles et en reste un pour l'avenir. Les sources lumineuses qui sont intenses, ajustables et qui ont de grandes longueurs de cohérence ou des sources qui émettent des longueurs d'onde extrêmes sont cruciales pour la poursuite d'une multitude de recherches. Comme exemple parmi tant d'autres, les premiers lasers à rayons X ont récemment été construits. Toutefois, ils ont une taille de plusieurs centaines de mètres et utilisent des accélérateurs de particules adaptés. La construction de lasers à rayons X compacts restera hors de portée pour de nombreuses années – si jamais cela reste du domaine du possible.

Réf. 112 L'électrodynamique et la relativité générale interagissent de plusieurs façons. Seul un petit nombre de situations ont été étudiées jusqu'à présent. Elles sont importantes pour l'étude des trous noirs et du vide. Par exemple, il semble que les champs magnétiques accroissent la rigidité de l'espace vide. Un grand nombre de sujets similaires seront dévoilés dans le futur.

Défi 170 r Mais le plus grand défi imaginable en électrodynamique classique reste peut-être l'interprétation des courants électriques présents dans le cerveau. Sera-t-il possible de lire nos pensées par le truchement d'un appareil placé à l'extérieur du crâne ? Nous pourrions commencer avec un défi plus simple : serait-il possible de discerner la pensée « oui » de la pensée « non » en mesurant les champs électriques ou magnétiques présents autour de la tête ? En d'autres termes, la lecture de la pensée est-elle réalisable ? Il est probable que le vingt et unième siècle apportera une réponse positive. Si c'est le cas, l'équipe qui parviendra à réaliser cette prouesse deviendra immédiatement célèbre.

LÉVITATION

Nous avons vu qu'il est possible de déplacer certains objets sans même les toucher, en utilisant un champ magnétique ou électrique, ou, bien sûr, en utilisant la gravitation. Est-il également possible, sans toucher un objet, de le faire flotter à une position figée en l'air ? Ce type de repos existe-t-il ?

Réf. 113 Il apparaît qu'il existe plusieurs méthodes pour faire léviter des objets. Celles-ci sont communément divisées en deux groupes : celles qui consomment de l'énergie et celles qui n'en consomment pas. Parmi les méthodes qui consomment de l'énergie, citons la lévitation des objets sur un jet d'air ou d'eau, la flottaison des objets à travers des ondes sonores, par exemple sur le dessus d'une sirène, ou par un rayon laser émis par-dessous, et la lévitation de matériaux conducteurs, et même de liquides, dans de forts champs

radiofréquence. La lévitation des liquides ou des solides par des ondes ultrasonores puissantes est actuellement largement diffusée dans les laboratoires. Toutes ces méthodes fournissent une lévitation *stationnaire*. Un autre groupe de méthodes qui consomment de l'énergie détecte la manière dont un corps est en train de chuter et lui communique une impulsion dans la bonne direction par le biais d'une boucle de rétroaction. Ces méthodes sont *non stationnaires* et utilisent généralement des champs magnétiques pour s'assurer que l'objet ne tombe pas. Le train magnétique en cours de construction à Shanghai par un consortium allemand est mis en lévitation de cette manière. Le train tout entier, y compris ses passagers, est mis en lévitation et avance alors en utilisant des électroaimants. Il est ainsi possible, en faisant usage d'aimants, de faire léviter plusieurs dizaines de tonnes de matière.

Pour les méthodes de lévitation qui *ne* consomment *pas* d'énergie – tous ces procédés sont nécessairement stationnaires – une contrainte bien connue peut être retrouvée en étudiant la « loi » de Coulomb de l'électrostatique : aucune disposition statique de champs électriques ne peut faire librement léviter un objet *chargé* dans l'espace ou en l'air. La même chose est vraie pour les champs gravitationnels et des objets *massifs**. En d'autres termes, nous ne pouvons pas produire un minimum local pour l'énergie potentielle au milieu d'une cavité en utilisant des champs électriques ou gravitationnels. Cette impossibilité est dénommée le *théorème d'Earnshaw*. Mathématiquement parlant, les solutions de l'équation de Laplace $\Delta\varphi = 0$, dites *fonctions harmoniques*, possèdent des minima ou des maxima uniquement à la frontière, mais jamais à l'intérieur du domaine de définition. (Vous l'avez démontré vous-même à la [page 126](#).) Ce théorème peut également être démontré en remarquant que, si l'on se donne un minimum du potentiel dans l'espace libre, le théorème de Gauss pour une sphère située autour de ce minimum exige qu'une source de ce champ soit présente à l'intérieur, ce qui est en contradiction avec l'hypothèse de départ.

Nous pouvons également déduire qu'il est impossible d'utiliser des champs électriques pour faire léviter un corps électriquement *neutre* en l'air : l'énergie potentielle U d'un tel corps, de volume V et de constante diélectrique ε , placé dans un environnement de constante diélectrique ε_0 , est donnée par

$$\frac{U}{V} = -\frac{1}{2}(\varepsilon - \varepsilon_0)E^2 . \quad (68)$$

Puisque le champ électrique E ne possède jamais un maximum en l'absence de charge dans l'espace, et puisque pour tous les matériaux $\varepsilon > \varepsilon_0$, il ne peut y avoir un minimum pour l'énergie potentielle dans l'espace libre pour un corps neutre**.

Pour résumer, en utilisant des champs électriques statiques ou gravitationnels statiques, il est impossible de maintenir un objet sans qu'il chute. Ni la mécanique quan-

* À la grande déception des nombreux fans de science-fiction, ce serait encore vrai si une masse négative existait. Et même si la gravité n'est pas réellement engendrée par un champ mais par la courbure de l'espace-temps, ce résultat tient toujours en relativité générale.

** Il est possible, cependant, de « faire léviter » des bulles de gaz dans des liquides – les « piéger » pour les empêcher de s'élever serait une expression plus appropriée – parce que, dans un tel cas, la constante diélectrique de l'environnement est supérieure à celle du gaz. Pouvez-vous trouver une combinaison liquide-gaz où les bulles tombent au lieu de s'élever ?

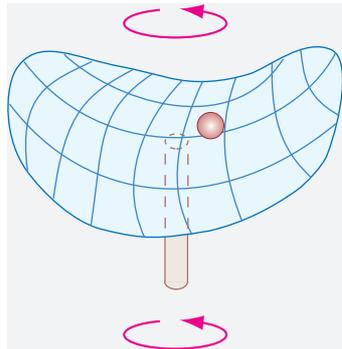


FIGURE 81 Piéger une sphère métallique en utilisant un foret à vitesse variable et une selle en plastique.

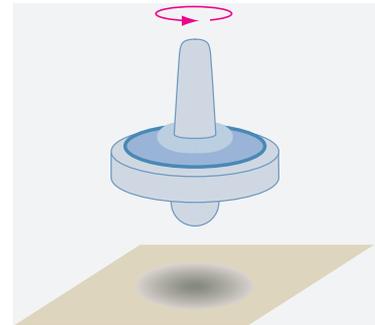


FIGURE 82 La « magie » de la lévitation maintenant disponible dans les magasins de jouets.

tique, qui incorpore des manifestations telles que l'antimatière, ni la relativité générale, qui inclut des phénomènes tels que les trous noirs, ne font fléchir ce résultat fondamental.

Pour des champs *magnétiques* statiques, l'argumentation est analogue à celle des champs électriques : l'énergie potentielle U d'un corps aimantable de volume V et de perméabilité μ placé dans un milieu ayant une perméabilité μ_0 ne contenant aucun courant est donnée par

$$\frac{U}{V} = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\mu_0} \right) B^2 \quad (69)$$

et, à cause de l'inégalité $\Delta B^2 \geq 0$, des maxima isolés pour un champ magnétique statique ne sont pas possibles, seuls des minima isolés le sont. Par conséquent, il est impossible de faire léviter des matériaux paramagnétiques ($\mu > \mu_0$) ou ferromagnétiques ($\mu \gg \mu_0$) tels que l'acier, y compris des barres aimantées, qui sont tous attirés vers les maxima du champ magnétique, et non pas repoussés.

Il existe donc deux manières d'obtenir la lévitation magnétique : faire léviter un matériau diamagnétique ou utiliser un champ qui varie dans le temps. Les matériaux diamagnétiques ($\mu < \mu_0$) peuvent être mis en lévitation par des champs magnétiques statiques parce qu'ils sont attirés vers les minima du champ magnétique. L'exemple le plus connu est la lévitation des supraconducteurs, qui sont, au moins pour ceux de type I, des diamagnétiques parfaits ($\mu = 0$). Des forces puissantes peuvent être engendrées, et cette méthode est également en cours d'essai au Japon pour la lévitation des trains de voyageurs. Dans certains cas, les supraconducteurs peuvent même être *suspendus* en l'air, sous un aimant. Des atomes isolés possédant un moment magnétique sont également des diamagnétiques ; nous les faisons léviter ainsi de manière routinière, et ils ont également été photographiés dans cet état.

Des neutrons isolés, qui possèdent un moment magnétique dipolaire, ont aussi été maintenus dans des bouteilles magnétiques de cette manière, jusqu'à ce qu'ils se désintègrent. Récemment, des scientifiques ont fait léviter des morceaux de bois, du plastique, des fraises, des gouttelettes d'eau, des gouttelettes d'hélium liquide de 2 cm, des sauterelles, des poissons et des grenouilles (tous en vie et sans subir la moindre dou-

Défi 173 pe

Défi 174 e

Réf. 118

Réf. 115

Réf. 119

leur) de cette manière. Ils sont tous constitués, comme les êtres humains, de matériau diamagnétique. Les hommes eux-mêmes n'ont pas encore été mis en lévitation, mais cet exploit est planifié et les efforts pour y parvenir redoublent.

Défi 175 pe Les diamagnétiques lèvent si $\nabla B^2 > 2\mu_0\rho g/\chi$, où ρ est la masse volumique de l'objet et $\chi = 1 - \mu/\mu_0$ sa susceptibilité magnétique. Puisque χ est typiquement de 10^{-5} environ et ρ de l'ordre de $1\,000\text{ kg/m}^3$, des gradients de champ d'environ $1\,000\text{ T}^2/\text{m}$ sont nécessaires. Autrement dit, la lévitation requiert des variations de champ de 10 T sur 10 cm , ce qui est de nos jours courant pour les aimants de laboratoire à champ puissant.

Réf. 113 Finalement, les champs électriques ou magnétiques *variables dans le temps*, par exemple les champs périodiques, peuvent engendrer la lévitation de plusieurs manières distinctes sans aucune consommation d'énergie. C'est une des méthodes employées dans l'orientation magnétique des pompes à vide turbomoléculaires. Dorénavant, des particules chargées seules, telles que des ions et des électrons, sont également mises quotidiennement en lévitation à l'aide de pièges de Paul et de pièges de Penning. L'analogie mécanique est indiquée sur la Figure 81.

Réf. 121 La Figure 82 montre un jouet qui vous permet personnellement de faire léviter une toupie en l'air au-dessus d'un aimant en anneau. C'est une démonstration plutôt impressionnante de la lévitation pour quiconque l'observe. Il n'est pas difficile de construire soi-même un tel dispositif.

Réf. 122 Nous pouvons même faire léviter des électrons libres, en les laissant flotter au-dessus de la surface de l'hélium fluide. En 1995, pendant la période la plus exaltante de la science de la lévitation, Stephen Haley a prédit que la suspension en hauteur de petites particules magnétiques au-dessus d'un anneau supraconducteur devrait être quantifiée. Cependant, cette prédiction n'a pas encore été vérifiée par l'expérience.

Page ?? Afin d'être exhaustif, nous mentionnons que les forces nucléaires ne peuvent pas être utilisées pour la lévitation dans la vie courante, puisque leur domaine d'action est restreint à quelques femtomètres. Cependant, nous verrons plus tard que la matière à la surface du Soleil est entravée dans sa chute vers le cœur par ces interactions; nous pourrions ainsi dire qu'elle est vraiment mise en lévitation par des interactions nucléaires.

MATIÈRE, LÉVITATION ET EFFETS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Défi 176 s La lévitation employée par les prestidigitateurs tombe principalement dans une autre catégorie. Lorsque David Copperfield, un magicien qui faisait des spectacles devant la génération MTV à la fin du vingtième siècle, « vole » au cours de ses démonstrations, il le fait parce qu'il est suspendu à de minces fils de pêche rendus invisibles par des arrangements astucieux de l'éclairage. (Comment pouvons-nous le vérifier?) En fait, si nous voulons être précis, nous devrions considérer les fils de pêche, les sacs en plastique ainsi que chaque table et chaise comme des dispositifs de lévitation. (Les journalistes de la presse à sensation les appelleraient même des dispositifs d'« anti-gravité ».) Contrairement à notre première impression, un objet suspendu ou allongé n'est pas réellement en contact avec l'objet qui le maintient, si nous scrutons attentivement les points de contact avec un microscope*. Nous en saurons plus à ce propos dans la partie quantique de notre excursion.

Défi 177 pe * Ce problème est loin d'être simple : laquelle des méthodes de lévitation décrites ci-dessus est-elle utilisée par les tables ou les chaises ?

Mais si c'est le cas, pourquoi ne tombons-nous pas à travers une table ou à travers le plancher ? Nous avons commencé l'étude de la mécanique en stipulant qu'une propriété clé de la matière est sa *solidité*, c'est-à-dire l'impossibilité d'avoir plus d'un corps au même endroit en même temps. Mais quelle est l'origine de la solidité ? À nouveau, nous pourrions répondre à cette question seulement dans la partie quantique de notre prochaine aventure, mais nous pouvons d'ores et déjà en rassembler les premiers indices.

Page ??

La solidité est due à l'électricité. De nombreuses expériences indiquent que la matière est constituée de particules chargées. En fait, la matière peut être déplacée et influencée par des champs électromagnétiques de plusieurs façons différentes. Au fil des ans, les

Réf. 124

Défi 178 r

spécialistes de la matière ont élaboré une longue liste de tels effets, lesquels sont tous fondés sur l'existence de composants chargés. Pouvez-vous en découvrir ou en imaginer un nouveau ? Par exemple, la charge électrique peut-elle modifier la couleur des objets ?

TABLEAU 14 Sélection de propriétés matérielles reliées à l'électromagnétisme, révélant entre autres le rôle qu'il joue dans la composition de la matière et, à cette occasion, bref survol de la physique atomique, de l'état solide, des fluides et du commerce.

PROPRIÉTÉ	EXEMPLE	DÉFINITION
rayonnement thermique ou rayonnement de chaleur ou incandescence	chaque objet	rayonnement dépendant de la température émise par toute quantité macroscopique de matière
Interactions avec les charges et les courants		
électrification	distinction entre les métaux et les isolants	chargement spontané
électricité statique	verre frotté sur la fourrure d'un chat	chargement par frottement
lumière barométrique	mercure glissant le long du verre	décharge du gaz due à l'électricité statique Réf. 125
isolation	air	aucune circulation de courant en deçà d'une différence critique de tension
semi-conductivité	diamant, silicium ou arséniure de gallium	circulation de courant uniquement lorsque le matériau est impur (« dopé »)
conductivité	cuivre, métaux	le courant circule facilement
supraconductivité	niobium	le courant circule sans aucune résistance
ionisation	flammes du feu	le courant circule facilement
localisation (faible, d'Anderson)	solides désordonnés	résistance des solides désordonnés
résistivité, effet Joule	graphite	réchauffement dû à la circulation du courant
effets thermoélectriques : effet Peltier, effet Seebeck, effet Thomson	ZnSb, PbTe, PbSe, BiSeTe, Bi ₂ Te ₃ , etc.	refroidissement dû à la circulation du courant, circulation du courant dû à une différence ou à des gradients de température
effet acoustoélectrique	CdS	génération de son par des courants et vice versa

PROPRIÉTÉ	EXEMPLE	DÉFINITION
magnétorésistance	fer, multicouches métalliques	variations de la résistance avec le champ magnétique appliqué Réf. 126
recombinaison	alarmes d'incendie	des porteurs de charge se combinent pour produire des atomes ou des molécules neutres
annihilation	tomographie par émission de positrons	particule et antiparticule, ex. électron et positron, disparaissent en photons
effet Penning	Ne, Ar	ionisation par le biais de collisions avec des atomes métastables
effet Richardson, émission thermique	BaO ₂ , W, Mo, utilisé dans les téles et les microscopes électroniques	émission d'électrons à partir des métaux chauds
effet de peau	Cu	forte densité de courant en surface des conducteurs
effet de pincement	InSb, plasmas	forte densité de courant à l'intérieur des conducteurs
effet Josephson	Nb-Oxyde-Nb	un passage de courant circule à travers un isolant placé entre deux supraconducteurs
effet Sasaki-Shibuya	n-Ge, n-Si	anisotropie de la conductivité due à l'application d'un champ électrique
magnétisme commutable	InAs :Mn	aimantation commutable en fonction de la tension Réf. 127
Interactions avec les champs magnétiques		
effet Hall	silicium, utilisé pour les mesures de champ magnétique	tension perpendiculaire au courant dans un champ magnétique appliqué
effet Zeeman	Cd	modification de la fréquence d'émission par le champ magnétique
effet Paschen-Back	gaz atomiques	modification de la fréquence d'émission dans des champs magnétiques puissants
ferromagnétisme	Fe, Ni, Co, Gd	aimantation spontanée, matériau fortement attiré par des champs magnétiques
paramagnétisme	Fe, Al, Mg, Mn, Cr	aimantation induite parallèle au champ appliqué, matériau attiré par les champs magnétiques
diamagnétisme	eau, Au, graphite, NaCl	aimantation induite opposée au champ appliqué, matériau repoussé par les champs magnétiques
magnétostriction ou piézomagnétisme	CeB ₆ , CePd ₂ Al ₃	modification de la forme ou du volume par l'application d'un champ magnétique
effet magnétoélastique	Fe, Ni	variation de l'aimantation par la tension ou la pression

PROPRIÉTÉ	EXEMPLE	DÉFINITION
effet acoustomagnétique	alliages métalliques, étiquettes anti-vol	excitation d'oscillations mécaniques par le champ magnétique
effet vanne de spin	multicouches métalliques	la résistance électrique dépend de la direction du spin des électrons par rapport au champ magnétique appliqué
activité magnéto-optique ou effet Faraday ou rotation de Faraday	verre flint	l'angle de polarisation tourne avec le champ magnétique, indice de réfraction différent pour la lumière de polarisation circulaire droite et gauche, comme dans l'enregistrement magnéto-optique (MO)
dichroïsme magnétique circulaire	gaz	absorption différente pour la lumière de polarisation circulaire droite et gauche, essentiellement identique à l'effet précédent
effet Majorana	colloïdes	effet magnéto-optique particulier
effet photoélectromagnétique	InSb	le courant circule grâce à l'exposition à la lumière de semiconducteurs dans un champ magnétique
effet Voigt	vapeurs	biréfringence induite par l'application d'un champ magnétique
effet Cotton–Mouton	liquides	biréfringence induite par l'application d'un champ magnétique
effet Hanle	Hg	modification de la polarisation de la fluorescence avec le champ magnétique
effet Shubnikov–de Haas	Bi	variation périodique de la résistance par l'application d'un champ magnétique
effets thermomagnétiques : effet Ettinghausen, effet Righi–Leduc, effet Nernst, effet magnéto–Seebeck	alliages BiSb	corrélation entre la température, les champs appliqués et le courant électrique
effet Ettinghausen–Nernst	Bi	apparition du champ électrique dans des matériaux ayant des gradients de température dans des champs magnétiques
effet Hall photonique	CeF ₃	l'intensité lumineuse transversale dépend du champ magnétique appliqué Réf. 128
effet magnétocalorique	gadolinium, alliages GdSiGe	le matériau se refroidit lorsque le champ magnétique est interrompu Réf. 129
résonance cyclotron	semi-conducteurs, métaux	absorption sélective d'ondes radio dans des champs magnétiques
effet magnétoacoustique	semi-conducteurs, métaux	absorption sélective d'ondes sonores dans des champs magnétiques

PROPRIÉTÉ	EXEMPLE	DÉFINITION
résonance magnétique	la majorité des matériaux ; utilisé par l'imagerie en médecine pour la détermination de la structure des molécules	absorption sélective d'ondes radio dans des champs magnétiques
effet magnétorhéologique	liquides ; employé dans les suspensions des modèles haut de gamme des voitures	modification de la viscosité avec l'application d'un champ magnétique
effet Meissner	supraconducteurs de type 1 ; utilisé pour la lévitation	exclusion totale de tout champ magnétique des supraconducteurs

Interactions avec les champs électriques

polarisabilité	toute la matière	modification de la polarisation avec le champ électrique appliqué
ionisation, émission de champ, effet Schottky	toute la matière, télé	des charges sont extraites sous des champs puissants
paraélectricité	BaTiO ₃	l'application d'un champ entraîne une polarisation dans la même direction
diélectricité	eau	dans la direction opposée
ferroélectricité	BaTiO ₃	polarisation spontanée en dessous d'une température critique
piézoélectricité	l'allume-gaz à quartz utilisé dans la cuisine, os humains	une polarisation apparaît avec la tension, la contrainte ou la pression
électrostriction	éponges de platine dans des acides	modification de la forme avec la tension appliquée Réf. 130
pyroélectricité	CsNO ₃ , tourmaline, cristaux ayant des axes polaires ; utilisé pour la détection infrarouge	le changement de température engendre une séparation des charges
électro-osmose ou effet électrocinétique	de nombreux liquides ioniques	le liquide se déplace sous l'influence d'un champ électrique Réf. 131
électromouillage	solutions salées sur de l'or	le mouillage de surface dépend de la tension appliquée
action électrolytique	acide sulfurique	transport de charges à travers un liquide
effet des cristaux liquides	affichage des montres	les molécules tournent avec le champ électrique appliqué
action électro-optique : effet Kerr, effet Pockels	liquides (ex. l'huile), solides cristallins	un matériau dans un champ électrique fait tourner la polarisation lumineuse, c.-à-d. produit la biréfringence
effet Freederichsz, effet Schadt-Helfrichs	cristaux liquides nématiques	biréfringence électriquement induite

PROPRIÉTÉ	EXEMPLE	DÉFINITION
effet Stark	hydrogène, mercure	changement de couleur de la lumière émise dans un champ électrique
ionisation de champ	hélium près des pointes de tungstène dans un microscope ionique à émission de champ	ionisation des atomes du gaz dans des champs électriques puissants
effet Zener	Si	transfert d'énergie nulle des électrons dans la bande de conduction sous l'action de champs puissants
évaporation de champ	W	évaporation par l'application de champs électriques puissants

Interactions avec la lumière

absorption	charbon, graphite	transformation de la lumière en chaleur ou d'autres formes d'énergie (lesquelles ?) Défi 179 s
noirceur	charbon, graphite	absorption complète dans le domaine visible
couleur, éclat métallique	rubis	absorption dépendant de la fréquence lumineuse
photostriction	PbLaZrTi	piézoélectricité induite par la lumière
photographie	AgBr, AgI	la lumière précipite l'argent métallique
photoélectricité, effet photo	Cs	des courants circulent dans le vide par irradiation lumineuse
effet photoélectrique interne	jonction p-n Si, cellules photovoltaïques	production d'une tension et d'une circulation de courant par l'exposition à la lumière
effet d'entraînement par photon	p-Ge	courant induit par la quantité de mouvement des photons
émissivité	tous les corps	aptitude à émettre de la lumière
transparence	verre, quartz, diamant	faible réflexion, faible absorption, faible diffusion
réflectivité	métaux	la lumière rebondit sur la surface
polarisation	feuilles de polymère tirées	la transmission de la lumière dépend de l'angle de polarisation
action optique	sucres dissous dans l'eau, quartz	rotation de la polarisation
biréfringence	calcite, cornée	l'indice de réfraction dépend de la direction de polarisation, les rayons lumineux sont séparés en deux faisceaux
dichroïsme	acides aminés, andalousite	l'absorption dépend de la polarisation circulaire
anisotropie optiquement induite, effet Weigert	AgCl	biréfringence et dichroïsme optiquement induits

PROPRIÉTÉ	EXEMPLE	DÉFINITION
génération de seconde harmonique	LiNbO ₃ , KPO ₄	lumière partiellement transformée en une fréquence double
luminescence : terme général opposé à l'incandescence	GaAs, télé	émission de lumière froide
fluorescence	CaF ₂ , production de rayons X, conduits de lumière, tubes cathodiques	émission de lumière pendant et après l'absorption de lumière ou d'une autre source d'énergie
phosphorescence	TbCl ₃	émission de lumière due à un apport d'énergie lumineuse, électrique ou chimique, persistant <i>longtemps après</i> le stimulus
électroluminescence	ZnS	émission de lumière due à un champ électrique alternatif
photoluminescence	ZnS : Cu, SrAlO ₄ : Eu, Dy, hyamine	émission de lumière déclenchée par la lumière UV ; utilisée dans la signalisation de sécurité
chimiluminescence	H ₂ O ₂ , ester phenyl oxalate, teinture	émission de lumière froide utilisée dans les tubes fluorescents pour les plongeurs et pour se divertir
bioluminescence	ver luisant, poisson abyssal	émission de lumière froide chez les animaux
triboluminescence	sucre	émission de lumière pendant le frottement ou la cassure
thermoluminescence	quartz, feldspath	émission de lumière pendant le réchauffement, utilisée par exemple pour la datation archéologique des poteries Réf. 132
bremsstrahlung ou rayonnement continu de freinage ou rayonnement blanc	production de rayons X	émission de rayonnement par des électrons en ralentissement rapide
effet Compton	mesure de la quantité de mouvement	variation de la longueur d'onde de la lumière, en particulier des rayons gamma et X, entrant en collision avec la matière
effet Čerenkov	eau, détecteurs de particules, polymères	émission de lumière dans un milieu due aux particules, émises par exemple par des processus radioactifs, se déplaçant plus vite que la vitesse de la lumière dans ce milieu
rayonnement de transition	tout matériau	émission de lumière due à des particules relativistes passant d'un milieu à un autre, ayant un indice de réfraction différent
électrochromicité	wolframates	modification de couleur avec le champ électrique appliqué

PROPRIÉTÉ	EXEMPLE	DÉFINITION
diffusion	gaz, liquides	la lumière change de direction de propagation
diffusion de Mie	poussières dans les gaz	la lumière change de direction de propagation
diffusion de Rayleigh	ciel	la lumière change de direction de propagation, le ciel est bleu
effet Raman ou effet Smekal–Raman	gaz moléculaires	variation de fréquence de la lumière diffusée
action du laser, superradiation	bière, rubis, He–Ne	émission de rayonnement stimulé
sonoluminescence	air dans l'eau	émission de lumière pendant la cavitation
gravitoluminescence	n'existe pas, pourquoi ? Défi 180 s	
miroir commutable	LaH	une tension contrôlée permet de passer de la réflexion à la transparence Réf. 133
effet radiomètre	moulins à vent bicolores	le rayonnement fait tourner le moulin (voyez la page 94)
pression lumineuse	<i>idem</i>	le rayonnement fait tourner directement le moulin
effet de voile solaire	futurs satellites	mouvement engendré par le vent solaire
effet acousto-optique	LiNbO ₃	diffraction de la lumière par le son dans des matériaux transparents
matériaux photoréfractifs	LiNbO ₃ , GaAs, InP	l'irradiation lumineuse modifie l'indice de réfraction
effet Auger	spectroscopie Auger des électrons	émission d'électrons due à une réorganisation atomique après une ionisation par rayons X
réflexion de Bragg	détermination de la structure d'un cristal	diffraction des rayons X par des plans atomiques
effet Mößbauer	Fe ; utilisé en spectroscopie	absorption résonante sans recul du rayonnement gamma
création de paire	Pb	transformation d'un photon en une paire particule–antiparticule chargée
photoconductivité	Se, CdS	changement de la résistivité avec l'irradiation lumineuse
effet optoacoustique, effet photoacoustique	gaz, solides	création de son provoquée par l'absorption de lumière pulsée
effet optogalvanique	plasmas	modification du courant de décharge due à l'irradiation lumineuse
effets optiques non linéaires : amplification paramétrique, mélange de fréquence, absorption saturable, génération de n -ième harmonique, effet Kerr optique, etc.		
action de miroir à conjugaison de phase	gaz	réflexion de la lumière avec une phase opposée

PROPRIÉTÉ	EXEMPLE	DÉFINITION
Propriétés matérielles		
solidité, impénétrabilité	sols, piliers, cordes, seaux	un objet, au plus, par emplacement à un instant donné
Interactions avec le vide		
effet Casimir	métaux	attraction des corps conducteurs non chargés

Toutes les propriétés matérielles présentées dans la liste peuvent être influencées par des champs électriques ou magnétiques, ou dépendent directement d'eux. Cela révèle que toutes ces propriétés matérielles sont de nature électromagnétique. Autrement dit, les charges et leurs interactions constituent une partie essentielle et fondamentale de la structure des objets. Le tableau montre tant de propriétés électromagnétiques différentes que le mouvement des charges à l'intérieur de chaque matériau doit, en vérité, être complexe. La plupart des effets relèvent du domaine de la physique de l'état solide*, des fluides et de la physique des plasmas.

La physique de l'état solide est de loin la branche la plus importante de la physique, lorsque nous la mesurons par l'impact qu'elle a sur la société. Pratiquement tous les effets ont des applications dans des produits techniques, et permettent d'employer de nombreuses personnes. Pouvez-vous citer un produit ou une application commerciale pour n'importe quel effet choisi au hasard dans ce tableau ?

Toutefois, dans notre ascension montagnaise nous n'analyserons qu'un exemple tiré de la liste précédente : le rayonnement thermique, l'émission de lumière par des corps chauds.

Le théorème d'Earnshaw sur l'impossibilité de l'existence d'un équilibre stable pour des particules chargées au repos implique que les charges situées à l'intérieur de la matière doivent vraiment être *en mouvement*. Pour chaque particule chargée en mouvement, les équations de Maxwell pour le champ électromagnétique montrent qu'elle diffuse de l'énergie sous forme de rayonnement en émettant des ondes électromagnétiques. En bref, la mécanique classique prédit ainsi que la matière doit rayonner de l'énergie électromagnétique.

De manière intéressante, chacun sait par expérience que c'est réellement le cas. Les corps chauds brillent en fonction de leur température, le fonctionnement des ampoules lumineuses démontre ainsi que les métaux sont constitués de particules chargées. L'*incandescence*, comme nous l'appelons, requiert des charges. En vérité, *tout* corps émet du rayonnement, même à température ambiante. Ce rayonnement est appelé *rayonnement thermique* ; à température ambiante il se situe dans l'infrarouge. Son intensité est plutôt faible dans la vie courante, elle est donnée par l'expression générale suivante

* L'ouvrage introductif, probablement le meilleur et certainement le plus divertissant, en langue anglaise sur le sujet est celui de NEIL ASHCROFT & DAVID MERMIN, *Solid State Physics*, Holt Rinehart & Winston, 1976.

$$I(T) = f T^4 \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \quad \text{ou} \quad I(T) = f \sigma T^4 \quad \text{avec} \quad \sigma = 56,7 \text{ nW/K}^4 \text{m}^2, \quad (70)$$

où f représente un facteur dépendant du matériau, de la forme et de la température, ayant une valeur située entre zéro et un, et est appelé l'*émissivité*. La constante σ est appelée la *constante de rayonnement de corps noir de Stefan-Boltzmann* ou *constante de rayonnement de corps noir*. Un corps dont l'émissivité est donnée par le cas parfait $f = 1$ est appelé un *corps noir*, parce qu'à température ambiante un tel corps possède également un coefficient d'absorption idéal, et paraît donc noir. (Pouvez-vous deviner pourquoi ?) Le rayonnement de chaleur qu'un tel corps émet est appelé *rayonnement de corps noir*.

Défi 182 s

Réf. 135

Défi 183 s

Par ailleurs, lequel de ces objets rayonne-t-il le plus d'énergie : un corps humain ou un échantillon représentatif de même masse du Soleil ? Devinez d'abord !

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LES EFFETS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

« À l'intérieur d'un conducteur, il n'y a pas de champ électrique. » Cette affirmation est fréquemment formulée. En fait, cette vérité n'est pas aussi évidente. Premièrement, un champ *statique* ou une charge *statique* à la surface d'un corps métallique n'influence pas les champs et les charges situés à l'intérieur. Une surface métallique fermée forme donc un bouclier vis-à-vis d'un champ électrique. Pouvez-vous en fournir une explication ? En fait, une mince couche métallique n'est pas nécessaire pour reproduire cet effet, une cage est suffisante. Nous parlons alors de *cage de Faraday*.

Défi 184 s

Le détail de ce mécanisme vous permet de répondre à la question suivante : les cages de Faraday pour la gravité existent-elles ? Pourquoi ?

Pour des champs externes ou des charges *mobiles*, ce problème est plus complexe. Les champs dus à des charges accélérées – des champs rayonnants – décroissent exponentiellement à travers un bouclier. Les champs engendrés par des charges en mouvement à vitesse constante sont fortement diminués, mais ne disparaissent pas. La réduction dépend de l'épaisseur et de la résistivité de la clôture métallique employée. Pour des feuillettes métalliques, la suppression du champ est très forte, elle n'est pas nécessairement forte pour du plastique pulvérisé de métal. Un tel dispositif ne résisterait pas forcément à un coup de foudre proche.

Réf. 90

En pratique, il n'y a aucun danger si la foudre frappe un avion ou une voiture, à condition qu'ils soient en métal. (Il y a un film sur Internet qui montre une voiture frappée par la foudre, son conducteur ne s'en aperçoit même pas.) Cependant, si votre véhicule est touché par un éclair par temps sec, vous devrez patienter quelques minutes avant d'en sortir. Pouvez-vous imaginer pourquoi ?

Les cages de Faraday fonctionnent aussi dans l'autre sens. Des champs électriques variant (lentement) situés à l'intérieur d'une cage de Faraday ne sont pas détectés à l'extérieur. Pour cette raison, les radios, les téléphones portables et les ordinateurs sont entourés par des boîtes faites de métal ou de plastique pulvérisé de métal. Le métal permet de restreindre au minimum ce que nous appelons le *brouillard électromagnétique*.

Il existe donc trois bonnes raisons d'isoler les appareils électriques par un bouclier relié à la terre : pour protéger l'appareil des champs extérieurs, pour protéger les gens et les autres machines du brouillard électromagnétique et pour protéger les utilisateurs de la tension du réseau électrique qui serait accidentellement mise en contact dans la

boîte (par exemple, lorsque l'isolation est défectueuse). Dans des expériences de haute précision, ces trois fonctions peuvent être mises en œuvre par trois cages distinctes.

Pour des champs purement magnétiques, la situation est plus complexe. Il est plutôt difficile de protéger l'intérieur d'une machine des champs magnétiques externes. Comment le feriez-vous ? En pratique, nous utilisons souvent des couches de *mu-métal* ; pouvez-vous deviner comment ce matériau agit ?

Défi 185 pe

* *

Réf. 91 Des chercheurs tentent de déceler la dégénérescence des dents à l'aide de courants électriques, en tirant profit du fait que les dents saines sont de mauvais conducteurs, contrairement aux dents abîmées. Comment tireriez-vous profit de cet effet dans cette situation ? (Par ailleurs, il se pourrait que la technique absolument sans rapport de l'imagerie par des ondes térahertz puisse conduire à des résultats similaires.)

Défi 186 pe

* *

Les os humains sont piézoélectriques : ils produisent des signaux électriques lorsqu'ils subissent une contrainte. Lorsque nous nous déplaçons et lorsque nous grandissons, les signaux électriques sont utilisés par le corps pour consolider les os dans les régions qui en ont besoin. La piézoélectricité du squelette contrôle et guide ainsi sa croissance. Cette relation est également mise à profit pour permettre aux os fracturés de se cicatrifier plus rapidement : en appliquant des champs magnétiques *pulsés* sur un os fracturé, la cicatrisation est stimulée et accélérée. (Les champs magnétiques statiques ne fonctionnent évidemment pas dans cette situation.) Les dents également sont piézoélectriques, et cet effet joue un rôle dans leur croissance.

* *

Nous pouvons nous procurer dans le commerce des appareils piézoélectriques – similaires à un allume-gaz – qui sont appliqués sur les piqûres de moustique et dont on prétend qu'ils réduisent les démangeaisons et même les enflures. (Certains produits s'appellent « Zanza-click » et « Skeeter-click ».) Cela peut-il être vrai ?

Défi 187 e

* *

Une équipe de cameramen située au milieu du Sahara a utilisé des équipements électriques alimentés par des batteries pour réaliser des enregistrements sonores. À chaque fois que le câble du microphone faisait quelques dizaines de mètres de long, ils entendaient aussi un bruit de fond d'alimentation électrique de 50 Hz, bien que le transformateur électrique le plus proche fût éloigné de plusieurs milliers de kilomètres. Une enquête révéla que les lignes à haute tension en Europe perdent une quantité considérable de puissance par rayonnement. Ces ondes de 50 Hz sont réfléchies par l'ionosphère autour de la Terre et peuvent donc perturber des enregistrements ayant lieu au milieu du désert. Pouvez-vous estimer si cette observation implique qu'il est dangereux de vivre directement à proximité d'une ligne à haute tension ?

Défi 188 s

* *

Lorsque des tempêtes de plasma solaire sont observées sur notre étoile, les astronomes téléphonent d'abord aux compagnies électriques. Ils savent qu'à peu près 24 à 48 heures

plus tard les particules chargées éjectées par les tempêtes parviendront sur la Terre, faisant vaciller le champ magnétique situé en surface. Puisque le réseau électrique possède souvent des boucles fermées de plusieurs milliers de kilomètres, des courants électriques supplémentaires sont induits, lesquels peuvent faire surchauffer les transformateurs situés dans le réseau, et les faire sauter. D'autres transformateurs doivent alors prendre en charge la puissance supplémentaire, ce qui peut provoquer leur surchauffe et ainsi de suite. À plusieurs reprises par le passé, des millions de gens se sont retrouvés sans courant électrique à cause des tempêtes solaires. Aujourd'hui, les compagnies d'électricité esquivent ce problème en déconnectant les diverses sections du réseau, en évitant d'avoir de vastes boucles, en réduisant la tension domestique pour éviter la saturation des transformateurs, et en rejetant tout transfert de charge des circuits défaillants vers les autres.

* *

Réf. 93 Si le champ électrique est décrit comme une somme de composantes de différentes fréquences, que nous dénommons les *composantes de Fourier*, les amplitudes sont données par

$$\hat{E}(k, t) = \frac{1}{(2\pi)^3/2} \int E(x, t) e^{-ikx} d^3x \quad (71)$$

et il en est de même pour le champ magnétique. Il apparaît alors qu'une quantité N invariante sous la transformation de Lorentz, décrivant l'énergie par fréquence circulaire ω , peut être définie :

$$N = \frac{1}{8\pi} \int \frac{|E(k, t)|^2 + |B(k, t)|^2}{c|k|} d^3k. \quad (72)$$

Défi 189 s Pouvez-vous deviner ce que N représente physiquement ? (Indice : pensez à la théorie quantique.)

* *

Faraday découvrit comment convertir le magnétisme en électricité, en sachant que l'électricité pouvait être transformée en magnétisme. (Ce problème est plus subtil. La loi de Faraday n'est pas le doublon de celle d'Ampère, puisque cela impliquerait l'utilisation de monopôles magnétiques ; elle n'est pas non plus la réciproque, puisqu'elle entraînerait alors l'existence du courant de déplacement. Mais il cherchait une relation et il trouva une manière de relier les deux observations – de façon innovante, comme cela nous est apparu.) Faraday découvrit également comment transformer l'électricité en lumière et comment l'utiliser en chimie. Il tenta alors de convertir la gravitation en électricité. Mais il n'y parvint pas. Pourquoi ?

Défi 190 pe

* *

Défi 191 s À haute altitude au-dessus de la Terre, les gaz sont complètement ionisés, aucun atome n'est neutre. Nous parlons alors de l'*ionosphère*, car l'espace est rempli d'ions positifs et d'électrons libres. Bien que ces deux charges apparaissent exactement dans la même proportion, un satellite qui traverse l'ionosphère acquiert une charge négative. Pourquoi ?

Comment ce chargement s'interrompt-il ?

* *

Défi 192 s Un condensateur de capacité C est chargé avec une tension U . L'énergie électrostatique emmagasinée est $E = CU^2/2$. Le condensateur est alors débranché de l'alimentation électrique et est relié à un condensateur vide de même capacité. Après un certain temps, la tension chute évidemment à $U/2$. Toutefois, l'énergie stockée est maintenant de $C(U/2)^2$, ce qui est la moitié de la valeur d'origine. Où l'énergie est-elle partie ?

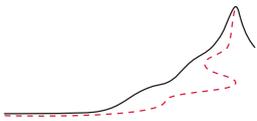
* *

Défi 193 pe La force maximale dans la nature restreint la charge maximale qu'un trou noir peut emporter. Pouvez-vous découvrir cette relation ?

* *

Défi 194 s Comment pouvez-vous donner à quelqu'un un choc électrique en utilisant une pile de 4,5 V et du fil métallique ?





CHAPITRE 6

TOUR D'HORIZON SUR L'ÉLECTRODYNAMIQUE CLASSIQUE ET SES LIMITES

Toute l'électrodynamique classique peut être résumée en trois principes :

- ▷ Les charges électriques exercent des forces sur les autres charges.
- ▷ Les charges électriques sont conservées.
- ▷ Les charges, comme toute la matière, se déplacent plus lentement que la lumière.

À partir de ces principes, nous pouvons retrouver toute l'électrodynamique. Celle-ci est ainsi bâtie sur la définition de la charge, sur la conservation de la charge et sur l'invariance de la vitesse de la lumière. En particulier, nous pouvons en déduire les propositions fondamentales qui suivent.

Réf. 22

- Le champ électromagnétique est une observable physique, comme le montrent par exemple les boussoles.
- Les sources du champ sont les charges (en mouvement), comme l'indiquent l'ambre, l'aimant naturel ou les télécommandes.
- Le champ électromagnétique modifie le mouvement des objets électriquement chargés par le biais de l'expression de Lorentz, comme le démontrent les générateurs électriques.
- Le champ peut exister dans l'espace vide et se déplacer dans celui-ci comme une onde, comme le révèlent, par exemple, les étoiles.
- Le champ se comporte comme une quantité continue et est décrit par les équations d'évolution de Maxwell, comme en témoignent, par exemple, les téléphones portables et les brosses à dents électriques.

Comme d'habitude, le mouvement des sources et du champ est réversible, continu, conservé et déterministe. Cependant, il y a pas mal de grain à moudre en perspective car, bien que cette description soit correcte dans la vie courante, au cours du reste de notre ascension montagnaise nous découvrirons que le dernier point doit être inexact. Un exemple simple le montre.

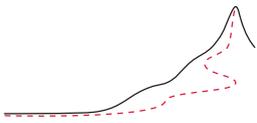
À une température de zéro kelvin, quand la matière ne rayonne plus thermiquement, nous notons la présence d'une situation paradoxale où les charges situées dans la matière ne peuvent pas bouger, puisque nous n'observons aucun rayonnement émis, mais elles ne peuvent pas non plus être au repos, à cause du théorème d'Earnshaw. En bref, la simple existence de la matière – avec ses valeurs discrètes de charge – démontre que l'électrodynamique classique est fautive.

Page 138

En réalité, la vue d'ensemble des propriétés matérielles du [Tableau 14](#) aboutit à la même conclusion de manière encore plus prononcée. L'électrodynamique classique peut décrire un grand nombre des effets listés, *mais elle ne peut pas expliquer l'origine de l'un*

quelconque d'entre eux. Même si quelques-uns des effets seront étudiés au cours de notre promenade – ils ne sont pas essentiels pour notre aventure –, les concepts généraux nécessaires pour leur description constitueront le sujet de la prochaine partie de cette ascension montagnaise, celle sur la théorie quantique.





CHAPITRE 7

LA PHYSIQUE CLASSIQUE DANS UNE COQUILLE DE NOIX

La description de la relativité générale et de l'électrodynamique classique achève notre déambulation à travers les sentiers de la physique classique. Afin de bien percevoir ses limitations, nous allons synthétiser ce que nous avons découvert. Dans la nature, nous avons appris à distinguer et à caractériser les objets, le rayonnement et l'espace-temps. Tous les trois peuvent bouger. Dans tout mouvement, nous discernons les propriétés intrinsèques, figées de celles relatives à un état variable. Tout mouvement se produit de telle sorte que le changement soit minimal.

Dans notre recherche de tous les aspects *figés et intrinsèques* des objets, nous avons remarqué que tous les objets suffisamment petits, ou les particules, sont entièrement décrits par leur masse et leur charge électrique. Il n'y a pas de charge magnétique. La masse et la charge électrique sont donc les uniques propriétés localisées intrinsèques des objets classiques, de la vie de tous les jours. La masse et la charge électrique sont toutes les deux définies par les accélérations qu'elles produisent autour d'elles. Ces deux quantités étant conservées, elles peuvent donc être additionnées. La masse, contrairement à la charge, est toujours positive. La masse décrit l'interaction des objets avec leur environnement, la charge l'interaction avec le rayonnement.

Tous les aspects *variables* des objets, c'est-à-dire leur état, peuvent être décrits en utilisant la quantité de mouvement et la position, ainsi que le moment cinétique et l'orientation. Tous peuvent varier continûment en grandeur et en direction. Par conséquent, l'ensemble de tous les états possibles forme un espace, dit *espace des phases*. L'état des objets étendus est donné par les états de toutes leurs particules constituantes. Ces particules composent tous les objets et interagissent, d'une façon ou d'une autre, de manière électromagnétique.

L'état d'une particule dépend de l'observateur. La notion d'état est utile pour évaluer le changement qui survient dans le mouvement. Pour une particule donnée, le changement est indépendant de l'observateur, mais les états ne le sont pas. Les états relevés par différents observateurs sont reliés : ces relations sont appelées les « lois » du mouvement. Par exemple, pour des instants différents, nous les appelons *équations d'évolution* ; pour des endroits et des orientations distincts, nous les appelons *relations de transformation* ; et pour des jauges différentes, nous les appelons *transformations de jauge*. Toutes ces lois peuvent être concentrées dans le principe de moindre action.

Nous observons également le mouvement d'une entité dénuée de masse : le *rayonnement*. Les types de rayonnements ordinaires, tels que la lumière, les ondes radio et leurs formes apparentées, sont des ondes électromagnétiques qui se propagent. Ils sont décrits par les mêmes équations que celles qui décrivent l'interaction des objets chargés

ou magnétiques. La vitesse des entités sans masse est la vitesse maximale possible dans la nature ; elle est la même pour tous les observateurs. Les *propriétés intrinsèques* du rayonnement sont sa relation de dispersion et sa relation énergie-moment cinétique. L'*état* du rayonnement est décrit par l'intensité de son champ électromagnétique, sa phase, sa polarisation et son couplage avec la matière. Le mouvement du rayonnement décrit le mouvement des images.

L'*environnement* spatio-temporel est décrit par les coordonnées d'espace et de temps. L'espace-temps peut également se mouvoir en modifiant sa courbure. Les propriétés intrinsèques de l'espace-temps sont le nombre de dimensions, sa signature et sa topologie. L'état est donné par la métrique, qui définit les distances et donc la distorsion locale. La distorsion peut osciller et se propager, de telle sorte qu'un espace vide peut se déplacer comme une onde.

Notre environnement possède un âge fini. Il témoigne d'une longue histoire et, aux grandes échelles, toute matière dans l'Univers s'éloigne du reste de la matière. La topologie à très grande échelle de notre environnement est absconse, tout comme ce qui se passe près de ses frontières spatiales et temporelles demeure impénétrable.

Le *mouvement* découle d'une règle élémentaire : le changement est toujours aussi minime que possible. Cela s'applique à la matière, au rayonnement et à l'espace-temps. Toute énergie se déplace de la manière dictée par l'espace-temps, et l'espace se meut selon ce que l'énergie lui dicte. Cette relation décrit le mouvement des étoiles, des pierres lancées en l'air, des rayons lumineux et des marées. Le repos et la chute libre sont une seule et même chose, et la gravité est l'espace-temps courbe. La masse brise la symétrie conforme et donc distingue l'espace du temps.

La limite supérieure de la vitesse de l'énergie et de la masse est une constante universelle c , et la limite supérieure de la variation de l'énergie par unité de temps est une constante universelle $c^5/4G$. La valeur de la vitesse c est atteinte par le mouvement des particules sans masse. Elle relie également l'espace au temps. La valeur de la puissance $c^5/4G$ est réalisée par les horizons. Nous les rencontrons autour des trous noirs et à la frontière du cosmos. Cette valeur relie aussi la courbure de l'espace-temps au flux d'énergie, et décrit ainsi l'élasticité de l'espace-temps.

Deux objets ne peuvent pas se trouver au même endroit en même temps. C'est la première affirmation à laquelle les hommes ont été confrontés à propos de l'électromagnétisme. Des recherches plus précises montrent que la charge électrique accélère d'autres charges, que celle-ci est nécessaire pour définir les intervalles de longueur et de temps, et que les charges représentent la source des champs électromagnétiques. La lumière aussi constitue un tel champ. La lumière voyage à la vitesse maximale possible. Contrairement aux objets, la lumière peut s'interpénétrer. En résumé, nous avons appris que des deux types élémentaires de mouvement des objets, à savoir le mouvement causé par la gravité – ou par la courbure de l'espace-temps – et le mouvement engendré par le champ électromagnétique, seul le dernier est authentique.

Par-dessus tout, la physique classique nous a montré que le mouvement, qu'il soit en translation ou en rotation, qu'il concerne celui de la matière, du rayonnement ou de l'espace-temps, est conservé. Le mouvement est continu. Plus que cela, le mouvement est analogue à une substance continue : il n'est jamais détruit, jamais créé, mais toujours redistribué. À cause de la conservation, tout mouvement, celui des objets, des images et de l'espace vide, est prévisible et réversible. Grâce à la conservation du mouvement, le

temps et l'espace peuvent être définis. De surcroît, nous avons découvert que le mouvement classique vérifie également la symétrie droite-gauche. La physique classique nous a révélé que le mouvement est prévisible : il n'y a *pas* de surprises dans la nature.

L'AVENIR DE LA PLANÈTE TERRE

La nature ne révèle peut-être pas de surprises, mais elle suscite toujours de nombreuses frayeurs. Le 8 mars 2002, un corps d'une taille de 100 m s'est approché très près de la Terre. Il a frôlé notre planète à une distance de 450 000 km seulement. Si l'impact avait eu lieu, il aurait pulvérisé une région de la taille de Londres. Quelques mois auparavant, un corps de 300 m manqua la Terre à 800 000 km près. En 1994, un corps s'est approché à 100 000 km de notre planète, mais le record s'est produit le 2 mars 2009 : 2009 DD₄₅ est un petit astéroïde qui est passé à proximité de la Terre à une altitude de 63 500 km seulement*. Nous pouvons prévoir plusieurs autres événements par la physique classique, comme indiqué dans le **Tableau 15**. Nombre d'entre eux sont des problèmes que l'humanité devra affronter dans un avenir lointain, mais certains, comme les éruptions volcaniques ou les impacts d'astéroïdes, peuvent survenir à n'importe quel moment. Ils font tous l'objet de recherches actives.

Réf. 139

TABLEAU 15 Exemples de mouvements catastrophiques d'importance future probable.

SITUATION CRITIQUE	ÉCHÉANCE EN AN - NÉES
Fin de la physique fondamentale	env. 30 (autour de l'an 2030)
Tsunami géant provenant d'une éruption volcanique des Îles Canaries	env. 10-200
Accident majeur dû à l'utilisation de matériaux ou d'armes nucléaires	inconnue
Diminution de la couche d'ozone	env. 100
Mini âge glaciaire dû à la disparition du Gulf Stream	inconnue
Élévation du niveau des océans due au réchauffement climatique	env. 100-1000
Fin de la physique appliquée	> 200
Explosion de volcan au Groenland, provoquant un obscurcissement prolongé du ciel	inconnue
Instabilité du manteau terrestre entraînant une intense activité volcanique	inconnue
Plusieurs pôles magnétiques nord et sud surgissent, laissant les tempêtes solaires perturber les communications radio et les télécommunications, couper les réseaux électriques, augmenter les mutations animales et désorienter les animaux migrants comme les baleines, les oiseaux et les tortues	env. 800
Notre nuage de gaz interstellaire se détache du Système solaire, modifiant la taille de l'héliosphère, et nous exposant ainsi de manière accrue aux champs magnétiques du Soleil et des aurores	env. 3 000

* Les pages Web sur cfa-www.harvard.edu/iau/lists/Closest.html fournissent plus d'informations sur de tels événements.

SITUATION CRITIQUE	ÉCHÉANCE EN AN - NÉES
Inversion du champ magnétique de la Terre, impliquant la présence d'une période essentiellement sans champ magnétique, avec des niveaux accrus de rayonnement cosmique et donc plus de cancers de la peau et de fausses couches	inconnue
Appauvrissement de l'oxygène atmosphérique dû à la réduction de la couverture forestière et à la consommation exagérée de carburant	> 1 000
Prochain âge glaciaire	env. 15 000
Collision probable avec un nuage de gaz interstellaire qu'on suppose être traversé par la Terre tous les 60 millions d'années, causant peut-être des extinctions massives	env. 50 000
Explosion du volcan de Yellowstone ou d'un autre volcan géant engendrant un hiver volcanique d'un an	0 à 100 000
Dégénérescence génétique possible d' <i>Homo sapiens</i> due à une diminution du chromosome Y	env. 200 000
L'Afrique entre en collision avec l'Europe, transformant la Méditerranée en un lac qui commence à s'évaporer	autour de $3 \cdot 10^6$
Sursauts gamma provenant de l'intérieur de notre galaxie, dont les rayonnements provoquent des dommages aux nombreux êtres vivants	entre 0 et $5 \cdot 10^6$
Astéroïde heurtant la Terre, engendrant des tsunamis, des tempêtes, un assombrissement de la lumière du jour, etc.	entre 0 et $50 \cdot 10^6$
Rapprochement d'une étoile voisine, déclenchant un déluge de comètes, à travers la déstabilisation du nuage d'Oort, et mettant ainsi en péril la vie sur Terre	> 10^6
Le continent américain heurte l'Asie	> $100 \cdot 10^6$
Un nuage moléculaire engloutit le Système solaire	inconnue
Instabilité du Système solaire	> $100 \cdot 10^6$
Une faible teneur en CO ₂ dans l'atmosphère stoppe la photosynthèse	> $100 \cdot 10^6$
Collision de la Voie lactée avec un amas stellaire ou une autre galaxie	> $150 \cdot 10^6$
Le Soleil vieillit et devient de plus en plus brûlant, faisant évaporer les océans	> $250 \cdot 10^6$
Le niveau des océans augmente à cause du ralentissement ou de la fin de la rotation de la Terre (si elle ne s'évapore pas avant)	> 10^9
La température s'élève ou chute (en fonction du lieu) à cause de la fin de la rotation de la Terre	> 10^9
Le Soleil n'a plus de carburant, devient une géante rouge, engloutit la Terre	$5,0 \cdot 10^9$
Le Soleil cesse de brûler, devient une naine blanche	$5,2 \cdot 10^9$

SITUATION CRITIQUE	ÉCHÉANCE EN AN - NÉES
Le noyau de la Terre se solidifie, faisant disparaître le champ magnétique et donc le bouclier terrestre contre le rayonnement cosmique	$10,0 \cdot 10^9$
Une nova proche (par ex. Bételgeuse) baigne la Terre d'un rayonnement d'annihilation	inconnue
Une supernova proche (par ex. Éta Carinae) souffle le Système solaire	inconnue
Le centre galactique déstabilise le reste de la galaxie	inconnue
L'Univers s'effondre – si jamais cela se produit (regardez la page 123)	$> 20 \cdot 10^9$
La matière se désintègre en rayonnement – si jamais cela arrive (regardez l'Annexe ??)	$> 10^{33}$
Problèmes avec les singularités nues	inconnue, controversée
Le vide devient instable	inconnue, controversée

Malgré la fascination que suscitent ces prédictions, nous laissons de côté ces problèmes littéralement phénoménaux et nous poursuivons notre aventure.

L'ESSENCE DE LA PHYSIQUE CLASSIQUE – L'INFINIMENT PETIT ET L'ABSENCE DE SURPRISES

Nous pouvons résumer la physique classique en deux propositions élémentaires : premièrement, *la physique classique est la description du mouvement qui utilise la notion de l'infiniment petit* ; deuxièmement, *la nature manque de surprises*.

Tous les concepts employés jusqu'à présent, que ce soit pour le mouvement, l'espace, le temps ou les observables, supposent que l'infiniment petit existe. La relativité restreinte, en dépit de la vitesse limite, autorise toujours l'existence de vitesses infiniment petites. La relativité générale, malgré sa limite du trou noir, permet toujours l'existence de valeurs de puissance et de force infiniment petites. De manière similaire, dans la description de l'électrodynamique et de la gravitation, les intégrales et les dérivées sont toutes les deux des notations de procédures mathématiques qui font usage d'intervalles de distance et de temps infiniment petits. Autrement dit, la description classique de la nature introduit l'infiniment petit dans la description du mouvement.

En utilisant l'infiniment petit comme instrument de recherche, la description classique du mouvement révèle que l'énergie, la quantité de mouvement, le moment cinétique et la charge sont conservés. Ils sont également conservés dans le cas de dimensions ou de durées infiniment petites. Autrement dit, il n'y a pas de surprises dans le mouvement.

L'étude minutieuse de la conservation nous a conduits à une conclusion profonde : l'exploration de l'infiniment petit indique que le mouvement est déterministe. Les surprises contrediraient le déterminisme*.

* L'absence de surprises implique aussi l'absence de miracles. La physique classique est donc en contradiction avec de nombreuses religions. En réalité, la majorité des religions argumente que l'infini est l'ingrédient

D'un autre côté, ce résultat laisse quelques questions sans réponse. Les relativités restreinte et générale ont toutes les deux évincé l'existence de l'infiniment grand. Il n'existe pas de force, de puissance, de taille, d'âge ou de vitesse infiniment grands. Pourquoi l'infiniment petit existerait-il, mais pas l'infiniment grand ?

En réalité, il y a encore d'autres questions ouvertes.

POURQUOI N'AVONS-NOUS PAS ENCORE ATTEINT LE SOMMET DE LA MONTAGNE ?

« Les lois et les réalités fondamentales les plus importantes de la physique ont toutes été découvertes et elles sont maintenant si fermement établies que l'éventualité de les voir infirmées par de nouvelles découvertes est extrêmement faible... Nos découvertes ultérieures ne devraient avoir un impact que sur la sixième décimale. »

Albert Michelson*.

Nous pourrions imaginer que nous connaissons dorénavant la nature, comme le pensait Albert Michelson à la fin du dix-neuvième siècle. Il proclama que l'électrodynamique et la physique galiléenne suggéraient que les lois principales de la physique étaient désormais bien connues. Cette affirmation est souvent citée comme un exemple de prédiction erronée, puisqu'elle reflète une ignorance intellectuelle incroyable sur le monde qui nous entoure. La relativité générale était encore inconnue, et la théorie quantique restait à découvrir.

À la fin du dix-neuvième siècle, les progrès de la technologie réalisés grâce à l'utilisation de l'électricité, de la chimie et de la technologie du vide ont permis de concevoir des machines et des appareils de plus en plus perfectionnés. Tous furent construits dans l'esprit de la physique classique. Entre 1890 et 1920, ces machines classiques anéantirent complètement les fondements de la physique classique. Des expériences menées avec ces dispositifs montrèrent que la matière est constituée d'atomes, que la charge électrique apparaît en quantités minimales insécables et que la nature se comporte de manière aléatoire. La nature engendre vraiment des surprises – bien que dans un sens limité, comme nous le verrons. Comme l'Empire britannique, le règne de la physique classique s'effondra. Pour le dire simplement, la physique classique ne rend pas compte de la nature aux petites échelles.

Mais même sans machines, notre physicien de l'époque victorienne aurait pu prévoir cette situation. (En réalité, de nombreux esprits plus clairvoyants le firent.) Il avait sous les yeux une contradiction entre l'électrodynamique et la nature, pour laquelle il n'avait aucune excuse. Dans notre promenade, jusqu'ici, nous avons découvert que les horloges et les mètres étalons sont nécessairement constitués de matière et fondés sur l'électromagnétisme. Mais comme nous venons de le voir, l'électrodynamique classique n'explique pas la stabilité de la matière. La matière est composée de petites particules, mais la relation entre ces particules, l'électricité et les charges élémentaires reste vague. Si nous ne

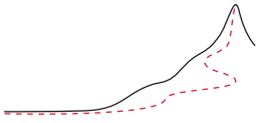
indispensable pour accomplir des miracles. La physique classique montre que ce n'est pas le cas.

* Tiré de son discours de 1894 à la cérémonie d'inauguration du laboratoire de physique Ryerson à l'université de Chicago.

comprenons pas ce qu'est la matière, alors nous n'avons pas encore compris ce que sont l'espace et le temps, puisqu'ils sont définis par le truchement de dispositifs de mesure constitués de matière.

Pire, ce physicien victorien négligea une réalité fondamentale : la description classique de la nature ne nous permet pas de comprendre la *vie*. Les aptitudes qu'ont les êtres vivants – grandir, voir, entendre, sentir, penser, être en bonne santé ou malade, se reproduire et mourir – demeurent toutes inexplicées par la physique classique. En fait, toutes ces aptitudes *contredisent* la physique classique. La compréhension de la matière et de ses interactions, y compris la vie elle-même, est par conséquent l'objectif de la prochaine partie de notre ascension de la Montagne Mouvement. Cette compréhension se tiendra aux échelles minuscules : pour comprendre la nature, nous devons étudier les particules. En réalité, la structure atomique de la matière, l'existence d'une charge minimale et l'existence d'une entropie minimale nous posent des questions sur l'existence de l'infiniment petit. Il reste un monde à explorer. Le fait de nous y consacrer nous fera rebondir de surprise en surprise. Pour bien nous y préparer, faisons d'abord une halte.





CHAPITRE 8

L'HISTOIRE DU CERVEAU

« Alles was überhaupt gedacht werden kann, kann klar gedacht werden*.
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 4.116 »

Défi 195 e

DANS notre quête de précision accrue sur la description de tous les mouvements de notre voisinage, il est temps de faire une pause. Asseyez-vous et contemplez le chemin parcouru. Dans notre promenade, qui nous a conduits à examiner la mécanique, la relativité générale et l'électrodynamique, nous avons utilisé jusqu'à présent plusieurs concepts sans les avoir définis. Par exemple, ceux d'« information », de « mémoire », de « mesure », d'« ensemble », de « nombre », d'« infini », d'« existence », d'« Univers » et d'« interprétation ». Chacun d'eux constitue un terme courant et important. Dans cet intermède, nous portons notre regard sur ces notions et tentons d'apporter quelques définitions simples, mais suffisamment précises, en leur conservant, autant que possible, une connotation aguichante et divertissante. Par exemple, pouvez-vous expliquer à vos parents ce qu'est un concept ?

La raison pour laquelle nous devons étudier ces définitions est simple. Nous avons besoin d'éclaircissements pour parvenir au sommet de la Montagne Mouvement, c'est-à-dire, jusqu'à la description complète du mouvement. Par le passé, nombreux sont ceux qui se sont égarés par manque de concepts clairs. Afin d'esquiver ces problèmes, la physique possède un fil conducteur particulier. Toutes les sciences ont en commun un fait établi : chaque type de changement observé dans la nature représente une forme de mouvement. En ce sens, et *uniquement* en ce sens, la physique, qui se focalise sur l'étude du mouvement lui-même, constitue le fondement de toutes les autres sciences. Autrement dit, la recherche de la célèbre « théorie du Tout » est une expression arrogante qui désigne la recherche d'une *théorie du mouvement*. Bien que la connaissance du mouvement soit fondamentale, sa description précise n'implique pas forcément une description de « tout » : essayez simplement de résoudre un problème de mariage en utilisant l'équation de Schrödinger pour constater la différence.

Étant donné l'importance fondamentale du mouvement, il est nécessaire qu'en physique toutes les formulations sur les observations faites soient aussi précises que possible. Pour cette raison, un grand nombre de savants ont examiné les formulations physiques avec une attention toute particulière, en faisant appel à tous les critères imaginables. La

* « Tout ce que l'on peut penser peut être exprimé en termes clairs. » Cette citation ainsi que d'autres de Ludwig Wittgenstein sont tirées de l'ouvrage aussi court que célèbre *Tractatus logico-philosophicus*, écrit en 1918, édité pour la première fois en 1921. Il a été depuis traduit dans de nombreuses langues.



FIGURE 83 Ludwig Wittgenstein.

physique est un babillage approfondi, tenu par des gens curieux à propos des choses qui bougent. Les critères pour la précision apparaissent une fois que nous nous demandons : quelles aptitudes ce discours requiert-il ? Vous pourriez vouloir en énumérer les réponses par vous-même.

Défi 196 e

Les aptitudes nécessaires pour discourir constituent encore un sujet de recherches aujourd'hui. Les biologistes de l'évolution étudient comment l'espèce humaine acquiert la capacité à discuter du mouvement. Les psychologues de l'enfance analysent la manière dont cette aptitude se développe chez un seul être humain. Les physiologistes, les neurologues et les informaticiens s'intéressent à la manière dont le cerveau et les facultés sensorielles rendent cela possible. Les linguistes se concentrent sur les propriétés du langage que nous utilisons, pendant que les logiciens, les mathématiciens et les philosophes des sciences étudient les propriétés générales des propositions sur la nature. Tous ces domaines d'étude examinent des outils qui sont essentiels pour le développement de la physique, la compréhension du mouvement et l'énumération des concepts non définis listés ci-dessus. Ces domaines organisent le présent chapitre.

L'ÉVOLUTION ET LE CERVEAU

« Une poule est seulement la façon pour un œuf de faire un autre œuf. »
Samuel Butler, *Life and Habit*.

Réf. 140
Page 210

L'évolution de l'espèce humaine est le fruit d'une longue histoire qui a déjà été contée dans de nombreux ouvrages excellents. Un tableau récapitulatif sur l'histoire de l'Univers est donné dans le chapitre sur la relativité générale. L'enchaînement presque invraisemblable des événements qui ont conduit à notre propre existence prend en compte la genèse des atomes, des galaxies, des étoiles, des planètes, de la Lune, de l'atmosphère, des premières cellules, des animaux marins, des animaux terrestres, des mammifères, des hominidés, des hommes, de nos ancêtres, de notre famille et finalement de nous-mêmes.

Réf. 141

La manière dont les particules qui nous constituent se sont déplacées au cours de ces événements, soufflées à travers l'espace, amassées sur la Terre, puis organisées pour façonner les êtres vivants, représente l'un des exemples les plus grandioses du mouvement. Le fait de s'imaginer et de méditer de temps à autre sur cette progression fantastique du mouvement peut constituer une expérience enrichissante.

Défi 197 e

En particulier, sans l'évolution biologique, nous ne pourrions pas discuter du mouvement, seuls les corps en mouvement peuvent étudier des corps en mouvement. Et si nous étions dépourvus de cerveau, nous ne serions capables ni de penser ni de parler. L'évolu-

tion fut également à l'origine de l'enfance et du désir de comprendre. Dans ce chapitre, nous découvrirons que chaque petit enfant appréhende déjà la majorité des concepts de la physique classique, au cours des expériences qu'il mène pendant sa croissance.

LES ENFANTS, LES LOIS ET LA PHYSIQUE

« Les physiciens aussi ont une réalité partagée. En dehors de cela, il n'y a pas vraiment beaucoup de différence entre le fait d'être physicien et le fait d'être schizophrène. »

Richard Bandler

Réf. 142

Réf. 143

Dans l'enfance, chacun est un physicien. Lorsque nous nous remémorons notre passé aussi loin que nous le pouvons, nous parvenons à un certain niveau, situé avant la naissance, qui forme le point de départ de l'expérience humaine. À cet instant magique, nous percevons d'une manière ou d'une autre que, à part nous-mêmes, il existe autre chose. La première observation que nous faisons concernant le monde qui nous entoure, durant la période prénatale, est donc la reconnaissance que nous pouvons distinguer deux parties : nous-même et le reste du monde. Cette distinction représente un exemple – peut-être le tout premier – d'un vaste nombre de « lois » de la nature qui constitueront des pierres d'achoppement tout au long de notre vie. En découvrant de plus en plus de différences, nous mettons de l'ordre dans le chaos de l'expérience. Nous découvrons rapidement que le monde est constitué de parties en relation, telles que maman, papa, le lait, la Terre, les jouets, etc.

Par la suite, lorsque nous apprenons à parler, nous nous amusons à employer des mots plus compliqués et nous désignons notre voisinage par *environnement*. En fonction du contexte, nous appelons l'ensemble formé par nous-même et l'environnement le *monde* (physique), l'*Univers* (physique), la *nature*, ou le *cosmos*. Ces concepts ne sont pas discernables l'un de l'autre dans cette promenade*, ils sont tous utilisés pour désigner la somme de toutes les parties et de leurs relations. Ils sont simplement considérés ici pour désigner le *tout*.

Défi 198 s

La découverte de la première distinction donne naissance à une avalanche de découvertes analogues. Nous extrayons les nombreuses distinctions qui sont possibles dans l'environnement, dans notre propre corps et dans les divers types d'interactions qui existent entre eux. L'aptitude à distinguer est la faculté primordiale qui nous permet de changer notre point de vue de celui du monde représenté par le *chaos*, c'est-à-dire comme un grand désordre, à celui du monde représenté par un *système*, c'est-à-dire un ensemble structuré, dans lequel les parties sont reliées selon des modalités spécifiques. (Si vous aimez la précision, vous pouvez méditer sur le fait de savoir si les deux éventualités de « chaos » et de « système » sont les seules possibles. Nous reviendrons sur ce problème dans la dernière partie de notre ascension montagnaise.)

* Les différences dans l'usage peuvent être déduites à partir de leurs origines linguistiques. « Monde » est dérivé du latin *mundus* et l'équivalent anglais « world » est dérivé de l'ancien allemand « wer » – personne – et « ald » – vieux – et signifiait à l'origine « longévité ». « Univers » est tiré du latin, et désigne le tout – « unum » – que nous voyons tourner – « versus », et se réfère au ciel nocturne étoilé qui tourne autour de l'étoile Polaire. « Nature » provient également du latin, et signifie « ce qui est né ». « Cosmos » est issu du grec κόσμος et signifie à l'origine « ordre ».

Page 218

Défi 199 e

En particulier, l'observation des différences qu'il y a entre soi-même et l'environnement va main dans la main avec l'acceptation que non seulement nous ne sommes pas indépendants de cet environnement, mais que nous y sommes fermement attachés de diverses façons inéluctables : nous pouvons tomber, nous faire mal, ressentir la chaleur, le froid, etc. De telles relations sont appelées *interactions*. Les interactions traduisent l'observation que, même si elles peuvent être distinguées, les parties de la nature ne peuvent pas être isolées. Autrement dit, les interactions décrivent la différence qui existe entre le tout et la somme de ses parties. Aucune partie ne peut être définie sans ses relations avec son environnement. (Êtes-vous d'accord ?)

Les interactions ne sont pas arbitraires. Considérez par exemple simplement le toucher, l'odorat ou la vue : ils diffèrent par la portée, l'efficacité et les conséquences. Les aspects caractéristiques des interactions sont appelés *modèles de la nature*, *propriétés de la nature*, *règles de la nature* ou, de manière équivalente, avec leur désignation historique mais malencontreuse, « lois » de la nature. Le mot « loi » insiste sur leur validité générale ; malheureusement, il implique également préméditation, aspiration, astreinte et punition en cas de violation. Cependant, aucune préméditation, aspiration ou astreinte n'est sous-jacente dans les propriétés de la nature, pas plus qu'une violation n'est possible. L'expression ambiguë « loi de la nature », popularisée par René Descartes (1596–1650), a été adoptée de manière enthousiaste parce qu'elle donnait du poids aux lois des nations – lesquelles étaient loin d'être parfaites à cette époque – et à celles des autres organisations – qui étaient rares. Cette expression est un anthropomorphisme frappé du sceau du despotisme, qui laisse sous-entendre que la nature est « gouvernée ». Nous utiliserons par conséquent le moins souvent possible cette expression dans notre promenade, et elle sera, lorsque nous le ferons, toujours placée à l'intérieur de parenthèses « ironiques ». La nature ne peut pas être dirigée de quelque sorte que ce soit. Les « lois » de la nature ne sont pas des obligations pour celle-ci ou ses parties, elles ne sont des obligations que pour les physiciens et toutes les autres personnes : les modèles de la nature nous obligent à employer certaines descriptions et à en abandonner d'autres. À chaque fois que nous disons que « les lois gouvernent la nature » nous prononçons des absurdités, l'expression correcte est *les règles décrivent la nature*.

Page ??

Réf. 145

Au cours de notre enfance, nous apprenons à faire la distinction entre les interactions avec l'environnement (ou *perceptions*) : certaines sont partagées avec d'autres personnes et sont appelées *observations*, d'autres sont purement personnelles et sont appelées *sensations**. Un critère encore plus strict de « partageabilité » est employé pour diviser le monde entre « réalité » et « imagination » (ou « rêves »). Notre excursion montrera que cette dichotomie n'est pas essentielle, à condition que nous restions fidèles à notre quête d'une précision toujours plus grande : nous découvrirons que la description du mouvement que nous sommes en train de rechercher ne dépend pas du fait que le monde soit « réel » ou « imaginaire », « personnel » ou « général ».

Réf. 144

Les hommes jouissent de leur capacité à discerner les parties, qu'ils nomment également dans d'autres contextes des *détails*, des *aspects* ou des *entités*, et jouissent de leur aptitude à les associer ou à observer les *relations* qu'il y a entre elles. Les êtres humains

* Un enfant qui est incapable de faire cette distinction parmi les perceptions – et qui est donc incapable de mentir – développe presque certainement un *autisme* ou en souffre déjà, comme des recherches psychologiques récentes l'ont montré.

appellent cet exercice la *classification*. Les couleurs, les formes, les objets, une maman, les lieux, les gens et les idées sont des exemples d'entités que les hommes découvrent en premier.

Notre anatomie fournit un outil commode pour faire un usage efficace de ces découvertes : la *mémoire*. Elle emmagasine une grande quantité de données que nous appellerons *expérience* par la suite. La mémoire est un expédient employé par les enfants, de leur plus jeune âge jusqu'à leur maturité, pour organiser leur monde et pour parvenir à une certaine sérénité dans le chaos de la vie.

Les classifications mémorisées sont appelées des *concepts*. Jean Piaget fut le premier chercheur à décrire l'influence de l'environnement sur les concepts qu'un enfant se forge. Pas à pas, les enfants apprennent que les objets sont localisés dans l'espace, que celui-ci possède trois dimensions, que les objets chutent, que les collisions produisent du bruit, etc. En particulier, Piaget montra que l'espace et le temps ne sont pas *a priori* des concepts, mais la résultante des interactions que chaque enfant mène avec son environnement*.

Réf. 147 Au cours de la période où un enfant va à l'école, celui-ci commence à comprendre l'idée de *constance des substances*, par exemple les liquides, et le concept de *contraire*. C'est uniquement à cette étape que son expérience subjective devient *objective*, grâce à la compréhension abstraite. Plus tard, la description du monde pour l'enfant cesse d'être animiste : avant ce stade, le Soleil, un ruisseau ou un nuage avaient *une âme*. En bref, ce

* Un tour d'horizon de l'origine de la psychologie évolutive est donné par J. H. FLAVELL, *The Developmental Psychology of Jean Piaget*, 1963. Ce travail synthétise les observations réalisées par le Suisse francophone Jean Piaget (1896–1980), la personnalité centrale dans ce domaine. Il fut un des premiers chercheurs à analyser le développement chez l'enfant de la même façon qu'un physicien analyse la nature : en observant attentivement, en prenant des notes, en réalisant des expériences, en extorquant des hypothèses, en les testant, en y déduisant des théories. Ses publications incroyablement nombreuses, fondées sur ses amplies observations, recouvrent presque toutes les phases du développement de l'enfant. Sa principale contribution concerne la description détaillée des phases du développement des aptitudes cognitives des êtres humains. Il montra que toutes les capacités mentales des enfants, la formation des concepts fondamentaux, leur manière de réfléchir, leur aptitude à parler, etc., résultent des interactions perpétuelles qui ont lieu entre l'enfant et l'environnement.

En particulier, Piaget décrit la manière par laquelle les enfants apprennent pour la première fois qu'ils sont différents de l'environnement extérieur, et comment ils découvrent alors les propriétés physiques du monde. De ses nombreux livres qui traitent des concepts physiques, les deux qui ont particulièrement trait au sujet qui nous préoccupe sont J. PIAGET, *Les notions de mouvement et de vitesse chez l'enfant*, Presses Universitaires de France, 1972 et *Le développement de la notion de temps chez l'enfant*, Presses Universitaires de France, 1981, ce dernier ouvrage étant né d'une suggestion due à Albert Einstein. Ces textes devraient faire partie de la culture littéraire de chaque physicien et philosophe des sciences intéressé par ces questions.

Piaget décrit également comment chez les enfants l'intelligence mathématique et orale dérive de l'intelligence sensorimotrice, pratique, qui résulte elle-même d'habitudes et d'associations acquises pour construire de nouveaux concepts. L'intelligence pratique requiert la présence du système de réflexes apportés par la structure anatomique et morphologique de notre organisme. Ainsi son œuvre montre en détail que notre faculté à décrire mathématiquement le monde est fondée, quoique indirectement, sur l'interaction physique de notre organisme avec l'extérieur.

Réf. 146 Certaines de ses opinions sur l'importance du langage dans le développement sont aujourd'hui en cours de révision, notamment à travers la redécouverte du travail de Lev Vigotsky, qui conjecture que toutes les aptitudes mentales supérieures, les émotions, la mémoire du passé, la pensée rationnelle, l'attention volontaire et la conscience de soi-même, ne sont pas innées, mais apprises. Cet apprentissage se produit à travers le langage et la culture, et en particulier à travers le processus de conversation avec soi-même.

n'est qu'après la puberté qu'un homme est prêt pour la physique.

Bien que tout le monde ait été physicien dans son plus jeune âge, la plupart des gens restent des physiciens *classiques*. Nous progressons dans cette aventure, en tirant profit de toutes les possibilités offertes par un jouet dont nous a doté la nature : le cerveau.

« L'expérience est le nom que chacun donne à ses erreurs. »
Oscar Wilde, *Lady Windermere's Fan*.

ÉLECTRONIQUE DES POLYMÈRES

Le cerveau est électrique. Plus précisément, le cerveau est un dispositif électronique souple, composé de polymères, sans métaux, à durée de vie limitée, sensible et peu fiable. Par ailleurs, toutes ces propriétés sont partagées par l'électronique des polymères, qu'ils soient vivants ou non. C'est la raison pour laquelle l'électronique du commerce est généralement plutôt basée sur le silicium.

TABLEAU 16 Quelques aspects du cerveau humain.

ASPECT	DÉTAILS	ÉQUIVALENT INFORMATIQUE
Matériel		
Mémoire à ultra-court terme Hippocampe	5 à 9 concepts détecteur de nouveauté, mémoire spatiale, apprentissage	mémoire cache mémoire vive et mémoire flash
Complexe amygdalien	émotions, apprentissage	ordonnanceur de priorité du système d'exploitation
Striatum ventral, fournisseur de dopamine et d'opioïde	système de récompense	ordonnanceur de priorité du système d'exploitation
Neurones dans le cortex	femmes env. $19 \cdot 10^9$, hommes env. $22 \cdot 10^9$	disque dur
Nombre de neurones perdus	femmes $e^{3,05-0,00145 \cdot \text{âge}/a} \cdot 10^9$, hommes $e^{3,2-0,00145 \cdot \text{âge}/a} \cdot 10^9$	disque dur
Impulsions échangées entre les deux moitiés du cerveau	$4 \cdot 10^9/s$	vitesse du bus interne
Nombre de synapses par neurone	10^4	
Total des connexions synaptiques	env. $2 \cdot 10^{14}$	cellules de mémoire
Voies des signaux d'entrée depuis l'œil	env. $2 \cdot 10^6$	câble d'appareil photo
Voies des signaux d'entrée depuis l'oreille	env. 2-3000	câble du micro

ASPECT	DÉTAILS	ÉQUIVALENT INFORMATIQUE
Voies des signaux d'entrée depuis la peau, la bouche et le nez	env. $0,5 \cdot 10^6$	interfaces sensorielles
Capacité de signaux en entrée (total, 300 impulsions /s par voie)	env. 100 MB/s	bande passante entrante
Voies en sortie (muscles, organes)	env. $1,5 \cdot 10^6$	interfaces motrices
Capacité de signaux en sortie (total, 300 impulsions /s par voie)	env. 50 MB/s	bande passante sortante
Masse typique (cerveau d'Einstein)	1,230 kg	
Consommation (moyenne) d'énergie	1 600 à 2 200 kJ/j ou 18 à 25 W	
Durée de vie	130 ans	
Logiciel et traitement		
Apprentissage	modification de l'activité synaptique par la potentialisation à long terme	activer, classer, stocker
Sommeil profond	transferts structurés de l'hippocampe au cortex	sauvegarde vers le disque dur
Sommeil paradoxal (REM)	traitement différé	compression de données dans un traitement par lots

Réf. 148 L'électronique des polymères qui façonne le cerveau est organisée comme un ordinateur. Certains détails sont indiqués dans le [Tableau 16](#). Bien que les blocs fonctionnels d'un cerveau et d'un ordinateur soient similaires, les mécanismes spécifiques qu'ils utilisent sont d'ordinaire complètement distincts.

POURQUOI UN CERVEAU ?

Réf. 149 « Denken ist bereits Plastik*. »
Joseph Beuys, sculpteur.

Réf. 150 Un grand nombre d'observations montrent que l'information sensorielle est traitée, c'est-à-dire classifiée, stockée et retrouvée dans le cerveau. Notamment, des lésions du cerveau peuvent conduire à la perte de tout ou partie de ces fonctions. Parmi les conséquences importantes de ces aptitudes fondamentales du cerveau, se trouvent la pensée et le langage.

Réf. 151 Toutes ces capacités émergent des rouages, de la « machinerie », du cerveau.

* « La pensée, c'est déjà de la sculpture. » Joseph Beuys (1920–1986).

Des systèmes ayant l'aptitude à déduire des classifications à partir des informations qu'ils reçoivent sont appelés des *classificateurs*, et on dit qu'ils sont capables d'*apprendre*. Notre cerveau partage cette propriété avec de nombreux systèmes complexes. Le cerveau d'un grand nombre d'animaux, mais également certains algorithmes informatiques, tels que ce que nous appelons des « réseaux de neurones », constituent des exemples de classificateurs. De tels systèmes sont étudiés dans plusieurs domaines, allant de la biologie à la neurologie, aux mathématiques et à l'informatique. Les classificateurs possèdent la double aptitude à dissocier et à associer, les deux étant essentielles pour la pensée.

Les machines classificatrices ont de nombreux points communs avec le cerveau. Par exemple, d'après une supposition récente importante en biologie de l'évolution, la nécessité de refroidir le cerveau d'une manière efficace est responsable de la marche verticale et bipède des êtres humains. Le cerveau a besoin d'un système de refroidissement puissant pour bien fonctionner. En cela, il ressemble aux ordinateurs modernes, qui possèdent en général des ventilateurs puissants ou même des systèmes de refroidissement liquides intégrés dans ceux-ci. Il apparaît que l'espèce humaine est dotée du système de refroidissement le plus performant de tous les mammifères. Une posture verticale permet à l'air de refroidir le corps de manière plus efficace dans les environnements tropicaux où les hommes ont évolué. Pour un meilleur refroidissement, les hommes sont également dépourvus de fourrure, excepté sur la tête où elle protège le cerveau du réchauffement direct dû au Soleil*.

Tous les classificateurs sont conçus à partir d'entités élémentaires de classification, qui sont parfois très nombreuses. En général, les unités élémentaires peuvent classer des informations dans seulement deux groupes distincts. Plus le nombre de ces entités, que nous appelons souvent « neurones » par analogie avec le cerveau, est grand, plus les classifications qui peuvent être produites par le classificateur sont sophistiquées**. Les classificateurs fonctionnent donc en appliquant des combinaisons plus ou moins sophistiquées des critères « identique » et « différent ». La distinction faite par un enfant entre des objets rouges et des objets bleus représente une telle classification. La distinction entre les groupes de symétrie de jauge compacts et non compacts en théorie quantique représente une classification plus élaborée, mais elle est fondamentalement reliée à la même aptitude.

Dans tous les classificateurs, les unités élémentaires de classification interagissent les unes avec les autres. Souvent ces interactions sont canalisées par des connexions, et l'ensemble est alors appelé un *réseau*. Dans ces jonctions, des signaux sont échangés, via des objets mobiles tels que des électrons ou des photons. Nous parvenons donc à la conclusion que la capacité du cerveau à classer le monde physique, pour distinguer des objets en mouvement qui interagissent les uns avec les autres par exemple, constitue une conséquence du fait qu'il est lui-même constitué d'objets en mouvement qui interagissent les uns avec les autres. Sans un classificateur performant, les hommes ne seraient pas devenus une espèce animale si prospère. Et seul le mouvement produit dans notre cerveau nous permet de parler du mouvement en général.

* La posture verticale permet par la suite aux hommes de prendre leur respiration indépendamment de leur marche, une prouesse que de nombreux animaux ne peuvent réaliser. Cela permet ensuite aux hommes de développer la parole. Et celle-ci permet enfin le développement du cerveau.

** Une bonne introduction aux réseaux de neurones est donnée dans J. HERTZ, A. KROGH & R. PALMER, *Introduction to the Theory of Neural Computation*, Addison Wesley, 1991.

De nombreux chercheurs ont identifié les zones du cerveau utilisées lorsque des tâches intellectuelles différentes sont réalisées. Ces expériences sont devenues possibles en utilisant l'imagerie par résonance magnétique et d'autres méthodes. D'autres chercheurs ont étudié comment le processus de pensée peut être façonné à partir de la structure du cerveau. La neurologie fait des progrès constants. En particulier, elle a fermement anéanti la croyance que la pensée est *plus* qu'un processus physique. Cette croyance est issue de craintes personnelles, comme vous pourriez le vérifier par introspection. Elle disparaîtra avec le temps. Comment démontreriez-vous que la pensée est uniquement un processus physique ?

Page ??

Défi 200 s

QU'EST-CE QUE L'INFORMATION ?

« Ces pensées ne me viennent pas sous leur forme verbale. Je pense rarement en mots. Une pensée vient et ensuite j'essaie de l'exprimer avec des mots. »

Albert Einstein

Nous avons commencé en stipulant que l'étude de la physique signifie que nous devons discuter du mouvement. Les paroles sont une transmission d'informations. L'information peut-elle être mesurée ? Pouvons-nous quantifier l'avancée de la physique de cette manière ? L'Univers est-il constitué d'informations ?

Défi 201 s

L'information est la résultante de la classification. Une classification représente la réponse à une ou à plusieurs questions de type oui-non. Ces questions sont les classifications les plus simples possibles, elles fournissent les *unités* élémentaires de classification, à partir desquelles toutes les autres peuvent être bâties. La façon la plus simple pour mesurer l'information consiste, par conséquent, à comptabiliser le nombre de questions de type oui-non concernées, les *bits*, qui conduisent à celle-ci. Êtes-vous capable de dire combien de bits sont nécessaires pour définir le lieu où vous vivez ? Manifestement, ce nombre de bits dépend de l'ensemble des questions considérées. Cela pourrait être les noms de toutes les rues d'une ville, l'ensemble de toutes les coordonnées de la surface de la Terre, le nom de toutes les galaxies présentes dans l'Univers, l'ensemble de toutes les combinaisons de lettres de l'adresse. Quelle est la méthode la plus efficace que vous puissiez imaginer ? Une variante de cette méthode combinatoire est employée dans les ordinateurs. Par exemple, le récit de cette promenade nécessite à peu près mille millions de bits. Mais puisque la quantité d'information présente dans une lettre ordinaire dépend de l'ensemble des questions que nous avons choisi, il est impossible de définir une mesure précise pour l'information de cette manière.

Page 254

Défi 202 s

La seule façon de mesurer précisément l'information consiste à prendre l'ensemble le plus vaste possible des questions qui peuvent être posées concernant un système, et de le comparer avec ce que nous savons de ce système. Dans cette situation, la quantité d'information inconnue est appelée entropie, un concept que nous avons déjà rencontré. Avec cette approche, vous devriez être capable de déduire s'il est réellement possible de mesurer l'avancée de la physique.

Puisque la catégorisation représente une activité du cerveau et des autres classificateurs analogues, l'information telle qu'elle est définie ici est un concept qui s'applique au résultat des activités menées par les individus et par les autres classificateurs. En bref, l'in-

formation est produite lorsque nous parlons de l'Univers – l'Univers lui-même n'est *pas la même chose* que l'information. Il y a un nombre croissant de publications fondées sur le point de vue opposé, cependant c'est un court-circuit conceptuel. N'importe quelle transmission d'information implique l'existence d'une interaction ; physiquement parlant, cela signifie que n'importe quelle information a besoin d'*énergie* pour la transmission et de *matière* pour le stockage. Sans celles-ci, il n'y a pas d'information. En d'autres termes, l'Univers, avec sa matière et son énergie, doit avoir existé *avant* que la transmission d'information fût possible. Dire que l'Univers est constitué d'informations est un pléonasme et n'a pas plus de sens que d'affirmer qu'il est constitué de dentifrice.

Le but de la physique est de fournir une classification *exhaustive* de tous les types et exemples de mouvement, autrement dit de tout connaître sur le mouvement. Est-ce possible ? Ou êtes-vous capable de trouver un argument qui va à l'encontre de cette démarche ?

Défi 203 s

QU'EST-CE QUE LA MÉMOIRE ?

« Le cerveau est mon deuxième organe préféré. »
Woody Allen

La mémoire est la collection des enregistrements des perceptions. La production de ces enregistrements constitue l'aspect primordial de l'observation. Les relevés peuvent être emmagasinés dans la mémoire humaine, c'est-à-dire dans le cerveau, dans la mémoire d'une machine, comme dans les ordinateurs, ou dans la mémoire d'un objet, tel que des notes sur une feuille de papier. Sans mémoire, il n'y a pas de science, de vie – car la vie est basée sur des enregistrements situés à l'intérieur de l'ADN – et plus particulièrement aucun plaisir, comme le démontre la vie morose de ceux qui ont perdu la mémoire.

Réf. 150

Évidemment, chaque enregistrement est un objet. Mais sous quelles conditions un objet est-il qualifié d'enregistrement ? Une signature peut représenter l'enregistrement d'un accord sur une transaction commerciale. Un unique point minuscule d'encre n'est pas un enregistrement, parce qu'il pourrait apparaître par erreur, par exemple par une tache accidentelle. Au contraire, il est improbable que l'encre puisse tomber sur une feuille exactement sous la forme d'une signature. (Les signatures simples des médecins sont évidemment des exceptions.) Pour le dire simplement, un *enregistrement* est tout objet, qui, pour être copié, doit être fabriqué. Plus précisément, un enregistrement est un objet ou une situation qui ne peut pas être produit ni disparaître par erreur ou par chance. Nos souvenirs personnels, qu'ils soient des images ou des voix, possèdent la même propriété. Nous pouvons généralement les croire, parce qu'ils sont si précis qu'ils ne peuvent pas être arrivés là par hasard ou par un processus non contrôlé qui aurait eu lieu dans notre cerveau.

Pouvons-nous faire une estimation de la probabilité qu'un enregistrement surgisse ou disparaisse par hasard ? Oui, nous le pouvons. Chaque enregistrement est constitué d'un nombre caractéristique N de petites entités, par exemple le nombre de points d'encre possibles sur une feuille, le nombre de cristaux de fer sur une bande magnétique, des électrons dans un bit d'une mémoire d'ordinateur, des grains d'iodure d'argent dans un négatif photographique, etc. Les perturbations aléatoires qui ont lieu dans chaque

mémoire sont dues aux fluctuations internes, également appelées *bruit*. Le bruit fait que l'enregistrement n'est plus lisible : cela peut être de la saleté sur une signature, une variation thermique de l'aimantation dans les cristaux de fer, du bruit électromagnétique à l'intérieur d'une mémoire à l'état solide, etc. On rencontre le bruit dans tous les classificateurs, puisqu'il est inhérent à toutes les interactions et donc à tout traitement de l'information.

Une propriété générale concerne le fait que les fluctuations internes engendrées par le bruit diminuent lorsque la taille, c'est-à-dire le nombre de constituants de l'enregistrement, s'accroît. En réalité, la probabilité p_{err} pour qu'il y ait une erreur de lecture ou d'écriture sur un enregistrement varie selon

$$p_{\text{err}} \sim 1/N, \quad (73)$$

où N représente le nombre de particules ou de sous-systèmes utilisés pour le stocker. Cette relation se tient parce que, pour des nombres très grands, ce que nous appelons la *loi normale* constitue une excellente approximation de pratiquement tous les processus. La largeur de la courbe en forme de cloche de la loi normale, qui détermine la probabilité d'avoir des erreurs d'enregistrement, croît moins rapidement que son intégrale lorsque l'on augmente le nombre d'entités. (Pouvez-vous confirmer ce point ?)

Nous concluons que tout enregistrement de bonne qualité doit être constitué d'un *très grand* nombre d'entités. Plus ce nombre est grand, moins la mémoire est sensible aux fluctuations. Maintenant, un système de très grande taille ayant des fluctuations négligeables est appelé un *bain (physique)*. Seuls les bains rendent les mémoires possibles. Autrement dit, chaque enregistrement contient un bain. Nous concluons que toute *observation* d'un système représente l'interaction de ce système avec un bain. Cette correspondance sera utilisée à plusieurs reprises par la suite, en particulier dans la théorie quantique. Quand un enregistrement est produit par une machine, l'« observation » est ordinairement appelée une *mesure (généralisée)*. Êtes-vous capable de spécifier quel est ce bain dans le cas d'une personne admirant un paysage ?

Défi 206 s

Page 231

À partir de la discussion précédente, nous pouvons déduire une conclusion de première importance : puisque nous avons une excellente mémoire à notre disposition, nous pouvons inférer que nous sommes faits de nombreuses petites parties. Et puisque les enregistrements existent, le monde doit également être fait d'un vaste nombre de petites parties. Aucun microscope, quel que soit son type, n'est nécessaire pour confirmer l'existence des molécules ou des petites entités analogues, un tel instrument n'est nécessaire que pour déterminer les *tailles* de ces particules. Leur existence peut être déduite simplement à partir de l'observation que nous possédons une mémoire. (Bien évidemment, le don d'ubiquité du bruit est un autre argument qui démontre que la matière est composée de minuscules parties.)

Défi 207 pe

Une deuxième conclusion fut popularisée vers la fin des années 1920 par Léo Szilard. Le fait d'écrire dans une mémoire ne produit pas d'entropie ; il est possible de stocker de l'information dans une mémoire sans augmenter l'entropie. Toutefois, celle-ci est produite à chaque fois que la mémoire est *effacée*. Il apparaît que l'entropie (minimale) créée en effaçant un bit est donnée par

$$S_{\text{par bit effacé}} = k \ln 2, \quad (74)$$

et le nombre $\ln 2 \approx 0,69$ représente le logarithme népérien de 2. D'un côté le fait de détruire réduit le désordre des données – l'entropie locale –, mais d'un autre côté cela augmente l'entropie totale. Comme nous le savons bien, de l'énergie est nécessaire pour réduire l'entropie d'un système local. En bref, tout système qui efface sa mémoire requiert de l'énergie. Par exemple, une porte logique ET efface effectivement un bit par opération. La pensée logique demande donc de l'énergie. Nous savons également que le fait de *rêver* est associé à une perte et une réorganisation de l'information. Serait-ce pour cette raison que, lorsque nous sommes très épuisés, dépourvus d'énergie résiduelle,

Défi 208 s

nous ne rêvons pas autant que d'habitude ?

L'entropie est donc nécessairement créée lorsque nous oublions. Cela devient flagrant quand nous nous rappelons que l'oubli est similaire à la détérioration d'un manuscrit ancien. L'entropie augmente quand le manuscrit n'est plus lisible, puisque ce processus est irréversible et dissipatif*. Une autre manière de s'en rendre compte consiste à reconnaître que, pour remettre à zéro une mémoire, par exemple une bande magnétique, nous devons lui fournir de l'énergie, et donc accroître son entropie. Inversement, le fait d'*écrire* dans une mémoire peut souvent *réduire* l'entropie ; nous nous souvenons que les signaux, les entités qu'écrivent les mémoires, transportent une entropie négative. Par exemple, l'écriture sur des bandes magnétiques réduit généralement leur entropie.

Réf. 155

LA PUISSANCE DU CERVEAU

« Les ordinateurs sont harassants. Ils ne peuvent donner que des réponses. »
(Faussement) attribué à Pablo Picasso

Le cerveau humain est conçu de telle manière que ses fluctuations ne peuvent détruire son contenu. Le cerveau est bien protégé par le crâne précisément pour cette raison. De surcroît, il cultive littéralement des connexions, appelées *synapses*, entre ses divers *neurones*, qui sont les cellules qui effectuent le traitement du signal. Le neurone est l'élément fondamental de traitement du cerveau, il exécute la classification de base. Il ne peut effectuer que deux choses : s'activer ou non. (Il est possible que le temps pendant lequel un neurone s'active transporte aussi de l'information, cette question n'est pas définitivement tranchée.) Le neurone délivre un signal en fonction des informations qu'il reçoit, lesquelles arrivent par les synapses depuis des centaines d'autres neurones. Un neurone constitue donc un élément qui peut distinguer les données qu'il reçoit en deux catégories : celles qui conduisent à une activation et celles qui ne le font pas. Les neurones sont donc des classificateurs du type le plus simple, uniquement capables de faire la distinction entre deux situations.

Réf. 158, Réf. 159

Réf. 156

* Comme Wojciech Zurek l'explique de façon claire, l'entropie créée à l'intérieur de la mémoire constitue la principale raison pour laquelle même un démon de Maxwell ne peut pas réduire l'entropie de deux volumes de gaz en ouvrant une porte située entre eux, de telle manière que les molécules rapides s'accumulent d'un côté et les molécules lentes s'accumulent de l'autre côté. (Maxwell avait introduit ce « démon » en 1871, pour éclaircir les limites imposées par la nature aux divinités.) C'est seulement une autre manière de reformuler le résultat ancien de Léo Szilard, qui avait montré que les mesures effectuées par le démon créent plus d'entropie qu'elles ne peuvent en économiser. Et chaque appareil de mesure contient intrinsèquement une mémoire.

Réf. 157

Pour s'amuser avec le démon de Maxwell, visitez le site www.wolfenet.com/~zeppelin/maxwell.htm.

Chaque fois que nous stockons quelque chose dans notre mémoire à long terme, comme un numéro de téléphone, de nouvelles synapses se développent, ou la connexion de synapses préexistantes est renforcée. Ces connexions entre les neurones sont beaucoup plus fortes que les fluctuations qui surgissent dans le cerveau. Seules les fortes perturbations, comme un vaisseau sanguin obstrué ou une lésion cérébrale, peuvent détruire des neurones et aboutir à la perte de mémoire.

Dans son ensemble, le cerveau fournit une mémoire extrêmement efficace. En dépit d'efforts insurmontables, les ingénieurs n'ont pas encore été capables de concevoir une mémoire ayant la puissance du cerveau dans le même volume. Estimons la capacité de cette mémoire. En multipliant le nombre de neurones, environ 10^{11} *, par le nombre moyen de synapses par neurone, environ 100, et par le nombre estimé de bits stockés dans chaque synapse, environ 10, nous parvenons à une capacité de stockage pour le cerveau d'environ

$$M_{\text{réinscriptible}} \approx 10^{14} \text{ bits} \approx 10^4 \text{ Go} . \quad (75)$$

(Un *octet*, noté o, est le nom courant qui désigne huit bits d'information.) Remarquez que l'évolution est parvenue à placer autant de neurones dans le cerveau qu'il y a d'étoiles dans la Galaxie, et que si nous mettons bout à bout toutes les synapses, nous obtenons une longueur totale d'environ 10^{11} m, ce qui correspond à la distance qui sépare la Terre du Soleil. Notre cerveau est vraiment *astronomiquement* complexe.

En pratique, la capacité du cerveau semble quasiment sans limites, puisqu'il libère de la mémoire à chaque fois qu'il a besoin d'un certain espace nouveau, en *effaçant* des données anciennes, par exemple au cours du sommeil. Remarquez que cette estimation standard de 10^{14} bits n'est pas réellement exacte ! Elle présuppose que l'unique composante de stockage de l'information dans le cerveau est l'effectif synaptique. Par conséquent elle ne mesure que la capacité de stockage *effaçable* du cerveau. En fait, l'information est également emmagasinée dans la structure cérébrale, c'est-à-dire dans la configuration exacte selon laquelle chaque cellule est reliée aux autres cellules. La majeure partie de cette structure est figée vers l'âge de deux ans, mais elle continue à se développer à un niveau plus faible durant le reste de la vie humaine. En supposant que pour chacune des N cellules ayant n connexions il y a $f n$ possibilités de connexions, cette capacité d'écriture *non réinscriptible* du cerveau peut être estimée à approximativement $N\sqrt{fn} fn \log fn$ bits. Pour $N = 10^{11}$, $n = 10^2$, $f = 6$, cela donne

$$M_{\text{non réinscriptible}} \approx 10^{16} \text{ bits} \approx 10^6 \text{ Go} . \quad (76)$$

Défi 209 pe

Réf. 160 Des mesures récentes ont confirmé que les individus bilingues, particulièrement les bilingues précoces, possèdent une densité supérieure de matière grise dans le petit cortex pariétal de l'hémisphère gauche du cerveau. C'est une zone principalement impliquée dans le traitement du langage. Le cerveau tire donc également profit des variations structurales pour optimiser le stockage et le traitement.

À ce propos, bien que le cerveau des cachalots et des éléphants puisse être cinq à six

* Le nombre de neurones semble être constant et fixé dès la naissance. La croissance la plus élevée des interconnexions se situe entre un an et trois ans ; on affirme qu'elle atteint alors jusqu'à 10^7 nouvelles connexions par seconde.

fois plus lourd que celui des hommes, le nombre de neurones et de connexions, et ainsi la capacité sont inférieurs à ceux des humains.

Parfois on entend proclamer que les gens utilisent entre 5 % et 10 % seulement de leurs capacités cérébrales. Cette croyance, qui nous fait revenir au dix-neuvième siècle, impliquerait qu'il est possible de mesurer les véritables données stockées dans le cerveau et de les comparer avec sa capacité, ce qui est d'une fiabilité impossible. D'autre part, ce mythe signifie que la capacité de traitement peut être mesurée. Il entraîne aussi que la nature aurait développé et maintenu un organe ayant 90 % de surcapacité, gaspillant toute l'énergie et la matière nécessaires pour le construire, le réparer et le préserver. Cette croyance est erronée.

La vaste capacité de stockage du cerveau montre également que la mémoire humaine est alimentée par l'environnement et n'est pas innée : un ovule humain et un spermatozoïde possèdent à eux deux une masse d'à peu près 1 mg, ce qui correspond à environ $3 \cdot 10^{16}$ atomes. Manifestement, les fluctuations font qu'il est impossible d'y stocker 10^{16} bits. En réalité, la nature n'emmagine que $3 \cdot 10^9$ bits environ dans les gènes d'un ovule, en utilisant 10^7 atomes par bit. Par opposition, un cerveau typique possède une masse de 1,5 à 2 kg, et contient environ 5 à $7 \cdot 10^{25}$ atomes, ce qui le rend aussi efficace qu'un ovule. La différence entre le nombre de bits dans l'ADN humain et dans le cerveau montre de manière élégante que presque toute l'information stockée dans le cerveau est extraite de l'environnement. Elle ne peut pas être d'origine génétique, même en imaginant l'existence d'une décompression astucieuse de l'information stockée.

Au final, toutes ces astuces utilisées par la nature accouchent du plus puissant classificateur connu jusqu'à présent*. Existe-t-il des limites à la capacité du cerveau pour mémoriser et pour classifier ? Avec les outils que les hommes ont développés pour étendre les possibilités du cerveau, tels que le papier, l'écriture et l'impression pour venir en aide à la mémoire, et les très nombreux outils disponibles pour simplifier et pour abréger les classifications explorées par les mathématiciens, la classification cérébrale est limitée uniquement par le temps passé à l'exercer. Sans outils, il existe des limites contraignantes, bien sûr. Le cortex cérébral de deux millimètres d'épaisseur des êtres humains possède une surface équivalente à environ quatre feuilles de papier A4, celui du chimpanzé est d'une feuille et celui d'un singe de la taille d'une carte postale. Nous estimons que la mémoire totale intellectuellement accessible est de l'ordre de

Réf. 161

$$M_{\text{intellectuelle}} \approx 1 \text{ Go} , \quad (77)$$

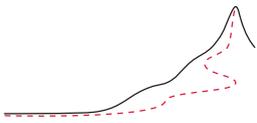
avec cependant une grande marge d'erreur expérimentale.

Le cerveau possède également une capacité de traitement non parallèle. On démontre cela de la manière la plus éclatante par la conséquence la plus importante qui dérive de la mémoire et de la classification : la pensée et le langage. En réalité, les nombreux types de pensée ou de langage que nous employons, tels que la comparaison, la distinction, le souvenir, la reconnaissance, l'association, la description, la déduction, l'explication, l'imagination, etc., décrivent tous différentes manières de classifier les mémoires ou les perceptions. Au final, chaque type de pensée ou d'élocution classe directement

* La puissance consommée du cerveau est également importante : bien qu'il ne représente que 2 % environ de la masse corporelle, il utilise 25 % de l'énergie issue de l'alimentation.

ou indirectement les observations. Ô combien les ordinateurs sont-ils loin d'accomplir cela ! La première tentative, en 1966, fut une plaisanterie de programmeur due à Joseph Weizenbaum : le célèbre programme de dialogue homme-machine Eliza (essayez-le sur www.manifestation.com/neurotoys/eliza.php3) est une parodie du jeu du psychanalyste. Même aujourd'hui, plus de 40 ans après, la conversation avec un programme informatique comme Friendbot (trouvez-le sur www.friendbot.co.uk) constitue toujours une expérience décevante. Pour appréhender les raisons pour lesquelles ce développement reste laborieux, nous nous demandons :





CHAPITRE 9

LA PENSÉE ET LE LANGAGE

QU'EST-CE QUE LE LANGAGE ?

« Gardez-vous le droit de penser, car penser faussement est mieux que de ne pas penser du tout. »
Hypatie d'Alexandrie

« Ein Satz kann nur sagen, *wie* ein Ding ist, nicht *was* es ist* ». »
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 3.221

Le langage est probablement le don le plus précieux de la nature humaine. En exploitant la capacité à produire des sons et à coucher de l'encre sur une feuille, les individus attribuent certains *symboles*** , également dénommés *mots* ou *termes* dans ce contexte, aux nombreuses entités abstraites qu'ils produisent à l'aide de leur pensée. On dit alors qu'une telle catégorisation est utilisée pour définir un *concept* ou une *notion* ; elle est mise en *italique* dans ce texte. Un ensemble élémentaire de concepts forme un langage*** . En d'autres termes, un *langage (humain)* représente un procédé typique par lequel les gens interagissent symboliquement entre eux**** . Il existe des langages humains fondés sur des expressions du visage, sur des gestes, sur des mots prononcés, sur des sifflements, sur des mots écrits, et d'autres. L'emploi du langage *parlé* est considérablement plus jeune que l'espèce humaine, il semble qu'il soit apparu il y a deux cent mille ans environ seulement. Le langage écrit est encore plus récent, c'est-à-dire vieux de seulement six mille ans environ. Mais l'ensemble des concepts utilisés, le *vocabulaire*, est toujours en expansion.

* Les propositions peuvent uniquement dire *comment* sont les choses, et non pas *ce qu'elles* sont.

** Un symbole est une catégorie de *signe*, c'est-à-dire une entité associée par une certaine convention à l'objet auquel il se réfère. D'après Charles Peirce (1839–1914) – lisez www.peirce.org – le philosophe le plus original qui soit né aux États-Unis, un symbole diffère d'une *icône* (ou *image*) et d'un *indicateur*, qui sont également attachés à des objets par convention, en ceci qu'il ne ressemble pas à l'objet, à la différence de l'icône, et en ceci qu'il ne possède aucun contact avec l'objet, à la différence d'un indicateur.

*** La reconnaissance que le langage est fondé sur une division des idées, en utilisant les diverses différences qui existent entre elles pour les distinguer, émergea avec le penseur suisse Ferdinand de Saussure (1857–1913), qui est considéré comme le fondateur de la linguistique. Son manuel *Cours de linguistique générale*, Éditions Payot, 1985, est resté le cadre de référence de ce domaine durant plus d'un demi-siècle. Remarquez que Saussure, contrairement à Peirce, préfère utiliser le mot « signe » à celui de « symbole », et que sa définition du mot « signe » inclut également l'objet auquel il se réfère.

**** Pour des définitions légèrement différentes et une profusion d'informations complémentaires intéressantes concernant le langage, lisez l'ouvrage magnifique de DAVID CRYSTAL, *The Cambridge Encyclopedia of Language*, Cambridge University Press, 1987.

TABLEAU 17 Fondamentaux du langage.

A S P E C T	V A L E U R
Phonèmes humains	env. 70
Phonèmes anglais	44
Phonèmes allemands	40
Phonèmes français	37
Phonèmes italiens	30
Mots de la langue anglaise (plus nombreux que la plupart des langues, avec une exception possible pour l'allemand)	env. 350 000
Nombre de langues sur Terre en l'an 2000	env. 8 000

Pour les êtres humains, la compréhension du langage commence peu de temps après la naissance (peut-être même avant), son utilisation active débute à l'âge d'un an environ, la faculté de lire peut commencer dès l'âge de deux ans, et le vocabulaire personnel continue de s'enrichir tant que l'intérêt demeure vivant.

La physique étant une manière oisive de discuter du mouvement, elle fait usage du langage comme d'un outil essentiel. Des nombreux aspects du langage, de la littérature à la poésie, des blagues aux ordres militaires, de toutes les expressions d'encouragement, de rêves, d'amour et d'émotion, la physique n'utilise qu'une petite portion plutôt particulière. Cette tranche est définie par la restriction inhérente à la discussion sur le mouvement. Puisque le mouvement est une observation, c'est-à-dire une interaction avec l'environnement, que plusieurs personnes éprouvent de la même façon, ce choix pose un grand nombre de restrictions sur le contenu – le vocabulaire – et sur la forme – la grammaire – de ces discussions.

Par exemple, à partir de la définition que les observations sont partagées par d'autres, nous obtenons la nécessité que les formulations qui les décrivent soient traduisibles dans toutes les langues. Mais à partir de quand une formulation peut-elle être traduite ? Deux points de vue radicalement opposés sont possibles sur cette question : le premier soutient que *toutes* les propositions peuvent être traduites, puisqu'il découle des propriétés du langage humain que chacun d'eux peut exprimer toutes les formulations possibles. Selon cette idée, seuls les systèmes de signes qui nous permettent d'exprimer le spectre complet des messages humains forment un *langage humain*. Cette propriété distingue le langage des signes et la parole des langages des animaux, tels que les signes utilisés par les singes, les oiseaux ou les abeilles, mais également des langages informatiques, tels que le Pascal ou le langage C. Avec cette signification du langage, toutes les déclarations peuvent être traduites, par définition.

Il est encore plus stimulant de suivre le point de vue opposé dans une discussion, à savoir que la traduction précise n'est possible que pour les déclarations qui utilisent des termes, des types de mots et des structures grammaticales que nous rencontrons dans *toutes* les langues. La recherche linguistique a consacré des efforts considérables dans le dépouillement des *universaux* phonologiques, grammaticaux et sémantiques, comme nous les appelons, à partir des quelque 7 000 langues que nous pensons qu'il existe au-

jour d'hui*.

L'analyse de l'aspect *phonologique*, qui a montré par exemple que chaque langue possède au minimum deux consonnes et deux voyelles, ne fournit aucun support pour cette discussion concernant la traduction**. En étudiant l'aspect *grammatical* (ou *syntactique*), nous découvrons que toutes les langues utilisent des éléments de base, appelés « mots », qu'elles regroupent en phrases. Elles ont toutes des pronoms pour la première et la deuxième personne, « je » et « tu », et contiennent toujours des noms et des verbes. Toutes les langues utilisent des *sujets* et des *attributs* ou, comme nous le disons généralement, les trois entités *sujet*, *verbe* et *complément d'objet*, bien que ce ne soit pas toujours dans cet ordre. Vérifiez-le avec les langues que vous connaissez.

Défi 210 e

Sur l'aspect *sémantique*, la longue liste des universaux lexicaux, c'est-à-dire des mots qui apparaissent dans toutes les langues, tels que « mère » ou « Soleil », s'est récemment vu attribuer une structure. La linguiste Anna Wierzbicka a réalisé une recherche des briques de base à partir desquelles tous les concepts peuvent être définis. Elle a recherché la définition de chaque concept à l'aide de ceux qui sont les plus simples, et a persévéré ainsi jusqu'à ce qu'un niveau fondamental soit atteint, qui ne puisse pas être davantage décomposé. L'ensemble des concepts qui restent alors est représenté par les primitives. En répétant cet exercice pour de nombreuses langues, Wierzbicka s'aperçut que cette liste est la même dans tous les cas. Elle avait ainsi découvert les *primitives sémantiques universelles*. En novembre 1992, cette liste contenait les mots donnés dans le [Tableau 18](#).

D'après les longues études d'Anna Wierzbicka et de son école de recherche, tous ces concepts existent dans toutes les langues du monde étudiées jusqu'à présent***. Ils ont établi la signification de chaque primitive en détail, réalisé des vérifications cohérentes et évincé les approches alternatives. Ils ont vérifié cette liste dans des langues issues de tous les groupes de langues, dans les langues de tous les continents, montrant ainsi que ce résultat est valable partout. Dans chaque langue, tous les autres concepts peuvent être définis à l'aide des primitives sémantiques.

Réf. 163

Pour le formuler simplement, l'apprentissage de la parole implique l'acquisition de ces termes fondamentaux, l'apprentissage de la manière de les combiner et l'assimilation des désignations de ces composés. La définition du langage donnée ci-dessus, à savoir celle d'un moyen de communication qui nous permet d'exprimer toutes les choses que

* Une liste étendue avec 6 800 langues (et avec 41 000 noms d'idiomes et de dialectes) peut être consultée sur le site Web de Barbara Grimes, *Ethnologue – Languages of the World*, que vous pouvez trouver à l'adresse www.ethnologue.com ou dans un livre qui porte le même titre.

On estime que 15 000 ± 5 000 langues ont existé dans le passé.

Néanmoins, dans le monde d'aujourd'hui, et de manière certaine dans les sciences, il est souvent suffisant de connaître sa propre langue maternelle et l'anglais. Puisque l'anglais est la langue ayant le plus grand nombre de mots, bien l'apprendre représente un défi plus important que l'apprentissage de la plupart des autres langues.

Réf. 162

** Les études explorent des thèmes tels que l'observation que dans un grand nombre de langues le mot désignant « petit » contient un « i » sonore (ou un « e » aigu) : little, piccolo, klein, tiny, pequeño, chiisai, les exceptions étant : small, parvus.

*** Il est facile d'imaginer que ces recherches marchent sur les pieds de nombreuses personnes. Une liste qui soutient que « vrai », « bien », « création », « vie », « mère » ou « dieu » sont composés provoquera des réactions violentes, malgré la justesse de ces affirmations. En réalité, certains de ces termes furent ajoutés dans la liste de 1996, qui est un tant soit peu plus longue. De surcroît, une liste qui soutient que nous n'avons qu'à peu près trente concepts fondamentaux dans nos esprits est considérée par beaucoup comme affligeante.

TABLEAU 18 Les primitives sémantiques, d'après Anna Wierzbicka.

I, you, someone, something, people	[substantifs]
this, the same, one, two, all, much/many	[déterminatifs et quantificateurs]
know, want, think, feel, say	[prédicats mentaux]
do, happen	[action, événement et mouvement]
good, bad	[évaluateurs]
big, small	[descripteurs]
very	[intensificateur]
can, if (would)	[modalité irréaliste]
because	[causalité]
no (not)	[négation]
when, where, after (before), under (above)	[temps et lieu]
kind of, part of	[taxonomie, partonomie]
like	[limite/similarité]

nous souhaitons dire, peut ainsi être raffinée : un *langage humain* représente n'importe quel ensemble de concepts qui intègre les primitives sémantiques universelles.

Pour les physiciens – qui ont pour objectif de discuter avec le nombre de mots le plus petit possible –, la liste des primitives sémantiques possède trois facettes. Premièrement, cette approche est attrayante, car elle est similaire à l'idéal même de la physique : l'idée de primitive attribue une structure rudimentaire à toutes les choses qui peuvent être dites, de même que les éléments atomiques structurent tous les objets qui peuvent être observés. Deuxièmement, la liste des primitives peut être organisée. En réalité, celle-ci peut être divisée en deux groupes : un groupe qui contient tous les termes décrivant le mouvement (faire, se produire, quand, où, ressentir, petit, etc. – peut-être un terme pour le champ sémantique relatif à la lumière ou à la couleur devrait-il être ajouté) et l'autre groupe qui contient tous les termes nécessaires pour parler des ensembles abstraits et des relations (ceci, tout, comme ça, non, si, etc.). Même pour les linguistes, les aspects du mouvement et les concepts logiques sont les entités fondamentales de l'expérience et de la pensée humaines. Pour exprimer ce sujet en termes plus concrets, les primitives sémantiques contiennent les éléments de base de la physique et les éléments de base des mathématiques. Tous les êtres humains sont donc à la fois des physiciens et des mathématiciens. Le troisième point est que la liste des primitives est trop longue. La division de cette liste en deux catégories suggère directement l'existence de listes plus courtes, nous devons juste demander aux physiciens et aux mathématiciens des résumés concis de leurs domaines respectifs. Pour apprécier cet objectif, essayez de définir ce que « si » signifie ou ce qu'un « opposé » est –, et explorez vos propres manières de réduire cette liste.

Défi 211 d

La réduction de la liste des primitives représente également un de nos buts dans cette aventure. Nous explorerons le groupe mathématique des primitives dans ce chapitre, le groupe physique nous occupera durant le reste de notre aventure. Cependant, une liste plus succincte de primitives n'est pas suffisante. Notre objectif est de parvenir à une liste constituée d'*un seul* concept élémentaire. Toutefois, atteindre ce but n'est pas aisé.

Premièrement, nous avons besoin de vérifier si l'ensemble des concepts de la physique classique que nous avons découverts jusqu'ici est complet. Les concepts de la physique classique peuvent-ils décrire *toutes* les observations ? La prochaine partie, quantique, de notre aventure est vouée à cette question. Notre deuxième devoir consiste à réduire cette liste. Cette tâche n'est pas immédiate, nous avons déjà découvert que la physique est fondée sur une définition qui se mord la queue : en physique galiléenne, l'espace et le temps sont définis en faisant appel à la matière, et la matière est définie par le biais de l'espace et du temps. Nous aurons besoin d'efforts plutôt conséquents pour surmonter cet écueil. La partie finale de ce texte raconte l'histoire précise. Suite à de nombreuses aventures, nous découvrirons réellement un concept fondamental sur lequel tous les autres concepts sont fondés.

Nous pouvons résumer tous les résultats de la linguistique, mentionnés ci-dessus, de la manière suivante. En construisant une phrase composée uniquement d'un sujet, d'un verbe et d'un complément d'objet, faite seulement de noms et de verbes, en utilisant uniquement des concepts issus des primitives sémantiques, nous sommes certains qu'elle puisse être traduite dans toutes les langues. Ceci explique pourquoi les manuels de physique sont si souvent ennuyeux : les auteurs craignent trop souvent de s'éloigner de ce schéma fondamental. D'un autre côté, la recherche a montré que de telles déclarations directes ne sont pas restrictives : avec elles, nous pouvons dire tout ce qui peut être dit.

« Chaque mot était au départ un poème.
Ralph Waldo Emerson* »

QU'EST-CE QU'UN CONCEPT ?

« Les concepts sont uniquement les résultats, que le langage a permis de pérenniser, d'un processus antérieur de comparaison.
William Hamilton »

Un groupe de personnes a poussé jusqu'à l'extrême le strict point de vue sur la traduction et sur la précision. Elles ont bâti tous les concepts à partir d'un ensemble encore plus petit de primitives, à savoir seulement deux : « ensemble » et « relation », et ont exploré les diverses combinaisons possibles de ces deux concepts, en observant leurs classifications. Pas à pas, ce groupe radical, couramment appelé *mathématiciens*, est parvenu à définir avec une précision absolue des concepts tels que les nombres, les points, les courbes, les équations, les groupes de symétrie et d'autres encore. La construction de ces concepts est partiellement résumée dans ce qui suit et se trouve en partie dans l'[Annexe ??](#).

Cependant, en dépit de cette précision compliquée, en fait précisément à cause d'elle, aucun concept mathématique ne traite de la nature ou des observations**. Par consé-

* Ralph Waldo Emerson (1803–1882), écrivain et philosophe américain.

** Dans la mesure où nous pouvons affirmer que les mathématiques sont fondées sur les concepts d'« ensemble » et de « relation », qui sont basés sur l'expérience, nous pouvons dire que les mathématiques explorent une partie de la réalité, et que ses concepts sont *dérivés* de l'expérience. On appelle *platonisme* ces points de vue ainsi que d'autres idées analogues concernant les mathématiques. Plus concrètement, le platonisme est l'idée selon laquelle les concepts des mathématiques existent *indépendamment* des gens, et qu'ils sont découverts, mais non inventés, par les mathématiciens.

En bref, puisque les mathématiques font usage du cerveau, lequel est un système physique, nous pouvons

quent l'étude du mouvement requiert d'autres concepts plus utiles. De quelles propriétés un concept utile devrait-il être doté ? Par exemple, qu'est-ce que la « passion » et qu'est-ce qu'un « coton-tige » ? Manifestement, un concept pratique implique l'existence d'une liste de ses parties, de ses aspects et de leurs relations internes, ainsi que de leur relation avec le monde extérieur. Les spécialistes de nombreux domaines, de la philosophie à la politique, s'accordent sur le fait que la définition de chaque *concept* exige :

- un contenu explicite et fixé,
- des limites explicites et fixées,
- un domaine d'application explicite et fixé.

L'incapacité à exprimer ces propriétés ou à les fixer est souvent la manière la plus facile de distinguer les *charlatans* des savants plus dignes de confiance. Des termes définis de manière floue, qui ne sont donc pas qualifiés de concepts, surgissent régulièrement dans les légendes, par exemple « dragon » ou « sphinx », ou dans les idéologies, comme « prolétaire » ou « âme ». Même la physique n'en est pas exempte. Notamment, nous découvrirons plus tard que ni l'« Univers » ni la « création » ne sont des concepts. Êtes-vous capable d'argumenter sur cette situation ?

Défi 212 s

Mais les trois propriétés déterminantes de chaque concept sont intéressantes en elles-mêmes. Le contenu explicite signifie que les concepts sont construits les uns à partir des autres. En particulier, les concepts les plus fondamentaux semblent être ceux qui n'ont aucune partie et aucune relation externe, mais seulement des relations internes. Pouvez-vous en citer un ? C'est seulement dans la dernière partie de cette promenade que nous dévoilerons le dernier mot sur ce sujet.

Défi 213 s

L'exigence de limites explicites et de contenus explicites implique également que tous les concepts qui décrivent la nature sont des *ensembles*, puisque les ensembles vérifient cette même condition. De surcroît, des domaines d'application explicites entraînent que tous les concepts sont aussi des *relations**. Puisque les mathématiques sont fondées sur les concepts d'« ensemble » et de « relation », nous en déduisons immédiatement que celles-ci peuvent définir la *forme* d'un concept quelconque, particulièrement à chaque fois qu'une précision élevée est exigée, comme dans l'étude du mouvement. Évidemment, le *contenu* de cette description est uniquement fourni par l'étude de la nature elle-même, ce n'est qu'alors que les concepts deviennent utiles.

Dans le cas de la physique, la quête de concepts suffisamment précis peut être vue comme l'unique fil conducteur qui structure la longue épopée de cette discipline. Régulièrement, de nouveaux concepts sont proposés, explorés sous toutes leurs coutures et testés. Finalement, ces concepts sont rejetés ou adoptés, de la même manière qu'un enfant adopte ou rejette un nouveau jouet. Les enfants le font de manière inconsciente, les scientifiques le font consciemment, par le biais du langage**. Pour cette raison, les

effectivement affirmer que *les mathématiques sont de la physique appliquée*.

* Nous voyons ainsi que chaque concept physique est un exemple de *catégorie* (mathématique), c'est-à-dire d'une combinaison d'objets et d'applications. Pour plus de détails concernant les catégories, notamment la définition précise de ce terme, lisez la [page 185](#).

** Les concepts formés inconsciemment au cours de notre prime jeunesse sont les plus difficiles à définir précisément, c'est-à-dire avec le langage. Certaines personnes qui étaient incapables de les définir, tel le philosophe prussien Emmanuel Kant (1724–1804), avaient l'habitude de les qualifier de concepts « a priori » (comme l'« espace » et le « temps ») pour les différencier des concepts « a posteriori » définis plus clairement.

concepts sont universellement intelligibles.

Remarquez que le concept de « *concept* » lui-même, n'est pas définissable indépendamment de l'expérience ; un concept est quelque chose qui nous aide à agir et réagir vis-à-vis du monde dans lequel nous vivons. Qui plus est, les concepts n'existent pas dans un monde distinct du monde physique : chaque concept fait appel à la mémoire de son utilisateur, puisque cet utilisateur doit se remémorer de quelle manière il a été formé. Par conséquent, chaque concept a besoin d'un support matériel pour son utilisation et son application. Donc toute réflexion et toute science sont fondamentalement basées sur l'expérience.

En conclusion, tous les concepts sont fondés sur l'idée que la nature est faite de parties en relation. Cette idée conduit aux couples complémentaires tels que « nom-verbe » en linguistique, « ensemble-relation » ou « définition-théorème » en mathématiques, et « aspect de la nature-modèle de la nature » en physique. Ces dualités guident constamment la pensée humaine, depuis l'enfance, comme la psychologie évolutive peut l'attester.

QUE SONT LES ENSEMBLES ? QUE SONT LES RELATIONS ?

“ Alles, was wir sehen, könnte auch anders sein.
Alles, was wir überhaupt beschreiben können,
könnte auch anders sein. Es gibt keine Ordnung
der Dinge a priori*.”
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 5.634 ”

Définir les ensembles et définir les relations constituent les deux actions fondamentales de notre pensée. On peut s'en apercevoir de la manière la plus claire dans n'importe quel livre traitant de mathématiques : un tel ouvrage est généralement divisé en paragraphes intitulés « définition », « théorème », « lemme » et « corollaire ». Le premier type de paragraphe définit des concepts, c'est-à-dire qu'il définit des ensembles, et les trois autres types de paragraphes expriment des relations, c'est-à-dire qu'ils établissent des connexions entre ces ensembles. Les *mathématiques* sont donc l'exploration des concepts symboliques possibles et de leurs relations. Les mathématiques sont la science des nécessités symboliques.

Les ensembles et les relations sont les outils de la classification, c'est pourquoi ils représentent également les instruments de base de n'importe quel bureaucrate. (Regardez la [Figure 84](#).) Cette classe d'êtres humains est caractérisée par un usage intensif de trombones, de dossiers, d'armoires métalliques, d'archives – qui définissent tous divers types d'ensembles – et par l'usage constant de numéros, tels que les références numériques, les numéros de clients, les numéros de passeport, les numéros de comptes, les numéros d'articles de loi – qui définissent les divers types de relations qui existent entre les composantes, c'est-à-dire entre les éléments de ces ensembles.

Les concepts d'ensemble et de relation expriment à la fois, de différentes façons, le fait que la nature peut être *décrite*, c'est-à-dire qu'elle peut être organisée en parties qui

Aujourd'hui, cette distinction s'est révélée non fondée à la fois par l'étude de la psychologie de l'enfant (voir la note de la [page 163](#)) et par la physique elle-même, de telle sorte que ces qualificatifs ne seront plus cités dans notre promenade.

* Tout ce que nous voyons pourrait être différent de ce qu'il est. Tout ce que nous pouvons décrire pourrait être radicalement différent de ce qu'il est. Il n'existe aucun ordre prédéfini des choses.



FIGURE 84 Outils permettant de définir des ensembles (à gauche) et des relations (à droite).

TABLEAU 19 Les propriétés déterminantes d'un ensemble – les axiomes ZFC.

AXIOMES DE LA THÉORIE DES ENSEMBLES DE ZERMELO-FRAENKEL-C

- Deux ensembles sont égaux si et seulement s'ils ont les mêmes éléments (axiome d'extensionnalité).
- L'ensemble vide est un ensemble (axiome de l'ensemble vide).
- Si x et y sont des ensembles, alors la paire $\{x, y\}$ est un ensemble (axiome de la paire).
- Si x est un ensemble d'ensembles, l'union de tous ses membres est un ensemble (axiome de la réunion).
- L'entité $\{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\{\emptyset\}\}, \{\{\{\emptyset\}\}\}, \dots\}$ est un ensemble^a – autrement dit, les séries infinies, comme les entiers naturels, sont des ensembles (axiome de l'infini).
- Une entité définie par tous les éléments ayant une propriété donnée est un ensemble, à condition que cette propriété soit raisonnable ; quelques détails techniques importants qui définissent le terme « raisonnable » sont nécessaires (axiome de séparation).
- Si le domaine de définition d'une fonction est un ensemble, il en est de même pour son image (axiome de remplacement).
- L'entité y de tous les sous-ensembles de x est également un ensemble, appelé l'ensemble des parties (axiome de l'ensemble des parties).
- Un ensemble n'est pas élément de lui-même – plus quelques détails techniques (axiome de fondation).
- Le produit d'une famille d'ensembles non vides est non vide. De manière équivalente, le fait de sélectionner des éléments dans une liste d'ensembles nous permet de construire un nouvel ensemble – plus des détails techniques (axiome du choix).

a. La formulation la plus courante (bien qu'équivalente à celle donnée ci-dessus) est : l'entité $\{\emptyset, \{\emptyset\}, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}, \{\emptyset, \{\emptyset, \{\emptyset\}\}\}, \dots\}$ est un ensemble.

forment un tout. L'action de grouper des aspects de l'expérience, c'est-à-dire l'acte de les classifier, est exprimée en langage formel en disant qu'un ensemble est défini. Autrement dit, un *ensemble* est une collection d'*éléments* de notre pensée. Tout ensemble distingue chaque élément des autres éléments et de l'ensemble lui-même. Cette définition d'« ensemble » est dénommée la définition *approximative*. Pour la physique, cette définition est suffisante, mais vous ne rencontrerez pas beaucoup de gens qui admettent cela. En réalité, les mathématiciens ont peaufiné cette définition du concept d'« ensemble » à plusieurs reprises au cours du temps, parce que la définition approximative ne fonctionne pas très bien pour des ensembles infinis. Un exemple célèbre concerne l'histoire des ensembles qui ne se contiennent pas eux-mêmes. Manifestement, tout ensemble est de l'une ou l'autre de ces espèces : soit il se contient lui-même, soit il ne se contient pas. Si nous considérons l'ensemble de tous les ensembles qui *ne* se contiennent *pas* eux-mêmes, à

Défi 214 s quelle espèce celui-ci appartient-il ?

Pour esquiver tous les problèmes dus au concept d'« ensemble », les mathématiques ont besoin d'une définition précise. La première définition répondant à ce critère fut donnée par le mathématicien allemand Ernst Zermelo (n. Berlin 1871, d. -Fribourg-en-Brisgau 1951) et le mathématicien germano-israélien Adolf/Abraham Fraenkel (n. Munich 1891, d. -Jérusalem 1965). Par la suite, ce que nous appelons l'*axiome du choix* fut ajouté, afin de pouvoir manipuler une classe plus vaste d'ensembles infinis. Le résultat de ces efforts est appelé la définition *ZFC**. À partir de cette définition fondamentale, nous pouvons construire tous les concepts mathématiques utilisés en physique. D'un point de vue pratique, il est suffisant de garder à l'esprit que, pour la physique tout entière, la définition approximative d'un ensemble est équivalente à la définition précise ZFC, et même, en réalité, à la définition ZF, plus simple. Des subtilités ne surgissent que pour certains types particuliers d'ensembles infinis, mais ceux-ci ne sont pas utilisés en physique. En bref, à partir de la définition approximative et élémentaire de l'ensemble, nous pouvons bâtir tous les concepts utilisés en physique.

Réf. 165

La définition imparfaite de l'ensemble est loin d'être inintéressante. Pour satisfaire deux personnes lorsque nous partageons un gâteau, nous suivons cette règle : je coupe, tu choisis. Cette méthode possède deux propriétés : elle est *juste*, puisque chacun pense qu'il a la portion qu'il mérite, et elle est *pleinement satisfaisante*, puisque chacun a le sentiment d'avoir au moins autant que l'autre. Quelle règle est nécessaire pour trois personnes ? Et pour quatre ?

Défi 216 d

Hormis le fait de définir des ensembles, chaque enfant ou chaque intelligence crée des liens entre les différents aspects de l'expérience. Par exemple, lorsqu'il perçoit une voix, il fait automatiquement le rapprochement qu'un homme est présent. En langage formel, les connexions de ce type sont appelées *relations*. Les relations associent et différencient des éléments par un truchement différent des ensembles : les deux forment un couple complémentaire. La définition d'un ensemble rassemble de nombreux objets et en même temps les partage en deux camps : ceux qui appartiennent à cet ensemble et ceux qui n'y appartiennent pas ; la définition d'une relation (binaire) rassemble des éléments deux par deux et les partage en de nombreuses parties, à savoir les nombreux couples qu'elle définit.

Ensembles et relations sont des concepts étroitement reliés. En réalité, nous pouvons définir des relations (mathématiques) à l'aide des ensembles. Une *relation (binaire)* entre deux ensembles X et Y est un sous-ensemble de l'ensemble-produit, où l'*ensemble-produit* ou *produit cartésien* $X \times Y$ représente l'ensemble de tous les couples (x, y) avec $x \in X$ et $y \in Y$. Un *couple*, ou paire ordonnée, (x, y) peut facilement être défini à l'aide des ensembles. Pouvez-vous découvrir comment ? Par exemple, dans le cas de la relation

Défi 217 s

* Un aperçu général de la théorie axiomatique des ensembles est donné par PAUL J. COHEN & REUBEN HERSCH, Non-Cantorian set theory, *Scientific American* 217, pp. 104–116, 1967. C'était le temps où *Scientific American* était une revue de qualité.

Réf. 164

D'autres types d'entités, plus générales que les ensembles standards, vérifiant d'autres propriétés, peuvent aussi être définis, et font également l'objet d'une recherche mathématique (comparativement plus réduite).

Page 184

Pour en trouver un exemple, lisez la section sur les nombres cardinaux un peu plus loin. De telles entités plus générales sont appelées des classes à chaque fois qu'elles contiennent au moins un ensemble. Pouvez-vous en

Défi 215 s

citer un exemple ? Dans l'ultime partie de notre ascension montagnaise, nous rencontrerons des concepts physiques qui ne sont décrits ni par des ensembles ni par des classes, et qui ne contiennent aucun ensemble.

« est l'épouse de », l'ensemble X est l'ensemble de toutes les femmes et l'ensemble Y celui de tous les hommes ; la relation est donnée par la liste de tous les couples appropriés, laquelle est beaucoup plus petite que le produit cartésien, c'est-à-dire que l'ensemble de toutes les combinaisons possibles femme-homme.

Nous devons mentionner que la définition de la relation que nous venons de donner n'est pas vraiment complète, puisque toute construction du concept d'« ensemble » contient déjà certaines relations, telle la relation « est élément de ». Il semble qu'il ne soit pas possible de réduire complètement l'un des deux concepts « ensemble » ou « relation » à l'autre. Cette impossibilité se reflète dans les situations physiques d'ensemble et de relation, tels l'espace (comme un ensemble de points) et la distance, qui semblent aussi impossibles à séparer complètement l'un de l'autre. En d'autres termes, bien que les mathématiques ne soient pas concernées par la nature, ses deux concepts fondamentaux, ensemble et relation, sont empruntés à la nature. De surcroît, ces deux concepts, comme ceux d'espace-temps et de particules, sont définis chacun à l'aide de l'autre.

INFINI

Les mathématiciens découvrirent immédiatement que le concept d'« ensemble » n'est utile que si nous pouvons également appeler des collections telles que $\{0, 1, 2, 3, \dots\}$, c'est-à-dire le nombre 0 et tous ses successeurs, un « ensemble ». Pour y parvenir, l'une des propriétés de la liste de Zermelo-Fraenkel qui définit le terme « ensemble » précise explicitement que cette collection peut être appelée un ensemble. (En fait, l'axiome du remplacement stipule aussi que les ensembles peuvent être infinis.) L'infini est donc introduit en mathématiques et dans les instruments de notre pensée directement depuis le début, dans la définition du mot « ensemble ». Lorsque nous décrivons la nature, avec ou sans les mathématiques, nous ne devrions jamais oublier cette conséquence. Quelques points supplémentaires concernant l'infini devraient faire partie du bagage culturel de chaque expert du mouvement.

Seuls les *ensembles* peuvent être infinis. Et les ensembles possèdent des composantes, à savoir leurs éléments. Lorsqu'une chose ou un concept est dit « infini », nous pouvons *toujours* nous demander et préciser ce que sont ses composantes : pour l'espace ce sont les points, pour le temps les instants, pour l'ensemble des entiers les entiers, etc. Une entité indivisible ou divisible de façon finie ne peut pas être qualifiée d'infinie*.

Un ensemble est infini s'il existe une fonction de celle-ci dans elle-même qui soit *injective* (c'est-à-dire que des éléments différents sont associés à des images différentes) mais pas *surjective* (c'est-à-dire que certains éléments n'apparaissent pas comme images d'éléments de départ). Par exemple, l'application $n \mapsto 2n$ montre que l'ensemble des entiers est infini. L'infini peut également être vérifié d'une autre manière : un ensemble est infini s'il demeure identique après suppression, même répétée, d'un élément. Nous avons juste besoin de nous rappeler que l'ensemble vide est *fini*.

Il existe de *nombreux types* d'infinis, tous de tailles différentes**. Cet important ré-

C'est là que nous commencerons vraiment à nous amuser.

* Par conséquent, la plupart des dieux, qui sont des concepts et donc des ensembles, sont soit finis soit, dans le cas où ils sont infinis, divisibles. Il semble que seules les conceptions polythéistes du monde ne soient pas perturbées par cette conclusion.

** En fait, il existe un nombre tellement énorme de types d'infinis qu'aucun de ces infinis ne décrit vraiment

sultat fut découvert par le mathématicien danois-russe-allemand Georg Cantor (1845–1918). Il montra qu'à partir de l'ensemble dénombrable des entiers naturels nous pouvons construire d'autres ensembles infinis qui ne sont pas dénombrables. Il fit cela en montrant que l'ensemble des parties $P(\omega)$, à savoir l'ensemble de tous les sous-ensembles, d'un ensemble infiniment dénombrable est infini, mais *pas* infiniment dénombrable. Pour le dire de façon plus abrupte, l'ensemble des parties d'un ensemble est « plus infini » que l'ensemble d'origine. Les nombres réels \mathbb{R} , qui seront bientôt définis, constituent un exemple d'ensemble infini indénombrable, il y en a beaucoup plus qu'il n'y a d'entiers naturels. (Pouvez-vous le démontrer ?) Cependant, *tout* type d'ensemble infini contient au moins un sous-ensemble qui est infiniment dénombrable.

Défi 218 s

Même pour un ensemble infini, nous pouvons définir la taille comme étant le nombre de ses éléments. Cantor appela cela le *cardinal* d'un ensemble. Le cardinal d'un ensemble fini est simplement donné par le nombre de ses éléments. Le cardinal d'un ensemble des parties de E est 2 exposant le cardinal de E . Le cardinal de l'ensemble des entiers est noté \aleph_0 , prononcé « aleph zéro », d'après la première lettre de l'alphabet hébreu. Le cardinal *indénombrable* le plus petit est noté \aleph_1 . Le cardinal suivant est noté \aleph_2 , etc. Toute une branche des mathématiques est impliquée dans la manipulation de ces « nombres » infinis : addition, multiplication, exponentiation sont aisément définies. Pour certains d'entre eux, même les logarithmes et d'autres fonctions prennent leur sens*.

Page 293

Les nombres cardinaux définis de cette manière, y compris \aleph_n , \aleph_ω , \aleph_{\aleph_n} , sont qualifiés d'accessibles, parce que depuis Cantor nous avons défini des types d'infinis encore plus grands, qualifiés d'*inaccessibles*. Ces nombres (les cardinaux inaccessibles, les cardinaux mesurables, les cardinaux supercompacts, etc.) requièrent la présence d'axiomes supplémentaires dans la théorie des ensembles, prolongeant ainsi le système ZFC. Comme les ordinaux et les cardinaux, ils constituent des exemples de ce que nous appelons des nombres *transfinitis*.

Défi 219 s

Le cardinal de l'ensemble des nombres réels est égal à celui de l'ensemble des parties de l'ensemble des entiers, à savoir 2^{\aleph_0} . Pouvez-vous montrer cela ? Ce résultat conduit à la célèbre question : Avons-nous $\aleph_1 = 2^{\aleph_0}$ ou non ? L'affirmation que c'est vrai, dénommée l'*hypothèse du continu*, est demeurée sans démonstration durant plusieurs générations. La réponse étonnante vint en 1963 : la définition usuelle du concept d'ensemble n'est pas assez explicite pour statuer sur cette question. En précisant le concept d'ensemble avec plus de détails, à l'aide d'axiomes supplémentaires – rappelez-vous que les axiomes sont des propriétés caractéristiques –, vous pouvez dévoiler que l'hypothèse du continu est soit vraie soit fausse, comme vous le voulez.

Réf. 166

Un autre résultat de recherche concernant les nombres transfinitis est primordial : pour chaque définition d'un type de cardinal infini, il semble être possible d'en découvrir un plus grand. Dans la vie quotidienne, l'idée d'infini est souvent utilisée pour mettre un terme à toute discussion sur la grandeur : « Mon grand frère est plus fort que le tien. » « Mais le mien est infiniment plus fort que le tien ! » Les mathématiques ont montré que les questions sur la taille persistent toujours après cela : « La force de mon frère est égale au cardinal de l'ensemble des parties de celui du tien ! » Rucker signale que les

ce nombre lui-même. Techniquement parlant, il existe autant d'infinis que de nombres ordinaux.

* De nombreux résultats sont résumés dans l'excellent et ravissant livre de poche de RUDY RUCKER, *Infinity and the Mind – the Science and Philosophy of the Infinite*, Bantam, Toronto, 1983.

Réf. 167 mathématiciens conjecturent qu'il n'existe aucune issue possible ni aucune fin concevable à ces discussions.

Défi 220 e Pour les physiciens, une question élémentaire surgit immédiatement. Les quantités infinies existent-elles dans la nature ? Ou mieux, est-il nécessaire d'employer des quantités infinies pour décrire la nature ? Vous devriez pouvoir éclaircir votre opinion sur ce sujet. Cela sera définitivement tranché dans la suite de notre aventure.

FONCTIONS ET STRUCTURES

Quelles relations sont utiles pour décrire les modèles de la nature ? Un exemple typique est « plus les pierres sont grosses, plus elles sont lourdes ». Une telle relation est d'un type particulier : elle associe une valeur spécifique d'une observable « volume » à une valeur spécifique de l'observable « poids ». Une telle relation un-pour-un est appelée *fonction (mathématique)* ou *application*. Les fonctions représentent les types les plus précis de relations, elles transmettent ainsi un maximum d'informations. De la même manière que les nombres sont utilisés pour les observables, les fonctions permettent une communication facile et précise des relations qui existent entre les observations. Toutes les règles et les « lois » physiques sont par conséquent exprimées à l'aide de fonctions et, puisque les « lois » physiques ont rapport aux mesures, les fonctions numériques sont leurs principales briques fondatrices.

Une *fonction* f , ou *application*, est donc une relation binaire, c'est-à-dire un ensemble $f = \{(x, y)\}$ de couples, où pour chaque valeur du premier élément x , appelé *argument*, il n'existe qu'un *seul* couple (x, y) . Le deuxième élément y est appelé la *valeur* de la fonction pour l'argument x . L'ensemble X de tous les arguments x est appelé le *domaine de définition* et l'ensemble Y de toutes les images y est appelé *ensemble d'arrivée* de la fonction. Au lieu de $f = \{(x, y)\}$, nous écrivons

$$f : X \rightarrow Y \quad \text{et} \quad f : x \mapsto y \quad \text{ou} \quad y = f(x), \quad (78)$$

où le type de flèche – avec une barre au début ou non – indique si nous sommes en train de considérer des ensembles ou des éléments.

Nous remarquons qu'il est également possible d'utiliser la paire « ensemble » et « application » pour définir tous les concepts mathématiques ; dans cette situation une relation est définie à l'aide d'applications. Une école moderne de la pensée mathématique a formalisé cette approche par l'utilisation de *catégories* (mathématiques), un concept qui intègre à la fois les ensembles et les applications sur un même pied d'égalité, dans sa définition*.

Pour réfléchir et discuter plus clairement sur la nature, nous avons besoin de définir des concepts encore plus spécialisés que les ensembles, les relations et les fonctions, parce

* Une *catégorie* est définie comme étant une collection d'objets et une collection de « morphismes », ou d'applications. Les morphismes peuvent être composés, cette composition est associative et il existe un morphisme d'identité. Le monde étrange de la théorie des catégories, parfois appelée abstraction de toutes les abstractions, est présenté dans WILLIAM LAWVERE & STEPHEN H. SCHANUEL, *Conceptual Mathematics : a First Introduction to Categories*, Cambridge University Press, 1997.

Remarquez que chaque catégorie contient un ensemble ; puisqu'il n'est pas aisé de savoir si la nature contient des ensembles, comme nous en débattons à la page 224, il est discutable d'affirmer que les catégories seront utiles dans l'unification de la physique, malgré le charme envoûtant de leur abstraction.

que ces termes de base sont trop généraux. Les concepts les plus importants qui en sont dérivés sont les opérations, les structures algébriques et les nombres.

Une *opération (binaire)* est une fonction qui associe le produit cartésien de deux occurrences d'un ensemble X à lui-même. En d'autres termes, une opération w prend un couple d'arguments $x \in X$ et lui affecte une valeur $y \in X$:

$$w : X \times X \rightarrow X \quad \text{et} \quad w : (x, x) \mapsto y. \quad (79)$$

Défi 221 s La division entre des nombres est-elle une opération au sens que nous venons de définir ?

Maintenant, nous sommes prêts à définir le premier des trois concepts fondamentaux des mathématiques. Une *structure algébrique*, également appelée *système algébrique*, est (au sens le plus strict) un ensemble associé à certaines opérations. Les structures algébriques les plus importantes qui apparaissent dans la physique sont les groupes, les espaces vectoriels, et les algèbres.

Page ??

En plus des structures algébriques, les mathématiques sont fondées sur des *structures d'ordre* et sur des *structures topologiques*. Les structures d'ordre sont les éléments de base des nombres et sont nécessaires pour définir des comparaisons de toutes sortes. Les structures topologiques sont construites, via les sous-ensembles, sur le concept de voisinage d'un point. Elles sont nécessaires pour définir la continuité, les limites, le nombre de dimensions, les espaces topologiques et les variétés.

Page ??

Bien évidemment, la plupart des structures mathématiques sont des combinaisons de divers exemples de ces trois types de structures de base. Par exemple, le *système* des nombres réels est donné par l'*ensemble* des nombres réels et par les *opérations* d'addition et de multiplication, la *relation d'ordre* « est plus grand que » et la propriété de *continuité*. Elles sont donc bâties en combinant une structure algébrique, une structure d'ordre et une structure topologique. Rentrons un peu plus dans les détails.

Réf. 168

LES NOMBRES

« Quels nombres sont multipliés par six lorsque nous déplaçons leur dernier chiffre en première position ? »

Défi 222 s

Les nombres représentent le concept mathématique le plus ancien et on les rencontre dans toutes les cultures. La notion de nombre, en grec ἀριθμός, a varié à plusieurs reprises au cours de l'histoire. À chaque fois, le but était d'inclure des classes plus vastes d'objets, mais en conservant toujours l'idée générale que les nombres sont des entités qui peuvent être ajoutées, soustraites, multipliées et divisées.

La manière moderne d'écrire les nombres, comme dans $12\,345\,679 \cdot 54 = 666\,666\,666$, est essentielle pour la science*. Nous pouvons même avancer que l'absence de système efficace pour noter les nombres et pour les manipuler a retardé le progrès de la science de plusieurs siècles. (Par ailleurs, la même chose peut être affirmée concernant la reproduction de masse accessible des textes écrits.)

* Cependant, il n'y a aucune obligation d'écrire des nombres pour faire des mathématiques, comme l'indique MARCIA ASCHER, *Ethnomathematics – A Multicultural View of Mathematical Ideas*, Brooks/Cole, 1991.

Défi 223 s Les nombres les plus simples, 0, 1, 2, 3, 4... sont généralement perçus comme étant directement tirés de l'expérience. Néanmoins, ils peuvent aussi être construits à partir des notions de « relation » et d'« ensemble ». Une des nombreuses manières possibles d'y parvenir (pouvez-vous en trouver une autre ?) consiste à identifier un entier naturel avec l'ensemble de ses prédécesseurs. Avec la relation « successeur de », noté S , cette définition peut être écrite ainsi :

$$\begin{aligned} 0 &:= \emptyset, & 1 &:= S 0 = \{0\} = \{\emptyset\}, \\ 2 &:= S 1 = \{0, 1\} = \{\emptyset, \{\emptyset\}\} & \text{et} & \quad n + 1 := S n = \{0, \dots, n\}. \end{aligned} \quad (80)$$

Page ?? Cet ensemble, associé aux opérations binaires « addition » et « multiplication », constitue le système algébrique $N = (N, +, \cdot, 1)$ des *entiers naturels*. Pour tous les systèmes de nombres, le système algébrique et l'ensemble sont souvent malencontreusement désignés par le même symbole. Le système algébrique N est un semi-anneau, comme il est expliqué dans l'[Annexe ??](#). (Certains auteurs préfèrent ne pas compter le nombre zéro comme un entier naturel.) Les entiers naturels sont, honnêtement, très utiles.

TABLEAU 20 Quelques grands nombres.

NOMBRE	EXEMPLE DANS LA NATURE
Autour de nous	
1	nombre d'anges qui peuvent se trouver en un lieu au même moment, d'après Thomas d'Aquin Réf. 169
8	nombre de fois qu'une feuille de journal peut être pliée dans des directions successivement perpendiculaires
12	nombre maximal de fois qu'une bande de papier a été pliée dans la même direction Réf. 170
20	nombre de chiffres, dans des mesures de précision, qui ne sera probablement jamais atteint
34, 55, 89	pétales des espèces communes de marguerites et de tournesols Réf. 171
57	facettes d'un diamant de taille brillant
2 000	étoiles visibles dans le ciel nocturne, en un lieu et à un instant donnés
15 000	nombre moyen d'objets dans un ménage européen
10^5	feuilles d'un arbre (hêtre de 10 m)
$6 \text{ à } 7 \cdot 10^9$	êtres humains en l'an 2000
10^{17}	fourmis dans le monde
env. 10^{20}	nombre de flocons de neige qui tombent sur la Terre chaque année
env. 10^{24}	grains de sable dans le désert du Sahara
10^{22}	étoiles dans l'Univers
10^{25}	cellules vivantes sur Terre
$1,1 \cdot 10^{50}$	atomes qui constituent la Terre ($6370^3 \text{ km}^3 \cdot 4 \cdot 3,14/3 \cdot 5500 \text{ kg/m}^3 \cdot 30 \text{ mol/kg} \cdot 6 \cdot 10^{23} / \text{mol}$)
10^{81}	atomes dans l'Univers visible
10^{90}	photons dans l'Univers visible
10^{169}	nombre d'atomes tenant dans l'Univers visible

NOMBRE	EXEMPLE DANS LA NATURE
10^{244}	nombre de points de l'espace-temps dans l'Univers visible
Information	
51	record du nombre de langues parlées par une personne
env. 5 000	mots prononcés en moyenne par jour par un homme
env. 7 000	mots prononcés en moyenne par jour par une femme
env. 2 000 000	nombre de scientifiques sur Terre autour de l'an 2000
$3 \cdot 10^8$	mots prononcés pendant une vie (30 mots par minute, les 2/3 du temps éveillé)
10^9	mots entendus et lus pendant une vie
$4 \cdot 10^9$	impulsions échangées entre les deux hémisphères du cerveau chaque seconde
10^{17}	pixels d'images vus au cours d'une vie ($3 \cdot 10^9 \text{ s} \cdot (1/15 \text{ ms}) \cdot 2/3$ (éveillé) $\cdot 10^6$ (nerfs vers le cerveau) Réf. 172
10^{19}	bits d'information traités au cours d'une vie (la valeur ci-dessus fois 32)
env. $5 \cdot 10^{12}$	mots imprimés disponibles dans des livres (distincts) dans le monde (env. $100 \cdot 10^6$ livres constitués de 50 000 mots)
$2^{10} \cdot 3^7 \cdot 8! \cdot 12!$ $= 4,3 \cdot 10^{19}$	positions possibles du Rubik's Cube $3 \times 3 \times 3$ Réf. 173
$5,8 \cdot 10^{78}$	positions possibles de l'analogue du Rubik's Cube $4 \times 4 \times 4$
$5,6 \cdot 10^{117}$	positions possibles de l'analogue du Rubik's Cube $5 \times 5 \times 5$
env. 10^{200}	parties possibles aux échecs
env. 10^{800}	parties possibles au jeu de go
env. 10^{10^7}	états possibles dans un ordinateur personnel
Nos constituants	
600	nombre de muscles du corps humain, parmi lesquels la moitié environ se situent dans le visage
150 000 \pm 50 000	cheveux sur une tête en bonne santé
900 000	neurones dans le cerveau d'une sauterelle
$126 \cdot 10^6$	cellules sensibles à la lumière par rétine (120 millions de bâtonnets et 6 millions de cônes)
$300 \cdot 10^6$	respirations effectuées pendant la vie humaine
$500 \cdot 10^6$	clignements de l'œil pendant une vie (à peu près une fois toutes les quatre secondes à l'éveil)
$3 \cdot 10^9$	batttements de cœur au cours d'une vie humaine
$3 \cdot 10^9$	lettres (paires de bases) dans l'ADN humain haploïde
$6,1 \cdot 10^9$	bits dans un CD
10^{10} à 10^{11}	neurones dans le cerveau humain
$1 \cdot 10^{11}$	êtres humains qui ont déjà vécu
$10^{15 \pm 1}$	cellules dans le corps humain
$10^{16 \pm 1}$	bactéries véhiculées par le corps humain
$> 10^{16}$	bits de mémoire dans le cerveau humain

Le système des *entiers* $Z = (\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, +, \cdot, 0, 1)$ est l'anneau minimal qui soit une extension des entiers naturels. Le système des *nombre rationnels* $Q = (Q, +, \cdot, 0, 1)$ est le corps minimal qui soit une extension de l'anneau des entiers. (Les termes « anneau » et « corps » sont expliqués dans l'Annexe ??.) Le système des *nombre réels* $R = (R, +, \cdot, 0, 1, >)$ est l'extension minimale des rationnels qui soit continue et totalement ordonnée. (Pour la définition de la continuité, lisez les pages ?? et ??.) De manière équivalente, les réels représentent l'extension minimale des rationnels qui forme un corps complet, totalement ordonné et strictement archimédien. C'est la construction – ou définition – historique des nombres entiers, rationnels et réels faite à partir des entiers naturels. Toutefois, ce n'est pas la seule construction possible. La définition la plus merveilleuse de tous ces types de nombres est celle découverte en 1969 par John Conway, et vulgarisée par lui-même, Donald Knuth et Martin Kruskal :

Réf. 174

- Un nombre est une succession de bits. Les deux bits sont généralement dénommés « haut » et « bas ». Des exemples de nombres et de la manière de les écrire sont fournis par la Figure 85.
- La succession vide représente le nombre zéro.
- Une succession finie de n hauts représente le nombre entier n , et une succession finie de n bas représente l'entier $-n$. Des successions finies de hauts et de bas mélangés fournissent les *nombre rationnels dyadiques*. Des exemples sont 1, 2, 3, -7 , $19/4$, $37/256$, etc. Ils possèdent tous des dénominateurs ayant une puissance de 2. Les autres *nombre rationnels* sont ceux qui se terminent par une chaîne de hauts et bas qui se répète éternellement, tels les *réels*, les *infinitésimaux* et les nombres infinis simples. Des séries infinies dénombrables plus longues fournissent des nombres encore plus insensés. Le corps complet est appelé le corps des *nombre surréels**.

Il existe une deuxième manière d'écrire les nombres surréels. La première est la succession de bits qui vient d'être mentionnée. Mais, afin de définir l'addition et la multiplication, une autre notation est généralement utilisée, et déduite de la Figure 85. Un surréel α est défini comme étant le nombre qui apparaît en premier parmi tous ceux qui sont situés entre deux séries de premiers surréels, les séries de gauche et de droite :

$$\alpha = \{a, b, c, \dots | A, B, C, \dots\} \quad \text{avec} \quad a, b, c < \alpha < A, B, C. \quad (81)$$

Par exemple, nous avons

$$\begin{aligned} \{0|\} &= 1, \{0, 1|\} = 2, \{|\} = -1, \{|\} = -2, \{0|1\} = 1/2, \\ \{0|1/2, 1/4\} &= 1, \{0, 1, 3/2, 25/16 | 41/16, 13/8, 7/4, 2\} = 1 + 37/64, \end{aligned} \quad (82)$$

montrant que les surréels finis sont les *nombre dyadiques* $m/2^n$ (n et m étant des entiers). Étant donné deux surréels $\alpha = \{\dots, a, \dots | \dots, A, \dots\}$ sachant que nous avons $a < \alpha < A$ et $\beta = \{\dots, b, \dots | \dots, B, \dots\}$ avec $b < \beta < B$, l'addition est définie de manière récursive, en

* Les nombres surréels *ne* forment pas un ensemble puisqu'ils contiennent tous les *nombre ordinaux*, qui eux-mêmes ne forment pas un ensemble, bien qu'ils *contiennent* des ensembles, bien évidemment. En bref, les ordinaux et les surréels sont des classes qui sont *plus grandes* que les ensembles.

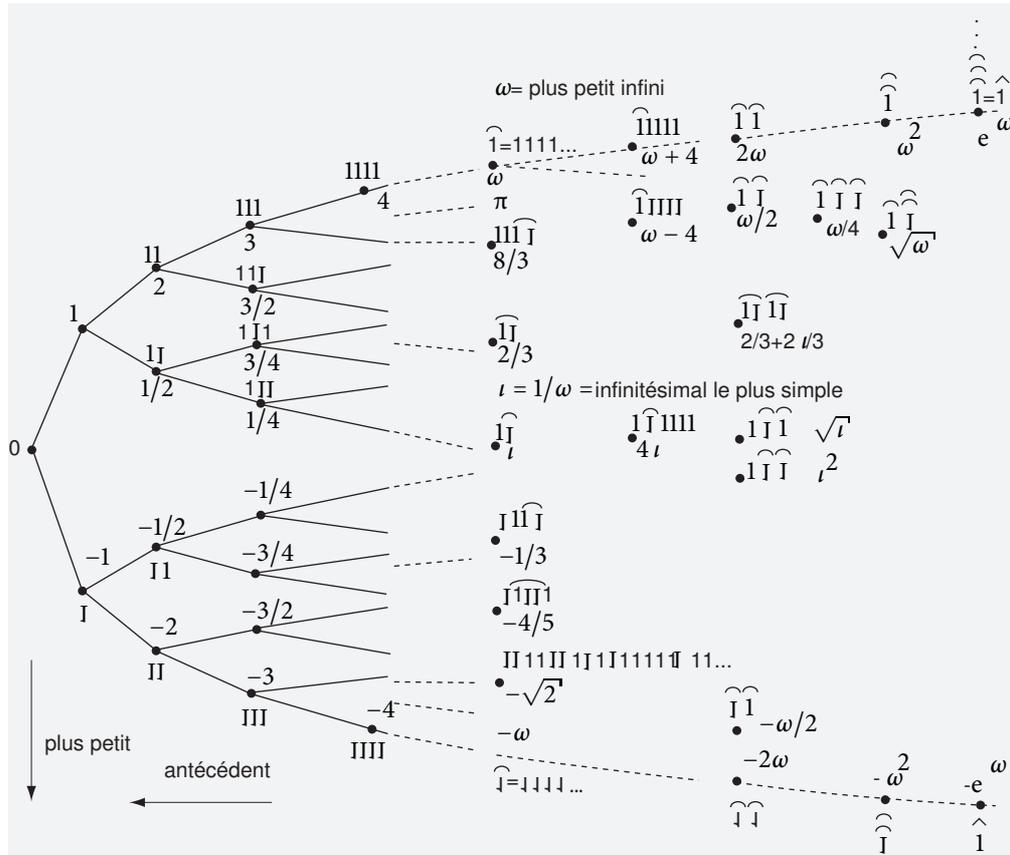


FIGURE 85 Les nombres surréels en notation conventionnelle et sous forme de bits.

utilisant les plus petits nombres déjà définis, comme

$$\alpha + \beta = \{ \dots, a + \beta, \dots, \alpha + b, \dots | \dots, A + \beta, \dots, \alpha + B, \dots \} . \tag{83}$$

Cette définition est employée simplement parce qu'elle donne les mêmes résultats que l'addition usuelle pour les entiers et les réels. Pouvez-vous le confirmer? Par ailleurs, l'addition n'est pas toujours commutative. Êtes-vous capable de déceler les exceptions, et de découvrir la définition de la soustraction? La multiplication est également définie de manière récursive, à savoir par l'expression

Défi 224 s

$$\alpha\beta = \{ \dots, a\beta + \alpha b - ab, \dots, A\beta + \alpha B - AB, \dots | \dots, a\beta + \alpha B - aB, \dots, A\beta + \alpha b - Ab, \dots \} . \tag{84}$$

Réf. 174

Ces définitions nous permettent d'écrire $\iota = 1/\omega$, et de discuter à propos de nombres tels que $\sqrt{\omega}$, la racine carrée de l'infini, à propos de $\omega + 4$, $\omega - 1$, 2ω , e^ω et à propos d'autres nombres étranges indiqués sur la Figure 85. Cependant, les nombres surréels ne sont pas couramment utilisés. Nous utilisons plus régulièrement un de leurs sous-ensembles.

Les *nombre réels* sont les surréels dont la valeur n'est pas plus grande que l'infini

et qui ne possèdent pas des terminaisons périodiques dont la période est de longueur 1. Autrement dit, les réels distinguent le nombre 0,9999999 du nombre 1, alors que les réels ne le font pas. En réalité, entre les deux, il existe un nombre infiniment grand de nombres réels. Pouvez-vous en citer quelques-uns ?

Défi 225 s

Les réels sont plus commodes pour décrire la nature que les réels, premièrement parce qu'ils forment un ensemble – alors que ce n'est pas vrai pour les réels – et deuxièmement parce qu'ils permettent la définition de l'intégration. D'autres nombres définis à l'aide des réels, par exemple les nombres complexes \mathbb{C} et les quaternions \mathbb{H} , sont présentés dans l'Annexe ???. Des systèmes numériques un peu plus élaborés y sont également exposés.

Appendix ??

Pour conclure, en physique nous appelons couramment *nombres* les éléments de tout ensemble qui est un semi-anneau (par exemple \mathbb{N}), un anneau (par exemple \mathbb{Z}) ou un corps (\mathbb{Q} , \mathbb{R} , \mathbb{C} ou \mathbb{H}). Tous ces concepts sont définis dans l'Annexe ???. Puisque les nombres nous permettent de comparer des grandeurs et donc de mesurer, ils jouent un rôle crucial dans la description des observations.

Réf. 175

« Une série de boules identiques est emballée de telle sorte que la surface nécessaire de papier cadeau soit minimale. Pour des petits nombres de boules, l'emballage linéaire, avec toutes les boules alignées, est le plus efficace. Pour quel nombre de boules cet emballage n'est-il plus un minimum ? »

Défi 226 s

POURQUOI FAIRE DES MATHÉMATIQUES ?

« Die Forderung der Möglichkeit der einfachen Zeichen ist die Forderung der Bestimmtheit des Sinnes* »

Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 3.23

Réf. 176

Plusieurs physiciens très connus se sont demandé à plusieurs reprises pourquoi les mathématiques sont si importantes. Par exemple, on cite que Niels Bohr a dit : « Nous ne comprenons pas pourquoi le langage des mathématiques a été si efficace pour exprimer ces lois dans leur forme la plus concise ». Eugene Wigner a écrit un article, fréquemment cité, intitulé *La déraisonnable efficacité des mathématiques*. À l'aube de la science, de nombreux siècles plus tôt, Pythagore et ses contemporains étaient si déconcertés par l'utilité des nombres dans la description de la nature, que Pythagore parvint à mettre sur pied une organisation secrète fondée sur cette correspondance. Les membres du cercle d'initiés de cette secte étaient baptisés les « érudits », en grec « *mathématiciens* », d'après la racine grecque μάθημα « enseigner ». Cette dénomination sectaire devint alors la désignation de la profession moderne.

Réf. 177

Ces personnalités avaient oublié que les nombres, ainsi qu'un vaste pan des mathématiques, sont des concepts développés précisément dans le but de décrire la nature. Les nombres et les concepts mathématiques furent directement développés, dès le départ,

* L'exigence que les signes simples soient possibles découle de l'exigence que la signification doive être déterminée.

pour en fournir une description aussi succincte que possible. C'est en conséquence que les mathématiques représentent la science des exigences symboliques.

Peut-être avons-nous été trop impartiaux. Peut-être que ces penseurs désiraient principalement exprimer leur sentiment d'émerveillement lorsqu'ils se rendaient compte que ce langage fonctionne admirablement bien, que la pensée et notre cerveau vont de l'avant, et que la vie et la nature sont si magnifiques. Cela pourrait rendre la question du titre de ce paragraphe plus proche de la célèbre déclaration d'Albert Einstein : « La chose la plus incompréhensible à propos de l'Univers est qu'il soit compréhensible ». La compréhension est un autre terme pour parler de la description, c'est-à-dire de la classification. Évidemment, tout système divisible est compréhensible, et il n'y a rien d'étrange à son propos. Mais l'Univers est-il divisible ? Tant qu'il est décrit comme étant constitué de particules et de vide, c'est effectivement le cas.

Nous découvrirons dans la dernière partie de cette aventure que l'hypothèse de base faite lors de notre départ est construite sur des fondements instables. La supposition que les observations dans la nature peuvent être *mesurées*, et donc que la nature est divisible, est une approximation. L'« incompréhensibilité » mentionnée devient stupéfaction au vu de la précision de cette approximation. Néanmoins, la secte de Pythagore, qui était fondée sur l'idée que « toute chose dans la nature est représentée par des nombres », avait tort. Comme pour tant de croyances, l'observation montrera que tout cela était faux.

“ Die Physik ist für Physiker viel zu schwer*.
David Hilbert ”

LES MATHÉMATIQUES SONT-ELLES UN LANGAGE ?

“ Die Sätze der Mathematik sind Gleichungen, also Scheinsätze. Der Satz der Mathematik drückt keinen Gedanken aus**.
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.2, 6.21 ”

Assurément, les mathématiques constituent un *vocabulaire* qui nous permet de discuter avec précision. Les mathématiques peuvent être vues comme l'exploration de *tous* les concepts possibles qui peuvent être construits à partir des deux briques fondamentales « ensemble » et « relation » (ou certaines autres paires équivalentes). Les *mathématiques* sont la science des exigences symboliques. Reformulé autrement, les mathématiques sont l'exploration de tous les types possibles de classifications. Cela explique son utilité dans toutes les situations où des classifications complexes, quoique précises, des observations sont nécessaires, comme en physique.

Toutefois, les mathématiques ne peuvent pas exprimer toutes les choses que les hommes veulent communiquer, telles que les espérances, les opinions ou les émotions. Essayez simplement d'exprimer le plaisir de la natation à l'aide des mathématiques. En réalité, *les mathématiques sont la science des exigences symboliques*, donc les mathématiques ne sont pas un langage, pas plus qu'elles n'en contiennent un. Les concepts mathématiques, étant fondés sur des ensembles et des relations *abstraites*, ne se rapportent pas

* La physique est trop difficile pour être laissée aux physiciens.

** Les propositions des mathématiques sont des équations, et par conséquent ce sont des pseudo-propositions. Une proposition des mathématiques n'exprime aucune pensée.

à la nature. Malgré leur beauté, les mathématiques ne nous permettent pas de parler de la nature ou des observations sur le mouvement. Les mathématiques ne nous enseignent pas *ce qu'il faut dire* concernant la nature, elles nous enseignent *comment* il faut le dire.

Dans sa célèbre conférence de 1900 à Paris, le mathématicien allemand David Hilbert* donna une liste de 23 grands défis qu'affrontaient les mathématiques. Le sixième des problèmes de Hilbert consistait à découvrir un traitement mathématique des axiomes de la physique. Notre aventure jusqu'ici a montré que la physique a débuté avec des définitions *circulaires* qui n'ont pas encore été éliminées après 2 500 années de recherches : l'espace-temps est défini par le truchement des objets et les objets sont définis à l'aide de l'espace et du temps. Étant basée sur une définition circulaire, la physique *n'est donc pas* modélisée par les mathématiques, même si de nombreux physiciens et mathématiciens, y compris Hilbert, auraient aimé qu'il en soit ainsi. Les physiciens doivent vivre avec des obstacles logiques et doivent progresser sur un terrain incertain dans le but de réaliser des avancées. En fait, ils ont fait ainsi durant 2 500 ans. Si la physique était un système axiomatique, elle ne renfermerait aucune contradiction ; d'autre part, elle cesserait d'être un langage et s'arrêterait de décrire la nature. Nous reviendrons sur ce problème plus tard.

Page 168

Réf. 178

Page ??

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LES MATHÉMATIQUES

Quel est le plus grand nombre qui peut être écrit avec quatre chiffres 2 et aucun autre symbole ? Et avec quatre 4 ?

Défi 227 s

* *

Les triplets pythagoriciens sont les entiers qui vérifient la relation $a^2 + b^2 = c^2$. Donnez-en au moins dix exemples. Montrez alors les trois propriétés suivantes : au moins un nombre dans un triplet est un multiple de 3, au moins un nombre dans un triplet est un multiple de 4, au moins un nombre dans un triplet est un multiple de 5.

Défi 228 e

* *

Une mère a 21 ans de plus que son enfant et, dans 6 ans, l'enfant sera 5 fois plus jeune que sa mère. Où est le père ? C'est l'*énigme de la jeune mère*.

Défi 229 s

* *

Le nombre $1/n$, lorsqu'il est écrit en notation décimale, possède une succession périodique de chiffres. Cette période possède au maximum $n - 1$ chiffres, comme pour

* David Hilbert (n. Königsberg 1862, d. -Göttingen 1943), qui fut professeur de mathématiques à Göttingen, était considéré comme le plus grand mathématicien de son époque. Il fut une personnalité centrale dans de nombreuses parties des mathématiques, et joua également un rôle important à la fois dans la naissance de la relativité générale et dans celle de la théorie quantique. Ses ouvrages sont toujours imprimés. Sa célèbre conviction personnelle était : « Wir müssen wissen, wir werden wissen. » (Nous devons savoir, nous saurons.) Sa célèbre conférence à Paris est publiée par exemple dans *Die Hilbertschen Probleme*, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, 1983. Cette conférence donna un coup de fouet aux mathématiques. (Malgré des efforts et des promesses de gloire identique, *personne* dans le monde n'eut une vision similaire des mathématiques qui lui aurait permis de reproduire cette prouesse en l'an 2000.) Dans sa dernière décennie, il endura la persécution du régime nazi, cette oppression évinça Göttingen de la liste des importantes universités scientifiques, sans jamais retrouver, jusqu'à ce jour, la place qu'elle avait alors.

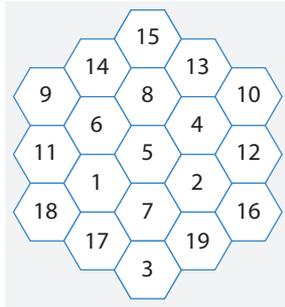


FIGURE 86 Le seul hexagone magique (jusqu'aux réflexions et rotations) commençant avec le nombre 1.

Défi 230 d $1/7 = 0,1428571428571428\dots$ Quels autres nombres $1/n$ possèdent des périodes de longueur $n - 1$?

* *

Défi 231 s Felix Klein était un professeur de mathématiques notoire de l'université de Göttingen. Il y avait deux types de mathématiciens dans son département : ceux qui menaient des recherches sur tout ce qu'ils voulaient et ceux pour lesquels Klein fournissait des sujets de recherche. À quelle catégorie Klein appartenait-il ?

Défi 232 s Cela est manifestement une variante d'une autre énigme célèbre. Un barbier rase tous les habitants d'une ville qui ne se rase pas eux-mêmes. Le barbier se rase-t-il ?

* *

Défi 233 s Tout le monde sait ce qu'est un *carré magique* : un tableau carré de nombres, allant de 1 à 9 dans le cas le plus simple, qui sont distribués de telle manière que la somme de toutes les lignes, colonnes (et accessoirement toutes les diagonales) donne le même total. Pouvez-vous écrire le *cube magique* $3 \times 3 \times 3$ le plus simple ?

* *

Réf. 179 Les chiffres de 0 à 9 sont agencés sur les claviers de deux manières différentes. Les calculatrices et les claviers d'ordinateurs ont le 7 en haut à gauche, alors que les téléphones et les guichets automatiques bancaires ont le chiffre 1 en haut à gauche. Les deux standards, dus respectivement à l'Organisation internationale de normalisation (International Standards Organization, ISO) et à l'Union internationale des télécommunications (International Telecommunication Union ITU, autrefois CCITT), ont évolué séparément et ne sont jamais parvenus à fusionner.

* *

Leonhard Euler écrivait parfois dans ses notes des équations telles que

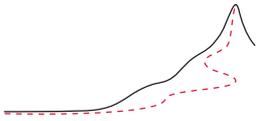
$$1 + 2^2 + 2^4 + 2^6 + 2^8 + \dots = -\frac{1}{3}. \quad (85)$$

Défi 234 d Cela peut-il être raisonnable ?

* *

Dans l'histoire des mathématiques récréatives, plusieurs personnes ont découvert indépendamment le célèbre hexagone magique indiqué à la [Figure 86](#). Le premier découvreur fut, en 1887, Ernst von Hasselberg. Cet hexagone est dit magique parce que toutes les lignes s'additionnent pour faire le même nombre, 38. Hasselberg démontra également le résultat presque incroyable qu'il n'existe aucun autre hexagone magique.





CHAPITRE 10

CONCEPTS, MENSONGES ET MODÈLES DE LA NATURE

“ Die Grenzen meiner Sprache bedeuten die Grenzen meiner Welt*.
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 5.6 ”

“ Der Satz ist ein Bild der Wirklichkeit. Der Satz ist ein Modell der Wirklichkeit, so wie wir sie uns denken**.
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 4.01 ”

Réf. 180

Contrairement aux mathématiques, la physique aspire à être un langage. À travers la description du mouvement, elle vise à exprimer *tout* ce qui est observé et, en particulier, tous les exemples et possibilités de changement***. Comme tout langage, la physique est constituée de concepts et de phrases. Afin de pouvoir tout exprimer, elle doit chercher à employer quelques mots seulement pour décrire une grande quantité de faits****. Les physiciens sont essentiellement des personnes *fainéantes* : ils tentent de minimiser l'effort dans tout ce qu'ils entreprennent. Les concepts employés aujourd'hui ont été optimisés par l'effort combiné de nombreuses personnes pour être aussi pratiques, c'est-à-dire aussi puissants, que possible. Un concept est qualifié de *puissant* lorsqu'il nous permet d'exprimer d'une manière concise une grande quantité d'information, signifiant qu'il

* Les frontières de mon langage sont les frontières de mon univers.

** La proposition est une image de la réalité. La proposition est un modèle de la réalité, telle que nous l'imaginons.

*** Toutes les observations concernent le changement ou la variation. Les divers types de changement sont étudiés par les diverses sciences : elles sont généralement regroupées dans les trois catégories suivantes : *sciences humaines*, *sciences formelles* et *sciences naturelles*. Parmi cette dernière, les plus anciennes sont l'astronomie et la science des métaux. Avec l'accroissement de la curiosité au début de l'Antiquité, apparut alors la science naturelle relative à l'étude du mouvement : la *physique*. Au cours de notre promenade, il deviendra clair que cette définition apparemment restrictive recouvre en réalité l'intégralité des domaines étudiés en physique. En particulier elle intègre la définition plus courante de la physique comme étant l'étude de la matière, de ses propriétés, de ses constituants et de leurs interactions.

**** Une observation spécifique, particulière, c'est-à-dire un exemple particulier d'information partagée par plusieurs personnes, est appelée un *fait* ou, dans d'autres contextes, un *événement*. Un fait saisissant et régulièrement observé est appelé un *phénomène*, et une observation générale faite dans de nombreuses situations distinctes est appelée un *principe (physique)*. (Souvent, lorsqu'un concept introduit est employé dans d'autres domaines avec des significations différentes, il sera suivi dans cette excursion du qualificatif « physique » ou « mathématique », entre parenthèses.) Les actions réalisées dans le but de collecter des observations sont appelées des *expériences*. Le concept d'expérience s'est établi au cours du seizième siècle. C'est pendant l'évolution d'un enfant qu'il peut le mieux être comparé à cette activité qui possède le même objectif de collecte d'expériences : *jouer*.

peut rapidement transmettre une foule de détails concernant les observations.

Les formulations générales au sujet de nombreux exemples de mouvement sont appelées *règles* ou *modèles*. Par le passé, nous disions souvent que « les lois gouvernent la nature », employant par là une vieille idéologie qui ne convient pas. Une « loi » physique est uniquement une manière de dire le plus de choses possibles avec le moins de mots possibles. Lorsque nous disons « les lois gouvernent la nature », nous voulons en réalité dire « étant fainéants, nous décrivons les observations à l'aide de modèles ». Les lois représentent l'archétype de la fainéantise. La formulation des lois est de la pure paresse. En réalité, l'expression correcte est *les modèles décrivent la nature*.

Les physiciens ont défini la paresse nécessaire pour leur discipline avec beaucoup de soin. Pour devenir un roi de la paresse, nous avons besoin de discerner les modèles oisifs de ceux qui ne le sont pas, comme les mensonges, les croyances, les déclarations qui ne concernent pas les observations, et les affirmations qui n'ont pas trait au mouvement. Nous allons le faire plus loin.

Le principe de la paresse extrême est à l'origine, entre autres, de l'usage des nombres en physique. Les observables sont souvent mieux décrites à l'aide de nombres, parce que ceux-ci permettent une communication et une classification faciles et précises. La longueur, la vitesse, les angles, la température, la tension ou l'intensité d'un champ sont de ce type. La notion de « nombre », employée dans chaque mesure, est construite, souvent inconsciemment, à partir des notions d'« ensemble » et de « relation », comme nous l'avons montré ci-dessus. Hormis la notion de nombre, d'autres concepts sont régulièrement définis pour permettre une communication rapide et concise concernant les « lois » de la nature, ils sont tous des « instruments de notation ». En ce sens, l'affirmation que « le degré de l'algèbre de Kac-Moody du lagrangien du modèle des supercordes hétérotiques est égal à un » contient une information précise, explicable à quiconque. Toutefois, il faudrait une douzaine de pages pour l'exprimer en utilisant uniquement les termes « ensemble » et « relation ». En bref, la *précision* commune en physique est issue de sa *quête de paresse*.

« Es ist besser, daß die Leute nicht wissen, wie Gesetze und Wurst zustande kommen. Sonst könnten sie nachts nicht ruhig schlafen*.
Otto von Bismarck »

LES CONCEPTS PHYSIQUES SONT-ILS DÉCOUVERTS OU INVENTÉS ?

« Das logische Bild der Tatsachen ist der Gedanke**.
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 3 »

Ce titre sous forme d'interrogation est souvent reformulé ainsi : les concepts physiques sont-ils affranchis de toutes croyances, goûts ou choix personnels ? Cette question a été tant débattue qu'elle apparaît même dans les films d'Hollywood. Nous en donnons un bref résumé, qui peut vous aider à reconnaître les honnêtes enseignants de ceux qui sont malhonnêtes.

* « Il est préférable que les gens ne sachent pas comment les lois et les saucisses sont confectionnées. Sinon ils ne dormiraient pas de la nuit. » Otto von Bismarck (1815-1898), chancelier prussien.

** L'image logique des faits, c'est la pensée.

L'invention des concepts, contrairement à leur découverte, impliquerait le libre choix parmi de nombreuses possibilités. Le choix effectué serait alors dû aux croyances ou aux sentiments ressentis par cette personne. En physique (en contraste flagrant avec les autres domaines de recherche plus idéologiques), nous savons que des descriptions physiques différentes des observations sont soit équivalentes soit, dans le cas opposé, imprécises, voire erronées. Une description des observations est donc essentiellement unique : n'importe quel choix de concepts n'est qu'apparent. Il n'y a aucune véritable liberté dans la définition des concepts physiques. Selon cette propriété, la physique est en parfaite contradiction avec l'activité artistique.

Si deux concepts distincts peuvent être utilisés pour décrire le même aspect des observations, ils doivent être équivalents, même si la relation qui conduit à cette équivalence n'est pas perçue immédiatement. En réalité, la condition nécessaire que des individus ayant des points de vue différents et qui observent le même événement en déduisent des descriptions équivalentes est liée au fondement même de la physique. Elle exprime la nécessité que les observations sont indépendantes de l'observateur. En bref, l'exigence forte d'indépendance de point de vue fait que le libre choix des concepts est une impossibilité logique.

La conclusion que les concepts qui décrivent les observations sont découverts plutôt qu'inventés est également formulée indépendamment dans le domaine de la linguistique par la recherche mentionnée ci-dessus sur les primitives sémantiques*, dans le domaine de la psychologie par les observations sur la formation des concepts lors du développement des jeunes enfants, et dans le domaine de l'éthologie par les observations du développement chez l'animal, particulièrement dans le cas des mammifères. Dans ces trois domaines, des observations méticuleuses ont été réalisées sur la manière dont les interactions entre un être humain et son environnement font émerger des concepts, parmi lesquels ceux qui sont les plus élémentaires, comme l'espace, le temps, l'objet ou l'interaction, sont communs à tous les sexes, toutes les cultures, les races et à de nombreuses espèces animales qui peuplent le monde. La curiosité et la manière dont la nature fonctionne conduisent aux mêmes concepts pour tous les individus et même les animaux ; le monde n'offre qu'une seule possibilité, sans laisser de place à l'imagination. Envisager que les concepts physiques puissent être inventés pendant votre temps libre est une croyance – ou un exercice utile, qui ne réussit jamais.

Les concepts physiques sont des classifications des observations. L'action de classer suit elle-même les modèles de la nature, c'est un processus mécanique que les machines peuvent également accomplir. Cela signifie que toute distinction, c'est-à-dire toute affirmation que A est différent de B, est une formulation libre de toute théorie. Aucun système de croyance n'est nécessaire pour distinguer des entités différentes dans la nature. Les chats et les cochons peuvent également le faire. Les physiciens *peuvent* être remplacés par des animaux, ou même par des machines. Notre ascension montagnaise confirmera à plusieurs reprises cette idée.

Comme nous l'avons déjà mentionné, les concepts physiques les plus répandus permettent de décrire les observations aussi succinctement et aussi fidèlement que possible.

* Anna Wierzbicka a conclu que ses recherches indiquent clairement que les primitives sémantiques sont *découvertes*, en particulier qu'elles sont déduites à partir des fondamentaux de l'expérience humaine, et non inventées.

Page ??

Ils sont formés dans le but d'avoir la compréhension la plus vaste possible avec la plus petite quantité d'effort possible. Le rasoir d'Occam – l'exigence de ne pas introduire de concepts superflus – et la motivation de l'unification réduisent automatiquement, tous les deux, le nombre et les types de concepts utilisés en physique. Autrement dit, l'essor de la science physique a été et est fondé sur un programme qui réduit les choix envisageables de concepts aussi rigoureusement que possible.

En résumé, nous découvrons que les concepts physiques sont les mêmes pour tout le monde et sont indépendants des croyances et des choix personnels : ils sont avant toute chose *ennuyeux*. Qui plus est, puisqu'ils peuvent provenir des machines au lieu des individus, ils sont *nés de la paresse*. Malgré ces analogies humaines – ce qui signifie qu'ils ne doivent pas être pris trop au sérieux – les concepts physiques *ne sont pas* inventés, ils sont découverts. Si un enseignant vous affirme le contraire, il est en train de mentir.

Comme nous avons traité le cas des concepts physiques, tournons-nous dorénavant vers les déclarations physiques. La situation est quelque peu similaire : les déclarations physiques doivent être paresseuses, arrogantes et ennuyeuses. Voyons pourquoi.

“ Wo der Glaube anfängt, hört die Wissenschaft auf*.
Ernst Haeckel, *Natürliche Schöpfungsgeschichte*, 1879.”

COMMENT DÉCOUVRONS-NOUS LES RÈGLES ET LES MODÈLES DE LA PHYSIQUE ?

“ Grau, treuer Freund, ist alle Theorie,
Und grün des Lebens goldner Baum**.
J.W. v. Goethe, *Faust*.”

“ La physique est généralement présentée comme une science objective, mais je fais remarquer que la physique change alors que le monde reste le même, il doit donc y avoir quelque chose de subjectif dans la physique.
Richard Bandler”

La progression dans l'étude du mouvement rappelle l'attitude d'un jeune enfant face à la vie. Cette avancée suit le programme élémentaire situé à gauche du [Tableau 21](#).

Les scientifiques adultes n'ont pas grand-chose à ajouter, excepté les termes plus conventionnels indiqués à droite, plus quelques professions spécialisées qui en tirent profit. Les experts de l'étape 7 sont indifféremment nommés lobbyistes ou quêteurs ; au lieu d'appeler ce programme « curiosité », ils l'appellent la « méthode scientifique ». Ils discutent beaucoup. La physique étant la discussion concernant le mouvement***, et le mou-

* La croyance commence là où la raison s'arrête.

** « Mon bon ami, toute théorie est sèche, et l'arbre précieux de la vie est fleuri. » Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832), est le poète allemand le plus important.

*** Plusieurs sciences possèdent le terme « discuter » dans une racine de leur nom, à savoir toutes celles dont le nom se termine par « -logie », comme la biologie. Ce suffixe provient du grec ancien et découle de λῆγειν signifiant « parler, discuter ». La physique comme science du mouvement pourrait donc être appelée « cinésiologie » d'après κίνησις, qui signifie « mouvement ». Mais, pour des raisons historiques, ce terme a eu une signification différente, à savoir l'étude de l'activité musculaire humaine. Le mot « physique » est soit

TABLEAU 21 La « méthode scientifique ».

Description normale Curiosité	Description lobbyiste Méthode scientifique
1. observer énormément autour de soi	1. interagir avec le monde
2. ne pas croire tout ce qui est dit	2. faire fi de l'autorité
3. choisir quelque chose d'intéressant et l'explorer tout seul	3. observer
4. construire votre propre opinion et décrire précisément ce que vous voyez	4. faire appel à la raison, construire des hypothèses
5. vérifier si vous pouvez aussi décrire de la même manière des situations similaires	5. analyser les hypothèses
6. accroître la précision de l'observation jusqu'à ce que les vérifications échouent ou soient complètes	6. réaliser des expériences jusqu'à ce qu'on démontre que les hypothèses sont fausses ou fondées
7. en fonction de la situation, continuer avec les étapes 4 ou 1	7. demander plus d'argent

vement étant un vaste sujet, de nombreux individus se sont spécialisés dans cette étape.

Les experts de l'étape 6 sont appelés *physiciens expérimentateurs* ou plus simplement *expérimentateurs*, un terme dérivé du latin « *experiri* », qui signifie « tester ». La majorité d'entre eux représente une partie de la catégorie des « étudiants diplômés ». Les experts des étapes 5 et 4 sont appelés *physiciens théoriciens* ou plus simplement *théoriciens**. C'est une désignation plutôt récente, et le premier professeur de physique théorique, par exemple, fut nommé autour du début du vingtième siècle. Ce terme est dérivé du grec θεωρία qui signifiait « observation, méditation ». Finalement, il y a les gens qui se focalisent sur les étapes 1 à 3, et qui amènent les autres à travailler sur les étapes 4 à 6, ils sont appelés *génies*.

Manifestement, un point primordial est dissimulé dans l'étape 6 : comment tous ces gens savent-ils si leurs expériences échouent ? Comment reconnaissent-ils la vérité ?

« Toutes les professions sont des conspirations
contre les profanes. »
George Bernard Shaw

dérivé du grec φύσις (τέχνη est mieux compris) qui veut dire « (la science de) la nature », soit tiré du titre de l'œuvre d'Aristote τὰ φυσικά qui signifie « les choses naturelles ». Ces deux expressions sont dérivées de φύσις, signifiait « nature ».

* Si vous aimez la physique théorique, jetez un œil sur la page Web rafraîchissante et accessible du lauréat du prix Nobel Gerard 't Hooft sous le titre *How to become a good theoretical physicist*. Elle peut être consultée sur www.phys.uu.nl/~thoof/theorist.html.

QU'EST-CE QU'UN MENSONGE ?

« Établissez d'abord soigneusement les faits.
Après quoi, vous pourrez les déformer comme
bon vous semble. »

Mark Twain

« La vérité pure est toujours un mensonge. »

Bert Hellinger

Les mensonges sont des formulations très pratiques, comme chacun l'apprend au cours de sa jeunesse. Une raison pour laquelle ils sont commodes, c'est que nous pouvons esquisser n'importe quelle conclusion imaginable à partir d'eux. Une discussion très célèbre entre deux professeurs de Cambridge au début du vingtième siècle l'établit clairement. McTaggart demandait : « Si $2 + 2 = 5$, comment pouvez-vous démontrer que je suis le pape ? » Godfrey Hardy : « Si $2 + 2 = 5$, alors $4 = 5$, défalquez 3, alors $1 = 2$, mais McTaggart et le pape sont deux, par conséquent McTaggart et le pape sont un ». Comme il a été mentionné depuis longtemps, *ex falso quodlibet* : à partir de ce qui est faux, tout ce qui est imaginable peut être inféré. Il est vrai que, dans notre ascension montagnaise, nous avons besoin de construire des arguments à partir des résultats précédemment déduits, et que notre voyage ne pourra s'achever si nous avons commis une erreur quelque part dans notre chapelet d'arguments. Mais mentir représente une activité si importante que nous devons apprendre à bien le faire.

Réf. 144 Il existe diverses étapes dans l'art de mentir. De nombreux animaux ont été vus en train de tromper leurs proches. Les enfants commencent à mentir juste avant leur troisième anniversaire, en dissimulant des choses. Les adultes fraudent sur les impôts. Et un grand nombre d'intellectuels ou d'hommes politiques proclament même que la vérité n'existe pas.

Cependant, dans la plupart des pays, tout le monde doit savoir ce qu'est la « vérité », puisque dans un tribunal par exemple, ne pas dire la vérité peut conduire à une peine d'emprisonnement. Les tribunaux sont emplis d'experts dans la détection du mensonge. Si vous mentez lors d'un jugement, il vaut mieux que vous le fassiez bien. L'expérience montre que vous devriez vous enfuir si vous avez exercé de nombreuses activités criminelles. Dans un tribunal, un *mensonge* est une phrase, prononcée en connaissance de cause, qui est en contradiction avec les observations*. La véracité d'une déclaration est donc vérifiée par l'observation. Ce contrôle lui-même est parfois dénommé la *démonstration* de la déclaration. Pour les tribunaux, comme pour la physique, la *vérité* est donc la correspondance avec les faits, et les *faits* sont les observations partagées par tous. Un « bon » mensonge est donc un mensonge dont le contraste avec les observations partagées est difficile à établir.

La première façon de mentir consiste à mettre l'accent uniquement sur le fait que l'information est plus ou moins partagée. Les populistes et les polémiques le font régulièrement. (« Chaque étranger représente un danger pour les valeurs de notre patrie. »)

* Des déclarations qui ne sont pas encore vérifiées sont indifféremment appelées *spéculations*, *conjectures*, *hypothèses*, ou – de manière inexacte – simplement *thèses*. Des déclarations qui sont en conformité avec les observations sont qualifiées de *correctes* ou *vraies*, celles qui sont en contradiction avec les observations sont dites *erronées* ou *fausses*.

Puisque pratiquement n'importe quelle opinion imaginable, même si elle est occulte, est détenue par un certain groupe – et donc partagée –, nous pouvons toujours proclamer qu'elle est vraie*. Malheureusement, il est notoire que des idées deviennent partagées aussi parce qu'elles sont à la mode, imposées ou parce qu'elles s'opposent à quelqu'un qui est généralement méprisé. Souvent un frère ou une sœur dans une famille possède ce rôle – souvenez-vous de Cassandre**. Pour un bon mensonge, nous avons donc besoin de plus de choses que la partageabilité, plus que l'*intersubjectivité* seule.

Un excellent mensonge devrait être, comme une déclaration vraie, réellement indépendant de l'auditeur et de l'observateur et, en particulier, indépendant de leur âge, de leur sexe, de leur éducation, de leur civilisation ou du groupe auquel ils appartiennent. Par exemple, il est particulièrement ardu – mais pas impossible – de mentir avec les mathématiques. La raison en est que les concepts fondamentaux des mathématiques, qu'ils soient « ensemble », « relation » ou « nombre », sont tirés de l'observation et sont intersubjectifs, de telle sorte que les déclarations les concernant sont faciles à vérifier. Généralement, les mensonges évitent les mathématiques***.

Page ??

Deuxièmement, un « bon » mensonge devrait éviter les déclarations concernant les observations et devrait employer à la place des *interprétations*. Par exemple, certaines personnes aiment discuter à propos d'autres univers, ce qui implique de parler de fantaisies, et non des observations. Un bon mensonge doit éviter, cependant, de tomber dans l'autre extrême, à savoir de faire des déclarations qui sont vides de sens. Le commentaire le plus caustique qui puisse être fait à propos d'une déclaration est celui prononcé par le grand physicien autrichien Wolfgang Pauli : « Ce n'est même pas faux. »

Réf. 181

Troisièmement, un bon mensonge ne doit pas se préoccuper des observations, mais seulement de l'imagination. Seule la vérité a besoin d'être *empirique*, pour pouvoir être distinguée des déclarations *spéculatives*. Si vous voulez « bien » mentir même avec des déclarations empiriques, vous devez faire très attention. Il existe deux types de déclarations empiriques : les déclarations *spécifiques* et les déclarations *universelles*. Par exemple, « Le 31 août 1960, j'ai vu un cygne vert nager sur la rive nord du lac de Varèse » est spécifique, alors que « Tous les corbeaux sont noirs » est universelle, puisqu'elle contient le mot « tout ». Il existe une différence notoire entre les deux, qui est importante pour bien mentir : les déclarations spécifiques ne peuvent pas être réfutées, elles sont uniquement vérifiables, alors que les déclarations universelles ne peuvent pas être vérifiées, elles sont uniquement réfutables. Pourquoi est-ce ainsi ?

Les déclarations universelles telles que « la vitesse de la lumière est constante » ne peuvent pas être testées pour *tous* les cas possibles. (Remarquez que si elles le pouvaient,

* Le travail du sociologue français Gabriel Tarde (1843–1903), plus particulièrement ses concepts d'*imitation* et de psychologie collective, fait déjà le rapprochement avec cette réalité.

** Les implications du rang de naissance sur la créativité dans les sciences et sur l'acceptation d'idées nouvelles ont été étudiées dans l'ouvrage fascinant de FRANK J. SULLOWAY, *Born to Rebel – Birth Order, Family Dynamics and Creative Lives*, Pantheon Books, 1996. Ce livre exceptionnel expose le résultat d'une longue carrière d'étude des corrélations qui existent entre les situations personnelles dans les familles de milliers de personnes et leur perception d'une vingtaine de révolutions environ de l'histoire récente. Ce livre intègre également un test dans lequel le lecteur peut déduire sa propension à se rebeller, sur une échelle allant de 0 à 100 %. Darwin atteint un score de 96 % sur cette échelle.

*** En mathématiques, « vrai » est généralement précisé par « déductible » ou « démontrable » ; c'est en réalité un cas particulier de la définition courante de vérité, à savoir « la conformité avec les faits », si nous rappelons que les mathématiques étudient les propriétés des classifications.

elles ne seraient plus des déclarations universelles, mais juste une liste de déclarations spécifiques.) Cependant, elles peuvent être anéanties par un contre-exemple. Un autre exemple du type universel est : « Les pommes tombent vers le haut ». Puisqu'elle est démentie par une observation conduite par Newton il y a plusieurs siècles, ou par l'expérience quotidienne, elle est qualifiée de mensonge (aisément décelable). Donc, en général, il est vain de mentir en affirmant le contraire d'une théorie. Si quelqu'un persiste à le faire, ce mensonge devient une *superstition*, une *croyance*, un *préjugé* ou une *doctrine*. Ceux-ci représentent les points de chute dans l'art du mensonge. Une situation célèbre d'insistance sur un mensonge est celle des confrères de Galilée, qui sont réputés pour avoir refusé de regarder dans sa lunette de peur d'être convaincus que Jupiter possède des satellites, une observation qui aurait bouleversé leur croyance que tout tourne autour de la Terre. Évidemment, ces astronomes étaient des novices dans l'art de mentir. Un bon mensonge universel est celui dont le contre-exemple n'est pas identifié de façon aussi facile.

Il ne devrait y avoir aucune raison de mentir en physique. Malheureusement, la physique classique est emplie de mensonges. Nous les écarterons un par un tout au long du reste de notre promenade.

Mentir en formulant des déclarations spécifiques au lieu d'universelles est beaucoup plus facile. (« Je ne peux me rappeler ceci ou cela. ») Même une déclaration explicite telle que « Hier, la Lune était verte, cubique et sentait le fromage » ne peut jamais être complètement réfutée : il n'y a aucune manière de montrer avec une certitude absolue que c'est faux. La seule chose que nous puissions faire est de vérifier si cette affirmation est compatible avec d'autres observations, tel que savoir si cette forme différente affecte les marées comme prévu, si cette odeur peut être retrouvée dans l'air collecté ce jour-là, etc. Un bon mensonge spécifique ne doit donc pas être en contradiction avec d'autres observations*.

À ce propos, les déclarations universelles et spécifiques sont reliées : le *contraire* d'une déclaration universelle est toujours une formulation explicite, et vice versa. Par exemple, le contraire de la formulation générale « les pommes tombent vers le haut », à savoir « certaines pommes tombent vers le bas », est spécifique. De manière identique, l'affirmation spécifique « la Lune est constituée de fromage vert » est en contradiction avec l'assertion universelle « la Lune est solide depuis des millions d'années et ne possède pratiquement pas d'odeur ni d'atmosphère ».

* Il est souvent difficile ou pénible de vérifier des déclarations concernant le passé, et la difficulté augmente avec l'éloignement dans le temps. C'est pourquoi les gens peuvent insister sur l'occurrence d'événements qui sont supposés être des exceptions aux modèles de la nature (« les miracles »). Depuis l'avènement des moyens de communication rapides, ces contrôles sont en passe de devenir de plus en plus faciles, et aucun miracle n'y résiste. Cela peut être vu à Lourdes où, bien qu'aujourd'hui le nombre de visiteurs soit beaucoup plus élevé que par le passé, aucun miracle n'a été signalé depuis des décennies.

En réalité, tous les « miracles » modernes persistent encore uniquement parce que les vérifications sont sciemment abandonnées, comme pour la supposée liquéfaction annuelle du sang à Naples, les statues qui boivent apparemment du lait, les guérisseurs présumés dans l'évangélisme télévisé, etc. La majorité des miracles persiste uniquement parce que de nombreuses organisations se font de l'argent sur la difficulté à réfuter des déclarations spécifiques. Par exemple, lorsque la princesse britannique Lady Diana s'éteignit dans un accident de voiture en 1997, bien que ces événements aient été investigués avec beaucoup de minutie, la presse à scandale continua à polémiquer pratiquement sans discontinuer sur les « mystères » de cet accident.

Autrement dit, les tribunaux et les philosophes sont en désaccord. Les tribunaux n'ont aucun problème pour qualifier des théories de vraies et des affirmations spécifiques de mensonges. De nombreux philosophes évitent cette situation. Par exemple, l'affirmation « les vertébrés gazeux irritables n'existent pas » est une déclaration de type universel. Si une déclaration universelle est en accord avec les observations, et si elle est réfutable, les tribunaux disent qu'elle est *vraie*. Le contraire, à savoir l'assertion : « les vertébrés gazeux irritables existent », est du type *spécifique*, puisqu'elle signifie « qu'une personne X a observé un vertébré gazeux irritable en un certain endroit Y à un certain instant Z ». Pour vérifier cela, nous avons besoin d'un enregistrement de cet événement particulier. Si un tel enregistrement, par exemple une photographie ou un témoignage, n'existe pas et si cette déclaration *peut* être réfutée par des observations complémentaires, les tribunaux disent que cette déclaration spécifique est un *mensonge*. Bien que cela constitue les règles de la vie quotidienne et de la loi, il n'y a pas de consensus parmi les philosophes et les scientifiques pour affirmer que c'est acceptable. Pourquoi ? Les intellectuels sont des personnalités prudentes, parce qu'un grand nombre d'entre eux ont perdu la vie après avoir révélé des mensonges trop publiquement.

En résumé, les mensonges spécifiques, comme toutes les déclarations spécifiques, ne peuvent jamais être réfutés avec certitude. C'est ce qui les rend si populaires. Les enfants apprennent les mensonges spécifiques en premier. (« Je n'ai pas mangé la confiture. ») Les mensonges généraux, comme toutes les déclarations générales, peuvent toujours être corroborés par des exemples. C'est la raison de la réussite des idéologies. Mais les critères pour reconnaître les mensonges, même s'ils sont généraux, sont devenus si ordinaires que les croyances et les mensonges tentent de se familiariser avec. Il est devenu habituel d'employer des expressions telles que « fait scientifique » – il n'existe aucun fait non scientifique – ou « scientifiquement prouvé » – les observations ne peuvent pas être prouvées d'une autre manière – et des phrases similaires vides de sens. Celles-ci ne sont pas des « bons » mensonges ; à chaque fois que nous rencontrons des phrases qui commencent par « la science affirme... » ou « la science et la religion font... », le fait de remplacer « science » par « connaissance » ou « expérience » constitue un procédé efficace permettant de vérifier si de telles déclarations doivent être prises au sérieux ou non*.

Les mensonges se différencient des affirmations vraies par leur aspect émotionnel. Les déclarations spécifiques sont généralement inintéressantes et fragiles, tandis que les mensonges spécifiques sont souvent sensationnels et violents. Par opposition, les déclarations générales sont souvent audacieuses et fragiles, alors que les mensonges généraux sont la plupart du temps ennuyeux et violents. La vérité est fragile. Les affirmations vraies exigent que l'auteur sorte vainqueur de la critique. Les chercheurs savent que si nous ne pouvons pas nous en dépêtrer, nous ne pouvons les qualifier d'observations ou de théories. (Une *théorie* est une autre dénomination qui désigne une ou plusieurs déclarations universelles liées, non encore réfutées, concernant des observations**.) Dire la

* Éclaircissons l'usage lexical de ce texte : la *religion*, c'est de la spiritualité plus un degré variable d'abus de pouvoir. Ce mélange dépend du milieu, de l'environnement et des antécédents de chaque individu. La *spiritualité* est l'ouverture attentive à la nature tout entière. La plupart, peut-être la totalité, des personnes qui sont passionnées par la physique font preuve de spiritualité. La majorité d'entre elles ne sont pas religieuses.

** En d'autres termes, un ensemble de modèles, non encore réfutés, d'observations concernant un sujet commun d'étude est appelé une *théorie (physique)*. Le terme « théorie » sera toujours employé dans ce sens dans cette promenade, c'est-à-dire avec la signification « ensemble de déclarations générales correctes ». Cet usage

vérité nous rend vulnérables. Pour cette raison, les théories sont souvent *audacieuses*, *arrogantes* ou *provocantes*, en même temps qu'elles doivent être *fragiles* et *vulnérables*. Pour les hommes, les théories ressemblent ainsi à ce qu'ils pensent des femmes. *L'origine des espèces* de Darwin, qui développe des théories audacieuses, illustre le contraste frappant qui existe entre les nombreux faits ennuyeux et fermement établis que Darwin avait réunis et la théorie courageuse qu'il en déduisit. La lassitude des faits est un signe de vérité.

Par opposition, les chasseurs de sorcières qui propagent ce que nous appelons le « dessein intelligent » ou le « créationnisme » sont des exemples de menteurs. Les mensonges spécifiques qu'ils véhiculent, comme « le monde fut créé en octobre 4004 AV. J.-C. », sont sensationnels, alors que les mensonges généraux qu'ils diffusent, tels que « il n'y a pas eu de grand bouleversement par le passé », sont inintéressants. Cela est en parfaite contradiction avec la raison commune. De plus, les mensonges, contrairement aux affirmations vraies, attisent la violence. Plus le mensonge est mauvais, plus les gens deviennent violents. Nous pouvons régulièrement observer cette corrélation dans les journaux. Autrement dit, le « dessein intelligent » n'est pas seulement un mensonge, c'est un mauvais mensonge. Un « bon » *mensonge général*, telle une bonne théorie physique, semble insensé et paraît vulnérable, comme par exemple « les gens sont libres d'agir comme bon leur semble ». Un « bon » *mensonge spécifique* est ennuyeux, comme par exemple « ceci ressemble à du pain, mais dans les dix prochaines minutes ce ne sera plus le cas ». Les bons mensonges n'engendrent pas la violence. Les sensations peuvent donc constituer un critère permettant de juger la qualité des mensonges, si nous faisons très attention au type de déclaration. Nous discuterons d'un certain nombre de mensonges communs un peu plus loin dans ce chapitre.

Un aspect primordial de tout mensonge « convenable » consiste à formuler le plus petit nombre possible de déclarations *publiques*, de telle sorte que les critiques puissent avoir le moins de choses possibles à examiner. (Pour toute personne qui enverrait des corrections d'erreurs relevées dans ce texte, l'auteur fournira une petite récompense.) Pour déceler les mensonges, l'examen public minutieux est important, quoique pas toujours fiable. Parfois, même les scientifiques font des déclarations qui ne sont pas fondées sur les observations. Toutefois, un « bon » mensonge est toujours bien apprêté et répété intentionnellement, les mensonges accidentels sont désapprouvés par les experts. Des exemples de bons mensonges en science sont l'« éther », les « OVNI », le « créationnisme scientifique » ou la « fusion froide ». Il faut parfois plusieurs décennies pour faire toute la lumière sur les mensonges dans ces domaines.

Pour résumer, le point central dans l'art de mentir sans en être accusé est élémentaire : ne divulguez pas les détails. Soyez *vague*. Toutes les méthodes utilisées pour vérifier une

est issu de son origine grecque : « theorein » veut dire « observer », sa signification originale, « contemplation passionnée et enthousiaste », synthétise la physique tout entière dans un seul mot. (La « théorie », comme le « théâtre », est formée à partir de la racine *thé*, qui signifie « l'action de contempler ».) Parfois, cependant, le mot « théorie » est employé avec la signification de « conjecture » – il est alors confondu avec « hypothèse » – comme dans « votre théorie est fausse », de temps en temps avec la signification de « modèle », comme dans la « théorie de Chern–Simons », et parfois avec le sens de « méthode standard », comme dans la « théorie des perturbations ». Ces usages incorrects seront évités ici. Pour apporter une réponse sur un point précis : la *théorie de l'évolution* n'est pas une conjecture, mais un ensemble de déclarations correctes fondées sur l'observation.

affirmation demandent des détails, de la *précision*. Pour chaque déclaration, son degré de précision nous permet de mesurer le degré avec lequel son auteur parvient à résister à la critique. Plus nous demandons de précision, plus une déclaration devient vulnérable et plus une faute sera décelée facilement, s'il y en a une. C'est la raison principale pour laquelle nous choisissons un accroissement de la précision comme fil conducteur de notre ascension montagnaise. Par ailleurs, la même méthode est utilisée dans les procès impliquant des criminels. Pour découvrir la vérité, les enquêteurs posent classiquement à tous les témoins un grand nombre de questions, permettant au plus grand nombre possible de *détails* de se faire connaître. Lorsqu'un nombre suffisant de détails est collecté, et que la précision est assez élevée, la situation devient limpide. Il est beaucoup plus difficile de proférer des « bons » mensonges que de dire la vérité, cela requiert une excellente imagination.

« La vérité est au fond du puits. »
Démocrite

« Enseigner des superstitions comme vérités est la plus épouvantable des choses. »
Hypatie d'Alexandrie (v. 355–415)

« [La vérité absolue :] C'est ce que les scientifiques disent d'elle lorsqu'ils parviennent au bout de leurs efforts. »
Charles Peirce

Réf. 184

CETTE PHRASE EST-ELLE VRAIE ?

« La vérité est un concept rhétorique. »
Paul Feyerabend

Les propositions ne peuvent pas toutes être catégorisées comme étant vraies ou fausses. Des déclarations peuvent simplement n'avoir aucun sens. De telles déclarations existent même en mathématiques, où elles sont qualifiées d'*indécidables*. L'hypothèse du continu en est un exemple. Cette hypothèse est indécidable parce qu'elle formule une affirmation qui dépend de ce que l'on entend précisément par le terme « ensemble » ; dans l'usage mathématique courant ce terme n'est pas défini de manière suffisamment précise, de telle sorte qu'une valeur de vérité peut être assignée à l'hypothèse du continu. En bref, des propositions peuvent être indécidables parce que les concepts qu'elles contiennent ne sont pas définis de manière concise.

Des affirmations peuvent également être indécidables pour d'autres raisons. Des phrases telles que « cette phrase n'est pas vraie » illustrent la situation. Kurt Gödel* a même imaginé une manière générale de construire de telles affirmations dans le domaine de la logique et des mathématiques. Les variantes de ces propositions *auto-référentes*, particulièrement populaires à la fois dans les disciplines de la logique et de l'informatique, ont fasciné un large public**. De manière identique, les propositions indécidables

* Kurt Gödel (1906–1978) était un célèbre logicien autrichien.

** Une introduction générale en est donnée dans les magnifiques ouvrages de RAYMOND SMULLYAN : *Satan, Cantor and Infinity and Other Mind-boggling Puzzles*, Knopf, 1992 ; *What is the Name of This Book ?*

peuvent être construites avec des termes tels que « calculable », « démontrable » et « déductible ».

Réf. 185

En réalité, les propositions auto-référentes sont indécidables parce qu'elles sont dénuées de sens. Si la définition usuelle de « vrai », à savoir l'adéquation avec les faits, est substituée en la phrase « cette phrase n'est pas vraie », nous voyons immédiatement qu'elle ne possède aucun contenu significatif. De toutes les phrases dépourvues de sens, celle qui reste la plus célèbre fut construite par le linguiste Noam Chomsky :

Des idées vertes sans couleur dorment furieusement.

Réf. 151

Elle est souvent employée comme modèle des propriétés de traitement du langage dans le cerveau, mais personne de raisonnable ne l'a élevée au rang de paradoxe et n'a rédigé de discussion philosophique à son propos. En faire de même avec le titre de cette section constitue un gaspillage analogue d'énergie.

La raison principale du succès populaire de l'auto-référence est la difficulté à percevoir l'absence de signification*. Un exemple excellent est la proposition :

Cette proposition est fausse ou vous êtes un ange.

Défi 236 s

Nous pouvons réellement déduire de celle-ci que « vous êtes un ange ». Pouvez-vous voir pourquoi ? Si vous le voulez, vous pouvez changer la deuxième partie et obtenir des propositions encore plus intéressantes. De tels exemples montrent que les affirmations qui se réfèrent à elles-mêmes doivent être considérées avec beaucoup de soin lorsqu'elles sont examinées. En bref, à chaque fois que vous rencontrez quelqu'un qui tente d'utiliser la construction auto-référente de Kurt Gödel pour en déduire une autre proposition, prenez du recul et faites un pas en arrière ou, encore mieux, plusieurs. L'auto-référence, particulièrement du type défini par Gödel, constitue une voie ardue mais courante – surtout parmi ceux qui se targuent d'être intellectuels – pour réfléchir, parler et écrire sur le *non-sens*. Rien d'utile ne peut être déduit à partir du non-sens. D'accord, pas tout à fait : cela permet vraiment de rencontrer des psychiatres de manière régulière.

En physique, dans les autres sciences naturelles et dans les procès en justice, ces problèmes ne surgissent pas, parce que les phrases auto-référentes ne sont pas utilisées**. En réalité, le travail des logiciens confirme, souvent d'une manière quelque peu impressionnante, qu'il n'existe aucune façon d'étendre le terme « vérité » au-delà de sa définition de « correspondance avec les faits ».

The Riddle of Dracula and Other Logical Puzzles, Touchstone, 1986, (en français sous le titre *Quel est le titre de ce livre ?*, Dunod, 1981 [N. d. T.]) et *The Lady or the Tiger? And Other Puzzles*, Times Books, 1982 (en français sous le titre *Le Livre qui rend fou*, Dunod, 1984 [N. d. T.]). Les définitions également peuvent n'avoir aucun contenu, comme « le plus petit nombre qui n'a pas été mentionné ce siècle » ou « la plus petite succession de nombres qui est décrite par plus de signes que cette proposition » de David Hilbert.

* Une victime bien connue de cette difficulté est Paul de Tarse. Le paradoxe du poète crétois *Épiménide* (VII^e siècle av. J.-C.), qui affirma que « Tous les Crétois sont des menteurs », était trop difficile pour Paul, notoirement dénué d'humour. Dans sa lettre à Titus (chapitre I, strophes 12 et 13, dans la Bible chrétienne), il qualifiait Épiménide de « prophète », ajoutait quelques commentaires racistes, et déclarait que cette « déposition » est vraie. Mais attendez, cette histoire ne s'arrête pas là. L'affirmation que « Tous les Crétois sont des menteurs » n'est *pas du tout* un paradoxe, une valeur de vérité peut vraiment lui être attribuée, parce que cette proposition n'est pas réellement auto-référente. Pouvez-vous le confirmer ? Le seul paradoxe *authentique* est « Je suis un menteur », auquel il est en réalité impossible d'affecter une valeur de vérité.

Réf. 186

Défi 235 s

** Pourquoi les propositions circulaires, telles que celles de la physique galiléenne, ne sont-elles pas auto-référentes ?

Défi 237 pe

« Ein Satz kann unmöglich von sich selbst aussagen, daß er wahr ist*.
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 4.442 »

CURIOSITÉS ET DÉFIS AMUSANTS SUR LES MENSONGES

« Es ist ja nicht alles, was ich den Bürgern sage, gelogen**.
Konrad Adenauer, 1962, chancelier allemand. »

Certains mensonges sont divertissants, d'autres sont prononcés dans un but criminel, certains sont excellents, d'autres sont mauvais.

* *

Défi 238 e « Hier, je me suis noyé. » Est-ce un bon ou un mauvais mensonge ?

* *

Défi 239 pe À partir des années 1990, ce que nous appelons des *agroglyphes**** furent façonnés par des individus marchant dans les champs de céréales avec des échasses, un instrument en bois et quelques cordes. Néanmoins, beaucoup de gens prétendirent et d'autres crurent que ces cercles étaient dus à des êtres extraterrestres. Est-ce un bon ou un mauvais mensonge ? Pouvez-vous découvrir une raison pour laquelle cela est impossible ?

* *

Défi 240 s Dans certains pays, deux mensonges étaient particulièrement répandus au début du vingt et unième siècle. Le premier : le réchauffement de la planète n'existe pas. Le second : le réchauffement de la planète n'est pas engendré par l'activité humaine. Sont-ils de bons ou de mauvais mensonges ?

* *

Défi 241 pe Nous entendons parfois dire qu'une personne dont la peau est entièrement recouverte de la poudre métallique la plus fine succombera à cause de l'impossibilité pour l'épiderme de respirer. Pouvez-vous montrer que c'est faux ?

* *

Défi 242 pe Un célèbre amalgame de canular et de croyance infondée présuppose que la Terre fut créée il y a environ six mille ans. (Certains partisans utilisent même cette affirmation erronée pour justifier leur véhémence contre ceux qui n'y croient pas.) Pouvez-vous expliquer pourquoi cette datation est fautive ?

* *

Une provocation notoire : le monde a été créé samedi dernier. Pouvez-vous déterminer

* Il est quasiment impossible pour une proposition de déclarer qu'elle est elle-même vraie.

** « En vérité, tout ce que je dis aux gens n'est pas un mensonge. »

*** Parfois également appelés « cercles de culture » ou « cercles de récolte ». Un agroglyphe est la zone d'un champ de blé, ou d'autres céréales similaires, dont certains épis ont été recourbés ou couchés pour former diverses formes géométriques, certaines en trois dimensions et d'autres en deux. [N.D.T.]

Défi 243 pe si c'est faux ?

* *

Des centaines de canulars sont consultables sur le site Web www.museumofhoaxes.com. Celui-ci donne une excellente introduction à l'art de mentir. Bien évidemment, il expose uniquement ceux qui ont été découverts. Amusez-vous avec les récits scientifiques, particulièrement ceux qui concernent l'archéologie. (Nombre d'autres sites ayant des contenus similaires peuvent être trouvés sur Internet.)

* *

Défi 244 e Dans les années 1990, aux Philippines, un grand nombre de « guérisseurs » firent fortune en persuadant des patients qu'ils étaient capables d'extraire des objets de leur corps, sans opération. Pourquoi ceci n'est-il pas possible ? (Pour plus d'information sur les mensonges médicaux, consultez le site www.quackwatch.com.)

* *

Défi 245 e Depuis les années 1980, des gens ont proclamé qu'il est possible d'acquérir des informations simplement à l'aide de quelqu'un situé à une distance de 1 000 km, sans aucune communication que ce soit entre les deux personnes. Cependant, ces hypothétiques « champs morphogénétiques » ne peuvent pas exister. Pourquoi ?

* *

Défi 246 s On dit qu'un bâtiment de sapeurs-pompiers situé dans une ville des États-Unis abrite une ampoule électrique qui est restée allumée sans interruption depuis 1901 (cela était au moins le cas en 2005). Cela peut-il être vrai ? Des centaines de récits analogues, souvent dénommés « rumeurs », peuvent être consultés sur le site www.snopes.com. Toutefois, certaines de ces histoires ne sont pas des canulars, elles sont vraies, comme le mentionne ce site Web.

* *

« Cette phrase a été traduite de l'anglais au français. » Cette proposition est-elle vraie, fausse ou ni l'une ni l'autre ?

* *

Défi 247 s Des avions n'ont aucun siège dans la rangée 13. De nombreux hôtels très élevés n'ont pas de treizième étage. Quel est le mensonge dissimulé derrière cette coutume ? Quelle est la vérité cachée derrière celle-ci ?

* *

Défi 248 s Depuis environ un millier d'années, certaines personnes prétendent qu'elles ont été stigmatisées, c'est-à-dire qu'elles ont « miraculeusement » enduré des blessures qui sont similaires à celles de la crucifixion de Jésus. Comment pouvons-nous démontrer par une observation immédiate que tous ces gens ont produit ces blessures eux-mêmes ?

* *

« Au Moyen Âge et dans l'Antiquité, les gens pensaient que la Terre était plate. » C'est un

fameux mensonge qui est rarement contesté. L'historien Reinhard Krüger a montré que cette contrevérité est principalement due aux écrivains Thomas Paine (1794) et Washington Irving (1928). La vérité est que, depuis Aristote, tout le monde croyait en une Terre sphérique.

* *

Défi 249 s Le mot « multivers » (un prétendu contraire de l'« univers ») représente-t-il un mensonge ou une croyance ?

* *

Ce qui suit n'est pas un mensonge. Une bonne manière de supprimer la curiosité chez les enfants est employée dans de nombreux milieux : laissez l'enfant regarder la télévision à chaque fois qu'il le désire. Faites-le pendant quelques semaines, et vous ne reconnaîtrez plus cet enfant. Faites-le pendant quelques années, et la curiosité disparaîtra à jamais.

* *

Défi 250 pe Comment montreriez-vous que les rayons terrestres de la radiesthésie sont un artifice ?

* *

Défi 251 s Comment démontreriez-vous que la phrase « les lois de la nature peuvent changer tout le temps » est un mensonge ?

OBSERVATIONS

« La connaissance est une expression compliquée pour désigner l'ignorance. »
Attribué à Karl Popper

Réf. 187 Le recueil d'un grand nombre de propositions vraies concernant un type d'observation, c'est-à-dire d'un grand nombre de faits, est appelé la *connaissance*. Lorsque le domaine des observations est suffisamment étendu, nous parlons alors de *science*. Un *scientifique* est donc quelqu'un qui collecte la connaissance*. Nous avons découvert plus haut qu'une observation est de l'information classée dans la mémoire de plusieurs personnes. Puisqu'il y a du mouvement partout, décrire toutes ces observations constitue une tâche titanesque. Comme pour toute tâche considérable, l'utilisation des outils appropriés détermine largement le niveau de réussite qui peut être atteint. Ces instruments, en physique et dans toutes les autres sciences, se classent en trois catégories : les outils

* Le mot anglais « scientist » (en français « scientifique ») est un terme mal approprié spécifique à la langue anglaise. Pour l'exprimer de manière correcte, un « scientiste » est un partisan du *scientisme*, une école philosophique extrémiste qui s'évertue à résoudre tous les problèmes à travers la science. Pour cette raison, certaines sectes religieuses possèdent ce terme dans leur nom. Puisque la langue anglaise ne possède pas de terme plus court pour désigner les « scientifiques » autrement que par « scientific persons », comme ils devraient être appelés, le mot « scientist » commença à apparaître aux États-Unis à partir du dix-huitième siècle. De nos jours, ce mot est employé dans tous les pays anglophones – mais pas en dehors de ceux-ci, par chance.

permettant de collecter des observations, les outils permettant de communiquer des observations, et les outils permettant de communiquer les relations qu'il y a entre les observations. Ce dernier groupe a déjà été discuté dans la section sur le langage et sur les mathématiques. Nous allons juste dire deux mots concernant les deux autres.

UNE QUANTITÉ D'OBSERVATIONS SUFFISANTE A-T-ELLE ÉTÉ RELEVÉE ?

« Chaque génération a tendance à définir « l'achèvement de la physique » comme coïncidant avec la fin de ses contributions scientifiques.

Julian Schwinger*

La physique est une science expérimentale, elle s'appuie sur le rassemblement des observations. Pour réaliser efficacement cette fonction, toutes sortes d'*instruments*, c'est-à-dire d'outils qui facilitent les observations, ont été développés puis construits. Les microscopes, les télescopes, les oscilloscopes, ainsi que les thermomètres, les hygromètres, les manomètres, les pyromètres, les spectromètres et beaucoup d'autres encore en constituent des exemples familiers. La précision de la plupart de ces outils est constamment en cours d'amélioration aujourd'hui encore. Leur fabrication représente une portion significative de l'activité industrielle moderne, les exemples étant les appareils de mesure électrique et les instruments de diagnostic pour la médecine, la chimie et la biologie. Ces instruments peuvent être aussi petits qu'une pointe de quelques atomes de tungstène pour produire un faisceau d'électrons de quelques volts, et aussi vastes qu'une installation de 27 km de circonférence, produisant un faisceau d'électrons et doté de plus de 100 GV de tension utile pour produire une accélération. Des instruments ont été conçus pour contenir et mesurer la matière la plus froide que nous connaissons dans l'Univers. D'autres instruments peuvent mesurer des variations de longueur beaucoup plus petites que le diamètre d'un proton sur des distances de quelques kilomètres. Des instruments ont été placés dans les profondeurs de la Terre, sur la Lune et sur plusieurs planètes, ou ont été propulsés en dehors du Système solaire.

Réf. 189, Réf. 190

Réf. 191

Dans cette excursion, les instruments ne sont pas examinés, de nombreux ouvrages de qualité sont disponibles sur ce sujet. La plupart des observations amassées par les instruments ne sont pas mentionnées ici. Les résultats les plus importants en physique sont signalés dans les publications courantes, telles que l'encyclopédie Landolt-Börnstein et les revues de physique (l'[Annexe C](#) donne un aperçu général concernant les sources d'information).

Y aura-t-il de nouvelles observations ultérieures de grande importance dans le domaine des fondamentaux du mouvement ? En ce moment, *en particulier dans ce domaine*, bien que le nombre de physiciens et de publications ait atteint un niveau sans précédent, le nombre de nouvelles découvertes expérimentales est resté en constante diminution

Réf. 188

* Julian Seymour Schwinger (1918–1994) fut un enfant américain prodige. Reconnu pour sa clarté d'esprit et ses excellentes conférences, il travailla sur les guides d'onde et sur le rayonnement synchrotron, apporta des contributions à la physique nucléaire et développa l'électrodynamique quantique. Pour cette dernière, il reçut le prix Nobel de physique en 1965 avec Tomonaga et Feynman. Il fut le directeur de thèse de nombreux physiciens célèbres et écrivit plusieurs excellents ouvrages de référence. Néanmoins, à la fin de sa vie, il s'intéressa étrangement à une amère fumisterie : la fusion froide.

pendant de nombreuses années, et est dorénavant plutôt réduit. La sophistication et l'investissement nécessaires pour obtenir de nouveaux résultats sont devenus extrêmement élevés. Dans un grand nombre de situations, les instruments de mesure sont parvenus aux limites technologiques, budgétaires ou même à celles de la nature. Le nombre de nouvelles expériences révélant des résultats qui ne montrent aucun écart par rapport aux prédictions théoriques est en augmentation croissante. Le nombre d'articles remarquables qui ont tenté d'éveiller des domaines d'investigation réputés austères ou en déclin s'est accru. Les revendications de l'existence d'effets nouveaux qui se sont révélées finalement fausses, à cause d'erreurs de mesure, d'effets non pris en compte, de biais expérimentaux ou même de fraudes, sont devenues si fréquentes que le scepticisme est désormais l'attitude courante. Bien que dans de nombreux domaines de la science, y compris la physique, des découvertes soient toujours attendues, sur les fondamentaux du mouvement l'argumentation que nous venons de présenter semble montrer que de nouvelles observations ne demeurent qu'une éventualité lointaine. La tâche consistant à collecter des observations sur les fondements du mouvement (bien que les autres branches de la physique ne soient pas concernées) semble être *complète*. En réalité, la plupart des observations décrites ici furent relevées avant la fin du vingtième siècle. Nous ne sommes pas trop en retard dans notre promenade.

Réf. 192

« Mesure ce qui est mesurable, rends mesurable ce qui ne l'est pas. »
Faussement attribué à Galilée.

TOUTES LES OBSERVABLES PHYSIQUES SONT-ELLES CONNUES ?

« Les scientifiques se comportent de manière antipathique, sauf lorsque vous soutenez leur théorie : vous pouvez alors leur emprunter de l'argent. »
Mark Twain

La manière la plus commode de communiquer des observations a été développée il y a très longtemps : grâce aux mesures. Une mesure permet une communication efficace relative à une observation vers d'autres époques et d'autres lieux. Cela n'est pas toujours aussi évident qu'il paraît : par exemple, au Moyen Âge les gens étaient incapables de comparer avec précision la « froidure » des hivers de deux années différentes ! L'invention du thermomètre apporta une solution fiable à ce besoin. Une *mesure* est donc la classification d'une observation dans un ensemble standard d'observations ou, pour faire simple, une *comparaison avec un étalon de référence*. Cette définition d'une mesure étant précise et pratique, elle a été par conséquent universellement adoptée. Par exemple, lorsque la longueur d'une maison est mesurée, cette caractéristique de l'habitation est classifiée dans un certain ensemble de longueurs de référence, à savoir l'ensemble des longueurs définies par les multiples d'une unité. Une *unité* est le nom abstrait qui désigne l'étalon de référence pour une observable donnée. Les nombres et les unités permettent la communication la plus précise et la plus efficace concernant les résultats des mesures.

Des unités de référence pratiques et des méthodes de mesure ont été définies pour toutes les quantités mesurables, les principales sont listées et définies dans l'[Annexe B](#). Toutes les unités sont dérivées d'un petit nombre d'unités fondamentales, ce qui est en

fin de compte dû à notre nombre limité de facultés sensorielles : longueur, durée et masse sont reliées à la vue, à l'ouïe et au toucher. La limitation de nos sens est, par la suite, due au petit nombre d'observables de la nature.

Nous appelons *observables* les différents aspects mesurables d'un système. La majorité des observables, telles que la taille, la vitesse, la position, etc. peuvent être décrites par des nombres, et dans ce cas ce sont des *quantités*, c'est-à-dire des multiples d'une certaine unité de référence. Les observables sont généralement notées par des *symboles* (*mathématiques*), d'habitude des lettres d'un alphabet donné. Par exemple, le symbole c désigne couramment la vitesse de la lumière. Pour la plupart des observables, des symboles standards ont été définis par des organismes internationaux*. Les symboles pour les observables qui décrivent l'état d'un objet sont également appelés *variables*. Les variables dont dépendent d'autres observables sont souvent appelées *paramètres*. (Souvenez-vous : un paramètre est une constante variable.) Par exemple, la vitesse de la lumière est une constante, la position une variable, la température est souvent un paramètre, dont la longueur d'un objet, par exemple, peut dépendre. Remarquez que toutes les observables ne sont pas forcément des quantités : en particulier, les parités ne sont pas des multiples d'une quelconque unité.

Aujourd'hui le travail de définition des outils nécessaires à la communication des observations peut être considéré comme *complet*. (Pour les quantités, c'est certainement exact, pour les observables de type pair-impair, il pourrait y avoir encore quelques exemples à découvrir.) C'est une déclaration élémentaire mais profonde. Même le BIPM, le Bureau international des poids et mesures, a cessé d'ajouter de nouvelles unités**.

En guise de remarque, l'éminence d'un physicien peut être quantifiée par le nombre d'observables qu'il a introduit. Même un grand scientifique comme Einstein, qui a découvert un grand nombre de « lois » de la nature, n'introduisit qu'une seule nouvelle observable, à savoir le tenseur métrique pour la description de la gravité. En suivant ce critère – de même que plusieurs autres – Maxwell est le physicien le plus important, car il a introduit les champs électrique et magnétique, le potentiel vecteur et plusieurs autres observables dépendantes de la matière. Pour Heisenberg, Dirac et Schrödinger, la fonction d'onde qui décrit le mouvement de l'électron pourrait être comptabilisée comme une moitié d'observable (car c'est une quantité nécessaire pour calculer des résultats expérimentaux, mais elle ne constitue pas en elle-même une observable). À ce propos, même l'introduction d'un terme *quelconque*, qui est réutilisé par d'autres personnes, constitue un événement rare : « gaz », « entropie » et quelques autres seulement en sont des exemples. Il a toujours été beaucoup plus difficile de découvrir une observable que de découvrir une « loi », généralement les observables sont développées par un ensemble d'individus qui coopèrent. En fait, de nombreuses « lois » portent des noms de personnes, mais pratiquement aucune observable.

* Tous les symboles mathématiques utilisés dans cette excursion, y compris les alphabets auxquels ils sont associés, sont listés dans l'Annexe A sur les notations. Ils obéissent aux standards internationaux à chaque fois qu'ils sont définis. Les symboles de référence concernant les quantités physiques, définis par l'Organisation internationale de normalisation (ISO), l'Union internationale de physique pure et appliquée (UIPPA) et l'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA) peuvent être consultés par exemple dans la bible, c'est-à-dire le *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, Boca Raton, 1992.

** La dernière unité, le katal ou mol/s, fut introduite en 1999. Les unités physiques sont présentées dans l'Annexe B.

Si la liste des observables nécessaires pour décrire la nature est exhaustive, cela signifie-t-il que tous les modèles ou règles de la nature sont connus ? Non, dans l'histoire de la physique, les observables ont généralement été définies et mesurées longtemps *avant* que les règles précises qui les mettent en avant soient découvertes. Par exemple, toutes les observables utilisées dans la description du mouvement lui-même, tels le temps, la position et ses dérivées, la quantité de mouvement, l'énergie et toutes les quantités thermodynamiques, furent définies avant ou au cours du dix-neuvième siècle, alors que les versions les plus précises des modèles ou des « lois » de la nature qui les associent, la relativité restreinte et la thermodynamique du non-équilibre, ont été découvertes au vingtième siècle seulement. La même chose est vraie pour toutes les observables associées à l'interaction électromagnétique. Le modèle correspondant de la nature, l'électrodynamique quantique, fut découvert longtemps après les observables qui s'y rapportent. Celles qui furent découvertes en dernier furent les champs des interactions nucléaires faible et forte. Dans ce cas aussi les modèles de la nature ont été formulés beaucoup plus tard*.

LES OBSERVATIONS PRENNENT-ELLES DU TEMPS ?

Une observation est une interaction avec une certaine partie de la nature, conduisant à la production d'un enregistrement, tels un souvenir dans le cerveau, des données sur une bande, de l'encre sur une feuille, ou tout autre élément figé appliqué sur un support. Le processus d'interaction irréversible nécessaire est souvent baptisé l'*écriture* de l'enregistrement. Manifestement, le fait d'écrire prend un certain temps, un temps d'interaction nul ne permettrait aucun enregistrement. Par conséquent tout dispositif d'enregistrement, y compris notre cerveau, mémorise toujours dans une certaine mesure la *moyenne dans le temps* de l'observation, même si elle est très courte.

Ce que nous appelons une image figée, qu'elle soit une image mentale ou une photographie, représente toujours la moyenne temporelle d'une situation en mouvement. Si nous ne pouvions faire de moyenne dans le temps, nous n'aurions pas de souvenirs figés. D'un autre côté, toute moyenne temporelle introduit un certain flou qui masque des détails, et dans notre quête de précision, à partir d'un certain moment, ces détails sont nécessairement importants. La découverte de ces détails commencera dans la prochaine partie de cette promenade, celle centrée sur la théorie quantique. Dans la dernière partie de notre ascension montagnaise, nous découvrirons qu'il existe une durée moyenne, qui est la plus courte possible. Les observations de cette brève durée exhibent tant de détails que même la distinction entre les particules et l'espace vide devient confuse. Contrairement à cela, nos concepts liés à la vie de tous les jours ne surgissent qu'après des durées moyennes relativement longues. La recherche d'une description de la nature qui s'affranchit de cette moyenne constitue l'un des grands défis de notre aventure.

* Après tout, est-il possible de discuter des observations ? C'est le passe-temps favori de nombreux philosophes que de discuter pour savoir s'il existe vraiment un exemple d'« Elementarsatz » (de « proposition élémentaire » [N.D.T.]) mentionné par Wittgenstein dans ses *Tractatus*. Il semble qu'il y en ait au moins une qui convient : *les différences existent*. C'est une phrase simple, elle jouera un rôle crucial dans l'ultime partie de notre promenade.

L'INDUCTION EST-ELLE UN PROBLÈME EN PHYSIQUE ?

« Nur *gesetzmäßige* Zusammenhänge sind *denkbar**. »

Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.361

« Il existe traditionnellement une opposition entre les partisans de l'induction et ceux de la déduction. Selon mon point de vue il serait aussi sensé que les deux extrémités d'un ver se querellent. »

Alfred North Whitehead

L'induction est le terme courant employé pour désigner l'acte de faire des conclusions générales, à partir d'un nombre réduit et fini d'expériences, concernant l'issue de *toutes* les expériences possibles réalisées dans d'autres lieux ou à d'autres époques. En un sens, c'est le terme technique permettant de généraliser, qui est nécessaire dans toute déclaration scientifique. L'induction est demeurée un sujet majeur de discussions pour les commentateurs scientifiques. Nous rencontrons fréquemment la remarque qui stipule que la connaissance en général, et plus particulièrement en physique, se fonde sur l'induction pour formuler ses propositions. D'après certains, l'induction est une sorte de croyance cachée qui est à l'origine de toutes les sciences mais, en même temps, qui est en contradiction avec celles-ci.

Pour éviter un gaspillage d'efforts inutiles, nous ne ferons que quelques remarques. La première peut être déduite d'une expérience élémentaire. Tentez de convaincre un détracteur de l'induction de mettre sa main dans le feu. De tous ceux qui qualifient franchement l'induction de croyance, personne ne conclurait à partir de quelques expériences malheureuses qui ont eu lieu par le passé qu'un tel acte serait également préjudiciable dans le futur... En bref, d'une certaine manière, l'induction marche.

Un deuxième point est que les propositions universelles de la physique sont toujours formulées ouvertement : elles ne sont jamais dissimulées. Le refus de mettre sa main dans le feu est une conséquence de l'invariance des observations sous les translations de temps et d'espace. En réalité, les déclarations générales de ce type forment les premiers fondements de la physique. Cependant, aucune proposition physique n'est une croyance uniquement parce qu'elle est universelle : elle reste continuellement ouverte aux vérifications expérimentales. L'induction physique n'est pas une méthode obscure d'argumentation, c'est une partie explicite des formulations expérimentales. En fait, la liste complète des propositions « inductives » utilisées en physique est donnée dans le tableau de la [page 201](#). Ces affirmations sont si importantes qu'elles se sont vu attribuer un nom particulier : elles sont appelées des *symétries*. Ce tableau liste toutes les symétries connues de la nature ; autrement dit, elle dresse la liste de toutes les déclarations inductives utilisées en physique.

Le meilleur argument pour l'utilisation de l'induction est probablement qu'il n'existe aucune manière de l'éviter lorsque nous sommes en train de réfléchir. Il n'existe aucun moyen de penser, de parler ou de se souvenir de quelque chose qui ne fasse appel à des concepts, c'est-à-dire qui n'admette que la plupart des objets ou des entités conservent les mêmes propriétés au cours du temps. Il n'y a également aucun moyen

* Seules les correspondances qui sont *subjettées à la loi* sont concevables.

Page 176

Réf. 187

Défi 252 s

de communiquer avec d'autres sans supposer que les observations faites à partir des points de vue des autres sont similaires au nôtre. Il n'y a pas de façon de penser sans la symétrie et l'induction. En réalité, ces concepts associés à la symétrie et à l'induction, tels que l'espace et le temps, appartiennent aux concepts fondamentaux du langage. Les seules phrases qui ne font pas appel à l'induction, les propositions de la logique, ne possèdent aucun contenu (*Tractatus*, 6.11). En vérité, sans l'induction, nous ne pouvons plus classer les observations ! L'évolution nous a dotés d'une mémoire et d'un cerveau parce que l'induction fonctionne. Faire la critique de l'induction ne consiste pas à critiquer les sciences de la nature, cela consiste à critiquer l'usage de la pensée en général. Nous ne devrions jamais prendre trop au sérieux les gens qui font eux-mêmes ce qu'ils reprochent aux autres, s'ils soulèvent fortuitement le ridicule de cette tentative alors ils méritent simplement qu'on leur accorde de l'attention.

Ce sujet pourrait se conclure ici, mais c'est sans compter sur certains développements intéressants en physique moderne qui enfoncent deux clous décisifs dans le cercueil des arguments contre l'induction. Premièrement, en physique, à chaque fois que nous faisons des propositions au sujet de toutes les expériences, tous les instants ou toutes les vitesses, ces propositions ne concernent en réalité qu'un *nombre fini* de situations. Nous savons aujourd'hui que les infinis, à la fois en taille et en nombre, ne se produisent jamais dans la nature. Le nombre infini de cas qui apparaissent dans les formulations de la physique classique et dans la mécanique quantique est apparent, donc non réel, et dû à des simplifications et des approximations humaines. Des expressions qui stipulent qu'une certaine expérience donne le même résultat « partout » ou qu'une équation donnée est correcte pour « tous les instants » n'englobent toujours qu'un nombre *fini* d'exemples. On évite de cette manière beaucoup de frustration souvent instinctive face à de telles déclarations. Dans les sciences, ainsi que dans ce livre, « tout » ne signifie *jamais* un nombre infini de situations.

Finalement, nous savons bien que l'extrapolation d'un petit nombre de cas à un grand nombre est erronée lorsque les quelques situations considérées sont indépendantes les unes des autres. Cependant, cette conclusion est correcte si les cas sont interdépendants. À partir du fait que quelqu'un a trouvé une pièce dans la rue deux mois de suite, on ne peut pas déduire qu'il en trouvera une le mois prochain. L'induction est correcte uniquement si nous savons que toutes les situations ont un comportement similaire, par exemple parce qu'elles sont issues de la même cause. Disons, si un voisin ayant un trou dans sa poche transporte son salaire le long de cette rue une fois par mois, et si le trou s'ouvre toujours à cet endroit parce qu'il y a des escaliers à gravir, alors cette conclusion pourrait être exacte. Il apparaît que les résultats de la physique moderne, que nous rencontrerons dans la dernière partie de notre excursion, montreront que toutes les situations dans la nature sont en réalité interdépendantes, et nous démontrons ainsi précisément que ce que nous appelons « induction » est en fait une conclusion logiquement correcte.

« Dans l'essor de la physique, l'exception se révèle généralement être le cas général. »

LA QUÊTE DE PRÉCISION ET SES CONSÉQUENCES

« Der Zweck der Philosophie ist die logische Klärung der Gedanken*.
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 4.112 »

Pour bien discuter du mouvement, il faut parler avec précision. La précision impose d'éviter trois erreurs courantes dans la description de la nature.

Réf. 193 Premièrement, les concepts ne devraient jamais avoir une contradiction inhérente à leur définition. Par exemple, tout phénomène se produisant dans la nature est évidemment un phénomène « naturel » ; par conséquent, discuter à propos des phénomènes « surnaturels » ou des phénomènes « artificiels » constitue une erreur que toute personne intéressée par le mouvement ne devrait jamais commettre. De tels termes renferment une contradiction logique. Naturellement, *toutes* les observations sont naturelles. Par ailleurs, il y a une récompense de plus d'un million de dollars pour celui qui démontrera le contraire. En plus de vingt ans, personne n'a encore été capable de la recevoir.

Réf. 194 Deuxièmement, les concepts ne devraient pas avoir de définition vague ou qui varie constamment. Leur contenu et leurs limites doivent être précisés de manière constante et explicite. Nous rencontrons fréquemment le contraire de cela chez les charlatans ou les politiciens populistes. Cette exigence permet de les distinguer des savants plus dignes de confiance. Les physiciens peuvent également tomber dans le piège : par exemple, il n'existe, bien évidemment, qu'*un seul* univers (physique), comme l'indique même cette désignation. Il est complètement stérile de discourir sur l'existence de plusieurs univers, malheureusement cela est de plus en plus fréquent.

Troisièmement, les concepts ne devraient pas être utilisés en dehors de leur domaine d'application. Il est facile de succomber à la tentation de transférer des résultats de la physique à la philosophie sans en vérifier le contenu. La question suivante en est un exemple : « Pourquoi les particules obéissent-elles aux lois de la nature ? » Le vice dans la question est dû à une mauvaise compréhension de l'expression « lois de la nature » et à une confusion avec les lois de la nation. Si la nature était gouvernée par des « lois », celles-ci pourraient être modifiées par le Parlement. En nous souvenant que les « lois de la nature » signifient simplement « modèles », « propriétés » ou « descriptions de comportement », et en reformulant correctement cette question ainsi : « Pourquoi les particules se comportent-elles précisément de la manière dont nous décrivons leur comportement ? », nous pouvons reconnaître son manque de logique.

Tout au long de notre promenade, nous serons souvent attirés par les sirènes de ces trois égarements. Voici quelques situations de ce type, avec les méthodes pour les éviter.

« La logique est le dernier refuge des gens qui manquent d'imagination.
Oscar Wilde »

* Le but de la philosophie est la clarification logique de la pensée.

QUE SONT LES INTERACTIONS ? – AUCUNE ÉMERGENCE

« Le tout est toujours bien plus que la somme de ses parties. »
Aristote, *Métaphysique*, 10f-1045a.

Dans la description physique de la nature, le tout est toujours *plus* que la somme de ses parties. En réalité, la différence entre le tout et la somme de ses parties est si importante qu'elle possède une dénomination particulière : c'est l'*interaction* entre les parties. Par exemple, l'énergie du tout moins la somme des énergies de ses parties est appelée l'énergie d'interaction. En fait, l'étude des interactions constitue le domaine de prédilection de la physique. Autrement dit, la physique s'intéresse *essentiellement* à la différence qu'il y a entre les parties et le tout, contrairement à ce que les mauvais journalistes ou d'autres penseurs stupides prétendent fréquemment.

Notez que le terme « interaction » est fondé sur l'observation générale que tout ce qui affecte n'importe quoi d'autre est, en retour, affecté par celui-ci : les interactions sont *réiproques*. Par exemple, si un corps modifie la quantité de mouvement d'un autre, alors le second modifie la quantité de mouvement du premier de la même quantité (négative). La réciprocité des interactions est une conséquence des « lois » de conservation. Cette réciprocité est également la raison pour laquelle toute personne qui emploie le mot « interaction » est considérée comme étant hérétique par les religions monothéistes, comme les théologiens le soulignent régulièrement. Ils insistent constamment sur le fait qu'une telle réciprocité renie implicitement l'inaltérabilité de la divinité. (Ont-ils raison ?)

L'application de la définition de l'interaction soulève également la question, que l'on entend souvent, de savoir si dans la nature il y a des propriétés « émergentes », c'est-à-dire des propriétés de systèmes qui ne peuvent pas être déduites à partir des propriétés de leurs parties et de leurs interactions. Par définition, il n'existe aucune propriété « émergente ». Celles-ci ne peuvent apparaître que si les interactions sont évaluées de manière approximative ou tout simplement ignorées. L'idée de propriétés « émergentes » est un pur produit des esprits dotés de visions réduites, incapables de percevoir ou d'admettre la profusion de conséquences que les principes généraux peuvent engendrer. En défendant l'idée de l'émergence, nous déprécions l'importance des interactions, en œuvrant d'une manière apparemment inoffensive, peut-être inconsciente, mais en réalité sournoise, contre l'utilisation de la raison dans l'étude de la nature. L'« émergence » est une croyance.

La définition simple de l'interaction, fournie ci-dessus, donne l'impression d'être élémentaire, mais elle conduit à des conclusions surprenantes. Prenez l'idée atomiste de Démocrite sous sa forme moderne : la nature est constituée de vide et de particules. La première conséquence est le *paradoxe de la description incomplète* : les expériences montrent qu'il y a des interactions entre le vide et les particules. Cependant, les interactions représentent les différences, d'une part, entre les parties et le tout, dans cette situation entre le vide et les particules, et le tout de l'autre. Nous en avons donc déduit que la nature n'est pas constituée uniquement de vide et de particules.

La deuxième conséquence est le *paradoxe de la description surcomplète* : les expériences démontrent aussi que les interactions se produisent à travers l'échange de particules. Toutefois, nous avons déjà comptabilisé les particules comme des briques fondamentales. Ceci signifie-t-il que la description de la nature par le vide et les particules soit

Défi 253 pe

Page 281

Réf. 195

Défi 254 s une surdescription, comptant deux fois les choses ?

Page ?? Nous résoudrons ces deux paradoxes dans la dernière partie de notre ascension montagnaise.

QU'EST-CE QUE L'EXISTENCE ?

« Vous savez ce que j'aime le plus ?
Les questions de rhétorique. »

Réf. 196 Supposez qu'un ami vous dise : « J'ai vu une *orque* aujourd'hui ! » Vous demanderiez naturellement à quoi elle ressemblait. Quelle réponse attendons-nous ? Nous nous attendons à quelque chose comme « c'est un animal doté d'un certain nombre de têtes similaires à un *X*, reliées à un corps bâti comme un *Y*, avec des ailerons faits comme un *Z*, il émet des sons comme un *U* et donne la même sensation au toucher qu'un *V* » – les lettres indiquant un autre animal ou objet donné. D'une manière générale, dans le cas d'un objet, cette scène tirée du voyage de Darwin en Amérique du Sud montre que, afin de se parler les uns aux autres, nous avons en premier lieu besoin de certains concepts élémentaires et communs (« animal », « tête », « aile », etc.). De surcroît, pour la définition d'une nouvelle entité, nous avons besoin d'une caractérisation de ses parties (« taille », « couleur »), de la manière dont ces parties sont reliées les unes aux autres et de la manière dont le tout interagit avec le monde extérieur (« toucher », « son »). En d'autres termes, pour qu'un objet puisse exister, nous devons être capables de dresser une liste des relations qu'il entretient avec le monde extérieur. Un objet existe si nous pouvons interagir avec lui. (L'observation est-elle suffisante pour déterminer l'existence ?)

Défi 255 s

Pour un concept abstrait, tel que le « temps » ou une « supercorde », la définition de l'existence doit être peaufinée au moins superficiellement : l'*existence (physique)* est la capacité à décrire fidèlement les interactions. Cette définition s'applique aux arbres, au temps, aux particules virtuelles, aux nombres imaginaires, à l'entropie et ainsi de suite. Il ne rime donc à rien de discuter pour savoir si un concept physique « existe » ou s'il est « uniquement » une abstraction utilisée comme instrument pour les descriptions des observations. Les deux possibilités se rejoignent. Le seul sujet de discordance peut être de savoir si la description fournie par un concept est *précise* ou non.

Pour les concepts mathématiques, la notion d'existence possède une signification quelque peu différente : on dit qu'un concept mathématique existe s'il ne possède aucune contradiction intrinsèque. C'est une condition requise beaucoup plus faible que l'existence physique. Il est donc incorrect de déduire l'existence physique à partir de l'existence mathématique. C'est une erreur fréquente : depuis l'époque de Pythagore on a souvent stipulé que, puisque les concepts mathématiques existent, ils doivent par conséquent exister aussi dans la nature. Historiquement, cette confusion s'est présentée dans les affirmations que les orbites planétaires « doivent » être circulaires, que la forme des planètes « doit » être sphérique ou que l'espace physique « doit » être euclidien. Aujourd'hui, cela se produit encore avec les déclarations que l'espace et le temps « doivent » être continus et que la nature « doit » être décrite par des ensembles. Dans toutes ces situations, le raisonnement est faux. En réalité, les tentatives incessantes pour déduire l'existence physique à partir de l'existence mathématique empêchent de montrer que le contraire est vrai : une réflexion rapide montre que l'existence mathématique est un cas

Défi 256 s particulier de l'existence physique.

Nous remarquons qu'il y a également une forme distincte d'existence, à savoir l'*existence psychologique*. On peut dire qu'un concept existe psychologiquement s'il décrit l'expérience intérieure humaine. Donc un concept peut exister psychologiquement même s'il n'existe pas physiquement. Il est facile de découvrir des exemples tirés des religions ou des structures qui décrivent des expériences privées. Les mythes, les légendes et les bandes dessinées définissent également des concepts qui existent uniquement de manière psychologique, et non physique. Dans notre promenade, à chaque fois que nous parlons de l'existence, nous sous-entendons qu'il s'agit uniquement de l'existence physique.

Défi 257 s

LES CHOSES EXISTENT-ELLES ?

« Wer Wissenschaft und Kunst besitzt,
Hat auch Religion ;
Wer jene beiden nicht besitzt,
Der habe Religion* .
Johann Wolfgang von Goethe, *Les Xénies*
apprivoisées, IX »

En utilisant la définition ci-dessus de l'existence, cette question devient soit triviale soit imprécise. Elle est triviale au sens où les choses existent nécessairement si elles décrivent des observations, puisqu'elles ont été définies de cette manière. Mais peut-être que celui qui pose la question veut dire : la réalité existe-t-elle indépendamment de l'observateur ?

En utilisant ce que nous venons de dire, cette interrogation peut être reformulée ainsi : « les choses que nous observons existent-elles indépendamment de l'observation ? » Après des millénaires de discussions intensives menées par des philosophes professionnels, des logiciens, des sophistes et des amateurs, la réponse demeure toujours la même : c'est « oui », parce que le monde n'a pas changé après le décès de notre arrière-grand-mère. La disparition des observateurs ne semble pas altérer l'Univers. Ces découvertes expérimentales peuvent être corroborées en introduisant la définition de l'« existence » dans la question, laquelle devient alors : « les choses que nous observons interagissent-elles avec d'autres aspects de la nature lorsqu'elles n'interagissent pas avec les gens ? » La réponse est évidente. Des livres de vulgarisation récents sur la mécanique quantique fantasment sur l'importance de la « conscience » des observateurs – quoi que ce terme puisse vouloir dire. Ils fournissent de jolis exemples d'auteurs qui se considèrent eux-mêmes comme irremplaçables, ayant apparemment perdu l'aptitude à se percevoir comme partie intégrante d'une plus grande entité.

Bien sûr, il existe d'autres opinions concernant l'existence des choses. La plus célèbre est celle de l'Irlandais George Berkeley (1685–1753) qui comprit à juste raison que les réflexions fondées sur l'observation seule, si elles étaient extrapolées, ébranleraient le fondement de l'organisation religieuse dont il était un des dirigeants supérieurs. Pour contrecarrer cette tendance, il publia en 1710 *Un traité concernant les principes de la*

* Celui qui possède la science et l'art possède aussi la religion. Celui qui ne les possède pas tous les deux, puisse-t-il avoir la religion !

connaissance humaine, un ouvrage réfutant l'existence du monde matériel. Ce livre réactionnaire devint largement connu dans les cercles d'initiés (c'était une époque où peu de livres étaient écrits) bien qu'il fût fondé sur une idée fondamentalement déficiente : elle suppose que le concept de l'« existence » et celui du « monde » peuvent être définis indépendamment l'un de l'autre. (Vous pourriez être tentés de réaliser cet exploit.)

Berkeley avait deux objectifs lorsqu'il écrivit son livre. Premièrement, il tenta de renier la capacité des gens à formuler des jugements sur la nature ou sur toute autre matière à partir de leur propre expérience. Deuxièmement, il tenta également de renier la portée ontologique de la science, c'est-à-dire les conclusions que nous pouvons esquisser à partir de l'expérience sur les questions concernant l'existence humaine. Bien que Berkeley soit généralement méprisé de nos jours, il parvint vraiment à accomplir son principal objectif : il fut l'initiateur de l'idée selon laquelle la science et la religion ne se contredisent pas, mais sont complémentaires l'une de l'autre. Par religion, Berkeley ne voulait pas sous-entendre moralité ou spiritualité : chaque scientifique est un ami de ces deux démarches. Berkeley voulait faire comprendre, par religion, que l'ensemble courant des croyances qu'il voulait mettre en relief est au-dessus des déductions de la raison. Cette expression largement citée, elle-même une croyance, est, encore de nos jours, toujours pieusement ressassée par de nombreuses personnes. Néanmoins, lorsque nous enquêtons sur l'origine du mouvement, toutes sortes de croyances se tiennent sur le chemin, y compris celle-ci. Emporter des croyances avec soi, c'est comme emporter des bagages encombrants : ils nous empêchent d'atteindre le sommet de la Montagne Mouvement.

LE NÉANT EXISTE-T-IL ?

« Le professeur : « Qu'y a-t-il entre le noyau et les électrons ? »

L'étudiant : « Rien, juste de l'air ».

« Natura abhorret vacuum*.

Antiquité

Dans les discussions philosophiques, le « néant » est généralement défini comme étant la « non-existence ». Nous jouons alors avec les mots lorsque nous demandons de répondre par oui ou non à la question « le néant existe-t-il ? ». L'expression « l'existence de la non-existence » est soit une contradiction dans les mots, soit une définition pour le moins confuse : ce sujet ne semblerait pas être d'un grand intérêt. Toutefois, des questions analogues surgissent en physique, et un physicien devrait être préparé pour faire la différence entre celles-ci et la précédente. Un vide existe-t-il ? L'espace vide existe-t-il ? Ou bien le monde est-il « plein » partout, comme le maintenait le biologiste plus conservateur Aristote ? Par le passé, des gens ont été sacrifiés pour avoir donné une réponse qui était insupportable pour les autorités.

Il n'est pas évident, mais il est néanmoins important, que les concepts physiques modernes de « vide » et d'« espace vide » ne représentent pas la même chose que le concept philosophique de « néant ». Le « vide » n'est pas défini comme étant la « non-existence » : au contraire, il est défini comme étant l'absence de matière et de rayonnement. Le vide

* La nature a horreur du vide.

est une entité dotée de propriétés observables spécifiques, tels que son nombre de dimensions, ses constantes électromagnétiques, sa courbure, sa masse évanescence, son interaction avec la matière par le truchement de la courbure et à travers son influence sur la désintégration, etc. (Un tableau des propriétés du vide physique est donné à la [page 108](#).) Historiquement, il fallut beaucoup de temps pour éclaircir la distinction qui existe entre un vide physique et un néant philosophique. Les gens confondirent ces deux concepts et débattirent de l'existence du vide durant plus de deux mille ans. Les premiers à affirmer qu'il existait, tentant audacieusement d'outrepasser la contradiction logique qui existe au niveau de la réalité physique sous-jacente, furent Leucippe et Démocrite, les penseurs les plus courageux de l'Antiquité. Leurs spéculations suscitèrent en retour la réaction virulente d'Aristote, qui rejeta le concept de vide. Aristote et ses disciples véhiculèrent la croyance selon laquelle *la nature a horreur du vide*.

Ce débat prit une nouvelle tournure au cours du dix-septième siècle, lorsque la première méthode expérimentale permettant de réaliser un vide fut inventée par Torricelli*. En utilisant du mercure dans un tube en verre, il produisit le premier vide de laboratoire. Pouvez-vous deviner comment ? Des arguments allant à l'encontre de l'existence du vide apparurent à nouveau autour de 1900, lorsqu'on argumenta que la lumière avait besoin de l'« éther » pour se propager, en utilisant pratiquement les mêmes prétextes que ceux utilisés deux cents ans auparavant, mais avec des termes différents. Cependant, les expériences ne parvinrent pas à déceler l'une des propriétés supposées de ce concept défini de manière vague. Les expériences liées au domaine de la relativité générale montrèrent qu'un vide peut bouger – quoique d'une manière radicalement différente de la façon selon laquelle l'éther était supposé bouger –, que le vide peut être courbé, mais qu'il tend alors à retrouver sa forme initiale. Ensuite, vers la fin du vingtième siècle, la théorie quantique des champs argumenta une nouvelle fois contre l'existence d'un véritable vide et en faveur d'un espace rempli de paires de particule-antiparticule virtuelles. Ce débat s'acheva dans les discussions tournant autour de la constante cosmologique.

La question « le vide existe-t-il ? » ne sera définitivement résolue que dans la dernière partie de cette promenade, d'une manière plutôt éblouissante.

* Evangelista Torricelli (n. Faenza 1608, d. -Florence 1647) fut un physicien italien, élève et héritier de Galilée. L'unité de pression (qui ne fait pas partie du SI) qui prit son nom est le « torr ».

Défi 259 s

Page ??

Page ??

LA NATURE EST-ELLE INFINIE ?

« Il est évident, et nos sens l'attestent, que dans ce monde certaines choses se meuvent. Or, tout ce qui se meut est mû par un autre... Donc, si la chose qui meut est mue elle-même, il faut qu'elle aussi soit mue par une autre, et celle-ci par une autre encore. Or, on ne peut ainsi continuer à l'infini, car dans ce cas il n'y aurait pas de moteur premier, et il s'ensuivrait qu'il n'y aurait pas non plus d'autres moteurs, car les moteurs seconds ne meuvent que selon qu'ils sont mus par le moteur premier, comme le bâton ne meut que s'il est mû par la main. Donc il est nécessaire de parvenir à un moteur premier qui ne soit lui-même mû par aucun autre, et un tel être, tout le monde comprend que c'est Dieu.

Thomas d'Aquin (v. 1225–1274) *Somme Théologique (Summa Theologica)*, I, q. 2.

La plupart des discussions modernes concernant la théorie des ensembles se concentrent sur les manières de définir le mot « ensemble » pour divers types de collections infinies. Pour la description du mouvement, cela conduit à nous poser deux questions : l'Univers est-il infini ? Est-ce un ensemble ? Commençons par la première. En éclairant cette question à partir de différents angles de vue, nous découvrirons rapidement que c'est à la fois simple et imprécis.

Avons-nous besoin de quantités infinies pour décrire la nature ? C'est assurément le cas en physique classique et quantique, par exemple pour l'espace-temps. Est-ce nécessaire ? Nous pouvons déjà avancer quelques idées.

Tout ensemble peut être fini selon un aspect et infini selon un autre. Par exemple, il est possible d'avancer le long d'une distance mathématique finie en une quantité de temps infinie. Il est également possible de voyager le long de n'importe quelle distance que ce soit en une quantité donnée de temps mathématique, faisant de la vitesse infinie une possibilité, même si la relativité est prise en compte, comme il a été expliqué plus tôt.

Page 41

Malgré l'utilisation des infinis, les scientifiques sont toujours limités. Nous avons vu plus haut que de nombreux types d'infinis existent. Cependant, aucun infini plus grand que le cardinal des nombres réels ne joue un rôle en physique. Aucun espace fonctionnel ou espace des phases en physique classique et aucun espace de Hilbert en théorie quantique ne possède de cardinal plus élevé. En dépit de l'aptitude des mathématiciens à définir des espèces beaucoup plus vastes d'infinis, la description de la nature n'en a pas besoin. Même les descriptions du mouvement les plus élaborées ne font appel qu'à l'infini des nombres réels.

Page 183

Réf. 183

Mais après tout est-il possible de dire *de la nature* ou de l'un de ses aspects qu'elle est véritablement *infinie* ? Une telle proposition peut-elle être compatible avec les observations ? Non. Il est évident que toute déclaration qui proclame que quelque chose dans la nature est infini constitue une croyance, et n'est pas confirmée par les observations. Nous éliminerons patiemment cette conviction par la suite.

Défi 260 s

La possibilité d'introduire des infinis artificiels rend toute discussion sur le fait de savoir si l'humanité est proche de « l'achèvement de la science », plutôt délicate. La quan-

Réf. 184

tité de connaissance et le temps nécessaires pour y parvenir sont sans rapport. En fonction de la vitesse à laquelle nous progressons à travers celle-ci, la fin de la science peut être proche ou inaccessible. En pratique, les scientifiques ont ainsi le pouvoir de *rendre* la science infinie ou non, par exemple en réduisant l'allure à laquelle les progrès sont réalisés. Puisque les scientifiques ont besoin de financements pour pouvoir travailler, nous pouvons deviner quel prétexte ils avancent généralement.

En bref, nous ne pouvons pas démontrer que l'Univers est infini. Mais peut-il être *fini*? À première vue, ce serait la seule possibilité qui nous reste. (Cela ne l'est pas, comme nous le verrons.) Mais bien que de nombreuses personnes aient tenté de décrire l'Univers comme étant fini dans tous ses aspects, personne n'a encore réussi dans cette entreprise. Afin de comprendre les écueils qu'ils ont rencontrés, nous allons continuer avec l'autre question soulevée ci-dessus.

L'UNIVERS EST-IL UN ENSEMBLE ?

Réf. 197 Une simple observation nous interroge sur le fait de savoir si l'Univers est un ensemble. Depuis 2 500 ans, on affirme que l'Univers est fait de vide et de particules. Cela implique que celui-ci est constitué d'un certain *nombre* de particules. La personnalité qui a porté cette conclusion jusqu'à son paroxysme est probablement l'astrophysicien anglais Arthur Eddington (1882–1944), qui a écrit :

Réf. 198 Je pense qu'il y a 15 747 724 136 275 002 577 605 653 961 181 555 468 044 717 914 527 116 709 366 231 425 076 185 631 031 296 protons dans l'Univers et le même nombre d'électrons.

Eddington fut maintes et maintes fois ridiculisé pour cette phrase et pour ses convictions qui aboutissaient à celle-ci. Ses arguments étaient en réalité fondés sur ses préférences personnelles pour certains nombres privilégiés. Cependant, nous ne devrions pas rire trop précipitamment. En fait, pendant 2 500 ans, presque tous les scientifiques ont eu la même ligne de pensée, la seule différence étant qu'ils n'avaient donné aucune valeur à ce nombre précis! En réalité, *tout autre nombre* placé dans la phrase antérieure aurait été aussi ridicule. Le fait d'éviter de spécifier ce nombre représente juste une manière de se dérober lâchement à la tâche consistant à faire face à cet aspect nébuleux de la description de la nature en termes de particules.

Y a-t-il un nombre précis de particules dans la nature? Si l'affirmation d'Eddington vous a fait sourire ou vous a fait hocher la tête, cela pourrait vouloir dire que vous croyez instinctivement que la nature n'est pas un ensemble. En est-il ainsi? Toutes les fois que nous définissons l'Univers comme l'intégralité des événements, ou comme la collection de tous les points de l'espace-temps et des objets, nous sous-entendons que les points de l'espace-temps peuvent être distingués, que les objets peuvent être distingués et que les deux peuvent être discernés l'un de l'autre. Nous supposons ainsi que la nature est séparable et constitue un ensemble. Mais est-ce correct? Cette question est fondamentale. L'aptitude à distinguer les points de l'espace-temps et les particules les uns des autres est souvent dénommé la *localité*. Donc l'Univers est séparable ou est un ensemble si et seulement si notre description de celui-ci est locale*. Et dans la vie quotidienne, la localité

* En mécanique quantique aussi, d'autres définitions moins claires de la localité sont utilisées. Nous les mentionnerons dans la partie quantique de ce texte. Le problème soulevé ici est différent, plus fondamental,

est observée sans aucune exception.

Dans la vie de tous les jours, nous observons aussi que la nature est séparable et, en même temps, un tout. C'est un « vaste nombre de constituants qui peut être imaginé comme un tout » : dans la vie courante la nature est un ensemble. En vérité, la caractéristique fondamentale de la nature, c'est sa diversité. Dans le monde qui nous entoure, nous remarquons des changements et des différences : nous observons que la nature est séparable. En outre, tous les aspects de la nature se rassemblent : il y a des relations entre ces aspects, souvent appelées « lois », qui déclarent que ces aspects distincts de la nature forment un tout, que l'on appelle généralement l'Univers.

Autrement dit, la possibilité de décrire les observations à l'aide de « lois » découle de notre expérience de la séparabilité de la nature. Plus la séparabilité est caractérisée de manière précise, plus les « lois » peuvent être formulées de manière détaillée. En fait, si la nature n'était pas séparable ou n'était pas unifiée, nous ne pourrions pas expliquer pourquoi les pierres chutent vers le bas. Donc nous sommes conduits à conjecturer que nous devrions être capables de déduire toutes les « lois » à partir du fait que la nature est séparable.

De plus, seule la séparabilité nous permet finalement de décrire la nature. Une description est une classification, c'est-à-dire une application entre certains aspects de la nature et certains concepts. Tous les concepts sont des ensembles et des relations. Puisque l'Univers est séparable, il peut être décrit à l'aide d'ensembles et de relations. Ils représentent tous les deux des entités séparables ayant des parties distinctives. Une description précise est communément appelée une compréhension. En résumé, l'Univers est compréhensible uniquement parce qu'il est séparable.

Qui plus est, seule la séparabilité de l'Univers fait de notre cerveau un instrument aussi efficace. Le cerveau est construit grâce à un grand nombre de composantes interconnectées, et seule sa séparabilité permet au cerveau de fonctionner. Autrement dit, la pensée est possible uniquement parce que la nature est séparable.

Finalement, seule la séparabilité de l'Univers nous permet d'établir une distinction entre des référentiels, et donc de définir toutes les symétries à la base des descriptions physiques. Et de la même manière que la séparabilité est, ainsi, nécessaire pour les descriptions *covariantes*, l'unité de la nature est nécessaire pour les descriptions *invariantes*. En d'autres termes, ce que nous appelons les « lois » de la nature sont basées sur l'expérience que la nature est à la fois séparable et unifiable – c'est-à-dire un ensemble.

Ces arguments semblent démontrer de façon merveilleuse que l'Univers est un ensemble. Toutefois, ils s'appliquent uniquement à l'expérience quotidienne, aux dimensions ordinaires et aux énergies courantes. La nature est-elle également un ensemble *en dehors* des domaines de la vie de tous les jours ? Les objets sont-ils différents aux autres énergies, même lorsqu'ils sont observés avec la précision la plus élevée possible ? Nous avons trois problèmes en suspens pour l'instant : le problème du nombre de particules présentes dans l'Univers, la définition circulaire de l'espace, du temps et de la matière, et le problème de savoir si le fait de décrire la nature comme étant constituée de particules et de vide constitue une surdescription, une sous-description, ou ni l'une ni l'autre. Ces trois énigmes font planer le doute sur le fait de savoir si les objets sont dénombrables à toutes les énergies. Nous découvrirons dans l'ultime partie de notre as-

et non relié à celui de la théorie quantique.

Page ?? tension montagnaise que ce n'est pas le cas dans la nature. Les conséquences seront considérables et captivantes. Par exemple, essayez de répondre à ceci : si l'Univers n'est pas un ensemble, qu'est-ce que cela signifie pour l'espace et le temps ?

Défi 261 s

L'UNIVERS EXISTE-T-IL ?

« Chaque esprit progressiste est contrarié par un millier d'hommes résignés à défendre le passé. »
Maurice Maeterlink

D'après la définition ci-dessus, l'existence d'un concept signifie qu'il est utile pour décrire les interactions. Il existe deux définitions communes du concept d'« Univers ». Selon la première, c'est la collection de toute la matière, l'énergie et l'espace-temps. Mais cet usage aboutit à une étrange conséquence : puisque rien ne peut interagir avec cette totalité, nous ne pouvons pas proclamer que l'Univers existe.

Défi 262 s Considérons donc le point de vue plus restrictif, à savoir que l'Univers représente seulement l'intégralité de la matière et de l'énergie. Mais dans ce cas aussi il est impossible d'interagir avec celui-ci. Pouvez-vous citer quelques arguments allant dans ce sens ?

Page ??

En résumé, nous parvenons à la conclusion que l'Univers n'existe pas. Nous confirmerons effectivement ce résultat avec plus de détails un peu plus tard dans notre excursion. En particulier, puisque l'Univers n'existe pas, il est même ridicule d'essayer de savoir *pourquoi* il existe. La meilleure réponse pourrait être : c'est à cause des idées vertes sans couleur, qui dorment furieusement.

Réf. 151

QU'EST-CE QUE LA CRÉATION ?

« (Gigni) De nihilo nihilum, in nihilum nil posse reverti* »
Perse, *Satires*, III, v. 83-84.

Réf. 199

« Anaxagore, découvrant l'ancienne théorie selon laquelle rien ne provient du néant, décida d'abolir le concept de création et introduisit à sa place celui de discrimination. Il n'hésita pas à déclarer, en réalité, que toutes les choses sont mélangées aux autres et que la discrimination engendre leur croissance. »
Fragment anonyme, Moyen Âge.

Réf. 200

Nous entendons souvent parler du terme de « création » dans les discussions concernant la nature. Il est employé dans divers contextes avec des significations différentes.

Nous parlons de création en tant que caractérisation des réalisations humaines, comme nous l'observons dans une peinture d'artiste ou une dactylographie de secrétaire. Manifestement, c'est un type de changement. Dans la classification du changement introduite au début de notre excursion, les changements mentionnés représentent des mouvements d'objets, tels que les électrons dans le cerveau, les molécules dans les muscles, les matériaux composant la peinture ou les électrons à l'intérieur de l'ordinateur. Ce type

* « Rien ne s'engendre de rien, rien ne peut retourner à rien. » (trad. Henri Clouard, 1934), « Rien ne sort du néant, et rien ne s'y replonge » (trad. Jules Lacroix, 1846).

de création est ainsi un cas particulier de mouvement.

Nous parlons également de création au sens biologique ou social, comme dans « la création de la vie », « la création d'une entreprise » ou « la création de la civilisation ». Ces événements sont des formes de croissance ou d'auto-organisation. À nouveau, ils représentent des cas particuliers de mouvement.

Page ?? Les physiciens nous disent souvent qu'une ampoule « crée » de la lumière ou qu'une pierre qui chute dans un étang « crée » des vagues sur l'eau. De manière similaire, ils parlent de « création de paires » de matière et d'antimatière. Le fait que tous ces processus constituent des types particuliers de mouvement, à savoir l'excitation de champs, a constitué une des découvertes importantes de la physique.

Page 226 Dans les ouvrages de vulgarisation de la cosmologie, la « création » est également un terme qui s'applique couramment, ou plutôt qui s'applique mal, au *Big Bang*. Néanmoins, l'expansion de l'Univers est un exemple pur de mouvement et, contrairement à une mauvaise compréhension courante, la description du *Big Bang* ne contient que des processus qui tombent dans l'une des trois catégories précédentes, comme indiqué dans le chapitre sur la relativité générale. Le *Big Bang* n'est pas un exemple de création. La cosmologie quantique apporte des arguments supplémentaires pour soutenir le fait que le terme naïf de « création » n'est pas applicable au *Big Bang*. *Primo*, il apparaît que celui-ci ne fut pas un événement. *Secundo*, il ne fut pas un commencement. *Tertio*, il ne constitue pas un *choix* tiré d'un large ensemble de possibilités. Le *Big Bang* ne possède aucune des propriétés attribuées au terme « création ».

Page 225 En résumé, nous concluons que, dans toutes les situations, *la création est un type de mouvement*. (La même chose s'applique aux notions de « disparition » et d'« annihilation ».) Aucun autre type de création n'est observé dans la nature. En particulier, le sens naïf de « création », à savoir « l'apparition à partir de rien » – *ex nihilo* en latin – n'est jamais observé dans la nature. Tous les types observés de « création » exigent la présence de l'espace, du temps, des forces, de l'énergie et de la matière pour qu'ils puissent se réaliser. La création requiert quelque chose qui existe déjà, afin de pouvoir se produire. De surcroît, une exploration minutieuse montre qu'aucun processus physique et aucun exemple de mouvement ne possèdent un commencement. Notre promenade nous démontrera que la nature nous interdit de localiser des commencements. Cette propriété seule est suffisante pour montrer que la « création » n'est pas un concept applicable à ce qui se passe dans la nature. Pire encore, la création se rapporte aux systèmes physiques uniquement. Nous découvrirons que la nature n'est pas un système et que les systèmes n'existent pas.

Page 229 Le contraire de la création, c'est la *conservation*. Les propositions centrales de la physique sont des théorèmes de conservation : pour l'énergie, la masse, la quantité de mouvement, le moment cinétique, la charge, etc. En réalité, chaque « loi » de conservation représente une répudiation précise et exacte du concept de création. L'ancienne idée grecque des atomes renfermait déjà ce rejet. Les atomistes affirmaient qu'il n'y a pas de création ni de disparition, mais uniquement un mouvement des atomes. Chaque transformation de la matière est un mouvement d'atomes. Autrement dit, l'idée de l'atome était une conséquence directe de la négation de la création. Il a fallu à l'humanité plus de 2 000 ans pour qu'elle cesse d'enfermer des gens en prison pour avoir évoqué l'idée des atomes, comme cela s'est produit pour Galilée.

Cependant, il existe une exception dans laquelle le concept naïf de création s'applique

vraiment : c'est ce que font les magiciens sur scène. Lorsqu'un prestidigitateur fait apparaître un lapin, sorti de nulle part, nous ressentons réellement qu'il y a de la « création » à partir de rien. Sous sa meilleure facette, une telle magie représente une forme d'amusement, mais sous son pire côté, c'est un mauvais usage de la crédulité. L'idée que l'Univers découle de l'un de ces deux aspects ne semble pas séduisante. Tout compte fait, cependant, peut-être qu'en considérant l'Univers comme un ultime divertissement nous pourrions nous ouvrir à une approche de la vie plus fraîche et plus créative.

Voltaire (1694–1778) diffusa un argument, allant à l'encontre de la création, souvent utilisé par le passé : nous ne savons pas si la création a eu lieu ou non. Aujourd'hui la situation est différente : nous *savons* qu'elle n'a *pas* eu lieu, parce que la création est un type de mouvement et, comme nous le verrons dans la partie concluant notre ascension montagnaise, le mouvement n'existait pas aux premiers instants du Big Bang.

Avez-vous déjà entendu l'expression « la création des lois de la nature » ? C'est un des exemples les plus fréquents de méconnaissance. En tout premier lieu, cette expression confond les « lois » avec la nature elle-même. Une description ne s'identifie pas à la chose elle-même : tout le monde sait que donner à la personne que l'on aime une description d'une rose, c'est différent que de donner une véritable rose. Deuxièmement, cette expression implique que la nature est telle qu'elle est parce qu'elle est d'une certaine manière « obligée » de suivre ces « lois » – un point de vue plutôt puéril et, qui plus est, incorrect. Et troisièmement, cette expression suppose qu'il est possible de « créer » des descriptions de la nature. Mais une « loi » est une description, et par définition une description ne peut pas être créée : donc l'expression est complètement vide de sens. La formule « la création des lois de la nature » représente l'archétype de la pensée confuse.

Il se pourrait bien que qualifier un grand artiste de « créatif » ou de « divin », comme on avait coutume de la faire à la Renaissance, ne soit pas un blasphème, mais simplement un encouragement pour les divinités de tenter d'en faire autant. En réalité, à chaque fois que nous utilisons le terme « création » pour décrire n'importe quoi d'autre qu'une certaine forme de mouvement, nous sommes en train d'abandonner à la fois les observations et la raison humaine. C'est l'un des derniers pseudo-concepts de notre époque moderne : aucun expert du mouvement ne devrait l'oublier. Il est impossible d'escalader la Montagne Mouvement sans se débarrasser de la « création ». Ce n'est pas facile. Nous rencontrerons la prochaine tentative pour faire renaître la création dans l'étude de la théorie quantique.

Page ??

« Chaque acte de création est avant tout un acte de destruction. »
Pablo Picasso

LA NATURE EST-ELLE INVENTÉE ?

« Au commencement l'Univers fut créé. Ce qui mit en colère beaucoup de gens et fut largement considéré comme étant une mauvaise idée. »
Douglas Adams

La tendance à induire la création d'un objet à partir de sa simple existence est répandue. Certaines personnes sautent sur cette conclusion à chaque fois qu'elles admirent un magnifique paysage. Cette habitude provient du triple préjugé qu'une scène magnifique implique une description complexe, ce qui implique en retour des instructions complexes

de conception, et ce qui souligne par conséquent un *dessein* fondamental caché.

Réf. 201

Cette succession de réflexions contient plusieurs erreurs. Premièrement, en général, la beauté n'est pas une conséquence de la complexité. Habituellement c'est le contraire : en fait, l'étude du chaos et de l'auto-organisation a démontré comment des formes et des motifs magnifiquement complexes peuvent être engendrés à partir de descriptions extrêmement simples. En vérité, pour la plupart des objets façonnés par l'homme, les descriptions complexes impliquent en fait des processus de conception compliqués, un ordinateur représente un bon exemple d'objet complexe ayant un processus de production compliqué. Mais dans la nature, cette correspondance ne s'applique pas. Nous avons vu plus haut que même la quantité d'information nécessaire pour construire un corps humain est environ un million de fois plus petite que l'information stockée uniquement dans le cerveau. Des résultats analogues ont été découverts pour la structure des plantes et pour de nombreux autres exemples de modèles naturels. Les descriptions élémentaires qui se cachent derrière les apparentes complexités de la nature ont été, et sont toujours, dévoilées par l'étude de l'auto-organisation, du chaos, de la turbulence et des formes fractales. Dans la nature, les structures complexes dérivent de processus *simples*. Méfiez-vous de toute personne qui prétend que la nature possède une « complexité infinie » : en tout premier lieu, la complexité n'est pas une entité mesurable, en dépit des nombreuses tentatives pour la quantifier. De plus, tout système complexe connu peut être décrit par un nombre (proportionnellement) petit de paramètres et d'équations élémentaires. Finalement, rien dans la nature n'est infini.

La deuxième erreur qui se trouve dans l'argumentation soutenant un dessein de la nature consiste à relier une description à une « instruction », et peut-être même à imaginer qu'une certaine « intelligence » inconnue est en train, d'une certaine manière, de tirer les ficelles de la scène du monde. L'étude de la nature a logiquement démontré qu'il n'y a aucune intelligence dissimulée et aucune instruction derrière les processus de la nature. Une instruction est une liste d'ordres donnée à un exécuteur. Mais il n'y a pas de directives dans la nature, et aucun exécuteur. Il n'existe pas de « lois » de la nature, mais seulement des descriptions de processus. Personne ne construit un arbre, cet arbre est une conséquence du mouvement des molécules qui le constituent. Les gènes présents dans l'arbre contiennent véritablement de l'information, mais aucune molécule ne se voit donner des instructions. Ce qui nous semble être des instructions sont juste des mouvements naturels de la part des molécules et de l'énergie, décrits par les mêmes modèles qui ont lieu dans les systèmes inertes. L'idée d'instruction tout entière – comme celle de « loi » de la nature – est une idéologie, née d'une analogie entre la monarchie, ou même la tyrannie, et un anthropomorphisme caractérisé.

La troisième erreur dans l'argumentation de cette intention est la suggestion qu'une description complexe d'un système implique un dessein sous-jacent. Ce n'est pas exact. Une description complexe implique uniquement que ce système possède une longue évolution derrière lui. La déduction exacte est : quelque chose de complexité importante existe, par conséquent il a *crû*, c'est-à-dire qu'il a été transformé par le biais de l'introduction (modérée) d'énergie au cours du temps. Cette déduction s'applique aux fleurs, aux montagnes, aux astres, à la vie, aux êtres, aux montres, aux livres, aux ordinateurs, et aux œuvres d'art. En réalité, elle s'applique à tous les objets présents dans l'Univers. La complexité de notre environnement laisse ainsi présager l'âge considérable de celui-ci et nous rappelle la brièveté de notre vie.

Le manque de complexité fondamentale et l'absence d'instructions dans la nature entérinent un résultat élémentaire : il n'existe pas une seule observation dans la nature qui entraîne ou exige un dessein ou une création. D'un autre côté, la diversité et l'intensité des phénomènes de la nature nous emplissent d'un profond respect. La beauté sauvage de la nature nous montre quelle *minuscule* partie de celle-ci nous sommes réellement, à la fois dans l'espace et dans le temps*. Nous explorerons cette expérience en détail. Nous découvrirons que rester ouvert aux phénomènes naturels dans toute leur irrésistible splendeur demeure crucial pour le reste de notre aventure.

« Il y a une séparation entre l'État et l'Église, mais pas encore entre l'État et la science. »
Paul Feyerabend

QU'EST-CE QU'UNE DESCRIPTION ?

« En théorie, il n'y a pas de différence entre la théorie et la pratique. En pratique, si. »

En suivant un usage courant du vocabulaire, une description d'une observation est une liste des détails la concernant. L'exemple de l'orque cité plus haut le montre clairement. En d'autres termes, une *description* d'une observation est l'acte consistant à la classifier, c'est-à-dire à comparer, par identification ou par différenciation, cette observation avec toutes celles déjà réalisées. Une description est une classification. En bref, *décrire signifie considérer comme un élément d'un ensemble plus vaste*.

Une description peut être comparée à l'indication « vous êtes ici » située sur la carte touristique d'une ville. Parmi un ensemble de positions possibles, l'indication « vous êtes ici » donne la position véritable. De manière similaire, une description met en relief la situation donnée par rapport à toutes les autres éventualités. Par exemple, la formule $a = GM/r^2$ est une description des observations qui associent le mouvement à la gravité, parce qu'elle classe les accélérations observées a en fonction de la distance au corps central r et de sa masse M . En réalité, une telle description considère chaque cas spécifique comme un exemple d'un modèle général. L'habitude de généraliser est une raison qui explique le stoïcisme dérangeant, si fréquent, des scientifiques : lorsqu'ils observent quelque chose, leur formation professionnelle les fait généralement classifier cela comme un cas particulier d'un phénomène connu et donc les empêche d'être surpris ou d'être excités à son propos.

Une description est donc le contraire d'une *métaphore* : cette dernière est une analogie qui relie une observation à un autre cas *particulier* ; une description associe une observation à un cas *général*, comme une théorie physique.

* La quête d'un « sens » dans la vie ou dans la nature est une manière compliquée (et nécessaire) d'essayer de faire face à l'insignifiance de l'existence humaine.

« Felix qui potuit rerum cognoscere causas,
atque metus omnis et inexorabile fatum
subjecit pedibus strepitumque acherontis avari. »
Virgile*

MOTIF, OBJECTIF ET INTERPRÉTATION

« Der ganzen modernen Weltanschauung liegt die
Täuschung zugrunde, daß die sogenannten
Naturgesetze die Erklärungen der
Naturerscheinungen seien**.
Ludwig Wittgenstein, *Tractatus*, 6.371 »

- Pourquoi les feuilles de la plupart des arbres sont-elles vertes ? Parce qu'elles absorbent la lumière rouge et bleue. Pourquoi absorbent-elles ces couleurs ? Parce qu'elles contiennent de la chlorophylle. Pourquoi la chlorophylle est-elle verte ? Parce que tous les types de chlorophylle contiennent du magnésium placé entre quatre groupes pyrroles, et cette combinaison chimique donne la couleur verte, en raison de ses niveaux quantiques d'énergie. Pourquoi les plantes contiennent-elles de la chlorophylle ? Parce que c'est ce que les plantes terrestres peuvent synthétiser. Pourquoi seulement cela ? Parce que toutes les plantes terrestres ont à l'origine évolué à partir des algues vertes, qui sont capables de synthétiser uniquement ce composé, et non les composés que l'on trouve dans les algues bleues ou rouges, que l'on rencontre également dans les océans.
- Pourquoi les enfants grimpent-ils aux arbres, et pourquoi certaines personnes escaladent-elles les montagnes ? À cause de la sensation qu'ils éprouvent au cours de cette activité : les sensations de réussite, l'acte symbolique d'aller vers le haut, le désir de parvenir à une vision plus étendue du monde sont des parties intégrantes de ce type d'aventure.

Les questions « pourquoi » dans ces deux derniers paragraphes montrent la différence générale qui existe entre les motifs et les objectifs (bien que ces deux termes ne soient pas précisément définis de la même manière par tout le monde). Un *objectif* ou une *intention* est une classification appliquée aux actions réalisées par des êtres humains ou des animaux ; à strictement parler, il désigne la recherche d'une sensation, à savoir l'accomplissement d'un certain type de satisfaction après l'achèvement de l'action. De l'autre côté, un *motif* est une relation particulière d'un fait avec le reste de l'Univers, généralement son passé. Ce que nous appelons un motif est toujours à l'extérieur de l'observation elle-même, tandis qu'un objectif est toujours interne à celle-ci.

Les motifs et les objectifs représentent les deux possibilités d'explication, c'est-à-dire les deux réponses possibles aux questions commençant par « pourquoi ». En général, la physique ne s'intéresse pas aux objectifs ou aux sentiments des gens, principalement

* « Heureux qui a pu connaître les causes des choses et qui a foulé aux pieds toutes les craintes, et l'inexorable destin, et le bruit de l'avare Achéron ! » (*Géorgiques*, Livre II, vers 490 ss.) Publius Vergilius Maro (70-19 av. J.-C.) dit Virgile, le grand poète romain, est l'auteur de l'Énéide. Achéron était la rivière traversée par ceux qui venaient de mourir et qui étaient en train de faire route vers les Enfers.

** Toute la conception moderne du monde est fondée sur l'illusion que les « lois de la nature » sont des explications de phénomènes naturels.

parce que son but original, parler du mouvement avec précision, ne semble pas être réalisable dans ce domaine. Par conséquent, les explications *physiques* des faits ne sont jamais des objectifs, mais toujours des motifs. Une *explication physique* d'une observation est toujours la description de sa relation avec le reste de la nature*.

Réf. 202

Cela signifie – contrairement à une opinion répandue – qu'une question commençant par « pourquoi » est ouverte à l'investigation physique à partir du moment où elle demande un motif et non un objectif. En particulier, on peut répondre à des questions telles que « pourquoi les pierres tombent-elles vers le bas et non vers le haut ? » ou « pourquoi les électrons ont-ils telle valeur de masse, et pourquoi, après tout, ont-ils une masse ? » ou « pourquoi l'espace possède-t-il trois dimensions et non trente-six ? » puisqu'elles s'interrogent sur les connexions qui existent entre des observations particulières et celles plus générales. Bien sûr, toutes les requêtes pour avoir des explications n'ont pas encore été satisfaites, et il reste bien des problèmes à résoudre. Notre présent cheminement nous conduit, à partir de quelques réponses uniquement, à certaines des questions plus fondamentales à propos du mouvement.

La quête la plus générale d'explication dérive de la question : pourquoi l'Univers est-il tel qu'il est ? Ce sujet est abordé dans notre ascension montagnaise en utilisant les deux approches usuelles, à savoir :

UNIFICATION ET DÉMARCATIION

« Tout sujet est un ; et, aussi vaste qu'il soit, il peut être renfermé dans un seul discours. »
Buffon, *Discours sur le style*.

En étudiant les propriétés du mouvement, et en veillant constamment à accroître la précision de la description, nous découvrons que les explications sont généralement de deux types** :

- « C'est comme toutes les situations de ce type, celle-ci aussi est décrite par ... » Cette situation est reconnue comme étant un *cas particulier* d'un comportement général.
- « Si cette situation était différente, nous aurions une conclusion en contradiction avec les observations. » Cette situation est reconnue comme étant *la seule issue possible****.

Autrement dit, la première approche consiste à formuler les règles ou « lois » qui décrivent des quantités de plus en plus importantes d'observations, et de comparer cette observation donnée avec elles. Cette volonté est appelée l'*unification* de la physique –

* Il est primordial de remarquer que les objectifs *ne* sont *pas* mis de côté parce qu'ils sont du domaine de l'avenir, mais parce qu'ils représentent des anthropomorphismes inacceptables. En réalité, pour des systèmes déterministes, nous pouvons également dire que le futur est véritablement un *motif* pour le présent et le passé, une réalité que l'on oublie souvent.

Défi 263 s

** Est-ce que ce sont les seuls possibles ?

*** Ces deux cas ne doivent pas être confondus avec des phrases similaires qui *semblent* être des explications, mais qui n'en sont pas :

- « C'est comme la situation de ... » Une ressemblance avec un autre cas *unique* n'est *pas* une explication.
- « Si c'était différent, cela contredirait l'idée selon laquelle ... » Une contradiction avec une *idée* ou avec une théorie n'est *pas* une explication.

par ceux qui l'affectionnent. Ceux qui ne l'aiment pas l'appellent le « réductionnisme ». Par exemple, la même règle décrit la trajectoire d'une balle de tennis, le mouvement des marées sur les rivages marins, la synchronisation des ères glaciaires, et le moment où la planète Vénus cesse d'être l'étoile du soir pour commencer à être celle du matin. Ces processus sont tous des conséquences de la gravitation universelle. De manière similaire, il n'est pas évident que la même règle décrive l'origine de la couleur des yeux, la formation de l'éclair, la digestion des aliments ou le fonctionnement du cerveau. Ces processus sont décrits par l'électrodynamique quantique.

L'unification réalise ses triomphes les plus impressionnants lorsqu'elle prédit une observation qui n'a pas été faite auparavant. Un exemple célèbre est l'existence de l'antimatière, prédite par Dirac quand il examinait les solutions d'une équation qui décrit le comportement précis de la matière courante.

La deuxième procédure dans la recherche des explications est l'élimination de toutes les autres possibilités imaginables en faveur de celle qui est vraiment correcte. Cette tentative ne possède pas de désignation unanimement acceptée : on pourrait l'appeler la *démarcation* des « lois » de la physique – pour ceux qui l'affectionnent. Les autres l'appellent l'« anthropocentrisme », ou plus simplement l'« arrogance ».

Lorsque nous découvrons que la lumière voyage d'une manière telle qu'elle met la plus courte durée possible pour parvenir à sa destination, quand nous décrivons le mouvement par un principe de moindre action, ou quand nous découvrons que les arbres sont ramifiés de telle sorte qu'ils parviennent à couvrir l'espace le plus vaste avec l'effort minimal, nous sommes en train d'utiliser une vision relative à la démarcation.

En résumé, l'unification, qui répond à des questions du type « pourquoi c'est ainsi », et la démarcation, qui répond à des questions du type « pourquoi ce n'est pas ainsi », sont caractéristiques du développement qui a eu lieu tout au long de l'épopée de la physique. Nous pouvons dire que les aspects duaux de l'unification et de la démarcation forment les qualités d'harmonisation et d'opposition de la physique. Ils représentent le désir de *tout savoir*.

Défi 264 s Cependant, ni la démarcation ni l'unification ne peuvent expliquer l'Univers. Pouvez-vous voir pourquoi ? En fait, mis à part l'unification et la démarcation, il existe une troisième voie qui les fusionne et nous permet d'en dire plus concernant l'Univers. Pouvez-vous la trouver ? Notre promenade nous y conduira mécaniquement bientôt.

Défi 265 s

LES COCHONS, LES SINGES ET LE PRINCIPE ANTHROPIQUE

« Das wichtigste Instrument des Wissenschaftlers ist der Papierkorb*.

Le rêve d'accomplir la démarcation des modèles de la nature est plus intéressant lorsque nous suivons les conséquences de règles distinctes de la nature jusqu'à ce que nous les mettions en contradiction avec l'observation la plus remarquable : notre propre existence humaine. Dans ce cas particulier, ce programme de démarcation est souvent appelé le *principe anthropique* – d'après le mot grec *ἄνθρωπος* qui signifie « homme ».

Par exemple, si la distance Terre-Soleil était différente de ce qu'elle est, la variation de température qui en résulterait sur la Terre aurait rendu impossible l'émergence de la vie,

* L'instrument le plus important d'un scientifique est la corbeille à papier.

laquelle a besoin d'eau liquide. De manière analogue, notre cerveau ne fonctionnerait pas si la Lune ne gravitait pas autour de la Terre. Il est également notoire que s'il y avait moins de grosses planètes dans le Système solaire, l'évolution des êtres humains aurait été impossible. Les grosses planètes dévient un grand nombre de comètes, les empêchant ainsi de frapper la Terre. La collision spectaculaire de la comète Shoemaker–Levy 9 avec Jupiter, l'événement astronomique de juillet 1994, fut un exemple de ce détournement d'une comète*.

De même, le principe anthropique parvient à ses succès les plus impressionnants lorsqu'il prédit des observations inédites. L'exemple le plus célèbre provient de l'étude des étoiles. Les atomes de carbone, comme tous les autres atomes excepté la majorité des atomes d'hydrogène, d'hélium et de lithium, se sont formés dans les étoiles par le biais de la fusion. En étudiant les mécanismes de la fusion en 1953, le célèbre astrophysicien britannique Fred Hoyle** découvrit que les noyaux de carbone ne pouvaient pas avoir été formés à partir des particules alpha présentes à l'intérieur des étoiles à des températures raisonnables, à moins qu'ils n'aient possédé un état excité ayant une section efficace plus importante. À partir de la réalité de notre existence, laquelle est fondée sur le carbone, Hoyle avait ainsi prévu l'existence d'un état excité précédemment inconnu pour le noyau de carbone. Et, en vérité, cet état excité fut découvert quelques mois plus tard par Willy Fowler***.

Réf. 203

Sous sa forme *sérieuse*, le principe anthropique représente par conséquent la quête de déduction de la description de la nature à partir de la réalité expérimentale de notre existence. Dans la littérature populaire, cependant, le principe anthropique est souvent transformé de sa forme expérimentale simple, qui permet de déduire les modèles de la nature, à sa forme *pervertie*, un pot-pourri d'idées métaphysiques absurdes dans lesquelles tout un chacun y fait un amalgame de ses croyances préférées. Plus récemment, l'observation expérimentale de notre propre existence a été pervertie pour réintroduire l'idée de « dessein », c'est-à-dire que l'Univers a été construit dans le but de produire des êtres humains. Il est même souvent suggéré que le principe anthropique constitue une *explication* – un exemple grossier d'intoxication de l'information.

Réf. 204

Comment pouvons-nous faire la distinction entre la forme sérieuse et la forme pervertie ? Nous commençons avec une observation. Nous aurions exactement les mêmes règles et modèles de la nature si nous utilisions l'existence des cochons ou des singes comme point de départ. Autrement dit, si nous parvenons à des conclusions *différentes* en utilisant le *principe porcin* ou le *principe simien*, nous sommes en train d'utiliser la forme pervertie du principe anthropique, sinon nous sommes en train d'employer sa

* Pour une collection d'images de cet événement, consultez par exemple le site Web garbo.uwasa.fi/pc/gifslevy.html.

** Fred Hoyle (n. Bingley 1915, d. -Yorkshire 2001), un important astronome et astrophysicien britannique, fut le premier et probablement le seul physicien qui ait fait une prédiction spécifique – à savoir l'existence d'un état excité du noyau de carbone – à partir du simple fait que les êtres humains existent. Anticonformiste inébranlable, il inventa l'expression « Big Bang » alors même qu'il n'acceptait pas l'évidence de celui-ci, et proposa un autre modèle, la théorie de l'« Univers stationnaire ». Son œuvre la plus importante et la plus reconnue concerne la formation des atomes à l'intérieur des étoiles. Il diffusa également la croyance que la vie fut apportée sur Terre par des microbes extraterrestres.

*** William A. Fowler (1911–1995) partagea le prix Nobel de physique en 1983 avec Subramanyan Chandrasekhar pour cette découverte et d'autres apparentées.

forme sérieuse. (L'histoire du carbone 12 constitue donc un exemple de cette forme sérieuse.) Ce test est efficace parce qu'il n'existe pas de modèle, ou de « loi », connu dans la nature qui soit particulier aux êtres humains mais superflu pour les singes ou les cochons*.

« Er wunderte sich, daß den Katzen genau an den Stellen Löcher in den Pelz geschnitten wären, wo sie Augen hätten.
Georg Christoph Lichtenberg** »

AVONS-NOUS BESOIN DE CAUSES ET D'EFFETS DANS LES EXPLICATIONS ?

« Dans la nature il n'y a ni récompenses ni punitions – il y a des conséquences.
Ivan Illich »

« Le monde ne vous doit rien. Il était là le premier.
Mark Twain »

« Aussi cruel, vilain et méchant que vous puissiez être, ce n'est pas grave : à chaque fois que vous prenez votre respiration vous rendez une fleur heureuse.
Mort Sahl »

Réf. 205

Historiquement, les deux termes « cause » et « effet » ont joué un rôle important dans les discussions philosophiques. En particulier, au cours de l'avènement de la mécanique moderne, il était primordial de faire remarquer que chaque effet possède une cause, afin de distinguer la réflexion précise et exacte de la pensée fondée sur des croyances, tels les « miracles », les « divines surprises » ou l'« évolution à partir de rien ». Il était également essentiel de souligner que les effets sont différents des causes : cette distinction élimine les pseudo-explications comme le fameux exemple de Molière où le médecin explique à son patient en termes raffinés que les somnifères marchent parce qu'ils contiennent un principe dormitif.

Mais en physique, les concepts de cause et d'effet ne sont plus utiles. Nous exprimons le fait que les miracles n'apparaissent pas chaque fois que nous utilisons des symétries et des théorèmes de conservation. L'observation que la cause et l'effet se différencient l'un de l'autre est intrinsèque à toute équation d'évolution. De surcroît, les concepts de cause et d'effet ne sont pas clairement définis : par exemple, il est particulièrement ardu de définir ce que l'on entend par une cause, par opposition à plusieurs d'entre elles, et de même pour un ou plusieurs effets. Ces deux termes sont impossibles à quantifier et à mesurer. Autrement dit, bien que la « cause » et l'« effet » puissent être utiles dans la

* Bien que les singes ne semblent pas être de bons physiciens, comme le décrit le texte de D. J. POVINELLI, *Folk Physics for Apes : the Chimpanzee's Theory of How the World Works*, Oxford University Press, 2000.

** « Il s'émerveillait de voir que les chats ont la peau trouée de deux orifices, précisément à la place des yeux. » Georg Christoph Lichtenberg (1742-1799) fut un physicien et intellectuel allemand, professeur à Göttingen, encore connu aujourd'hui pour ses satires et ses aphorismes caustiques extrêmement nombreux. Avec d'autres personnalités de son époque, Lichtenberg tourna en dérision tous ceux qui soutenaient que l'Univers était exactement conçu sur mesure pour l'homme, une idée que l'on retrouve fréquemment dans la sphère nébuleuse du principe anthropique.

vie privée pour faire la distinction entre des événements qui se succèdent régulièrement les uns aux autres, ils ne sont pas indispensables en physique. Dans les explications physiques, ils ne jouent aucun rôle particulier.

« Ἄγαθον καὶ ξαζόν · ἔν καὶ ταὐτό*.

Héraclite

« Wenn ein Arzt hinter dem Sarg seines Patienten geht, so folgt manchmal tatsächlich die Ursache der Wirkung**.

Robert Koch

LA CONSCIENCE EST-ELLE NÉCESSAIRE ?

« Variatio delectat***.

Cicéron

Réf. 206 Un grand nombre de discussions stériles s'étalent sur ce sujet, et nous sauterons, ici par-dessus celles-ci. Qu'est-ce que la conscience ? Le plus simplement et concrètement du monde, la conscience signifie la possession d'une petite partie de soi-même qui surveille ce que le reste de soi-même perçoit, ressent, pense et fait. En bref, la conscience est l'aptitude à s'observer soi-même, et en particulier les mécanismes et motivations intimes du soi. La *conscience* représente la capacité à mener une introspection. Pour cette raison, celle-ci *ne* constitue *pas* une condition préalable à l'étude du mouvement. En réalité, les animaux, les plantes ou les machines sont aussi capables d'observer le mouvement. Pour le même motif, la conscience n'est pas nécessaire pour observer le mouvement en mécanique quantique. D'un autre côté, l'étude du mouvement et celle de soi-même possèdent toutes les deux beaucoup de choses en commun : le besoin d'observer attentivement, de surmonter les présomptions, de dominer la crainte et le plaisir de le faire.

Jusqu'ici, nous avons assez insisté sur la précision des concepts. Discuter du mouvement représente également quelque chose qui doit être profondément apprécié. Voyons pourquoi.

« La précision et la clarté vérifient la relation d'indétermination : leur produit est constant.

CURIOSITÉ

« La précision est fille de la curiosité.

Comme dans la vie de chaque individu, l'histoire de l'humanité retrace une lutte permanente pour éviter les pièges de l'acceptation des déclarations énoncées comme vraies par des autorités, sans vérifier les faits. En réalité, chaque fois que la curiosité nous conduit à formuler une question, il y a toujours deux manières générales de procéder.

* « Bien et mal sont tout un. »

** « Quand un médecin marche derrière le cercueil de son patient, en réalité la cause suit parfois l'effet. »

*** « La variété séduit. » Marcus Tullius Cicero (106–43 av. J.-C.) fut un important juriste, orateur et homme politique de la fin de l'Empire romain.

L'une consiste à contrôler personnellement les faits, l'autre consiste à interroger quelqu'un. Néanmoins, la dernière technique est dangereuse : elle implique d'abandonner une partie de soi-même. Les gens en bonne santé, les enfants dont la curiosité est toujours vivante, ainsi que les scientifiques, choisissent la première méthode. Après tout, la science est de la curiosité adulte.

La curiosité, également appelée *moteur exploratoire*, joue à des jeux étranges avec les gens. En commençant avec l'expérience originale du monde comme étant une grande « soupe » de parties en interaction, la curiosité peut nous inciter à découvrir *toutes* les parties et *toutes* les interactions. Elle n'entraîne pas seulement les individus. Nous avons observé que, lorsque des rats exhibent un comportement de curiosité, certaines cellules cervicales situées dans l'hypothalamus s'activent et secrètent des hormones qui produisent des émotions et des sensations de bien-être. Si un rat a la possibilité, à travers certaines électrodes implantées, d'exciter ces mêmes cellules en appuyant sur un interrupteur, il le fait volontairement : les rats deviennent *dépendants* des sensations reliées à la curiosité. Comme les rats, les êtres humains sont curieux parce qu'ils aiment cela. Ils exercent leur curiosité pour au moins quatre raisons : parce qu'ils sont artistes, parce qu'ils sont amateurs de plaisir, parce qu'ils sont aventuriers, et parce qu'ils sont rêveurs. Voyons comment.

Réf. 207

À l'origine, la curiosité provient de la volonté d'interagir d'une manière positive avec l'environnement. Les jeunes enfants en fournissent d'excellents exemples : la curiosité est un ingrédient naturel de leur vie, de la même manière qu'elle l'est pour d'autres mammifères et quelques espèces d'oiseaux. Par ailleurs, on trouve la même distribution taxonomique pour le comportement joueur. En bref, tous les animaux qui jouent sont curieux, et vice versa. La curiosité fournit les bases de l'apprentissage, de la créativité et donc de toutes les activités humaines qui laissent un héritage, telles que l'art ou la science. L'artiste et théoricien de l'art Joseph Beuys (1920–1986) avait son propre principe conducteur, qui stipule que *chaque* acte de création est une forme d'art. Les êtres humains, et particulièrement les enfants, jouissent de la curiosité parce qu'ils ressentent son importance pour la créativité, et pour le développement en général.

Réf. 208

La curiosité nous conduit régulièrement à nous exclamer : « Oh ! », une expérience qui conduit à la seconde raison d'être curieux : la délectation des sensations d'émerveillement et d'étonnement. Épicure (Epikuros) (341–271 av. J.-C.) soutenait que cette expérience, *θαυμάζειν*, représente l'origine de la philosophie. Ces sensations, qui sont de nos jours diversement qualifiées de religieuse, spirituelle, numineuse, etc., sont les mêmes que celles qui font que les rats peuvent devenir dépendants. Parmi ces sensations, Rudolf Otto a introduit la distinction dorénavant classique entre le fascinant et l'effrayant. Il nomma les expériences correspondantes « *mysterium fascinans* » et « *mysterium tremendum* »*. Dans le cadre de ces distinctions, les physiciens, les scientifiques, les enfants et les initiés prennent une position nette : ils choisissent le *fascinans* comme point de départ de leur motivation et pour leur approche du monde. De telles émotions de fascination amènent certains enfants qui contemplant le ciel nocturne à rêver de devenir astronomes, certains qui observent à travers un microscope de devenir biologistes

* Cette distinction est le fondement de RUDOLF OTTO, *Das Heilige – Über das Irrationale in der Idee des Göttlichen und sein Verhältnis zum Rationalen*, Beck, München, 1991. C'est une nouvelle édition de l'œuvre qui marqua son époque, à l'origine publiée au début du vingtième siècle. Rudolf Otto (1869–1937) fut l'un des plus importants théologiens de son temps.

ou physiciens, et ainsi de suite. (Il se pourrait aussi que la génétique ait son mot à dire dans cette aspiration à la recherche de nouveauté.)

Réf. 209

Les moments les plus exaltants dans l'étude de la physique sont probablement ceux qui surviennent après que des nouvelles observations ont ébranlé les conceptions habituelles que nous avions auparavant, après qu'elles nous ont imposé d'abandonner une conviction préalablement tenace et qu'elles ont suscité le sentiment d'avoir échoué. C'est alors que, dans ce moment critique, nous découvrons finalement une description plus appropriée et plus précise de ces observations, qui apporte un meilleur éclairage du monde, nous sommes envahis d'une sensation généralement appelée illumination. Toute personne qui a gardé la mémoire et le goût intacts de ces instants magiques sait que dans ces situations nous sommes pénétrés par un sentiment de symbiose entre soi-même et le monde*. La jouissance de ces moments, les aventures de la modification structurelle de la pensée qui leur sont associées, et l'exaltation des perspectives qui en découlent constituent la motivation de nombreux scientifiques. Leur dénominateur commun est : peu de discours et beaucoup de plaisir. Dans cet esprit, le célèbre physicien autrichien Victor Weisskopf (1908–2002) aimait dire en plaisantant : « Il y a deux choses qui font que la vie vaut la peine d'être vécue : Mozart et la mécanique quantique. »

Le choix de quitter le *tremendum* pour aller vers le *fascinans* est issu d'un désir inné, plus évident chez les enfants, de diminuer l'incertitude et la peur. Ce moteur est le père de toutes les aventures. Il possède un célèbre parallèle dans la Grèce antique, où les premiers hommes qui étudièrent les observations, tels qu'Épicure, déclarèrent explicitement que leur objectif était de libérer les gens des craintes inutiles en approfondissant la connaissance et en métamorphosant les victimes passives apeurées en êtres fascinés, actifs et responsables. Ces anciens penseurs commencèrent à populariser l'idée que, comme tous les événements courants dans notre vie, les événements plus rares découlent également de règles. Par exemple, Épicure souligna que l'éclair est un phénomène naturel provoqué par des interactions entre les nuages, et insista sur le fait qu'il était un processus naturel, c'est-à-dire un processus qui obéit à des règles, de la même manière que la chute d'une pierre ou tout autre processus familier de la vie quotidienne.

En enquêtant sur les phénomènes qui les entourent, les philosophes et plus tard les scientifiques réussirent à libérer les gens de la plupart des peurs provoquées par l'incertitude et par un manque de connaissance concernant la nature. Cette émancipation joua un rôle important dans l'histoire de la culture humaine, et s'immisce encore dans l'histoire personnelle de nombreux scientifiques. Le but de parvenir à des vérités stables et ultimes a inspiré (mais également entravé) un grand nombre d'entre eux. Albert Einstein est d'une exemplarité reconnue pour cela, pour avoir découvert la relativité, pour avoir lancé et ensuite dénigré la mécanique quantique.

De manière intéressante, dans l'expérience et dans le développement de chaque être humain, la curiosité, et par conséquent le goût pour les sciences, apparaît *avant* la magie et la superstition. La magie exige de la tromperie pour être efficace, et la superstition a besoin d'endoctrinement ; la curiosité n'a besoin ni de l'un ni de l'autre. Les conflits de

* Plusieurs chercheurs ont étudié plus en détail les situations conduisant à ces instants privilégiés, notamment le médecin et physicien prussien Hermann von Helmholtz (1821–1894) et le mathématicien français Henri Poincaré (1854–1912). Ils distinguaient quatre phases dans la conception d'une idée à la base d'un tel instant magique : la saturation, l'incubation, l'illumination et la vérification.

Réf. 210

la curiosité avec les superstitions, les idéologies, les autorités ou le reste de la société sont donc programmés à l'avance.

La curiosité est l'exploration des limites. Pour chaque limite, il existe deux possibilités : cette limite peut se révéler être réelle ou apparente. Si la limite est réelle, l'attitude la plus opportune est celle de l'acceptation. Le fait de s'approcher de la limite donne alors de la force. Si la limite n'est qu'apparente et en réalité inexistante, l'attitude la plus profitable consiste à réévaluer ce point de vue erroné, à en extraire le rôle positif qu'il joue, puis à dépasser cette limite. La distinction entre les limites réelle et apparente est possible uniquement lorsque cette limite est examinée avec beaucoup de soin, d'ouverture d'esprit et sans aucun préjugé. Par-dessus tout, l'exploration des limites nécessite du courage.

« Das gelüftete Geheimnis rächt sich*.
Bert Hellinger »

COURAGE

« Il est dangereux d'avoir raison dans des choses
où des hommes accrédités ont tort.
Voltaire »

« Manche suchen Sicherheit, wo Mut gefragt ist,
und suchen Freiheit, wo das Richtige keine
Wahl läßt**.
Bert Hellinger »

Réf. 211

La plus grande partie de la teneur de ce chapitre est nécessaire dans l'aventure pour atteindre le sommet de la Montagne Mouvement. Mais il en faut plus encore. Comme toute entreprise, la curiosité exige également du courage, et la curiosité absolue, comme nous la recherchons dans notre expédition, requiert un courage entier. En fait, il est facile d'être découragé dans ce voyage. Cette excursion est souvent abandonnée par d'autres personnes car inutile, inintéressante, puérile, embarrassante, compromettante ou, plus fréquemment, malfaisante. Par exemple, entre le décès de Socrate en 399 av. J.-C. et celui de Paul-Henri Thiry, baron d'Holbach, au dix-huitième siècle, aucun livre ne fut publié avec l'affirmation « les dieux n'existent pas », à cause des menaces que quiconque aurait subies dans sa vie pour avoir osé la proférer. Même aujourd'hui, ce type d'attitude est toujours courant, comme l'indiquent les journaux.

Par le biais de l'élimination constante de l'incertitude, la curiosité et l'activité scientifique sont toutes les deux intrinsèquement opposées à toute idée, personne ou organisation qui tenterait d'esquiver la confrontation des affirmations avec les observations. Ces « fugeurs » demandent à vivre avec des superstitions et des croyances. Mais les superstitions et les croyances engendrent des craintes inutiles. Et la peur représente le fondement de tous les régimes autoritaires. Nous obtenons un cercle vicieux : le rejet de la comparaison avec l'observation produit la peur – la peur permet de maintenir en place l'autorité injuste – cette dernière empêche la confrontation avec l'observation – etc.

* « Le secret dévoilé prend sa revanche. »

** « Certains cherchent la sécurité là où le courage est nécessaire et cherchent la liberté là où la véritable voie ne laisse aucun choix. » Cela est tiré du magnifique livret de BERT HELLINGER, *Verdichtetes*, Carl-Auer Systeme Verlag, 1996.

Par conséquent, la curiosité et la science sont fondamentalement opposées aux autorités injustes, une relation qui rendit la vie dure à des personnages comme Anaxagore (500–428 av. J. - C.) dans la Grèce antique, Hypatie d’Alexandrie dans l’Empire romain chrétien, Galileo Galilei dans l’État de l’Église, Antoine Lavoisier en France, et Albert Einstein (et beaucoup d’autres) en Allemagne. Dans la seconde moitié du vingtième siècle, les victimes furent Robert Oppenheimer, Melba Phillips et Chandler Davis aux États-Unis, et Andreï Sakharov dans l’Union soviétique. Chacun d’eux raconte une histoire terrible mais instructive, comme en témoignent, plus récemment, Fang Lizhi, Xu Lianying, Liu Gang et Wang Juntao en Chine, Kim Song-Man en Corée du Sud, Otanazar Aripov en Ouzbékistan, Ramadan al-Hadi al-Hush en Libye, Bo Bo Htun en Birmanie, Sami Kilani et Salman Salman en Palestine, ainsi que plusieurs centaines d’autres. Dans un grand nombre de sociétés autoritaires, l’antagonisme entre la curiosité et l’injustice a entravé voire entièrement réprimé le développement de la physique et des autres sciences, avec des conséquences économiques, sociales et culturelles extrêmement négatives.

Lorsque nous nous sommes lancés dans cette ascension, nous avons besoin d’être conscients de ce que nous faisons. En réalité, les obstacles externes peuvent être esquivés ou du moins largement rabaisés en gardant solidement ce projet en soi. D’autres difficultés demeurent toujours, cette fois de nature personnelle. Nombreux sont ceux qui ont tenté d’embarquer dans cette aventure avec une certaine intention dissimulée ou explicite, généralement de nature idéologique, et qui se sont trouvés empêtrés par celle-ci avant d’être parvenus à la fin. Certains n’ont pas été préparés à accepter l’humilité requise pour une telle tâche. D’autres n’étaient pas préparés à l’ouverture d’esprit nécessaire, laquelle peut fracasser les convictions les plus profondément tenaces. D’autres encore n’étaient pas prêts à se tourner vers l’imprécis, l’obscur et l’inconnu, qui les taraudent sans cesse.

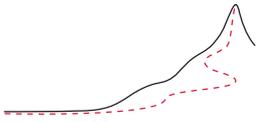
D’un autre côté, les périls valent le coup d’être affrontés. En considérant la curiosité comme un précepte, en faisant face à la méconnaissance et à la peur avec tout notre courage, nous nous libérons de toutes les croyances. En échange, vous parvenez alors à savourer les plaisirs les plus intenses et la satisfaction la plus profonde que la vie puisse vous offrir.

Nous persévérons donc dans notre excursion. À ce niveau, la piste en direction du sommet de la Montagne Mouvement est en train de nous conduire vers la prochaine aventure : la découverte de l’origine des dimensions et des formes dans la nature.

« Et les dieux dirent à l’homme : « Prenez ce que vous voulez, et payez-en le prix. »
(Dicton populaire) »

« Il est difficile de rendre un homme misérable s’il s’estime être digne.
Abraham Lincoln »





ANNEXE A

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. 212

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 artefact, 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	N O M	S Y M B O L E
hertz	Hz = 1/s	newton	N = kg m/s ²
pascal	Pa = N/m ² = kg/m s ²	joule	J = Nm = kg m ² /s ²
watt	W = kg m ² /As ³	coulomb	C = As
volt	V = kg m ² /As ³	farad	F = As/V = A ² s ⁴ /kg m ²
ohm	Ω = V/A = kg m ² /A ² s ³	siemens	S = 1/Ω
weber	Wb = Vs = kg m ² /As ²	tesla	T = Wb/m ² = kg/As ² = kg/Cs
henry	H = Vs/A = kg m ² /A ² s ²	degré Celsius	°C (cf. définition du kelvin)
lumen	lm = cd sr	lux	lx = lm/m ² = cd sr/m ²
becquerel	Bq = 1/s	gray	Gy = J/kg = m ² /s ²
sievert	Sv = J/kg = m ² /s ²	katal	kat = mol/s

Défi 266 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. 214		
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 »).

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.

Défi 267 e

- 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 268 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/onzia* (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 286](#).

TABLEAU 23 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 269 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

$$\begin{aligned} 1/[l^2] &= [E]^2 = [F] = [B] = [E_{\text{électrique}}], \\ 1/[l] &= [E] = [m] = [p] = [a] = [f] = [I] = [U] = [T], \\ 1 &= [v] = [q] = [e] = [R] = [S_{\text{action}}] = [S_{\text{entropie}}] = \hbar = c = k = [\alpha], \quad (86) \\ [l] &= 1/[E] = [t] = [C] = [L] \quad \text{et} \\ [l]^2 &= 1/[E]^2 = [G] = [P] \end{aligned}$$

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

Réf. 215

* Des définitions différentes pour les constantes de proportionnalité en électrodynamique conduisent, entre 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.

** 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. 216

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 270 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

$$1 \text{ eV} \approx \frac{1}{6} \text{ aJ} \quad (87)$$

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 271 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. 217

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. 218

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. 219 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 24 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 272 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'*éclairage énergétique* de la lumière du soleil est d'environ $1\,300 \text{ W/m}^2$ lors d'une journée ensoleillée. Par ailleurs, l'*éclairage 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'éclairage 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. 220

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 25 Quelques valeurs mesurées d'éclairéments lumineux.

OBSERVATION	ÉCLAIREMENT LUMINEUX
Pâle étoile	0,1 nlx
Sirius	10 μ lx
Le phot (ancienne unité d'éclairément 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 lx. 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. 221

* *

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. 222

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. 223 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. 224 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. 225

Défi 273 s

* *

Réf. 226

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.

* *

Page 289

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](#)).

* *

Défi 274 s

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 ?

* *

Réf. 227

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. 228

* *

Réf. 229

Défi 275 s

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 ?

* *

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 :

$$\begin{aligned} S_{\text{France}} &= 1,5 \text{ cm}^{-1}(l + 1 \pm 1 \text{ cm}) \\ S_{\text{Europe centrale}} &= 1,5748 \text{ cm}^{-1}(l + 1 \pm 1 \text{ cm}) \\ S_{\text{Homme anglo-saxon}} &= 1,181 \text{ cm}^{-1}(l + 1 \pm 1 \text{ cm}) - 22 \end{aligned} \quad (88)$$

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 276 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 sont 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. 230

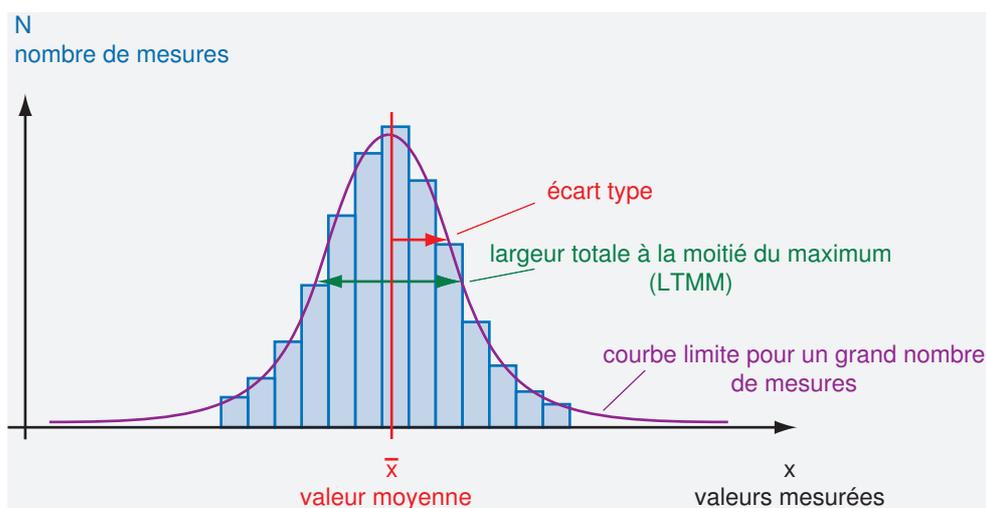


FIGURE 87 Une expérience de précision et sa distribution des mesures.

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 :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (89)$$

Défi 277 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 87, est décrite par l'expression

$$N(x) \approx e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}. \quad (90)$$

Défi 278 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. 231 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. 232 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*.

Défi 279 pe
Page ??

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

Réf. 232

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 26 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 = 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 ,	$G_{\text{F}}/(\hbar c)^3$	$1,166\,39(1) \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$	$8,6 \cdot 10^{-6}$
constante de couplage faible	$\alpha_{\text{w}}(M_{\text{Z}}) = g_{\text{w}}^2/4\pi$	$1/30,1(3)$	$1 \cdot 10^{-2}$
angle de mélange électrofaible	$\sin^2 \theta_{\text{W}}(\overline{MS})$	$0,231\,24(24)$	$1,0 \cdot 10^{-3}$
angle de mélange électrofaible	$\sin^2 \theta_{\text{W}}(\text{enveloppe})$	$0,2224(19)$	$8,7 \cdot 10^{-3}$
constante de couplage fort ^d	$\alpha_{\text{s}}(M_{\text{Z}}) = g_{\text{s}}^2/4\pi$	$0,118(3)$	$25 \cdot 10^{-3}$

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 $g_{\text{em}}(Q^2 = M_{\text{W}}^2 c^2) \approx 1/128$. La constante de couplage de l'interaction forte possède des valeurs supérieures pour des transferts d'impulsion moins importants, par exemple $\alpha_{\text{s}}(34 \text{ GeV}) = 0,14(2)$.

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 27 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	$R_{\infty} = m_e c \alpha^2 / 2\hbar$	$10\,973\,731,568\,549(83) \text{ m}^{-1}$	$7,6 \cdot 10^{-12}$

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR UNITÉS SI	INCERT.
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	$\lambda_c = h/m_e c$	2,426 310 215(18) pm	$7,3 \cdot 10^{-9}$
rayon de Bohr ^a	$\lambda_c = \hbar/m_e c = r_e/\alpha$	0,386 159 264 2(28) pm	$7,3 \cdot 10^{-9}$
magnéton nucléaire	$a_\infty = r_e/\alpha^2$	52,917 720 83(19) pm	$3,7 \cdot 10^{-9}$
rapport de masse proton-électron	$\mu_N = e\hbar/2m_p$	5,050 783 17(20) $\cdot 10^{-27}$ J/T	$4,0 \cdot 10^{-8}$
constante de Stefan-Boltzmann	m_p/m_e	1836,152 667 5(39)	$2,1 \cdot 10^{-9}$
constante de la loi du déplacement de Wien	$\sigma = \pi^2 k^4/60\hbar^3 c^2$	56,704 00(40) nW/m ² K ⁴	$7,0 \cdot 10^{-6}$
constante de conversion de bits en entropie contenu énergétique du TNT	$b = \lambda_{\max} T$	2,897 768 6(51) mmK	$1,7 \cdot 10^{-6}$
		10^{23} bit = 0,956 994 5(17) J/K	$1,7 \cdot 10^{-6}$
		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 280 s

TABLEAU 28 Constantes astrophysiques.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
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	

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
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	$\rho_\gamma = \pi^2 k^4/15T_0^4$	$4,6 \cdot 10^{-31} \text{ kg/m}^3$
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	$m_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c/G}$	$21,8 \mu\text{g}$
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 281 s**
Réf. 233
- 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 $16 \pm 4 \mu\text{K} = 6(2) \cdot 10^{-6} T_0$.

Page 210

Soyez vigilants : dans l'ultime partie de cet ouvrage on montre qu'un grand nombre des constantes du **Tableau 14** 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 29 Constantes astronomiques.

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
masse de la Terre	M_{\oplus}	$5,972\,23(8) \cdot 10^{24}$ 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	ρ_{\oplus}	5,5 Mg/m ³
âge de la Terre	T_{\oplus}	4,55 Ga = 143 Ps
rayon de la Lune	$R_{\zeta\text{v}}$	1 738 km dans la direction de la Terre
rayon de la Lune	$R_{\zeta\text{h}}$	1 737,4 km dans les deux autres directions
masse de la Lune	M_{ζ}	$7,35 \cdot 10^{22}$ kg
distance moyenne de la Lune ^b	d_{ζ}	384 401 km
distance de la Lune au périégée ^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	ρ_{ζ}	3,3 Mg/m ³
masse du Soleil	M_{\odot}	$1,988\,43(3) \cdot 10^{30}$ 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

QUANTITÉ	SYMBOLE	VALEUR
taille angulaire du Soleil		0,53° en moyenne; minimum le quatre juillet (aphélie) 1888'', maximum le quatre janvier (périhélie) 1952''
densité moyenne du Soleil	ρ_{\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 autour du centre de la galaxie	$v_{\odot g}$	220(20) km/s
vitesse solaire par rapport au fond diffus cosmologique	$v_{\odot b}$	370,6(5) km/s
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 au Soleil	D_{J}	778 412 020 km
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

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

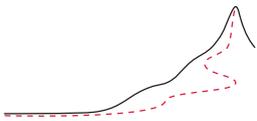
Si le nombre π est *normal*, c'est-à-dire si les chiffres et les combinaisons de chiffres

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 $0,123456789101112131415161718192021\dots$ et de nombreux autres. Pouvez-vous en citer quelques exemples ?

Défi 282 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.





BIBLIOGRAPHIE

« [...] moi, qui trouve toujours tous les livres trop longs, et surtout les miens [...] »
Voltaire, *Lettre à M. Cideville*.

- 1 JULIAN SCHWINGER, L. L. DERAAD, K. A. MILTON & W. Y. TSAI, *Classical Electrodynamics*, Perseus, 1998. Un excellent texte sur ce sujet, rédigé par les plus grands maîtres du domaine.
Consultez aussi le magnifique ouvrage de problèmes d' ANDRÉ BUTOLI & JEAN-MARC LÉVY-LEBLOND, *La physique en questions – électricité et magnétisme*, Vuibert, 1999. Cité aux pages 14 et 57.
- 2 Consultez le site Web du Particle Data Group, la référence mondiale, sur at pdg.web.cern.ch. Lisez également H. JEON & M. LONGO, Search for magnetic monopoles trapped in matter, *Physical Review Letters* 75, pp. 1443–1447, 1995. Consultez aussi A. S. GOLDHABER & W. P. TROWER, Resource letter MM-1 : magnetic monopoles, *American Journal of Physics* 58, pp. 429–439, 1990. Cité en page 16.
- 3 R. EDWARDS, Filling station fires spark cars' recall, *New Scientist*, pp. 4–5, 4 mars 1995. Cité en page 18.
- 4 S. DESMET, F. ORBAN & F. GRANDJEAN, On the Kelvin electrostatic generator, *European Journal of Physics* 10, pp. 118–122, 1989. Vous pouvez aussi trouver des plans de construction de celui-ci sur divers sites Internet. Cité en page 19.
- 5 Pour visualiser une gravure du paratonnerre original de Franklin, lisez E. P. KRIDER, Benjamin Franklin and lightning rods, *Physics Today* 59, pp. 42–48, 2006. Cité en page 20.
- 6 W. RUECKNER, An improved demonstration of charge conservation, *American Journal of Physics* 75, pp. 861–863, 2007. Cité en page 21.
- 7 Pour avoir plus d'informations sur les diverses unités électromagnétiques, lisez l'ouvrage de référence de J. D. JACKSON, *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, Wiley, 1998. Cité en page 24.
- 8 Lisez les articles anciens mais admirables de RICHARD C. TOLMAN & T. DALE STEWART, The electromotive force produced by the acceleration of metals, *Physical Review* 8, pp. 97–116, 1916, RICHARD C. TOLMAN & T. DALE STEWART, The mass of the electric carrier in copper, silver and aluminium, *Physical Review* 9, pp. 164–167, 1917, et l'expérience ultérieure mais beaucoup plus précise de C. F. KETTERING & G. G. SCOTT, Inertia of the carrier of electricity in copper and aluminum, *Physical Review* 66, pp. 257–267, 1944. (Manifestement, la langue américaine omettait le « i » d' aluminium durant cette période.) Le premier de ces articles, qui est également une synthèse des percées précédentes, expose en détail l'expérience. Le dernier article indique ce qui devait être pris en compte pour atteindre une précision suffisante. Cité en page 27.

- 9 Cet effet a été mesuré pour la première fois par S. J. BARNETT, A new electron-inertia effect and the determination of m/e for the free electron in copper, *Philosophical Magazine* 12, p. 349, 1931. Cité en page 27.
- 10 Lisez 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 27.
- 11 L. I. SCHIFF & M. V. BARNHILL, Gravitational-induced electric field near a metal, *Physical Review* 151, pp. 1067–1071, 1966. F. C. WITTEBORN & W. M. FAIRBANK, Experimental comparison of the gravitational force on freely falling electrons and metallic electrons, *Physical Review Letters* 19, pp. 1049–1052, 1967. Cité en page 28.
- 12 J. LEPAK & M. CRESCIMANNO, Speed of light measurement using ping, prépublication électronique disponible sur arxiv.org/abs/physics/0201053. Cité en page 28.
- 13 Cette anecdote fut contée par le *Wall Street Journal* en décembre 2006 : lisez online.wsj.com/article_print/SB116615315551251136.html. Cité en page 28.
- 14 PIERRE DE MARICOURT, *Tractatus de magnete*, 1269. Cité en page 30.
- 15 R. WILTSCHKO & W. WILTSCHKO, *Magnetic Orientation in Animals*, Springer, Berlin, 1995. Cité en page 31.
- 16 Le rapport entre le moment cinétique L et le moment magnétique M est

$$\frac{L}{M} = \frac{2m}{e} \cdot \frac{1}{g}, \quad (91)$$

- où e représente la charge de l'électron et m sa masse. L et M sont tous les deux mesurables. Les premières mesures furent publiées avec une valeur pour g de 1, certainement parce que les auteurs ne connaissaient pas cette valeur. Dans les expériences ultérieures, de Haas a trouvé d'autres valeurs. Les mesures effectuées par d'autres chercheurs donnaient des valeurs plus proches de 2 que de 1, une réalité qui ne fut comprise qu'avec la découverte du spin. Les publications originales sont A. EINSTEIN & W. J. DE HAAS, Proefondervinderlijk bewijs voor het bestaan der moleculaire stroomen van Ampère, *Koninklijke Akademie der Wetenschappen te Amsterdam, Verslagen* 23, p. 1449, 1915, et A. EINSTEIN & W. J. DE HAAS, Experimental proof of the existence of Ampère's molecular currents, *Koninklijke Akademie der Wetenschappen te Amsterdam, Proceedings* 18, p. 696, 1916. Cité en page 34.
- 17 S. J. BARNETT, Magnetization by rotation, *Physical Review* 6, pp. 171–172, 1915, et S. J. BARNETT, Magnetization by rotation, *Physical Review* 6, pp. 239–270, 1915. Cité en page 34.
- 18 Lisez J. D. JACKSON, *Classical Electrodynamics*, 3rd edition, Wiley, 1998, ou également R. F. HARRINGTON, *Time Harmonic Electromagnetic Fields*, McGraw–Hill, 1961. Cité aux pages 38 et 57.
- 19 Le meilleur ouvrage sur le cerveau est celui de ERIC R. KANDEL, JAMES H. SCHWARTZ & THOMAS M. JESSELL, *Principles of Neural Science*, 5th edition, McGraw–Hill, 2000. Le site Web suhep.phy.syr.edu/courses/modules/MM/brain/brain.html fournit une introduction à la physiologie du cerveau. Cité en page 38.
- 20 N. SALINGAROS, Invariants of the electromagnetic field and electromagnetic waves, *American Journal of Physics* 53, pp. 361–363, 1985. Cité en page 39.
- 21 DE LA TORRE, $V \leq c$ in 1820 ?, *European Journal of Physics* 20, pp. L23–L24, mars 1999. Cité en page 40.
- 22 J. A. HERAS, Can Maxwell's equations be obtained from the continuity equation ?, *American Journal of Physics* 75, pp. 652–657, 2007. Cité aux pages 42 et 150.

- 23 Un résumé similaire constitue le fondement de FRIEDRICH W. HEHL & YURI N. OBUKOV, *Foundations of Classical Electrodynamics – Charge, Flux and Metric*, Birkhäuser 2003. Cité en page 42.
- 24 R. H. TYLER, S. MAUS & H. LÜHR, Magnetic signal due to ocean tidal flow identified in satellite observations, *Science* 299, pp. 239–241, 2003. Les films issus de ces données peuvent être consultés sur le site Web www.tu-bs.de/institute/geophysik/spp/publikationen.html. Cité en page 47.
- 25 H. MONTGOMERY, Unipolar induction : a neglected topic in the teaching of electromagnetism, *European Journal of Physics* 20, pp. 271–280, 1999. Cité en page 48.
- 26 Pour l'état de l'art sur la dynamo terrestre, lisez l'article de P. H. ROBERTS & G. A. GLATZMAIER, Geodynamo theory and simulations, *Reviews of Modern Physics* 72, pp. 1081–1123, 2000. Celui-ci est plus ancien : R. JEANLOZ & B. ROMANOWICZ, Geophysical dynamics at the center of the Earth, *Physics Today*, pp. 22–27, août 1997. Cité aux pages 48 et 132.
- 27 J. YANG, F. LU, L. W. KOSTIUK & D. Y. KWOK, Electrokinetic microchannel battery by means of electrokinetic and microfluidic phenomena, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 13, pp. 963–970, 2003. Cité en page 50.
- 28 OLEG D. JEFIMENKO, A relativistic paradox seemingly violating conservation of momentum law in electromagnetic systems, *European Journal of Physics* 20, pp. 39–44, 1999. Bien évidemment, la quantité de mouvement manquante se retrouve dans le champ électromagnétique. Étant donné que le moment électromagnétique est exprimé par le potentiel vecteur, êtes-vous capable de vérifier que tout s'accorde comme il le faut ? Cité en page 56.
- 29 H. VAN DAM & E. P. WIGNER, Classical relativistic mechanics of interacting point particles, *Physical Review* 136B, pp. 1576–1582, 1965. Cité en page 56.
- 30 MARK D. SEMON & JOHN R. TAYLOR, Thoughts on the magnetic vector potential, *American Journal of Physics* 64, pp. 1361–1369, 1996. Cité aux pages 57, 59 et 60.
- 31 JEAN SIVARDIÈRE, Simple derivation of magnetic vector potentials, *European Journal of Physics* 14, pp. 251–254, 1993. Cité en page 58.
- 32 T. T. WU & C. N. YANG, Concept of nonintegrable phase factors and global formulation of gauge fields, *Physical Review D* 12, pp. 3845–3857, 1975. Cité en page 61.
- 33 Ce qui suit est un texte sur l'électrodynamique entièrement rédigé à l'aide du formalisme (mathématique) : KURT MEETZ & WALTER L. ENGL, *Elektromagnetische Felder – mathematische und physikalische Grundlagen*, Springer, 1980. Cité en page 62.
- 34 J. TRAVIS, Twirl those organs into place – getting to the heart of how a heart knows left from right, *Science News* 156, 21 août 1999. Un excellent ouvrage sur les asymétries dans la nature : H. BRUNNER, *Rechts oder links*, Wiley-Vch, 1999. Cité en page 64.
- 35 Lisez par exemple la discussion donnée par M. C. CORBALLIS & I. L. BEALE, On telling left from right, *Scientific American* 224, pp. 96–104, mars 1971. Cité en page 65.
- 36 WOLFGANG RINDLER, *Essential Relativity – Special, General, and Cosmological*, revised 2nd edition, Springer Verlag, 1977, page 247. Il y a également le magnifique article de M. LE BELLAC & J. -M. LÉVY-LEBLOND, Galilean electrodynamics, *Nuovo Cimento B* 14, p. 217, 1973, qui expose les possibilités qui existent mais également les problèmes qui surgissent lorsque nous tentons de définir la théorie sans faire usage de la relativité. Cité en page 67.
- 37 L. -C. TU, J. LUO & G. T. GILLES, The mass of the photon, *Reports on Progress of Physics* 68, pp. 77–130, 2005. Cité en page 67.

- 38 Pour un compte rendu captivant sur l'histoire des idées sur la lumière, lisez DAVID PARK, *The Fire Within the Eye : a Historical Essay on the Nature and Meaning of Light*, Princeton University Press, 1997. Cité en page 70.
- 39 Lisez le livre de RAYMOND L. LEE & ALISTAIR B. FRASER, *The Rainbow Bridge : Rainbows in Art, Myth, and Science*, Pennsylvania State University Press, 2000. Un chapitre peut être consulté sur le site Web www.nadn.navy.mil/Oceanography/RainbowBridge/Chapter_8.html. Cité en page 74.
- 40 Cette admirable expérience de fente fut publiée par E. A. MONTIE, E. C. COSMAN, G. W. 'T HOOFT, M. B. VAN DER MARK & C. W. J. BEENAKKER, Observation of the optical analogue of quantized conductance of a point contact, *Nature* 350, pp. 594–595, 18 avril 1991, et dans la version plus longue E. A. MONTIE, E. C. COSMAN, G. W. 'T HOOFT, M. B. VAN DER MARK & C. W. J. BEENAKKER, Observation of the optical analogue of the quantized conductance of a point contact, *Physica B* 175, pp. 149–152, 1991. Ce résultat fut également publié dans de nombreuses autres revues scientifiques. Cité en page 74.
- 41 Une mesure récente de la fréquence de la lumière est présentée dans TH. UDEM, A. HUBER, B. GROSS, J. REICHERT, M. PREVEDELLI, M. WEITZ & T. W. HAUSCH, Phase-coherent measurement of the hydrogen 1S–2S transition frequency with an optical frequency interval divider chain, *Physical Review Letters* 79, pp. 2646–2649, 6 octobre 1997. Une autre se trouve dans C. SCHWOB, L. JOZEFOWSKI, DE BEAUVOIR, L. HILICO, F. NEZ, L. JULIEN, F. BIRABEN, O. ACEF & A. CLAIRON, Optical frequency measurement of the 2S–12D transitions in hydrogen and deuterium : Rydberg constant and Lamb shift determinations, *Physical Review Letters* 82, pp. 4960–4963, 21 juin 1999. Cité en page 75.
- 42 Les découvreurs de deux méthodes de ce type furent récompensés par le prix Nobel de physique en 2005. Cité en page 75.
- 43 Regardez par exemple G. HORVÁTH, J. GÁL & R. WEHNER, Why are water-seeking insects not attracted by mirages ? The polarization pattern of mirages, *Naturwissenschaften* 83, pp. 300–303, 1997. Cité en page 76.
- 44 W. K. HAIDINGER, Über das direkte Erkennen des polarisierten Lichts, *Poggendorf's Annalen* 63, pp. 29–39, 1844, W. K. HAIDINGER, Beobachtung des Lichtpolarisationsbüschels in geradlinig polarisiertem Lichte, *Poggendorf's Annalen* 68, pp. 73–87, 1846, W. K. HAIDINGER, Dauer des Eindrucks der Polarisationbüschel auf der Netzhaut, *Poggendorf's Annalen* 93, pp. 318–320, 1854. Cité en page 77.
- 45 Lisez le chapitre sur les brosses de polarisation, dans MARCEL G. J. MINNAERT, *Light and Colour in the Outdoors*, Springer, 1993, ou la série d'ouvrages originaux, MARCEL G. J. MINNAERT, *De natuurkunde van 't vrije veld*, Thieme & Cie, 1937. Pour plus de précisions, lisez G. P. MISSION, Form and behaviour of Haidinger's brushes, *Ophthalmology and Physiological Optics* 137, pp. 392–396, 1993, ou J. GREBE-ELLIS, Zum Haidinger-Büschel, 2002, sur didaktik.physik.hu-berlin.de/forschung/optik/download/veroeffentlichungen/haidinger.pdf. Sur le phénomène de biréfringence de l'œil, lisez L. BOUR, Een eigenaardige speling der natuur, *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde* 67, pp. 362–364, décembre 2001. En particulier, une photographie de l'œil utilisant l'illumination rectilignement polarisée et prise à travers un analyseur révèle une croix noire dans la pupille. Cité en page 78.
- 46 K. L. KELLY, Color designations for colored lights, *Journal of the Optical Society of America* 33, pp. 627–632, 1943. Cité en page 82.

- 47 La référence standard sur la propagation de la lumière est MAX BORN & EMIL WOLF, *Principles of Optics – Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*, Pergamon Press, 6th edition, 1998. Cité en page 86.
- 48 Pour une introduction sur le halo de 22°, le halo de 46°, les parhélies, et les nombreux autres arcs et anneaux qui peuvent être aperçus autour du Soleil, lisez le texte magnifiquement illustré de R. GREENLER, Lichterscheinungen, Eiskristalle und Himmelsarchäologie, *Physikalische Blätter* 54, pp. 133–139, 1998, ou le livre de ROBERT GREENLER, *Rainbows, Halos, and Glories*, Cambridge University Press, 1980. Cité en page 89.
- 49 Lisez-le en ligne sur fermi.imss.fi.it/rd/bdv?/bdviewer/bid=000000300682. Cité en page 89.
- 50 JAMES E. FALLER & JOSEPH WAMPLER, The lunar laser reflector, *Scientific American* pp. 38–49, mars 1970. Cité en page 90.
- 51 Neil Armstrong sur Apollo 11, Jim Lovell sur Apollo 8 et Apollo 13, et Jim Irwin sur Apollo 15 l'ont scrupuleusement recherchée et répondirent alors par la négative, comme cela est conté dans *Science News*, p. 423, 24 & 31 décembre 1994. À partir de la Station spatiale cependant, qui gravite à seulement quelques centaines de kilomètres au-dessus de la Terre, la muraille peut être vue lorsque le Soleil est suffisamment bas de telle manière que celle-ci paraisse plus large grâce à son ombre, comme expliqué dans *Science News* 149, p. 301, 1996. Cité en page 90.
- 52 Des photographies supplémentaires de mirages, voire des films peuvent être consultés sur www.polarimage.fi/mirages/mirages.htm et virtual.finland.fi/netcomm/news/showarticle.asp?intNWSAID=25722. Cité en page 90.
- 53 M. SHIH, M. SEGEV & G. SALAMO, *Physical Review Letters* 78, pp. 2551–2554, 1997. Lisez également l'article plus accessible de MORDECHAI SEGEV & GEORGE STEGEMAN, Self-trapping of optical beams : spatial solitons, *Physics Today* 51, pp. 42–48, août 1998. Cité en page 91.
- 54 La première explication correcte du moulin à lumière a été donnée par OSBORNE REYNOLDS, On certain dimensional properties of matter in the gaseous state, *Royal Society Philosophical Transactions Part 2*, 1879. La meilleure discussion est celle donnée sur le Web par PHIL GIBBS, dans la liste des foires aux questions (FAQ) du forum de discussion sci.physics, elle est disponible sur le site Web www.desy.de/user/projects/Physics/light-mill.html. Cité en page 95.
- 55 P. LEBEDEV, Untersuchungen über die Druckkräfte des Lichtes, *Annalen der Physik* 6, pp. 307–458, 1901. Lebedew confirma le résultat de Kepler qui établit que la pression de la lumière est à la base du changement de direction des queues des comètes lorsqu'elles tournent autour du Soleil. Cité en page 95.
- 56 P. GALAJDA & P. ORMOS, *Applied Physics Letters* 78, p. 249, 2001. Cité en page 95.
- 57 Un bref aperçu en est donné par MILES PADGETT & LES ALLEN, Optical tweezers and spanners, *Physics World* pp. 35–38, septembre 1997. Les articles originaux du groupe d'Ashkin sont A. ASHKIN, J. M. DZIEDZIC, J. E. BJORKHOLM & S. CHU, Observation of a gradient force optical trap for dielectric particles, *Optics Letters* 11, p. 288, 1986, et A. ASHKIN, J. M. DZIEDZIC & T. YAMANE, Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams, *Nature* 330, p. 769, 1987. Une explication pédagogique sur les clés à molettes optiques, comprenant une méthode pour en construire une, peut être trouvée dans D. N. MOOTHOO, J. ARLT, R. S. CONROY, F. AKERBOOM, A. VOIT & K. DHOLAKIA, Beth's experiment using optical tweezers, *American Journal of Physics* 69, pp. 271–276, 2001, et dans S. P. SMITH, S. R. BHALOTRA, A. L. BRODY, B. L. BROWN, E. K. BOYDA & M. PRENTISS, Inexpensive optical tweezers for undergraduate laboratories, *American Journal of Physics* 67, pp. 26–35, 1999. Cité en page 95.

- 58 R. A. BETH, Mechanical detection and measurement of the angular momentum of light, *Physical Review* 50, p. 115, 1936. Pour des mesures plus récentes, lisez N. B. SIMPSON, K. DHOLAKIA, L. ALLEN & M. J. PADGETT, Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light : an optical spanner, *Optics Letters* 22, pp. 52–54, 1997, et M. E. J. FRIESE, T. A. NIEMINEN, N. R. HECKENBERG & H. RUBINSZTEIN-DUNLOP, Optical torque controlled by elliptical polarization, *Optics Letters* 23, pp. 1–3, 1998. Consultez aussi J. H. POYNTING, The wave motion of a revolving shaft, and a suggestion as to the angular momentum in a beam of circularly polarised light, *Proceedings of the Royal Society London A* 82, pp. 560–567, 1908. Cité en page 96.
- 59 A. VALENZUELA, G. HAERENDEL, H. FÖPPL, F. MELZNER, H. NEUSS, E. RIEGER, J. STÖCKER, O. BAUER, H. HÖFNER & J. LOIDL, The AMPTE artificial comet experiments, *Nature* 320, pp. 700–703, 1986. Cité en page 96.
- 60 Lisez le texte en latin de DIETRICH VON FREIBERG *De iride et radialibus impressionibus*, v. 1315. Cité en page 98.
- 61 J. WALKER, Multiple rainbows from single drops of water and other liquids, *American Journal of Physics* 44, pp. 421–433, 1976, et How to create and observe a dozen rainbows in a single drop of water, *Scientific American* 237, pp. 138–144, 1977. Regardez aussi K. SASSEN, Angular scattering and rainbow formation in pendant drops, *Journal of the Optical Society of America* 69, pp. 1083–1089, 1979. Cité en page 99.
- 62 La coloration de la bordure du Soleil qui en résulte est clairement indiquée sur la page Web d'Andrew Young mintaka.sdsu.edu/GF/explain/simulations/std/rims.html. Son site Web mintaka.sdsu.edu/GF fournit la meilleure explication du flash vert, y compris les différentes variétés qui existent (expliquées sur mintaka.sdsu.edu/GF/papers/Zenit/glance.html), comment l'observer, et les très nombreux effets physiques concernés. Des simulations détaillées et une profusion de ressources sont disponibles. Lisez également son article : A. T. YOUNG, Sunset science – III. Visual adaptation and green flashes, *Journal of the Optical Society of America A* 17, pp. 2129–2139, 2000. Cité en page 99.
- 63 Il existe également d'autres manières de voir ce rayon vert, sur des durées plus longues, à savoir lorsqu'un mirage apparaît au coucher du soleil. Une explication appuyée par des photographies en couleurs se trouve dans M. VOLLMER, Gespiegelt in besonderen Düften ... – Oasen, Seeungeheuer und weitere Spielereien der Fata Morgana, *Physikalische Blätter* 54, pp. 903–909, 1998. Cité en page 99.
- 64 Regardez le merveilleux site Web de Les Cowley sur l'optique atmosphérique, www.atoptics.co.uk. Ou le livre de DAVID K. LYNCH & WILLIAM LIVINGSTON, *Color and Light in Nature*, 2nd edition, Cambridge University Press, 2001. Ils ont étendu et remis au goût du jour cette fascination pour les couleurs dans la nature, comme les halos autour de la Lune et du Soleil, ou la couleur des ombres, qui avait été initiée par le magnifique livre classique de Marcel Minnaert mentionné à la page 70. Cité en page 99.
- 65 Cette célèbre découverte est due à BRENT BERLIN & PAUL KAY, *Basic Color Terms : Their Universality and Evolution*, University of California Press, 1969. Leur inventaire mondial des couleurs en cours est ardemment attendu. Certes, il y a aussi des études en cours pour trouver des exceptions possibles, mais le fondement structurel est fermement établi, comme l'indiquent les comptes rendus de conférence C. L. HARDIN & LUISA MAFFI, *Colour Categories in Thought and Language*, Cambridge University Press, 1997. Cité en page 100.
- 66 Pour une discussion approfondie des diverses vitesses associées aux trains d'ondes, lisez l'ouvrage classique de LOUIS BRILLOUIN, *Wave Propagation and Group Velocity*, Academic Press, New York, 1960. Il élargit en détail ce sujet discuté par ARNOLD SOMMERFELD, Über die Fortpflanzung des Lichtes in dispergierenden Medien, *Annalen der Physik*, 4th

- series, 44, pp. 177–202, 1914. Consultez également ARNOLD SOMMERFELD, *Optik*, Dietrichsche Verlagsbuchhandlung, Wiesbaden 1950, section 22. Une traduction anglaise ARNOLD SOMMERFELD, *Lectures on Theoretical Physics : Optics*, 1954, est également disponible. Cité aux pages 102 et 104.
- 67 La modification de la vitesse de groupe dans les fibres optiques est même possible maintenant sur demande, comme l'indiquent M. GONZÁLEZ-HERRÁEZ, K. -Y. SONG & L. THÉVENAZ, Optically controlled slow and fast light in optical fibers using stimulated Brillouin scattering, *Applied Physics Letters* 87, p. 081113, 2005. Ils exhibèrent des vitesses de groupe allant de $0,24c$ jusqu'à plus l'infini et, plus que cela, jusqu'aux valeurs négatives. Cité en page 103.
- Une autre expérience fut menée par S. CHU & S. WONG, Linear pulse propagation in an absorbing medium, *Physical Review Letters* 48, pp. 738–741, 1982. Lisez aussi S. CHU & D. STYER, Answer to question #52. Group velocity and energy propagation, *American Journal of Physics* 66, pp. 659–661, 1998. Un autre exemple fut décrit en 1993 par le groupe de Raymond Chiao pour le cas de certains matériaux non linéaires dans R. CHIAO, P. G. KWAIT & A. M. STEINBERG, Faster than light ?, *Scientific American* 269, p. 52, août 1993, et R. Y. CHIAO, A. E. KOZHEKIN & G. KURIZKI, Tachyonlike excitations in inverted two-level media, *Physical Review Letters* 77, pp. 1254–1257, 1996. Concernant un autre dispositif expérimental utilisant encore la dispersion anormale dans du gaz de césium, lisez L. J. WANG, A. KUZMICH & A. DOGARIN, Gain-assisted superluminal light propagation, *Nature* 406, pp. 277–279, 20 juillet 2000.
- 68 Y. P. TERLETSKII, *Paradoxes in the Theory of Relativity*, Plenum Press, 1968. Cité en page 104.
- 69 Lisez l'excellente explication de KIRK T. McDONALD, Negative group velocity, *American Journal of Physics* 69, pp. 607–614, 2001. Cité en page 104.
- 70 La prédiction de la réfraction négative est due à V. G. VESELAGO, The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ , *Soviet Physics Uspekhi* 10, p. 509, 1968. (L'article original en russe est de 1967.) L'explication avec des directions différentes de réfraction fut publiée par P. M. VALANJU, R. M. WALSER & A. P. VALANJU, Wave refraction in negative-index media : always positive and very inhomogeneous, *Physical Review Letters* 88, p. 187401, 8 mai 2002. Le principe de Fermat est également revu, comme l'explique V. G. VESELAGO, About the wording of Fermat's principle for light propagation in media with negative refraction index, arxiv.org/abs/cond-mat/0203451. Cité en page 105.
- 71 Le premier exemple de système matériel ayant un indice de réfraction négatif fut présenté par David Smith et son équipe. R. A. SCHELBY, D. R. SMITH & S. SCHULTZ, Experimental verification of a negative index of refraction, *Science* 292, p. 77-79, 2001. Des exemples plus récents se trouvent dans A. A. HOUCK, J. B. BROCK & I. L. CHUANG, Experimental observations of a left-handed material that obeys Snell's law, *Physical Review Letters* 90, p. 137401, 2003, C. G. PARAZZOLI, R. B. GREGOR, K. LI, B. E. C. KOLTENBAH & M. TANIELIAN, Experimental verification and simulation of negative index of refraction using Snell's law, *Physical Review Letters* 90, p. 107401, 2003. S. FOTEINOPOULOU, E. N. ECONOMOU & C. M. SOUKOULIS, Refraction in media with a negative refractive index, *Physical Review Letters* 90, p. 107402, 2003. Cité en page 105.
- 72 S. A. RAMAKRISHNA, Physics of negative refractive index materials, *Reports on Progress of Physics* 68, pp. 449–521, 2005. Cité en page 106.
- 73 J. PENDRY, Negative refraction makes a perfect lens, *Physical Review Letters* 85, p. 3966, 2000. Lisez aussi J. B. PENDRY, D. SCHURIG & D. R. SMITH, Controlling electromagnetic fields, *Science* 312, pp. 1780–1782, 2006, et D. SCHURIG, J. J. MOCK, B. J. JUSTICE,

- S. A. CUMMER, J. B. PENDRY, A. F. STARR & D. R. SMITH, Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies, *Science* 314, pp. 977–980, 2006. Cité en page 106.
- 74 Sur les métamatériaux, lisez A. LAI, C. CALOZ & T. ITOH, Composite right, left-handed transmission metamaterials, *IEEE Microwave Magazine* 5, pp. 34–50, septembre 2004. Cité en page 106.
- 75 M. ZEDLER & P. RUSSEK, Investigation on the Dispersion Relation of a 3D LC-based Metamaterial with an Omnidirectional Left-Handed Frequency Band, *2006 International Microwave Symposium Digest, San Francisco* pp. 1477–1479, 2006. M. ZEDLER, C. CALOZ & P. RUSSEK, A 3D Isotropic left-handed metamaterial based on the rotated transmission line matrix (TLM) scheme, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 2007. Cité en page 106.
- 76 G. NIMTZ, A. ENDERS & H. SPIEKER, *Journal de Physique I (Paris)* 4, p. 565, 1994. Malheureusement, Nimitz semble croire lui-même qu’il a transporté de l’énergie ou des signaux plus rapidement que la lumière : il est soutenu par la critique, souvent influencée de façon déplorable, concernant ses expériences plutôt sophistiquées. Lisez A. ENDERS & G. NIMTZ, *Physikalische Blätter* 49, p. 1119, décembre 1993, et les réponses succinctes dans *Physikalische Blätter* 50, p. 313, avril 1994. Regardez également A. M. STEINBERG, *Journal de Physique I (Paris)* 4, p. 1813, 1994, A. M. STEINBERG, P. G. KWIAT & R. Y. CHIAO, *Physical Review Letters* 71, pp. 708–711, 1993, et A. RANFAGNI, P. FABENI, G. P. PAZZI & D. MUGNAI, *Physical Review E* 48, p. 1453, 1993. Cité en page 107.
- 77 Une synthèse de toutes les pièces à conviction concernant le mouvement de l’éther est donnée par R. S. SHANKLAND, S. W. MCCUSKEY, F. C. LEONE & G. KUERTI, New analysis of the interferometer observations of Dayton C. Miller, *Review of Modern Physics* 27, pp. 167–178, 1955. Voici un texte plus ancien : H. WITTE, *Annalen der Physik* 26, p. 235, 1908. Cité en page 108.
- 78 L’histoire du concept du vide peut être compulsée dans le livre de E. GRANT, *Much Ado About Nothing*, Cambridge University Press, 1981, et dans l’ample texte de référence d’EDMUND T. WHITTAKER, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Volume I : *The Classical Theories*, Volume II : *The Modern Theories*, Tomash Publishers, American Institute of Physics 1951, 1987. Cité aux pages 108 et 109.
- Les divers *modèles de l’éther* – les rouages, les tubes, les tourbillons – proposés au cours du dix-neuvième siècle furent abandonnés pour différentes raisons. Puisque plusieurs modèles avaient coutume d’expliquer les champs électrique et magnétique comme un mouvement de certaines entités, on en avait conclu que la vitesse de la lumière dépendrait des champs électrique ou magnétique. Un type de champ était généralement décrit par un mouvement rectiligne de ces entités, l’autre par un mouvement rotatoire ou entortillé, ces deux attributions étant possibles. En conséquence, l’éther doit être un fluide quelque peu étrange qui s’écoule parfaitement, mais qui résiste à la rotation d’éléments de volume, comme le déduisit McCulloch en 1839. Cependant, les expériences montrent que la vitesse de la lumière dans le vide ne dépend pas de l’intensité du champ électromagnétique. Les tourbillons furent abandonnés parce que ceux du monde réel se révélèrent instables. Tous ces modèles rendirent leur dernier souffle lorsqu’ils refusèrent de se plier aux exigences imposées par la relativité restreinte.
- 79 Cela est arrivé à Giovanni Bellini (v. 1430–1516), le grand peintre vénitien de la Renaissance, qui consigna même cette expérience par écrit, produisant ainsi l’une des plus grandes « bévues » de tous les temps. Si vous prenez une photographie de cet effet avec un appareil contrôlable à distance, vous pouvez prouver que votre appareil photo est également sacré. Cité en page 110.

- 80** S. R. WILK, How retroreflectors really work, *Optics & Photonics News*, pp. 6–7, décembre 1993. Cité en page [110](#).
- 81** W. H. EHRENSTEIN & B. LINGELBACH, Das Hermann-Gitter, *Physik in unserer Zeit* **6**, pp. 263–268, 2002. Ce journal montre aussi une variante de couleur différente de ces grilles. Cité en page [110](#).
- 82** Ce mythe concernant la sensibilité de l'œil est minutieusement démenti par B. H. SOFFER & D. K. LYNCH, Some paradoxes, errors, and resolutions concerning the spectral optimization of human vision, *American Journal of Physics* **67**, pp. 946–953, 1999. Cité en page [113](#).
- 83** DAVID R. WILLIAMS, Supernormal Vision, *Science News* **152**, pp. 312–313, 15 novembre 1997. Consultez aussi www.cvs.rochester.edu/williamslab/p_williams.html ainsi que les photographies sur www.cvs.rochester.edu/people/~aroorda/ao_research.html de l'intérieur des yeux des êtres vivants. Leur dernière publication est A. ROORDA, A. METHA, P. LENNIE & D. R. WILLIAMS, Packing arrangement of the three cone classes in the primate retina, *Vision Research* **41**, pp. 1291–1306, 2001. Cité en page [114](#).
- 84** S. W. HELL, Strategy for far-field optical imaging and writing without diffraction limit, *Physics Letters A* **326**, pp. 140–145, 2004, lisez aussi V. WESTPHAL & S. W. HELL, Nanoscale resolution in the focal plane of an optical microscope, *Physical Review Letters* **94**, p. 143903, 2005, et V. WESTPHAL, J. SEEGER, T. SALDITT & S. W. HELL, Stimulated emission depletion microscopy on lithographic microstructures, *Journal of Physics B* **38**, pp. S695–S705, 2005. Cité en page [118](#).
- 85** A. D. ERLYKIN & A. W. WOLFENDALE, The origin of cosmic rays, *European Journal of Physics* **20**, pp. 409–418, 1999, Cité en page [125](#).
- 86** D. SINGLETON, Electromagnetic angular momentum and quantum mechanics, *American Journal of Physics* **66**, pp. 697–701, 1998, Cité en page [69](#).
- 87** A. YAZDANI, D. M. EIGLER & N. D. LANG, Off-resonance conduction through atomic wires, *Science* **272**, pp. 1921–1924, 28 juin 1996. Pour l'aluminium, l'or, le plomb, le niobium, ainsi que l'influence des propriétés chimiques, lisez ELKE SCHEER, The signature of chemical valence in the electric conduction through a single-atom contact, *Nature* **394**, pp. 154–157, 9 juillet 1998. Cité en page [51](#).
- 88** Lisez L. KOWALSKI, A myth about capacitors in series, *The Physics Teacher* **26**, pp. 286–287, 1988, et A. P. FRENCH, Are the textbook writers wrong about capacitors?, *The Physics Teacher* **31**, pp. 156–159, 1993. Cité en page [51](#).
- 89** Ce problème a été suggéré par Vladimir Surdin. Cité en page [121](#).
- 90** Consultez par exemple J. M. AGUIRREGABIRIA, A. HERNANDEZ & M. RIVAS, Velocity fields inside a conducting sphere near a slowly moving charge, *American Journal of Physics* **62**, pp. 462–466, 1994. Cité en page [146](#).
- 91** PHILIP COHEN, Open wide, this won't hurt a bit, *New Scientist* p. 5, 3 février 1996. Cité en page [147](#).
- 92** Une telle revendication fut implicitement faite par D. MUGNAI, A. RANFAGNI & R. RUGGIERI, Observation of superluminal behaviors in wave propagation, *Physical Review Letters* **84**, p. 4830, 2000. Une excellente explication et une réfutation furent apportées par W. A. RODRIGUES, D. S. THOBER & A. L. XAVIER, Causal explanation for observed superluminal behavior of microwave propagation in free space, arxiv.org/abs/physics/0012032. Cité en page [122](#).
- 93** J. E. AVRON, E. BERG, D. GOLDSMITH & A. GORDON, Is the number of photons a classical invariant?, *European Journal of Physics* **20**, pp. 153–159, 1999. Cité en page [148](#).

- 94** Si vous voulez mieux vous rendre compte de la manière dont le monde apparaît aux différents types de daltoniens, jetez un œil sur les pages Web webexhibits.org/causesofcolor/2.html ou www.vischeck.com/examples. Cité en page 122.
- 95** Si vous voulez en lire plus sur ce sujet, consultez l'ouvrage classique de WARREN J. SMITH, *Modern Optical Engineering : the Design of Optical Systems*, 3rd edition, McGraw-Hill, 2000. Cité aux pages 93 et 123.
- 96** Les spécialistes mondiaux de la physique de l'éclair sont russes, pour la plupart. En voici deux excellents ouvrages : VLADIMIR A. RAKOV & MARTIN A. UMAN, *Lightning : Physics and Effects*, Cambridge University Press, 2003, et EDUARD M. BAZELYON & YURI P. RAIZER, *Lightning Physics and Lightning Protection*, Institute of Physics Publishing, 2000. Cité en page 127.
- 97** Concernant la longue vie passionnée qui anima Luke Howard, lisez le livre de RICHARD HAMBLYN, *The Invention of Clouds*, Macmillan 2001. Cité en page 127.
- 98** J. LATHAM, The electrification of thunderstorms, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 107, pp. 277–289, 1981. Pour un tour d'horizon plus récent et plus large, consultez EARLE R. WILLIAMS, The tripole structure of thunderstorms, *Journal of Geophysical Research* 94, pp. 13151–13167, 1989. Lisez également le livre de la NATIONAL RESEARCH COUNCIL STAFF, *The Earth's Electrical Environment*, Studies in Geophysics, National Academy Press, 1986. Cité en page 127.
- 99** A. V. GUREVICH & K. P. ZYBIN, Runaway breakdown and the mysteries of lightning, *Physics Today* 58, pp. 37–43, mai 2005. Cité en page 127.
- 100** Pour en savoir plus sur les courants atmosphériques, jetez un coup d'œil au travail de vulgarisation de l'étude américaine mené par E. A. BERING, A. A. FEW & J. R. BENBROOK, The global electric circuit, *Physics Today* 51, pp. 24–30, octobre 1998, ou la synthèse plus technique de E. BERING, *Reviews of Geophysics* (supplement) 33, p. 845, 1995. Cité en page 129.
- 101** L'utilisation des résonances de Schumann dans le condensateur que représente l'ionosphère terrestre, pour ce domaine de recherche, est expliquée dans K. SCHLEGEL & M. FÜLLERKRUG, Weltweite Ortung von Blitzen, *Physik in unserer Zeit* 33, pp. 257–261, 2002. Cité en page 129.
- 102** J. R. DWYER, M. A. UMAN, H. K. RASSOUL, M. AL-DAYEH, E. L. CARAWAY, J. JERAULD, V. A. RAKOV, D. M. JORDAN, K. J. RAMBO, V. CORBIN & B. WRIGHT, Energetic radiation produced by rocket-triggered lightning, *Science* 299, pp. 694–697, 2003. Cité en page 129.
- 103** J. R. DWYER, A fundamental limit on electric fields in air, *Geophysical Research Letters* 30, p. 2055, 2003. Cité en page 129.
- 104** B. M. SMIRNOV, Physics of ball lightning, *Physics Reports* 224, pp. 151–236, 1993. Lisez aussi D. FINKELSTEIN & J. RUBINSTEIN, Ball lightning, *Physical Review* 135, pp. 390–396, 1964. Une simple recherche sur la Toile mondiale vous permet d'en savoir plus sur les légendes et les croyances colportées sur ce sujet. Cité en page 130.
- 105** G. D. SHABANOV, The optical properties of long-lived luminous formations, *Technical Physics Letters* 28, pp. 164–166, 2002, A. I. EGOROV & S. I. STEPANOV, Long-lived plasmons produced in humid air as analogues of ball lightning, *Technical Physics* 47, pp. 1584–1586, 2002, A. E. EGOROV, S. I. STEPANOV & G. D. SHABANOV, Laboratory demonstration of ball lightning, *Physics Uspekhi* 47, pp. 99–101, 2004, et G. D. SHABANOV & B. YU. SOKOLOVSKII, Macroscopic separation of charges in a pulsed electric discharge, *Plasma Physics Reports* 31, pp. 512–518, 2005. (Ce sont tous des traductions anglaises

- d'articles antérieurs en langue russe.) Consultez les sites Web biod.pnpi.spb.ru/pages_ru/Stepanov/index.html, stealthtank.narod.ru, balllightning.narod.ru/hvewd.html et www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/presse/pi/05_06_pi.html, pour avoir plus de précisions et voir des films spectaculaires. Cité en page 131.
- 106** G. SILVA PAIVA, A. C. PAVÃO, E. ALPES DE VASCONCELOS, O. MENDES & DA SILVA, Production of ball-lightning-like luminous balls by electrical discharges in silicon, *Physics Review Letters* **98**, p. 048501, 2007. Cité en page 131.
- 107** Lisez la synthèse récente de S. PARROTT, arxiv.org/abs/gr-qc/9711027. Lisez aussi T. A. ABBOTT & D. J. GRIFFITHS, Acceleration without radiation, *American Journal of Physics* **53**, pp. 1203–1211, 1985. Consultez également A. KOVETZ & G. E. TAUBER, Radiation from an accelerated charge and the principle of equivalence, *American Journal of Physics* **37**, pp. 382–385, 1969. Cité en page 131.
- 108** C. DE ALMEIDA & A. SAA, The radiation of a uniformly accelerated charge is beyond the horizon : a simple derivation, *American Journal of Physics* **74**, pp. 154–158, 2006. Cité en page 131.
- 109** J. ZHANG, X. D. SONG, Y. C. LI, P. G. RICHARDS, X. L. SUN & F. WALDHAUSER, Inner core differential motion confirmed by earthquake doublet waveform doublets, *Science* **309**, pp. 1357–1360, 2005. Cité en page 133.
- 110** On déduit cela à partir des mesures de $g - 2$, comme l'a expliqué le Prix Nobel suivant lors de son discours : HANS DEHMELT, Experiments with an isolated subatomic particle at rest, *Reviews of Modern Physics* **62**, pp. 525–530, 1990, et dans HANS DEHMELT, Is the electron a composite particle ?, *Hyperfine Interactions* **81**, pp. 1–3, 1993. Cité en page 133.
- 111** L'article qui suit en constitue une introduction succincte et excellente, F. ROHRLICH, The self-force and radiation reaction, *American Journal of Physics* **68**, pp. 1109–1112, 2000. Cité en page 134.
- 112** C. G. TSAGAS, Magnetic tension and the geometry of the universe, *Physical Review Letters* **86**, pp. 5421–5424, 2001. Un tour d'horizon du sujet en est donné dans C. G. TSAGAS, Geometrical aspects of cosmic magnetic fields, arxiv.org/abs/gr-qc/0112077. Cité en page 134.
- 113** Une excellente synthèse en est fournie par E. H. BRANDT, Levitation in Physics, *Science* **243**, pp. 349–355, 1989. Cité aux pages 134 et 137.
- 114** Lisez l'article de R. TUCKERMANN, S. BAUERECKER & B. NEIDHART, Levitation in Ultraschallfeldern – Schwebende Tröpfchen, *Physik in unserer Zeit* **32**, pp. 69–75, février 2001. Des gouttes de liquide de 1 g ont été mises en lévitation de cette manière. Cité en page 135.
- 115** F. C. MOON & P. Z. CHANG, *Superconducting Levitation – Applications to Bearings and Magnetic Transportation*, Wiley & Sons, 1994. Cité aux pages 135 et 136.
- 116** W. T. SCOTT, Who was Earnshaw ?, *American Journal of Physics* **27**, pp. 418–419, 1959. Cité en page 135.
- 117** L'astuce consiste à montrer que $\text{div } \mathbf{E} = 0$, $\text{curl } \mathbf{E} = 0$, donc $\mathbf{E} \nabla^2 \mathbf{E} = 0$ et, à partir de cela, $\nabla^2 E^2 \geq 0$. Il n'y a donc pas de maxima du champ électrique local en l'absence de charges libres. La même démonstration s'applique pour le champ magnétique. Cependant, des corps dotés de constantes diélectriques *inférieures* à leur environnement *peuvent* être mis en lévitation dans des champs électriques statiques. Les bulles de gaz dans des liquides en sont un exemple, comme l'ont montré T. B. JONES & G. W. BLISS, Bubble dielectrophoresis, *Journal of Applied Physics* **48**, pp. 1412–1417, 1977. Cité en page 135.
- 118** Néanmoins, il est possible de faire léviter des aimants si nous utilisons une combinaison de matériaux diamagnétiques. Lisez A. K. GEIM, M. D. SIMON, M. I. BOAMFA &

- L. O. HEFLINGER, Magnet levitation at your fingertips, *Nature* **400**, pp. 323–324, 1999. Cité en page [136](#).
- 119** Les premières photographies d'un unique *ion* furent montrées dans W. NEUHAUSER, M. HOHENSTATT, P. E. TOSCHEK & H. DEHMELT, Localized visible Ba⁺ mono-ion oscillator, *Physical Review A* **22**, pp. 1137–1140, 1980. Lisez aussi D. J. WINELAND & W. M. ITANO, *Physics Letters A* **82**, p. 75, 1981, ainsi que F. DIETRICH & H. WALTER, *Physical Review Letters* **58**, p. 203, 1987.
Pour des *atomes* seuls, regardez les photographies données dans Z. HU & H. J. KIMBLE, *Optics Letters* **1**, p. 1888, 1994, F. RUSCHEWITZ, D. BETTERMANN, J. L. PENG & W. ERTMER, *Europhysics Letters* **34**, p. 651, 1996, D. HAUBRICH, H. SCHADWINKEL, F. STRAUCH, B. UEBERHOLZ, R. WYNANDS & D. MESCHÉDE, *Europhysics Letters* **34**, p. 663, 1996. Cité en page [136](#).
- 120** Lisez par exemple MARK BUCHANAN, And God said...let there be levitating strawberries, flying frogs and humans that hover over Seattle, *New Scientist* pp. 42–43, 26 juillet 1997, ou C. WU, Floating frogs, *Science News* **152**, pp. 632–363, 6 décembre 1997, et C. WU, Molecular magnetism takes off, *Physics World*, avril 1997, p. 28. Les expériences d'Andre Geim, Jan Kees Maan, Humberto Carmona et Peter Main furent rendues publiques par P. RODGERS, *Physics World* **10**, p. 28, 1997. Certains de ces résultats se trouvent dans M. V. BERRY & A. K. GEIM, Of flying frogs and levitrons, *European Journal of Physics* **18**, pp. 307–313, 1997. Consultez également leur site Web www.hfml.science.ru.nl/levitate.html. Cité en page [137](#).
- 121** Ce célèbre jouet, baptisé « Levitron », permet de mettre en œuvre la lévitation sans utiliser une quelconque source d'énergie. Il *ne fut pas* inventé par Bill Hones de la Fascination Toys & Gifts à Seattle, comme l'explique le site Web www.levitron.com. Ce joujou est analysé par RON EDGE, Levitation using only permanent magnets, *Physics Teacher* **33**, p. 252, avril 1995. Il est également discuté par M. V. BERRY, The LevitronTM : an adiabatic trap for spins, *Proceedings of the Royal Society A* **452**, pp. 1207–1220, 1996 (lors de la période de notoriété de Berry), ainsi que par M. D. SIMON, L. O. HEFLINGER & S. L. RIDGEWAY, Spin stabilized magnetic levitation, *American Journal of Physics* **65**, pp. 286–92, 1997, et par T. B. JONES, M. WASHIZU & R. GANS, Simple theory for the Levitron, *Journal of Applied Physics* **82**, pp. 883–889, 1997. Cité en page [137](#).
- 122** Le tour du foret et la conception d'un Levitron sont décrits dans la magnifique retranscription du cours de JOSEF ZWÉCK, *Physik im Alltag*, Skript zur Vorlesung im WS 1999/2000 der Universität Regensburg. Cité en page [137](#).
- 123** La prédiction concernant la lévitation quantifiée est due à STEPHEN B. HALEY, Length quantization in levitation of magnetic microparticles by a mesoscopic superconducting ring, *Physical Review Letters* **74**, pp. 3261–3264, 1995. Ce sujet est discuté de façon plus détaillée dans STEPHEN B. HALEY, Magnetic levitation, suspension, and superconductivity : macroscopic and mesoscopic, *Physical Review B* **53**, p. 3506, 1996, et avec un tout autre ordre de grandeur dans STEPHEN B. HALEY, Quantized levitation of superconducting multiple-ring systems, *Physical Review B* **53**, p. 3497, 1996, ainsi que STEPHEN B. HALEY, Quantized levitation by multiply-connected superconductors, LT-21 Proceedings, in *Czechoslovak Journal of Physics* **46**, p. 2331, 1996. En 1998, il n'y avait toujours pas de confirmation expérimentale (Stephen Haley, communication privée). Cité en page [137](#).
- 124** Des descriptions détaillées d'un grand nombre de ces effets peuvent être compulsées dans l'excellente synthèse éditée par MANFRED VON ARDENNE, GERHARD MUSIOL & SIEGFRIED REBALL, *Effekte der Physik und ihre Anwendungen*, Harri Deutsch, 2004. Cité en page [138](#).

- 125** R. BUDDAKIAN, K. WENINGER, R. A. HILLER & SETH J. PUTTERMAN, Picosecond discharges and stick-slip friction at a moving meniscus of mercury in glass, *Nature* **391**, pp. 266–268, 15 janvier 1998. Lisez aussi *Science News* **153**, p. 53, 24 janvier 1998. Cité en page [138](#).
- 126** HENK SWAGTEN & REINDER COEHOORN, Magnetische tunneljuncties, *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde* **64**, pp. 279–283, novembre 1998. Cité en page [139](#).
- 127** H. OHNO, D. CHIBA, F. MATSUKURA, T. OMIYA, E. ABE, T. DIETL, Y. OHNO & K. OHTANI, Electric-field control of ferromagnetism, *Nature* **408**, pp. 944–946, 21-28 décembre 2000. Cité en page [139](#).
- 128** Cet effet fut découvert par GEERT RIKKEN, BART VAN TIGGELEN & ANJA SPARENBERG, Lichtverstrooiing in een magneetveld, *Nederlands tijdschrift voor natuurkunde* **63**, pp. 67–70, mars 1998. Cité en page [140](#).
- 129** VITALIJ PECHARSKY & KARL A. GSCHNEIDNER, Giant magnetocaloric effect in Gd₅(Si₂Ge₂), *Physical Review Letters* **78**, pp. 4494–4497, 1995, et, par les mêmes auteurs, Tunable magnetic regenerator alloys with a giant magnetocaloric effect for magnetic refrigeration from ~20 to ~2990 K, *Applied Physics Letters* **70**, p. 3299, 1997. Cité en page [140](#).
- 130** J. WEISSMÜLLER, R. N. VISWANATH, D. KRAMER, P. ZIMMER, R. WÜRSCHUM & H. GLEITER, Charge-induced reversible strain in a metal, *Science* **300**, pp. 312–315, 11 avril 2003. Cité en page [141](#).
- 131** A. AJDARI, Electro-osmosis on inhomogeneously charged surfaces, *Physical Review Letters* **75**, pp. 755–758, 1995. Cité en page [141](#).
- 132** M. J. AITKEN, *Thermoluminescence Dating*, Academic Press, 1985. Cependant, la précision de cette méthode est bien plus mauvaise que la datation au C14, comme l'indique H. HUPPERTZ, *Thermolumineszenzdatierung : eine methodologische Analyse aufgrund gesicherter Befunde*, Peter Lang Verlag, 2000. Cité en page [143](#).
- 133** Cet effet fut révélé par J. N. HUIBERTS, R. GRIESSEN, J. H. RECTOR, R. J. WIJNGARDEN, J. P. DEKKER, D. G. DE GROOT & N. J. KOEMAN, Yttrium and lanthanum hydride films with switchable optical properties, *Nature* **380**, pp. 231–234, 1996. Une bonne introduction en est donnée dans R. GRIESSEN, Schaltbare Spiegel aus Metallhydriden, *Physikalische Blätter* **53**, pp. 1207–1209, 1997. Cité en page [144](#).
- 134** Consultez n'importe quel ouvrage sur la thermostatique, tel que LINDA REICHL, *A Modern Course in Statistical Physics*, Wiley, 2nd edition, 1998. Cité en page [145](#).
- 135** Le Soleil émet environ $4 \cdot 10^{26}$ W à partir de sa masse de $2 \cdot 10^{30}$ kg, soit à peu près 0,2 mW/kg. Une personne ayant une masse moyenne de 75 kg émet environ 100 W (vous pouvez vérifier cela au lit la nuit), c'est-à-dire à peu près 500 fois plus. Cité en page [146](#).
- 136** Consultez son site Web www.cie.co.at/index_ie.html. Cité en page [118](#).
- 137** P. D. JONES, M. NEW, D. E. PARKER, S. MARTIN & I. G. RIGOR, Surface air temperature and its changes over the past 150 years, *Reviews of Geophysics* **37**, pp. 173–199, mai 1999. Cité en page [119](#).
- 138** Des images d'objets portés au rouge dans un four brûlant et à température ambiante sont montrées dans C. H. BENNETT, Demons, engines and the second law, *Scientific American* **255**, pp. 108–117, novembre 1987. Cité en page [120](#).
- 139** BILL MCGUIRE, *A Guide to the End of the World : Everything You Never Wanted to Know*, Oxford University Press, 2002. Sur les catastrophes du passé, lisez l'introduction donnée par TONY HALLAM, *Catastrophes and Lesser Calamities – the Causes of Mass Extinctions*, Oxford University Press, 2004. Cité en page [154](#).

- 140** Lisez par exemple le magnifique ouvrage de STEPHEN C. STEARNS & ROLF F. HOEKSTRA, *Evolution : An Introduction*, Oxford University Press, 2000. Concernant le récit fascinant de l'évolution, pour des non-spécialistes, consultez RICHARD FORTEY, *Life – An Unauthorized Biography*, Harper Collins, 1997, et aussi MENNO SCHILTHUIZEN, *Frogs, Flies & Dandelions – the Making of Species*, Oxford University Press, 2001. Consultez aussi STEPHEN J. GOULD, *Le Pouce du panda*, Grasset, 1982, un des multiples ouvrages intéressants et instructifs sur la biologie de l'évolution, rédigé par le meilleur auteur dans ce domaine. Un aperçu didactique sur les résultats de l'évolution, dont l'arbre généalogique aux nombreuses ramifications qu'elle a engendré, en est donné sur le site phylogeny.arizona.edu/tree. Concernant les résultats de l'évolution des êtres humains, lisez le texte pertinent de K. KUSCH & S. KUSCH, *Der Mensch in Zahlen*, Spektrum Akademischer Verlag, 2nd edn., 2000. L'œuvre historique de CHARLES DARWIN, *L'Origine des espèces*, peut être consultée sur le Web, par exemple sur les sites abu.cnam.fr/cgi-bin/go?especel, entisoft.earthlink.net/origspec.htm et sur www.darwin-online.org.uk. Cité en page 160.
- 141** Une description élémentaire en est donnée par MALCOLM ROSS MACDONALD, *The Origin of Johnny*, Jonathan Cape, 1976. Cité en page 160.
- 142** RICHARD BANDLER, *Using Your Brain for a Change*, Real People Press, p. 18, 1985. Cité en page 161.
- 143** Les spécialistes ne sont pas d'accord sur la datation précise de cette expérience. Certains disent que seule la naissance elle-même constitue cet instant. Toutefois, il existe plusieurs méthodes usuelles qui permettent de faire ressurgir des souvenirs antérieurs, même avant la naissance. L'une d'entre elles est décrite et employée par J. K. STETTbacher, *Making Sense of Suffering*, Penguin, New York, 1991, traduit de l'original allemand. Des exemples encore plus impressionnants sont cités par N. J. MAYER, *Der Kainkomplex – neue Wege der systemischen Familientherapie*, Integral Verlag, 1998. Cité en page 161.
- 144** SANJIDA O'CONNELL, *Mindreading – How We Learn to Love and Lie*, Arrow, 1998. Ce livre intéressant décrit l'importance du mensonge dans le développement d'un être humain, et explique les troubles du comportement qu'ont ceux qui ne peuvent pas lire dans les pensées des autres et qui ne peuvent donc pas mentir, tels que les autistes. Cité aux pages 162 et 201.
- 145** L'approche consistant à décrire les observations comme des parties en relation est dénommée le structuralisme. Le point de départ de ce mouvement fut donné par le *Cours de linguistique générale* de de Saussure (lisez la note de la page 174). De nombreux penseurs ont tenté d'utiliser la même approche en philosophie, en mythologie et dans la théorie de la littérature, quoique ce fût avec un succès mitigé. Un aperçu de la réussite (modeste) du structuralisme en linguistique et de ses échecs dans d'autres domaines est donné par L. JACKSON, *The Poverty of Structuralism : Literature and Structuralist Theory*, Longman, 1991. L'auteur argue que lorsque nous réduisons les systèmes aux seules interactions, nous négligeons le contenu et les propriétés spécifiques aux éléments du système, et cette approche ne permet pas d'avoir une compréhension globale du système considéré. Cité en page 162.
- 146** Pour une vision des aptitudes mentales, distincte de celle de Piaget (décrite à la page 163), un auteur actuellement très en vogue est le psychologue expérimentateur soviétique Lev Vigotsky, dont les idées anticonformistes et la vie tumultueuse sont décrites, par exemple, dans LEV VIGOTSKY, *Mind in Society*, Harvard University Press, 1978, ou dans RENÉ VAN DER VEER & JAAN VALSINER, *Understanding Vigotsky : a Quest for Synthesis*, Blackwell Publishers, 1994. Des ressources plus profondes peuvent être trouvées dans le vaste travail de RENÉ VAN DER VEER & JAAN VALSINGER, *The Vigotsky Reader*, Blackwell, 1994. Cité en page 163.

- 147** Le magnifique ouvrage de BRUNO BETTELHEIM, *The Uses of Enchantment : the Meaning and Importance of Fairy Tales*, Knopf, 1976, est une source, dans une certaine mesure non conventionnelle, pour obtenir plus de précisions. Cité en page 163.
- 148** Le livre de MANFRED SPITZER, *Lernen – Gehirnforschung und Schule des Lebens*, Elsevier, 2007, en est une introduction élémentaire. Cité en page 165.
- 149** Cité dans V. HARLEN, R. RAPPMANN & P. SCHATA, *Soziale Plastik – Materialien zu Joseph Beuys*, Achberger Verlag, 1984, p. 61. Cité en page 165.
- 150** Les problèmes qui surgissent lorsque nous perdons l'aptitude à classer ou à mémoriser sont développés dans le beau livre du neurologue OLIVER SACKS, *L'Homme qui prenait sa femme pour un chapeau et autres récits cliniques*, Seuil, 1992, qui énumère de nombreux cas d'étude qu'il a rencontrés au cours de sa carrière. Des cas plus surprenants sont collectés dans son ouvrage tout aussi impressionnant *Un Anthropologue sur Mars*, Seuil, 1996.
Lisez aussi le magnifique ouvrage de DONALD D. HOFFMAN, *Visual Intelligence – How We Create What We See*, W.W. Norton & Co., 1998, et le site Web qui lui est associé www.cogsci.uci.edu/personnel/hoffman/hoffman.html. Cité aux pages 165 et 168.
- 151** Pour une introduction passionnante sur les relations entre le langage et le cerveau selon un point de vue chomskien, lisez l'ouvrage à succès de STEVEN PINKER, *The Language Instinct – How the Mind Creates Language*, Harper Perennial, 1994. La phrase sur l'idée verte est débattue dans un chapitre de ce livre. Cité aux pages 165, 207 et 226.
- 152** Voici une introduction à la neurologie : JOSEPH LEDOUX, *Synaptic Self : How Our Brains Become Who We Are*, Viking Press, 2002. Cité en page 166.
- 153** Un tour d'horizon de l'état de la recherche sur l'origine de la bipédie est exposé par B. WOOD, Four legs good, two legs better, *Nature* 363, pp. 587–588, 17 juin 1983. Cité en page 166.
- 154** La référence JAMES A. ANDERSON, *An Introduction to Neural Networks*, MIT Press, 1995, est une excellente introduction à l'étude des classificateurs. Une introduction à l'informatique théorique en est donnée dans J. GLENN BROOKSHEAR, *Computer Science, An Overview*, 6th edition, Addison Wesley, 2000, ou dans RICK DECKER & STUART HIRSHFIELD, *The Analytical Engine : An Introduction to Computer Science Using the Internet*, Brooks/Cole Publishers, 1998. Cité en page 166.
- 155** Vous trouverez plus d'informations sur les connexions entre l'entropie et les ordinateurs dans l'article de référence de R. LANDAUER, Irreversibility and heat generation in the computing process, *IBM Journal of Research and Development* 5, pp. 183–191, 1961, et dans C. H. BENNETT & R. LANDAUER, The fundamental physical limits of computation, *Scientific American* 253, pp. 48–56, 1985. Cité en page 170.
- 156** W. H. ZUREK, Thermodynamic cost of computation, algorithmic complexity and the information metric, *Nature* 341, pp. 119–124, 14 août 1989. Cité en page 170.
- 157** L. SZILARD, Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen, *Zeitschrift für Physik* 53, p. 840, 1929. Ce classique peut également être consulté en traduction anglaise dans les œuvres choisies de Leo Szilard. Cité en page 170.
- 158** J. J. HOPFIELD, *Nature* 376, pp. 33–36, 1995. Cet article rédigé par l'un des pères fondateurs de ce domaine expose une possibilité selon laquelle la *synchronisation* des signaux nerveux pourrait également transporter de l'information, au lieu de la fréquence des impulsions généralement présumée. Cité en page 170.
- 159** Les propriétés détaillées de la forme des impulsions des neurones sont merveilleusement décrites dans l'article de M. MAHOWALD & R. DOUGLAS, A silicon neuron, *Nature* 354,

- pp. 515–518, 19-26 décembre 1991, dans lequel ils montrent comment reproduire le comportement électrique d'un neurone en utilisant un circuit sur silicium. Cité en page 170.
- 160** A. MECHELLI, J. T. CRINION, U. NOPPENNEY, J. O' DOBERTY, J. ASHBURNER, R. S. FRACKOWIAK & C. J. PRICE, *Neurolinguistics : structural plasticity in the bilingual brain*, *Nature* 431, p. 757, 2004. Cité en page 171.
- 161** La discussion de savoir si le cerveau est ou n'est pas supérieur à un ordinateur est magnifiquement résumée par G. VOLLMER, *Algorithmen, Gehirne, Computer – Was sie können und was sie nicht können, Teil I und Teil II*, *Naturwissenschaften* 78, p. 481, 1991, et 78, pp. 533–542, 1991. Cité en page 172.
- 162** Cependant, le dictionnaire disponible le plus vaste est celui de la langue hollandaise, avec les 40 volumes du *Wordenboek der Nederlandsche Taal*, qui sortirent entre 1864 et 1998. Il possède environ 400 000 entrées. Cité en page 176.
- 163** Cette liste ainsi que la remarque sur la découverte des concepts proviennent d'une communication personnelle d'Anna Wierzbicka. Une liste plus longue est publiée dans son livre *Semantics, Primes and Universals*, Oxford University Press, 1996. Cité aux pages 176 et 198.
- 164** W. S. HATCHER, *Foundations of Mathematics*, W.B. Saunders Co., Philadelphia, 1968. Il y a aussi l'article de P. J. COHEN & R. HERSCH, *Non-Cantorian set theory*, *Scientific American* 217, pp. 104–116, 1967. Cohen fut le mathématicien qui démontra en 1963 que la négation de l'hypothèse du continu pouvait être ajoutée aux axiomes de la théorie des ensembles tout en produisant encore une théorie cohérente, il qualifia ces ensembles de *non cantoriens*. Cité en page 182.
- 165** Lisez l'article admirable de I. STEWART, *Fair shares for all*, *New Scientist*, pp. 42–46, 17 juin 1995. Cité en page 182.
- 166** La preuve de l'indépendance de l'hypothèse du continu se fait en deux temps. Premièrement, Kurt Gödel démontra en 1940 qu'un axiome peut logiquement être ajouté à la théorie des ensembles ZFC de telle sorte que l'hypothèse du continu soit correcte. Puis, en 1963, Paul Cohen montra qu'un axiome peut logiquement être ajouté à la théorie des ensembles ZFC de telle sorte que l'hypothèse du continu soit fausse. Cité en page 184.
- 167** RUDY RUCKER, *Infinity and the Mind – the Science and Philosophy of the Infinite*, Bantam, Toronto, 1983. Cité en page 185.
- 168** Cette division générale des mathématiques est très bien expliquée dans l'ouvrage de PIERRE BASIEUX, *Die Architektur der Mathematik – Denken in Strukturen*, Rororo, 2000. Cité en page 186.
- 169** Ce problème est traité dans THOMAS D'AQUIN, *Somme théologique*, à la question 52 de la première partie. Le texte complet, de plusieurs milliers de pages, peut être compulsé sur les sites Web docteurangelique.free.fr (en français) www.newadvent.org (en anglais). Nous y reviendrons dans la partie sur la théorie quantique, dans la section sur le principe d'exclusion de Pauli. Il semble que cette question tout entière ait ressurgi dans PIERRE LOMBARD, *Liber Sententiarum* v. 1150. Cité en page 187.
- 170** B. C. GALLIVAN, *How to fold paper in half twelve times : an « impossible challenge » solved and explained*, Historical Society of Pomona Valley, 2002, que l'on trouve également sur www.osb.net/Pomona/12times.htm. Lisez aussi www.sciencenews.org/20040124/mathtrek.asp. Cité en page 187.
- 171** I. STEWART, *Daisy, daisy, give me your answer, do*, *Scientific American*, pp. 76–79, janvier 1995. Cet article instructif explique comment la croissance des plantes conduit généralement à des fleurs dont le nombre de pétales est tiré de la suite de Fibonacci 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, etc. (La figure située à la page 171 en est un exemple.) Les écarts à cette

Page ??

- règle idéale sont également expliqués. Le travail initiateur correspond aux deux articles de S. DOUADY & Y. COUDER, La physique des spirales végétales, *La Recherche* 24, pp. 26–36, 1993, et Phyllotaxis as a self-organized growth process, dans *Growth Patterns in Physical Sciences and Biology*, édité par J.M. GARCIA-RUIZ & al., Plenum Press, 1993. Cité en page 187.
- 172** H. DAVSON, *The Eye*, Academic Press, 1962. Cité en page 188.
- 173** Consultez le site Web akbar.marlboro.edu/~mahoney/cube/NxN.txt. Cité en page 188.
- 174** Une introduction aux nombres surréels est donnée par l'article de POLLY SHULMAN, Infinity plus one, and other surreal numbers, *Discover*, pp. 99–105, décembre 1995. Il y a aussi le texte de D. KNUTH, *Surreal Numbers : How two ex-Students Turned on to Pure Mathematics and Found Total Happiness*, Addison Wesley, 1974, ou www-cs-faculty.stanford.edu/~knuth/sn.html. Les références généralement citées sur ce sujet incluent JOHN H. CONWAY, *On Numbers and Games*, Academic Press, 1976, E. R. BERLEKAMP, J. H. CONWAY & R. K. GUY, *Winning Ways for Your Mathematical Plays, Volume I: Games in General*, Academic Press, 1982, et H. GONSHOR, *An Introduction to Surreal Numbers*, Cambridge University Press, 1986. Cité aux pages 189 et 190.
- 175** Ce magnifique problème est traité par IAN STEWART, A bundling fool beats the wrap, *Scientific American*, pp. 109–111, juin 1993. En quatre dimensions, nous savons que la solution se situe quelque part entre 50 000 et 100 000, tandis qu'on conjecture que la réponse dans la cinquième dimension est « jamais ». Cité en page 191.
- 176** A. PAIS, *Niels Bohr's Times : in Physics, Philosophy and Polity*, Oxford University Press, 1991, page 176. Cité en page 191.
- 177** EUGENE WIGNER, *Symmetries and Reflections*, Indiana University Press, 1962. Cité en page 191.
- 178** ALFRED TARSKI, *Introduction to Modern Logic*, Dover, 1946. Lisez aussi le célèbre livre pour enfants du mathématicien et photographe LEWIS CARROLL, *Alice au pays des merveilles*. Cité en page 193.
- 179** GÖRAN WIKELL, The layout of digits on pushbutton telephones – a review of the literature, *Tele* 34, pp. 34–42, 1982. Cité en page 194.
- 180** Un tour d'horizon clair de la philosophie des sciences, souvent appelée *épistémologie*, sans détails superflus, est donné par ROBERT BLANCHÉ, *L'Épistémologie*, Presses Universitaires de France, 1972. Cité en page 196.
- 181** Sur les différents aspects de l'aptitude des propositions générales à être réfutées, il est d'usage de citer le travail de l'épistémologue Karl Popper (1902–1994), plus particulièrement son long livre harassant *Logik der Forschung*, publié pour la première fois en 1934. La raison de cette lassitude est que le travail de Popper est simplement une remise au goût du jour des idées de Pierre Duhem. Cité en page 202.
- 182** Pour une bonne méthode permettant de faire liquéfier du sang, lisez L. GARLASHELLI, F. RAMACCINI & S. DELLA SCALA, Working bloody miracles, *Nature* 353, p. 507, 1991. Le *Grand Dictionnaire universel du XIX^e siècle*, de PIERRE LAROUSSE, contient également une recette, qui fut à nouveau montrée au public dans les années 1980 par Henri Broch. L'ouvrage classique de HARRY HOUDINI, *Miracle Mongers and their Methods*, Prometheus Books, Buffalo, 1981, est splendide. L'original, écrit en 1920 par le magicien mondialement célèbre appelé « le Grand Houdini », est également disponible sur le site Web etext.lib.virginia.edu/toc/modeng/public/HouMirM.html. Les statues indiennes qui boivent du lait étaient courantes dans le monde en 1994 et 1995. Concernant les guérisseurs, lisez JAMES RANDI, *Flim-flam !*, Prometheus Books, Buffalo, New York, 1987, et l'excellent ou-

- vrage de HANS CONRAD ZANDER, *Warum ich Jesus nicht leiden kann*, Rowohlt, 1994. Cité en page 203.
- 183** ROGER PENROSE, *The Road to Reality : A Complete Guide to the Laws of the Universe*, Jonathan Cape, 2004, p. 378. Cité en page 223.
- 184** JOHN HORGAN, *The End of Science – Facing the Limits of Knowledge in the Twilight of the Scientific Age*, Broadway Books, 1997, pp. 31–32, et chapitre 2, note 2. Cité aux pages 206 et 223.
- 185** Lisez le livre de GREGORY J. CHAITIN, *The Limits of Mathematics*, Springer Verlag, 1997, pour avoir une opinion complètement opposée à celle exposée ici. Ce livre est également décrit sur le site Web de l’auteur www.cs.auckland.ac.nz/CDMTCS/chaitin/lm.html, parmi ses autres travaux. Chaitin a consacré la majorité de sa vie aux questions débattues dans cette section, particulièrement sur la calculabilité. Cité en page 207.
- 186** Lisez le livre de J. BARWISE & J. ETCHEMENDY, *The Liar*, Oxford University Press, New York, 1987. Cité en page 207.
- 187** Cette définition (proposition 4.11) et de nombreuses autres propositions sur la science se trouvent dans le texte magnifique et célèbre à juste titre de LUDWIG WITTGENSTEIN, *Tractatus logico-philosophicus*, Suhrkamp, 1963. Il fournit un résumé condensé des fondements de la science, de la pensée et du langage dans une collection de phrases hautement structurées et numérotées. Cité aux pages 210 et 216.
- 188** Lisez M. DRESDEN, The Klopsteg memorial lecture, *American Journal of Physics* **66**, pp. 468–482, 1998. Cité en page 211.
- 189** Parmi les ouvrages notoires, nous avons par exemple FRIEDRICH KOHLRAUSCH, *Praktische Physik*, Teubner, 24. Auflage, 1996. Cité en page 211.
- 190** Les résultats sont décrits par exemple dans L. BERGMANN & C. SCHÄFER, *Lehrbuch der Experimentalphysik*, Band I, II, III und IV, W. de Gruyter. Cité en page 211.
- 191** LANDOLT-BÖRNSTEIN, édité par K. -H. HELLEWEGE & O. MADELUNG, *Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik*, Neue Serie, Springer Verlag, Berlin, 1984. Cette collection de plus de cent volumes contient toutes les observations importantes faites en physique. Cité en page 211.
- 192** La source de cette attribution incorrecte se trouve dans le livre de GERHARD SZCZESNY, *Brecht, Leben des Galilei – Dichtung und Wirklichkeit*, Ullstein, Berlin 1966, p. 6. Cette déclaration n’a jamais été faite par Galilée, ce problème a été longuement débattu dans les cercles de spécialistes, par exemple par F. KLEINERT, "Messen was meßbar ist" - Über ein angebliches Galilei-Zitat, *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte* **11**, p. 221, 1988, ou sur Internet par Peter Jaencke. Cité en page 212.
- 193** Les livres de MARTIN GARDNER, *Fads and Fallacies*, Dover, 1957, et JAMES RANDI, *Faith Healers*, Prometheus Books, 1989, nous dévoilent les conséquences étranges et parfois dangereuses des croyances. Le prix d’un million de dollars pour la démonstration d’un quelconque effet paranormal ou surnaturel est disponible sur le site Web www.randi.org. Cité en page 217.
- 194** Consultez la belle collection d’excentriques sur le site Web www.crank.net. Cité en page 217.
- 195** Par exemple, le point de vue opposé sur l’émergence des propriétés est vigoureusement défendu par P. JENSEN, Particle physics and our everyday world, *Physics Today* pp. 58–59, juillet 1998. Cité en page 218.
- 196** Lisez la page 133 de la bibliographie de JOHN BOWLBY, *Charles Darwin*, Pimlico, 1991. Cité en page 219.

- 197** Une admirable introduction à la philosophie grecque est l'ouvrage de EDUARD ZELLER, *Outlines of the History of Greek Philosophy*, Dover, 1980, réédition d'un livre publié en 1928. Il donne entre autres un exposé clair de la philosophie de Démocrite et des autres présocratiques. Cité en page 224.
- 198** Cette célèbre citation se trouve au début du chapitre XI, « The Physical Universe », dans ARTHUR EDDINGTON, *The Philosophy of Physical Science*, Cambridge, 1939. Cité en page 224.
- 199** GIUSEPPE FUMAGALLI, *Chi l'ha detto ?*, Hoepli, Milano, 1983. Cité en page 226.
- 200** Lisez JEAN-PAUL DUMONT, *Les Écoles présocratiques*, Folio Essais, Gallimard, p. 653, 1991. Cité en page 226.
- 201** Pour un magnifique texte sur les fractales, lisez la note de la page 44. Cité en page 229.
- 202** Comme l'a fait remarquer René Descartes. Cité en page 232.
- 203** La célèbre résonance du carbone ^{12}C fut découverte par Willy Fowler, comme le décrit E. MARGARET BURBRIDGE, G. R. BURBRIDGE, W. A. FOWLER & F. HOYLE, Synthesis of the elements in stars, *Reviews of Modern Physics* 29, pp. 547–560, 1957. Cité en page 234.
- 204** L'épais ouvrage de JOHN D. BARROW & FRANK J. TIPLER, *The Anthropic Cosmological Principle*, Oxford University Press, 1986, donne une vaste vue d'ensemble de ce sujet. Ce terme lui-même est dû à Brandon Carter, qui le forgea en 1973 et le présenta lors d'un symposium dédié au 500^e anniversaire de Nicolas Copernic. Pour plus de littérature, lisez YURI I. BALASHOV, Resource Letter AP-1 : the anthropic principle, *American Journal of Physics* 59, pp. 1069–1076, 1991. Cité en page 234.
- 205** VOLTAIRE, *Candide ou l'Optimisme*, 1759. Lisez la note de la page 180. Ce livre est si bon qu'il était encore confisqué par le United States Customs Service en 1930, et le United States Post Office refusa de l'acheminer jusqu'en 1944. Pour plus d'informations, cherchez « banned books online » sur Internet. Cité en page 235.
- 206** Le nombre d'ouvrages sur la conscience est énorme, les contenus pas toujours intéressants et souvent non fondés sur les faits, comme l'indique KARL R. POPPER & JOHN ECCLES, *The Self and its Brain – an Argument for Interactionism*, Rutledge, 1993. Cité en page 236.
- 207** Consultez par exemple l'*Encyclopedia Britannica*, Macropaedia, dans l'entrée sur le comportement animal. Cité en page 237.
- 208** Une introduction directe et instructive (en allemand) sur l'œuvre et les idées de Joseph Beuys est donnée par RENATE GEORGI, Joseph Beuys, RAAbits Kunst, Raabe Fachverlag, septembre 1996. Cité en page 237.
- 209** Deux études, l'une de R.P. EBSTEIN & al., Dopamine D4 receptor (D4DR) exon III polymorphism associated with human personality trait of novelty seeking, *Nature Genetics* 12, pp. 78–80, janvier 1996, et une autre étude de J. BENJAMIN & al., Population and familial association between the D4 dopamine receptor gene and measures of novelty seeking, *Nature Genetics* 12, pp. 81–84, janvier 1996, révèlent que les individus ayant une forme particulière du gène récepteur dopaminergique D4, ou D4DR, sont plus enclins à la recherche d'innovation que ceux ayant la forme usuelle. Le gène D4DR contrôle la formation des récepteurs dopaminergiques, un messenger chimique présent dans le cerveau qui a, pendant un certain temps, été candidat comme substance impliquée dans l'aptitude à la recherche d'innovation. Cité en page 238.
- 210** Lisez JACQUES HADAMARD, *The Mathematician's Mind – The Psychology of Invention in the Mathematical Field*, Princeton Science Library, 1996. Pour un point de vue moderne, consultez PIERRE-GILLES DE GENNES, *Fragile Objects : Soft Matter, Hard Science, and*

- the Thrill of Discovery*, Springer, 1996, dans lequel de Gennes critique certains systèmes éducatifs qui insistent beaucoup trop sur les mathématiques, détruisant ainsi la créativité. Cité en page 238.
- 211** Par exemple, nous avons besoin du courage pour résister à l'envie. Concernant ce sujet lisez le classique de HELMUT SCHOECK, *Der Neid*, 1966, publié en anglais dans *Envy: A Theory of Social Behavior*, 1969. C'est l'œuvre de référence dans ce domaine. Cité en page 239.
- 212** 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 241.
- 213** 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 242.
- 214** 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 243.
- 215** 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 246.
- 216** G. J. STONEY, On the physical units of nature, *Philosophical Magazine* 11, pp. 381–391, 1881. Cité en page 246.
- 217** 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 247.
- 218** 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 247.
- 219** G. CHARPAK & R. L. GARWIN, The DARI, *Europhysics News* 33, pp. 14–17, janvier/février 2002. Cité en page 247.
- 220** 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 248.
- 221** 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 249.

Défi 284 e

- 222** A. ZEILINGER, The Planck stroll, *American Journal of Physics* **58**, p. 103, 1990. Pouvez-vous découvrir un autre exemple similaire ? Cité en page [249](#).
- 223** 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 [250](#).
- 224** J. BERGQUIST, ed., *Proceedings of the Fifth Symposium on Frequency Standards and Metrology*, World Scientific, 1997. Cité en page [250](#).
- 225** Consultez les informations sur les mésons D_s^\pm , données par le « particle data group » sur pdg.web.cern.ch/pdg. Cité en page [251](#).
- 226** 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 [251](#).
- 227** 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 [251](#).
- 228** 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 [251](#).
- 229** 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 [251](#).
- 230** 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 [252](#).
- 231** 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 [253](#).
- 232** 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 (UICPA) et d'autres organisations. Le site Web de l'UICPA est www.iupac.org. Cité aux pages [253](#) et [254](#).
- 233** Les détails sont fournis dans la célèbre référence astronomique, KENNETH SEIDELMANN, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, 1992. Cité en page [258](#).
- 234** Pour plus d'informations concernant le nombre π , ainsi que d'autres constantes, la page Web oldweb.cecm.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 :

$$\pi + 3 = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n 2^n}{\binom{2n}{n}} \quad (92)$$

ou l'élégante formule découverte en 1996 par Bailey, Borwein et Plouffe :

$$\pi = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{16^n} \left(\frac{4}{8n+1} - \frac{2}{8n+4} - \frac{1}{8n+5} - \frac{1}{8n+6} \right). \quad (93)$$

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 détiennent 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.

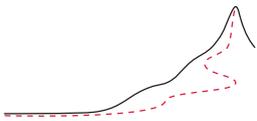
Pour le calcul de la constante d'Euler γ lisez aussi D. W. DETEMPLE, A quicker convergence to Euler's constant, *The Mathematical Intelligencer*, pp. 468–470, mai 1993.

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 259.

Défi 285 r

Défi 286 s





INDICES ET SOLUTIONS DES DÉFIS

Challenge 4, page 19: Les gouttes de liquide doivent se détacher de l'écoulement précisément à l'intérieur des électrodes métalliques séparées. Il se trouve toujours une minuscule charge quelque part sur les structures métalliques (due aux rayons cosmiques, au frottement, à une accumulation de charge antérieure, etc.). Dans la **Figure 88**, cette charge initiale est la charge positive dessinée sur la structure métallique en bas à gauche et en haut à droite. Lorsque les gouttelettes d'eau se forment, elles acquièrent une charge qui est opposée à celle du métal qui se trouve à proximité d'où elles sont produites. Les gouttelettes négatives chutent dans l'autre structure métallique. Par l'intermédiaire de l'accumulation de la charge négative à cet endroit, la charge positive située dans la première structure augmente. Lorsque la charge sur la structure métallique augmente, la séparation de charge dans les gouttelettes est plus efficace. Autrement dit, la formation d'une gouttelette d'eau à l'intérieur des structures métalliques *amplifie* toute charge initiale. Après un certain laps de temps, la valeur de la charge et la tension associée sont si importantes que cela provoque un bang audible (si tout est sec, y compris l'air.) Alors le processus se répète à nouveau. En réalité, un mécanisme de séparation de charge vaguement similaire conduit à l'accumulation de charges dans les nuages puis à l'éclair. Si vous voulez construire un générateur de Kelvin chez vous, jetez un œil sur la page Web de.wikipedia.org/wiki/Kelvin-Generator, ou recherchez d'autres sites Internet sur ce sujet.

Pour éviter les étincelles dans les réservoirs à essence de ses véhicules, Opel raccorda simplement à la masse le tube métallique situé à l'entrée du réservoir, les ingénieurs avaient omis d'assurer un contact électrique entre le tube et le reste du véhicule.

L'explosion de carburant peut aussi se produire si vous versez de l'essence dans votre voiture avec un récipient en métal. À plusieurs reprises, des voleurs de carburant ont été « punis » par une explosion déclenchée par de l'électricité statique, lorsqu'ils ont tenté de verser le carburant volé dans leur propre véhicule.

Dans chaque aéroport, vous pouvez observer comment on esquivé ce problème : avant même de fixer le tube d'arrivée de carburant à un avion, l'employé attache un câble conducteur pour relier le camion (ou la citerne) à l'avion.

Challenge ??, page ??: On observe les deux étincelles par le biais d'un miroir en rotation rapide. De cette manière, des différences infimes de durées entraînent des différences de position pour ces deux étincelles. Au XIX^{ème} siècle, les valeurs de vitesse mesurées selon cette méthode fluctuaient entre 6 000 km/s et la valeur radicalement différente de 100 000 km/s, parce que cette vitesse dépend de la capacité électrique et de l'inductance efficace du fil et du dispositif. La vitesse mesurée est la même que celle de la lumière dans le vide uniquement si ces effets peuvent être négligés, c'est-à-dire pratiquement 300 000 km/s. Dans les fils électriques modernes, la vitesse se situe souvent autour d'un tiers de cette valeur.

Page ??

Challenge 5, page 20: Un énorme fracas surgissait pendant que le pendule métallique cognait violemment les deux clochettes fixées.

Challenge 6, page 23: Non.

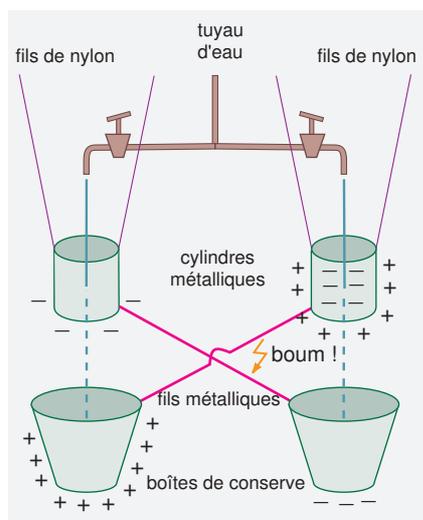


FIGURE 88 Le processus clé à l'œuvre dans le générateur de Kelvin : la séparation des charges pendant la formation des gouttelettes.

Challenge 8, page 24: Le champ à une distance de 1 m d'un électron est de 1,4 nV/m.

Challenge 9, page 24: C'est un simple effet géométrique : tout ce qui s'écoule, de façon homogène, vers l'extérieur d'une sphère diminue avec le carré de la distance.

Challenge 10, page 25: Nous avons $F = \alpha \hbar c N_A^2 / 4R^2 = 3 \cdot 10^{12}$ N, une force colossale, correspondant au poids de 300 millions de tonnes. Cela montre les forces gigantesques de cohésion de la matière. Bien évidemment, il n'existe aucune façon de conserver 1 g de charges positives ensemble, puisque les forces répulsives autour des charges seraient même encore plus importantes.

Challenge 11, page 26: Pour montrer l'équivalence complète entre les « lois » de Coulomb et de Gauss, montrez d'abord qu'elle est vraie pour une seule charge ponctuelle. Étendez alors ce résultat à plus d'une charge ponctuelle. Cela donne la « loi » de Gauss sous sa forme intégrale, telle qu'elle a été donnée juste avant ce défi.

Pour déduire la forme intégrale de la « loi » de Gauss pour une unique charge ponctuelle, nous devons calculer l'intégrale sur la surface fermée. Ici, le point essentiel consiste à remarquer que cette intégration ne peut être menée à bien que pour une dépendance en l'inverse du carré. Cette dépendance nous permet de transformer le produit scalaire entre le champ local et l'élément de surface en un produit normal entre la charge et l'angle solide Ω :

$$E \, dA = \frac{q \, dA \cos \theta}{4\pi \epsilon_0 r^2} = \frac{q \, d\Omega}{4\pi \epsilon_0} . \quad (94)$$

Dans le cas où cette surface est fermée, cette intégration est alors immédiate.

Pour déduire la forme différentielle de la « loi » de Gauss (statique), à savoir

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} , \quad (95)$$

faites usage de la définition de la densité de charge ρ et de la relation purement mathématique

$$\int_{\text{surface-fermée}} \mathbf{E} \, d\mathbf{A} = \int_{\text{volume-délimité}} \nabla \cdot \mathbf{E} \, dV . \quad (96)$$

Cette relation mathématique, valable pour un champ vectoriel \mathbf{E} quelconque, est appelée le *théorème de Gauss*. Il stipule simplement que le flux d'un vecteur à travers une surface fermée est égal à l'intégrale de la divergence de ce vecteur sur le volume délimité par cette surface.

Pour déduire la forme générale de la loi de Gauss, incluant la dérivée par rapport au temps du champ magnétique, incorporez les effets relativistes en remplaçant votre point de vue par celui d'un observateur en mouvement.

Challenge 13, page 26: Non, les piles ne peuvent que séparer des charges et les prélever autour d'eux.

Challenge 14, page 26: Les corps non chargés peuvent s'attirer les uns les autres s'ils sont constitués de composants chargés qui se neutralisent entre eux, et si les charges ont une liberté de mouvement restreinte. Les fluctuations de charge conduisent alors à l'attraction. La plupart des molécules interagissent entre elles de cette manière, de telles forces sont également à la base de la tension superficielle dans les liquides, et ainsi, de la formation des gouttelettes.

Challenge 16, page 28: Le rapport q/m des électrons et celui des charges libres dans les métaux ne sont pas exactement les mêmes.

Challenge 18, page 30: Découvrez une manière de tester ce problème, faites l'expérience et publiez-la !

Challenge 19, page 31: Si vous le pouvez, publiez le résultat. Des chercheurs ont tenté de placer des gens sur l'océan pendant des journées orageuses, ont essayé des expériences dans des salles obscures, mais il n'en est rien ressorti jusqu'à présent. Les expériences réalisées avec des individus placés dans des appareils d'imagerie par résonance magnétique restent peu convaincantes jusqu'à ce jour.

Challenge 21, page 36: Non.

Challenge 23, page 37: La version correcte de la « loi » d'Ampère est

$$\nabla \wedge \mathbf{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \mu_0 \mathbf{j} \quad (97)$$

alors que l'expression mentionnée dans le texte omet le terme $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$.

Pour une autre façon d'établir cette différence, lisez RICHARD P. FEYNMAN, R. B. LEIGHTON & M. SANDS, *The Feynman Lectures on Physics*, volume II, Addison Wesley, p. 21-1, 1977.

Challenge 24, page 37: Seules les transformations de Lorentz avec des vitesses relativistes mélangent significativement les champs magnétiques et électriques.

Challenge 26, page 38: Le champ dual $*F$ est défini à la page 54.

Challenge 28, page 39: Les produits scalaires de quatre vecteurs sont toujours, par construction, des quantités invariantes sous les transformations de Lorentz.

Challenge 31, page 40: Presque toutes les particules neutres sont constituées de particules chargées. Donc cet argument se tient également pour elles. Il n'y a qu'une seule exception : les neutrinos. Pour ceux-ci, l'argument n'est plus valable.

Challenge 32, page 41: La vitesse de signal dans les métaux est supérieure à la vitesse de l'électron, c'est-à-dire à peu près la vitesse de la lumière. Cette vitesse détermine l'intensité du champ magnétique.

Page 124

Challenge 33, page 42: Le rayonnement du soleil modifie l'ionisation de la haute atmosphère et engendre de la convection dans l'ionosphère. Les marées déplacent les ions dans l'océan et dans l'atmosphère. Ces courants produisent des champs magnétiques qui peuvent être perçus par les aiguilles des boussoles sensibles.

Page 47

Challenge 34, page 43: Si vous découvrez un tel effet et si vous êtes capable de l'expliquer, publiez-le dans une revue de vulgarisation.

Challenge 35, page 43: Généralement, les câbles des lignes à haute tension sont trop chauds pour être confortables.

Challenge 36, page 43: Les enfants blonds ont tendance à avoir les cheveux plus fins, produisant ainsi l'effet le plus flagrant. Le temps sec est nécessaire pour éviter que l'humidité de l'air ne décharge la tête, ce qui empêcherait les cheveux de se hérissier.

Challenge 37, page 43: Déplacez-les de façon à façonner une forme en T.

Challenge 38, page 43: Pour trois interrupteurs et plus, utilisez des inverseurs. Un inverseur est un interrupteur qui possède deux entrées et deux sorties, pour lequel dans une position on connecte la première et la deuxième entrée à, respectivement, la première et la deuxième sortie, et dans l'autre position on connecte la première entrée à la deuxième sortie et vice-versa. (Il existe d'autres possibilités, toutefois ; les fils peuvent être supprimés en utilisant des interrupteurs à relais électromagnétiques.)

Challenge 40, page 45: C'est possible, cependant les systèmes conçus jusqu'ici sont imposants et sont dangereux pour la santé humaine. L'idée qui consiste à collecter la puissance solaire dans l'espace lointain puis à l'envoyer sous forme de faisceaux micro-ondes vers la Terre a souvent été divulguée. Les enjeux financiers et les risques encourus ont bloqué ce projet jusqu'à présent.

Challenge 41, page 45: Collez deux miroirs ensemble à angle droit. Ou regardez-vous sur votre téléviseur en utilisant une caméra vidéo.

Challenge 42, page 45: C'est à nouveau un exemple de triboluminescence et de triboélectricité combinées. Consultez également les sites Web scienceworld.wolfram.com/physics/Triboluminescence.html et www.geocities.com/RainForest/9911/tribo.htm.

Challenge 44, page 46: Le poivre est plus léger que le sel, et réagit donc à la cuillère avant le sel.

Challenge 45, page 47: Pour une longueur d'onde de 546,1 nm (vert de référence), cela correspond à un peu plus de 18 longueurs d'ondes.

Challenge 46, page 48: La taille angulaire du Soleil est trop grande, la diffraction ne joue ici aucun rôle.

Challenge 47, page 48: Utilisez simplement un appareil photographique à temps de pose très bref.

Challenge 48, page 48: Le courant circule perpendiculairement au champ magnétique et est donc dévié. Il entraîne l'aimant tout entier avec lui.

Challenge 49, page 49: La lumière fait plusieurs fois le tour de la Terre en une seconde.

Challenge 50, page 49: À 10 pc=32,6 al, le Soleil aurait une magnitude apparente de 4,7. À 20 pc=65,2 al, il paraîtrait 4 fois plus pâle, soit 1,5 environ de magnitude supplémentaire, par conséquent avec une magnitude visuelle apparente d'environ 6,2. Celle-ci est proche de la magnitude limite de l'œil. La véritable magnitude limite de l'œil n'est ni constante ni universelle, donc la distance de 50 années-lumière n'est pas une limite partagée par tous. La magnitude limite, comme la vision nocturne – ou *sensibilité scotopique* –, dépend de la pression partielle de l'oxygène dans l'atmosphère que l'observateur est en train de respirer, de la clarté de l'air, de l'angle zénithal, et, par dessus tout, du degré d'adaptation à l'obscurité. Un œil exposé à la luminosité totale du ciel nocturne dans un endroit très sombre, éloigné de toute pollution lumineuse, n'est toujours pas entièrement adapté à l'obscurité. Vous pouvez facilement apercevoir les étoiles de magnitude 7 en masquant la majorité du ciel et en observant simplement une petite parcelle de celui-ci. Certains observateurs, dans des conditions idéales, ont affirmé, de façon crédible, avoir vu des étoiles proches de la magnitude 8.

Challenge 52, page 50: L'équivalent le plus simple d'une bobine est une masse rotative qui est mise en rotation par l'eau qui s'écoule. Un transformateur serait alors constitué de deux masses de cette sorte reliées par leur axe.

Challenge 55, page 50: La couche chargée agit de telle sorte que, pratiquement, seuls les ions de charge unique traversent les canaux. Par conséquent, les charges sont séparées des deux côtés du liquide, et un courant est généré.

Challenge 57, page 51: Des fuites de courant changent cette illustration. Le rapport des tensions à long terme est donné par le rapport de la fuite de résistance $V_1/V_2 = R_1/R_2$, comme nous pouvons aisément le vérifier dans les expériences.

Challenge 64, page 56: Une certaine quantité de mouvement est emportée par le champ électromagnétique.

Challenge 65, page 57: Les lignes du champ et les surfaces équipotentielles sont toujours perpendiculaires les unes aux autres. Donc une ligne du champ ne peut pas traverser deux fois une surface équipotentielle.

Challenge 74, page 63: L'argument est le même que pour l'accroissement de l'entropie : les processus renversés sont possibles, mais leur probabilité est si faible qu'ils n'apparaissent jamais en pratique. Cette probabilité extrêmement faible est due aux fluctuations induites par l'environnement.

Challenge 75, page 64: Dessinez tout simplement un courant qui circule à travers une bobine avec son champ magnétique, dessinez alors l'image miroir de ce courant puis redessinez le champ magnétique.

Challenge 76, page 65: L'hélicité des molécules d'ADN qui structurent les chromosomes et de nombreuses autres molécules dans les systèmes vivants, l'inclination droitière de la plupart des hommes, l'asymétrie d'espèces de poisson qui restent généralement plats au fond de la mer, sont d'autres asymétries de la nature.

Challenge 77, page 65: Cela est absolument impossible en utilisant des systèmes ou des effets gravitationnels ou électromagnétiques. La seule manière d'y parvenir est d'utiliser l'interaction nucléaire faible, comme indiqué dans le chapitre sur le noyau.

Challenge 78, page 65: Le lagrangien ne change pas si l'une des trois coordonnées est remplacée par sa valeur négative.

Challenge 79, page 65: L'image bascule vers le haut : une rotation de 90 degrés tourne l'image de 180 degrés.

Challenge 80, page 66: Imaginez E et B comme étant les vecteurs unitaires de deux axes situés dans l'espace complexe. Alors une rotation quelconque de ces axes est également une symétrie généralisée par dualité.

Challenge 81, page 66: La constante de structure fine est remplacée par sa valeur inverse. Ainsi $1/137,036$ devient $137,036$. Cela implique que le concept de particule et de vide soit radicalement modifié. Il est possible, dorénavant, de rendre compréhensible cette situation que nous qualifions de *couplage fort* : c'est la raison pour laquelle les théoriciens s'intéressent de manière générale aux dualités.

Challenge 82, page 69: Le moment cinétique a été introduit dans ce système lorsqu'il a été formé. Si nous déplaçons une charge ponctuelle depuis l'infini en suivant une ligne droite jusqu'à sa position finale, proche d'un dipôle magnétique, la force magnétique qui agit sur la charge n'est pas dirigée le long de la ligne de mouvement. Elle engendre par conséquent un couple non nul autour de l'origine. Lisez J. M. AGUIRREGABIRIA & A. HERNANDEZ, The Feynman paradox revisited, *European Journal of Physics* 2, pp. 168–170, 1981.

Challenge 83, page 69: Montrez que même si le champ magnétique radial d'une onde sphérique s'annule par définition, les équations de Maxwell exigeraient de lui qu'il soit différent de zéro. Puisque les ondes électromagnétiques sont transversales, il suffit aussi de montrer qu'il est impossible de peigner une sphère chevelue sans obtenir une (double) touffe spiroïdale ou deux

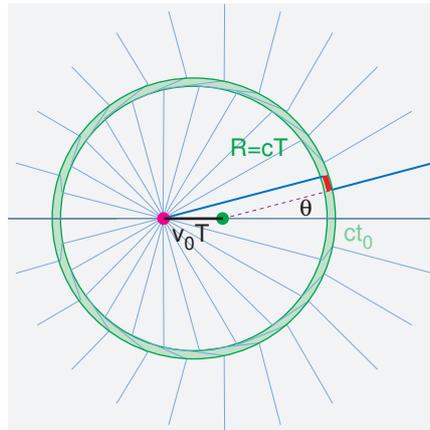


FIGURE 89 Calcul du champ transversal d'une charge accélérée.

touffes spiroïdales simples. Malgré ces affirmations, la théorie quantique modifie d'une certaine façon cette vision des choses : la probabilité d'émission d'un photon par un atome excité placé dans un état dégénéré est précisément à symétrie sphérique.

Challenge 87, page 69: Le rayonnement émis est fortement réprimé parce que la taille du dipôle (la prise de courant) est beaucoup plus petite que la longueur d'onde du champ.

Challenge 89, page 73: Dans toutes les situations d'interférence, l'énergie est redistribuée dans d'autres directions. C'est la règle générale, parfois il est assez compliqué de découvrir cette autre direction.

Challenge 90, page 74: L'auteur voit environ 7 lignes régulièrement espacées, en supposant que la distance est d'environ $20 \mu\text{m}$, cela fait à peu près $3 \mu\text{m}$ par ligne. La longueur d'onde doit être plus petite que cette valeur et donc la fréquence plus grande que 100 THz. Les valeurs réelles pour diverses couleurs sont données dans le tableau du spectre électromagnétique.

Challenge 92, page 75: Il remarqua que lorsqu'un prisme produit un arc-en-ciel, un thermomètre placé dans la région située après la couleur rouge révélait une hausse de température.

Challenge 93, page 76: La biréfringence apparaît lorsque la réfraction est dépendante de la polarisation. Seules deux polarisations linéaires indépendantes sont possibles, donc il n'existe pas de triréfringence dans la nature. Cela reste également vrai pour les cristaux, qui possèdent trois indices de réfraction distincts dans trois directions !

Challenge 94, page 76: La lumière réfléchiée sur une surface d'eau est partiellement polarisée. Les mirages ne le sont pas.

Challenge 98, page 84: La Figure 89 montre le champ transversal E_t dessiné en rouge. Nous supposons que la charge se déplace à une vitesse initiale v_0 petite et décélère jusqu'à une vitesse nulle en un temps t_0 . Après qu'une durée T se soit écoulée, l'impulsion de rayonnement a traversé une distance $R = cT$, où $T \ll t_0$. La figure montre que le champ transversal est relié au champ radial E_r par

$$\frac{E_t}{E_r} = \frac{v_0 T \sin \theta}{ct_0} = \frac{aR \sin \theta}{c^2}. \quad (98)$$

En y insérant l'expression de Coulomb pour le champ radial nous obtenons

$$E_t = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{a \sin \theta}{R}. \quad (99)$$

L'intensité du champ transversal dépend de l'angle θ , cela est flagrant dans la [Figure 43](#) de la [page 85](#).

Challenge 99, page [86](#): Un tel voyageur observerait un champ ondulé mais statique, ce qui ne peut pas exister, comme le montrent les équations du champ électromagnétique.

Challenge 100, page [86](#): Vous ne seriez jamais mort. Pourriez-vous atteindre la limite de l'Univers ?

Challenge 101, page [87](#): Le sirop révèle un effet encore plus magnifique dans le dispositif suivant. Prenez un long tube transparent fermé à une extrémité et remplissez-le de sirop. Éclairez l'intérieur du tube à partir du bas avec un laser rouge à hélium-néon. Introduisez alors un polariseur linéaire dans le faisceau : la lumière observée dans le tube formera une spirale. En faisant tourner le polariseur vous pouvez faire avancer ou reculer la spirale. Cet effet, dénommé *activité optique* (ou *pouvoir rotatoire*) du sucre, est due à l'aptitude du sucre de faire tourner la polarisation lumineuse et à une certaine propriété spécifique des plantes : elles ne produisent qu'une seule des deux formes miroirs du sucre.

Challenge 102, page [88](#): La formule des lentilles minces est

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}. \quad (100)$$

Elle est valable pour des lentilles divergentes et convergentes, à partir du moment où leur propre épaisseur est négligeable. La puissance d'une lentille peut donc être mesurée avec la quantité $1/f$. L'unité 1 m^{-1} est appelée une *dioptrie*, elle est utilisée spécialement pour les verres correcteurs. Les lentilles convergentes ont des valeurs positives, les lentilles divergentes des valeurs négatives.

Toutefois, la formule des lentilles minces n'est qu'une approximation, et n'est jamais employée dans la conception des lentilles. C'est une relique des anciens ouvrages. Les concepteurs des lentilles modernes utilisent toujours l'optique gaussienne pour les calculs. (Lisez, par exemple, FRANCIS A. JENKINS & HARVEY E. WHITE, *Fundamentals of Optics*, McGraw-Hill, 1957.)

Challenge 104, page [88](#): Un microscope optique est essentiellement composé de deux lentilles convergentes. Une lentille – ou système de lentilles – produit une image réelle agrandie et la seconde produit une image virtuelle agrandie de l'image réelle précédente. La [Figure 90](#) montre également que les microscopes retournent toujours les images à l'envers. À cause de la longueur d'onde de la lumière, les microscopes optiques possèdent une résolution maximale d'environ $1\ \mu\text{m}$. Remarquez que le grossissement des microscopes n'est pas limité, ce qui est limité c'est leur résolution. Les images numériques dénotent exactement le même comportement. La *résolution* est simplement la taille du pixel le plus petit possible qui semble raisonnable.

Challenge 106, page [89](#): La dispersion dans le cristallin conduit à des positions apparentes différentes des images, comme indiqué dans la [Figure 91](#). Pour plus de détails sur la dispersion dans l'œil humain et les manières d'en tirer profit pour engendrer des effets en trois dimensions, lisez l'article de C. UCKE & R. WOLF, *Durch Farbe in die dritte Dimension*, *Physik in unserer Zeit* 30, pp. 50–53, 1999.

Challenge 107, page [90](#): Le faisceau de 1 mm reviendrait $1\ 000$ fois plus large que le faisceau de 1 m . Un rayon parfait de 1 m de large de lumière verte ferait 209 m de large sur la Lune, pouvez-vous déduire ce résultat à partir de la formule (importante) qui contient la distance, la longueur d'onde, le diamètre initial et le diamètre final ? Essayez d'abord de deviner cette magnifique formule, puis déduisez-la. En réalité, les valeurs sont plusieurs fois plus grandes que le minimum théorique ainsi calculé. Consultez les sites Web www.csr.utexas.edu/mlrs et ilrs.gsfc.nasa.gov.

Challenge 108, page [90](#): On dit souvent que l'évolution a ajusté le nombre de cônes présents dans l'œil à la résolution maximale avec la pupille ouverte, les spécialistes sur ce sujet maintiennent cependant qu'il y a un nombre légèrement plus grand de cônes.

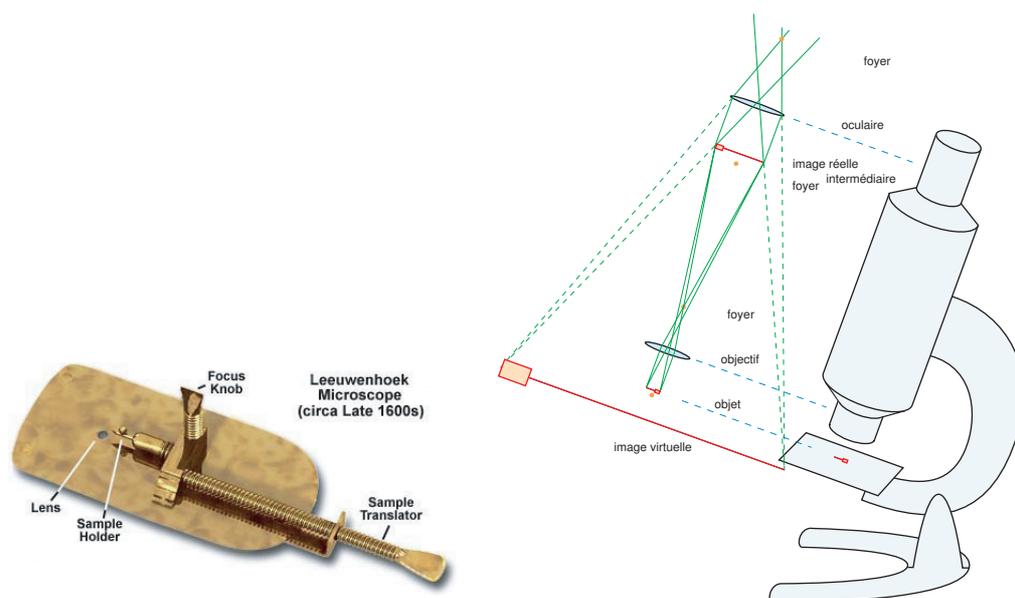


FIGURE 90 Le premier microscope n'avait qu'une lentille (longueur 8 cm env., qui doit être maintenue à proximité de l'œil) mais avec deux lentilles convergentes nous avons un microscope moderne.

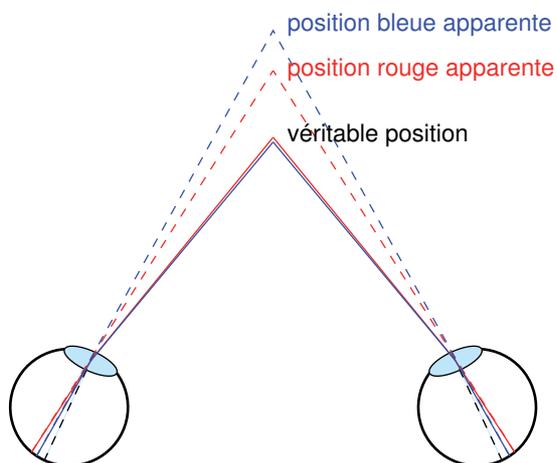


FIGURE 91 La relation entre l'effet coloré et la dispersion du cristallin.

Challenge 109, page 90: La réponse devrait se situer entre une et deux douzaines de kilomètres, en faisant l'hypothèse de circonstances atmosphériques idéales.

Challenge 114, page 94: Une surface de 1 m^2 perpendiculaire à la lumière reçoit environ 1 kW de rayonnement. Celui-ci engendre la même pression que le poids de $0,3\text{ mg}$ environ de matière. Cela produit une pression de $3\text{ }\mu\text{Pa}$ pour des surfaces noires, et le double pour des miroirs.

Challenge 116, page 94: Le côté brillant reçoit le double de la quantité de mouvement transférée par rapport au côté noir, et devrait donc être poussé vers l'arrière.

Challenge 119, page 97: Un polariseur peut réaliser cela.

Challenge 122, page 97: Les motifs d'interférence varient lorsque les couleurs sont modifiées. Les arcs-en-ciel se manifestent également parce que les couleurs distinctes sont dues à des fréquences différentes.

Challenge 124, page 98: L'arc-en-ciel complet est rond comme un cercle. Vous pouvez en produire un avec le tuyau d'arrosage de votre jardin, si vous gardez la lance dans votre main pendant que vous vous tenez debout sur une chaise, avec votre dos tourné vers le Soleil du soir. (Bien sûr, il manque une petite chose : pouvez-vous imaginer laquelle ?) Le cercle est dû à la forme sphérique des gouttelettes. Si celles-ci étaient de forme différente, et si elles étaient toutes alignées, l'arc-en-ciel aurait une forme différente de celle d'un simple cercle.

Challenge 129, page 102: Filmez une explosion de supernova lointaine et vérifiez si elle se produit au même instant pour chaque couleur séparément.

Challenge 131, page 105: La première partie de la vitesse précurseur est une caractéristique ayant la longueur d'onde effective la plus courte possible, elle est donc donnée en considérant la limite pour une fréquence infinie.

Challenge 132, page 105: La lumière est pulsée, donc c'est la vitesse de l'énergie.

Challenge 133, page 105: Dans la matière, l'énergie est transférée aux atomes, puis redevient lumière, et retourne dans les atomes suivants, etc. Cela prend du temps et ralentit la propagation.

Challenge 135, page 108: Cela reste vrai même en relativité générale, lorsque la courbure du vide est examinée.

Challenge 136, page 109: Pratiquement aucune lumière ne passe : l'intensité de la lumière tenue qui est transmise dépend exponentiellement du rapport entre la longueur d'onde et le diamètre du trou. Nous disons également qu'après le trou il y a une onde évanescence.

Challenge 139, page 110: Pas vraiment : un catadioptré utilise deux réflexions sur les côtés d'un cube. Un œil de chat vivant possède un grand nombre de réflexions. L'effet final reste le même cependant : la lumière rebrousse chemin dans la direction où elle est arrivée.

Challenge 140, page 110: Il y a un angle mort dans l'œil : c'est une région dans laquelle les images ne sont pas perçues. Le cerveau suppose ainsi que l'image à cet endroit est la même qu'à ses frontières. Si un point tombe exactement dans celle-ci, il disparaît.

Challenge 142, page 114: L'œil et le cerveau n'interviennent certainement pas la direction haute et basse à un certain âge. Hormis cela, d'où vient cette idée que les bébés voient à l'envers ?

Challenge 143, page 114: L'œil et le système visuel soustraient les motifs qui sont constants dans le temps.

Challenge 145, page 116: En réalité, il n'y a aucune chance pour qu'un hologramme d'un individu puisse rôder autour d'une personne réelle et puisse l'effrayer. Un hologramme est toujours transparent, nous pouvons toujours apercevoir l'arrière-plan à travers celui-ci. Un hologramme donne ainsi toujours une impression similaire à ce que les films de cinéma montrent généralement sous la forme de fantômes.

Challenge 146, page 119: La température moyenne de la Terre est donc de 287 K . L'énergie issue du Soleil est proportionnelle à la quatrième puissance de la température. L'énergie est diffusée sur (approximativement) la moitié de la surface terrestre. La même énergie, à la surface du

Soleil, provient d'une surface beaucoup plus petite, donnée par le même angle que la Terre sous-tend à cet endroit. Nous avons donc $E \sim 2\pi R_{\text{Terre}}^2 T_{\text{Terre}}^4 = T_{\text{Soleil}}^4 R_{\text{Terre}}^2 \alpha^2$, où α est la moitié de l'angle sous-tendu par le Soleil. Par conséquent, on estime que la température du Soleil vaut $T_{\text{Soleil}} = (T_{\text{Terre}}^4 / \alpha^2)^{0,25} = 4 \text{ kK}$.

Challenge 150, page 120: Parce que le maximum d'un spectre en longueurs d'ondes et en fréquences n'est pas le même, donc il *ne* vérifie *pas*, et ne peut pas vérifier, la relation $c = f\lambda$.

Challenge 153, page 120: À une température élevée, tous les corps s'approchent des corps noirs. Cette couleur est plus importante que les autres effets sur la couleur. Le four et l'objet ont la même température. Nous ne pouvons donc pas les distinguer l'un de l'autre. Pour pouvoir le faire cependant, éclairez la scène avec une lumière puissante puis prenez une photo avec une sensibilité réduite. Nous avons ainsi toujours besoin de fournir de la lumière pour prendre des photos de ce qui se passe à l'intérieur du feu.

Challenge 154, page 122: La surface verte observée selon un grand angle proche du sol est plus grande que lorsqu'elle est vue verticalement, où nous voyons également le sol. Le sol est recouvert par l'herbe verte lorsque l'angle d'observation est bas.

Challenge 155, page 122: C'est réellement vrai. Les télescopes modernes possèdent une grande surface de collecte de la lumière (jusqu'à 50 m^2) et sont dotés de détecteurs extrêmement sensibles. Le nombre de photons émis par le craquement d'une allumette sur la Lune dans la direction d'un grand télescope (de quelle taille ?) est suffisant pour déclencher le détecteur.

Challenge 156, page 122: Non, bien sûr, puisque la vitesse de groupe n'est pas limitée par la relativité restreinte. La vitesse de l'énergie est limitée, mais elle n'est pas concernée par ces expériences.

Challenge 158, page 123: L'explorateur prussien Alexander von Humboldt vérifia soigneusement la véracité de cette légende au cours du dix-neuvième siècle. Il explora de nombreux puits miniers et interrogea une quantité innombrable de mineurs au Mexique, au Pérou et en Sibérie sur leurs expériences. Il interrogea également de nombreux ramoneurs. Ni lui ni qui que ce soit d'autre a déjà vu les étoiles pendant la journée.

Challenge 159, page 124: Regardez le défi 28.

Challenge 160, page 124: Les électrons se déplacent lentement, en revanche la vitesse des signaux électriques n'est pas déterminée par la vitesse de l'électron, mais par le temps que mettent les électrons pour se mouvoir. Imaginez une longue queue de voitures (qui représentent les électrons) qui attendent devant un feu rouge. Tous les conducteurs regardent le feu. Dès qu'il passe au vert, tout le monde commence à rouler. Bien que la vitesse de conduite pourrait être de 10 m/s seulement, la vitesse de l'écoulement du trafic au début était celui de la lumière. C'est cette dernière vitesse qui représente la vitesse des signaux électriques.

Les canalisations d'eau révèlent la même chose. Un long tuyau délivre de l'eau pratiquement au même moment où le robinet est ouvert, même si l'eau met un temps fou pour aller du robinet jusqu'à l'extrémité du tuyau. La vitesse à laquelle l'eau réagit est donnée par la vitesse des ondes de pression dans l'eau. Même pour les tuyaux d'arrosage, la vitesse de signal, approximativement donnée par la vitesse du son dans l'eau, est beaucoup plus importante que la vitesse de l'écoulement de l'eau.

Challenge 161, page 125: Nous pouvons mesurer les fluctuations de courant, ou mesurer les charges les plus petites, en montrant qu'elles sont toujours des multiples d'une même unité. La dernière méthode fut utilisée par Millikan.

Challenge 164, page 125: Le potentiel de la Terre serait de $U = -q/(4\pi\epsilon_0 R) = 60 \text{ MV}$, où le nombre d'électrons dans l'eau doit être pris en ligne de compte.

Challenge 165, page 126: Il y a toujours une erreur expérimentale lorsque nous mesurons des

valeurs de champ, même lorsque nous mesurons un champ électromagnétique « évanescent ».

Challenge 166, page 128: Le corps humain est légèrement conducteur, il change la forme du champ et donc le court-circuite vraiment. Généralement, le champ ne peut pas être utilisé pour générer de l'énergie, puisque les courants concernés sont beaucoup trop faibles. (Les flashes de l'éclair constituent un domaine à part, bien sûr. Ils sont dus – très indirectement – au champ de la Terre, mais ils sont trop irréguliers pour être utilisés de manière routinière. Le paratonnerre de Franklin en constitue un spécimen.)

Challenge 167, page 129: Le champ situé à la surface d'une sphère de rayon r est donné par $E = Q/4\pi\epsilon_0 r^2$. En incorporant $E = 200 \text{ V/m}$, nous obtenons $Q = 0,9 \text{ MC}$.

Challenge 168, page 133: Si vous découvrez une méthode qui est différente des estimations connues, publiez-la.

Challenge 170, page 134: Cela pourrait être possible dans un futur proche, mais à la fois l'expérience, qui mesurera probablement les subtilités du champ magnétique du cerveau, et la vérification précise de sa crédibilité ne seront pas simples.

Challenge 176, page 137: Toutes les illusions concernant la lévitation nous donnent l'impression que le magicien est maintenu par des fils, comme de nombreuses personnes l'ont observé, y compris l'auteur. (Les flashes photographiques sont interdits, un arrière-plan étincelant est installé afin de rendre difficile l'observation des fils, aucun anneau n'a jamais vraiment été manipulé autour du magicien, l'aquarium dans lequel il flotte est toujours ouvert pour laisser passer les lignes de pêche à travers, c'est toujours le même partenaire qui est choisi « au hasard » dans le public, etc.) Les renseignements fournis par les témoins oculaires qui ont réellement aperçu les lignes de pêche utilisées par David Copperfield donnent une justification à ces dispositifs. Le groupe de discussion alt.magic.secrets, en particulier Tilman Hausherr, a été d'une importance cruciale dans l'éclaircissement de ce problème dans tous ses détails, y compris le nom de la société qui fabrique le mécanisme de suspension.

Challenge 178, page 138: Un quelconque effet nouveau serait digne d'une publication.

Challenge 179, page 142: L'énergie sonore est également possible, de même que le travail mécanique.

Challenge 180, page 144: La déformation de l'espace-temps n'est pas reliée à l'électricité, tout du moins aux énergies courantes. Près des énergies de Planck, cela pourrait être différent, mais nous n'avons encore rien conjecturé jusqu'à présent.

Challenge 182, page 146: L'absorption parfaite, c'est la noirceur (bien que cela puisse être la rougeur ou la blancheur à des températures plus élevées).

Challenge 183, page 146: En réalité, le Soleil émet environ $4 \cdot 10^{26} \text{ W}$ à partir de sa masse de $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, soit environ $0,2 \text{ mW/kg}$. Le corps humain adulte (au repos) émet environ 100 W (vous pouvez vérifier ceci au lit la nuit), donc environ $1,2 \text{ W/kg}$. C'est à peu près 6 000 fois plus que le Soleil.

Challenge 184, page 146: Les charges situées dans un métal se réorganisent de telle sorte que le champ situé à l'intérieur demeure nul. C'est ce qui fait que dans les voitures et les avions nous sommes en sûreté contre les orages. Bien sûr, si le champ extérieur varie si promptement que ce nouvel arrangement ne peut pas se faire à temps, des champs *peuvent* pénétrer dans la cage de Faraday. (À ce propos, des champs ayant des grandes longueurs d'onde traversent également les métaux, les télécommandes emploient régulièrement des fréquences de l'ordre de 25 kHz pour ce faire.) Cependant, nous devons patienter un peu avant de sortir d'un véhicule après qu'un éclair l'ai frappé, puisque celui-ci repose sur des pneus en caoutchouc ayant une faible conduction, cette attente donne le temps aux charges de circuler vers le sol.

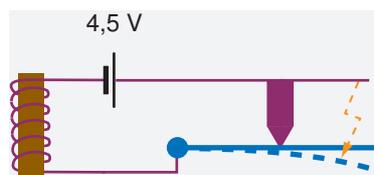


FIGURE 92 Comment recevoir des chocs électriques avec une pile de 4,5 V.

Pour la gravitation et les cages solides, le réagencement de masse n'est pas possible, donc les boucliers gravitationnels n'existent pas.

Challenge 188, page 147: C'est un sujet sensible. Nous ne sommes pas sûrs que les champs de 50 Hz soient dangereux pour les êtres humains. Il est fortement probable que ce ne soit pas le cas, mais ce problème n'est pas tranché.

Challenge 189, page 148: Le nombre de photons multiplié par le quantum d'action \hbar .

Challenge 191, page 148: L'accumulation de charges cesse parce qu'un satellite négativement chargé repousse les électrons et donc stoppe tout mécanisme de collecte d'électrons. Les électrons sont capturés plus souvent que les ions parce qu'il est plus facile pour eux que pour les ions d'avoir une collision inélastique avec le satellite, à cause de leur vitesse plus élevée à une température donnée.

Challenge 192, page 149: N'importe quel mécanisme de déperdition donnera une explication à la perte d'énergie, tel que la résistance électrique ou le rayonnement électromagnétique. Après une fraction de seconde, l'énergie sera perdue. Ce petit problème soulève de nombreuses discussions sur Internet.

Challenge 194, page 149: Utilisez le fil métallique comme indiqué dans la Figure 92. Si l'oscillation est convenablement ajustée en fréquence, si le contact se détache correctement à l'extrémité, et si vous empoignez franchement les deux contacts, vous recevrez un choc si fort que vous ne pourrez tenir debout.

Challenge 198, page 161: La question est : l'« Univers » est-il un concept ? Nous en dirons plus à ce sujet dans la dernière partie de ce texte.

Challenge 200, page 167: Lorsque nous pensons, l'énergie physique, la quantité de mouvement et le moment cinétique sont conservés, et l'entropie thermodynamique n'est pas détruite. Toute expérience qui montre quelque chose de différent ferait allusion à des processus inconnus. Cependant, nous n'avons aucune pièce à conviction dans l'existence de tels processus.

Challenge 201, page 167: La meilleure méthode ne peut pas être beaucoup plus courte que ce qui est nécessaire pour décrire 1 dans 6 000 millions, ou 33 bits. Les systèmes de codes postaux hollandais et anglo-saxon (y compris les lettres NL ou UK) ne sont pas très loin de cette valeur et peuvent donc se proclamer être très efficaces.

Challenge 202, page 167: Pour les systèmes complexes, lorsque les inconnues sont nombreuses, le progrès est ainsi simplement donné par l'augmentation du nombre de réponses. Pour l'Univers dans sa globalité, le nombre de problèmes ouverts est plutôt faible, comme indiqué à la page ??, on remarque qu'il n'y a pas eu beaucoup de progrès ces dernières années. Mais dans ce cas aussi, les avancées sont clairement mesurables.

Challenge 203, page 168: Est-il possible d'employer le mot « complète » lorsque nous décrivons la nature ?

Challenge 206, page 169: Il y a une succession de plusieurs bains : des bains thermiques dans chaque cellule sensible à la lumière dans les yeux, des bains thermiques à l'intérieur des nerfs reliés au cerveau et des bains thermiques dans les cellules cérébrales.

Challenge 208, page 170: Oui.

Challenge 211, page 177: Les physiciens affirment que les propriétés des objets, de l'espace-temps et des interactions forment la plus petite liste possible. Cependant, cette liste est plus longue que celle découverte par les linguistes ! La raison est que les physiciens ont découvert des primitives qui n'apparaissent pas dans la vie de tous les jours. Dans un sens, l'aspiration des physiciens est limitée par la liste des questions sans réponse sur la nature, donnée à la page ??.

Challenge 212, page 179: Aucun ne possède de contenu défini, de limites clairement établies ou de domaine d'application.

Challenge 213, page 179: Impossible ! Cela ne serait plus un concept, puisqu'il n'aurait plus de contenu. La solution à ce problème doit être, et sera, différente.

Challenge 214, page 182: À aucune d'entre elles. Ce paradoxe montre qu'un tel « ensemble de tous les ensembles » n'existe pas.

Challenge 215, page 182: La plus célèbre est la classe de tous les ensembles qui ne se contiennent pas eux-mêmes. Ce n'est pas un ensemble, mais une classe.

Challenge 216, page 182: Le partage des gâteaux est un problème ardu. Une méthode élémentaire qui résout de nombreux problèmes – mais pas tous – entre N personnes $P_1 \dots P_N$ est la suivante :

- P_1 coupe le gâteau en N parts,
- P_2 à P_N choisissent un morceau,
- P_1 garde la dernière part,
- $P_2 \dots P_N$ réassemblent leurs parts en une seule,
- Alors $P_2 \dots P_N$ réitèrent l'algorithme avec une personne en moins.

Ce problème est beaucoup plus compliqué si l'assemblage n'est pas permis. Une méthode *juste* (en un nombre fini d'étapes) pour 3 personnes, et faisant neuf étapes, fut publiée en 1944 par Steinhaus, et une méthode *totale*ment satisfaisante dans les années 1960 par John Conway. Une méthode totalement satisfaisante pour quatre personnes ne fut découverte qu'en 1995, elle possède 20 étapes.

Challenge 217, page 182: $(x, y) := \{x, \{x, y\}\}$.

Challenge 218, page 184: Indice : montrez que toute énumération dénombrable des réels omet au moins un nombre. C'est Cantor qui démontra cela pour la première fois. Sa méthode consistait à noter cette liste en développement décimal puis à rechercher un nombre qui n'est sûrement pas dans cette liste. Deuxième indice : son truc mondialement célèbre s'appelle l'argument de la diagonale de Cantor.

Challenge 219, page 184: Indice : tous les nombres réels sont des limites de séries de nombres rationnels.

Challenge 221, page 186: Oui, mais à condition seulement que la division par zéro est interdite, et que les nombres sont limités aux rationnels et aux réels.

Challenge 222, page 186: Ils sont infiniment nombreux. Mais le plus petit est déjà suffisamment grand : 1016949152542372881355932203389830508474576271186440677966. Si le chiffre six est remplacé dans cette énigme, on trouve que la plus petite solution pour 1 est 1, pour 4 c'est 102564, pour 5 c'est 142857, pour 8 c'est 1012658227848, pour 2 c'est 105263157894736842, pour 7 c'est 1014492753623188405797, pour 3 c'est 1034482758620689655172413793, et pour 9 c'est 10112359550561797752808988764044943820224719. La plus petite solution pour 6 est le nombre le plus grand de cette liste.

Challenge 223, page 187: $0 := \emptyset$, $1 := \{\emptyset\}$, $2 := \{\{\emptyset\}\}$ etc...

Challenge 224, page 190: Pour la soustraction, c'est facile. L'addition n'est pas commutative uniquement dans les situations où des nombres infinis sont concernés : $\omega + 2 \neq 2 + \omega$.

Challenge 225, page 191: $1 - \varepsilon$ ou $1 - 4\varepsilon^2 - 3\varepsilon^3$ en sont des exemples.

Challenge 226, page 191: La réponse est 57, la référence citée fournit les détails.

Challenge 227, page 193: $2^{2^{22}}$ et $4^{4^{4^4}}$.

Challenge 229, page 193: L'enfant est âgé de moins 0,75 ans, soit moins 9 mois : le père est donc très près de la mère.

Challenge 230, page 194: Ce n'est pas une question facile. Les premiers nombres non triviaux sont 7, 23, 47, 59, 167 et 179. Consultez ROBERT MATTHEWS, Maximally periodic reciprocals, *Bulletin of the Institute of Mathematics and its Applications* 28, pp. 147–148, 1992. Matthews montre qu'un nombre n pour lequel $1/n$ engendre le maximum de $n - 1$ chiffres décimaux dans son développement décimal fait partie d'une catégorie particulière de nombres premiers qui peut être déduite à partir de ce que l'on nomme les *nombres premiers S de Sophie Germain*. Nous devons avoir $n = 2S + 1$, où S et $2S + 1$ sont tous les deux des nombres premiers et où $S \bmod 20$ doit être égal à 3, 9, ou 11.

Ainsi les premiers nombres n sont 7, 23, 47, 59, 167 et 179, correspondants aux valeurs de S 3, 11, 23, 29, 83 et 89. En 1992, le nombre connu S le plus grand qui répond aux critères était

$$S = (39051 \cdot 2^{6002}) - 1, \quad (101)$$

un nombre premier de Sophie Germain long de 1 812 chiffres qui est égal à 3 mod 20. Il fut découvert par Wilfred Keller. Ce nombre premier de Sophie Germain entraîne l'existence d'un nombre premier n qui possède un développement décimal d'environ 10^{1812} chiffres de long avant qu'il commence à se répéter lui-même. Lisez votre ouvrage préféré sur la théorie des nombres pour avoir plus de renseignements. De manière intéressante, la solution à ce défi est également reliée à celle du défi 222. Pouvez-vous en dire plus ?

Challenge 231, page 194: Klein n'appartenait à aucun de ces groupes. Par conséquent, certains de ses étudiants les plus désagréables concluaient qu'il n'était pas un mathématicien.

Challenge 232, page 194: Un barbier ne peut pas appartenir à l'un de ces groupes, la définition du barbier est donc contradictoire et doit être rejetée.

Challenge 233, page 194: Consultez la page Web members.shaw.ca/hdhcubes/cube_basics.htm pour plus d'informations sur les cubes magiques.

Challenge 234, page 194: Une telle expression est déduite grâce au résultat intermédiaire $(1 - 2^2)^{-1}$. La manipulation des séries divergentes semble absurde, mais les mathématiciens savent comment attribuer à cette expression un contenu explicite. (Lisez GODFREY H. HARDY, *Divergent Series*, Oxford University Press, 1949.) Les physiciens utilisent souvent des expressions similaires sans vraiment y prendre garde, en théorie quantique des champs.

Challenge 235, page 207: Il est *faux* que « tous les crétois mentent », puisque le contraire, à savoir « certains crétois disent la vérité » est vrai dans cette situation précise. Le piège est que le contraire de la phrase d'origine est généralement, mais à *tort*, supposée être « tous les crétois disent la vérité ».

Challenge 236, page 207: Cette phrase ne peut pas être fautive, à cause de sa première partie et de la condition « ou ». Puisqu'elle est vraie, la deuxième partie doit être vraie et donc vous êtes un ange.

Challenge 240, page 208: Nous pouvons en débattre, dans tous les cas nous savons de manière irrévocable que ces deux affirmations sont des mensonges, comme indiqué à la page ??.

Challenge 246, page 209: Le récit de cette ampoule semble être exact. L'ampoule éclaire très faiblement, de telle sorte que le fil ne s'évapore pas.

Challenge 247, page 209: Cette origine semble remonter au nombre de personnes présentes au dernier repas de Jésus dans le Nouveau Testament, ou le 13ème signe manquant du zodiaque. Il n'y a aucune valeur de vérité dans cette superstition. En réalité, chaque superstition est un mensonge. Cependant, prenez garde aux individus qui sont jaloux de ceux qui ne s'embarassent pas avec des superstitions, et qui manifestent une réaction violente.

Challenge 248, page 209: Sans exceptions jusqu'à présent, tous ceux qui ont prétendu avoir été stigmatisés avaient des plaies dans la *paume* de leurs mains. Cependant, lors de la crucifixion, les clous furent enfoncés à travers les *poignets*, parce que des clous fixés dans les paumes ne peuvent pas supporter le poids d'un corps humain : les paumes se seraient déchirées.

Challenge 249, page 210: Le mot « multivers » est à la fois une croyance et un mensonge.

Challenge 251, page 210: Par rapport à quel référentiel? Comment? Méfiez-vous de quiconque vous prononcerait cette affirmation : c'est un imposteur.

Challenge 252, page 216: Seule l'induction logique nous permet de faire usage des similitudes et donc de définir des concepts.

Page ?? **Challenge 254**, page 219: Oui, comme nous l'apprenons.

Challenge 255, page 219: Oui, car l'observation implique l'interaction.

Challenge 256, page 220: L'absence de contradictions intrinsèques implique qu'un concept est valide en tant qu'outil de pensée. Puisque nous utilisons nos réflexions pour décrire la nature, l'existence mathématique est une version particulière de l'existence physique, car la pensée est elle-même un processus naturel. En vérité, les concepts mathématiques sont également pertinents pour la description du fonctionnement des ordinateurs et ainsi de suite.

Une autre manière de souligner cette idée consiste à faire remarquer que tous les concepts mathématiques sont bâtis à partir des ensembles et des relations, ou de certaines généralisations appropriées de ceux-ci. Ces briques fondamentales sont prélevées dans notre environnement physique. Parfois cette idée est exprimée d'une manière différente : de nombreux mathématiciens ont reconnu que certains concepts mathématiques, comme les entiers naturels, sont directement issus de l'expérience.

Challenge 257, page 220: Des spécimens en sont Achille, Ulysse, Mickey Mouse, les dieux du polythéisme et des esprits.

Challenge 259, page 222: Torricelli fit le vide dans un tube en verre en forme de U, en employant du mercure, le même métal liquide utilisé dans les thermomètres. Pouvez-vous imaginer comment? Une question plus ardue : où a-t-il pu se procurer du mercure?

Challenge 260, page 223: On peut toujours permettre de préférer que quelque chose est infini, si l'affirmation est réfutable. Par exemple, la phrase « Il y a un nombre infini de moustiques ».

D'autres propositions ne sont pas réfutables, comme « L'Univers se poursuit à l'infini derrière l'horizon ». Une telle affirmation est une croyance, et non pas une réalité.

Challenge 261, page 226: Ils ne sont pas non plus des ensembles et donc pas des collections de points.

Challenge 262, page 226: Il n'existe toujours pas de possibilité d'interagir avec toute la matière et l'énergie, puisque nous en faisons partie.

Challenge 263, page 232: Non. Il n'y a qu'une généralisation qui englobe les deux.

Challenge 264, page 233: Une interprétation de l'Univers n'est pas possible, car le mot interprétation requiert la possibilité de discuter d'un système si nous sommes à l'extérieur de celui-ci. L'Univers n'est pas une partie d'un ensemble plus vaste.

Challenge 265, page 233: Ces deux aspects peuvent en fait être vus comme les deux facettes du même argument : il n'y a pas d'autres choix, il n'y a qu'une seule possibilité. L'ensemble de la nature montre qu'il doit en être ainsi, car toutes les choses dépendent des autres.

Challenge ??, page ??: $|z|^2$ est le *déterminant* de la matrice $z = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix}$.

Challenge ??, page ??: Utilisez l'argument de la diagonale de Cantor, comme dans le défi 218.

Challenge ??, page ??: Toute rotation d'un angle 2π est décrite par -1 . Seule une rotation de 4π est décrite par $+1$, les quaternions décrivent vraiment les spineurs.

Challenge ??, page ??: Vérifiez simplement ce résultat composante par composante. Lisez aussi la référence citée.

Challenge ??, page ??: Pour qu'un entier de Gauss $n + im$ soit un nombre premier, l'entier $n^2 + m^2$ doit être premier, et de surcroît, une condition sur $n \bmod 3$ doit être vérifiée : laquelle et pourquoi ?

Challenge ??, page ??: Cette métrique est régulière, positive, définie et vérifie l'inégalité triangulaire.

Challenge ??, page ??: La réponse est l'ensemble de toutes les matrices deux par deux, puisque chaque matrice deux par deux détermine une transformation linéaire, si nous définissons un point transformé comme étant le produit de ce point par cette matrice. (Seule la multiplication avec une matrice donnée peut représenter une transformation linéaire.) Pouvez-vous identifier à partir d'une matrice si elle représente une rotation, une réflexion, une dilatation, une troncature ou un étirement le long de deux axes ? Quelles sont les autres possibilités ?

Challenge ??, page ??: Le produit (le plus simple) entre deux fonctions est représenté par la multiplication point à point.

Challenge ??, page ??: La norme $\|f\|$ d'une fonction réelle f est définie comme étant la borne supérieure de ses valeurs absolues :

$$\|f\| = \sup_{x \in \mathbb{R}} |f(x)|. \quad (102)$$

En termes simples : la valeur maximale prise par la valeur absolue de la fonction représente sa norme. Elle est également appelée norme « sup ». Parce qu'elle contient une borne supérieure, cette norme est définie uniquement sur le sous-espace des fonctions continues *bornées* sur un espace X , ou, si X est compact, sur l'espace de toutes les fonctions continues (car une fonction continue sur un espace compact doit être bornée).

Challenge ??, page ??: Sortez la tête de votre pull, puis tirez un côté de celui-ci vers le bras correspondant, continuez à le tirer sur l'autre bras. Tirez alors l'autre côté, sous le premier, vers l'autre bras également. Remplacez votre tête. Votre pull (ou votre pantalon) sera à l'envers.

Challenge ??, page ??: La transformation d'une variété vers une autre ayant une topologie distincte peut être réalisée avec un changement infinitésimal, en ce que nous appelons un *point singulier*. Puisque la nature révèle une action minimale, on ne peut pas rendre un tel changement infinitésimal nul.

Challenge ??, page ??: Le produit $M^\dagger M$ est hermitien, et possède des valeurs propres positives. Donc H est défini de manière unique et est hermitien. U est unitaire parce que $U^\dagger U$ est la matrice unité.

Challenge 269, page 246: 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 273, page 251: N'oubliez pas la dilatation relativiste du temps.

Challenge 274, page 251: Environ $10 \mu\text{g}$.

Challenge 275, page 251: 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 276, page 252: 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 277, page 253: La formule avec $n - 1$ est un choix plus convenable. Pourquoi ?

Challenge 280, page 256: Non, seulement les propriétés des parties de l'Univers. L'Univers lui-même ne possède aucune propriété, comme indiqué à la page ??.

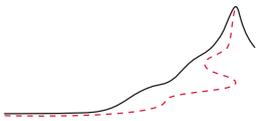
Challenge 281, page 258: Ce ralentissement progresse en *proportion quadratique* avec le temps, parce que chaque nouveau ralentissement s'ajoute au précédent !

Challenge 282, page 260: Le double de ce nombre, le nombre constitué de la suite de tous les nombres pairs, etc.

Challenge 285, page 282: 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 décelé une.

Challenge 286, page 282: 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 Pascazio 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 Pascazio, 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 Nammouni, 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 Blumensath 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

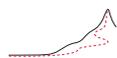
Les animations d'une onde électromagnétique plane à la page 72 sont la propriété de Thomas Weiland qui les a aimablement fournies et sont tirées de son site Web www.temf.de de la Technische Universität Darmstadt. L'animation du champ électromagnétique émis par une charge qui oscille à la page 85 est aimablement accordée et est la propriété de Daniel Schroeder. Il la déposera un jour sur sa page Web physics.weber.edu/schroeder/mrr/MRRtalk.html.

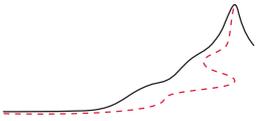
CRÉDITS PHOTOGRAPHIQUES

La photographie de l'effet exercé sur l'eau par un peigne frotté à la page 15 est aimablement fournie et appartient à Robert Fritzius, on la retrouve sur son site Web <http://www.datasync.com/~rsf/fun/bend-w.htm>. La photographie de l'éclair à la page 18 est la propriété de Steven Horschburgh (voir www.horschburgh.com) et est reproduite ici avec sa permission. La photo du générateur de Kelvin à la page 19 est aimablement fournie et est protégée par Harald Chmela, elle est issue de son site Web www.hcrs.at. La photographie du grand requin blanc à la page 22 est protégée et est aimablement accordée par Klaus Jost, on la retrouve sur son magnifique site Web www.jostimages.com. Les images de l'expérience de la conservation de la charge électrique à la page 22 et celle du four chauffé au rouge à la page 121 sont sous la protection des droits d'auteurs et sont aimablement fournies par Wolfgang Rueckner. La photographie de *M. bavaricum* à la page 31 est la propriété de Marianne Hanzlik et est aimablement fournie par Nicolai Petersen. Les images de la bobine de Tesla à la page 43 sont gracieusement fournies et sont la propriété de Robert Billon, on les retrouve sur son site Web f3wm.free.fr. La photo des cheveux électrisés sur le terrain de jeu, à la page 44, est aimablement fournie et est la propriété d'Evan Keller, on la retrouve sur sa page Web www.flickr.com/photos/evanrkeller. La photographie de l'objet qui se soulève à la page 46 est gracieusement fournie et est la propriété de Jean-Louis Naudin, vous pouvez trouver plus d'informations sur son site Web www.jlnlabs.org. La reproduction de la forme des océans à la page 47 est gracieusement accordée par Stefan Maus, elle est tirée de son site web www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/SatMag/ocean_tides.html. La photo du moteur élémentaire à la page 48 est la propriété de Stefan Kluge, qui l'accorde gracieusement. La photographie du prisme aux pages 71 et 98 est de Susan Schwartzberg et est la propriété de l'Exploratorium qui l'accorde gracieusement, on la retrouve sur www.exploratorium.edu. L'image de l'arc-en-ciel à la page 64 est issue du site Web de la NOAA. L'image de l'arc-en-ciel secondaire à la page 74 est aimablement accordée et est la propriété d'Antonio Martos. Les photographies des systèmes de commande à

distance magnifiquement simples indiquées à la [page 73](#) sont la propriété et sont aimablement fournies par Guido Pegna, on les retrouve aussi sur son site Web www.peгна.com. L'image des arcs surnuméraires à la [page 74](#) est aimablement fournie, est la propriété de Wolfgang Hinz et est tirée de son site Web www.meteoros.de. La figure d'interférence à la [page 75](#) est la propriété et est gracieusement accordée par Rüdiger Paschotta, on la retrouve dans son encyclopédie libre sur le laser sur www.rp-photonics.com. La photographie composite de l'arc-en-ciel visible et infrarouge à la [page 76](#) est aimablement fournie et est la propriété de Stefan Zeiger, on la retrouve dans sa collection www.photo.net/photodb/member-photos?include=all&user_id=439012. Les photographies de la biréfringence à la [page 77](#) sont protégées et aimablement fournies par Roger Weller, d'après son site Web skywalker.cochise.edu/wellerr/mineral/calcite/calcite1.htm, Brad Amos, d'après son site Web homepage.ntlworld.com/w.amos2/BradAmos'sWebsite, et Martin Pietralla, d'après son support de cours. La photo du point de Poisson à la [page 91](#) est gracieusement fournie et est la propriété de Christopher Jones, elle est tirée de son site Web www.union.edu/PUBLIC/PHYDEPT/jonesc/scientific_photos.htm. La photographie d'un mirage supérieur à la [page 92](#) est aimablement accordée, est la propriété de Thomas Hogan et on la retrouve sur son site Web home.centurytel.net/Arkcite/looming.htm. La photographie d'un mirage inférieur à la [page 92](#) est aimablement accordée, est la propriété d'Andy Barson et on la retrouve sur son site Web www.andybarson.co.uk. La photographie du four solaire à la [page 92](#) est aimablement fournie et est la propriété de Gerhard Weinrebe. La photo de la comète McNaught à la [page 94](#) est aimablement fournie et est protégée par Flagstaffotos. La photographie du rayon vert solaire à la [page 99](#) est aimablement fournie, est la propriété d'Andrew Young et fait partie de son vaste site Web fascinant mintaka.sdsu.edu/GF; la photographie du rayon vert lunaire est gracieusement accordée et est la propriété de Laurent Laveder, elle est tirée de son magnifique site sur www.PixHeaven.net. L'image de l'eau laiteuse à la [page 100](#) a été réalisée pour ce livre et est la propriété d'Antonio Martos. La photographie de l'arc blanc à la [page 101](#) est aimablement fournie et est la propriété de Michel Tournay, on peut la retrouver sur sa page Web www.spacew.com/gallery/Micheltournay. La photographie de l'arc-en-ciel fendu à la [page 101](#) est gracieusement accordée et est la propriété d'Eva Seidenfaden, on peut la retrouver sur son site Web www.paraselene.de. La photographie de l'arc-en-ciel à six bras à la [page 101](#) est aimablement fournie et est la propriété de Terje Nordvik, on peut la retrouver sur teronor@online.no et sur antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap070912.html. La photo de la parhélie à la [page 102](#) est gracieusement accordée, est protégée par Phil Appleton et on la retrouve sur la page Web www.astronet.ru/db/xware/msg/1174325/solsticehalo_appleton.jpg.html. La photographie infrarouge à la [page 113](#) est protégée et aimablement accordée par Serge Augustin. Les images des rétines à la [page 114](#) sont la propriété d'Austin Roorda qui les accorde gracieusement. L'image du microscope à la [page 118](#) est la propriété et est aimablement fournie par Stefan Hell. Les images exhibant le daltonisme à la [page 122](#) sont la propriété et sont aimablement fournies par Michael Douma, elles sont tirées de son splendide site Web sur webexhibits.org/causesofcolor/2.html. Les photographies de nuages à la [page 128](#) sont aimablement accordées par la NASA. Les images des nuages de plasma produits en laboratoire, qui ressemblent aux boules de feu, à la [page 130](#) sont aimablement fournies et sont la propriété de Sergei Emelin et Alexei Pirozerski et sont issues de leur site Web balllightning.narod.ru. Les représentations de l'intérieur de la Terre à la [page 132](#) sont protégées par les droits d'auteur et sont aimablement fournies par MPI-Chemie, Mainz/GEO, et peuvent être trouvées dans la brochure située sur www.mpch-mainz.mpg.de/mpg/deutsch/Panels_B.pdf. Elles sont gracieusement fournies par Mirjana Kotowski. Les portraits historiques des physiciens, reproduits dans ce livre ne sont pas protégés par des droits d'auteur, sauf lorsque cela est mentionné. Tous les schémas qui ne sont pas explicitement mentionnés sont protégés par le droit d'auteur © 1997 – 2010 de 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

ABBOTT

Les numéros de page en caractères *italiques* se réfèrent aux pages où la personne est présentée plus en détail.

A

- Abbott, T.A. 271
Abe, E. 273
Acef, O. 264
Ackermann, Peter 280
Adams, Douglas 228
Adenauer, Konrad 208
Advantest 22
Aguirregabiria, J.M. 269, 287
Aitken, M.J. 273
Ajdari, A. 273
Akerboom, F. 265
Al-Dayeh, M. 270
al-Farisi, Kamal al-Din 98
al-Hadi al-Hush, Ramadan 240
Allen, L. 266
Allen, Les 265
Almeida, C. de 271
Amos, Brad 77, 302
Ampère, André-Marie 33, 40
Anaxagore 226, 240
Anderson, James A. 275
Appleton, Phil 102, 302
Arago, Dominique-François 31, 91
Arago, François 91
Aripov, Otanazar 240
Aristote 218, 222
Arlt, J. 265
Armstrong, Neil 265
Aronson, Jeff 300
Aronson, Jeff K. 280
Arseneau, Donald 300
Ascher, Marcia 186
Ashburner, J. 276
Ashcroft, Neil 145
Ashkin, A. 265
Ashkin, Arthur 95
Ata Masafumi 300
Audoin, C. 280
Augel, Barbara et Edgar 300
Augustin d' Hippone 42
Augustin, Serge 113, 302
Avron, J.E. 269
- #### B
- Babinet, Jacques 242
Baez, John 300
Bagnoli, Franco 300
Balashov, Yuri I. 279
Bandler, Richard 161, 199, 274
Barberi Gnecco, Bruno 300
Barbosa, Lucas 301
Barnett, S.J. 262
Barnhill, M.V. 262
Barrow, John D. 279
Barson, Andy 92, 302
Bartel, Elmar 300
Barwise, J. 278
Basieux, Pierre 276
Bauer, O. 266
Bauerecker, S. 271
Bautista, Ferdinand 300
Beale, I.L. 263
Beaty, William 300
Beeksma, Herman 300
Beenakker, C.W.J. 264
Belfort, François 300
Belic, D. 281
Bellac, M. Le 263
Bellini, Giovanni 268
Benbrook, J.R. 270
Benjamin, J. 279
Bennett, C.H. 273, 275
Berg, E. 269
Bergmann, L. 278
Bergquist, J. 281
Bering, E. 270
Bering, E.A. 270
Berkeley, George 220
Berlekamp, E.R. 277
Berlin, Brent 266
Bernstein, Aaron 86
Berry, M.V. 272
Beth, R.A. 266
Bettelheim, Bruno 275
Bettermann, D. 272
Beuys, Joseph 165, 237, 279
Beyer, Lothar 300
Bhalotra, S.R. 265
Biggar, Mark 300
Billon, Robert 43, 301
Biraben, F. 264
Bird, D.J. 280
Bjorkholm, J.E. 265
Blair, D.G. 281
Blanché, Robert 277
Bliss, G.W. 271
Blumensath, Achim 300
Boamfa, M.I. 271
Bohr, Niels 191
Bombelli, Luca 300
Boone, Roggie 300
Born, Max 265

B

BOUR

- Bour, L. 264
 Bowlby, John 278
 Boyda, E.K. 265
 Brandes, John 300
 Brandt, E.H. 271
 Brebner, Douglas 300
 Brillouin, Louis 266
 Broch, Henri 277
 Brock, J.B. 267
 Brody, A.L. 265
 Brookshear, J. Glenn 275
 Brown, B.L. 265
 Brown, Peter 300
 Bruce, Tom 300
 Brunner, H. 263
 Buchanan, Mark 272
 Buchmann, Alfons 300
 Buddakian, R. 273
 Budney, Ryan 300
 Burbridge, E. Margaret 279
 Burbridge, G.R. 279
 Butler, Samuel 160
 Butoli, André 261
 Böhncke, Klaus 300
- C**
 Caloz, C. 268
 Cantor, Georg 184
 Caraway, E.L. 270
 Carlip, Steve 300
 Carmona, Humberto 272
 Carr, Jim 300
 Carroll, Lewis 277
 Carter, Brandon 279
 Celsius, Anders 251
 Chaitin, Gregory J. 278
 Chandrasekhar, Subramanyan 234
 Chang, P.Z. 271
 Chaplin, Charlie 64
 Charpak, G. 280
 Chiao, R. 267
 Chiao, R.Y. 267, 268
 Chiba, D. 273
 Chmela, Harald 19, 22, 301
 Chomsky, Noam 207
 Christian CErsted, Hans 32
 Chu, S. 265, 267
 Chuang, I.L. 267
- Chudnovsky, D.V. 282
 Chudnovsky, G.V. 282
 Cicero, Marcus Tullius 236
 Clairon, A. 264
 Codling, K. 280
 Coehoorn, Reinder 273
 Cohen, P. J. 276
 Cohen, Paul 276
 Cohen, Philip 269
 Colazingari, Elena 300
 Conroy, R.S. 265
 Conti, Andrea 300
 Conway, J.H. 277
 Conway, John 189, 295
 Conway, John H. 277
 Copernic, Nicolas 279
 Copperfield, David 137, 293
 Corballis, M.C. 263
 Corbin, V. 270
 Corovic, Dejan 300
 Cosman, E.C. 264
 Couder, Y. 277
 Coulomb, Charles-Augustin de 23
 Cowley, Les 266
 Crescimanno, M. 262
 Crespi, Roberto 300
 Crinion, J.T. 276
 Crookes, William 94
 Crystal, David 174
 Cummer, S.A. 268
- D**
 d'Aquin, Thomas 223, 276
 Dahlman, John 300
 Dalton, John 122
 Danecek, Petr 300
 Darley, Vincent 301
 Darre, Daniel 300
 Darwin 202, 205, 219
 Darwin, Charles 274
 Davidhazy, Andrew 113
 Davis, Chandler 240
 Davson, H. 277
 Davy, Humphry 32
 de deutérium, fluorure 121
 Deaver, B.S. 254
 Decker, Rick 275
 Dehmelt, H. 272
- Dehmelt, Hans 271
 Dekker, J.P. 273
 DeRaad, L.L. 261
 Descartes, René 279
 Descartes, René 162
 Desmet, S. 261
 DeTemple, D.W. 282
 de Maricourt, Pierre 30
 Dholakia, K. 265, 266
 Diana, princesse de Galles 203
 Dietl, T. 273
 Dietrich, F. 272
 Diez, Ulrich 301
 DiFilippo, Frank 300
 Dirac 213, 233
 Dirr, Ulrich 301
 Dobra, Ciprian 300
 Dogarin, A. 267
 Douady, S. 277
 Douglas, R. 275
 Douma, Michael 122, 302
 Dragon, Norbert 300
 Dresden, M. 278
 Drude, Paul 125
 Duhem, Pierre 277
 Dumont, Jean-Paul 279
 Dwyer, J.R. 270
 Dyson, Freeman 300
 Dziedzic, J.M. 265
 Díaz Navas, José Antonio 301
 Démocrite 206, 218, 222, 279
 Díaz Navas, José Antonio 79
- E**
 Ebstein, R.P. 279
 Eccles, John 279
 Economou, E.N. 267
 Eddington, Arthur 224, 279
 Edge, Ron 272
 Edwards, R. 261
 Egorov, A.E. 270
 Egorov, A.I. 270
 Egorov, Anton 131
 Ehrenstein, W.H. 269
 Eigler, D.M. 269
 Einstein, A. 262
 Einstein, Albert 64, 167, 192, 240
 Els, Danie 301

E

ELSWIJK

Elswijk, H.B. 262
 Elswijk, Herman B. 300
 Emelin, Sergei 130, 300, 302
 Emerson, Ralph Waldo 178
 Enders, A. 268
 Epikuros 237
 Erlykin, A.D. 269
 Ertmer, W. 272
 Etchemendy, J. 278
 Euler, Leonhard 194
 Everitt, C.W. 254
 Exploratorium 71, 98, 301

F

Fabeni, P. 268
 Fairbank, W.M. 262
 Fairbanks, J.D. 254
 Fang Lizhi 240
 Faraday, Michael 32, 37, 39, 47, 48
 Farinati, Claudio 300
 Fermani, Antonio 300
 Few, A.A. 270
 Feyerabend, Paul 206, 230
 Feynman, Richard 69
 Feynman, Richard P. 211
 Finkelstein, D. 270
 Finkenzeller, Klaus 300
 Fischer, Ulrike 300
 Flagstaffotos 94, 302
 Flavell, J. H. 163
 Fortey, Richard 274
 Foteinopoulou, S. 267
 Fowler, W.A. 279
 Fowler, Willy 234, 279
 Frackowiak, R.S. 276
 Fraenkel, Adolf/Abraham 182
 Franklin, Benjamin 19, 20
 Frasinski, L.J. 280
 Fraunhofer, Joseph 74
 Freiberg, Dietrich von 266
 French, A.P. 269
 Fresnel, Augustin Jean 74, 91
 Friese, M.E.J. 266
 Fritzius, Robert 15, 301
 Fumagalli, Giuseppe 279
 Furrie, Pat 300
 Föppl, H. 266
 Füllerkrug, M. 270

G

Gödel, Kurt 206, 207
 Gabor, Dennis 116
 Galajda, P. 265
 Galilei, Galileo 88, 222, 227, 240
 Gallivan, B.C. 276
 Galvani, Luigi 29
 Gans, R. 272
 Garcia-Ruiz, J.M. 277
 Gardner, Martin 278
 Garlaschelli, L. 277
 Garwin, R.L. 280
 Gastaldi, Luca 301
 Geim, A.K. 271, 272
 Geim, Andre 272
 Gennes, Pierre-Gilles de 279
 GEO 132, 302
 Georgi, Renate 279, 300
 Gibbons, Gary 300
 Gibbs, Phil 265
 Gilbert, William 16
 Gilles, G.T. 263
 Glassey, Olivier 300
 Glatzmaier, G.A. 263
 Gleiter, H. 273
 Goldhaber, A.S. 261
 Goldsmith, D. 269
 Gonshor, H. 277
 González, Antonio 300
 González-Herráez, M. 267
 Gordon, A. 269
 Gould, Stephen J. 274
 Graham, George 42
 Grahn, Alexander 301
 Grandjean, F. 261
 Grant, E. 268
 Grebe-Ellis, J. 264
 Greegor, R.B. 267
 Greenler, R. 265
 Greenler, Robert 265
 Gregorio, Enrico 301
 Greiner, Jochen 300
 Griessen, R. 273
 Griffiths, D.J. 271
 Grimaldi, Francesco 89
 Grimes, Barbara 176
 Groot, D.G. de 273
 Gross, B. 264

Gurevich, A.V. 270
 Guy, R.K. 277
 Gácsi, Zoltán 300
 Gál, J. 264
 Gödel, Kurt 276

H

Haas, W.J. de 262
 Haas, Wander Johannes de 34
 Haber, John 300
 Hadamard, Jacques 279
 Haeckel, Ernst 199
 Haerendel, G. 266
 Haidinger, W.K. 264
 Haidinger, Wilhelm 77
 Hakonen, P.J. 280
 Haley, Stephen 137, 300
 Hallam, Tony 273
 Hamblyn, Richard 270
 Hamilton, William 178
 Hanzlik, Marianne 31, 301
 Hardcastle, Martin 300
 Hardin, C.L. 266
 Hardy, Godfrey H. 201
 Harlen, V. 275
 Harrington, R.F. 262
 Hasselberg, Ernst von 195
 Hatcher, W.S. 276
 Haubrich, D. 272
 Hausch, T.W. 264
 Hausherr, Tilman 293, 300
 Hayes, Allan 300
 Heaviside 53
 Heckenberg, N.R. 266
 Heflinger, L.O. 272
 Heisenberg 213
 Heisenberg, Werner 88
 Hell, S.W. 269
 Hell, Stefan 118, 302
 Hellinger, Bert 201, 239
 Hellwege, K.-H. 278
 Helmholtz 74
 Helmholtz, Hermann 112
 Helmholtz, Hermann von 238
 Helmond, Tom 300
 Henderson, Paula 300
 Hentig, Hartmut von 7
 Heras, J.A. 262
 Hermann, Ludimar 110

H

HERNANDEZ

- Hernandez, A. 269, 287
 Hersch, R. 276
 Hersch, Reuben 182
 Herschel, William 75
 Hertz 53
 Hertz, Heinrich Rudolf 71
 Hertz, J. 166
 Hertzlinger, Joseph 301
 Heumann, John 300
 Higashi, R. 281
 Hilbert, David 192, 193, 207
 Hilico, L. 264
 Hiller, R.A. 273
 Hillman, Chris 300
 Hinz, Wolfgang 74, 302
 Hirshfield, Stuart 275
 Hitler, Adolf 119
 Hoekstra, Rolf F. 274
 Hoffman, Donald D. 275
 Hogan, Thomas 92, 302
 Hohenstatt, M. 272
 Hones, Bill 272
 Hong, F.-L. 281
 't Hooft, Gerard 200
 Hooft, G.W. 't 264
 Hopfield, J.J. 275
 Horgan, John 278
 Horsburgh, Steven 18, 301
 Horváth, G. 264
 Houck, A.A. 267
 Houdini, Harry 277
 Howard, Luke 127
 Hoyle, F. 279
 Hoyle, Fred 234
 Htun, Bo Bo 240
 Hu, Z. 272
 Huber, A. 264
 Huber, Daniel 300
 Huiberts, J.N. 273
 Humboldt, Alexander von 292
 Huppertz, H. 273
 Huygens, Christiaan 73
 Hypatie 174, 206, 240
 Höfner, H. 266
- I**
 IEEE 106
 Illich, Ivan 235
 Irving, Washington 210
- Irwin, Jim 265
 Itano, W.M. 272
 Itoh, T. 268
 Ivanov, Igor 300
- J**
 Jackson, J.D. 261, 262
 Jackson, L. 274
 Jaencke, Peter 278
 Jalink, Kim 300
 Jamil, M. 300
 Janek, Jürgen 300
 Jeanloz, R. 263
 Jensen, P. 278
 Jeon, H. 261
 Jerauld, J. 270
 Johansson, Mikael 300
 Jones, Christopher 91, 302
 Jones, Gareth 281
 Jones, P.D. 273
 Jones, Quentin David 300
 Jones, T.B. 271, 272
 Jones, Tony 280
 Jong, Marc de 300
 Jordan, D.M. 270
 Jost, Klaus 22, 301
 Jozefowski, L. 264
 Ju, L. 281
 Julien, L. 264
 Justice, B.J. 267
- K**
 Köppe, Thomas 300
 Kanada Yasumasa 282
 Kant, Emmanuel 123, 179
 Katori, H. 281
 Kay, Paul 266
 Keesing, R.G. 281
 Keller, Evan 44, 301
 Keller, Wilfred 296
 Kelly, K.L. 264
 Kelu, Jonatan 300
 Kepler, Johannes 94
 Kerr, John 80
 Kettering, C.F. 261
 Kim Song-Man 240
 Kimble, H.J. 272
 Kiss, Joseph 300
 Klaus Tschira Foundation 301
- Klein, Felix 194
 Kleinert, F. 278
 Kluge, Stefan 48, 301
 Knuth, D. 277
 Knuth, Donald 189
 Koch, Robert 236
 Koeman, N.J. 273
 Kohlrausch, Friedrich 278
 Kolberg, Ulrich 301
 Koltenbah, B.E.C. 267
 Koolen, Anna 300
 Koomans, A.A. 262
 Kopeikin, Sergei 300
 Kostiuik, L.W. 263
 Kotowski, Mirjana 302
 Kovetz, A. 271
 Kowalski, L. 269
 Kozhekin, A.E. 267
 Kramer, D. 273
 Krider, E.P. 261
 Krijn, Marcel 300
 Krogh, A. 166
 Kruskal, Martin 189
 Królikowski, Jarosław 300
 Krüger, Reinhard 210
 Kubala, Adrian 300
 Kuerti, G. 268
 Kurizki, G. 267
 Kusch, K. 274
 Kusch, S. 274
 Kuzin, Pavel 300
 Kuzmich, A. 267
 Kwait, P.G. 267
 Kwiat, P.G. 268
 Kwok, D.Y. 263
- L**
 Lai, A. 268
 Landauer, R. 275
 Landolt-Börnstein 278
 Lang, N.D. 269
 Larousse, Pierre 277
 Latham, J. 270
 Laveder, Laurent 99, 302
 Lavoisier, Antoine 240
 Lebedew, P. 265
 Lebedew, Pyotr/Peter 95
 Ledoux, Joseph 275
 Leeuwenhoek, Antoni Van 89

L
LEIGHTON

- Leighton, R.B. 285
 Lennie, P. 269
 Leone, F.C. 268
 Lepak, J. 262
 Leucippe 222
 Li, K. 267
 Li, Y.C. 271
 Lichtenberg, Georg Christoph 235
 Lincoln, Abraham 240
 Linde, Johan 301
 Lingelbach, B. 269
 Lingelbach, Elke 110
 Lintel, Harald van 300
 Lipperhey, Johannes 88
 Liu Gang 240
 Livingston, William 266
 Loidl, J. 266
 Lombard, Pierre 276
 Lombardi, Luciano 300
 Longo, M. 261
 Lorentz, Hendrik Antoon 36
 Lovell, Jim 265
 Lu, F. 263
 Luca Bombelli 300
 Luo, J. 263
 Lynch, D.K. 269
 Lénine 32
 Lévy-Leblond, J.-M. 263
 Lévy-Leblond, Jean-Marc 261
 Lühr, H. 263
- M**
 Maan, Jan Kees 272
 Macdonald, Malcolm Ross 274
 Madelung, O. 278
 Maeterlink, Maurice 226
 Maffi, Luisa 266
 Mahoney, Alan 300
 Mahowald, M. 275
 Main, Peter 272
 Malus, Louis 76
 Manly, Peter 88
 Mark, Martin van der 300
 Martikainen, J.E. 280
 Martin, S. 273
 Martos, Antonio 74, 100, 300-302
- Massa, Corrado 300
 Matsukura, F. 273
 Matthews, Robert 296
 Maus, S. 263
 Maus, Stefan 47, 301
 Maxwell 26, 213
 Maxwell, James Clerk 53
 Mayer, N.J. 274
 Mayné, Fernand 300
 Mayr, Peter 300
 McCulloch 268
 McCuskey, S.W. 268
 McGuire, Bill 273
 McQuarry, George 300
 McTaggart 201
 Mechelli, A. 276
 Meetz, Kurt 263
 Melzner, F. 266
 Mendes, O. 271
 Mermin, David 108, 145
 Merrit, John 300
 Meschede, D. 272
 Metha, A. 269
 Michaelson, P.F. 254
 Michelson, Albert 157
 Millikan 292
 Milton, K.A. 261
 Minnaert, Marcel 266
 Mission, G.P. 264
 Mock, J.J. 267
 Mohr, P.J. 281
 Molière 235
 Montgomery, H. 263
 Montie, E.A. 264
 Montonen, Claus 66
 Moon, F.C. 271
 Moortel, Dirk Van de 300
 Moothoo, D.N. 265
 Moser, Lukas Fabian 300
 Mozart 238
 MPI-Chemie, Mainz 132, 302
 Mugnai, D. 268, 269
 Murdock, Ron 300
 Murillo, Nadia 300
 Musiol, Gerhard 272
 Muynck, Wim de 300
- N**
 Namouni, Fathi 300
- Naudin, Jean-Louis 46, 301
 Neidhart, B. 271
 Neuhauser, W. 272
 Neumaier, Heinrich 300
 Neuss, H. 266
 New, M. 273
 Newton 252
 Nez, F. 264
 Nieminen, T.A. 266
 Niepraschk, Rolf 301
 Nieuwpoort, Frans van 300
 Nimitz, G. 268
 Nimitz, Günter 107
 Noppeney, U. 276
 Nordvik, Terje 101, 302
- O**
 O'Connell, Sanjida 274
 O'Doberty, J. 276
 Oberdiek, Heiko 301
 Oberquell, Brian 300
 Ørsted 32
 Offner, Carl 300
 Ohm, Georg Simon 51
 Ohno, H. 273
 Ohno, Y. 273
 Ohtani, K. 273
 Olive, David 66
 Omiya, T. 273
 Oostrum, Piet van 300
 Oppenheimer, Robert 240
 Orban, F. 261
 Ormos, P. 265
 Osterle, Fletcher 50
 Otto von Bismarck 197
 Otto, Rudolf 237, 237
- P**
 Padgett, M.J. 266
 Padgett, Miles 265
 Page, Don 300
 Pahaut, Serge 300
 Paine, Thomas 210
 Pais, A. 277
 Palmer, R. 166
 Parazzoli, C.G. 267
 Park, David 264
 Parker, D.E. 273
 Parks, David 300

P

PARROTT

- Parrott, S. 271
 Pascazio, Saverio 300
 Paschotta, Rüdiger 75, 302
 Pasi, Enrico 300
 Paul de Tarse 207
 Pauli, Wolfgang 202
 Pavão, A.C. 271
 Pazzi, G.P. 268
 Pecharsky, Vitalij 273
 Peeters, Bert 300
 Pegna, Guido 73, 302
 Peirce, Charles 174, 206
 Pendry, J. 267
 Pendry, J.B. 267, 268
 Pendry, John 105, 106
 Peng, J.L. 272
 Penrose, Roger 278
 Perini, Romano 300
 Perse 226
 Petersen, Nicolai 301
 Philips 15
 Phillips, Melba 240
 Piaget, J. 163
 Piaget, Jean 163
 Picasso, Pablo 64, 170, 228
 Pietralla, Martin 77, 302
 Pinker, Steven 275
 Pirozerski, Alexei 130, 302
 PixHeaven.net 99
 Planck, Max 119
 Poincaré, Henri 238
 Poisson, Denis 91
 Popper, Karl 210, 277
 Popper, Karl R. 279
 Povinelli, D.J. 235
 Poynting, J.H. 266
 Poynting, John Henry 61
 Prentiss, M. 265
 Prevedelli, M. 264
 Price, C.J. 276
 Pritchard, Carol 300
 Proença, Nuno 300
 Protagoras 252
 Purves, William 300
 Pythagore 191, 192
- R**
- Rahtz, Sebastian 301
 Rakov, V.A. 270
- Ramaccini, F. 277
 Ramakrishna, S.A. 267
 Rambo, K.J. 270
 Randi, James 277, 278
 Ranfagni, A. 268, 269
 Rankl, Wolfgang 300
 Rappmann, R. 275
 Rassoul, H.K. 270
 Reball, Siegfried 272
 Rector, J.H. 273
 Redondi, Pietro 300
 Reichert, J. 264
 Reichl, Linda 273
 Renselle, Doug 300
 Reppisch, Michael 300
 Reynolds, Osborne 265
 Richards, P.G. 271
 Ridgeway, S.L. 272
 Rieger, E. 266
 Riemann, Bernhard 78
 Rigor, I.G. 273
 Rikken, Geert 273
 Rindler, Wolfgang 263
 Ritter, Johann Wilhelm 75
 Rivas, M. 269
 Rivas, Martin 300
 Roberts, P.H. 263
 Robertson, Will 301
 Rodgers, P. 272
 Rodrigues, W.A. 269
 Rohrllich, F. 271
 Romanowicz, B. 263
 Roorda, A. 269
 Roorda, Austin 114, 302
 Ruben, Gary 300
 Rubinstein, J. 270
 Rubinsztein-Dunlop, H. 266
 Rucker, Rudy 184, 276
 Rueckner, W. 261
 Rueckner, Wolfgang 22, 121, 301
 Ruggieri, R. 269
 Rusby, R.L. 281
 Rusby, Richard 281
 Ruschewitz, F. 272
 Russer, P. 268
- S**
- S.R. Madhu Rao 300
 Saa, A. 271
 Sacks, Oliver 275
 Sahl, Mort 235
 Sakharov, Andrei 240
 Salamo, G. 265
 Salditt, T. 269
 Salingaros, N. 262
 Salman Salman 240
 Sami Kilani 240
 Sands, M. 285
 Sassen, K. 266
 Saussure, Ferdinand de 174
 Scala, S. Della 277
 Schadwinkel, H. 272
 Schata, P. 275
 Scheer, Elke 269
 Schelby, R.A. 267
 Schiff, L.I. 262
 Schiller, Britta 300, 301
 Schiller, C. 262
 Schiller, Christoph 302
 Schiller, Isabella 300
 Schiller, Peter 300
 Schiller, Stephan 300
 Schilthuizen, Menno 274
 Schlegel, K. 270
 Schoeck, Helmut 280
 Schroeder, Daniel 85, 301
 Schrödinger 103, 213
 Schultz, S. 267
 Schurig, D. 267
 Schwartzberg, Susan 71, 98, 301
 Schwinger, Julian 211, 261
 Schwob, C. 264
 Schäfer, C. 278
 Schönenberger, C. 262
 Scott, G.G. 261
 Scott, Jonathan 300
 Scott, W.T. 271
 Seeger, J. 269
 Segev 91
 Segev, M. 265
 Segev, Mordechai 265
 Seidenfaden, Eva 101, 302
 Shabanov, G.D. 270
 Shabanov, Gennady 131
 Shankland, R.S. 268
 Shaw, George Bernard 200

S

SHELDON

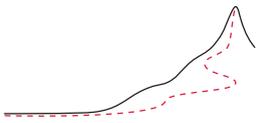
- Sheldon, Eric 300
 Shih, M. 265
 Short, J. 281
 Shulman, Polly 277
 Siart, Uwe 301
 Sierra, Bert 300
 Simon, Julia 300
 Simon, M.D. 271, 272
 Simpson, N.B. 266
 Singleton, D. 269
 Singleton, Douglas 300
 Sivardière, Jean 263
 Slabber, André 300
 Smirnov, B.M. 270
 Smith, D.R. 267, 268
 Smith, David 267
 Smith, S.P. 265
 Smith, Warren J. 270
 Smullyan, Raymond 206
 Soffer, B.H. 269
 Sokolovskii, B.Yu. 270
 Solomatin, Vitaliy 300
 Sommerfeld, Arnold 104, 266, 267
 Song, K.-Y. 267
 Song, X.D. 271
 Soukoulis, C.M. 267
 Sparenberg, Anja 273
 Spieker, H. 268
 Spitzer, Manfred 275
 Staff, National Research Council 270
 Starr, A.F. 268
 Stearns, Stephen C. 274
 Stedman, G.E. 281
 Stegeman, George 265
 Steinberg, A.M. 267, 268
 Steinhaus 295
 Stepanov, S. I. 270
 Stepanov, S.I. 270
 Stettbacher, J.K. 274
 Stewart, I. 276
 Stewart, Ian 277
 Stewart, T. Dale 261
 Stoney, G.J. 280
 Stoney, George 28
 Stoney, George Johnston 246
 Story, Don 301
 Strauch, F. 272
- Styer, D. 267
 Stöcker, J. 266
 Sun, X.L. 271
 Surdin, Vladimir 269, 300
 Swagten, Henk 273
 Szczesny, Gerhard 278
 Szilard, L. 275
 Szilard, Léo 169, 170
- T**
 Takamoto, M. 281
 Tanielian, M. 267
 Tarde, Gabriel 202
 Tarko, Vlad 300
 Tarski, Alfred 277
 Tauber, G.E. 271
 Taylor, B.N. 281
 Taylor, J.H. 250
 Tegelaar, Paul 300
 Terletskii, Y.P. 267
 Tesla, Nikola 42
 Thaler, Jon 300
 Thalès de Milet 15
 Theodoricus Teutonicus de Vriberg 98
 Thidé, Bo 57
 Thies, Ingo 300
 Thiry, Paul-Henri 239
 Thober, D.S. 269
 Thomas d'Aquin 187
 Thomson (Kelvin), William 18
 Thomson, Joseph John 28
 Thévenaz, L. 267
 Tipler, Frank J. 279
 Tomonaga 211
 Torricelli, Evangelista 222
 Toschek, P.E. 272
 Tournay, Michel 101, 302
 Townsend, Paul 300
 Travis, J. 263
 Trevorrow, Andrew 301
 Trower, W.P. 261
 Tsagas, C.G. 271
 Tsai, W.Y. 261
 Tu, L.-C. 263
 Tuckermann, R. 271
 Tuppen, Lawrence 300
 Twain, Mark 201, 212, 235
 Tyler, R.H. 263
- U**
 Ucke, C. 289
 Udem, Th. 264
 Ueberholz, B. 272
 Uguzzoni, Arnaldo 300
 Ulysse 297
 Uman, M.A. 270
 Upright, Craig 301
 Ustinov, Peter 64
- V**
 Valanju, A.P. 267
 Valanju, P.M. 267
 Valenzuela, A. 266
 Valsiner, Jaan 274
 Valsinger, Jaan 274
 Vanier, J. 280
 Vannoni, Paul 300
 Veer, René van der 274
 Verne, Jules 99
 Veselago, V.G. 267
 Veselago, Victor 105
 Vigotsky, Lev 163, 274
 Virgile 231
 Viswanath, R.N. 273
 Voit, A. 265
 Volin, Leo 300
 Vollmer, G. 276
 Vollmer, M. 266
 Volta, Alessandro 44
 Voltaire 228, 239, 252, 261, 279
 Voss, Herbert 301
 Vuorinen, R.T. 280
 Völz, Horst 280
- W**
 Waldhauser, F. 271
 Walker, J. 266
 Walser, R.M. 267
 Walter, H. 272
 Wang Juntao 240
 Wang, L.J. 267
 Warkentin, John 301
 Washizu, M. 272
 Wehner, R. 264
 Weiland, Thomas 72, 301
 Weinrebe, Gerhard 92, 302
 Weiss, Martha 300
 Weisskopf, Victor 238

W

WEISSMÜLLER

- Weissmüller, J. 273
 Weitz, M. 264
 Weizenbaum, Joseph 173
 Weller, Roger 77, 302
 Weninger, K. 273
 Westphal, V. 269
 Wheatstone, Charles 28
 Whewell, William 47
 Whitehead, Alfred North 215
 Wiechert, Johann Emil 28
 Wien, Wilhelm 120
 Wierda, Gerben 300
 Wierzbicka, Anna 176, 198, 276, 300
 Wigner, E.P. 263
 Wigner, Eugene 191, 277
 Wijk, Mike van 300
 Wijngarden, R.J. 273
 Wikell, Göran 277
 Wilde, Oscar 164, 217
 Wilk, S.R. 269
 Williams, D.R. 269
 Williams, David 114
 Wiltschko, R. 262
 Wiltschko, W. 262
 Wineland, D.J. 272
 Wise, N.W. 254
- Witte, H. 268
 Witteborn, F.C. 262
 Wittgenstein, Ludwig 159, 174, 180, 191, 192, 196, 197, 208, 215, 217, 231, 278
 Wolf, Emil 265
 Wolf, R. 289
 Wolfendale, A.W. 269
 Wong, S. 267
 Wood, B. 275
 Wright, B. 270
 Wright, Joseph 301
 Wu, C. 272
 Wu, T.T. 263
 Wynands, R. 272
 Würschum, R. 273
- X**
 Xavier, A.L. 269
 Xu Liangying 240
- Y**
 Yamane, T. 265
 Yang, C.N. 263
 Yang, J. 263
 Yazdani, A. 269
 Young, A.T. 266
- Young, Andrew 99, 266, 300, 302
 Young, Thomas 74
- Z**
 Zaccone, Rick 301
 Zalm, Peer 300
 Zander, Hans Conrad 278
 Zedler, M. 268
 Zedler, Michael 300
 Zeiger, Stefan 76, 302
 Zeilinger, A. 280
 Zeller, Eduard 279
 Zermelo, Ernst 182
 Zernike, Frits 117
 Zhang, J. 271
 Zhao, C. 281
 Zimmer, P. 273
 Zurek, W.H. 275
 Zurek, Wojciech 170
 Zweck, Josef 272
 Zybin, K.P. 270
- É**
 Épicure 237, 238





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.

- A**
- à condensateur, électromètre 44
 - a posteriori 179
 - a priori 179
 - à travers les vêtements, voir 81
 - abeilles communes 76
 - aberrations 89
 - aberrations chromatiques 97
 - absorption 142
 - absorption saturable 144
 - abstraction 185
 - accident dû à du matériau nucléaire ou à l'utilisation d'armes 154
 - accumulabilité 23
 - accélération de Laplace 36
 - accélération de Lorentz 36
 - achèvement de la science 223
 - acide sulfurique 141
 - acides aminés 142
 - action de miroir à conjugaison de phase 144
 - action du laser 144
 - action optique 142
 - action électro-optique 141
 - action électrolytique 141
 - activité magnéto-optique 140
 - activité optique 289
 - additivité 23, 25, 35
 - ADN 83
 - ADN 168, 172, 188, 252
 - Afrique entre en collision avec l'Europe 155
 - AgBr 142
 - AgCl 75, 142
 - âge de la Terre 258
 - âge de la Voie lactée 259
 - âge du Soleil 259
 - âge glaciaire 154, 155
 - AgI 142
 - agroglyphes 208
 - aimant 48
 - aimants 16, 137
 - air 138
 - Al 139
 - Albert Einstein, jeune 86
 - albédo 93
 - alimentation électrique, bruit 147
 - Allen, Woody 168
 - alliages métalliques 140
 - allume-gaz 72
 - aluminium 261
 - ambre 15
 - amplification paramétrique 144
 - amplitude 70
 - ampoules de Lorenzini 22, 30
 - ampoules électriques 109
 - ampère 241
 - andalousite 142
 - ange, en êtes-vous un ? 207
 - anges 187
 - anglais, langue 176
 - anglais, taille de la langue 175
 - angle de mélange électrofaible 255
 - animisme 163
 - anisotropie optiquement induite 142
 - annihilation 139
 - année tropicale 256
 - année-lumière 256
 - anode 47
 - antenne, la plus simple 84
 - anti-gravité, dispositifs 137
 - aphélie 259
 - apogée 258
 - Apollo 90
 - appareil photo, sacré 268
 - appauvrissement de l'oxygène 155
 - application 185
 - apprentissage 166
 - apprentissage, meilleure méthode 9
 - Ar 139
 - araignées 76, 88
 - arbre 187, 252
 - arbres et électricité 15
 - arc blanc 101
 - arc-en-ciel 74, 89
 - arc-en-ciel apparié 101
 - arc-en-ciel irrégulier 101
 - arc-en-ciel, explication 98
 - arc-en-ciel, largeur 100
 - arc-en-ciel, polarisation 101
 - arcs électriques 20
 - arcs-en-ciel surnuméraires 74
 - argent 20
 - argument 185
 - armes avec la lumière 120
 - arséniure de gallium 138
 - articles de physique 108

A

ARTIFICIELS

- artificiels, phénomènes 217
 artéfact 242
 ascenseurs 46
 aspects de la nature 162
 astéroïde heurtant la Terre 155
 atome unique 51
 atto 243
 attributs 176
 Au 139
 au début 292
 auréole 110
 autisme 162, 274
 autistes 274
 autistique 162
 auto-référentes 206
 avalanche électronique 127
 aventures futures 154
 axiome du choix 181, 182
 axiomes de la théorie des ensembles 181
 axiomes ZFC de la théorie des ensembles 181
- B**
 bain physique 169
 balayage pour l'imagerie 117
 baleines 171
 BaO₂ 139
 barbier, paradoxe 194
 BaTiO₃ 141
 battements de cœur 188
 batterie 44
 becquerel 243
 Belgique 90
 Belle au bois dormant, effet 86
 Bi 140
 bible 207, 213
 bibliothèque 108
 biologistes de l'évolution 160
 bioluminescence 143
 BIPM 213, 241, 242
 biréfringence 76, 142
 BiSb 140
 BiSeTe 138
 Bi₂Te₃ 138
 bits 167
 bière 144
 blanc 118
 blasphèmes 228
- bleu 82
 bleu primaire 82
 bobine Tesla 42
 bobines Tesla 45
 bouclage des cheveux 65
 bougie 131
 boules de feu 130
 Bourse 28
 bremsstrahlung 143
 brillant 187
 brosse de Haidinger 78
 brosse de polarisation 78
 brouillard électromagnétique 146
 bruit 169
 Bureau International des Poids et Mesures 241
 bâtonnets dans la rétine 115, 188
 Bételgeuse 156
- C**
 CaCO₃ 76
 CaF₂ 143
 cage de Faraday 146
 calcite 76, 77, 142
 calorie 251
 candela 241
 canons magnétiques 45
 canons électriques 45
 canulars 90
 cardinal 184
 cardinal inaccessible 184
 carré magique 194
 catastrophes 154
 cathode 47
 catégorie 179, 185
 cause 235
 CD 188
 Cd 139
 CdS 138, 144
 CeB₆ 139
 CeF₃ 140
 cellule primaire 44
 cellule secondaire 44
 cellule voltaïque 44
 cellules 187
 cellules photovoltaïques 142
 centi 243
- cerveau 134, 160, 188
 cerveau de baleine 171
 cerveau et Lune 234
 cerveau, consommation d'énergie 172
 cerveau, meilleur ouvrage sur le 262
 champ de jauge 61
 champ de Poynting 69
 champ magnétique 16, 35, 35
 champ magnétique critique 17
 champ physique 16
 champ radio 16
 champ électrique 16, 23
 champ électromagnétique 16, 37, 38, 61
 champ électromagnétique, linéarité 70
 champ électromoteur 55
 champs quasi statiques 80
 chandelle 248
 charbon 142
 charge 152
 charge du positron 254
 charge électrique 19
 charge électrique est discrète 123
 charge électrique minimale 123
 charge, quantité de 21
 charge, rayonnement dû à l'accélération 131
 charge, rayonnement dû à la gravité 131
 charlatans 179, 217
 chat 110
 chevelue, sphère 287
 cheveux 188
 cheveux, bouclage 65
 chimiluminescence 143
 chiral 45
 chiralité 45
 chlorophylle 231
 chocolat et vitesse de la lumière 72
 choix, absence au Big Bang 227
 chromosome 155
 chromosome X et daltonisme

C

CIEL

- 122
ciel 144
cinésiologie 199
circonspection 258
cirrus 127
classe 182
classificateurs 166
classification 163
clignements 188
clés à molette optiques 95
CMOS 134
CO₂ 155
Co 139
cobalt 16
CODATA 281
commande ping pour mesurer
la vitesse de la lumière 28
Commission Internationale
des Poids et Mesures 241
communication,
supraluminique 107
communisme 32
comparaison avec un étalon
de référence 212
complexité « infinie » 229
complément d'objet 176
complétude 23
composantes de Fourier 148
compréhensibilité de
l'Univers 225
comète 94
comète artificielle 96
comètes 265
concept 174, 179, 180
concepts physiques,
découverte des 199
concepts, a priori 163
condensateur 44, 149
conditions initiales 62
conditions limites 63
conductivité 138
Conférence Générale des
Poids et Mesures 241, 252
conjectures 201
connaissance 210
conscience 236
conservation 23, 227
constante cosmologique 256
constante de Boltzmann 119,
255
constante de couplage de
Fermi 255
constante de couplage fort 255
constante de couplage gravit.
255
constante de Hubble 256
constante de la loi du
déplacement de Wien 256
constante de Planck 119
constante de Planck originale
254
constante de Planck réduite
254
constante de rayonnement de
corps noir 146
constante de rayonnement de
corps noir de
Stefan-Boltzmann 146
constante de Rydberg 255
constante de
Stefan-Boltzmann 256
constante de structure fine 66,
104, 244, 255, 255
constante magnétique 255
constante électrique 255
contacts ponctuels 50
continuité 23
continuum 25, 35
contraire 203
Convention du Mètre 241
conversion de bits en entropie
256
coordonnées rationnelles 260
cornichon 109
cornée 78, 142
corps humain, émission de
lumière 249
corps neutre 21
corps noir 146
corps noir, rayonnement 145
cosmonautes 89, 90
cosmos 161
coucher du soleil 100
couleur 142
couleur, inventaire mondial
266
couleurs dans la nature 266
coulomb 21, 243
Coulomb, force 25
couplage fort 287
couple 35, 182
courant électrique 20
covariant 225
Cr 139
cristallin 78
cristaux liquides 141
croyances 203
croyances dans les concepts
physiques 197
croûte terrestre 132
création de paire 144
création est un type de
mouvement 227
créationnisme 205
créationnisme scientifique 205
Cs 142
CsNO₃ 141
Cu 139
cube magique 194
cuisses de grenouilles 29
cuivre 20, 124, 126, 138
cumulonimbus 127
cumulus 127
cure-dent 131
curiosité 237
câble électrique, élimination
45
célébrité, manière d'y
parvenir 134
cônes dans la rétine 188
- D**
D₄DR 279
daltonien 122
daltonisme 122
datation au C14 273
de l'électron, spin 34
de vision nocturne, lunettes
249
degré Celsius 243
degré, unité d'angle 243
densité baryonique 257
densité de photons 257
densité du flux magnétique 35
densité lumineuse 249
densité moyenne de la Terre
258

D

DENTIFRICE

- dentifrice 168
dents 147
dents, croissance 147
description 230
dessein 229
dessein intelligent 205, 229
deutan 122
diagonale de Cantor 295
dialogue homme-machine 173
diamagnétisme 34, 139
diamant 138, 142
dichroïsme 140, 142
dichroïsme magnétique
circulaire 140
dieux 157, 183, 204, 218, 220,
223, 228, 239
diffraction 89
diffraction, limite 117
diffusion 91, 100, 144
diffusion de Mie 144
diffusion de Rayleigh 144
diminution de la couche
d'ozone 154
dioptrie 289
direction 25, 35
dirigeable 81
discernement 23, 25, 35
dispersion anormale 267
distance moyenne de la Lune
258
divines surprises 235
divinité 218
divinités 170
diélectricité 141
diélectriques 20
doctrine 203
doigts 73
doigts démontrent les
propriétés ondulatoires de
la lumière 73
domaine de définition 185
dopamine 279
droitiers 64
dualité électromagnétique 66
dynamos 37
déca 243
déci 243
découverte des concepts
physiques 199
- défi, classement 9
défi, le plus tenace de la
science 68
défi, niveau 9
défis 9, 14, 15, 19, 20, 23–26, 28,
30, 31, 35–43, 45–52, 54–66,
69, 70, 73–76, 78, 79, 84,
86–90, 93, 94, 96–99,
101–103, 105, 106, 108–110,
112, 114–116, 119, 120,
122–126, 128, 129, 133–138,
142, 144–149, 159–162,
167–171, 176, 177, 179, 182,
184–187, 190, 191, 193, 194,
207–210, 216, 218–223, 226,
232, 233, 243, 244, 246–248,
251–254, 256, 258, 260, 263,
281, 282
dégénérescence des dents 147
déluge de comètes 155
démarcation 233
démon de Maxwell 170
démonstration 201
dénombrabilité 184
déplacement de couleur, Wien
120
désastres futurs 154
détails 206
détails de la nature 162
détecteur d'ondes radio 72
détecteurs des airbags 30
détection de la polarisation à
l'œil nu 77
- E**
 ϵ_0 24
eau 139, 143
écart-type 253
échasses 208
éclair 18, 23, 127, 248
éclair émet des rayons X 129
éclair, forme en zigzag 127
éclairage lumineux 248
éclairage énergétique 248
éclat métallique 142
écriture 214
effacement 171
effacement mémoire 169
effaçable 171
- effet 235
effet acousto-optique 144
effet acoustomagnétique 140
effet acoustoélectrique 138
effet Auger 144
effet Barnett 34
effet Casimir 145
effet Compton 143
effet Cotton-Mouton 140
effet d'entraînement par
photon 142
effet de la Belle au bois
dormant 86
effet de peau 139
effet de pincement 139
effet de voile solaire 144
effet des cristaux liquides 141
effet Doppler, inversé 106
effet Einstein-de Haas 34
effet Ettinghausen 140
effet Ettinghausen-Nernst 140
effet Faraday 140
effet Frederichsz 141
effet Hall 139
effet Hall photonique 140
effet Hanle 140
effet Josephson 139, 242
effet Kerr 141
effet Kerr optique 144
effet Kirlian 16
effet magnéto-Seebeck 140
effet magnétoacoustique 140
effet magnétocalorique 140
effet magnétorhéologique 141
effet magnétoélastique 139
effet Majorana 140
effet Meissner 141
effet Mößbauer 144
effet Nernst 140
effet optoacoustique 144
effet optogalvanique 144
effet Paschen-Back 139
effet Peltier 138
effet Penning 139
effet photo 142
effet photoacoustique 144
effet photoélectrique interne
142
effet photoélectromagnétique

E

EFFET

- 140
 effet Pockels 141
 effet radiomètre 144
 effet Raman 144
 effet Richardson 139
 effet Righi–Leduc 140
 effet Sasaki–Shibuya 139
 effet Schadt–Helfrichs 141
 effet Schottky 141
 effet Seebeck 138
 effet Shubnikov–de Haas 140
 effet Smekal–Raman 144
 effet Stark 142
 effet Thomson 138
 effet vanne de spin 140
 effet Voigt 140
 effet Weigert 142
 effet Zeeman 139
 effet Zener 142
 effet Čerenkov 143
 effet électrocinétique 141
 effets optiques non linéaires 144
 effets thermomagnétiques 140
 effets thermoélectriques 138
 EHF, extrêmement haute fréquence 81
 Einstein, Albert 213
 électrets 16
 électricité 26
 électricité statique 138
 électrification 138
 électrique, flux 26
 électriques, poissons 30
 électro-osmose 141
 électrochromicité 143
 électrode 47
 électroluminescence 143
 électrolyte 47
 électrolytes 123
 électromagnétique, onde 84
 électromagnétisme comme preuve de la relativité restreinte 84
 électromètres 21
 électromouillage 141
 électronique des polymères 164
 électrons 124
 électronvolt 246
 électrostriction 141
 élément d'un ensemble 23, 25, 35, 181
 éléphants 171
 ELF 80
 elfes 128, 129
 Eliza 173
 émergence 218, 218, 278
 émergence des propriétés 218
 émetteur radio, le plus simple possible 72
 émetteur, le plus simple possible 72
 émission de champ 141
 émission thermique 139
 émissivité 142, 146
 empirique 202
 empiriques, déclarations 202
 Encyclopédie 33
 Énéide 231
 énergie 18
 énergie, conservation 112
 énigme de la jeune mère 193
 ennuyeux, physique 178
 enregistrement 168
 ensemble 179, 181
 ensemble d'arrivée 185
 ensemble des parties 181, 184
 ensemble-produit 182
 ensembles, utiles pour décrire l'Univers ? 224
 entiers 189
 entiers naturels 187
 entités 162
 entraînement du potentiel vecteur par des courants 59
 entre guillemets 162
 entropie 167
 environnement 120, 153, 161
 épistémologie 277
 équation d'onde 70
 équation des lentilles minces 88
 équations d'évolution 152
 équilibre thermique 120
 ères glaciaires 233
 erreur 201
 erreurs aléatoires 253
 erreurs systématiques 253
 espace des phases 152
 espace vectoriel euclidien 25, 35
 essence, versement 283
 ET logique, porte 170
 Éta Carinae 156
 étalon, pomme 252
 état 152
 éther 108, 205, 268
 étincelle 18
 étincelles 24
 étiquettes anti-vol 140
 étoile verte 120
 étoile à neutrons 17
 étoile, rapprochement 155
 étoiles 187
 EUV 83
 évanescence, onde 291
 évaporation de champ 142
 événement 196
 évolution 171
 ex nihilo 227
 exa 243
 exactitude 253
 exigences symboliques, science des 192
 existence de l'Univers 226
 existence des concepts mathématiques 219
 existence physique 219
 existence psychologique 220
 explication 234
 explication physique 232
 explosion de volcan 154
 explosion du volcan de Yellowstone 155
 expérience 163, 164
 expériences 196
 expérimentateurs 200
- F**
 fabrication 168
 facteur de phase 61
 faisceaux lumineux, tournants 91
 fait 196, 201
 fantômes 291
 farad 243

F

FARFADETS

farfadets 128
 faux 201
 Fe 139, 144
 feldspath 143
 femto 243
 fer 16, 139
 fermer légèrement les
 paupières 90
 ferromagnétisme 34, 139
 ferroélectricité 141
 feu 138
 fin de la physique appliquée
 154
 fin de la physique
 fondamentale 154
 fin de la science 223
 fini 183, 224
 flamme 138
 flash vert 99, 266
 flocons de neige 187
 fluorescence 143
 flux 284
 flux d'énergie 248
 flux magnétique 55
 fonction 185
 fonction mathématique 185
 fonctions harmoniques 135
 force de Coulomb 25
 forme mathématique 62
 formule de Heaviside 56
 formule de Larmor 86
 four 120
 four micro-ondes 131
 France, la vie est illégale 120
 Friendbot 173
 fréquence angulaire 70
 fusion froide 205
 futur et présent 232

G

GaAs 143, 144
 gadolinium 140
 gaucher, matériau 106
 gauchers 64
 gaz 144
 Gd 139
 GdSiGe 140
 General Motors 18
 giga 243

gloire 265
 Goethe, Johann Wolfgang von
 199, 220
 grammatical 176
 grand frère 184
 Grande Muraille 90
 Grande Muraille de Chine 265
 graphite 138, 139, 142
 gravitoluminescence 144
 gravité, cages de Faraday 146
 gray 243, 247
 grille de Hermann 110
 grilles de Hering 110
 guillemets 162
 guérisseurs, Philippines 209
 géant, volcan 155
 génie 200
 générateur de Kelvin 18, 283
 génération de seconde
 harmonique 143
 génération harmonique 144
 géodynamo 132

H

halo 89, 110, 265, 266
 halos 128
 He-Ne 144
 hecto 243
 Heiligenschein 110
 henry 243
 hertz 243
 heure 243
 heurter un champ 56
 hexagone magique 195
 HF, haute fréquence 81
 Hg 140
 Hilversum 130
 Hollywood, films 197
 hologramme 116
 hologrammes, en mouvement
 116
 holographie 117
 horreur du vide 222
 houblon 64
 huile 141
 humain, œil 78
 hydrogène 142
 hydrogène atomique 250
 hypothèse du continu 184

hypothèses 201
 hélicoptère 129
 hélium 137, 142, 234

I

icône 174
 id. 94
 idées vertes 207
 îles Canaries 154
 illumination 238
 image 174
 image réelle 88
 image virtuelle 88
 images 93
 images, et dispositifs de
 focalisation 87
 imagination 162
 imitation 202
 impédance caractéristique du
 vide 255
 impédance/résistance d'onde
 108
 impénétrabilité 145
 InAs :Mn 139
 incandescence 138, 145, 145
 incertitude totale 253
 incubation 238
 index, doigt 73
 indicateur 174
 indice de réfraction, négatif
 105
 indigo 82
 indiscernable 108
 induction magnétique 35
 indénombrabilité 184
 indépendamment 178
 infini 25, 35, 183, 223
 infinis 216
 infinitude 25, 35
 infinitésimaux 189
 informaticiens 160
 information, tableau 188
 infrarouge 81
 injective 183
 InP 144
 InSb 139, 140
 insectes 76
 instabilité du manteau
 terrestre 154

I

INSTABILITE

- instabilité du Système solaire 155
- instant magique 161
- instants magiques 238
- instruments 211
- intelligent, dessein 229
- intensité dipolaire 48
- intensité lumineuse 248
- intention 231
- interaction 162, 218
- interactions, réciprocité des 218
- interférence 73, 74
- interféromètres 251
- interféromètres en anneau 251
- interrupteur électrique 43
- interrupteur, inverseur 286
- intersubjectivité 202
- invariance 23
- invariance conforme 108
- invariance de jauge 59
- invariance par parité 65
- invariant 225
- inventaire mondial des couleurs 266
- inversion du champ magnétique de la Terre 155
- invisibilité, manteau 107
- ion 47
- ionisation 138, 141
- ionisation de champ 142
- ionosphère 48, 147, 148
- ions 29, 123, 125
- IRA ou infrarouge proche 81
- IRB ou infrarouge moyen 81
- IRC ou infrarouge lointain 81
- ISO 213
- isolants 20
- isolation 138
- italique 174
- J**
- jauge de Lorentz 39
- jaune 82
- jets 128
- jouer 196
- joule 243
- jour sidéral 256
- jour, unité de temps 243
- journée ensoleillée 248
- justesse 201
- K**
- katal 213, 243
- kelvin 241
- ketchup, mouvement 124
- kilo 243
- kilogramme 241
- Klitzing, von – constante 256
- KPO₄ 143
- L**
- lagrangien de Proca 67
- lagrangien du champ électromagnétique 38
- LaH 144
- lait 100, 203, 277
- Landolt–Börnstein 211
- langage 160
- langage humain 174, 175, 177
- langage parlé 174
- langage écrit 174
- langues parlées par une personne 188
- largeur totale de la courbe à la moitié du maximum 253
- laser 116
- laser et billes de verre 93
- laser et Lune 90
- laser pulsé à impulsion mortelle 121
- laser, lévitation 93
- lasers à rayons X 134
- lassitude comme signe de vérité 205
- latéralisation 65, 65
- lentille 87
- Levitron 272
- LF, basse fréquence 80
- ligne à haute tension 43
- lignes du champ 57
- lignes tourbillonnaires 57
- lignes électriques 43
- lignes équipotentielles 57
- limite de la diffraction 89
- limite de Planck 83
- limite des basses fréquences 80
- limite sur la résolution 90
- LiNbO₃ 143, 144
- linguistes 160
- linéarité du champ électromagnétique 70
- liquides 144
- lithium 234
- litre 243
- lobbyistes 199
- localisation (faible, d'Anderson) 138
- localité 224
- logiciens 160
- loi 215
- « loi » de Gauss 26
- loi de la nature, première 161
- loi de Laplace–Gauss 253
- loi normale 169
- « lois » de Coulomb et de Gauss, équivalence des 26
- lois de la nature 162, 228
- lois et saucisses 197
- lois, fainéantise 197
- longueur d'onde 74
- longueur d'onde de Compton 256
- longueur d'onde de de Broglie 242
- longueur gravitationnelle de la Terre 258
- loupe 88
- lueur dans les yeux d'un chat 110
- lumen 243
- luminescence 143
- luminosité 248
- luminosité du Soleil 258
- lumière 82
- lumière barométrique 138
- lumière est électromagnétique (la) 78
- lumière infrarouge 75
- lumière ultraviolette 75
- lumière, détection des oscillations 75
- lumière, moment cinétique 96
- lumière, pression 93
- lumière, vitesse constante en électromagnétisme 84

Lune et cerveau 234
 Lune et laser 90
 lunettes 123
 lunettes de vision nocturne 249
 Lunokhod 89
 lux 243, 248
 lévitation 93, 134, 141
 lévitation humaine 137

M

μ_0 36
 machines électrostatiques 45
 macula lutea 78
 magie 228
 magique, cubes et carrés 194
 magique, hexagone 195
 magiques, cubes 296
Magnetobacterium bavaricum 31
 magnétar 17, 50
 magnétique, potentiel vecteur 57
 magnétique, pôle, dans un miroir 64
 magnétisme commutable 139
 magnétoencéphalographie 68
 magnéton nucléaire 256
 magnétorésistance 139
 magnétosomes 31
 magnétostriction 139
 mammifères 115
 manchot 64
 Manhattan comme mine de cuivre 20
 manteau d'invisibilité 107
 manteau terrestre 133
 marche 166, 275
 marche sur deux pieds 166
 marguerite 187
 mariage 159
 Mars 247
 maser 96
 masse 152
 masse de Jupiter 259
 masse de la Lune 258
 masse de la Voie lactée 259
 masse du Soleil 258
 masse négative 135

mathématiciens 160, 178, 191
 mathématiques 178, 192
 mathématiques, physique appliquée 179
 matière, transformation 227
 matériau gaucher 106
 matériaux photoréfractifs 144
 matériaux photoréfringents 91
 Maxwell, démon 170
 mensonges 201, 204, 208
 mensonges généraux 205
 mensonges spécifiques 205
 menteur, paradoxe 207
 mercure 138, 142
 mesurabilité 23, 25, 35
 mesure 169, 212
 MF, moyenne fréquence 80
 Mg 139
 micro 243
 micro-ondes 81
 micronystagmus 114
 microscope 88
 microscope optique 289
 microscopie 116
 microscopie confocale à balayage laser 117
 microscopie en champ clair 116
 microscopie en champ proche à balayage optique 117
 microscopie en champ sombre 117
 microscopie oblique 117
 microscopie à contraste d'interférence différentielle 117
 microscopie à contraste de phase 117
 microscopie à déplétion par émission stimulée 117
 microscopie à fluorescence 117, 118
 miel 59
 mile 244
 milli 243
 million de dollars 217
 mind-reading 134
 minute 243, 259
 miracles 157, 203, 235

mirage 90
 miroir 45, 64, 86
 miroir commutable 144
 miroir concave 65
 Mn 139
 Mo 139
 modèles 197
 modèles de l'éther 268
 modèles de la nature 162
 mole 241
 moment cinétique 35, 96
 moment cinétique de la lumière 96
 monde 161
 monde, chaos ou système 161
 monochromatique 97
 monopôle magnétique 66
 monopôles 55
 monopôles magnétiques 68
 montgolfière 130
 morphogénétiques, champs 209
 moteur exploratoire 237
 moteur unipolaire 48
 motif 231
 mots 174
 mots entendus 188
 mots imprimés 188
 mots prononcés 188
 moulin à lumière 94
 mouvement 153
 mouvement des images 153
 mouvement et unités de mesure 242
 mouvement, réversibilité 63
 moyenne 214
 mu-métal 147
 multicouches métalliques 139, 140
 multivers 210
 muscles 188
 mystères 203
 mètre 241
 méga 243
 mélange de fréquence 144
 mélange de lumière 97
 mémoire 163
 mémoire, effacement 169
 mémoire, non réinscriptible

M

METAMATERIAUX

171
 métamatériaux 106
 métaphore 230
 métaux 145
 méthode scientifique 199
 métricité 23, 25, 35

N
 n-Ge 139
 n-Si 139
 NaCl 139
 naine blanche 17
 nano 243
 nanocristaux 50
 NASA 247
 NASA 97
 nature 161
 nature, sens de la 230
 Nb-Oxyde-Nb 139
 Ne 139
 nerfs 124
 neurologues 160
 neurones 166, 170, 188
 newton 243
 Ni 139
 nickel 16
 niobium 138
 Nit 249
 niveau des océans 154, 155
 NOAA 301
 noirceur 142
 nombre d'Avogadro 255
 nombre de dimensions 25, 35
 nombre de particules 224, 224
 nombre fini 216
 nombre infini de préfixes du
 SI 252
 nombres 191
 nombres complexes 191
 nombres dyadiques 189
 nombres ordinaux 189
 nombres premiers de Sophie
 Germain 296
 nombres rationnels 189
 nombres rationnels dyadiques
 189
 nombres réels 189, 190
 nombres surréels 277
 nombres transfinis 184

nombreux types 183
 non cantorians 276
 non stationnaires 135
 non-sens 207
 normale, loi 253
 normalité 282
 normalité de π 260
 notion 174
 nova 156
 noyau terrestre 133
 nuage d'Oort 155
 nuage de gaz interstellaire 154,
 155
 nuage moléculaire 155
 nuages d'orage sont des
 batteries 129
 nuages de plasma, flottants 131
 nœud 64
 néant 221
 négative 19

O
 objectif 231
 objet façonné 229
 objet, lévitation 135
 observables 213
 observateur à la vitesse de la
 lumière est impossible 86
 observation 169, 214
 observations 162
 octet 171
 œil 114
 œil humain 264
 œil, sensibilité 113
 œil humain 76
 ohm 243
 oiseaux 43, 76
 ombre avec un halo ou une
 auréole 110
 ombre avec un trou 91
 ombre de la Grande Muraille
 de Chine 90, 265
 ombres des câbles 48
 ombres, couleur des 266
 onde 70
 onde électromagnétique 84
 onde électromagnétique,
 création 84
 onde, moment cinétique 96

ondes de polarisation
 circulaire 78
 ondes gravitationnelles 96
 ondes radio 72, 80
 ondes térahertz 81, 147
 ondes électromagnétiques 70
 ondes électromagnétiques
 sphériques 69
 Opel 18
 opposé 177
 optique adaptative 114
 optiques, microscopes 289
 opération binaire 186
 or 141
 orangé 82
 ordre 23
 organes sensoriels des plantes
 pour les champs
 électriques et magnétiques
 69
 ornithorynque 30
 orque 219, 230
 os humain 147
 OVNI 205

P
 π , normalité de 259
 p-Ge 142
 paradoxe de la description
 incomplète 218
 paradoxe de la description
 surcomplète 218
 paradoxe du menteur 207
 paramagnétisme 34, 139
 paramètre 213
 paratonnerre 20
 paraélectricité 141
 paresse 197
 paresse en physique 196
 parhélie 101
 parhélies 265
 parsec 256
 particules de spin 1 96
 particules de spin 2 96
 particules quantiques 50
 particules, nombre 224
 parties, somme des 218
 pascal 243
 Pb 144

P

PBLAZRTI

- PbLaZrTi 142
 PbSe 138
 PbTe 138
 peau 81, 97
 peinture rétro-réfléchissante 110
 perceptions 162
 permittivité 108
 permittivité diélectrique du vide 254
 permittivité du vide 24
 perméabilité 108
 perméabilité du vide 36
 perméabilité magnétique du vide 254
 personne 273
 perversi 234
 phase 70
 philosophes des sciences 160
 phosphorescence 143
 phot 249
 photoconductivité 144
 photographie 116, 142
 photoluminescence 143
 photon, masse du 67
 photostriction 142
 photoélectricité 142
 physiciens expérimentateurs 200
 physiciens théoriciens 200
 physiologie 160
 physique 196, 199
 physique de l'état solide, dans la société 145
 physique ennuyeuse 178
 physique, étymologie 200
 phénomène 196
 phénomènes artificiels 217
 phénomènes surnaturels 217
 pico 243
 pierres 14, 185, 227, 232, 238
 pile 44
 pincettes optiques 95
 pistolet à impulsion électrique 41
 pièges de Paul 137
 pièges de Penning 137
 piézomagnétisme 139
 piézoélectricité 141
 Planck, unités corrigées 246
 planète, réchauffement 208
 plaques 133
 plasma, nuages flottants 131
 plasmas 123, 139, 144
 plasmoides 131
 platonisme 178
 point de Poisson 91
 point singulier 298
 poisson abyssal 143
 polarisabilité 141
 polarisabilité électrique 51
 polarisation 76, 142
 polarisation circulaire, onde 78
 polarisation de la lumière 76
 polarisation électrique 21
 polariseurs dans les éclairages et pare-brise des voitures 109
 polders 90
 polymère 142, 143
 polymères, électronique 164
 pomme comme pile 44
 pomme de terre comme pile 44
 pomme étalon 252
 pommes 203
 pommiers 252
 porte, ET logique 170
 portée ontologique 221
 positive 19
 positive ou négative 23
 potassium 29
 potentiel vecteur magnétique 57
 potentiel vecteur, entraînement par des charges 59
 potentiel électrique 59
 poussière 144
 pouvoir rotatoire 289
 pression de la lumière 93
 pression lumineuse 144
 primates 115
 primitives sémantiques universelles 176
 principe anthropique 233
 principe d'exclusion de Pauli 276
 principe physique 196
 principe porcin 234
 principe simien 234
 produit cartésien 182
 promenade de Planck 250
 propositions 160
 propositions indécidables 206
 propositions, ennuyeux 205
 propriétés de la nature 162
 propriétés émergentes 218
 protan 122
 protonvolt 247
 précision 206, 253, 254
 préfixes 243, 280
 préfixes du SI 252
 préfixes, SI 243
 préjugé 203
 présocratiques 279
 pseudovecteur 35
 psychologie collective 202
 psychologie de l'enfance 160
 psychologique, existence 220
 publique 205
 puissance 248
 pyroélectricité 141
 périégée 258
 périhélie 259
 péta 243
 pétroliers 46
 pétroliers, naufrage 46
 pôle magnétique dans un miroir 64
 pôle nord 33
 pôle sud 33
 pôles 30
 pôles nord 154
 pôles sud 154
- Q**
 quantités 213
 quantum d'action 119
 quantum de conductance 256
 quantum du flux magnétique 256
 quartz 141-143
 quaternions 191
 queues des comètes 96

R

RADIANT

R

- radian 242
- radioactivité 247
- radiocommande, la plus simple possible 72
- radiomètre de Crookes 94
- rapport de fréquence de Josephson 256
- rapport de masse proton-électron 256
- rasoir d'Occam 199
- rayon classique de l'électron 256
- rayon de Bohr 256
- rayon de la Lune 258
- rayon de la Terre 258
- rayon de Schwarzschild comme unité de longueur 246
- rayon laser 97
- rayon laser tubulaire 122
- rayon vert 266
- rayon à traction 109
- rayonnement 72, 152
- rayonnement blanc 143
- rayonnement continu de freinage 143
- rayonnement cosmique 125
- rayonnement de chaleur 138
- rayonnement de corps noir 145, 146
- rayonnement de transition 143
- rayonnement thermique 120, 138, 145, 145
- rayonnement, dépendance selon l'observateur 131
- rayons γ 83
- rayons cathodiques 27
- rayons cosmiques 125, 127, 129, 155
- rayons terrestres 210
- rayons X 83
- rayons X, durs 83
- rayons X, mous 83
- recherche de nouveauté 238
- recombinaison 139
- recouvrement des impôts 241
- recul 27
- relation 179
- relation binaire 182
- relation d'Ohm 126
- relation de dispersion 70
- relation de Lorentz 38
- relations 162, 182
- relations de transformation 152
- religion 204
- requins 30
- respect 230
- respirations 188
- rose 228
- rotation de Faraday 140
- rotation de la Terre 250
- rotation de la Terre, fin 155
- rotationnel 58
- rotationnel, visualisation du 58
- roue de Barlow 48
- rouge 82, 114
- rouge primaire 82
- ruban adhésif 45
- Rubik's Cube 188
- rubis 142, 144
- rumeurs 209
- rutile 77
- règle de Lenz 55
- règles 197
- règles de la nature 162
- réalité 162
- réchauffement de la planète 208
- réductionnisme 233
- réels 189
- réflectance 93
- réflectivité 142
- réflexion de Bragg 144
- réfraction 87, 105, 110, 140, 142
- réfraction, indice négatif 105
- réseau 166
- réseaux de neurones 166
- résine 15
- résineux 19
- résistance d'atomes uniques 51
- résistance électrique 51
- résistivité, effet Joule 138
- résolution 289
- résonance cyclotron 140
- résonance magnétique 141
- résonances de Schumann 270
- rétine 114
- rêves 162

S

- sable 187
- sacs comme dispositifs d'anti-gravité 137
- Sahara 187
- Sahara, signal de 50 Hz au milieu du 147
- salamandre 30
- sans dimension 255
- saturation 238
- Scarabeus 76
- science 210
- science des exigences symboliques 192
- science des nécessités symboliques 180
- science, fin de la 223
- sciences formelles 196
- sciences humaines 196
- sciences naturelles 196
- scientifique 210
- scientisme 210
- Se 144
- seconde 241, 243, 259
- sel 141
- semi-anneau 187
- semi-conducteurs 140
- semi-conductivité 138
- sens de la nature 230
- sens de la vie 230
- sensations 162
- sensations et mensonges 205
- sensibilité scotopique 286
- sept sages 15
- Service international de la rotation terrestre 250
- seuls les morts sont légaux 120
- SHF, super haute fréquence 81
- Si 142
- si 177
- SI, unités 241
- SI, unités supplémentaires 242
- siemens 243
- sievert 243, 247

S

SIGNAL

- signal 107
 signal physique 102
 signaux nerveux 275
 signe 174
 silicium 138, 139
 singularités nues 156
 sirop 289
 sodium 29
 Soleil 273, 293
 soleil double 101
 Soleil, luminosité 273, 293
 Soleil, émission de chaleur 293
 Soleil, émission thermique 273
 solidification du noyau de la
 Terre 156
 solidité 138, 145
 somme des parties 218
 son 89
 sonoluminescence 144
 souvenirs 214
 soviets 32
 spatiale, dimensionnalité 108
 spectromètres 97
 spin 34
 spiritualité 204
 sprites 128
 spéculations 201
 spéculative 202
 squark 300
 SrAlO₄ 143
 stationnaire 135
 stigmates 209
 Stoney, unités 246
 stratus 127
 structure algébrique 186
 structures d'ordre 186
 structures topologiques 186
 stéradian 242
 succession 23
 sucre 87, 142, 143, 289
 suite de Fibonacci 276
 sujets 176
 supernovæ 156
 superposition 70
 superradiation 144
 superstition 203
 supraconducteurs 141
 supraconductivité 138
 supraluminique 107
 surdescription 60
 surjective 183
 surnaturels, phénomènes 217
 surnuméraires, arcs-en-ciel 74
 surprises dans la nature 154
 surprises divines 235
 surréel 189
 sursauteur gamma mou 17
 sursauts gamma 155
 sylphes 128, 129
 symbole mathématique 213
 symboles 174
 symboliques, science des
 exigences 192
 symétrie de jauge 59
 symétries 215
 synapses 170
 syntaxique 176
 système algébrique 186
 système d'unités de Gauss 24
 système d'unités de
 Heaviside–Lorentz 24, 246
 système d'unités gaussiennes
 246
 système d'unités
 électromagnétiques 24, 246
 système d'unités
 électrostatiques 24, 246
 Système géodésique mondial
 259
 Système international 24
 Système International
 d'Unités (SI) 241
 systèmes d'unités 24
 séparabilité 23
 séparabilité de l'Univers 225
 sérieux 234
- T**
 table comme dispositif
 d'anti-gravité 137
 taille de la Voie lactée 259
 taille des chaussures 252
 TbCl₃ 143
 temps universel coordonné
 250
 température du fond diffus
 micro-onde 257
 tempêtes solaires 147
 tenseur 37
 tenseur antisymétrique 35
 tenseur dual du champ 55
 tenseur énergie–impulsion 63
 tenseur énergie–impulsion du
 champ électromagnétique
 63
 termes 174
 Terre, rotation 250
 tesla 36, 243
 test 235
 thallium 94
 « théorème » d'Ampère 36
 thermique, rayonnement 145
 thermoluminescence 143
 thèses 201
 théoriciens 200
 théorie 204
 théorie de l'évolution 205
 théorie des champs 57
 théorie du mouvement 159
 théorie du Tout 159
 théorie physique 204
 théorème d'Earnshaw 135
 théorème de Gauss 284
 TNT, contenu énergétique 256
 TOE 159
 TOM 159
 tomographie 117
 tonne 243
 topologie 108
 tourmaline 141
 tournesol 187
 tout, le 161
 trace 38
 traction, rayon 109
 transfinis, nombres 184
 transformateur, champ de
 Poynting 69
 transformation de jauge 60
 transformation de la matière
 227
 transformations de jauge 152
 transparence 142
 transporteur d'énergie 107
 transsubstantiation 205
 triboluminescence 143
 triréfringence 76, 76
 tritan 122

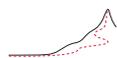
T

TSUNAMI

- tsunami géant issu des Îles
Canaries 154
- tubulaire, rayon laser 122
- tungstène 109
- télescope 88
- télescope de Galilée 88
- télescope hollandais 88
- télescopes dans la nature 88
- télescopes 117
- télé 143
- télécommande à distance, la
plus simple possible 72
- télécommunications 120
- téléphone portable 16
- téléphone satellite et vitesse de
la lumière 73
- télévision 15
- téra 243
- térahertz, ondes 81, 147
- U**
- udeko 243
- udekta 243
- UHF, ultra haute fréquence 81
- UICPA 281
- UICPA 213
- UIPPA 281
- UIPPA 213
- ultrasons 135
- ultraviolet 82
- unification 232
- Union Géodésique et
Géophysique
Internationale 259
- unité 212, 241
- unité astronomique 256
- unités de base 241
- unités de Planck corrigées 246
- unités de Stoney 246
- unités naturelles de Planck
244
- unités SI 253
- unités, non SI 244
- unités, véritables naturelles
246
- Univers 161
- univers, autres 202
- univers, compréhensible 225
- univers, effondrement 156
- univers, est-ce un ensemble ?
224
- univers, existence 226
- univers, un seul 217
- universaux 175
- universaux lexicaux 176
- UNIX 28
- UVA 83
- UVB 83
- UVC 83
- V**
- valeur 185
- vampire 86
- vanadate 77
- variable 213
- variance 253
- vecteur d'onde 70
- vecteur de Poynting 61
- vendeko 243
- vendekta 243
- ver luisant 143
- verbe 176
- verre 138, 140, 142
- vert 82
- vert primaire 82
- vert, étoile 120
- verte 114
- vertes, idées 207
- vertébrés gazeux irritables 204
- VHF, très haute fréquence 81
- vide 108
- vide, instable 156
- vie, sens de la 230
- violet 82
- virtuel, image 88
- vitesse d'un électron 103
- vitesse de dérive 124
- vitesse de front 104
- vitesse de groupe 102
- vitesse de groupe négative 104
- vitesse de groupe peut être
infinie 103
- vitesse de l'énergie 104
- vitesse de la lumière 124
- vitesse de la pointe d'un coup
de foudre 48
- vitesse de phase 102
- vitesse des électrons 124
- vitesse du signal électrique 124
- vitesse précurseur 104
- vitesse, dérive des électrons 49
- vitreux 19
- vocabulaire 174, 192
- voir 120
- voitures, polariseurs intégrés
109
- volt 243
- vrai 204
- vérification 238
- véritable vitesse de la lumière
105
- vérité 201
- vérité pure 201
- W**
- W 139, 142
- watt 243
- weber 243
- weko 243
- wekta 243
- Wien, « loi » du déplacement
de couleur 120
- wolframates 143
- X**
- xenno 243
- xenta 243
- Y**
- yeux des oiseaux 115
- yocto 243
- yotta 243
- Z**
- zepto 243
- zetta 243
- ZFC 182
- ZFC, axiomes 181
- ZnS 143
- ZnSb 138
- zéro 187



Z
—
ZERO



LA MONTAGNE MOUVEMENT

L'Aventure de la Physique – Vol. III

Lumière, Charges et Cerveau

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.

