



SCIENCE



Translation from the English language edition of:
short cuts SCIENCE - © UniPress Books Ltd 2023

Directeur artistique : Alexandre Coco
Éditeur consultant : Mark Peplow
Éditrice d'acquisition : Kate Duffy
Illustrateur : Robert Brandt

Traduction et mise en page de l'édition française : Benjamin Peylet

ISBN (papier) : 978-2-7598-3093-0
ISBN (ebook) : 978-2-7598-3094-7

Imprimé en Serbie

Copyright © EDP Sciences 2023

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

1 ORIGINES

8

Peut-on encore entendre le Big Bang ?	14
Combien d'étoiles faut-il pour faire un être humain ?	16
Quel est le sens de la demi-vie ?	18
La Terre bouge-t-elle ?	20
La vie est-elle née dans une soupe ?	22
L'Évolution est-elle un jeu de sélection ?	24

2 FORCES ET ÉNERGIE

26

Tout obéit-il aux lois du mouvement de Newton ?	32
Si c'est en haut... ?	34
La thermodynamique, un sujet brûlant ?	36
De quoi se charge l'électromagnétisme ?	38
Qu'est-ce qui va plus vite que la lumière ?	40
Comment voir un trou noir ?	42
À quoi sert la matière noire ?	44

3 MATIÈRE

46

Comment les atomes ont-ils divisé les savants ?	52
Le tableau périodique prévoit-il l'avenir ?	54
Y a-t-il des agents secrets dans les liaisons chimiques ?	56
La chiralité est-elle à portée de main ?	58
Comment naviguer à l'échelle nanométrique ?	60

4 FONDATIONS

62

Qui a quantifié la physique quantique ?	68
Une particule est-elle aussi une onde ?	70
Est-on bien certain du principe d'incertitude ?	72
Qu'est-ce que l'antimatière ?	74
Le modèle standard est-il en pièces ?	76
Quelle est la saveur d'un neutrino ?	78
Comment attraper un boson de Higgs ?	80

5 VIE 82

La taxonomie peut-elle tous nous relier ?	88
Comment la photosynthèse nourrit-elle la planète ?	90
Les cellules sont-elles la clé de la vie ?	92
Que trouve-t-on dans l'ADN ?	94
Comment séquencer un gène ?	96
Comment faire évoluer une enzyme ?	98

6 SANTÉ 100

Qu'est-ce qu'un microbe ?	106
Les vaccins sont-ils la seule voie de l'immunité ?	108
L'épidémiologie est-elle mauvaise pour la santé ?	110
Quand un médicament ne marche-t-il plus ?	112
Comment reprogrammer une cellule ?	114
L'édition génomique, c'est bien ou c'est mal ?	116

7 PLANÈTES 118

Le réchauffement peut-il détruire la planète ?	124
La biodiversité est-elle vraiment diverse ?	126
Quelles sont les limites à la croissance ?	128
Comment renouveler l'énergie de la Terre ?	130
Est-ce que Boucle d'Or connaît des aliens ?	132
Y a-t-il quelqu'un au bout du fil ?	134

8 INFORMATION 136

Qu'y a-t-il au cœur de la méthode scientifique ?	142
Le système d'unités international est-il bien constant ?	144
Qu'est-ce que la théorie de l'information ?	146
Peut-on mettre de l'ordre dans le chaos ?	148
La vie n'est-elle qu'une théorie du jeu ?	150
Les machines pensent-elles comme nous ?	152
Qui a atteint la suprématie quantique ?	154

POUR ALLER PLUS LOIN 156

INDEX 158

REMERCIEMENTS 160

INTRODUC

La science forme un gigantesque territoire du savoir humain. Il y a quelques siècles encore, il était possible à un érudit d'en connaître tous les recoins. Mais le rythme des découvertes s'est accéléré et les frontières de la science se sont étendues à une vitesse ahurissante. De nos jours, comment ne pas se perdre dans ce paysage scientifique immense ?

Avec une carte. Les raccourcis de ce livre vous guideront dans ce voyage, depuis l'aube des temps jusqu'aux plus récentes découvertes de l'édition génomique et de l'informatique quantique. En chemin, vous croiserez les grands noms cachés derrière ces découvertes et constaterez que la science n'est pas qu'une simple collection de faits ; c'est aussi une aventure profondément humaine, un procédé imparfait, mais ô combien vivant, pour concevoir le fonctionnement de l'Univers.

Notre expédition commence par une série de genèses : le Big Bang, l'histoire de la Terre et l'évolution de la vie. Nous verrons ensuite comment l'énergie et les forces modèlent le cosmos et nous rencontrerons les atomes minuscules et les molécules qui forment la matière autour de nous. Ce chemin nous mènera toujours plus loin dans le monde étrange de la physique quantique.

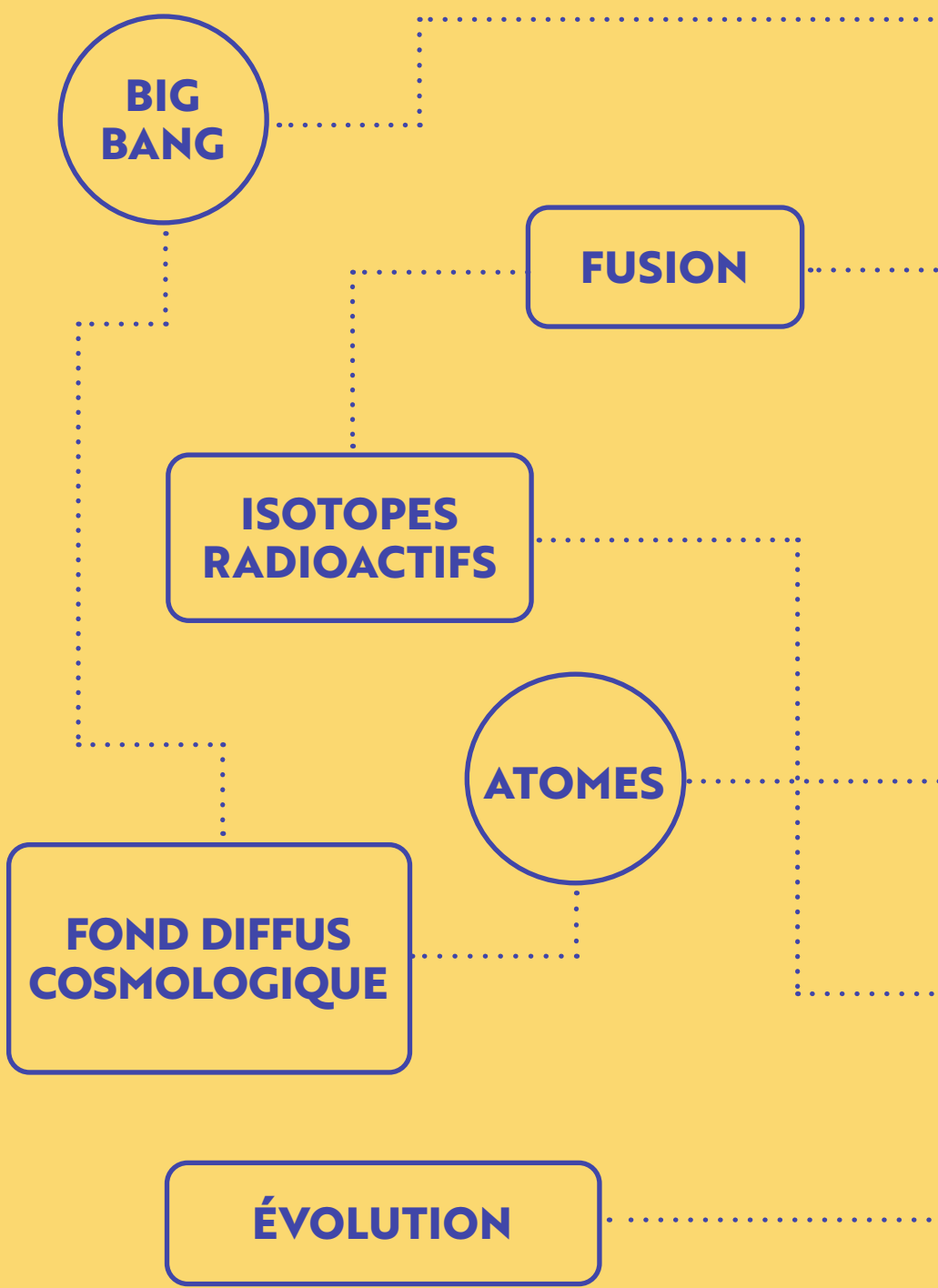
TION

Nos pas s'y mesureront en quadrillions de millimètres. Là, une nouvelle théorie de gravité quantique nous attend, par-delà les frontières de la compréhension.

Nous reviendrons ensuite à l'air libre pour étudier les mécanismes de la vie, des cellules et de la photosynthèse, des gènes et des enzymes, grâce auxquels les chercheurs ont développé des vaccins, des antibiotiques, des traitements qui ont considérablement prolongé nos vies ces derniers siècles. Ce chemin mène aussi aux nouvelles technologies de la reprogrammation cellulaire qui promet d'autres avancées extraordinaires.

En prenant encore plus d'altitude, nous verrons comment la Terre permet la vie et comment nous pouvons protéger cet environnement pour les générations futures. Au-delà, nous atteindrons les étoiles et des mondes innombrables qui pourraient abriter d'autres civilisations. Notre destination finale sera l'information elle-même, la force qui propulse la révolution informatique.

Le territoire que couvre ce livre fournit un bref aperçu du monde scientifique, mais il reste tant à découvrir ! En attendant, nous sommes ravis que vous ayez embarqué dans ce tour d'horizon autour de 50 idées scientifiques centrales. Nous espérons que le voyage sera agréable.



CHAPITRE 1

ORIGINES

ÉTOILES

ÉLÉMENTS

TERRE
PRIMORDIALE

TECTONIQUE
DES
PLAQUES

INTRODUCTION

Comment en est-on arrivé là ? Les humains ont ruminé cette question existentielle pendant des millénaires et la science nous propose des réponses extraordinaires. Ce chapitre se concentre sur les origines, ce que la science nous raconte de la naissance de l'Univers, de l'apparition de la vie et son évolution jusqu'à la panoplie des **ESPÈCES**, dont la nôtre, qui peuplent notre planète.

Cette question des origines nous entraîne dans un périple au travers du temps et de l'espace. Tout a commencé il y a 13,8 milliards d'années par un événement appelé le **BIG BANG** qui a libéré toute la matière et l'énergie de l'Univers depuis un point unique (page 14).

Puis l'Univers s'est étendu, le rayonnement de haute énergie de ses premières années s'est étiré pour atteindre des longueurs d'onde supérieures. Aujourd'hui, il est encore visible sous forme de **MICRO-ONDES** qui nous parviennent depuis toutes les directions du cosmos. Ce **FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE**, écho résiduel du Big Bang, est le message que la création a laissé dans le ciel.

Quelques centaines de milliers d'années après le Big Bang, le plasma brûlant qui emplissait l'Univers s'est refroidi suffisamment pour former des atomes neutres, l'hydrogène, l'hélium, un peu de lithium. Les autres éléments ont dû attendre que s'agglutinent petit à petit les nuages de gaz qui formeront les premières étoiles, des centaines de millions d'années plus tard.

Les **ÉTOILES** fonctionnent à la fusion, elles écrasent le noyau des atomes d'hydrogène pour former de l'hélium,

puis du carbone, de l'oxygène et d'autres éléments. Les plus grosses atteignent des éléments très lourds, qu'elles répandent partout lors de **SUPERNOVAS** spectaculaires. La plupart des éléments de notre corps ont été formés par des réactions de **FUSION** dans les étoiles (page 16).

Le nuage de gaz et de poussière qui a fait naître le Soleil a aussi créé les planètes si variées de notre système solaire. En étudiant les isotopes radioactifs des plus vieilles pierres de notre planète, les scientifiques ont déterminé que la Terre s'était formée il y a environ 4,5 milliards d'années (page 18).

Depuis, la Terre a connu des changements importants. La lente convection de roche à moitié fondue sous la croûte terrestre a déplacé les continents, un mécanisme appelé la **TECTONIQUE DES PLAQUES** qui contribue à enrichir les océans d'éléments essentiels à la vie (page 20).

Les débats sont toujours ouverts quant aux origines de la vie. Une expérience célèbre a tenté de reproduire les conditions de la Terre primordiale et découvert qu'un courant électrique appliqué à un mélange chaud d'eau et de certains gaz produisait bien les briques élémentaires de nos molécules biologiques (page 22).

Comment ces molécules se sont-elles organisées jusqu'à produire les organismes unicellulaires qui ont dominé la Terre des milliards d'années durant ? Encore un mystère. Cependant, nous savons que l'**ÉVOLUTION**, petit à petit, a modifié ces êtres en organismes de plus en plus complexes qui se sont diversifiés en espèces (page 24). Il y a 300 000 ans, ce processus a abouti à la création d'un primate particulièrement malin, *Homo sapiens* : le premier humain de notre espèce.

BIG BANG

Théorie largement acceptée de la naissance de l'Univers : il y a environ 13,8 milliards d'années, il se serait étendu à partir d'un point unique infiniment dense.

FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE

Rayonnement fossile issu des premiers âges de l'Univers, à l'époque de son expansion rapide et de son refroidissement. Preuve du Big Bang.

ÉTOILE

Objet astronomique massif formé d'un gaz très chaud appelé plasma, où hydrogène et hélium fusionnent pour former des éléments plus lourds, ce qui émet de l'énergie sous forme de lumière et de chaleur.

FUSION

Deux noyaux atomiques fusionnent pour former un nouvel atome plus lourd. La différence de masse est émise ou absorbée sous forme d'énergie.

GALAXIE

Groupe d'étoiles, de nuages de gaz, de poussière et autres objets retenus ensemble par gravité. Il y a des milliards de galaxies dans l'Univers.

SUPERNOVA

Puissante explosion d'une étoile à la fin de sa vie, qui émet d'énormes quantités de matière et d'énergie.

ESPÈCES

Groupe d'organismes capables de se reproduire naturellement et de produire une descendance fertile. Quand une population évolue pour devenir une nouvelle espèce distincte, on parle de spéciation.

CHARLES DARWIN

Naturaliste, géologue et biologiste anglais (1809–82) ayant découvert que l'évolution passe par un procédé de sélection naturelle.

SÉLECTION NATURELLE

Mécanisme expliquant que les organismes mieux adaptés à leur environnement sont plus susceptibles de survivre et de transmettre leurs caractères à leur descendance.

PHYSIQUE

MICRO-ONDES

Type de rayonnement électromagnétique. La définition précise varie, mais comprend généralement les longueurs d'onde entre 1 m et 1 mm (fréquences de 300 MHz à 300 GHz), ou entre 0,3 m et 3 mm (1 à 100 GHz).

RAYONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Énergie qui se propage sous forme d'ondes électromagnétiques voyageant à la vitesse de la lumière ; comprend les ondes radio, les micro-ondes, infrarouges, ultraviolets, les rayons X et les rayons gamma.

DEMI-VIE

Temps requis pour qu'une quantité soit divisée par deux. Pour la désintégration radioactive, temps pour que la moitié des noyaux de l'échantillon soit transformée.

DÉSINTÉGRATION RADIOACTIVE

Processus au cours duquel un noyau atomique instable émet spontanément des particules et de l'énergie et se change en un noyau différent, plus stable.

TECTONIQUE DES PLAQUES

Théorie selon laquelle la croûte terrestre est divisée en « plaques » qui se déplacent les unes par rapport aux autres, produisant chaînes de montagnes, volcans et tremblements de terre.

ÉVOLUTION

Théorie biologique selon laquelle les espèces changent par petites modifications au cours des générations successives.

ABIOGÈNÈSE

Théorie du procédé chimique qui a permis l'apparition des premières formes de vie sur Terre à partir de matière inanimée.

ACIDE RIBONUCLÉIQUE

Molécule à simple brin, notée ARN, portant de l'information copiée de l'ADN. L'ARN joue un rôle important dans la fabrication des protéines.

SOUPE PRIMORDIALE

Mélange de molécules organiques qui pourrait produire les briques élémentaires de la vie dans certaines conditions atmosphériques précises.

Peut-on encore entendre le Big Bang ?

→ Oui. C'est le rayonnement du fond diffus cosmologique et il nous aide à rassembler des morceaux d'histoire de l'Univers. Tout ce qu'il faut pour l'entendre, c'est un poste de radio.



Notre Univers est né avec le Big Bang, il y a environ 13,8 milliards d'années. Quand on regarde

l'espace, on observe des galaxies lointaines qui s'éloignent de nous, et c'est grâce à leur couleur que nous savons qu'elles s'éloignent. Comme une sirène d'ambulance change de ton quand elle nous dépasse, car son onde sonore s'étire quand l'ambulance s'éloigne, l'onde de lumière émise par les galaxies s'étire vers nous et apparaît plus rouge. Plus la galaxie en question va vite, plus sa lumière est rouge. C'est le « décalage vers le rouge ».

Ce décalage nous révèle que notre Univers est en expansion, il était donc plus petit par le passé. Si on remonte suffisamment loin, on peut donc supposer qu'à existé l'instant où toute la matière de l'Univers se trouvait entassée en un seul point, qui s'est étendu soudain. C'est le Big Bang.

Après le Big Bang, l'Univers était rempli de rayonnement, sous forme de lumière. Cet Univers très jeune et très chaud a rapidement enflé, puis il s'est lentement refroidi, s'est étiré, et la lumière aussi s'est étirée en micro-ondes. Aujourd'hui, après tous ces milliards d'années, on voit encore la chaleur résiduelle du Big

Bang sous forme d'un rayonnement que les télescopes spécialisés dans les micro-ondes détectent comme une « lueur » dans toutes les directions du ciel. Cette lueur est le fond diffus cosmologique (FDC), un écho du Big Bang.

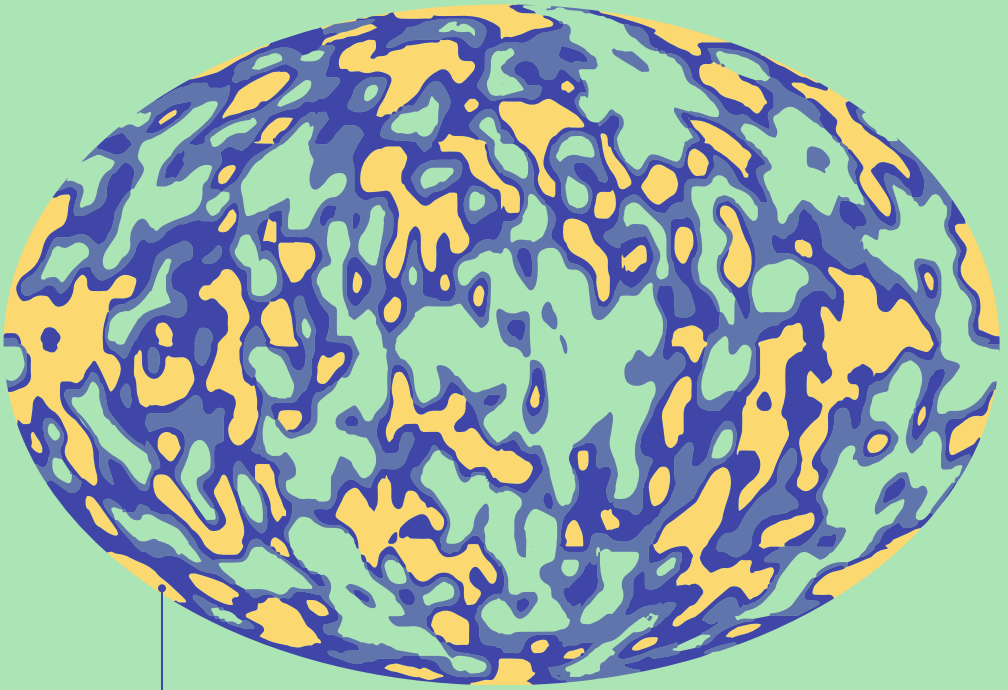
Le FDC ne se voit pas à l'œil nu, il est bien trop froid pour ça, 2,725 °C au-dessus du zéro absolu (-273,15 °C), mais on peut l'entendre. Ralph Apher, un cosmologiste américain, est celui qui a prédit son existence en 1948. Mais ce n'est qu'en 1964 qu'Arno Penzias et Robert Wilson l'ont découvert par accident, ce qui leur vaudra le prix Nobel de physique. Ces deux astronomes utilisaient une antenne radio pour mesurer des signaux venus de l'espace et se demandaient ce qui émettait tout ce bruit. Ils pensaient à une forme d'interférence, mais ils ont bien vite réalisé que cela venait de partout dans le ciel, quelle que soit la direction de l'antenne. C'était le FDC.

Découvrir le FDC était un peu comme observer les cendres d'un enfer depuis longtemps éteint. C'est ce qui a donné à la théorie du Big Bang, une hypothèse parmi d'autres pour la formation de l'Univers, sa place de choix chez les cosmologistes.

FOND DIFFUS COSMOLOGIQUE

Il est plutôt rare que la cosmologie fasse la une des journaux. En 1992, quand les données de la mission Cosmic Background Explorer (COBE) de la NASA ont permis de cartographier le FDC, c'est pourtant ce qu'il s'est passé. La carte est ovale pour présenter plus simplement l'information qu'elle contient. Elle nous montre que si

le FDC est présent partout dans l'Univers, il existe de petites fluctuations en son sein, les différentes teintes de l'image. Les régions plus sombres nous révèlent ainsi où se forment les galaxies. Ces fluctuations nous permettent d'affiner les estimations de l'âge et de la composition de l'Univers, et la naissance des premières étoiles.



Les régions denses forment des galaxies.

Combien d'étoiles faut-il pour faire un être humain ?

→ Probablement plusieurs. Notre étoile le Soleil permet la vie sur Terre, mais la plupart des éléments chimiques de nos corps ont été produits au cœur d'autres étoiles, mortes depuis bien longtemps.



Nos corps sont formés d'une merveilleuse variété d'éléments. Six d'entre eux comptent pour environ 99 % de notre masse : l'oxygène, le carbone, l'hydrogène, l'azote, le calcium et le phosphore. On en compte une vingtaine d'autres dans nos corps, tous essentiels à la vie, dont le chlore, le magnésium et le potassium.

Chaque atome d'hydrogène compte dans son noyau un proton formé dans la première seconde après le Big Bang (page 14). Les autres ont été produits au cœur des étoiles.

Le Soleil et les autres étoiles génèrent leur énergie par une forme d'alchimie cosmique : elles transforment les éléments légers en d'autres, plus lourds, un processus appelé la fusion. La chaleur et la pression énormes en leur cœur écrasent les protons les uns contre les autres et des noyaux d'hélium se forment. C'est l'astronome britannique Arthur Eddington qui a découvert ce mécanisme en 1920.

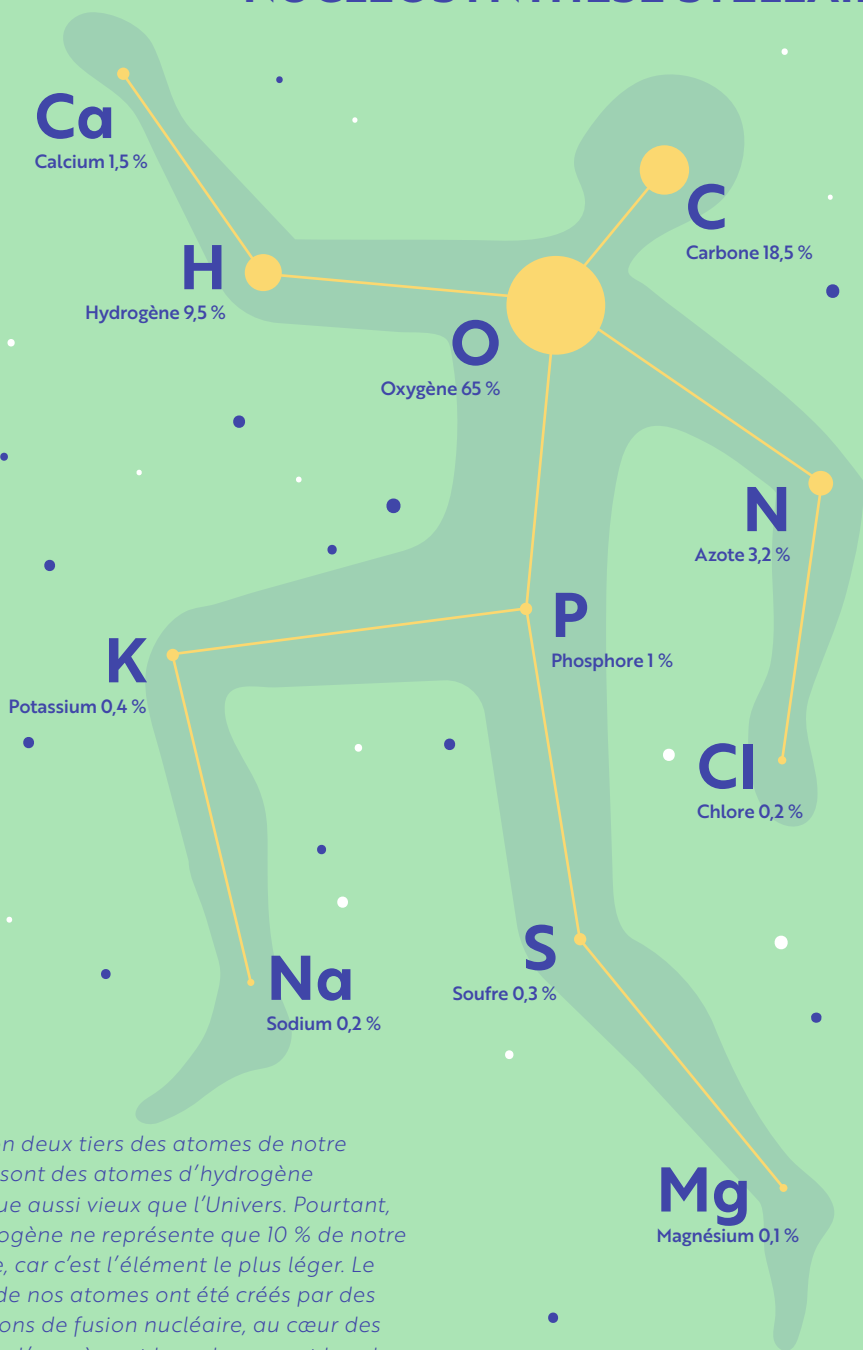
Il faut attendre Fred Hoyle, dans les années 1940 et 1950, pour comprendre comment d'autres processus de fusion produisent les noyaux atomiques plus gros. Quand une étoile a épuisé son stock d'hydrogène, elle se contracte et son cœur devient assez chaud pour

que fusionnent les noyaux d'hélium, ce qui produit du carbone et de l'oxygène. Les plus petites s'arrêtent là et deviennent des naines blanches. Mais les grosses étoiles continuent de s'élever dans le tableau périodique (page 54) et produisent le fer, le cobalt et le nickel. Parfois, d'autres réactions nucléaires ajoutent des neutrons supplémentaires aux noyaux, ce qui forme des éléments encore plus lourds.

La situation devient alors explosive. Privé de la pression de rayonnement de la fusion, le cœur des étoiles massives s'effondre et écrase les noyaux d'atome pour former une étoile à neutrons ou un trou noir (page 42). L'onde de choc produite pulvérise les couches externes de l'étoile : c'est une supernova. Tous les éléments sont dispersés dans le cosmos. On pense que les collisions entre étoiles à neutrons ou entre naines blanches sont aussi des sources importantes d'éléments plus lourds que le fer.

Chaque supernova répand des graines de vie dans le cosmos. Ces déchets stellaires s'amoncellent en nuages où naissent des planètes et de nouvelles étoiles. Étant donné l'âge de notre galaxie, certains des atomes de notre corps ont peut-être vécu plusieurs de ces résurrections stellaires.

NUCLÉOSYNTÈSE STELLAIRE



Environ deux tiers des atomes de notre corps sont des atomes d'hydrogène presque aussi vieux que l'Univers. Pourtant, l'hydrogène ne représente que 10 % de notre masse, car c'est l'élément le plus léger. Le reste de nos atomes ont été créés par des réactions de fusion nucléaire, au cœur des étoiles. L'oxygène et le carbone sont les plus communs parmi eux, toutefois, des éléments comme le soufre et le magnésium, qui ne représentent que 1 % de notre masse, sont aussi indispensables à la vie. Comme l'a dit le célèbre astronome Carl Sagan :
« Nous sommes de la poussière d'étoiles. »

Quel est le sens de la demi-vie ?

→ C'est le temps pour que la moitié des atomes d'un échantillon se désintègre. En comptant les produits de cette désintégration, on estime l'âge des roches et des objets, des indices clés pour retracer l'histoire du monde.



Tous les éléments ont des demi-vies, car tous ont des isotopes radioactifs, dont le noyau atomique finit par subir le processus de désintégration radioactive, et la demi-vie d'un élément est le temps nécessaire pour que la moitié des atomes d'un échantillon l'ait subi. Les éléments très radioactifs, tels que polonium et plutonium, ont des isotopes aux demi-vies très courtes. Les isotopes des éléments stables, comme l'étain, ont parfois des demi-vies très longues.

Dans tous les noyaux de tous les atomes de tous les éléments chimiques, on trouve des protons et des neutrons, sauf dans l'hydrogène (page 52). Tous les atomes d'un élément donné contiennent le même nombre de protons, mais le nombre de neutrons, lui, varie, ce qui entraîne l'existence d'isotopes. Les éléments familiers tels que l'oxygène ont toujours au moins un isotope stable, et les moins stables se désintègrent vite. Les éléments très radioactifs se désintègrent encore plus vite, mais chacun de leurs isotopes le fait à un rythme différent.

La demi-vie des isotopes va de milliards d'années à quelques millisecondes. De plus, les noyaux atomiques dans un échantillon ne

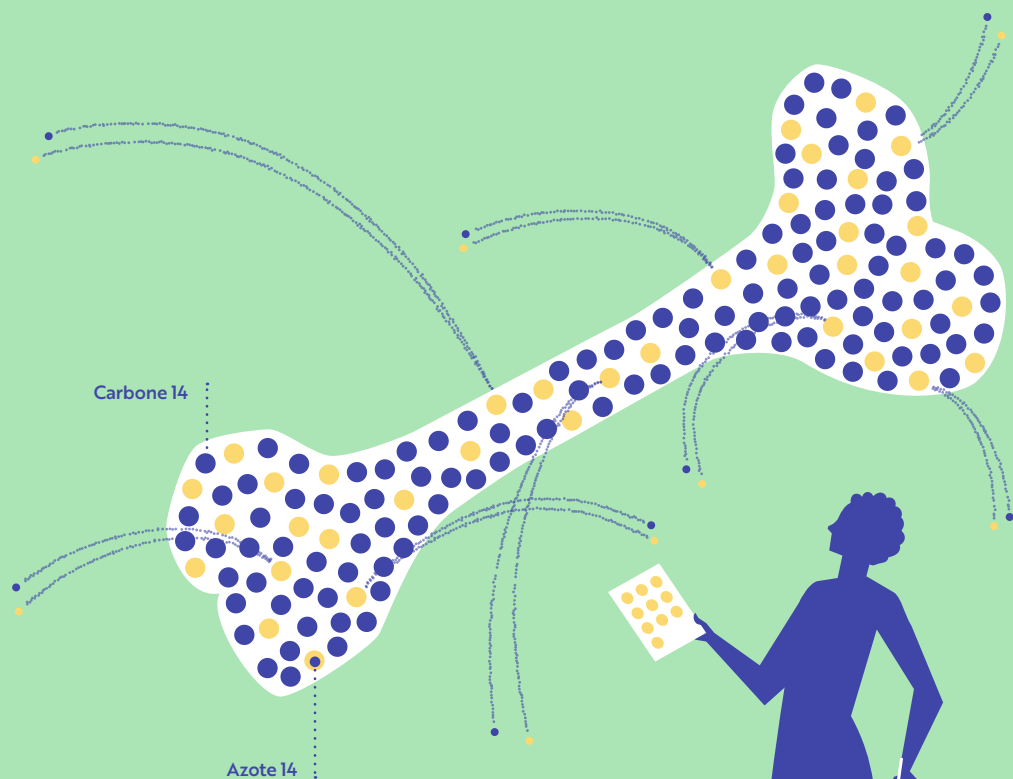
se désintègrent pas tous ensemble. Comme des bulles de savon, certains « éclatent » çà et là avant qu'ils ne disparaissent tous.

Certaines désintégrations émettent un rayonnement dangereux, comme l'uranium employé dans les centrales nucléaires. Connaître sa demi-vie nous permet de manipuler les déchets avec les précautions nécessaires.

La désintégration a aussi des avantages : elle nous permet de dater des roches, des fossiles, des artefacts archéologiques. En comparant la proportion d'un isotope dans un objet à sa création (ou dans un fossile au moment de la mort de l'organisme) avec la quantité restante, non encore désintégrée, on déduit combien de demi-vies sont passées depuis, et donc son âge.

Le carbone 14, isotope assez instable, est utile pour dater les objets archéologiques de quelques milliers d'années (14 est le nombre de neutrons et de protons dans son noyau). Le potassium 40 est bien plus stable, il se désintègre en argon 40 selon une demi-vie de 1,25 milliard d'années ; en comparant les proportions de ces éléments dans les roches, on déduit l'âge de la Terre (4,5 milliards d'années) et de ses structures.

DATATION RADIOMÉTRIQUE



Carbone 14

Azote 14

La datation radiométrique nous sert à calculer l'âge des roches et de choses autrefois vivantes, comme les fossiles, le bois ou les os. Avec le temps, l'isotope « père », par exemple le carbone 14, se transforme en isotope « fils », dans ce cas l'azote 14. Calculer la proportion des deux nous permet de déterminer l'âge. La désintégration radioactive permet aussi aux médecins d'étudier le corps humain. Du phosphore radioactif injecté dans les veines d'un patient victime d'une fracture migre jusqu'aux zones où l'os se répare, et s'y désintègre. Le médecin le détecte à ce moment et peut grâce à cela former une image de la fracture afin de savoir comment la résorber au mieux.

La Terre bouge-t-elle ?

→ Oui, mais plus ou moins vite selon les régions. La croûte terrestre est un puzzle qui se déplace sans cesse, poussé par des forces loin sous nos pieds.



En 1912, le géophysicien Alfred Wegener a noté que la côte est de l'Amérique et les côtes ouest de l'Afrique et de l'Europe s'emboîtaient plutôt bien. S'étaient-elles séparées ? Eh bien, en quelque sorte. Bien que les théories passées de dérive des continents aient été réfutées, elles ont donné naissance à ce qu'on appelle la tectonique des plaques.

Les continents ne dérivent pas, mais la croûte sur laquelle ils se tiennent est déplacée par ce qu'on trouve en dessous. Au centre de la Terre, on trouve un noyau dense de fer et de nickel. À sa surface, la croûte. Entre les deux, le manteau, une couche de roche chaude et semi-solide qui représente les deux tiers de sa masse.

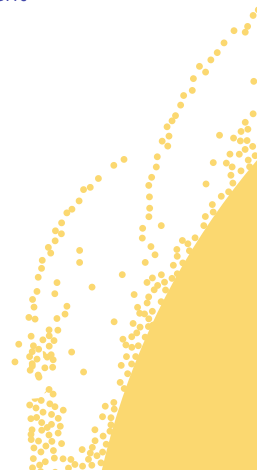
Le manteau est comme une casserole d'eau bouillante, il s'y forme des courants de convection qui ramènent constamment à la surface la matière chauffée dessous. Une fois remontée, celle-ci refroidit, puis coule, avant d'être remplacée par une nouvelle dose de matière chaude. Au-dessus de ces cellules de convection flottent les plaques tectoniques qui forment la croûte terrestre. Ces cycles de convection les déplacent en permanence.

Quand les plaques se rencontrent (on parle de convergence), l'une passe parfois sous l'autre. C'est une zone de subduction, la plaque plonge dans le manteau comme

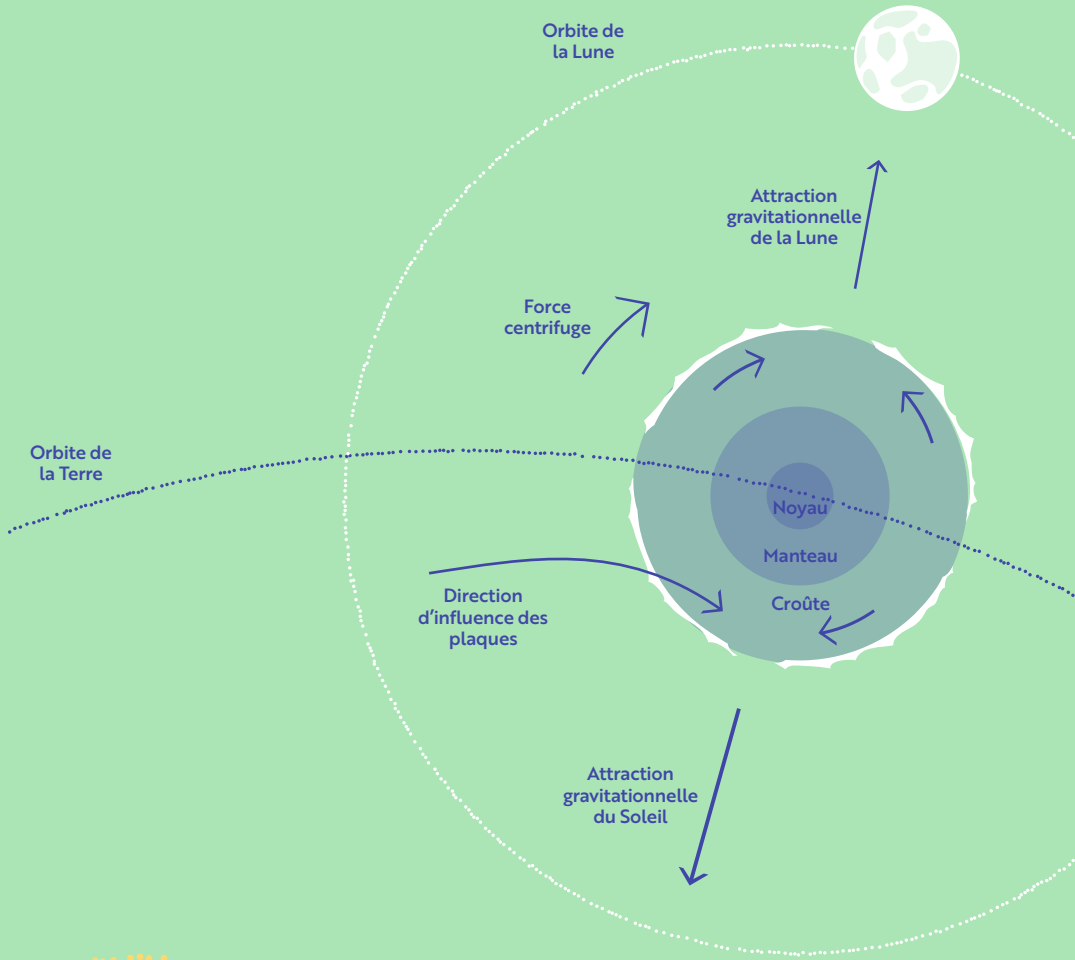
un couteau dans du beurre tiède. Les volcans se forment quand la plaque fondue rejoint la surface. Les séismes dans ces régions sont fréquents et provoquent parfois des tsunamis. Quand les plaques convergent sous l'océan, elles forment des fosses, comme la fosse des Mariannes. Si elles se rencontrent là où se trouvent des terres, la croûte s'écrase et s'élève pour former des chaînes de montagnes telles que l'Himalaya.

Quand les plaques s'éloignent (ce sont les zones de divergence), une faille apparaît dans la croûte, qui se remplit constamment de magma chaud, ce qui la cicatrise comme la croûte sur une coupure. Le meilleur exemple d'une telle zone est le Rift atlantique qui écarte l'Europe et l'Amérique du Nord l'une de l'autre de quelques centimètres par an ; l'Islande est pile sur cette crête. Ces zones existent aussi sur les continents, par exemple la vallée du Grand Rift en Afrique.

Les plaques qui ne convergent ni ne divergent peuvent glisser l'une contre l'autre (zones de coulissage). La faille de San Andreas en Californie est une telle zone, où la terre se bloque et glisse par à-coups, provoquant de grands séismes.



TECTONIQUE DES PLAQUES



De récentes recherches suggèrent que, en plus de la convection du manteau, le mouvement de la tectonique des plaques serait affecté par l'attraction gravitationnelle du Soleil et de la Lune. Par endroits, les courants de convection du manteau ne semblent pas assez puissants pour expliquer l'activité tectonique de la

surface. Mais si le manteau et la croûte sont soumis à l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil, les niveaux d'activité sismique et volcanique observés pourraient s'expliquer. Peut-être que ces nouvelles recherches, avec le temps, finiront par transformer notre compréhension des causes de la tectonique des plaques.

La vie est-elle née dans une soupe ?

→ Oui, puisque nous sommes là. Mais comment ? Qu'y avait-il dans cette soupe ? Qu'est-ce qui a transformé ces molécules sans vie en une biosphère ?



En 1953, à l'Université de Chicago, Harold Urey et Stanley Miller ont tenté de créer les conditions atmosphériques des débuts de la Terre.

Deux semaines plus tard, leur interprétation de la soupe primordiale dans laquelle la Terre baignait avait produit des acides aminés, les briques élémentaires indispensables à la vie. Plus tard, des versions plus sophistiquées de la même expérience ont créé encore plus de ces molécules, dont des lipides, nécessaires à la naissance de la vie.

L'idée était de montrer que des réactions chimiques indéterminées au sein de cette soupe pouvaient donner naissance à la première cellule vivante : un mécanisme appelé abiogénèse. Il se pourrait que cette réaction ait eu lieu plusieurs fois dans l'histoire de la planète, mais la composition actuelle de l'atmosphère terrestre l'a rendue impossible.

Parmi les nombreuses hypothèses qui mènent à l'apparition de la première cellule vivante, notons le scénario du monde ARN, qui propose que tout commença par une simple molécule d'acide ribonucléique (RNA) capable de se copier elle-même sans recours à d'autres molécules. L'ARN,

l'acide désoxyribonucléique (ADN, page 94) et les protéines sont tous d'une importance centrale pour la vie sur Terre, mais l'hypothèse suppose que ce serait d'abord l'ARN qui aurait proliféré. L'ARN peut déclencher des réactions chimiques comme les protéines et transporter l'information génétique comme l'ADN, c'est pourquoi les paléobiologistes pensent que la vie peut avoir commencé avec l'ARN, avant l'existence des protéines et de l'ADN.

Toutefois, les expériences doivent encore prouver la théorie, et d'autres chemins ont été proposés pour l'apparition de la vie, tels que la panspermie, qui est le bombardement de la Terre par des météorites transportant des organismes vivants, ou l'apparition de la vie près de sources chaudes au fond de l'océan. C'est un des sujets de débat les plus vifs dans le domaine des sciences de la vie.

La recherche a beaucoup avancé grâce à l'étude des autres planètes et des lunes de notre système solaire. Dans l'atmosphère de Titan, une lune de Saturne, on a ainsi trouvé des molécules organiques complexes qui nous ont offert une fenêtre d'étude sur l'environnement de la Terre primordiale.

CONSTRUIRE LES BRIQUES DE LA VIE

Afin de recréer leur idée de la soupe primordiale, des chercheurs de l'Université de Chicago ont rempli un bol d'eau, d'hydrogène, d'ammoniac et de méthane, ce qu'ils considéraient comme les conditions de la Terre ancestrale. Ils l'ont ensuite chauffé pour

simuler la chaleur du Soleil et soumis à un courant électrique pour simuler des éclairs. C'était un peu comme placer des ingrédients dans une cocotte, la mettre au four et les voir se transformer, si ce n'est que le plat produit aurait une durée de vie bien plus longue !



L'Évolution est-elle un jeu de sélection ?

→ Oui. La sélection naturelle est le mécanisme grâce auquel les espèces évoluent avec les changements de l'environnement. C'est la force qui modèle la vie sur Terre, le socle d'une théorie scientifique parmi les plus solides de l'histoire.



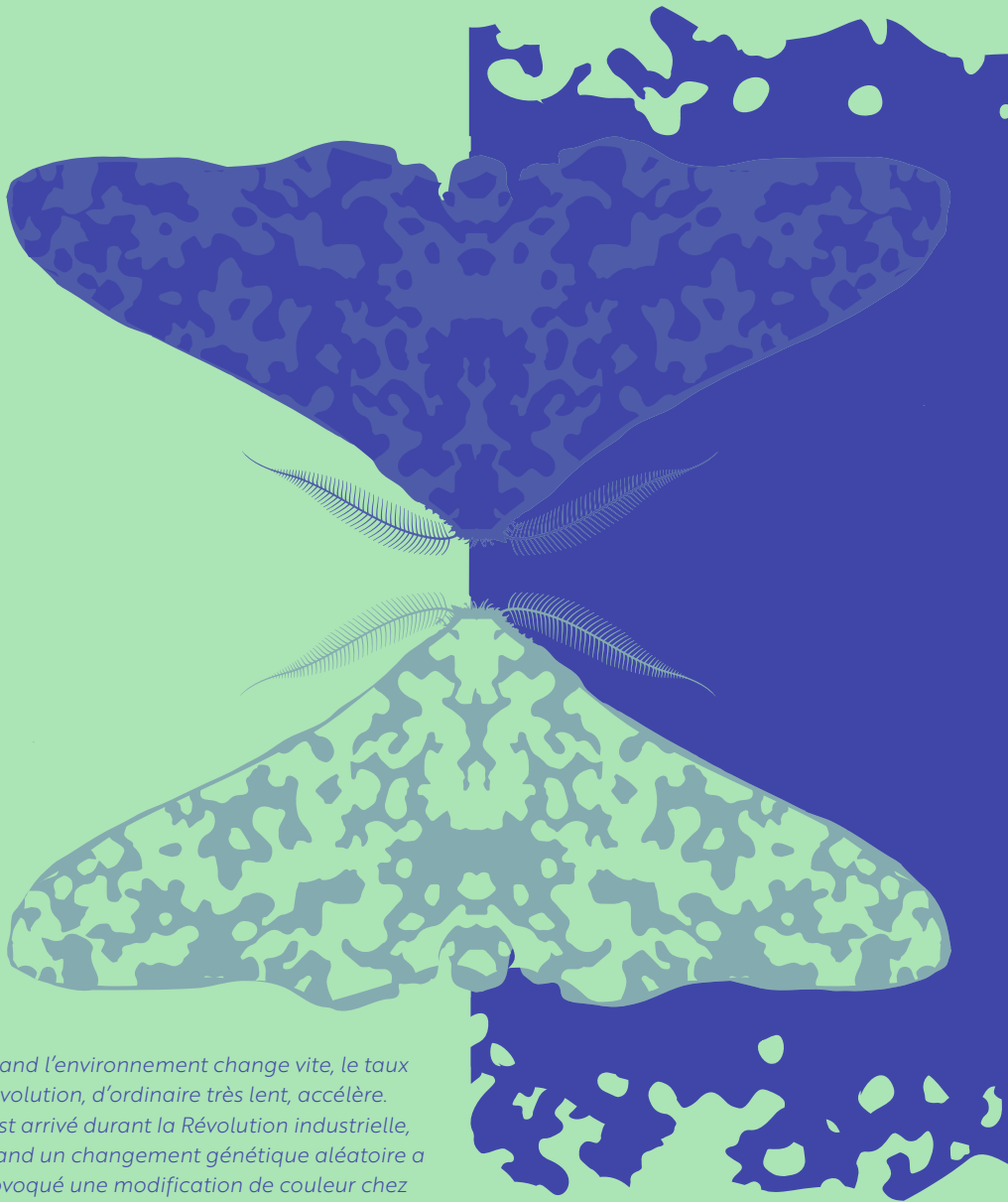
En 1859, Charles Darwin a publié un livre contenant sa théorie de l'évolution par sélection naturelle qui a fait beaucoup de bruit. Il y expliquait que la vie n'était pas figée, qu'elle évoluait. Selon lui, les espèces actuelles sont les descendantes modifiées d'espèces précédentes, et toutes les espèces partagent un ancêtre commun. Ainsi, toutes les formes de vie sont sur les branches du même arbre de la vie.

Il a proposé comme moteur de cette évolution la sélection naturelle, la « survie du plus apte ». Les membres d'une espèce se ressemblent, mais de petites différences héréditaires favorisent certains individus, qui peuvent mieux échapper aux prédateurs ou résister aux toxines, par exemple. Comme ils sont plus aptes que ceux qui ne disposent pas de ces avantages, ils ont de meilleures chances de se reproduire et de transmettre ces caractères. Ainsi l'espèce change avec le temps, les caractères avantageux deviennent plus fréquents et les défauts disparaissent.

Au cours de nombreuses générations, ces changements s'accumulent et mènent à la spéciation, autrement dit l'apparition de nouvelles espèces quand des populations d'une même espèce deviennent génétiquement si différentes qu'elles ne peuvent plus se reproduire entre elles. De plus en plus d'espèces apparaissent ainsi, et la vie se diversifie.

Parfois, des espèces présentent des caractères qui n'aident pas à leur survie. Les paons, par exemple, ont de longues plumes vives sur la queue qui les ralentissent quand un prédateur les chasse. La théorie de la sélection naturelle prédit que ce caractère devrait disparaître avec le temps, pourtant il demeure. Darwin expliquait cela par la sélection sexuelle, un type particulier de sélection naturelle. Certains caractères, disait-il, persistent dans le temps parce qu'ils rendent les mâles plus attirants pour les femelles, ce qui augmente leurs chances de se reproduire.

L'ÉVOLUTION EN ACTION



Quand l'environnement change vite, le taux d'évolution, d'ordinaire très lent, accélère. C'est arrivé durant la Révolution industrielle, quand un changement génétique aléatoire a provoqué une modification de couleur chez la phalène du bouleau. La nouvelle couleur, plus sombre, se confondait mieux avec les troncs d'arbre couverts de suie où la phalène se posait toute la journée (en haut), tandis que l'ancienne, plus claire (en bas), se repérait mieux ; ces phalènes étaient donc chassées davantage. Cela a entraîné un changement au fil du temps, la forme sombre a proliféré et la forme claire a disparu peu à peu.

**LOIS DE LA
THERMODYNAMIQUE**

ENTROPIE

ÉLECTROMAGNÉTISME

**THÉORIE DE
LA RELATIVITÉ
RESTREINTE**

GRAVITÉ

**THÉORIE DE
LA RELATIVITÉ
GÉNÉRALE**

CHAPITRE 2

FORCES ET ÉNERGIE

LOIS DU
MOUVEMENT

MATIÈRE
NOIRE

ÉNERGIE
SOMBRE

INTRODUCTION

Forces et énergie modèlent notre Univers. Les comprendre nous permet d'expliquer pourquoi les pommes tombent de l'arbre et pourquoi le Soleil brille. Cela nous montre aussi à quel point le cosmos est à la fois bizarre et merveilleux.

L'ÉNERGIE prend de nombreuses formes : la chaleur d'une braise brillante, le tournoiement d'une éolienne, les liaisons chimiques au sein d'un explosif. Tous sont les mêmes aspects de la même puissante essence, qui passe d'une forme à l'autre et rend parfois service au passage. En d'autres termes, l'énergie est simplement la capacité de travail. Elle ne peut être créée ni être détruite, une idée fondamentale, consacrée par la première loi de la **THERMODYNAMIQUE** (page 36).

LES FORCES, de leur côté, sont ce qui pousse et qui tire les objets. Différentes forces agissent à toutes les échelles concevables, elles lient ensemble les éléments du noyau de l'atome comme les étoiles d'une galaxie.

ISAAC NEWTON a ouvert la voie pour la compréhension des forces avec ses trois **LOIS DU MOUVEMENT** (page 32). Il a aussi compris que, dans l'Univers, tout exerce une force gravitationnelle sur tout le reste. Il a développé sa loi de la gravitation universelle pour expliquer les trajectoires des boulets de canon et les orbites des planètes (page 34).

Une autre force fondamentale de la nature est **L'ÉLECTROMAGNÉTISME** (page 38). Au XIX^e siècle, James Clerk Maxwell a montré que l'électricité et le magnétisme étaient les deux faces d'une même pièce : des charges qui se déplacent et génèrent des **CHAMPS MAGNÉTIQUES**.

De leur côté, ces champs ont une action sur les particules chargées. Ces interactions sont au cœur de tous les moteurs électriques, des téléphones portables et autres.

La lumière elle-même est une onde électromagnétique, composée de champs électriques et magnétiques qui s'entrecroisent en une danse sinusoïdale. Découvrir que la lumière est une forme de rayonnement électromagnétique a révolutionné la science et conduit **ALBERT EINSTEIN** à formuler ses deux théories de la relativité (page 40).

La **THÉORIE DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE** repose sur l'idée que la vitesse de la lumière dans le vide paraît ne jamais varier, que l'observateur soit en mouvement ou non. Une conséquence étrange est que, plus vous vous déplacez vite, plus le temps ralentit ! Une autre est que la masse et l'énergie sont en réalité équivalentes, comme l'exprime la célèbre équation $E = mc^2$, si bien que la matière peut être envisagée comme de l'énergie condensée.

Einstein a ensuite développé la **THÉORIE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE** qui conclut que les masses « tordent » l'étoffe même de l'Univers pour provoquer ce que l'on perçoit comme de la **GRAVITÉ**. La relativité générale prédit aussi l'existence des trous noirs (page 42).

Bien des mystères autour des forces et de l'énergie demeurent. Par exemple, les astronomes pensent que les galaxies maintiennent leur cohésion grâce à une **MATIÈRE NOIRE** invisible et que l'accélération de l'expansion de l'Univers est à mettre au crédit d'une **ÉNERGIE SOMBRE** (page 44). Résoudre ces mystères fait partie des grands défis scientifiques du XXI^e siècle.

FORCES ET ÉNERGIE

MASSE

CHAMP MAGNÉTIQUE

Disposition de la force magnétique dans et autour des objets ou au passage d'un courant électrique.

ÉQUATIONS DE MAXWELL

Quatre équations de James Clerk Maxwell pour décrire les propriétés des champs magnétiques et des charges, courants et champs électriques, et leurs interactions.

CHARGE ÉLECTRIQUE

Propriété de certaines particules en vertu de laquelle la matière est soumise à une force dans un champ électromagnétique.

ÉLECTROMAGNÉTISME

Force fondamentale de la nature, centrée sur l'interaction entre objets porteurs d'une charge électrique et les champs magnétiques résultants.

FORCE

Pression ou traction exercée sur un objet, à distance ou au contact. Une force peut déplacer l'objet, modifier sa vitesse ou sa forme.

LOIS DU MOUVEMENT

Trois lois publiées par Isaac Newton en 1687 qui décrivent les relations entre les forces agissant sur un objet et son mouvement. Elles ne fonctionnent plus à l'échelle atomique ni à des vitesses proches de celle de la lumière.

GRAVITATION

Force attractive entre deux objets, qui dépend de leurs masses et de leur distance, selon Isaac Newton. Pour les très grosses masses, elle est mieux décrite par la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein.

ISAAC NEWTON

Physicien et mathématicien anglais (1643–1727), qui a formulé les lois du mouvement et de la gravitation universelle, entre autres accomplissements.

ÉNERGIE SOMBRE

Forme hypothétique de l'énergie qui agit à l'opposé de la gravitation, proposée pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers.

MATIÈRE NOIRE

Forme hypothétique et invisible de la matière, qui représenterait plus de 80 % de la matière de l'Univers et expliquerait certains comportements des étoiles, des planètes et des galaxies.

RELATIVITÉ

THERMODYNAMIQUE

Science des relations entre la température, la chaleur, le travail et l'énergie.

ENTROPIE

Mesure du désordre d'un système. En thermodynamique, plus il y a d'entropie, moins il y a d'énergie calorifique disponible pour le travail utile.

ÉNERGIE

Capacité de « travail ». Peut être convertie d'une forme (par exemple calorifique, électrique ou chimique) à l'autre, mais ne peut être créée ou détruite dans un système fermé, selon la loi de conservation de l'énergie.

$E = mc^2$

Équation d'Albert Einstein qui montre la relation entre la masse et l'énergie, où **E** est l'énergie, **m** la masse et **c** la vitesse de la lumière.

THÉORIE DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE

Théorie d'Albert Einstein datée de 1905 pour expliquer pourquoi la vitesse de la lumière dans le vide est la même pour tous les observateurs, quelle que soit la leur ou celle de la source de lumière.

THÉORIE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Théorie publiée par Albert Einstein en 1915 qui explique la gravité comme une courbure de l'espace-temps provoquée par les objets massifs.

ALBERT EINSTEIN

Physicien théoricien (1879–1955) qui a inventé les théories de la relativité restreinte et générale et contribué au développement de la mécanique quantique.

ESPACE-TEMPS

Ensemble formé de l'espace à trois dimensions et d'une quatrième dimension, le temps. Très important dans le cadre de la théorie de la relativité générale.

TROU NOIR

Objets astronomiques si denses et à la gravité si forte que rien, pas même la lumière, ne s'en échappe.

Tout obéit-il aux lois du mouvement de Newton ?

→ Presque tout ! Les lois de Newton, qui ont presque 300 ans, sont généralement vraies, mais nous connaissons des cas où elles ne tiennent plus.



Les trois lois du mouvement d'Isaac Newton font partie des concepts les plus familiers et les mieux connus de la physique. Nous croisons tous les jours des exemples qui les démontrent. D'abord publiée en 1687 dans les *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, aussi appelés les *Principia*, la première loi édicte qu'un corps au repos ou se déplaçant à vitesse constante continuera ainsi. La deuxième loi dit qu'une force qui s'exerce sur un objet est égale au produit de sa masse par son accélération. La troisième, que si deux objets exercent une force l'un sur l'autre, les forces seront égales en intensité, mais de directions opposées.

Ces lois ont plus de 300 ans et sont encore vraies dans la plupart des cas. Toutefois, comme beaucoup d'aspects de la physique classique, elles s'en tirent moins bien quand on passe aux extrêmes, aux échelles microscopiques ou macroscopiques. Par exemple, les particules subatomiques ne se comportent pas conformément à la physique newtonienne. À la plus petite des

échelles, il faut se tourner vers la physique quantique (page 68). De même, les objets qui se déplacent aussi vite ou presque aussi vite que la lumière sont mieux décrits par d'autres lois, celles de la relativité, restreinte ou générale (page 40).

Nous savons à présent que les lois du mouvement de Newton, plutôt qu'une théorie universelle, sont un cas particulier, uniquement valable dans un référentiel galiléen, c'est-à-dire un cadre où, en l'absence de force extérieure, un objet conserve son inertie (qui peut être nulle, s'il est au repos).

Dans le cas de référentiels non galiléens, par exemple un référentiel qui accélère, ou en rotation, les scientifiques ont introduit le concept de forces fictives, dont la plus connue est la force de Coriolis. Une fois ces forces supplémentaires introduites, les lois de Newton fonctionnent de nouveau et continuent à nous fournir de solides fondations pour notre compréhension de la physique. Plutôt impressionnant pour des concepts qui ont plusieurs siècles !

FORCES FICTIVES



Un manège, comme celui illustré ici, est un référentiel « non galiléen ». Quand vous y prenez place, vous tournez avec lui et faites l'expérience de l'une de ces « forces fictives », car vous devez vous accrocher pour ne pas être éjecté du manège, ce qui la rend plutôt réelle de votre point de vue ! C'est un exemple où une force fictive nous permet de continuer à appliquer les lois de Newton dans une situation de tous les jours.

Si c'est en haut... ?

→ ... est-ce que ça finit toujours par tomber ?
La légende voudrait que Newton ait formulé sa loi de gravitation universelle après avoir vu une pomme tomber d'un arbre. Mais certains aspects de sa loi ont aussi connu leur chute.



La célèbre loi de gravitation universelle de Newton édicte que deux corps dans l'espace s'attirent l'un l'autre selon une force fonction de leurs masses et de la distance qui les sépare. Avant 1687, les savants pensaient que la force qui faisait tomber les objets était un phénomène purement terrestre. Mais quand Newton a vu cette pomme tomber, la Lune était haut dans le ciel. Il en a conclu que la force qui attirait la pomme vers le bas, la gravitation, maintenait aussi la Lune en orbite. L'intuition de Newton a unifié la gravitation sur Terre et dans l'espace.

La théorie énonce que la gravitation est proportionnelle au produit des masses des deux objets, et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Ou, pour le dire plus simplement, la grosse Terre maintient la petite Lune en orbite. C'est universel parce que cela s'applique à toutes les masses, partout, même les étoiles et les trous noirs (page 42).

Combinée avec les lois du mouvement de Newton, qui expliquent qu'un objet à vitesse constante se déplace en ligne droite à moins d'être soumis à une force, cette loi illustre pourquoi les planètes en mouvement restent en orbite autour du Soleil.

Newton a démontré sa loi à l'aide d'une expérience de pensée. Un boulet de canon, lâché d'une falaise, tombe verticalement. Tiré d'un canon, il écrit un arc. Toutefois, si on le tire à une vitesse suffisante, il partirait en orbite autour de la Terre, comme les planètes sont en orbite autour du Soleil.

Le physicien Henry Cavendish a testé la théorie de Newton en 1798 au moyen de l'attraction créée entre deux sphères de plomb, afin de calculer la gravité exacte de la Terre, de laquelle il a pu dériver sa masse. En 1846, Urbain Le Verrier a prédit l'existence de Neptune à l'aide de la théorie de Newton, car il a remarqué des irrégularités dans l'orbite d'Uranus.

En 1915, la théorie de la relativité générale d'Einstein (voir page 40) a offert une nouvelle perspective sur la gravitation, montrant que les masses des étoiles courbaient l'espace-temps autour d'elles, attirant les corps plus légers dans ces vallées que les distorsions de courbure produisent. D'infimes variations de l'orbite de Mercure, que la gravitation de Newton n'expliquait pas, s'expliquent par la théorie d'Einstein ; une minuscule planète proche du Soleil est affectée par les distorsions de l'espace-temps autour de l'étoile.

GRAVITÉ AUGMENTÉE



Newton a formulé sa loi de gravitation universelle au XVII^e siècle, à la suite des théories de Johannes Kepler, Galilée et Robert Hooke. La loi de Newton expliquait que la Lune tourne autour de la Terre en raison de la présence d'une force attractive entre les deux. Elle a tenu le coup jusqu'en 1915, quand Einstein a généralisé sa théorie de la relativité

restreinte afin d'inclure des observateurs dont la vitesse variait. Einstein y explique que la gravitation est une forme d'accélération, ce qui permet à sa théorie de la relativité d'être aussi une théorie de la gravitation, selon laquelle la masse ou l'énergie courbe l'espace-temps à quatre dimensions. Il a ainsi fourni une alternative à la loi de Newton.

La thermodynamique, un sujet brûlant ?

→ La thermodynamique est l'étude de la chaleur, de l'énergie, du travail et de la température d'un système. Il suffirait que les lois de la thermodynamique soient très légèrement altérées pour que notre monde soit complètement différent.



On pense souvent que la thermodynamique ne s'occupe que de température, mais c'est en réalité plus que ça. C'est l'étude de l'énergie calorifique, qui est l'énergie cinétique produite par des atomes et des molécules après une augmentation de température, donc l'énergie dont un objet est doté de par les mouvements qu'il renferme.

Les lois de la thermodynamique ne sont pas très sexy, mais elles sont fondamentales pour comprendre le fonctionnement des choses et construire bien des objets indispensables. Une voiture, un réfrigérateur, une fusée qui transporte le satellite qui dira à votre smartphone où vous êtes, tout cela dépend de la thermodynamique.

Il y a quatre lois fondamentales de la thermodynamique, une théorie qui s'est développée à partir du XIX^e siècle. La première est une autre version de la loi de conservation de l'énergie, qui édicte que dans tout système fermé, l'énergie ne se crée ni ne se détruit, mais qu'elle peut se transformer et passer d'une forme à l'autre. La deuxième est que, dans un système fermé qui n'est pas à l'équilibre, « l'entropie » augmente toujours, l'entropie

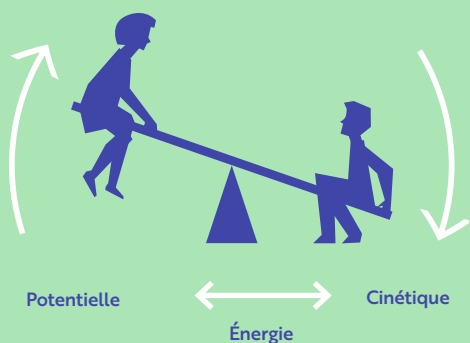
étant une mesure du désordre d'un système. La troisième loi dit que quand la température d'un système approche le zéro absolu, l'entropie s'approche d'une valeur constante.

La quatrième loi est appelée le principe zéro, ce qui peut prêter à confusion. Il indique que si deux systèmes sont en équilibre thermique (ils sont de même température) avec un troisième système, alors ils sont en équilibre thermique l'un avec l'autre.

Il a fallu de nombreuses années pour découvrir et énoncer ces lois. Elles sont fondamentales, car de la thermodynamique dépend toute notre compréhension de l'Univers, à toutes les échelles.

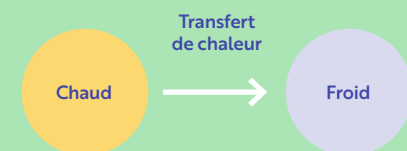
Comprendre la thermodynamique a changé le monde, et ce n'est pas fini. C'est ce qui a abouti au développement de la machine à vapeur et du moteur à combustion. Aujourd'hui, elle est appliquée dans le cadre de missions spatiales de plus en plus avancées. Elle est aussi au centre des réflexions sur les sources d'énergie renouvelable (page 130), car appliquer les lois de la thermodynamique aide les ingénieurs à améliorer l'efficacité avec laquelle, par exemple, l'énergie solaire ou éolienne est convertie en énergie utile.

LOIS DE LA THERMODYNAMIQUE



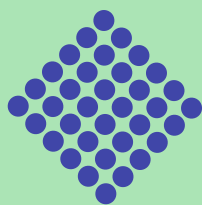
PREMIÈRE LOI DE LA THERMODYNAMIQUE

L'énergie n'est ni créée ni détruite, mais peut se transformer et passer d'une forme à l'autre.



DEUXIÈME LOI DE LA THERMODYNAMIQUE

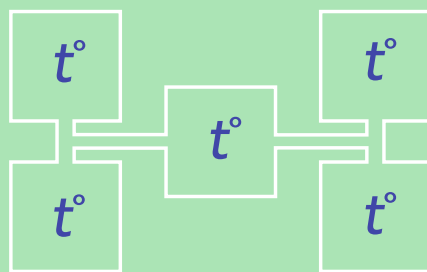
Si un système fermé n'est pas à l'équilibre, son « entropie » augmente. En conséquence, la chaleur passe des objets chauds aux objets froids.



Cristal parfait
au zéro absolu

TROISIÈME LOI DE LA THERMODYNAMIQUE

Un cristal parfait au zéro absolu (-273 °C) a une entropie nulle.



PRINCIPE ZÉRO

Si deux systèmes sont en équilibre thermique avec un troisième, alors ils sont aussi en équilibre thermique entre eux.

De quoi se charge l'électromagnétisme ?

→ L'électromagnétisme est un des piliers de la physique de tous les jours. Son domaine, ce sont les interactions entre les objets porteurs de charge électrique, et les champs magnétiques qui résultent de ces interactions.



La théorie de l'électromagnétisme s'applique à de nombreux concepts physiques, dont les courants et les champs électriques, les champs magnétiques, et donne les théorèmes qui les relient.

La charge électrique est une propriété fondamentale des objets. Tout objet a son champ électrique associé. Sa charge peut être négative, positive ou neutre. Deux objets de charge opposée, placés côte à côte, s'attirent – les opposés s'attirent ! Inversement, deux objets de charge identique placés côte à côte se repoussent.

Dans tous les cas, quand les particules chargées se mettent en mouvement, un autre champ est aussi créé : un champ magnétique. Ce champ impose une force supplémentaire sur les particules chargées, un effet exploité par de nombreux objets du quotidien.

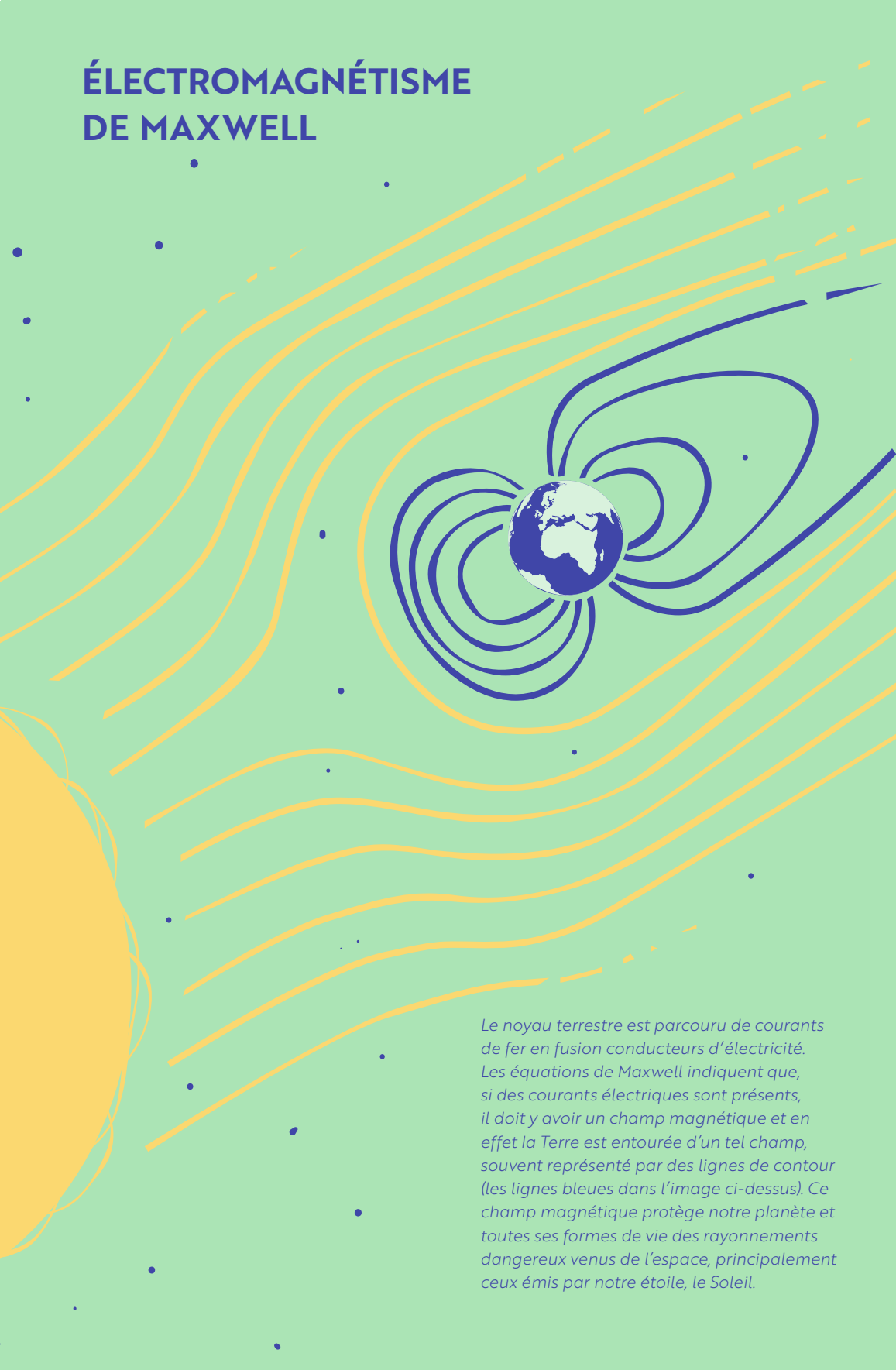
Ces propriétés ont été étudiées de façon indépendante par de nombreux physiciens et mathématiciens, mais aucun d'entre eux n'était parvenu à décrire mathématiquement l'électromagnétisme et ses interactions avant le milieu du XIX^e siècle, quand le physicien James Clerk Maxwell a unifié des

équations déjà connues en un seul bloc cohérent, connu depuis sous le nom des équations de Maxwell.

Les équations de Maxwell sont en réalité quatre formules distinctes et liées entre elles, des formules dues aux fameux savants Carl Friedrich Gauss, André-Marie Ampère et Michael Faraday. Gauss a contribué aux deux premières formules des équations de Maxwell, qui décrivent le comportement des champs électriques puis des champs magnétiques. La troisième équation de Maxwell, connue sous le nom de loi de Faraday, décrit la manière dont un courant électrique peut être induit dans un fil quand un champ magnétique est présent. La dernière, la loi d'Ampère à laquelle Maxwell a ajouté un terme important, indique que les champs magnétiques sont eux aussi générés par des modifications dans les champs électriques.

Les implications des équations de Maxwell sont immenses. D'innombrables objets technologiques les exploitent dans la vie de tous les jours, dont les moteurs électriques, les générateurs de puissance et les communications sans fil.

ÉLECTROMAGNÉTISME DE MAXWELL



Le noyau terrestre est parcouru de courants de fer en fusion conducteurs d'électricité. Les équations de Maxwell indiquent que, si des courants électriques sont présents, il doit y avoir un champ magnétique et en effet la Terre est entourée d'un tel champ, souvent représenté par des lignes de contour (les lignes bleues dans l'image ci-dessus). Ce champ magnétique protège notre planète et toutes ses formes de vie des rayonnements dangereux venus de l'espace, principalement ceux émis par notre étoile, le Soleil.

Qu'est-ce qui va plus vite que la lumière ?

→ Rien. La relativité restreinte d'Albert Einstein indique qu'un corps matériel deviendrait infiniment lourd s'il atteignait la vitesse de la lumière dans le vide.



Albert Einstein a imaginé que les observateurs vivaient différemment les événements selon leur vitesse.

D'où la relativité. Il est arrivé à cette conclusion en réalisant que les lois de l'optique étaient les mêmes pour tous les observateurs, quelle que soit leur vitesse.

La théorie de la relativité restreinte d'Einstein, publiée en 1905, postule que tous les observateurs mesurent la même vitesse pour la lumière dans le vide : 299 792 458 mètres par seconde. Elle est invariable, ce qui entraîne un casse-tête : pourquoi est-elle la même pour tous les observateurs, quel que soit leur déplacement par rapport à celui de la source de lumière ? Comment se fait-il que le rayon d'une lampe-torche accrochée à une fusée ne voyage pas plus vite que la lumière ? Quelque chose de bizarre se produit avec l'espace et le temps. Einstein en a conclu que le mouvement d'un objet ralentit le temps, et que l'espace se comprime dans la direction du mouvement.

Il a été démontré depuis qu'il avait raison. Une montre dans un avion est très légèrement plus lente que la même montre restée au sol. C'est ce qu'on appelle la dilatation du temps.

Autre conséquence curieuse de la relativité restreinte : la masse se convertit en énergie, selon l'équation $E = mc^2$. En 1915, Einstein a généralisé sa théorie en incluant des observateurs soumis à une accélération. Il a

ainsi réalisé que l'accélération est la gravité. Sa théorie générale de la relativité est aussi une théorie de la gravitation.

Aux trois dimensions de l'espace, la relativité ajoute une quatrième, le temps, créant ce qu'on appelle l'espace-temps. Les énormes masses, comme les étoiles, déforment cet espace-temps. C'est ce qu'est la gravité en réalité : une déformation de l'espace-temps. Quand la loi de gravitation de Newton dit que la Terre tourne autour du Soleil, car une force attractive les lie, la relativité générale dit que la gravitation est l'effet du creux que la masse du Soleil produit sur l'espace-temps qui l'entoure.

Placez une boule de pétanque sur un drap de lit bien tendu. Le drap se déforme et un creux apparaît autour de la boule. Une bille qu'on y lance roulera vers ce creux, comme la Terre tourne autour du Soleil. Ce que nous percevons comme de la gravité est une altération de la géométrie de l'espace-temps. De même, les effets de lentille gravitationnelle observés sur Terre sont une déformation de la lumière des étoiles quand elle passe à proximité du soleil, ce qu'Einstein avait prédit.

Il a aussi prédit les ondes gravitationnelles provoquées par des cataclysmes cosmiques tels que des collisions entre trous noirs. Ces ondulations de l'espace-temps voyagent à la vitesse de la lumière et nous informent sur les origines de l'Univers.

DILATATION DU TEMPS



Quand le cosmonaute Sergueï Krikaliou est revenu sur Terre en 1992 après un séjour involontairement prolongé de 311 jours dans l'espace, il était 0,02 seconde plus jeune qu'il ne l'aurait été en restant sur Terre. Ce

qui explique cela, c'est la vitesse de son déplacement dans l'espace comparée à celle de ses collègues sur Terre (et à la nôtre). Il a très légèrement bénéficié de la dilatation du temps prédite par Einstein.

Comment voir un trou noir ?

→ Bien après que la science les a prédits, nous avons obtenu des preuves de l'existence des trous noirs. En repérer un nécessite de savoir ce qu'on cherche, toutefois, et, surtout, de savoir où regarder.



Albert Einstein a prédit dans sa théorie de la relativité générale, en 1915, l'existence de trous noirs, des objets si denses, à la gravité si forte, que rien, pas même la lumière, ne s'en échappe.

Plus tard, Subrahmanyan Chandrasekhar, qui a remporté le prix Nobel de physique en 1938, a appliqué la mécanique quantique alors naissante à son étude des étoiles mourantes. Il a réalisé que si une étoile dépasse une certaine masse, la force gravitationnelle qu'elle exerce est si intense qu'à sa mort elle s'effondrera sur elle-même jusqu'à n'occuper plus qu'un point infiniment petit. Il a prédit ce qu'on appellerait plus tard des trous noirs.

Pour comprendre l'étendue des forces impliquées, reprenons l'analogie du drap pour figurer l'espace-temps (page 40). Imaginez que la boule de pétanque conserve sa taille, mais que sa masse augmente. Le drap va se déformer de plus en plus, jusqu'à ce que ses bords se rassemblent au-dessus de la boule. C'est un peu ce qui se passe dans l'Univers. Le tissu déformé de l'espace-temps s'enroule autour de la masse dense et la déconnecte de tout le reste. Plus rien n'échappe à sa gravité. C'est devenu un trou noir.

Au centre d'un trou noir se trouve un point infiniment dense qu'on appelle la singularité. Ses frontières sont nommées l'horizon des événements, car rien de ce qui les franchit ne pourra s'en libérer, lumière comprise.

Les astronomes estiment que quatre types de trous noirs pourraient exister. Les trous noirs de masse stellaire sont la conséquence de l'effondrement d'étoiles massives, comme prédit par Chandrasekhar. Les trous noirs supermassifs, prédits par Einstein, se forment au centre des galaxies, dont notre Voie lactée. La plus petite classe, émise par le cosmologiste Stephen Hawking, n'est que théorique. Ces mini-trous noirs pourraient s'être formés peu après le Big Bang (page 14) et se seraient évaporés ensuite, laissant derrière eux le phénomène étrange des sursauts gamma. Enfin, une quatrième classe de trous noirs intermédiaires pourrait exister.

Alors, peut-on les voir ? Pas vraiment, mais on peut écouter les sources radio ou les rayonnements qui leur sont associés et détecter leur présence au travers de l'influence qu'ils exercent sur la matière, attirant à eux les nuages de gaz ou modifiant les trajectoires d'étoiles proches, ce qui trahit leur position.

DÉTECTER L'HORIZON DES ÉVÉNEMENTS



Peut-on voir un trou noir ? Malgré leur masse, ils sont plutôt petits, si bien que même nos meilleurs télescopes, pris isolément, ne peuvent les distinguer. Le télescope Event Horizon, en revanche, est un observatoire virtuel composé de télescopes répartis sur toute la planète, du Groenland à l'Antarctique, à la recherche des phénomènes associés à la présence de trous noirs. En 2019, il a capturé la première image d'un trou noir ou, plus exactement, l'anneau de lumière que produit la matière quand elle se fait avaler par le trou noir supermassif au centre de la galaxie M87, notre voisine. La masse de ce trou noir est d'environ 6,5 milliards de fois celle du Soleil.

À quoi sert la matière noire ?

→ Sans elle, l'Univers tel que nous le comprenons ne fonctionne pas. Nous ne la voyons pas, mais nous savons qu'elle est là par l'effet qu'elle produit sur d'autres objets, tels que les étoiles et les galaxies.



Dans la cosmologie moderne, rien n'a plus d'importance que la quête de la matière noire et de l'énergie sombre.

Au siècle dernier, les cosmologistes ont réalisé que les galaxies visibles ne représentaient qu'une fraction de la masse de l'Univers. Nous ne voyons pas le reste, qui n'émet ni n'absorbe la lumière. C'est la matière noire.

Nous savons qu'elle est là parce que quelque chose agit sur le mouvement des galaxies qui n'est pas la gravitation. En tournant sur elles-mêmes, elles devraient se désagréger, ce qui ne se produit pas. En 1997, le télescope spatial Hubble a révélé que la lumière se courbait autour d'un amas d'étoiles, un phénomène qui nécessite 250 fois plus que la gravité des étoiles de l'amas pour se produire. La matière noire maintient tout ensemble, comme la pâte tient les pruneaux dans un flan.

Qu'est-ce donc ? Les théories abondent. Une partie pourrait être de la matière ordinaire comme celle de notre système solaire, disons des objets de la taille de Jupiter, trop distants pour qu'on les voie. Peut-être y a-t-il aussi les machos (*massive compact halo objects*), les

corps comme les trous noirs. D'autres pensent qu'elle comprend des particules créées quand l'Univers était jeune, les wimps (*weakly interacting massive particles*), dont la quête est aujourd'hui un Graal cosmologique.

Mais il y a un hic. La matière noire agit comme une force attractive, elle ralentit donc l'expansion de l'Univers, tandis qu'une énergie sombre ferait tout le contraire. Les galaxies lointaines s'éloignent plus vite que les galaxies proches, ce qui implique que quelque chose accélère l'expansion. Cette énergie sombre représenterait presque 70 % de la masse de l'Univers, bien plus que la matière noire. Là aussi, sa composition est inconnue. Elle comprend peut-être des particules temporaires qui se forment et disparaissent aussitôt. À moins qu'elle ne recèle une énergie dynamique, la « quintessence » ? Ou alors ce serait une propriété de l'espace lui-même...

Quelles qu'elles soient vraiment, la matière noire et l'énergie sombre sont la clé pour comprendre l'évolution des galaxies et le futur de l'Univers. Va-t-il continuer de s'étendre, se stabiliser ou s'effondrer sur lui-même ?

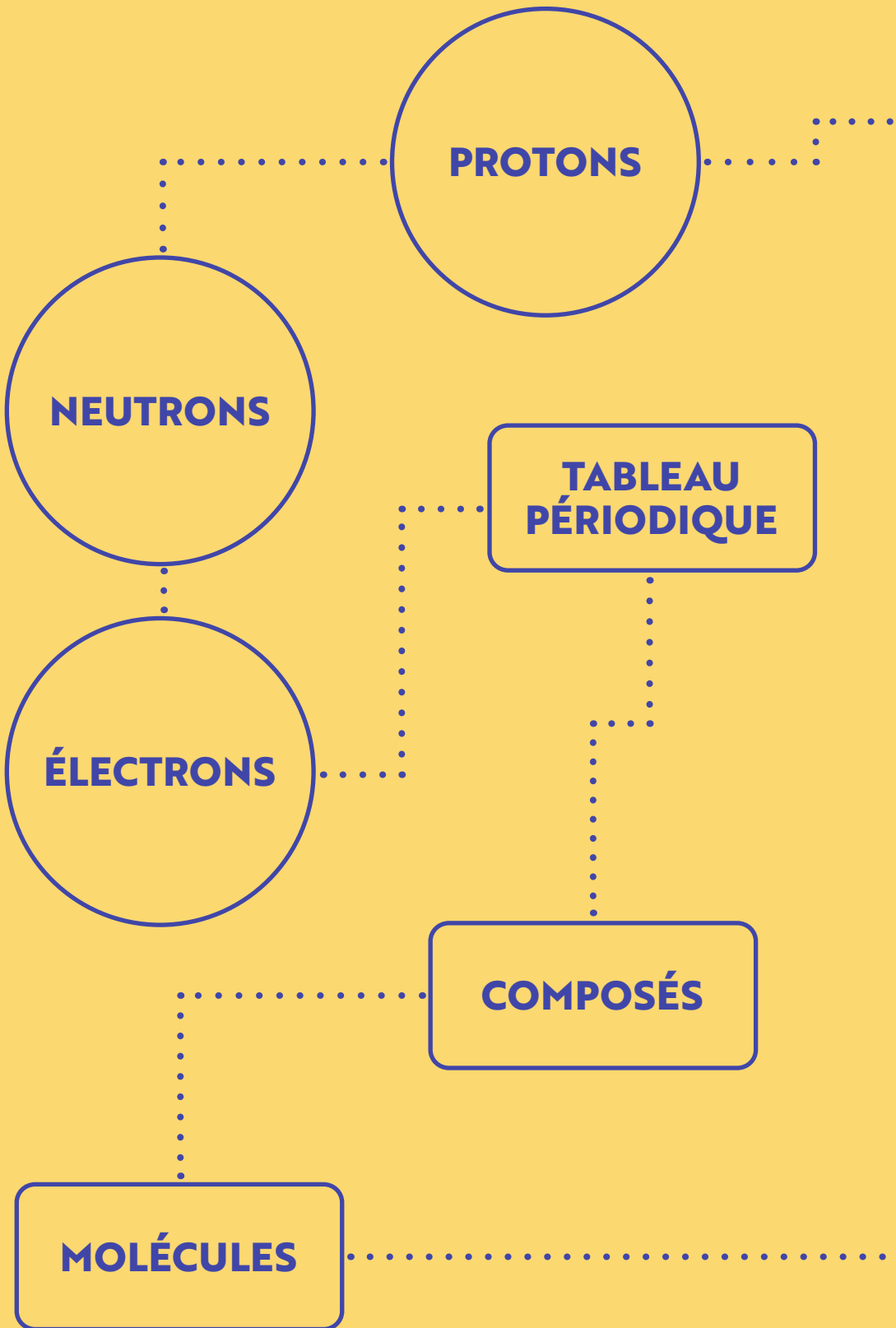


ÉQUILIBRER LA BALANCE COSMIQUE



Quand on pense à une galaxie, on imagine des spirales d'étoiles tourbillonnant dans l'espace. Mais cette image familière ne représente qu'une minuscule fraction de la matière. Il faut autre chose pour équilibrer la balance cosmique. Si l'Univers visible remplit un plateau, que trouve-t-on sur l'autre ? Les astronomes ont d'abord appelé ça la « masse manquante », mais

cela prêtait à confusion. Rien ne manque, c'est juste invisible. En 1933, Fritz Zwicky a remarqué que la force gravitationnelle qui maintenait ensemble les galaxies de l'amas de la Chevelure de Bérénice ne correspondait pas à ce qu'on voyait. C'est ce qui a enclenché la recherche de la matière noire, qui se poursuit encore près d'un siècle plus tard.



ÉLÉMENTS

CHAPITRE 3

MATIÈRE

RÉACTIONS

NANOTECHNOLOGIE

CHIRALITÉ

INTRODUCTION

LES **ATOMES** sont les briques de la matière de tous les jours. Le voyage scientifique pour comprendre leur nature et savoir les manipuler a pris plus de 2 000 ans. C'est une idée qui remonte au V^e siècle av. J.-C., quand le philosophe grec Démocrite a suggéré que tout était formé de minuscules objets invisibles et indivisibles (page 52).

Au XIX^e siècle, les savants étaient devenus familiers avec cette idée, à mesure qu'ils découvraient de nouveaux **ÉLÉMENTS** chimiques, qui sont des substances pures, telles que l'hydrogène ou l'or, que les **RÉACTIONS CHIMIQUES** ne peuvent décomposer en éléments plus simples. Chaque élément est composé d'un type d'atome uniquement. Quand les scientifiques ont appris à regarder de plus près, ils ont découvert que chaque atome contenait un noyau de **PROTONS** et (le plus souvent) de **NEUTRONS**, entouré par des **ÉLECTRONS**. Le nombre de protons détermine l'élément : les atomes d'hydrogène ont toujours un seul proton, les atomes d'or en ont toujours 79.

Les chimistes ont alors eu besoin d'organiser leur liste toujours grandissante d'éléments. En 1869, **DMITRI MENDELÉÏEV** a inventé une manière de les regrouper selon le poids de leurs atomes, ainsi que leurs propriétés chimiques et physiques. C'est le **TABLEAU PÉRIODIQUE**, qui a évolué jusqu'à devenir cet atlas détaillé qui aide les scientifiques à voyager entre les éléments (page 54). Il rassemble les éléments par famille de réactivité chimique semblable et révèle comment la réactivité chimique change en passant des atomes légers aux atomes lourds.

Les éléments chimiques s'assemblent souvent pour former des **COMPOSÉS**. Cela implique des réactions qui

collent les atomes entre eux, ou au contraire les séparent. La colle qui maintient les atomes est appelée une **LIAISON CHIMIQUE**. En modifiant ces liaisons et en réarrangeant ces atomes, les scientifiques peuvent prendre des **MOLÉCULES** extraites d'une huile et les transformer en de puissants médicaments contre le cancer, ou des écrans flexibles, ou des millions d'autres choses (page 56).

Même si deux molécules ont des atomes identiques reliés par les mêmes liaisons chimiques, elles ont parfois des propriétés différentes en raison de la disposition particulière de leurs atomes dans l'espace. Une molécule appelée la carvone, par exemple, existe en deux versions qui sont l'image miroir l'une de l'autre et qu'on ne peut superposer, comme une main droite et une main gauche. On dit alors qu'elle est chirale (page 58). Ainsi, dans le cas de la carvone, la forme droite sent la menthe, la forme gauche carvone sent l'anis. La **CHIRALITÉ** joue un rôle dans de nombreux cas en biologie, depuis l'ADN qui transporte l'information génétique dans vos cellules aux acides aminés qui constituent toutes les protéines de votre corps.

Dans les années 1980, les scientifiques ont développé des techniques nouvelles pour produire des images époustouflantes d'atomes ou de molécules. Elles ont permis de cartographier le royaume miniature des **NANOTECHNOLOGIES**, qui a produit des microprocesseurs de plus en plus rapides, de même que les minuscules points qui illuminent les écrans de télé (page 60). Elles ont aussi révélé des mystères : à l'échelle nanoscopique, les propriétés de la matière ordinaire se modifient pour adopter les effets curieux du royaume quantique.

TABLEAU PÉRIODIQUE

Représentation graphique célèbre des éléments chimiques dans laquelle les blocs, lignes (périodes) et colonnes (groupes) donnent les tendances des éléments selon leur configuration électronique.

ÉLÉMENT

Substance constituée uniquement d'atomes de même nombre de protons dans son noyau, qu'on ne peut décomposer par réaction chimique.

NUMÉRO ATOMIQUE (Z)

Nombre qui identifie un élément chimique, égal au nombre de protons de son noyau.

PROTON (P)

Particule de charge positive qu'on trouve dans le noyau de l'atome, dont le nombre donne le numéro atomique de l'élément.

NOYAU

Région dense au centre de l'atome, où neutrons et protons de charge positive sont liés par la force nucléaire.

NEUTRON (N)

Particule subatomique de charge neutre, qu'on trouve dans le noyau de l'atome.

ISOTOPE

Deux atomes ayant le même nombre de protons, mais un nombre de neutrons différent sont des isotopes du même élément.

ATOME

Plus petite unité de la matière ordinaire, composée d'un noyau de charge positive entouré par un nuage d'électrons de charge négative, liés ensemble par la force électrostatique.

ÉLECTRON

Particule de charge négative dont la masse vaut environ $1/1836$ de celle d'un proton.

ION

Atome de charge positive ou négative en raison d'un nombre d'électrons et de protons différent.

DMITRI MENDELÉËV

Chimiste russe (1834–1907) qui a formulé la loi périodique et conçu le premier tableau périodique capable de prédire le comportement d'éléments non encore découverts.

DÉMOCRITE

Philosophe grec (autour de 460–370 av. J.-C.) qui a avancé que tout était composé de petits corpuscules appelés atomes, plutôt que de combinaisons entre la terre, l'air, le feu et l'eau.

CATALYSTES

COMPOSÉ

Substance chimique composée de nombreuses molécules identiques faites d'atomes de différents éléments liés ensemble par des liaisons chimiques.

NANOTECHNOLOGIE

Technologie à toute petite échelle. Un nanomètre est un milliardième de mètre.

MOLÉCULE

Groupe de deux atomes ou plus, sans charge électrique, liés par des liaisons chimiques.

LIAISON CHIMIQUE

Attraction entre atomes (électrons négatifs et protons positifs s'attirent) qui permet la formation de composés et impose la structure de la matière.

RÉACTION CHIMIQUE

Transformation chimique d'une substance en une autre, la plupart du temps au travers des électrons qui forment et rompent des liaisons chimiques.

CHIRALITÉ

Quand deux objets sont « l'image miroir » l'un de l'autre, comme nos mains, et ne peuvent se superposer. Chez les molécules, cela leur confère des propriétés différentes.

Comment les atomes ont-ils divisé les savants ?

→ Les philosophes et les savants ont passé des milliers d'années à se diviser sur la nature de la matière. La découverte des atomes a mis fin aux débats et ces briques élémentaires sont devenues les fondements de la science.



Des philosophes, dont Aristote et Platon, étaient convaincus que tout était composé des quatre éléments, terre, air, feu et eau, mélangés ensemble en différentes proportions. Pendant des siècles, la plupart des savants étaient d'accord avec eux, malgré quelques voix discordantes. Dès le V^e siècle av. J.-C., par exemple, le philosophe grec Démocrite avait avancé que tout ce que contenait le monde était formé de petites briques de matière indivisibles, les atomes.

Deux mille ans plus tard, c'est Démocrite qui a eu le dernier mot. Dès la fin du XIX^e siècle, les scientifiques avaient compris que les gaz étaient sûrement composés de minuscules particules. Puis John Dalton, fils d'un tisserand du Cumberland, en a déduit que cela devait se vérifier pour tous les états de la matière.

Dalton proposa l'existence de différents types d'atomes, chacun pourvu de propriétés différentes. Quand de nombreux atomes du même type sont rassemblés, ils forment un élément pur, par exemple l'or ou le soufre, qui ne peut être décomposé en matériaux plus simples par réaction chimique. Quand différents types d'atomes s'assemblent,

ils forment des composés, tels que l'eau ou le sel de table.

Dalton avait parfaitement raison. Nous savons aujourd'hui qu'il y a 94 types d'atomes différents dans la nature, chacun étant la brique élémentaire d'un élément particulier (page 54). Les atomes sont si petits qu'on peut en loger des milliers de milliards rien que dans le point à la fin de cette phrase. Ils se collent entre eux, comme des briques de LEGO®, et forment ainsi une incroyable variété de combinaisons possibles, au sein de structures appelées « molécules ».

Il fallut cent ans de plus pour que les scientifiques découvrent que les atomes eux-mêmes sont constitués de particules encore plus petites. Au centre de chaque atome se trouve un noyau qui contient des protons de charge positive et des neutrons de charge neutre. Ce noyau est entouré d'électrons de charge négative en quantité suffisante pour équilibrer la charge des protons. La seule exception est l'hydrogène, le plus léger des éléments, dont l'atome ne comporte qu'un proton et un électron. Le nombre de protons, appelé numéro atomique, détermine l'identité de l'élément. Ainsi, un atome qui contient 79 protons est toujours un atome d'or.

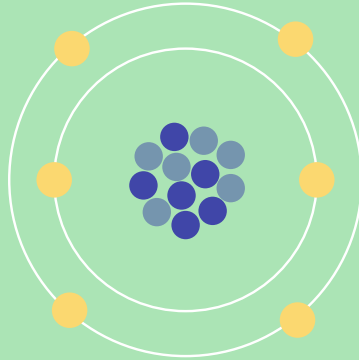
À L'INTÉRIEUR D'UN ATOME

Tous les noyaux de carbone contiennent six protons, et la plupart six neutrons. Quelques-uns cependant en ont sept, ou même huit. Ces variantes, les isotopes (page 18), sont désignées par leur total de protons et neutrons. Certains, comme le carbone-14, sont radioactifs ; leur noyau instable se décompose

spontanément et émet un rayonnement. Quand les scientifiques ont compris comment déclencher cela dans un isotope de l'uranium, nous sommes entrés dans l'ère des centrales nucléaires et des bombes atomiques. L'atome divisait autrefois les savants ; aujourd'hui, ce sont les savants qui divisent l'atome.

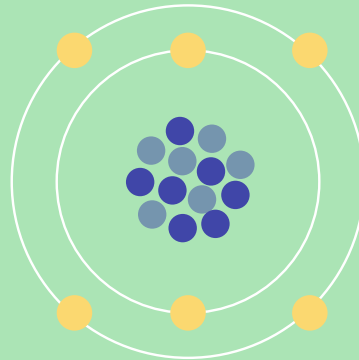
CARBONE-12

- Six protons
- Six neutrons
- Six électrons



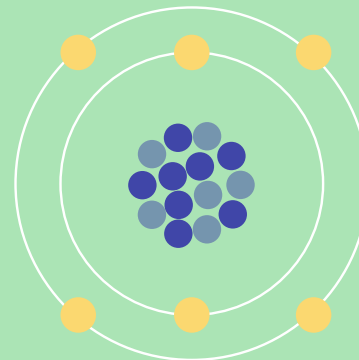
CARBONE-13

- Six protons
- Sept neutrons
- Six électrons



CARBONE-14

- Six protons
- Huit neutrons
- Six électrons



Le tableau périodique prévoit-il l'avenir ?

→ Oui ! Le tableau périodique organise les éléments chimiques en rangées et colonnes ; les vieilles versions comportaient des trous pour les éléments restant à découvrir, donnant aux savants une feuille de route à suivre.



Peu après que les scientifiques eurent compris que chaque élément chimique était composé

de ses propres atomes (page 52), ils se mirent à les organiser selon le poids de ceux-ci. À l'hydrogène, élément le plus léger, a été attribué le poids atomique de 1. L'atome de carbone, lui, avait un poids atomique de 12.

En 1869, la liste des éléments s'était agrandie jusqu'à en compter plus de 60. En mars de cette année, Dmitri Mendeleïev a proposé une nouvelle organisation pour ces briques élémentaires de l'Univers, qui se fondait sur les liens que formaient les atomes entre eux.

Quand différents atomes s'assemblent pour former un composé, ils se comportent comme s'ils avaient un certain nombre de « crochets » pour retenir des partenaires dans leur danse atomique (page 56). Ainsi, l'hydrogène n'a qu'un seul crochet, et l'oxygène en a deux, c'est pourquoi la molécule d'eau compte deux atomes d'hydrogène pour un atome d'oxygène et que sa formule chimique est H_2O . Ce nombre de crochets est appelé la valence d'un atome.

Mendeleïev a remarqué que quand il listait certains éléments selon leur poids atomique,

leur valence augmentait et diminuait selon un schéma périodique. Il a donc organisé la liste en rangées, les unes sous les autres, où tous les atomes d'une même colonne avaient la même valence et de propriétés chimiques semblables. Quand aucun élément ne venait remplir une case particulière, il la laissait vide et déclarait qu'elle serait remplie par un élément qui restait à découvrir.

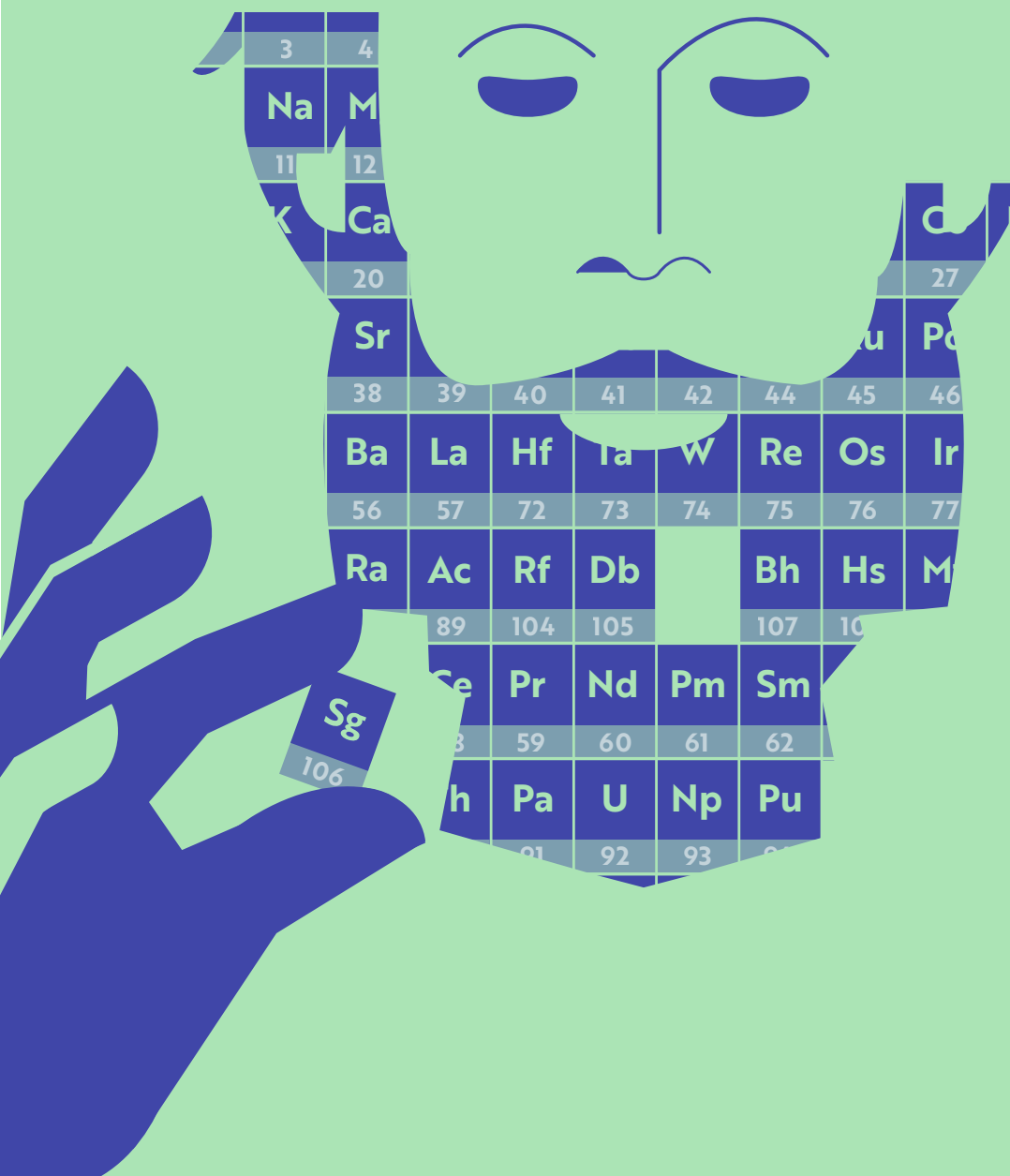
Cela a fourni aux chimistes un atlas des éléments à découvrir. De plus, il donnait des indices sur les réactions probables des nouveaux éléments et facilitait ainsi leur découverte, puisque l'emplacement des cases vides révélait quels composés pouvaient les abriter. Le gallium, par exemple, a été découvert quelques années plus tard. Ses propriétés étaient exactement celles que donnait le tableau pour la case qu'il venait occuper.

Depuis, le tableau périodique a connu de nombreuses nouvelles formes, à mesure que les savants trouvaient de meilleures façons d'arranger les éléments entre eux (on les classe maintenant par leur numéro atomique et non par leur poids atomique), mais toutes se sont fondées sur l'idée de départ de Mendeleïev.

UNE CARTE QUI S'AGRANDIT

Avec les années, le tableau relativement simple de Mendeleïev a évolué pour devenir la carte détaillée des éléments. Certains scientifiques l'ont réorganisé en spirale, en fleur, en ruban (mais pas encore en barbe). Le tableau standard inclut aujourd'hui des

éléments artificiels superlourds, créés dans d'énormes machines à broyer les atomes. L'élément 106, le seaborgium, a été ainsi nommé en l'honneur de Glenn Seaborg, le chimiste américain qui a contribué à la découverte de dizaines de ces éléments.



Y a-t-il des agents secrets dans les liaisons chimiques ?

—> Bien sûr. Autour des atomes, les électrons forment une sorte de colle qui agglomère la matière. Ce sont de vrais agents de liaison.



Les électrons sont formidables. Ces petits points presque infinitésimaux transportent leur charge négative dans nos câbles électriques pour faire fonctionner tous nos appareils. Mais ils sont bien plus que de simples porteurs d'électricité. Sans eux, le monde tel que nous le connaissons tomberait tout simplement en morceaux.

Les atomes contiennent un noyau positif entouré d'électrons négatifs (page 52). On peut imaginer ces électrons en orbite autour du noyau comme des planètes autour du Soleil, certains sur des orbites proches, d'autres sur de plus lointaines. Chacune de ces couches accueille un certain nombre d'électrons, un pour la première, huit pour la deuxième, dix-huit pour la troisième, et ainsi de suite. Cette structure sous-jacente est ce qui détermine l'organisation irrégulière du tableau périodique (page 54).

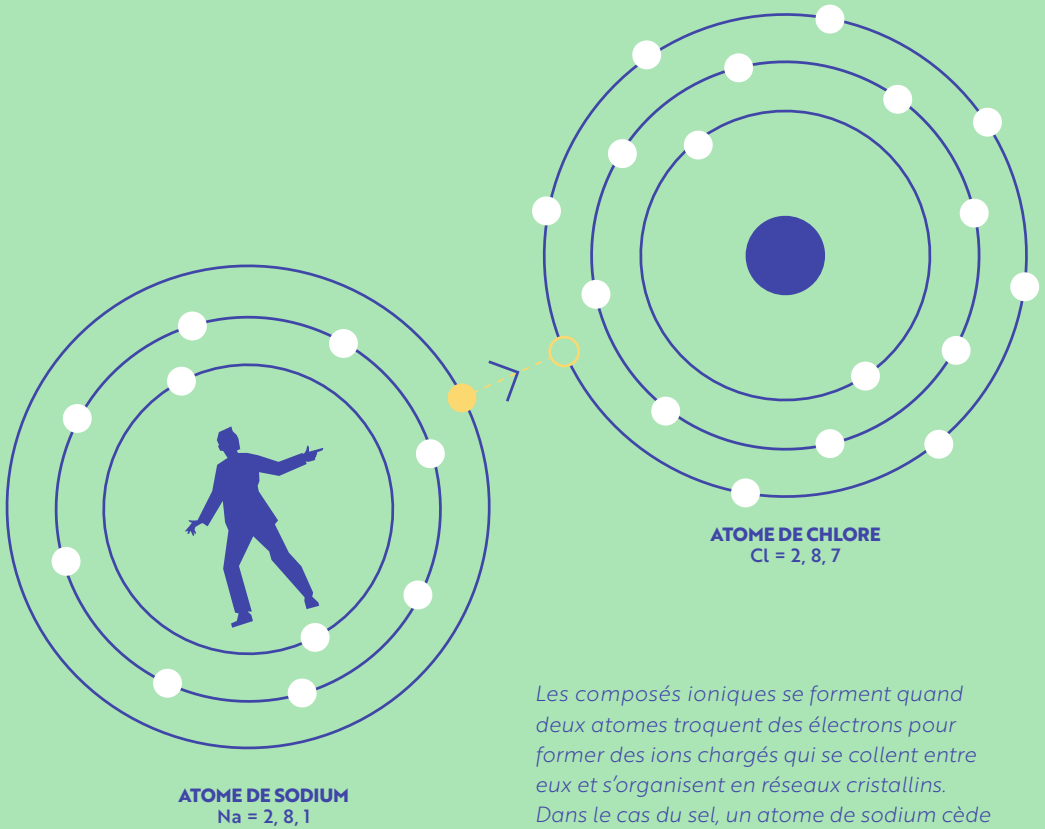
Les électrons les plus externes d'un atome sont responsables de sa chimie particulière ; ils déterminent le nombre de « crochets » dont cet atome dispose pour se lier aux autres. La chimie est ainsi surtout une histoire de nuages d'électrons qui se déplacent et créent des liens.

Parfois, un atome peut céder un ou plus de ces électrons à un autre atome ; le donneur s'en trouve positivement chargé, le receveur négativement. Ces atomes chargés sont appelés des ions et l'attraction qui se crée entre leurs charges opposées est une liaison ionique. Ces liaisons permettent aux ions de s'empiler dans l'espace selon des motifs bien particuliers, comme les fruits sur un étal, et de former ainsi des cristaux tels que le chlorure de sodium, qu'on connaît mieux sous son nom de sel de table.

En 1916, le chimiste américain Gilbert Lewis a compris que certains atomes ne sont pas aussi généreux que ça et préféreraient partager leurs électrons, plutôt que les donner complètement. Deux atomes qui partagent une paire d'électrons forment une liaison covalente. Ces liaisons unissent les atomes de nombreuses molécules à base de carbone, depuis l'essence de votre voiture à l'ADN de vos cellules. Elles s'assurent aussi que les diamants sont bien éternels (enfin presque).

Les électrons sont encore responsables d'autres types de liaisons, ce qui prouve bien que ce sont eux, les agents secrets de la chimie.

LIAISONS IONIQUES DANS LE CHLORURE DE SODIUM



Les composés ioniques se forment quand deux atomes troquent des électrons pour former des ions chargés qui se collent entre eux et s'organisent en réseaux cristallins. Dans le cas du sel, un atome de sodium cède un électron à un atome de chlore, qui en profite pour remplir la seule place qui restait sur son orbite externe d'électrons. (Le total d'électrons sur chaque orbite, ou « orbitale », est souvent écrit comme une suite de nombres.) Si les électrons se déplaçaient comme les balles du pistolet Walther PPK de James Bond, ce serait facile de les suivre, mais la mécanique quantique (page 68) révèle que les électrons sont plutôt comme des nuages autour du noyau, la partie la plus dense nous indiquant dans quelle partie du nuage un électron a le plus de chances de se trouver.

La chiralité est-elle à portée de main ?

→ La chiralité nous révèle que des molécules qui paraissent identiques sont en réalité des images-miroir. Bien des molécules de votre corps sont chirales, si bien que les médicaments le sont souvent aussi.



Regardez vos mains. Elles ont l'air semblables, avec quatre doigts et un pouce reliés à une paume. Mais elles sont clairement différentes : ce sont des images-miroir l'une de l'autre.

Beaucoup de molécules ont le même genre de configuration, une propriété qu'on appelle la chiralité. Une paire de molécules chirales ont les mêmes atomes, liés par les mêmes liaisons, mais la disposition de leurs atomes dans l'espace en fait des images-miroir.

Ce n'est pas une rareté dans le monde moléculaire. Les molécules d'ADN qui transportent l'information génétique dans vos cellules sont toutes en hélice vers la droite, alors que les protéines de votre peau, de vos muscles et de vos cheveux sont quasiment toutes constituées d'acides aminés orientés vers la gauche. Personne ne sait pourquoi la vie a choisi ces formes chirales particulières et pas leurs jumelles. Ce choix a pourtant eu de profondes implications.

De nombreux médicaments fonctionnent en se liant aux protéines, si bien qu'on les produit souvent dans l'une des deux formes chirales possibles, car l'autre pourrait être moins efficace ou déclencher des effets secondaires indésirables, en raison des différentes manières dont les molécules

chirales se regroupent. Ainsi, l'ibuprofène orienté à gauche est un antidouleur efficace, alors que l'ibuprofène orienté à droite n'en est pas un.

C'est le physicien français Jean-Baptiste Biot qui a remarqué le premier ces histoires de chiralité en 1815, en notant que certaines substances faisaient pivoter un rayon de lumière polarisée soit vers la gauche, soit vers la droite. En 1848, le chimiste Louis Pasteur a réussi à séparer des cristaux gauches et des cristaux droits d'acide tartrique et il a prouvé qu'ils faisaient pivoter la lumière en direction opposée en raison de la disposition spatiale de leurs molécules.

Pasteur a alors supposé possible de créer une forme de vie qui serait l'image-miroir de la nôtre, en utilisant les « mauvaises » formes miroir des molécules biologiques. Les scientifiques ont transformé l'idée de Pasteur en réalité en construisant péniblement des versions miroir de l'ADN, des protéines et de toute la machinerie biochimique qui gère ces molécules. Des protéines miroir sont aussi utilisées en médecine, où on les programme pour s'attaquer à des cibles spécifiques telles que les cellules cancéreuses, mais leur étrange chiralité fait que nos anticorps habituels ne peuvent pas s'en débarrasser ensuite.

MOLÉCULES MIROIRS

La carvone est chirale. Elle existe en deux versions, images-miroir l'une de l'autre. La gauche sent l'anis sauvage, la droite la menthe verte. Les scientifiques se demandent encore pourquoi, car les deux formes chirales d'une molécule ne sentent pas toujours différemment l'une de l'autre, ce qui veut dire que notre odorat n'est pas fondé sur la chiralité.



Comment naviguer à l'échelle nanométrique ?

→ Avec une toute petite carte. L'échelle nanométrique démarre au milliardième de mètre, pourtant les scientifiques trouvent leur chemin dans ce paysage lilliputien à l'aide d'instruments capables de détecter et manipuler les atomes individuels.



Les nanotechnologies sont la science du minuscule. Les explorateurs du microcosme mesurent leurs trajets en nanomètres, un milliardième de mètre, la longueur de trois atomes d'or alignés. Si vous mesuriez un nanomètre, un seul virus de SARS-CoV-2 vous paraîtrait aussi gros que Notre-Dame de Paris. Mais si cette science s'intéresse aux petites choses, son impact sur nos vies est considérable.

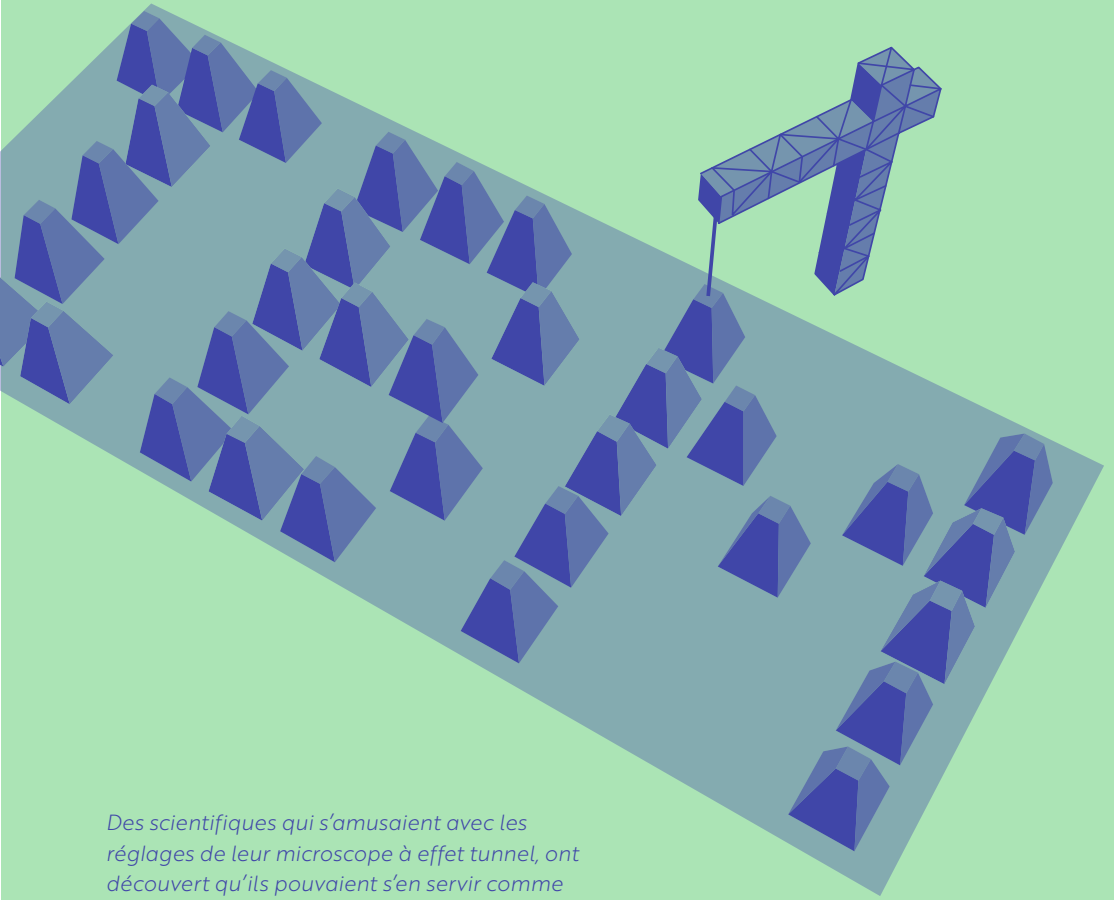
Le nanomonde est entré dans nos vies dans les années 1980, quand de nouveaux microscopes très puissants ont été développés par IBM. Ces microscopes à effet tunnel utilisent une pointe extrêmement fine placée juste au-dessus de la surface à étudier, assez près pour que des électrons sautent de l'une à l'autre. Quand la pointe se déplace, les modifications du flux d'électrons sont traduites en images, les atomes et molécules de la surface. De leur côté, les microscopes à force atomique produisent le même genre d'images en utilisant leur pointe fine directement sur la surface pour sentir sa texture, comme la pointe d'une platine qui passerait dans le sillon d'un disque vinyle.

Ces instruments ont aidé les scientifiques à développer et étudier toutes sortes de nano-matériaux. Prenez les catalystes, ces substances qui accélèrent les réactions chimiques. Les chimistes améliorent leurs capacités en les décomposant en nanoparticules de quelques douzaines d'atomes chacune. Ces catalystes permettent ensuite de produire des molécules qui forment des plastiques ou des médicaments.

Les boîtes quantiques sont un genre de nanoparticules à base de matériaux semi-conducteurs. On les emploie pour éclairer nos écrans de télé. En ajustant la taille et la composition de ces boîtes, on les force à émettre des couleurs précises quand elles sont éclairées d'une lumière bleue.

Les nanotechnologies nous aident aussi à réduire la taille des composants électroniques et ainsi donner toujours plus de puissance de calcul aux microprocesseurs. En 1970, les puces principales d'un ordinateur mesuraient mille nanomètres d'épaisseur. Grâce à la nanolithographie, qui se sert de lumière ultraviolette pour tailler les matériaux, elles mesurent aujourd'hui 5 nanomètres.

CONSTRUCTION DANS LE NANO MONDE



Des scientifiques qui s'amusaient avec les réglages de leur microscope à effet tunnel, ont découvert qu'ils pouvaient s'en servir comme d'une grue nanométrique, pour déplacer les atomes. Ils ont ainsi écrit les initiales IBM avec des atomes de xénon, par exemple. Le prix Nobel de physique et excellent joueur de bongo Richard Feynman avait prédit ce genre de technologies dans une célèbre conférence donnée en 1959, intitulée « Il y a plein de place en bas ». On ne sait pas à quel point cette conférence a influencé le développement des nanotechnologies, mais beaucoup de ses prédictions se sont avérées.

**MÉCANIQUE
QUANTIQUE**

```
graph TD; A((MÉCANIQUE QUANTIQUE)) -.-> B[COMPORTEMENT ONDULATOIRE]; B -.-> C[PRINCIPE D'INCERTITUDE]; C -.-> D[ANTIMATIÈRE]; A -.-> D;
```

**COMPORTEMENT
ONDULATOIRE**

**PRINCIPE
D'INCERTITUDE**

ANTIMATIÈRE

CHAPITRE 4

FONDACTIONS

**MODÈLE
STANDARD**

**PARTICULES
SUBATOMIQUES**

NEUTRINOS

INTRODUCTION

Dans les deux précédents chapitres, nous avons exploré l'énergie et les forces qui président à tout changement dans l'Univers, et la matière qui constitue notre monde quotidien. Mais certaines des avancées les plus importantes de la physique du XX^e siècle sont venues de l'exploration des dessous de la réalité, dans l'étrange royaume de la mécanique quantique et des particules subatomiques.

La **MÉCANIQUE QUANTIQUE** décrit les interactions de la matière et de l'énergie à l'échelle atomique. L'une des principales découvertes de la mécanique quantique est que l'énergie ne se mesure pas comme un bout de ficelle, qui peut prendre n'importe quelle longueur, mais par morceaux indivisibles, que le physicien Max Planck a baptisés « quanta » (page 68). Cette découverte en a entraîné beaucoup d'autres, qui nous ont permis d'élaborer la physique quantique moderne.

Ainsi, les savants du XIX^e siècle avaient montré que la lumière était composée d'ondes capables de se diffracter et d'interférer, comme les vaguelettes d'un étang. Mais Albert Einstein et d'autres ont découvert qu'elle pouvait aussi se comporter comme un flux de corpuscules appelés **PHOTONS**, tandis que ce qu'on pensait être des corpuscules, par exemple les électrons, se comportaient parfois comme des ondes. Ce comportement de caméléon est appelé la **DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE** (page 70).

De la nature ondulatoire des particules découle une ambiguïté du monde subatomique. Le **PRINCIPE D'INCERTITUDE** énonce qu'il est impossible de connaître

la localisation et la quantité de mouvement exactes d'une particule au même moment. Si vous en mesurez une avec précision, l'autre devient automatiquement plus floue (page 72).

La mécanique quantique a aussi prédit, avec succès, l'existence des particules d'**ANTIMATIÈRE** telles que le **POSITON**, qui a exactement la même masse que l'électron, mais porte une charge positive (page 74).

Toutes les particules fondamentales découvertes par les physiciens rentrent dans le même grand cadre théorique, le **MODÈLE STANDARD** (page 76). Au sein de cette ménagerie, certaines particules forment la matière qui nous entoure, tandis que d'autres sont les supports des forces fondamentales telles que l'électromagnétisme. L'un de ces porteurs de force est le **BOSON DE HIGGS**, que le modèle standard prédisait depuis longtemps, mais que nous n'avons découvert qu'en 2012 (page 80). Le boson de Higgs est la manifestation d'un champ qui donne leur masse aux particules. Il explique aussi pourquoi les photons de lumière n'ont pas de masse du tout.

Il reste néanmoins de gros trous dans le modèle standard. Par exemple, les **NEUTRINOS**, produits lors de certaines désintégrations radioactives, ne se comportent pas comme le prédit le modèle (page 78). Il n'inclut pas non plus la gravité, c'est pourquoi les physiciens sont en quête de nouvelles théories de la « gravité quantique » afin d'y remédier. Après plus d'un siècle d'exploration du royaume quantique, il semblerait que les fondations de la réalité soient plus profondes encore.

PHOTON

Particule élémentaire de la classe des bosons, dénuée de masse et se déplaçant donc à la vitesse de la lumière dans le vide.

BOSONS

Une des deux classes fondamentales de particules, l'autre étant les fermions. Bosons de Higgs, mésons et gluons sont des bosons.

MODÈLE STANDARD

Cadre pour comprendre la physique fondamentale. Il contient les particules élémentaires et trois des quatre forces fondamentales (nucléaire forte, nucléaire faible, électromagnétisme).

FERMIONS

Une des deux classes fondamentales de particules, l'autre étant les bosons. Quarks, leptons et baryons sont des fermions.

DÉTECTEUR

Expériences visant à détecter des particules, leurs attributs et interactions. Souvent très gros et construits en sous-sol pour les isoler de sources de rayonnement.

BOSON DE HIGGS

Particule élémentaire du modèle standard produite par excitation quantique du champ de Higgs, qui génère la masse de certains bosons au travers de leurs interactions avec celui-ci.

PARTICULE ÉLÉMENTAIRE

Les particules élémentaires ou fondamentales sont des excitations des champs quantiques. Elles incluent les photons, les neutrinos et les bosons.

POSITON

Particule identique à un électron, mais de charge positive : c'est l'antiparticule de l'électron.

NEUTRINO

Particule fondamentale de faible masse, sans charge électrique. Existe en trois types, ou « saveurs » : neutrino électronique, muon et tau.

TOMOGRAPHIE PAR ÉMISSION DE POSITONS

Mécanisme d'imagerie médicale : des isotopes radioactifs sont injectés dans le patient pour y produire des positons qui émettent des rayons gamma quand ils s'annihilent au contact d'électrons.

QUANTA

EXPÉRIENCE DES FENTES DE YOUNG

Démonstration de la dualité onde-corpuscule en projetant de la lumière au travers de deux fentes vers une surface plate pour constater les figures d'interférences formées.

DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE

Quand des particules se comportent à la fois comme des ondes et comme des corpuscules. Concept clé de la physique quantique.

PRINCIPE D'INCERTITUDE

Publié en 1927 par Werner Heisenberg, il édicte qu'il est impossible de mesurer à la fois la position et la quantité de mouvement d'une particule avec précision.

INTRICATION

Quand deux particules restent liées quelle que soit la distance qui les sépare, qu'elles partagent un état commun, unifié.

MÉCANIQUE QUANTIQUE

Branche de la physique qui décrit les atomes et les particules subatomiques, leur mouvement et leurs interactions.

CHAT DE SCHRÖDINGER

Expérience de pensée qui illustre le paradoxe de la superposition quantique, fondé sur l'impossibilité de savoir si un chat dans une boîte est vivant ou mort quand son destin dépend d'un événement quantique aléatoire.

ANTIMATIÈRE

Jumelle inversée de la matière ordinaire. Les antiparticules ont la même masse, mais une charge opposée : par exemple, un positon est un électron de charge positive.

PAUL DIRAC

Physicien anglais (1902–84) qui a unifié la mécanique quantique et la relativité restreinte dans les équations de Dirac, et prédit l'existence des antiparticules.

Qui a quantifié la physique quantique ?

→ Les équations de Newton décrivent bien le déplacement des objets que nous voyons, ceux avec lesquels nous interagissons tous les jours. Mais les particules subatomiques se comportent différemment, selon les lois de la physique quantique.



La physique quantique décrit le mouvement et les interactions des particules subatomiques, leurs comportements souvent étranges et contre-intuitifs. Les origines de cette nouvelle physique remontent aux années 1900, quand le physicien allemand Max Planck étudiait le rayonnement de la matière quand on la chauffe. Planck a déterminé que l'énergie dégagée était quantifiée, c'est-à-dire émise en paquets séparés et non en flux continu. Cela semblait simple, mais les implications étaient énormes. Son étude révolutionnaire a valu à Planck le prix Nobel en 1918 et a posé les bases de la physique quantique.

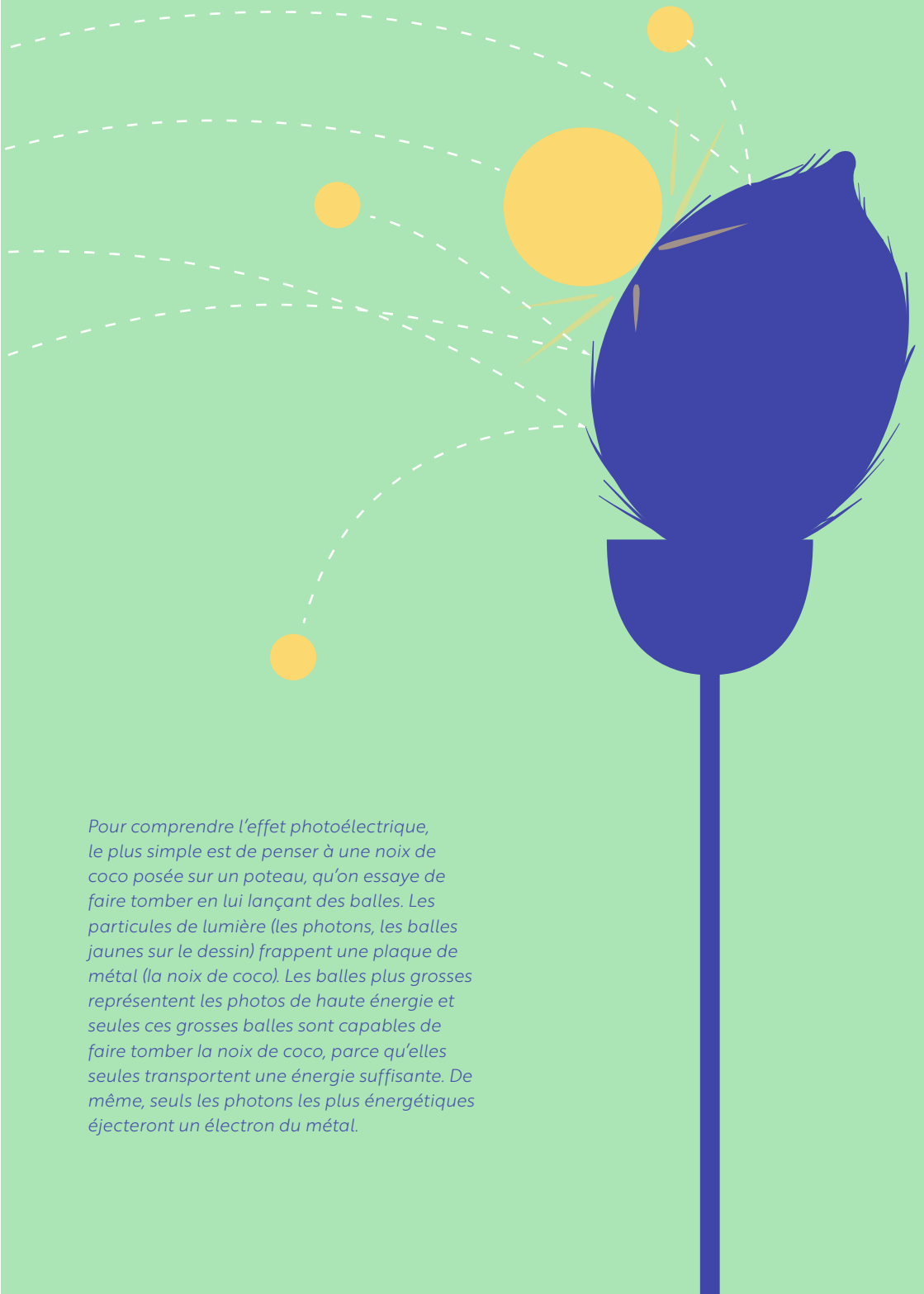
Si l'énergie est bien quantifiée, comme Planck l'a montré, alors l'interaction entre l'énergie et les particules doit l'être aussi. C'est ce qu'a montré le plus célèbre physicien du monde, Albert Einstein. Si on éclaire du métal, l'énergie de la lumière est transférée aux électrons du métal. Si chaque paquet de lumière transporte assez d'énergie, les électrons seront arrachés à leurs atomes et éjectés du métal. Si chaque paquet de lumière ne transporte pas assez

d'énergie, alors aucun électron ne sera émis, quelle que soit la quantité de paquets que le métal reçoit. C'est ce qu'on appelle l'effet photoélectrique, qui valut à Einstein le prix Nobel en 1905.

Les travaux d'Einstein et Planck ont ouvert la voie à d'innombrables branches de la physique quantique. Ces domaines ont donné naissance aux concepts de dualité onde-corpuscule (page 70), d'intrication quantique et au fameux principe d'incertitude de Heisenberg (page 72). De célèbres physiciens tels que Richard Feynman et Paul Dirac ajouteraient eux aussi leur contribution au champ toujours plus vaste de la physique quantique, sous forme de l'électrodynamique quantique et de la théorie quantique des champs, qui décrivent toutes les deux les interactions entre particules quantifiées.

Le champ de la physique quantique s'agrandit encore aujourd'hui et s'étend à présent à des technologies que nous utilisons quotidiennement. Parmi celles-ci viendra un jour s'ajouter l'informatique quantique (page 154), qui aurait très certainement ravi Planck et Einstein.

EFFET PHOTOÉLECTRIQUE



Pour comprendre l'effet photoélectrique, le plus simple est de penser à une noix de coco posée sur un poteau, qu'on essaye de faire tomber en lui lançant des balles. Les particules de lumière (les photons, les balles jaunes sur le dessin) frappent une plaque de métal (la noix de coco). Les balles plus grosses représentent les photos de haute énergie et seules ces grosses balles sont capables de faire tomber la noix de coco, parce qu'elles seules transportent une énergie suffisante. De même, seuls les photons les plus énergétiques éjecteront un électron du métal.

Une particule est-elle aussi une onde ?

→ Les électrons sont parmi les plus petites particules connues et, même si nous les appelons des particules, ils peuvent se comporter parfois comme des ondes, ce que des expériences vieilles de plus de 200 ans avaient déjà constaté.



Les objets de tous les jours se comportent comme des ondes, par exemple les vaguelettes qui se propagent dans un étang, ou comme des corpuscules, par exemple le ballon de foot dans lequel vous donnez un coup de pied. À l'échelle microscopique, de toutes petites particules, électrons, protons et photons, présentent des comportements que nous associons à la fois aux corpuscules et aux ondes, ce qui a de nombreux effets étranges (et utiles). C'est ce qu'on appelle la dualité onde-corpuscule, un des concepts clés de la physique quantique (page 68).

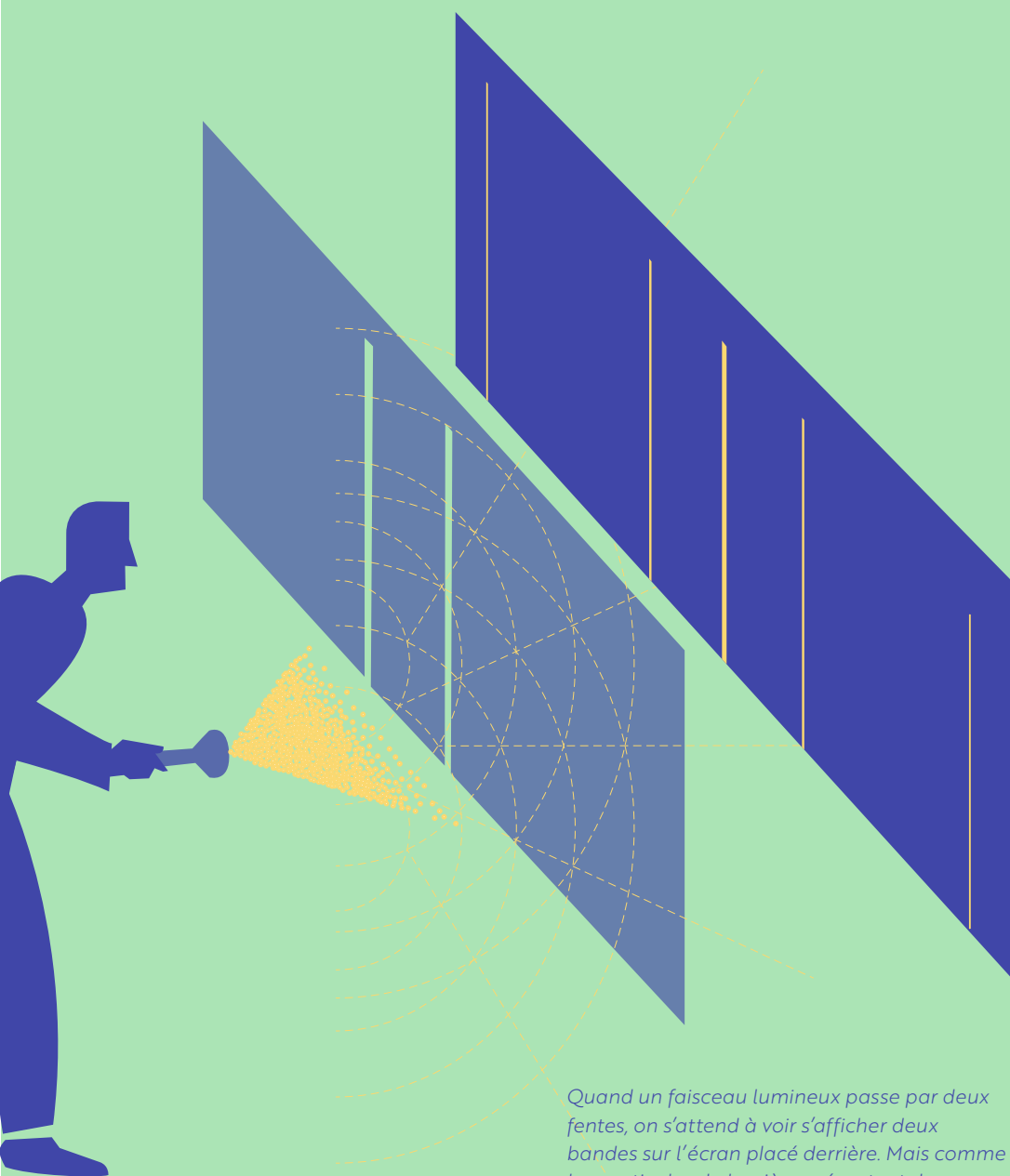
Imaginez que vous éclairez à l'aide d'une lampe-torche un écran dans lequel deux fentes étroites ont été percées. Si vous placez un autre écran derrière et que vous observez ce que la lumière y dessine après être passée par les deux fentes, quel motif pensez-vous trouver ? On pourrait s'attendre à deux bandes étroites de lumière, mais ce n'est pas le cas. Vous verrez de nombreuses bandes. Ce qui l'explique, c'est que les particules de lumière (les photons) se comportent comme des ondes et interfèrent les unes avec les autres. Comme les vaguelettes dans un étang qui se mélangent et se combinent,

les photons qui traversent chacune des fentes entrent en interférence, ce qui entraîne l'apparition de plusieurs bandes lumineuses sur le deuxième écran.

De nombreux savants ont réfléchi à cette dualité onde-corpuscule, dont Albert Einstein avec l'effet photoélectrique et Thomas Young, le premier à avoir imaginé cette expérience des deux fentes.

Dans les années 1920, un autre physicien célèbre, Louis de Broglie, a cherché à décrire mathématiquement la nature ondulatoire des particules et en particulier celle de l'électron. Dans sa thèse de doctorat, il a abouti à la relation de De Broglie, qui décrit les propriétés ondulatoires de l'électron. Sa théorie est aujourd'hui au fondement de nombreux outils expérimentaux très utiles, comme le microscope électronique à balayage. Cette technologie repose sur la nature ondulatoire de l'électron, telle que décrite par la dualité onde-corpuscule, afin de pouvoir représenter visuellement de minuscules objets (page 60).

INTERFÉRENCES DANS LA DUALITÉ ONDE-CORPUSCULE



Quand un faisceau lumineux passe par deux fentes, on s'attend à voir s'afficher deux bandes sur l'écran placé derrière. Mais comme les particules de lumière présentent des propriétés ondulatoires, les deux faisceaux de sortie interfèrent de nombreuses fois et donnent naissance à une alternance de bandes sombres et lumineuses.

Est-on bien certain du principe d'incertitude ?

→ Selon le principe d'incertitude, il est impossible de mesurer simultanément la localisation et la quantité de mouvement exactes d'une particule subatomique.



Publié par le physicien théoricien allemand Werner Heisenberg en 1927, le principe d'incertitude est au cœur de nombreux jeux de mots et plaisanteries. Il est très beau dans sa simplicité, décrit en une seule équation qui nous indique que le comportement des particules subatomiques (quantiques) est difficile à prévoir précisément et qu'il comporte toujours une certaine incertitude. D'où son nom.

Le principe d'incertitude postule qu'il est impossible de mesurer à la fois la position et la quantité de mouvement d'une particule avec une précision parfaite pour les deux mesures. En d'autres termes, plus nous en savons sur l'une de ces quantités, moins l'autre nous sera connue avec précision. C'est à l'opposé de ce que nous observons dans notre monde à grande échelle, qui est décrit dans les termes de la physique classique où aucune limitation de ce genre n'existe. Les implications et les conséquences du principe d'incertitude sont immenses et de très grande portée.

Il a été malgré tout remis en question par un groupe de physiciens dans les années 1990. Ces scientifiques ont réalisé à leur manière la fameuse expérience des fentes de Young (page 70) et ont montré que la position des particules et leur quantité de mouvement pouvaient être mesurées toutes les deux avec une grande précision.

Plus récemment, des scientifiques ont testé ce principe de plusieurs manières différentes. Dans l'une d'elles, ils ont effectué beaucoup de petites mesures, de nature à interférer le moins possible avec l'expérience, qu'ils ont ensuite compilées toutes ensemble. En les accumulant ainsi et en les prenant toutes en compte, leurs mesures sont devenues plus précises que le principe d'incertitude ne le permet théoriquement.

Il faut toutefois ici faire une importante distinction. Ce n'est peut-être pas finalement le procédé de mesure qui introduit l'incertitude, mais il est toujours impossible de connaître simultanément plusieurs états quantiques. Ainsi, il semblerait que le principe d'incertitude soit toujours vrai.

CHAT QUANTIQUE DE SCHRÖDINGER

On associe souvent le chat de Schrödinger au principe d'incertitude, ce qui est compréhensible. Au départ, c'était une expérience de pensée qui avait pour but d'illustrer l'un des paradoxes de la physique quantique. Conçue en 1935, elle décrit un chat enfermé dans une boîte avec un élément radioactif. L'élément peut se

désintégrer à tout moment et quand il le fera, la radiation tuera le chat. Les lois de la physique quantique font qu'on ne peut pas savoir avec certitude si le chat va bien. Il a une probabilité d'être mort et une probabilité d'être vivant. Tant que la boîte n'est pas ouverte, le chat peut être considéré comme à la fois mort et vivant.



Qu'est-ce que l'antimatière ?

→ Le jumeau mystérieux de la matière ordinaire. Comprendre sa différence pourrait dissiper les plus grands mystères de l'Univers. Sur Terre, elle aide déjà les médecins à repérer des tumeurs chez leurs patients.



En 1928, le physicien anglais Paul Dirac a relié physique quantique et relativité restreinte au travers de ses équations, les plus belles de la physique, selon certains. Les équations de Dirac fournissent une description détaillée du comportement des particules. Elles prédisent aussi que l'électron devrait avoir une antiparticule, un jumeau de même masse, mais de charge opposée.

Cela semblait tout à fait fantaisiste, jusqu'à ce qu'un électron positif, un positon, soit découvert quelques années plus tard. Les antiprotons ont suivi en 1955. Depuis, les scientifiques ont trouvé toute une ménagerie d'antiparticules. Ils ont même assemblé des antiprotons avec des positons pour produire des atomes d'antihydrogène.

Le sujet est explosif. En effet, quand une antiparticule rencontre sa particule, les deux s'annihilent en dégageant beaucoup d'énergie. Une boîte d'antimatière de la taille d'une brique de lait suffirait à générer plus d'énergie qu'une grosse centrale électrique n'en produit en une année.

Heureusement pour nous, il n'y a pas de gros morceaux d'antimatière qui traînent dans l'Univers. La théorie suggère cependant que le Big Bang (page 14) aurait

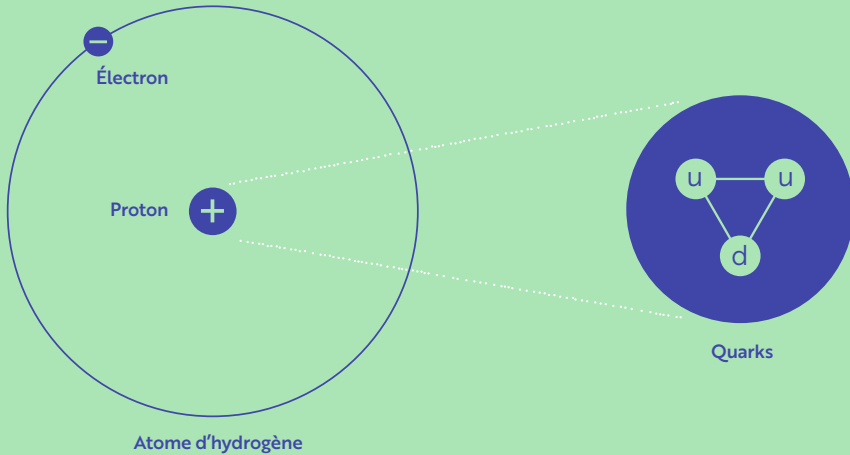
dû créer la matière et l'antimatière en parts égales, menant à un des grands mystères de la physique. Puisqu'elles étaient en quantité égale au départ, pourquoi y a-t-il beaucoup plus de matière que d'antimatière, à présent ? Il y aurait une différence fondamentale, mais infime entre les deux, qui demeure cachée aux yeux des physiciens.

L'antimatière est exotique, mais malgré tout partout autour de nous, au moins brièvement. Certaines désintégrations radioactives (page 18) recrachent un positon, qu'on utilise en imagerie médicale : c'est la tomographie par émission de positons (TEP). On injecte aux patients un isotope radioactif à des endroits précis dans le corps. L'isotope produit des positons qui s'annihilent immédiatement avec des électrons, générant des rayons gamma au passage. Le scanner les détecte et le docteur peut ainsi localiser la tumeur.

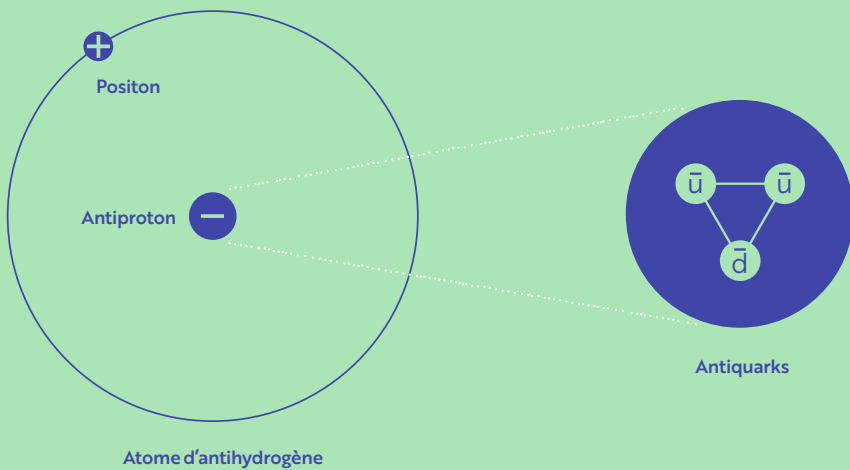
De minuscules quantités d'antimatière sont également produites dans votre saladier de fruits. Les bananes contiennent beaucoup d'atomes de potassium, et certains de ces atomes sont des isotopes radioactifs qui émettent à l'occasion un positon : à peu près une fois toutes les 75 minutes.

MONDE INVERSÉ

MATIÈRE



ANTIMATIÈRE



Un atome d'hydrogène est composé d'un proton et un électron. Les protons sont eux-mêmes faits de particules encore plus petites appelées quarks, qui peuvent prendre différentes « saveurs » : up et down. Le jumeau d'antimatière de l'hydrogène est fait d'un positron (électron positif) et d'un antiproton, contenant des antiquarks.

Les scientifiques étudient les différences entre l'hydrogène et l'antihydrogène afin de tester certaines lois fondamentales de la physique, mais ce sont des expériences délicates, car quand la matière rencontre l'antimatière, leurs masses sont instantanément converties en énergie, selon la fameuse équation d'Einstein, $E = mc^2$.

Le modèle standard est-il en pièces ?

→ Non, mais il a besoin d'une révision. Le modèle standard fournit un moyen de décrire les particules de notre Univers, mais de nouvelles découvertes doivent lui être incorporées, dont la matière noire.



Développé dans les années 1970, le modèle standard permet de relier les briques élémentaires de l'Univers (les particules) à trois des quatre forces fondamentales : l'électromagnétisme et les forces nucléaires, faible et forte. Il classe les particules en différentes familles, selon leurs propriétés. Les particules élémentaires sont ainsi des fermions (les électrons et les quarks), qui forment la matière, ou des bosons (les photons), qui sont les vecteurs des forces.

Depuis sa conception, le modèle standard a beaucoup été testé. Nous savons aujourd'hui que des aspects lui manquent et qu'il n'est pas capable de rendre compte de tout, par exemple du magnétisme du muon, de la légère domination de la matière sur l'antimatière, ou encore de la matière noire et de l'énergie sombre.

Le muon, par exemple, est un cousin massif et instable de l'électron, l'une des particules fondamentales du modèle standard. Les scientifiques ont récemment été capables de mesurer très précisément son magnétisme interne, duquel découlent ses interactions avec les forces et les particules et les autres particules. Ils ont découvert que ce

magnétisme déviait, peu, mais indéniablement, des prévisions déduites du modèle standard.

Un autre problème de ce modèle est qu'il n'inclut pas la dernière force fondamentale de l'Univers, qui est la gravitation. Les scientifiques n'ont pas encore découvert de particule qui leur permettrait de décrire comment la gravitation « communique » avec les autres particules.

Le modèle standard ne tient pas non plus compte de la matière noire et de l'énergie sombre, qui représentent pourtant la grande majorité de l'Univers ; de fait, il n'explique qu'environ 5 % de l'énergie présente. Beaucoup d'incertitude entoure encore ces deux concepts, mais l'un des candidats privilégiés pour expliquer la matière noire (ce n'est toutefois qu'une théorie parmi beaucoup d'autres) serait le neutrino (page 78).

Comme beaucoup de théories scientifiques, le modèle standard est utile et fournit un précieux point de départ, mais il a ses limites. À mesure que leurs mesures de l'Univers se feront plus précises, il ne fait aucun doute que les scientifiques trouveront dans le futur de nouvelles déviations entre le modèle standard et la réalité.

PIÈCES MANQUANTES



Le modèle standard de la physique des particules est un puzzle compliqué que les scientifiques ont mis des décennies à assembler. Il a connu des succès incroyables dans l'explication de nombreux aspects des particules subatomiques et prédit l'existence du boson de Higgs (page 80), par exemple. Mais il lui manque quelques pièces, dont la gravité, la matière noire et

l'énergie sombre, et la manière dont elles pourraient s'y intégrer est loin d'être claire. Certains voudraient étendre le modèle pour qu'il inclue beaucoup de particules « supersymétriques » supplémentaires, d'autres voudraient le remplacer intégralement par un autre, fondé non sur les particules, mais sur de minuscules « cordes » à une seule dimension et sur leurs vibrations.

Quelle est la saveur d'un neutrino ?

→ Les neutrinos peuvent être de trois saveurs différentes. Chacune laisse une trace spécifique, ce qui permet aux scientifiques de savoir quelle particule est passée par là.



Toute la matière qui vous entoure est faite de particules fondamentales. Ce sont les briques élémentaires de tout ce que vous voyez. Les physiciens les regroupent dans ce qu'on appelle le modèle standard et, au sein de ce modèle, on trouve un groupe étrange et mystérieux : les neutrinos. Ces neutrinos peuvent être de trois saveurs différentes : électronique, muon et tau. De manière étonnante, ils peuvent osciller entre chaque saveur, c'est-à-dire passer de l'une à l'autre.

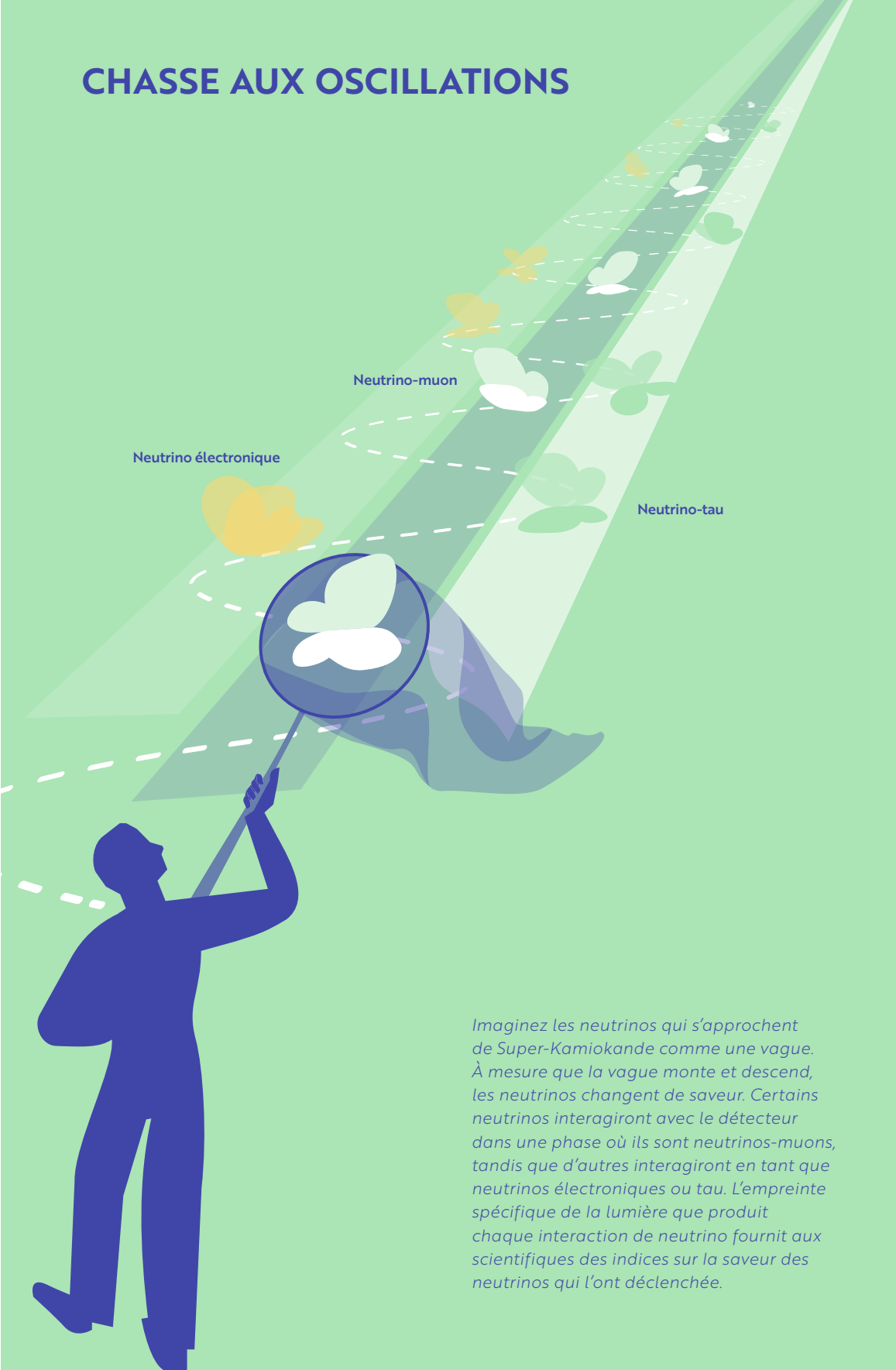
Faire la distinction entre les trois saveurs de neutrinos est difficile, car chacune de ces particules a une masse très faible et pas de charge électrique, si bien qu'elles interagissent à peine avec la matière, à tel point que, pendant que vous lisez ces lignes, environ 100 milliards de neutrinos produits dans le Soleil sont passés au travers de vos os.

Comment les physiciens prouvent-ils leur existence, dans ce cas ? Pour tester leurs théories, ils ont dû concevoir des expériences capables de détecter et capturer les neutrinos. Comme ils interagissent très épisodiquement avec la matière, il faut être prêt quand cela se produit ! Détecter les interactions des neutrinos sur Terre est

difficile, car il y a trop d'autres particules et de sources de rayonnement. Pour pallier cela, les scientifiques ont construit d'énormes détecteurs de particules en souterrain, où les particules indésirables ne les atteignent pas. L'un d'eux est le détecteur Super-Kamiokande au Japon, enterré sous 1 000 mètres de terre dans une vieille mine abandonnée. Il consiste en un réservoir de 40 mètres qui contient 50 000 tonnes d'eau ultra-pure, entouré de photodétecteurs ultra-sensibles. Là, les scientifiques attendent que les différents types de neutrinos interagissent avec l'eau et ils étudient le rayonnement et les particules que ces interactions produisent.

Super-Kamiokande a été le premier détecteur à fournir la preuve de l'oscillation des neutrinos en 1998. En 2015, Takaaki Kajita et Arthur McDonald ont remporté le prix Nobel pour leurs travaux qui confirmaient la détection d'oscillations de neutrinos. Le succès de Super-Kamiokande a entraîné la construction d'une autre version beaucoup plus grande du détecteur : Hyper-Kamiokande, ou Hyper-K. Il contiendra plus d'un milliard de litres d'eau ultra-pure et cherchera à détecter d'autres interactions discrètes entre particules, telles que la désintégration des protons.

CHASSE AUX OSCILLATIONS



Neutrino électronique

Neutrino-muon

Neutrino-tau

Imaginez les neutrinos qui s'approchent de Super-Kamiokande comme une vague. À mesure que la vague monte et descend, les neutrinos changent de saveur. Certains neutrinos interagissent avec le détecteur dans une phase où ils sont neutrinos-muons, tandis que d'autres interagissent en tant que neutrinos électroniques ou tau. L'empreinte spécifique de la lumière que produit chaque interaction de neutrino fournit aux scientifiques des indices sur la saveur des neutrinos qui l'ont déclenchée.

Comment attraper un boson de Higgs ?

→ Essayez avec le Grand Collisionneur de hadrons. Le boson de Higgs, la « particule de Dieu », y a été détecté dans le champ de Higgs, un champ de force qui donne leur masse à la plupart des particules.



Pourquoi tant de choses dans l'Univers ont-elles une masse alors que d'autres, comme la lumière, n'en ont pas ? La réponse est à trouver dans un champ de force invisible et une particule aujourd'hui célèbre, le boson de Higgs.

La nature est gouvernée par quatre forces fondamentales : la gravitation, la force nucléaire forte, la force nucléaire faible et la force électromagnétique. Chacune est transmise par une particule appelée boson. Les bosons W et Z, par exemple, sont les médiateurs de la force faible et sont très similaires aux particules de lumière, les photons, médiateurs de l'électromagnétisme.

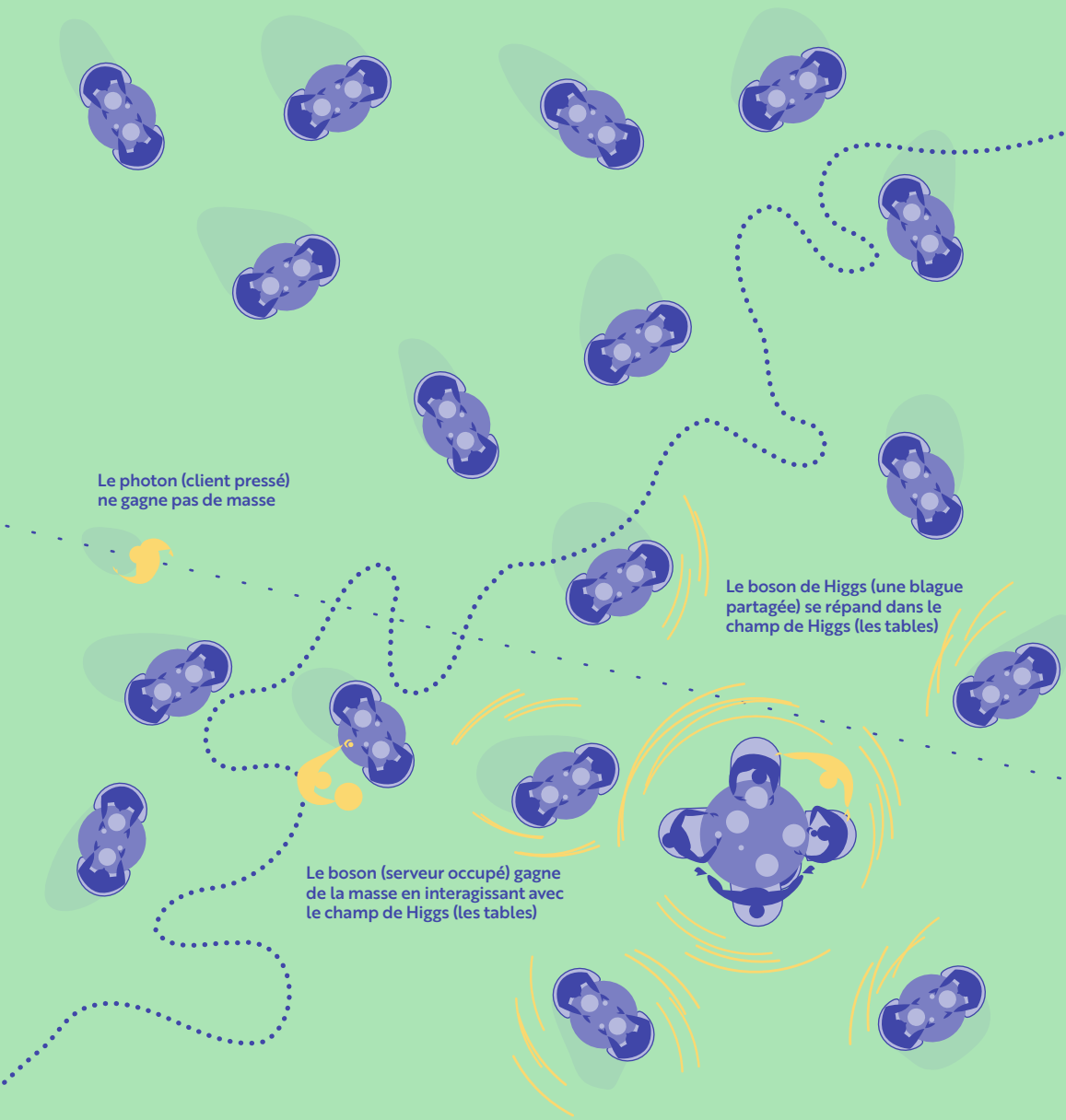
Toutefois, les scientifiques ne comprenaient pas pourquoi les bosons W et Z sont des particules relativement lourdes, alors que les photons ont une masse nulle. Dans les années 1960, des physiciens ont tenté d'expliquer cela à l'aide d'un nouveau champ de force qui confère leur masse aux bosons W et Z, mais n'interagit pas avec les photons. C'est le champ de Higgs, nommé d'après Peter Higgs. Plus une particule interagit avec ce champ, plus elle devient lourde.

Le boson de Higgs est un genre d'onde dans le champ de Higgs et il s'agissait de la dernière pièce manquante dans le modèle standard, cette ménagerie de particules et de forces élémentaires qui constituent les briques fondamentales de l'Univers (page 76).

Pour chasser cette proie divine, les physiciens ont construit le Grand Collisionneur de hadrons (LHC) au CERN, près de Genève. Cette machine écrase les protons pour obtenir une soupe de particules exotiques de haute énergie. Après quelques années à analyser cette soupe, le CERN a annoncé en 2012 que ces collisions avaient créé des bosons de Higgs, ce qui confirmait l'existence du champ de Higgs. Peter Higgs et François Englert ont gagné le prix Nobel en 2013 pour leurs prédictions.

La physique des particules est-elle enfin complète ? Pas vraiment. Il reste beaucoup d'étrangetés que le modèle standard n'explique pas, par exemple les mystères de l'énergie sombre et de la matière noire.

LE CHAMP DE HIGGS



Le photon (client pressé) ne gagne pas de masse

Le boson de Higgs (une blague partagée) se répand dans le champ de Higgs (les tables)

Le boson (serveur occupé) gagne de la masse en interagissant avec le champ de Higgs (les tables)

Si le champ de Higgs était un bar bondé, un client pressé qui le traverserait sans s'arrêter serait un photon, qui passe dans le champ de Higgs sans interaction. Un serveur très occupé qui passerait de table en table pour ramasser les verres représenterait, lui, un boson qui gagne de la masse lentement en traversant le champ. Les deux commencent avec une masse nulle, la masse n'étant gagnée qu'au travers de l'interaction avec le

champ de Higgs, si bien que seul le boson (le serveur occupé) gagne de la masse. Et quand un client raconte une blague et que d'autres clients accourent à sa table pour l'entendre, avant de retourner à la leur où ils la racontent à leur tour, cela crée une onde qui se répand dans toute la pièce. Cette onde, qu'on peut rapprocher de celle que vous produisez dans une corde en en agitant un bout, est une bonne analogie du boson de Higgs.

TAXONOMIE

PHOTOSYNTHÈSE

CELLULES

CHAPITRE 5

VIE

ADN

GÈNES

ENZYMES

BACTÉRIE

INTRODUCTION

La science ne résout peut-être pas la question du sens de la vie, mais elle nous fournit de fascinantes informations sur la vie terrestre et les mécanismes qui la régissent.

Pour explorer toutes les formes de vie qui nous entourent, il faut une carte, et c'est ce que Carl von Linné nous a fourni en développant le premier système moderne de classification des animaux et des plantes en groupes distincts. C'est ce qui a marqué le début de la **TAXONOMIE**, la science de la classification des organismes (page 88).

Linné a fondé sa taxonomie sur les caractères physiques des organismes, auxquels il a donné un nom unique en latin pour indiquer leur place sur la carte. Aujourd'hui, la taxonomie se fonde sur l'étude génétique des organismes, qui nous révèle leur lien de parenté.

Presque toutes les formes de vie terrestre tirent leur énergie du Soleil, recueillie lors du mécanisme de **PHOTOSYNTHÈSE** (page 90). Les plantes, les algues et quelques bactéries utilisent la lumière pour produire du glucose et de l'oxygène à partir d'eau et de dioxyde de carbone. Quand nous mangeons des plantes, nous récoltons leur énergie solaire transformée en glucose et nous nous servons de l'oxygène pour nous aider à la digérer.

Ces miracles biochimiques se déroulent dans nos **CELLULES**, l'unité structurelle fondamentale de tout ce qui vit (page 92). Les cellules ont été aperçues pour la première

fois sous les microscopes du XVII^e siècle. Bien des organismes s'en tirent très bien avec une seule cellule, mais les humains sont faits de dizaines de milliards d'entre elles, de différents types correspondant à différentes fonctions.

Après avoir fouillé dans les cellules, les savants ont trouvé dans ces petits sacs tout un tas de molécules, toutes engagées dans ces réactions biochimiques qui donnent la vie. La plus célèbre d'entre elles est sans doute l'acide désoxyribonucléique, l'**ADN**. Sa structure en double hélice renferme un code chimique qui donne toutes les informations pour créer un organisme (page 94).

Les **GÈNES** sont de petits bouts d'ADN qui donnent aux cellules les plans pour construire des molécules. Ainsi, des gènes fournissent les codes des **ENZYMES**, un type de protéines spécialisées qui accélèrent les réactions chimiques dans les cellules (page 98). Sans elles, la vie irait si lentement que la digestion et le mouvement deviendraient impossibles.

Comprendre comment l'ADN renferme et transmet ces plans biologiques a permis aux scientifiques de déduire le fonctionnement de bien des maladies, et parfois de les traiter. Cela leur permet aussi d'altérer le code génétique d'organismes comme les **BACTÉRIES**, de leur donner des capacités extraordinaires, dont ils se servent pour produire des carburants ou des médicaments. En analysant les mécanismes qui permettent à la vie de s'épanouir, la science nous aide à prolonger nos vies.

GÉNÉTIQUE

ENZYME

Type de protéines qui tiennent le rôle de catalyseur biologique, accélérant les réactions chimiques sans s'en trouver transformées elles-mêmes.

ALLÈLE

Variante d'un gène. Une copie de gène est héritée de chacun des parents. Si ce ne sont pas les mêmes allèles et que l'un est « dominant », c'est lui qui sera manifesté, par exemple les yeux marron plutôt que bleus. C'est la même chose pour le risque de maladies ou d'allergies héritées.

PROTÉINES

Grandes molécules faites d'acides aminés, accomplissant de nombreuses fonctions cruciales. Essentielles pour la structure, la fonction et la régulation des organes et des tissus du corps humain.

GÈNE

Unité fondamentale de l'hérédité passée de parent à enfant, comprenant des sections d'ADN qui fournissent aux cellules les instructions d'un caractère physique ou d'une fonction.

ACIDES AMINÉS

Petites briques qui forment les protéines. On en trouve de vingt types différents dans le corps humain.

RIBOSOMES

Trouvés dans toutes les cellules, ils assemblent les acides aminés pour former des protéines à partir du code d'un ARN spécifique, appelé ARN-messager.

ADN

Acide désoxyribonucléique, molécule contenant les instructions pour la production de protéines dans un organisme. Chaque molécule est en double hélice.

ROSALIND FRANKLIN

Chimiste anglaise (1920–58) ayant obtenu des images précises de l'ADN aux rayons X qui ont contribué à la découverte de sa structure en double hélice.

JAMES WATSON ET FRANCIS CRICK

Scientifiques qui ont déterminé la structure en double hélice de l'ADN en 1953. Ils ont partagé le prix Nobel de médecine avec leur collègue Maurice Wilkins.

BIOLOGIE

MUTATION

Changement dans le code génétique d'un organisme, par erreur lors de sa copie ou provoqué par des facteurs environnementaux.

ÉVOLUTION DIRIGÉE

Effectuer des changements répétés dans le code ADN qui donne une protéine, afin d'en modifier une propriété ciblée.

SÉQUENÇAGE

Mécanisme de détermination de l'ordre des bases dans les molécules d'ADN. Contribue à la recherche biologique et au diagnostic médical.

GÉNOME

Code génétique complet ou ensemble d'instructions ADN qui contient toute l'information génétique d'un organisme.

PAIRE DE BASES

Chaque brin de l'ADN est formé de petites molécules, les bases, qui s'apparient pour lier ensemble les deux brins.

CELLULE

Bloc fondamental du vivant, plus petit organisme capable de vie autonome. Composée d'une membrane, d'un noyau et de cytoplasme, le plus souvent.

BACTÉRIES

Organismes microscopiques, simples ou unicellulaires, qu'on trouve partout sur terre et dans les autres organismes. Elles peuvent être bénéfiques ou nuisibles pour l'humain.

EUCARYOTES

Organismes complexes (pas unicellulaires) faits de cellules contenant un noyau et entourés d'une membrane. Les humains et les plantes sont des eucaryotes.

ARCHÉES

Organismes unicellulaires primitifs, sans noyau ; semblables aux bactéries, mais avec des différences caractéristiques.

PHOTOSYTHÈSE

Mécanisme de la croissance des plantes. L'énergie solaire est absorbée par un pigment puis employée pour mélanger l'eau et le dioxyde de carbone afin de former du glucose et de l'oxygène.

TAXONOMIE

Système inventé par Carl von Linné pour classer les organismes vivants en catégories, qui se subdivisent ensuite en groupes de plus en plus petits.

La taxonomie peut-elle tous nous relier ?

→ Bien nommer les choses est un excellent moyen de comprendre ce qui les unit. C'est ce qui fait de la taxonomie, la science du nommage, de la description et de la classification des organismes, un élément important de la compréhension du vivant.



Si vous aimez les choses vivantes et que vous aimez les organiser, vous allez adorer la taxonomie autant que

Carl von Linné. Au XVIII^e siècle, ce biologiste suédois qui allait devenir le « père de la taxonomie moderne » a en effet inventé le premier système de classification des organismes. Il divisait le vivant en catégories de plus en plus petites, comme si on zoomait pour passer d'un pays à une ville, puis à une rue, une maison et finalement un individu unique.

Il a aussi créé un système pour nommer les organismes, qui consiste en l'emploi de deux mots latins donnant le genre et l'espèce. Les humains, par exemple, sont des *Homo sapiens*. Il a employé ce système pour nommer plus de 12 000 espèces de plantes et d'animaux, et sa méthode est encore en vigueur.

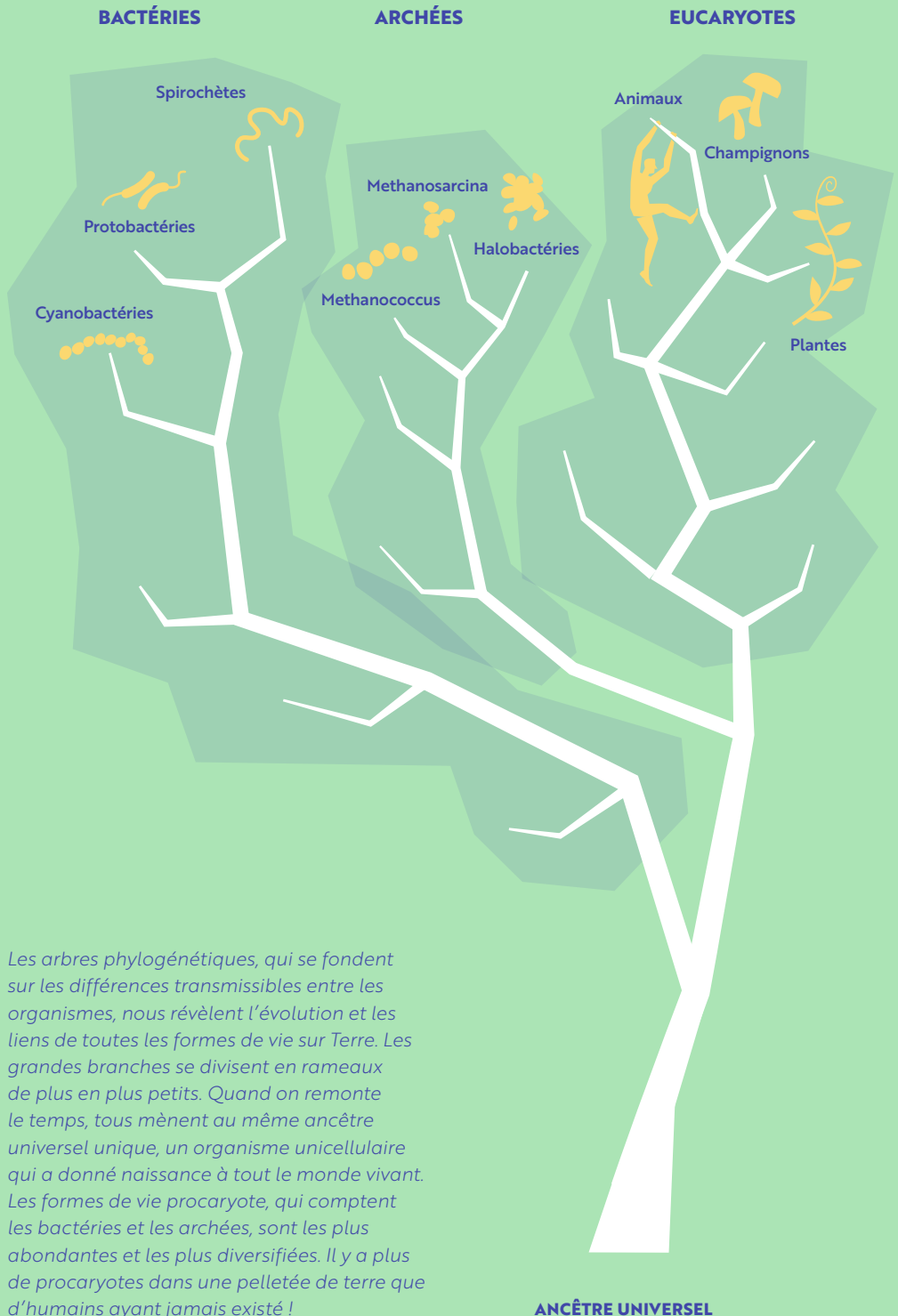
Avec le temps, les savants ont avancé dans leur connaissance du monde naturel et développé de nouvelles méthodes d'étude. Les idées originelles de Linné ont été affinées. Tout le monde vivant se divise à présent en domaines, règnes, embranchements, classes, ordres, familles,

genres et espèces. En 1977, le microbiologiste américain Carl Woese a inventé la technique de taxonomie phylogénétique, qui s'appuie sur les différences génétiques pour classer les organismes entre eux.

Le résultat de ces travaux est que l'opinion dominante divise de nos jours le monde vivant en trois domaines : eucaryotes, bactéries et archées. C'est Woese qui a identifié et classifié les archées, un type d'organisme unicellulaire primitif. Les bactéries aussi sont unicellulaires, mais les eucaryotes, parmi lesquelles on compte les plantes et les humains, sont plus complexes : leurs cellules ont des noyaux et sont entourées d'une membrane.

Il est plus facile aujourd'hui d'isoler et d'étudier le matériel génétique, en particulier l'ADN, si bien que les scientifiques modifient en permanence la classification des organismes. Le panda roux, par exemple, fait maintenant partie de la famille des ratons, tandis que le panda géant appartient à la famille des ours. L'arbre phylogénétique de la vie devient tous les jours de plus en plus intéressant !

ARBRE DE VIE



Les arbres phylogénétiques, qui se fondent sur les différences transmissibles entre les organismes, nous révèlent l'évolution et les liens de toutes les formes de vie sur Terre. Les grandes branches se divisent en rameaux de plus en plus petits. Quand on remonte le temps, tous mènent au même ancêtre universel unique, un organisme unicellulaire qui a donné naissance à tout le monde vivant. Les formes de vie procaryote, qui comptent les bactéries et les archées, sont les plus abondantes et les plus diversifiées. Il y a plus de procaryotes dans une pelletée de terre que d'humains ayant jamais existé !

Comment la photosynthèse nourrit-elle la planète ?

—> Un rayon de lumière, un souffle d'air, une goutte d'eau, voilà les ingrédients de la photosynthèse, une série de réactions chimiques qui alimente toute vie sur Terre depuis des milliards d'années.



On pensait autrefois que les plantes grandissaient en transformant la terre en tiges et en feuilles. Au XVII^e siècle, Jean-Baptiste van Helmont a réalisé une célèbre expérience pour infirmer cette idée. Il a pesé avec soin un jeune saule, puis un peu de terre, avant de les réunir dans un pot. Pendant cinq longues années, il a arrosé et observé son arbre grandir, s'assurant que rien ne venait se mêler à la terre. Enfin, il a sorti l'arbre de son pot, l'a séparé de la terre et les a pesés de nouveau. L'arbre était devenu bien plus lourd, mais la terre n'avait presque pas changé de poids.

La raison, c'est que l'arbre avait construit ses branches, ses racines et ses feuilles à partir de l'air et de l'eau selon un procédé appelé la photosynthèse, le mécanisme chimique peut-être le plus important de la planète.

À l'aide d'un pigment, la chlorophylle, les plantes absorbent la lumière rouge et canalisent son énergie dans des réactions qui mélangent l'eau au dioxyde de carbone de l'air. Cela produit une molécule circulaire appelée glucose, le sucre principal de votre

sang, ainsi que de l'oxygène qui, lui, est relâché dans l'air. La plante emploie le glucose comme brique de base pour former toutes sortes de glucides, dont la cellulose et l'amidon. La cellulose est un polymère rigide qui renforce les membranes des cellules végétales et aide la plante à grandir. L'amidon agit comme une pile, elle emmagasine l'énergie solaire dans ses liaisons chimiques. Quand nous mangeons une plante ou un animal qui s'en nourrit, nous absorbons du carbone et gagnons de l'énergie d'abord capturés grâce à la photosynthèse.

L'oxygène qu'elle libère est bien utile aussi. Chacune de nos respirations en absorbe, nous l'utilisons pour décomposer la nourriture et libérer son énergie. Sans la photosynthèse, nous serions cuits.

Même les carburants fossiles lui doivent leur énergie. Quand des plantes mortes sont écrasées et chauffées très longtemps sous des couches de roche, elles forment le charbon. Brûler ce charbon libère l'énergie solaire que ces plantes avaient capturée il y a des millions d'années.



ESSENCE DE PLANTES

Partout dans le monde, la photosynthèse convertit environ 200 milliards de tonnes de dioxyde de carbone en sucres tous les ans, soit plus de 6 000 tonnes par seconde, assez pour remplir un ballon plus gros que la pyramide de Khéops en Égypte.



La photosynthèse récolte de grosses quantités de lumière solaire. En deux minutes, elle rassemble la même quantité d'énergie que ce que transporte un pétrolier : 12 millions de milliards de joules.

Les cellules sont-elles la clé de la vie ?

→ Vous ne pourriez lire ces mots sans elles ! Tous les êtres vivants sont composés de cellules, sans exception. Votre corps en compte environ 40 000 milliards, et toutes contribuent à votre fonctionnement. Ce ne sont pas les clés de la vie, mais la vie même.



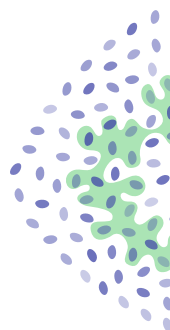
La cellule est l'unité structurelle et fonctionnelle de base de la vie. C'est un minuscule « sac », souvent trop petit pour être décelé à l'œil nu, si bien que les savants ont dû attendre l'invention du microscope avant de le découvrir. Le moment est venu en 1665, quand le savant anglais Robert Hooke a regardé dans un microscope et vu une cellule végétale. Il a raconté en détail son observation dans son livre *Micrographia* et a nommé cellule cette structure, car elle lui évoquait les chambres dans lesquelles vivaient les moines.

Peu de temps après, le Hollandais Antonie van Leeuwenhoek a développé une lentille de microscope plus puissante avec laquelle il a détecté d'autres minuscules entités, dont les enzymes et les spermatozoïdes.

Il devenait évident que des organismes unicellulaires existaient et que les autres, plus grands et plus complexes, étaient aussi faits de cellules. Cette idée a été formalisée en 1839 par Theodor Schwann et Matthias Schleiden, qui ont avancé que les cellules étaient les

unités fondamentales des plantes comme des animaux, ce qu'on a appelé ensuite la théorie cellulaire. L'idée a encore été élargie en 1855 par Rudolf Virchow, qui a découvert que les cellules étaient toutes générées par d'autres cellules. Elles ne sortent jamais de nulle part.

Cela nous a menés à un casse-tête évolutionnaire. Si toute la vie sur Terre descend du même ancêtre unicellulaire initial, comment cette première cellule est-elle née ? Certains pensent que les petites molécules qui ont mené à la vie ont été produites près de sources chaudes dans l'océan, d'autres qu'elles ont été amenées sur Terre par des météorites. Tout ce que l'on sait, c'est que les premières cellules, donc la vie sur Terre, sont apparues il y a 3,8 milliards d'années. Depuis, une chaîne ininterrompue de cellules, de ce premier organisme unicellulaire jusqu'à nous, s'est formée, qui a donné toute la vie sur Terre.



BRIQUES DE VIE



Tous les êtres multicellulaires, les humains, les dinosaures, les poissons, les plantes sont (ou étaient, dans le cas des dinosaures) faits de nombreuses cellules différentes. Il y a des cellules musculaires, des cellules nerveuses, des cellules graisseuses. Chaque type de

cellules est spécialisé et accomplit une fonction particulière, et toutes s'assemblent pour créer un tout qui est bien plus que la somme de ses parties. En travaillant de concert, les cellules nous font vivre, penser, agir. Elles sont l'essence de la vie.

Que trouve-t-on dans l'ADN ?

→ La double hélice de l'ADN porte le code secret de la vie, écrit en langage chimique. Il compte trois milliards de lettres qui forment la série des recettes pour produire les molécules de notre corps.



Les instructions qui permettent de créer une créature vivante sont contenues dans ses gènes. Les scientifiques ont étudié la génétique pendant des décennies avant de savoir de quoi les gènes étaient faits. Dans les années 1940, de nombreuses preuves indiquaient que l'information génétique était stockée dans une molécule, l'acide désoxyribonucléique ou ADN. Mais on ne savait toujours pas à quoi cette molécule ressemblait.

En 1953, James Watson et Francis Crick ont résolu le problème en s'appuyant sur le travail de nombreux autres scientifiques, surtout celui de Rosalind Franklin, qui avait rassemblé toutes les données importantes. En étudiant le schéma de dispersion de rayons X filtrés par un cristal d'ADN, ils ont réalisé que deux longs brins d'ADN s'enroulaient l'un sur l'autre pour former une double hélice.

Chaque brin porte une série de petites molécules, adénine (A), guanine (G), thymine (T) et cytosine (C), qu'on appelle les bases. Ces bases s'apparient pour coller entre eux les deux brins d'ADN. Le T s'accroche au A, le C au G. Cette découverte nous a permis de comprendre le fonctionnement de l'ADN.

Si on considère les bases de l'ADN comme des lettres, les gènes sont les longues phrases qu'elles forment. Leur travail est de stocker la recette de fabrication des protéines, qui remplissent de nombreuses tâches biochimiques dans nos organismes. Les protéines sont faites de centaines de petites briques, les acides aminés, de vingt variétés différentes.

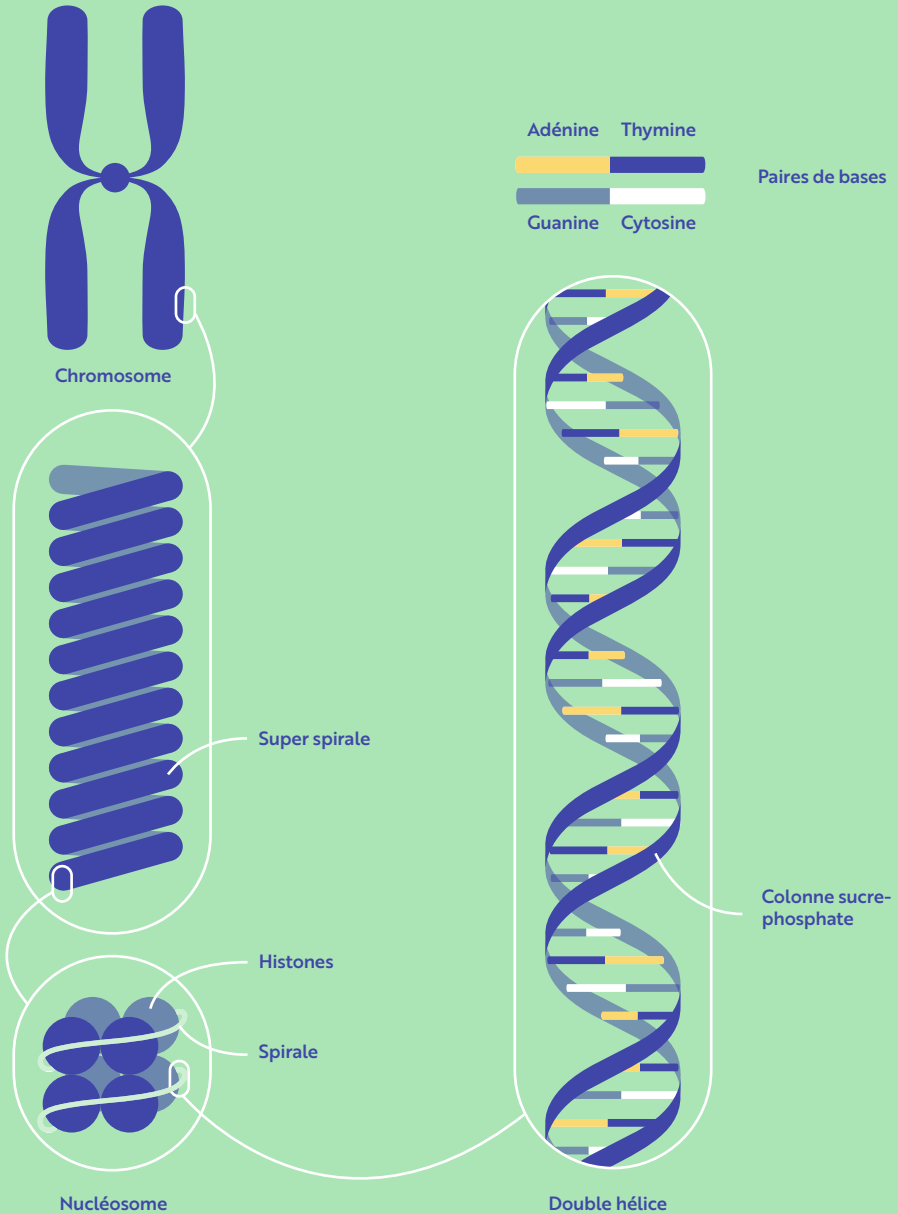
La séquence des bases de l'ADN dit au corps quels acides aminés doivent être assemblés pour chaque protéine. Voici comment. Une protéine spéciale appelée enzyme (page 98) déroule la double hélice, pour que son code puisse être copié et apporté à une petite usine biologique appelée ribosome. Le ribosome lit le code et construit la protéine correspondante, acide aminé par acide aminé.

Si le code ADN contient une erreur, la mauvaise base au mauvais endroit, cela peut parfois augmenter le risque de cancer, de diabète et autres maladies. La recherche médicale se sert souvent d'une technique appelée le séquençage pour lire le code génétique afin de diagnostiquer des maladies et comprendre leurs causes.

STRUCTURE DE L'ADN

L'ADN humain transporte 3 milliards de paires de bases environ, mais seuls quelques pourcents servent à former nos 21 000 gènes. Si vous étirez la molécule d'ADN d'une de vos cellules en ligne droite, elle mesurera deux mètres de long. Pour rentrer dans sa cellule, elle est disposée avec précautions autour de

protéines d'échafaudage appelées histones, puis enroulée et réenroulée afin de former des structures appelées chromosomes. Chez l'humain, chaque noyau de cellule abrite 46 chromosomes, qui mesurent chacun six micromètres de large, deux cents fois moins qu'un grain de sable.



Comment séquencer un gène ?

→ Si vous êtes généticien, la réponse est « facilement ». C'est aujourd'hui assez simple et peu cher de séquencer ou de décoder l'ADN des cellules. Cela aide les scientifiques à mieux comprendre le développement de la vie et des maladies, et à inventer des thérapies nouvelles.



Les gènes sont de petites sections de l'ADN. Les humains en ont environ 21 000 différents. Les drosophiles autour de 14 000, et le riz 51 000. Chaque gène confère à la cellule qui l'abrite un ensemble d'instructions pour construire une molécule utile, comme une protéine. Pris ensemble, ils influencent tout, de la couleur des cheveux à la taille, des maladies possibles à la personnalité.

Au XIX^e siècle, en étudiant des pois, le moine augustin Gregor Mendel s'est rendu compte que leurs caractères, dont la couleur de leur fleur et la forme de leur graine, étaient déterminés par des « facteurs d'hérédité » transmis d'une génération à la suivante. Nous savons maintenant que ces facteurs sont des gènes et que ses pois héritaient de différentes versions de ces gènes particuliers, ce qu'on appelle des allèles. Si un allèle est dominant, une seule copie suffit pour être exprimée. S'il est récessif, il en faudra deux.

Les gènes n'ont été mieux connus qu'après la découverte de l'ADN et le déchiffrement

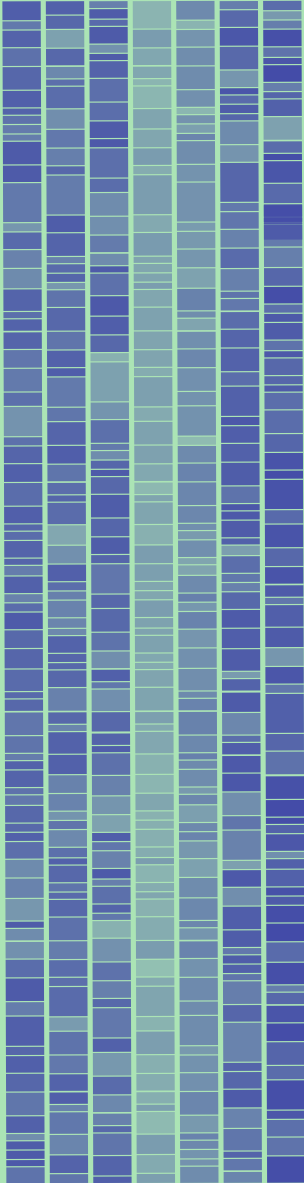
de sa structure. En 1952, Rosalind Franklin et Raymond Gosling ont pris des photographies aux rayons X de l'ADN qui ont poussé James Watson et Francis Crick à proposer une structure d'échelle en spirale ou de double hélice pour cette molécule.

Les « barreaux » de l'échelle sont faits de paires de molécules appelées nucléotides, qui n'existent qu'en quatre versions différentes, si bien que le code génétique complet d'un organisme, son « génome », peut compter des milliards de ces nucléotides.

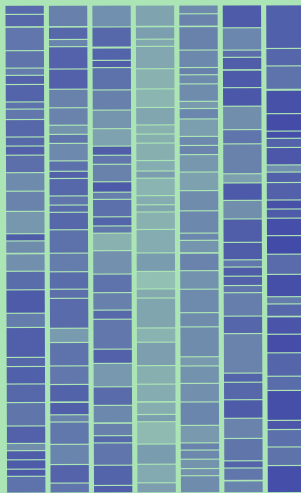
Les gènes eux-mêmes ne sont pas tous de la même taille, allant de quelques milliers à des millions de paires de nucléotides. Quant à la séquence génétique, c'est l'ordre de ces nucléotides. De nos jours, vous pouvez gratter l'intérieur de votre joue et envoyer cet échantillon à un laboratoire pour qu'il détermine vos allèles spécifiques pour chaque gène clé de votre code. Cela vous donnera des indications sur vos origines ainsi que vos risques de développer certaines maladies.

SÉQUENÇAGE

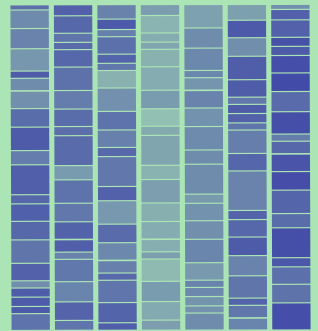
Le séquençage de l'ADN est la méthode employée pour déterminer l'ordre, la « séquence », des nucléotides. Elle est devenue plus rapide et moins chère avec le temps et de nos jours les méthodes de « séquençage haut débit » permettent d'obtenir non seulement la séquence d'un gène, mais celle de tout le génome en moins d'un jour. Comparer le génome complet d'organismes différents révèle de surprenantes informations. Le riz, par exemple, a 30 000 gènes de plus que nous !



RIZ
~ 51 000 gènes



HUMAINS
~ 21 000 gènes



DROSOPHILES
~ 14 000 gènes

Comment faire évoluer une enzyme ?

→ Les enzymes sont les catalyseurs de la nature, elles accélèrent les réactions chimiques vitales dans nos corps. On sait de nos jours les faire évoluer en laboratoire, leur faire produire des médicaments ou des carburants, ou autres tâches très utiles.



Une enzyme est un genre particulier de protéine qui accélère les réactions chimiques. Ce sont des catalyseurs biologiques.

Contrairement à nos catalyseurs artificiels, les enzymes n'ont pas besoin de beaucoup de chaleur ni de pression. Avec elles, les réactions peuvent aller des milliards de fois plus vite. Les mécanismes les plus essentiels à la vie, tels que la digestion ou la contraction des muscles, dépendent tous des enzymes.

Comme toutes les protéines, elles sont faites de centaines de briques d'acides aminés. Notre corps en compte des milliers de types différents, chacun avec sa fonction. Elles travaillent souvent en équipe afin de réaliser une série de réactions chimiques, comme dans le cas de la production d'énergie à partir des glucides. Ces réactions se déroulent dans une partie spécifique de l'enzyme qu'on appelle son site actif. De nombreux médicaments visent à bloquer le site actif d'une enzyme afin de réduire une activité biologique indésirable.

Si une erreur se loge dans l'ADN codant une enzyme, le mauvais acide aminé se retrouve parfois dans le site actif, ce qui peut

diminuer l'efficacité de l'enzyme, mais aussi la transformer en un meilleur catalyste, ou changer la réaction censée y être catalysée.

Les scientifiques ont appris comment accélérer cette « évolution des enzymes » en tubes à essai, afin de leur conférer ces capacités décuplées. L'Américaine Frances Arnold a ainsi partagé le prix Nobel 2018 en chimie pour avoir été pionnière dans cette approche appelée « évolution dirigée ».

Elle a d'abord introduit des erreurs aléatoires dans l'ADN codant une enzyme en particulier. Ensuite, elle a injecté cet ADN dans une bactérie bien utile, qui s'est mise à produire plein d'exemplaires de cette enzyme mutée. Après avoir testé leur efficacité, les gagnantes sont désignées pour un deuxième tour de mutation et de tests, puis un troisième et un quatrième, etc., jusqu'à ce qu'émerge l'enzyme championne.

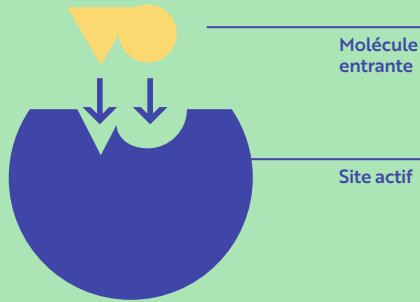
Cette stratégie a permis de dompter le pouvoir des enzymes pour des applications diverses. Des enzymes dans les détergents rendent votre linge plus blanc que blanc, d'autres fabriquent des médicaments ou transforment la tige de plantes en carburant.

LE POUVOIR DES ENZYMES

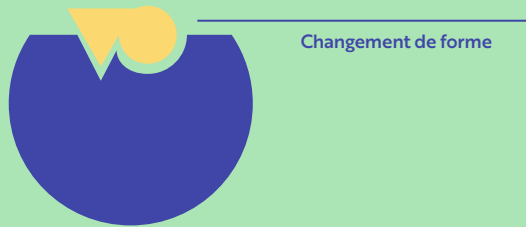
Les enzymes sont d'une forme spécifique et présentent un petit réacteur chimique sur leur surface. Ce « site actif » est tapissé de groupes chimiques, tous dans la bonne position pour attraper les petites molécules et les convertir en autre chose. On a d'abord pensé que la molécule entrante

(le « substrat ») se logeait dans le site actif comme une clé dans une serrure. C'est vrai jusqu'à un certain point, mais certaines enzymes flexibles peuvent aussi adapter leur forme et venir enrober la molécule au besoin. Elles se modifient pour adopter la forme idéale pour un rôle donné.

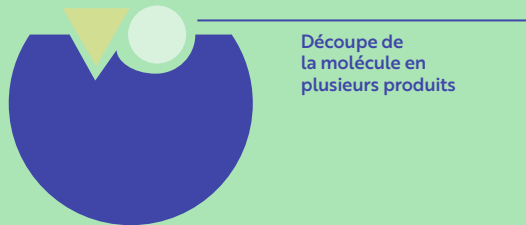
La molécule entre dans le site actif de l'enzyme.



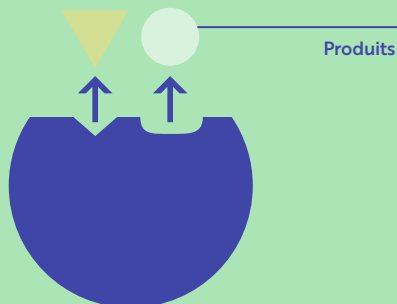
L'enzyme se lie à la molécule.



L'enzyme déclenche une réaction.



Les produits quittent le site actif de l'enzyme.



IMMUNITÉ

ÉPIDÉMIOLOGIE

RÉSISTANCE

MICROBES

CHAPITRE 6

PÉNICILLINE

SANTÉ

**ÉDITION
GÉNOMIQUE**

INTRODUCTION

Nos études des mécanismes de la vie ont transformé notre compréhension de la biologie et mené à des améliorations remarquables dans le domaine de la santé. En identifiant les causes des maladies, les scientifiques ont pu développer tout un arsenal de médicaments efficaces et trouver le moyen de prévenir les infections. Plus récemment, les chercheurs se sont attaqués aux maladies en modifiant les bases fondamentales de la vie, en reprogrammant les cellules et en éditant le code génétique.

L'un des moments fondateurs de la médecine préventive s'est déroulé au XIX^e siècle. Le docteur hongrois Ignaz Semmelweis a compris que si les médecins se lavaient les mains avant de traiter les patientes des maternités, ils éviteraient que ces femmes contractent des « fièvres puerpérales » souvent fatales.

Cela s'explique parce que de nombreuses maladies se transmettent d'une personne à l'autre via des **MICROBES**, bactéries ou virus (page 106). Nous les supprimons de nos jours à l'aide de processus comme la **PASTEURISATION** et la stérilisation, et nous administrons des vaccins pour stimuler notre **IMMUNITÉ** à ces microbes (page 108).

Toujours au XIX^e siècle, les savants se sont mis à étudier la transmission des maladies comme le choléra. C'est ce qui a mené au développement de l'**ÉPIDÉMIOLOGIE**, qui étudie l'occurrence des maladies au sein des populations (page 110). Elle fournit des informations vitales pour stopper la transmission d'infections comme celle au COVID-19. L'épidémiologie sert également à identifier les personnes les plus vulnérables pour une maladie particulière.

Se laver à l'eau et au savon est souvent suffisant pour éliminer les bactéries qui rôdent sur une surface, mais ces microbes deviennent bien plus difficiles à supprimer une fois qu'ils ont proliféré dans le corps d'un patient. C'est pourquoi la découverte en 1928 de la **PÉNICILLINE**, un puissant antibiotique, a marqué un tournant dans le traitement des maladies. Pour la première fois, les médecins avaient un traitement véritablement efficace pour prévenir et guérir une très large gamme d'infections bactériennes (page 112).

Toutefois, les bactéries développent par évolution une **RÉSISTANCE** aux antibiotiques les plus fréquents. Cette antibiorésistance signifie qu'un nombre grandissant d'infections deviennent plus dures à traiter. Une course est lancée avec les chercheurs pour le développement de nouvelles molécules afin de la contrer.

Les maladies sont parfois dues à des défauts de nos organismes plutôt qu'à des microbes. La reprogrammation cellulaire permet alors de créer un tissu de remplacement, pour soigner par exemple la maladie de Parkinson. Cela implique de ramener des cellules saines à un état antérieur, celui de **CELLULES SOUCHES**, pour les pousser à former ensuite le tissu que la maladie atteint (page 114).

Une autre technique, l'**ÉDITION GÉNOMIQUE**, pourrait permettre aux médecins de remédier à des problèmes au sein même de notre code ADN (page 116). C'est déjà employé expérimentalement chez des patients pour désactiver les gènes impliqués dans des maladies génétiques, comme l'anémie falciforme. Encore un exemple qui montre que les avancées en biologie façonnent notre santé à une vitesse folle.

MALADIE

FLORENCE NIGHTINGALE

Infirmière, réformatrice et statisticienne (1820–1910), fondatrice des soins modernes ; elle a établi l'importance primordiale de l'hygiène à l'hôpital.

ÉPIDÉMIOLOGIE

Étude de la fréquence des maladies dans les populations et de leurs causes.

PANDÉMIE

Poussée rapide d'une maladie infectieuse (épidémie) dans une vaste zone géographique.

MICROBE

Microorganisme, tel que bactérie, virus, champignon ou protozoaire, qui provoque des maladies.

PASTEURISATION

Processus pour éliminer les microbes des aliments et des boissons à l'aide de chaleur ; nommé d'après le scientifique français Louis Pasteur.

IMMUNITÉ

Capacité d'un organisme à résister aux maladies et aux substances externes, microbes et toxines. Peut être innée ou acquise.

ANTIGÈNE

Substance qui incite le système immunitaire à produire des anticorps contre lui, pour minimiser ou prévenir une maladie ou une réaction allergique.

ANTICORPS

Protéine protectrice produite par le système immunitaire pour supprimer les antigènes. Aussi appelé immunoglobuline.

MÉDICAMENT

PÉNICILLINE

Première substance antibiotique efficace connue, découverte par Alexander Fleming en 1928.

RÉSISTANCE

Quand la bactérie ou le champignon qui provoque une infection ne répond plus aux traitements médicamenteux destinés à l'éliminer.

REPROGRAMMATION CELLULAIRE

Processus consistant à transformer des cellules matures en cellules souches, qu'on incite ensuite à se développer en les cellules de notre choix.

CELLULES SOUCHES

Type intermédiaire et versatile de cellules qui peuvent se développer en de nombreux types différents de cellules spécialisées.

LIGNÉE GERMINALE

Population de cellules reproductrices qui transmettent leur génome à la génération suivante.

ÉDITION GÉNOMIQUE

Technologie de modification génétique des plantes et des animaux par altération de morceaux d'ADN et activation ou désactivation de gènes.

CLONAGE

Production d'une ou plusieurs copies génétiquement identiques d'une cellule ou d'un organisme.

THÉRAPIE GÉNIQUE

Qu'est-ce qu'un microbe ?

→ Tout organisme microscopique qui cause une infection est un « microbe », ce qui inclut donc bactéries, virus et champignons. Ils infectent les plantes comme les animaux et les maladies qu'ils provoquent vont des plus bénignes aux plus mortelles.



Au XIX^e siècle, il était encore dangereux d'enfanter. Quand le docteur hongrois Ignaz Semmelweis travaillait dans une maternité autrichienne, bien des jeunes mères mouraient encore de « fièvre puerérale » après l'accouchement.

Semmelweis a remarqué que les mères soignées par des sages-femmes mouraient moins que celles surveillées par des médecins et des étudiants. La raison, dit-il, était que les médecins et les étudiants passaient de la dissection des corps aux accouchements sans se laver les mains, et qu'ils transmettaient ainsi, d'une manière ou d'une autre, la maladie. Les médecins se sont mis à se laver les mains régulièrement et le nombre de morts a décliné. C'était le début de la médecine préventive.

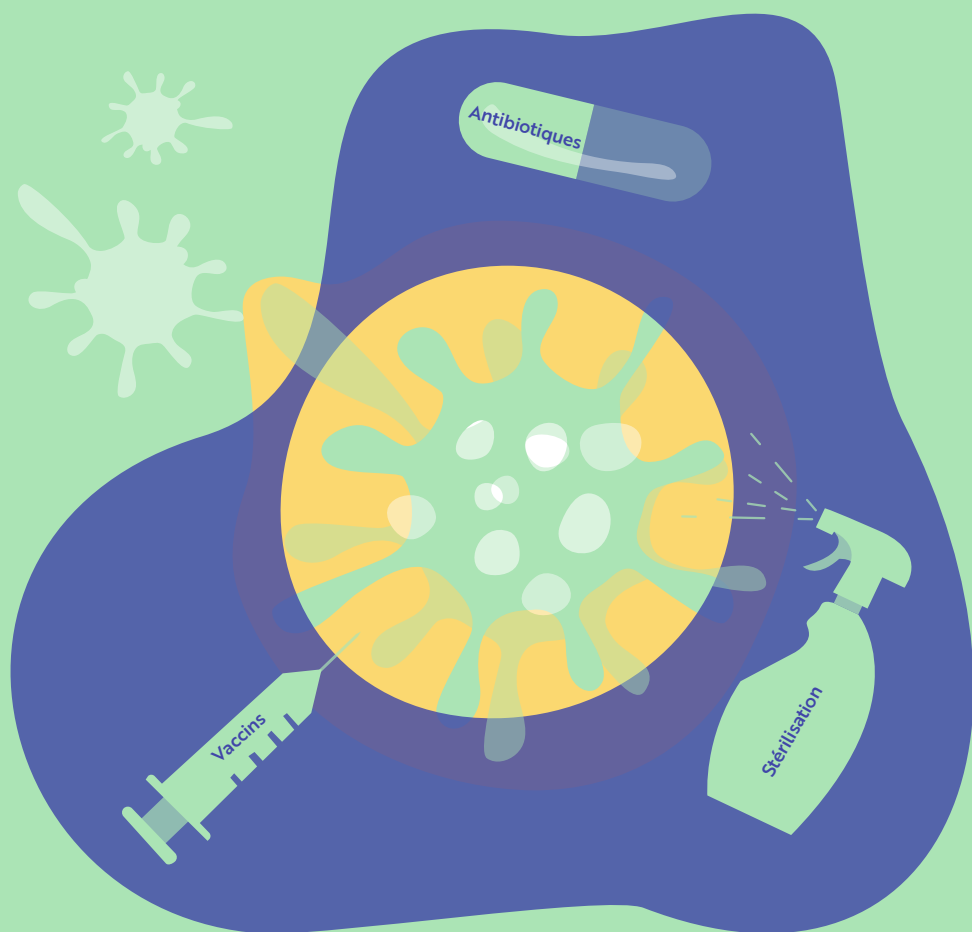
Quelques années plus tard, le Français Louis Pasteur a montré le premier que les microbes étaient la cause de maladies. Il a développé des vaccins contre la rage et la maladie du charbon, et inventé le mécanisme de la pasteurisation pour tuer les microbes. C'est cependant un scientifique allemand, Robert Koch, qui a le plus développé les idées de Pasteur. Koch a

découvert quelle bactérie était responsable de la maladie du charbon, de la tuberculose et du choléra. Les méthodes qu'il a employées pour cela ont permis à d'autres de découvrir encore plus de bactéries pathogènes.

La théorie microbienne — cette idée que les microbes provoquent des maladies — gagnait en influence. Dans les années 1870, le chirurgien britannique Joseph Lister l'a appliquée aux tables d'opération. Il a utilisé du phénol pour stériliser les instruments chirurgicaux, la peau du patient et les mains du chirurgien. Le nombre de complications post-opératoires a énormément chuté en conséquence.

La théorie microbienne est aujourd'hui largement acceptée. La stérilisation sauve des vies tous les jours. Des antiviraux allègent les symptômes et réduisent les épidémies. Les antibiotiques traitent les infections bactériennes (page 112), les vaccins renforcent notre immunité (page 108). Grâce à cette théorie, bien des maladies autrefois mortelles, contre lesquelles on ne pouvait rien, sont de nos jours facilement soignées et la santé mondiale ne s'est jamais aussi bien portée.

GUERRE AUX MICROBES



Avant la théorie microbienne, on pensait que les maladies étaient les conséquences d'un mauvais air ou de « miasmes ». On sait à présent qu'elles sont souvent causées par des « microbes », sous forme de bactéries, de champignons et autres créatures microscopiques. La guerre contre les microbes est déclarée. Notre artillerie consiste en la stérilisation, les vaccins et les antibiotiques. Toutefois, les microbes évoluent et nos traitements doivent évoluer aussi. C'est pourquoi de nouveaux vaccins et de nouveaux médicaments sont développés en permanence.

Les vaccins sont-ils la seule voie de l'immunité ?

→ Non. Il existe différents types d'immunité, différentes voies pour l'atteindre. Mais les vaccins, qui fonctionnent en imitant une infection, sont une bonne option, car ils nous protègent d'une maladie avant même que nous l'ayons rencontrée.



Il y a trois types d'immunité. Nous naissons tous avec une immunité naturelle ou innée à un certain degré, qui nous confère un niveau de protection basique contre des substances dangereuses, microbes ou toxines. La peau, par exemple, est une partie de ce système : elle agit comme une barrière contre les microbes.

L'immunité passive, elle, est acquise tout au long de la vie. On « l'emprunte » à une source extérieure et elle ne dure qu'un temps. Les protéines contenues dans le lait maternel, par exemple, confèrent au bébé une immunité temporaire contre les maladies que la mère a rencontrées.

L'immunité active est elle aussi acquise, mais elle dure plus longtemps. Elle se produit spontanément en cas d'exposition à un organisme pathogène (qui provoque des maladies) et implique de nombreux types de cellules. Les phagocytes, par exemple, avalent et détruisent les pathogènes, tandis que les lymphocytes aident le corps à se souvenir des précédents envahisseurs et à les reconnaître. Ils y parviennent en produisant des anticorps qui reconnaissent des protéines présentes à

la surface des pathogènes, les antigènes. Cela prend du temps néanmoins, et nous pouvons tomber malades dans l'intervalle.

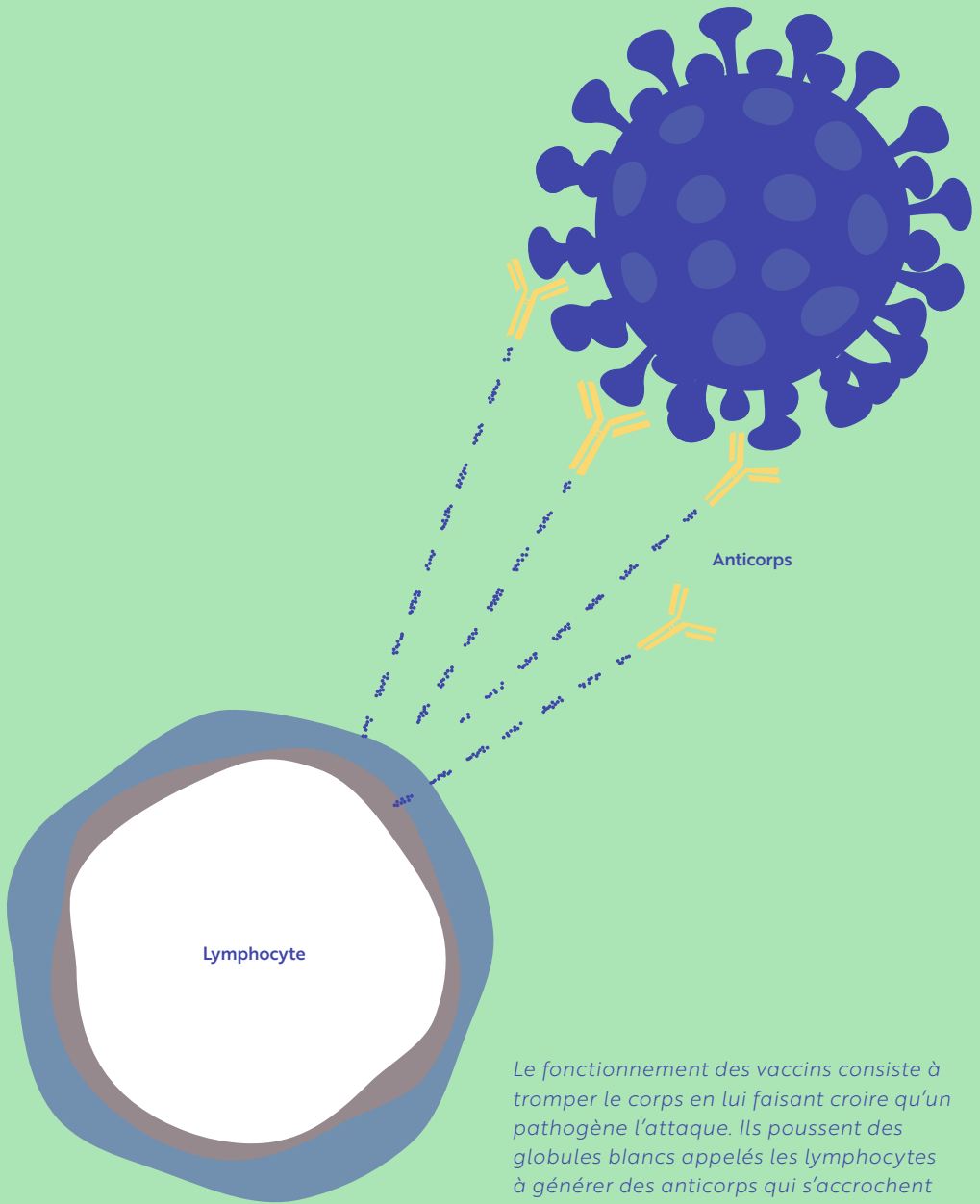
Les vaccins aussi créent une immunité active. Ils trompent le système immunitaire, le persuadent qu'il est attaqué par un pathogène, afin que le corps génère son immunité sans être atteint de la maladie.

Edward Jenner est le célèbre inventeur d'un vaccin contre la variole en 1796. Son vaccin utilisait un virus vivant, semblable à celui de la variole, pour produire l'immunité, mais les vaccins actuels tendent à fonctionner à l'aide de versions inactives ou atténuées des pathogènes. Le premier vaccin approuvé contre le COVID-19 était lui fait de morceaux de code génétique appelés ARN-messager, qui donne aux corps les instructions pour produire des protéines stimulant l'immunité.

Les vaccins sont l'un des plus grands succès de santé publique de l'histoire. Ils ont éradiqué la variole et contribué à maintenir la pandémie de COVID-19 sous contrôle dans les pays où ils sont largement distribués. On estime que les vaccins évitent environ 5 millions de morts chaque année.

MÉCANISME DES VACCINS

Pathogène (virus)



Le fonctionnement des vaccins consiste à tromper le corps en lui faisant croire qu'un pathogène l'attaque. Ils poussent des globules blancs appelés les lymphocytes à générer des anticorps qui s'accrochent au pathogène et le désignent aux autres cellules immunitaires afin qu'elles le détruisent. Certains vaccins produisent une immunité pendant des dizaines d'années, d'autres une immunité plus courte, de quelques années ou quelques mois. C'est pourquoi le vaccin contre la COVID-19, par exemple, doit être renouvelé régulièrement.

L'épidémiologie est-elle mauvaise pour la santé ?

→ L'épidémiologie est l'étude de la fréquence et des causes des maladies au sein des populations. C'est bon pour la santé parce qu'elle aide les chercheurs à identifier les causes des maladies, et le meilleur moyen de les prévenir ou de les contrôler.



Florence Nightingale est connue pour ses talents d'infirmière, mais elle était aussi une fameuse statisticienne. Alors qu'elle travaillait dans un hôpital militaire turc rempli de malades durant la guerre de Crimée (1853–56), elle a tenu le compte des morts et a pu prouver que les soldats mouraient davantage des maladies attrapées à l'hôpital que de leurs blessures de guerre. Une fois des mesures d'hygiène mises en place, elle a pu prouver que le taux de mortalité baissait. C'était le début de l'épidémiologie moderne, qui emploie des méthodes statistiques pour améliorer la santé publique.

À la même époque, le médecin anglais John Snow adoptait la même approche lors d'une épidémie de choléra à Soho, un quartier de Londres. En plaçant tous les cas répertoriés sur une carte, il a montré que la maladie émanait d'une pompe à eau de Broad Street. La poignée de la pompe a été ôtée, le nombre de cas a chuté. Les bases de l'épidémiologie scientifique étaient posées.

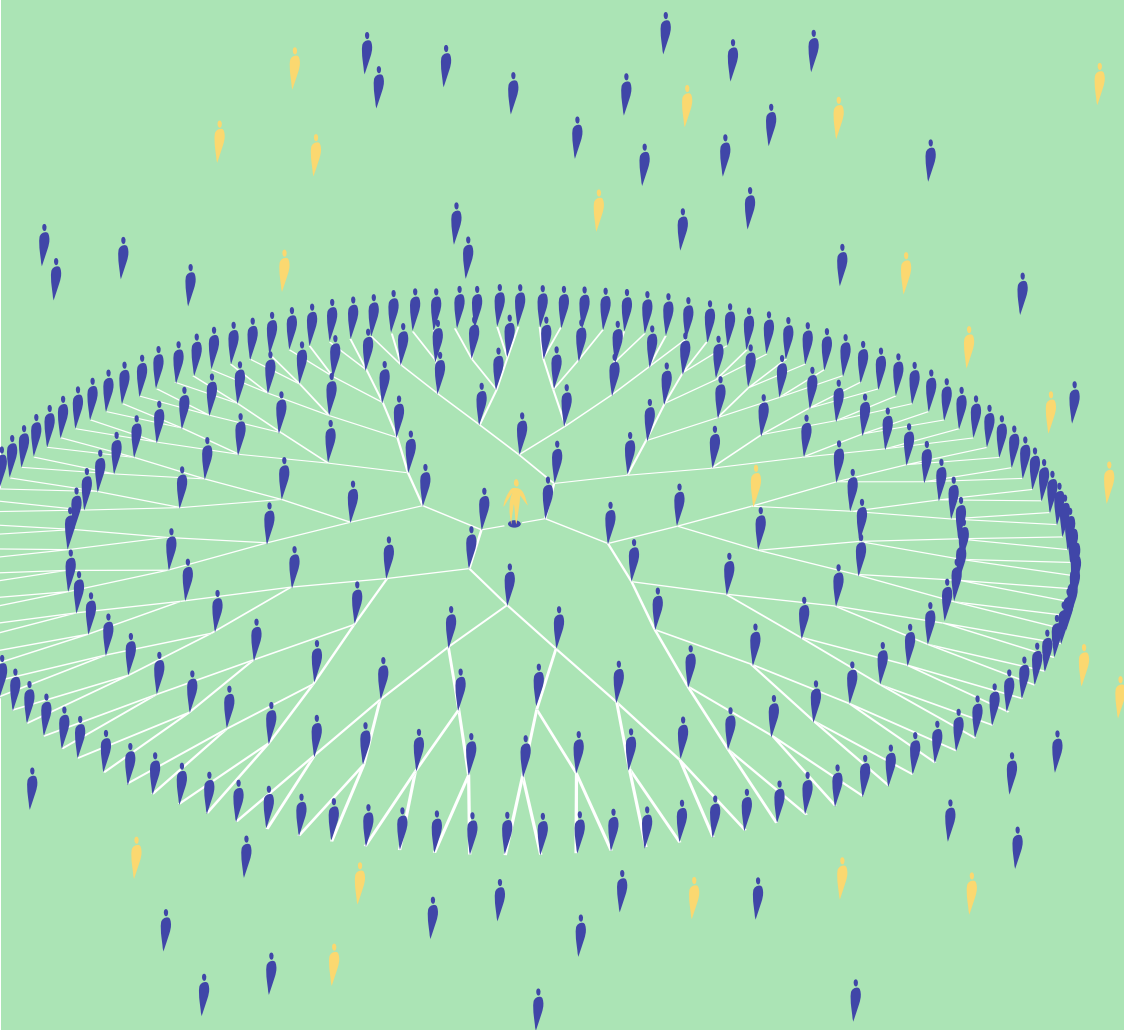
Aujourd'hui, elle a agrandi ses horizons et ne s'intéresse plus seulement aux

maladies infectieuses, mais à toutes les maladies. Par exemple, des études du génome qui comparent l'ADN de populations saines et de populations malades ont pu identifier les prédispositions génétiques pour le développement de certains cancers, de maladies cardiovasculaires ou de diabète. De bons algorithmes et une puissance de calcul énorme permettent aujourd'hui aux chercheurs d'analyser des ensembles de données gigantesques, les big data, ce qui a placé l'épidémiologie en première ligne de la lutte contre la pandémie de COVID-19.

Les vagues du coronavirus vont et viennent et les études épidémiologiques ont prouvé les bénéfices des vaccins, de la distanciation sociale et autres, comme elles aident les chercheurs à anticiper l'impact des nouveaux variants. De même, les études modélisant la propagation du virus et l'analyse des données de contamination et de décès sont encore au centre des prises de décision politiques partout dans le monde.



NOMBRE DE REPRODUCTION DE BASE



Le nombre de reproduction de base, R_0 , est un concept fondamental de l'épidémiologie. On l'utilise pour décrire l'intensité d'une propagation épidémique. C'est le nombre de cas qu'une personne infectée provoquera en moyenne. Si une épidémie a un R_0 de deux, par exemple, cela signifie que chaque personne infectée en infectera deux de plus, qui à leur tour en infecteront deux, etc. Cela montre comment un tout petit nombre d'infections peut rapidement se transformer en raz-de-marée.

Quand un médicament ne marche-t-il plus ?

→ C'est mauvais signe. Les bactéries finissent par résister aux antibiotiques qu'on emploie contre elles ; ainsi, des infections autrefois bien soignées pourraient redevenir mortelles.



En 1928, le médecin écossais Alexander Fleming a mal nettoyé sa paillasse avant de partir en vacances.

Une négligence à laquelle nous devons beaucoup ! Quand il est revenu, il a remarqué que de la moisissure s'était répandue dans l'une des boîtes de Petri qu'il avait oublié de nettoyer, et que là où il y avait de la moisissure, il n'y avait plus de bactéries. Une substance les avait tuées, qu'il a d'abord appelée « jus de moisissure », puis pénicilline. Elle était efficace contre toutes les bactéries « Gram positives », dont font partie celles responsables de la maladie du charbon et de la pneumonie.

La pénicilline a dépassé toutes les attentes durant la Deuxième Guerre mondiale, où les soldats risquaient de voir leurs blessures de guerre s'infecter. Elle a réduit le taux de mortalité de 15 %. Depuis, les antibiotiques ont pavé la voie à la transplantation d'organes, la chimiothérapie, la césarienne et des centaines d'autres opérations devenues de routine grâce à la réduction drastique du risque d'infection. Elles ont sauvé des millions de vies et ajouté vingt ans à l'espérance de vie mondiale.

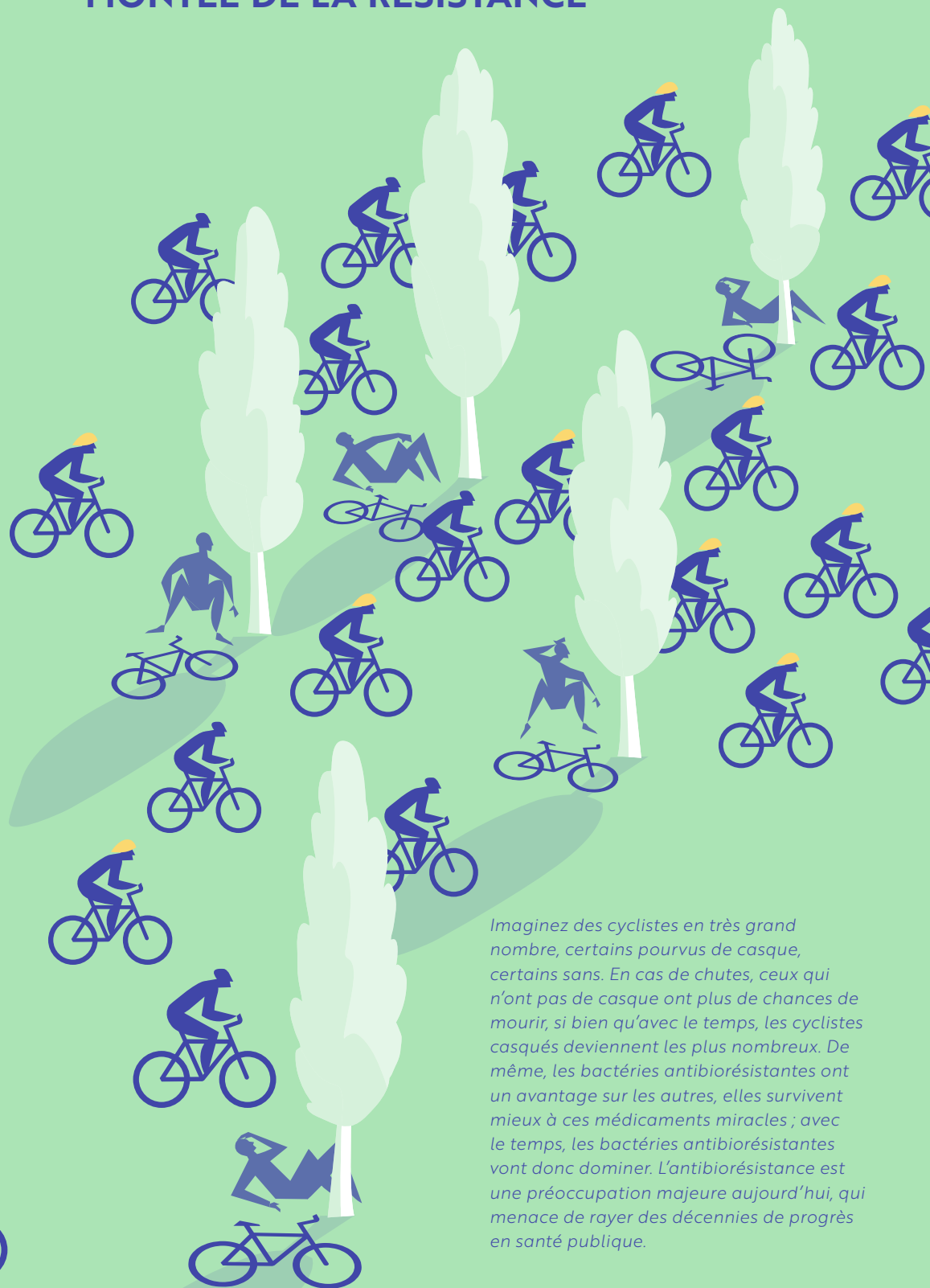
Mais, en 1945, lors de son discours d'acceptation du prix Nobel de médecine, Fleming a prédit la montée de la résistance. Ce n'est pas devenu un vrai problème avant les années 1990. Quand une infection devenait résistante à un antibiotique, on en employait un autre et voilà tout. Mais ce n'est plus le cas. Certaines bactéries, comme le staphylocoque doré résistant à la méthicilline, sont devenues aussi résistantes à plusieurs gammes d'antibiotiques.

Un nombre grandissant d'infections sont maintenant devenues plus difficiles à traiter. L'Organisation mondiale de la santé cite l'antibiorésistance comme l'une des menaces majeures pour la santé, l'alimentation, la sécurité et le développement, partout dans le monde. Les scientifiques estiment qu'en 2050 elle pourrait devenir responsable d'une dizaine de millions de morts par an.

Que faire ? Pendant que les chercheurs développent de nouveaux antibiotiques, nous devrions utiliser ceux que nous avons avec parcimonie, en agriculture et en médecine, afin de ralentir la montée de la résistance.



MONTÉE DE LA RÉSISTANCE



Imaginez des cyclistes en très grand nombre, certains pourvus de casque, certains sans. En cas de chutes, ceux qui n'ont pas de casque ont plus de chances de mourir, si bien qu'avec le temps, les cyclistes casqués deviennent les plus nombreux. De même, les bactéries antibiorésistantes ont un avantage sur les autres, elles survivent mieux à ces médicaments miracles ; avec le temps, les bactéries antibiorésistantes vont donc dominer. L'antibiorésistance est une préoccupation majeure aujourd'hui, qui menace de rayer des décennies de progrès en santé publique.

Comment reprogrammer une cellule ?

→ La reprogrammation cellulaire, c'est un peu comme revenir aux réglages d'usine pour un téléphone. Faire revenir des cellules matures à un état plus précoce offre de belles possibilités à la médecine régénérative, aux traitements de la fertilité et aux médicaments.



La reprogrammation cellulaire est la capacité des scientifiques à faire revenir des cellules spécialisées

matures, par exemple des cellules de peau, à un stade plus versatile de cellules intermédiaires, les cellules souches, qu'on pousse ensuite à se spécialiser comme on le désire.

On peut ainsi prendre un échantillon de peau à un patient atteint de la maladie de Parkinson ou d'insuffisance rénale et s'en servir pour produire du tissu nerveux ou rénal, qui servira à réparer l'organe endommagé. On peut employer la même technique pour produire des ovules en vue d'une fécondation in vitro en cas de problèmes de fertilité. Ou, comme ces cellules sont celles du patient, on peut s'en servir pour concevoir un traitement individualisé. Comment ça marche ?

Au début, la reprogrammation cellulaire fonctionnait par clonage. En 1962, le Britannique John Gurdon a montré chez le têtard que les cellules spécialisées de l'intestin pouvaient être reprogrammées en transférant de l'ADN dans un ovocyte sans noyau. La cellule ainsi

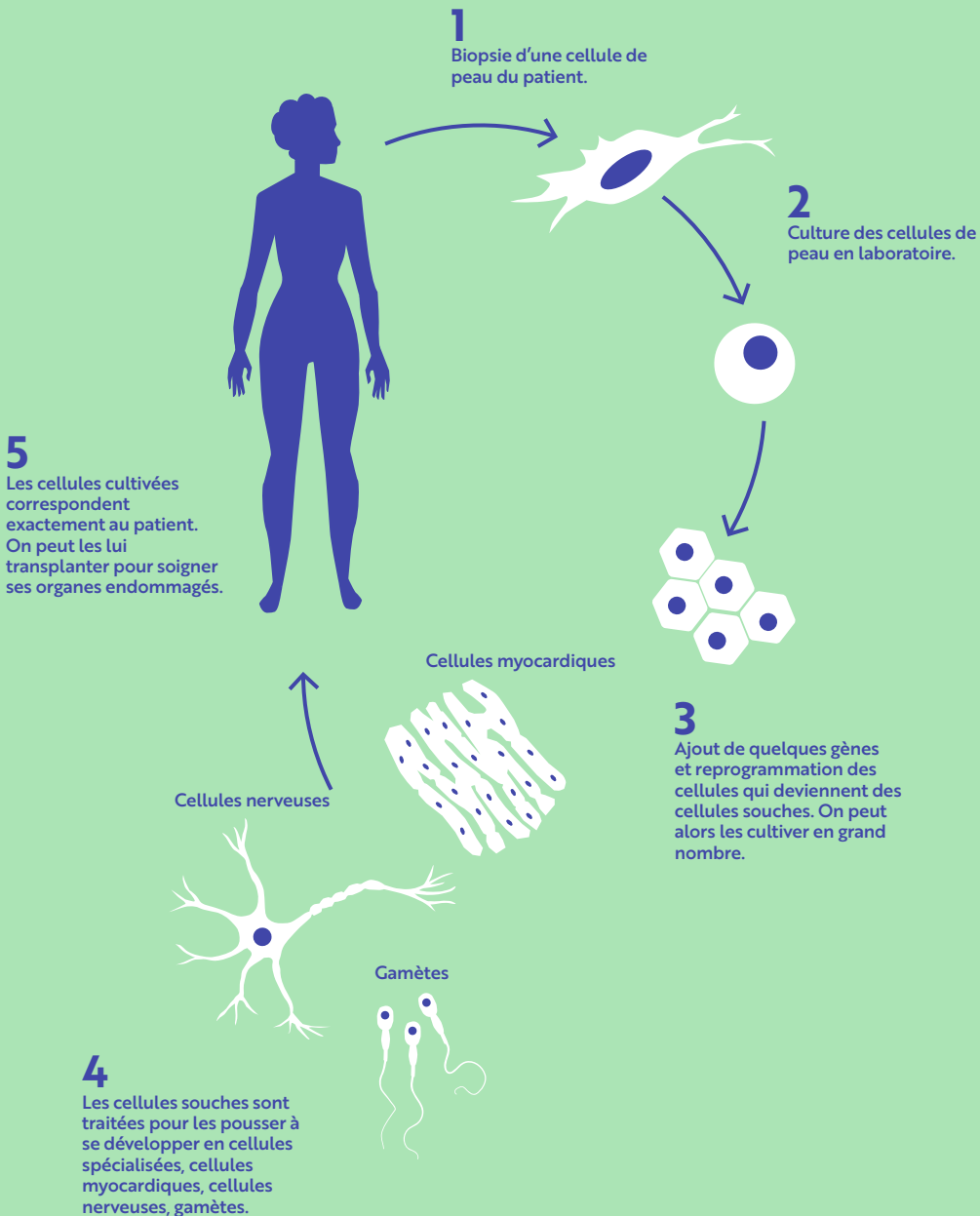
reconfigurée s'est divisée puis développée en têtard, clone de l'amphibien de départ.

Les scientifiques qui ont tenté des expériences semblables avec des cellules de mammifère ont réalisé que ces embryons clonés pouvaient être employés comme source de cellules souches pour la médecine régénérative. Mais ils se trouvaient face à un dilemme moral : en récoltant les cellules souches, ils détruisaient l'embryon.

Ce problème a été résolu en 2006 quand le biologiste japonais Shinya Yamanaka, lauréat du prix Nobel, a développé une méthode de culture de cellules souches sans embryon. Sa solution était d'ajouter quatre gènes clés à des cellules cultivées de peau de souris. Il les a appelées « cellules souches pluripotentes induites » ou CSPI, elles sont utilisées depuis pour générer des cellules de foie, de sang, de cœur capable de battre, même des cellules nerveuses. La méthode est encore en développement, les essais cliniques commencent à peine, mais les promesses sont grandes pour l'avenir de la médecine.

PROMESSES DE LA MÉDECINE RÉGÉNÉRATIVE

La reprogrammation cellulaire peut servir à générer des cellules pour soigner un organe ou ajuster un médicament.



L'édition génomique, c'est bien ou c'est mal ?

→ Des OGM aux traitements de maladies incurables, des bébés sur catalogue à la désextinction, les avancées de l'édition génomique sont toujours controversées. Alors, bien ou mal ? C'est à la société de le décider.



En 2012, les biologistes Jennifer Doudna et Emmanuelle Charpentier ont démontré comment un système moléculaire simple, CRISPR-Cas9, pouvait être employé pour sectionner l'ADN exactement comme on le voulait. On avait déjà modifié ou altéré des gènes avant, mais jamais avec ce degré de précision.

CRISPR-Cas9 est moins cher, plus facile et plus polyvalent que les méthodes précédentes. Il permet aux chercheurs d'ajouter, d'enlever ou d'altérer des séquences spécifiques dans l'ADN, à volonté. Il permet de réécrire le code de la vie.

En une décennie à peine, les chercheurs ont développé les usages de CRISPR-Cas9 pour produire des poules résistantes aux maladies, du bétail qui supportait mieux la chaleur et des moutons qui produisaient plus de laine. Ils ont fait du maïs qui résistait aux inondations, du riz de meilleur rendement, des pommes de terre qui tenaient plus longtemps sur les étals. La méthode permettrait aussi de contrôler la reproduction d'espèces invasives et de ramener à la vie des espèces éteintes, comme le mammoth laineux, autrement dit de pratiquer la « désextinction ».

En médecine, on emploie cette technique pour désactiver des gènes au sein des cellules,

une par une, afin de constater ce qu'ils font, et pour créer de meilleurs modèles des maladies. Elle est aussi employée de façon thérapeutique sur un petit nombre de patients. Elle a adouci les symptômes de maladies génétiques comme l'anémie falciforme, et on développe actuellement grâce à elle des traitements du cancer.

L'application la plus controversée serait de se servir de CRISPR-Cas9 pour modifier définitivement l'ADN de nos descendants. En 2018, le scientifique chinois He Jiankui a annoncé la naissance des premiers bébés CRISPR : deux jumelles modifiées pour résister au VIH, le virus du sida. Sa décision d'altérer la lignée germinale humaine, puisque ses modifications se transmettront aux générations suivantes, a déclenché une série de condamnations. Beaucoup considéraient qu'une ligne rouge éthique avait été franchie. Les plus critiques notaient que les répercussions à long terme de cette édition étaient inconnues. En 2020, une assemblée internationale de sociétés scientifiques a conclu que nous n'étions pas prêts pour appliquer cette technique à des embryons humains. Comment cela évoluera-t-il ? Seul l'avenir nous le dira.



RÉÉCRIRE LE CODE DE LA VIE



CRISPR-Cas9 permet aux scientifiques de réécrire précisément le code de la vie : l'ADN. On l'a souvent comparée à une paire de ciseaux moléculaires reliée à un GPS. On peut grâce à cette molécule modifier, ôter ou ajouter des gènes et même transférer de l'ADN d'une espèce à l'autre.

**RÉCHAUFFEMENT
CLIMATIQUE**

ÉCOSYSTÈMES

EXTINCTION

BIODIVERSITÉ

**ÉNERGIE
RENOUVELABLE**

CHAPITRE 7

PLANÉTES

EXOPLANÈTE

**ÉQUATION
DE DRAKE**

**VIE
EXTRATERRESTRE**

INTRODUCTION

A lors que les biologistes creusent de plus en plus profond dans les mystères moléculaires de la vie, d'autres scientifiques prennent de la hauteur sur la planète et ses habitants. Étudier la vie à l'échelle planétaire permet de découvrir les interactions entre les espèces et l'écosphère, et les effets dévastateurs que peut avoir une seule d'entre elles.

Le **RÉCHAUFFEMENT** est la conséquence des émissions de dioxyde de carbone, de méthane et autres **GAZ À EFFET DE SERRE** (page 124), d'origine humaine. À moins que nous limitions ces émissions, le **CHANGEMENT CLIMATIQUE** déclenchera des événements météorologiques extrêmes en série, tels que canicules et inondations, provoquant des déplacements de millions de personnes dans le monde et plaçant les **ÉCOSYSTÈMES** en grande difficulté. Pour avoir un aperçu de changement climatique extrême, inutile de changer de planète : l'**EXTINCTION** Permien-Trias, suite à un réchauffement naturel, a balayé environ 90 % des espèces vivant sur Terre il y a 252 millions d'années.

Les espèces dépendent les unes des autres pour leur survie. Les prédateurs ont besoin des proies, les insectes pollinisent les fleurs, etc. Cette diversité essentielle de la vie est appelée la **BIODIVERSITÉ** et elle est en net déclin (page 126). On estime qu'un million d'espèces pourraient s'éteindre dans les décennies qui viennent.

Cette perte de biodiversité est due en grande partie à des activités humaines, dont la déforestation, l'agriculture et la pêche. Les gens pensent de plus en plus que la consommation effrénée des ressources est intenable.

Beaucoup estiment que la croissance de l'économie mondiale a des limites naturelles, puisqu'elle se fonde sur l'exploitation de ressources finies (page 128). Cela entraîne une méfiance envers les modes de vie jetables et un intérêt pour l'**ÉCONOMIE CIRCULAIRE** afin de préserver nos précieuses ressources. Les **ÉNERGIES RENOUVELABLES** pourraient jouer un grand rôle dans cette transition (page 130).

La Terre nous est chère, mais ce n'est qu'une parmi les milliers de milliards de planètes disséminées dans la galaxie. Pendant des siècles, les astronomes n'ont connu qu'une poignée d'entre elles, celles en orbite autour du Soleil. En 1992, ils ont détecté la première **EXOPLANÈTE** autour d'une étoile lointaine. Depuis, ils en ont repéré plus de 5 000 (page 132).

L'une d'elles abrite-t-elle une vie intelligente ? Si des extraterrestres y vivent, nous n'en avons encore reçu aucune nouvelle. Les scientifiques impliqués dans la recherche d'une intelligence extraterrestre (**SETI**) prêtent une oreille attentive aux transmissions éventuelles. Une façon de calculer leur chance d'en détecter une est l'**ÉQUATION DE DRAKE**, une formule qui calcule le nombre de civilisations technologiquement avancées sur des planètes habitables dans la galaxie (page 134). Sa solution est inconnue et ses estimations varient entre une (oui, c'est nous) et des millions. Elle a tout de même guidé l'œil des astronomes jusqu'aux endroits les plus intéressants dans cette quête.

Il est possible qu'une civilisation extraterrestre soit déjà bien renseignée sur la nôtre. Peut-être a-t-elle constaté l'impact que nous avons sur notre planète et décidé en conséquence de rester silencieuse.

POLLUTION

GAZ À EFFET DE SERRE

Gaz émis naturellement ou par l'activité humaine qui piège la chaleur dans l'atmosphère, dont le dioxyde de carbone et le méthane.

CARBURANT FOSSILE

Matériau naturel contenant de l'hydrogène et du carbone obtenu par décomposition des plantes et des animaux en sous-sol, qu'on peut brûler pour produire de l'énergie : charbon, pétrole et gaz naturel.

ÉNERGIE RENOUVELABLE

Énergie produite par des sources non finies, comme les énergies solaire, éolienne et hydroélectrique.

LIMITES À LA CROISSANCE

Une étude de 1972 montre qu'une croissance économique sans fin est intenable sur le plan environnemental.

ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Approche de la production et de la consommation en boucle fermée, fondée sur la réutilisation, le recyclage, la réparation, la remise à neuf, le prêt et la location.

RÉCHAUFFEMENT

Augmentation des températures causée par les gaz à effet de serre ; désigne souvent le réchauffement climatique depuis la révolution industrielle.

CHANGEMENT CLIMATIQUE

Changement à long terme du climat de la planète en raison du réchauffement ; devrait inclure une montée des eaux, et une fréquence accrue des tempêtes, inondations et sécheresses sévères.

ENVIRONNEMENT

Conditions dans lesquelles vit un organisme ; ou combinaison de toutes les choses vivantes et non vivantes de la planète, dont l'air, l'eau, les plantes, et les animaux.

EXOPLANÈTE

Toute planète hors de notre système solaire.

ÉCOLOGIE

POINT DE BASCULE

Seuil au-delà duquel un système ne peut plus revenir à son état précédent ou arrêter le changement en cours.

EXTINCTION

Quand tous les individus d'une espèce sont morts.

ÉCOSYSTÈME

Interaction entre un groupe d'organismes et leur environnement dans une « bulle » géographique donnée.

BIODIVERSITÉ

Diversité de la vie sur Terre, des animaux, plantes, champignons et micro-organismes, bactéries et amibes, qui y vivent.

CHAÎNE ALIMENTAIRE

Série d'organismes liés par leur dépendance alimentaire les uns envers les autres. Commence par un organisme qui produit sa propre nourriture, tel qu'une plante.

ESPÈCE INVASIVE

Espèce non native qui nuit à un environnement dans lequel elle a été introduite par des humains (volontairement ou par accident), souvent à cause de sa surpopulation.

EXTRATERRESTRES

ZONE BOUCLE D'OR

Région autour d'une étoile dans laquelle une exoplanète pourrait abriter de l'eau liquide, donc de la vie.

SETI

Search for extraterrestrial intelligence. Quête de la vie intelligente sur d'autres planètes, par analyse des signaux électromagnétiques venus de l'espace.

ÉQUATION DE DRAKE

Méthode inventée par l'astronome Frank Drake pour déterminer combien d'exoplanètes de la Voie lactée abritent une civilisation avancée technologiquement.

Le réchauffement peut-il détruire la planète ?

→ Si « détruire » veut dire mener la vie à l'extinction, la réponse est oui. Les fossiles nous indiquent que des extinctions ont déjà eu lieu par le passé, mais cette fois le coupable est différent.



L'extinction Permien-Trias a éradiqué environ 90 % des espèces sur Terre il y a 252 millions d'années. La cause

était presque certainement une accélération du réchauffement suite à la hausse du taux de dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique résultant d'éruptions volcaniques en Sibérie. Le CO₂ est un gaz à effet de serre, il forme une barrière atmosphérique qui piège la chaleur.

Bien sûr, il s'agissait alors d'un phénomène naturel étalé sur des millions d'années. La mauvaise nouvelle, c'est que le taux de réchauffement est aujourd'hui presque dix fois plus grand et que sa cause est l'activité humaine, la combustion des carburants fossiles et la déforestation. Cela produit plus de CO₂ et autres gaz à effet de serre, tels que le protoxyde d'azote. À ce rythme, les phénomènes extrêmes, tempêtes, canicules, inondations, ne peuvent qu'empirer. Les calottes glaciaires et les glaciers fondront, de même que le permafrost (relâchant toujours plus de carbone). Le niveau de la mer montera et la désertification s'accroîtra. L'extinction de masse se profile, si elle n'a pas déjà commencé.

Les famines résultant de la destruction de la chaîne alimentaire entraîneront la disparition de la vie. Quand la base de la chaîne, les insectes,

le krill ou le plancton meurent, les plus gros animaux qui s'en nourrissent meurent aussi. Selon les climatologues, un réchauffement limité à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels suffirait à en arriver là, ce qui devrait se produire dès 2050. Le monde s'est déjà réchauffé de 1,2 °C.

Une fois atteint ce point de bascule, même de petits changements auront des répercussions irréversibles et le changement climatique ne pourra plus être arrêté. Ce point pourrait être situé à 2 °C des niveaux préindustriels.

Les écosystèmes s'effondreront, la pollution, l'eau douce deviendra rare, les forêts mourront, les terres agricoles seront ravagées par les inondations et les invasions de nuisibles. Les océans se réchaufferont, manqueront d'oxygène et s'acidifieront. De nouvelles maladies émergeront, d'autres se réveilleront. Les canicules seront fréquentes et les migrations nécessaires, menant à des conflits et à l'effondrement économique.

Selon les études, la plupart des espèces n'auront pas le temps d'évoluer pour s'adapter à ces changements climatiques. L'humanité réagira-t-elle à temps ?

EFFONDREMENT DE L'ÉCOSYSTÈME

La hausse du taux de CO_2 atmosphérique a d'abord été constatée il y a 120 ans ; des décennies plus tard, le chimiste Charles Keeling a confirmé que l'activité humaine provoquait cette hausse. En 1988, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat a été fondé pour coordonner la recherche sur cette question.

Depuis, l'humanité n'a pas porté toute l'attention qu'il faudrait aux signaux d'avertissement que nous a envoyés notre planète en surchauffe. Nous n'avons pas atteint les quotas de réduction des émissions de gaz à effet de serre négociés mondialement, quand nous n'avons pas tout simplement ignoré le sujet.



Le niveau des mers pourrait monter de 75 cm en ce siècle.

La dilatation thermique de l'eau contribue à hauteur de 42 % à la montée des eaux.

Les sept années les plus chaudes de l'histoire sont toutes postérieures à 2015.

La biodiversité est-elle vraiment diverse ?

→ Pas autant qu'elle le devrait. La vie sur Terre nécessite une large variété d'organismes pour former et soutenir les écosystèmes nécessaires à son entretien, fournissant de l'eau fraîche, de la nourriture et des soins.



La biodiversité est l'ensemble de la vie sur Terre, animaux, plantes, champignons et micro-organismes, tels que les bactéries et les amibes. Elle suit son bonhomme de chemin du mieux qu'elle peut, interagissant avec son environnement pour former des écosystèmes. Les mangroves, par exemple, diminuent l'érosion et protègent les côtes des tempêtes. Une forêt tropicale fournit un habitat à des millions d'espèces, piège le carbone dans ses arbres et libère de l'oxygène dans l'air que nous tous respirons. Toutefois, ces bénéfices ne sont pas le produit d'une seule espèce. Ils viennent de l'interaction entre toutes. Autrement dit, la biodiversité est nécessaire à la vie.

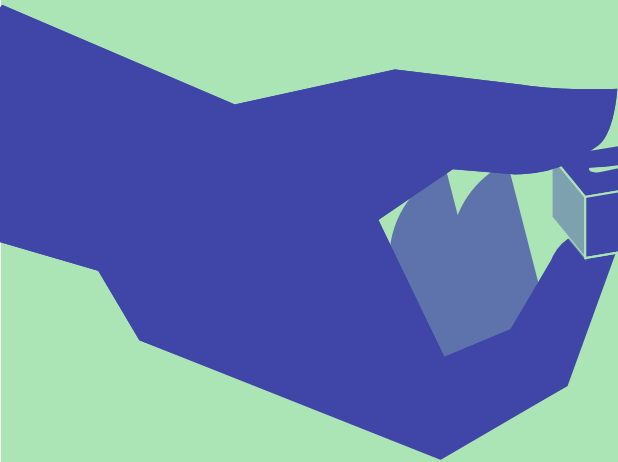
De tout temps, des espèces ont disparu, mais les taux d'extinction actuels s'envolent. Les espèces disparaissent entre mille et dix mille fois plus vite qu'en temps normal, selon les scientifiques. On estime qu'environ 1 million d'espèces pourraient s'éteindre dans les prochaines décennies, dont 40 % des amphibiens, 33 % des coraux des récifs, 34 % des conifères, 31 % des requins et des raies,

25 % des mammifères et 14 % des oiseaux. La biodiversité est en déclin.

Les scientifiques débattent des répercussions possibles. Certains estiment qu'une fois dépassé un point de bascule, les écosystèmes s'effondreront. D'autres notent que la Terre est déjà passée par des extinctions de masse et que la vie a toujours trouvé le moyen de rebondir. Mais cela pourrait prendre des dizaines de milliers d'années. Que faire ?

C'est un problème dont nous sommes entièrement responsables. Le changement climatique rend la survie difficile pour de nombreux animaux et végétaux. La déforestation, la chasse et la pêche déciment les espèces sauvages, tout comme l'agriculture intensive et la multiplication des espèces invasives problématiques. Des organisations internationales travaillent de concert pour inverser cette tendance. Les individus aussi ont leur rôle à jouer, par la préservation des espaces naturels, une alimentation plus végétale et une consommation de viande plus raisonnée, de meilleure qualité, issue du pâturage et d'élevages en plein air.

RISQUES DE LA CHUTE DE LA BIODIVERSITÉ



Les écosystèmes sont des communautés d'organismes vivants dans un environnement. On peut se les représenter comme une immense tour en briques, où chaque brique représente une composante importante de l'écosystème ; par exemple une espèce spécifique, animale ou végétale. Si on ôte ou déplace quelques briques, la tour tient toujours. Mais si on continue ainsi, il viendra un moment où elle s'effondrera. Nous ne pouvons nous permettre de négliger la perte de nombreuses espèces, car nous risquons de perdre avec elles des écosystèmes entiers.

Quelles sont les limites à la croissance ?

→ En 1972, une étude, *Les Limites à la croissance*, a montré qu'une économie toujours croissante était écologiquement intenable. C'était très controversé à l'époque ; aujourd'hui, les arguments pour l'écologie et l'économie circulaire paraissent évidents.



Dans les années 1970, de plus en plus de scientifiques ont pris conscience des conséquences d'une économie mondiale en plein boom sur l'environnement. Leurs inquiétudes ont été rassemblées dans un rapport célèbre intitulé *Les Limites à la croissance*, commandé par le Club de Rome, forum mondial de politiciens, scientifiques, économistes et gens des affaires.

Les Limites à la croissance étudiait l'impact de la hausse de la population, de la consommation des ressources naturelles et de la pollution sur notre planète future. C'était le début des simulations numériques pour extrapoler l'effet de variables clés à une échelle planétaire.

Les résultats faisaient froid dans le dos. Si la société poursuivait sa trajectoire, disait l'étude, la spirale de la consommation finirait par dépasser en un siècle les capacités de la Terre à la soutenir. Le résultat serait un effondrement soudain, massif, de la civilisation. En d'autres termes, l'économie ne peut pas grandir éternellement sur une planète finie.

Bien des commentateurs de l'époque ont accusé le rapport d'agiter les peurs avec des affirmations absurdes. Ils jugeaient les

données erronées, les simulations simplistes et l'idéologie de leurs auteurs, fondée sur un anti-capitalisme primaire.

Avec le temps, les conclusions de *Limites à la croissance* ont gagné du terrain, à mesure que les dégâts humains sur l'environnement devenaient évidents. Le rapport, publié en livre, est devenu un bestseller influent, une pierre de touche pour le mouvement écologique alors naissant. Plus récemment, des simulations numériques très élaborées ont repris les analyses du rapport et soutenu la majorité de ses conclusions.

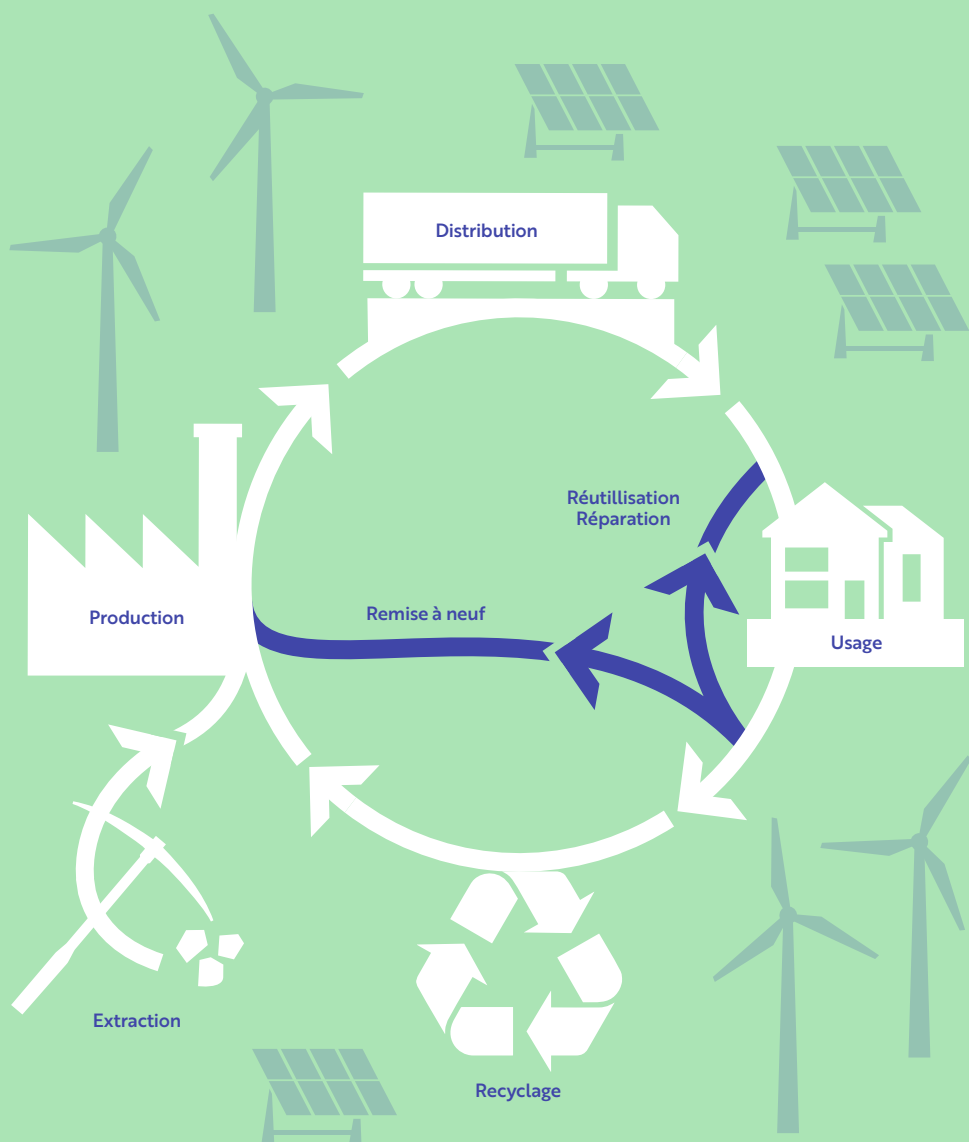
Cinquante ans plus tard, les preuves que nous poussons la planète jusqu'au point de rupture s'accumulent. Pollution, épuisement des ressources et changement climatique sont devenus des problèmes majeurs nécessitant l'attention du monde entier.

Cependant, au milieu de ses prédictions sinistres, *Les Limites à la croissance* contenait quelques notes d'espoir. En limitant la consommation, disait le rapport, nous devrions pouvoir modifier notre trajectoire de croissance fondée sur la cupidité et atteindre un état de stabilité économique et écologique. Nous avons le choix.

ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Notre économie est « linéaire » ; les ressources naturelles sont consommées pour obtenir des produits manufacturés qui deviendront des déchets. C'est un tapis roulant perpétuel qui épuise les ressources de la planète. Les conclusions des Limites de la croissance ont poussé les chercheurs à inventer des modèles économiques

alternatifs, dont l'économie circulaire. Dans ce modèle, les produits qui atteignent la fin de leur vie utile sont réutilisés, remis à neuf ou recyclés grâce à des procédés qui s'appuient sur des énergies renouvelables (page 130). Cela diminue les quantités de déchets et réduit la quantité de ressources nécessaires à la production.



Comment renouveler l'énergie de la Terre ?

→ Hydroélectricité, solaire, éolien, biocarburants, géothermie, marémoteur : tous renouvelables. Ces sources peuvent nous aider à nous passer des combustibles fossiles et alimenter durablement la planète en énergie.



Le monde moderne est alimenté en énergie par les combustibles fossiles, charbon, pétrole et gaz, en majorité.

Le pétrole est raffiné pour produire de l'essence pour les voitures ou du kérosène pour les avions. Les chaudières à gaz réchauffent nos maisons. Les centrales brûlent des hydrocarbures pour produire l'électricité.

Le problème, c'est que libérer ainsi l'énergie des combustibles fossiles émet de grosses quantités de dioxyde de carbone (CO_2), un gaz à effet de serre, mauvais pour le climat (page 124).

C'est pourquoi le monde court après les énergies renouvelables, solaire ou éolienne, et les biocarburants. Ni le Soleil ni le vent ne menacent de manquer, et ils n'émettent pas directement de CO_2 . Les combustibles fossiles émettent par ailleurs d'autres polluants quand on les brûle, les énergies renouvelables pourraient donc nous aider à mieux respirer.

Elles ont beaucoup progressé. En 2020, elles ont fourni plus de 28 % de l'électricité mondiale, grâce à des panneaux solaires, des éoliennes et des centrales hydroélectriques.

La construction des panneaux solaires était autrefois onéreuse, mais la production en masse et l'amélioration des technologies impliquées ont fait chuter les coûts. Entre

2010 et 2020, le coût de l'électricité générée par les panneaux solaires a baissé de 82 % en moyenne ; dans les régions ensoleillées, leur électricité est aujourd'hui moins chère que celle des centrales à charbon.

Voici leur principe de fonctionnement. La plupart des cellules photovoltaïques contiennent un semi-conducteur, le silicium. Quand de la lumière les éclaire, elles excitent les électrons dans le réseau cristallin du silicium, qui se déplacent et laissent des « trous » de charge positive. Les électrons voyagent vers une électrode, les trous vers l'électrode opposée. Ce déplacement de charges génère un courant électrique.

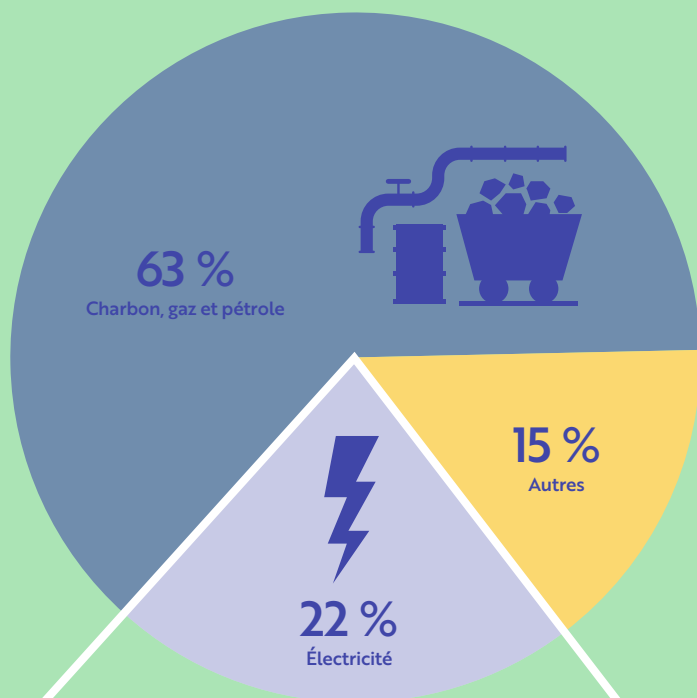
Malheureusement, l'énergie solaire ou éolienne ne sert pas à grand-chose par une nuit sans vent. C'est pourquoi nous devons trouver différents moyens de stocker les énergies renouvelables, de grosses batteries ou des réservoirs hydroélectriques.

Malgré une hausse d'environ 7 % par an de sa production, l'électricité renouvelable ne remplit que la moitié de la hausse attendue de la demande en énergie. Les énergies renouvelables sont un atout, pas une panacée. Nous devons aussi limiter notre consommation en énergie (page 128), toujours grandissante.

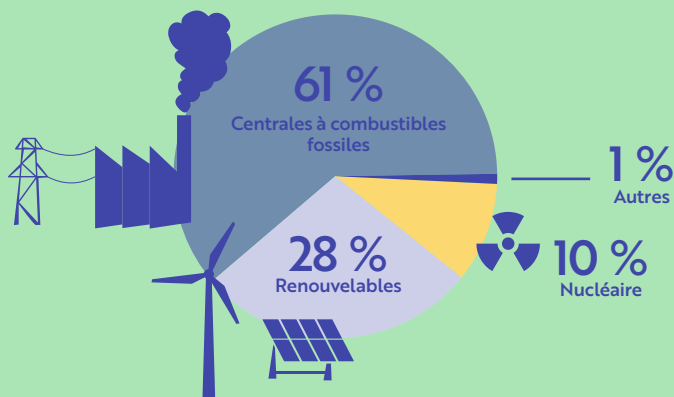
CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

Les énergies renouvelables fournissent de l'électricité propre, elles nous aident à nous passer des centrales à combustible fossile très polluantes. Mais l'électricité ne représente que 22 % de la consommation énergétique mondiale aujourd'hui. Parallèlement au déploiement des

énergies renouvelables, nous devons donc électrifier davantage les transports, les industries lourdes et autres secteurs énergivores qui dépendent encore directement des combustibles fossiles, afin qu'eux aussi puissent bénéficier de la révolution du renouvelable.



MÉTHODE DE PRODUCTION DE L'ÉLECTRICITÉ



Est-ce que Boucle d'Or connaît des aliens ?

→ Possible. Certaines exoplanètes sont dans la zone « Boucle d'Or », pas trop près de leur étoile pour que leur eau ne s'évapore pas, et pas trop loin pour qu'elle ne gèle pas non plus (« juste comme il faut »). Et là où il y a de l'eau liquide, il pourrait y avoir de la vie.



Notre système solaire contient huit planètes, de Mercure brûlée par le Soleil à Neptune, la géante de glace.

Mais, plus loin dans le cosmos, il y a des milliards d'étoiles dans la Voie lactée, et peut-être 2 billions de galaxies dans l'Univers. Ça fait vraiment beaucoup d'étoiles, et bon nombre d'entre elles comptent sur leurs orbites des mondes lointains, les exoplanètes.

Dès le XVI^e siècle, le philosophe italien Giordano Bruno avait supposé que les autres étoiles pouvaient disposer de leurs propres systèmes planétaires, mais il a fallu attendre 1992 pour que les astronomes confirment l'existence de la première exoplanète. Depuis, on en a trouvé beaucoup d'autres : plus de cinq mille aujourd'hui. Les astronomes les ont repérées en mesurant la perturbation de leur étoile au cours de leur orbite. D'autres se montrent en atténuant légèrement la lumière de leur étoile quand elles leur passent

devant. De puissants télescopes ont même pu voir quelques exoplanètes directement. Les premières découvertes étaient surtout des « Jupiter chaudes », des géantes gazeuses orbitant près de leur étoile. Mais avec l'amélioration des techniques et des outils tels que le télescope spatial Kepler, les chasseurs d'exoplanètes ont trouvé plus de planètes telluriques, semblables à la Terre.

Le télescope James Webb de la NASA nous a ouvert une nouvelle fenêtre sur ces mondes. Il étudie la lumière infrarouge qui filtre de leurs atmosphères et cherche des molécules capables de former les briques élémentaires de la vie (page 22). Il révèle aussi des choses de leur naissance, dans le disque de gaz et de poussières qui entoure les jeunes étoiles.

En observant l'espace profond, nous pourrions en apprendre plus sur les origines de notre planète, et peut-être découvrir que nous ne sommes pas seuls...

ZONE BOUCLE D'OR



Dans le conte pour enfants, Boucle d'Or choisit le bol de soupe du petit ours parce qu'il n'est ni trop chaud, ni trop froid : il est « juste comme il faut ». Elle donne aujourd'hui son nom à la zone Boucle

d'Or, cette région de l'espace autour d'une étoile où une exoplanète en orbite serait exactement à la bonne distance pour jouir d'une température où l'eau liquide, et donc la vie, pourrait exister.

Y a quelqu'un au bout du fil ?

→ Si oui, il reste discret. Mais l'Univers est si vaste que bien des scientifiques pensent que la vie intelligente doit bien exister ailleurs. L'équation de Drake nous permet d'estimer nos chances d'en entendre parler un jour.



Les scientifiques de la NASA estiment qu'il y aurait jusqu'à 300 millions de planètes habitables dans notre galaxie, la Voie lactée. Combien d'entre elles abritent des civilisations extraterrestres capables de communiquer ? En 1961, l'astronome Frank Drake a établi une méthode pour estimer ce nombre.

L'équation de Drake inclut sept facteurs, tels que la fréquence d'apparition de la vie sur une planète habitable et ses chances d'évoluer jusqu'à une société technologiquement avancée. L'équation n'a pas de solution précise, mais certaines estimations suggèrent qu'il pourrait y avoir des milliers de ces civilisations dans notre galaxie.

Malgré les incertitudes indépassables qu'elle contient, l'équation de Drake donne aux scientifiques une feuille de route pour explorer les questions autour de l'existence de la vie et des civilisations extraterrestres, un domaine résumé par l'acronyme SETI (*Search for extraterrestrial intelligence*).

Les recherches SETI emploient le plus souvent des radiotélescopes pour épier les transmissions extraterrestres, mais elles n'en ont encore détecté aucune qui soit très convaincante. Si l'Univers contient bien des millions de mondes habitables, comment se

fait-il que nous n'ayons jamais entendu parler d'extraterrestres ? C'est ce qu'on appelle le paradoxe de Fermi, d'après le physicien italien Enrico Fermi qui a remarqué cette anomalie. Peut-être est-ce parce que la vie est bien plus rare qu'on ne le pense, ou que les civilisations disparaissent avant de développer une forme de communication interstellaire.

Plus proche de nous, des sondes ont transporté des outils de détection des traces chimiques des formes de vie simples sur d'autres mondes. En 1976, deux sondes Viking ont atterri sur Mars pour y chercher des signes de vie, avec des résultats peu probants. D'autres missions ont trouvé depuis des indices d'activité biologique sur Mars, des bouffées de méthane, par exemple, mais la géologie pourrait les expliquer aussi, plutôt que la biologie. Dans la décennie qui vient, d'autres sondes chercheront des traces de vie sur Europe et Titan, des lunes de Jupiter et Saturne, respectivement.

Réaliser ces analyses chimiques n'est pas une mince affaire. Le robot Perseverance de la NASA rassemble des échantillons de roches martiennes qui seront ramenés sur terre après 2030. Les chercheurs auront ainsi de meilleures chances de déceler des signes de vie.

BOUTEILLE INTERSTELLAIRE À LA MER



Les ondes radio ne sont pas le seul moyen d'envoyer des messages dans l'espace. Au début des années 1970, les sondes spatiales Pioneer 10 et 11 transportaient des plaques gravées d'une carte indiquant la position de notre système solaire et la position de la Terre dans celui-ci, avec une illustration d'un homme et d'une femme. En 1977, deux sondes Voyager transportaient chacune un disque d'or qui contenait des enregistrements de musique, de messages de bienvenue et autres sons de la Terre, ainsi que des instructions pour qu'un DJ alien puisse les diffuser. Les sondes Voyager ont à présent quitté notre système solaire et transportent leur message dans l'espace interstellaire.

**RÉVOLUTION
TECHNOLOGIQUE**

**MÉTHODE
SCIENTIFIQUE**

**SYSTÈME D'UNITÉS
INTERNATIONAL**

**THÉORIE DE
L'INFORMATION**

INFORMATION

ORDINATEURS
QUANTIQUES

THÉORIE
DU CHAOS

THÉORIE
DES JEUX

APPRENTISSAGE
AUTOMATIQUE

INTRODUCTION

Comme nous l'avons vu, la science nous permet de comprendre le fonctionnement des choses. Mais comment la science elle-même fonctionne-t-elle ?

Tout débute souvent par une observation inexpiquée. Les scientifiques proposent alors une hypothèse qui expliquerait ce phénomène étrange et inventent une expérience qui permet de la tester. Cette combinaison d'observation, d'hypothèse et d'expérience a véritablement pris son envol lors de la **RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE** des XVI^e et XVII^e siècles. Elle a posé les bases de fonctionnement de la science professionnelle contemporaine (page 142).

En dépit de ce que vous avez pu entendre, il n'y a pas qu'une seule **MÉTHODE SCIENTIFIQUE**. Cependant, vous pouvez être certain qu'il y aura à un moment donné dans toute entreprise scientifique des mesures très précises. Les scientifiques tentent en permanence de reproduire les expériences des autres, ils ont donc besoin de s'accorder sur un système de mesures qui leur permettra de comparer tous leurs résultats. C'est le **SYSTÈME D'UNITÉS INTERNATIONAL** (page 144). Il dépendait autrefois d'objets physiques pour définir les quantités standard, mais les scientifiques les définissent à présent à l'aide des constantes fondamentales de la nature, telles que la vitesse de la lumière dans le vide.

L'information, ingrédient essentiel de la science, domine de plus en plus nos vies. Les énormes quantités de données qui s'échangent autour du globe sont surtout transmises sous forme numérique, des messages codés consistant en séries de 1 et de 0 qu'on appelle les bits. **LA THÉORIE DE L'INFORMATION** nous aide à faire passer toujours plus de ces *data* dans les canaux de communication et à les stocker sur des puces ou des disques magnétiques (page 146).

La théorie de l'information est une bonne approche pour étudier des systèmes incroyablement complexes. Une autre est la **THÉORIE DU CHAOS**, fondée sur l'idée que de minuscules modifications apportées à un système complexe, tel que la météorologie mondiale, peuvent aboutir à des changements spectaculaires et inattendus (page 148). Une troisième façon d'envisager la complexité émerge de la **THÉORIE DES JEUX**, qui s'attache aux conflits, à la coopération et à la prise de décision dans des domaines aussi variés que la théorie de l'évolution et l'économie (page 150).

Nous pouvons également utiliser l'information pour entraîner nos ordinateurs, améliorer leurs algorithmes pour qu'ils deviennent meilleurs aux échecs ou pour analyser une radiographie. C'est l'**APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE**, ou *machine-learning*, qui implique de nourrir l'ordinateur d'un grand nombre de données, jusqu'à ce qu'il repère les connexions répétées entre actions et résultats (page 152). Il engrange tellement d'expérience sur les causes et les effets qu'il « apprend » alors à prédire ces connexions par la suite.

Les **ORDINATEURS QUANTIQUES** pourraient accélérer l'apprentissage automatique et d'autres domaines du calcul numérique (page 154). Là où nos vieux ordinateurs marchent avec des bits binaires, un ordinateur quantique gère l'information stockée dans les états quantiques de particules subatomiques. Ces « qubits » peuvent être des 1 et des 0 en même temps, ce qui donne en principe aux ordinateurs quantiques la capacité de calculer d'un coup toutes les solutions de problèmes extrêmement complexes. C'est encore trop tôt pour l'affirmer, mais l'étrangeté du monde quantique pourrait donner naissance à des ordinateurs aboutissant à une nouvelle ère de découvertes scientifiques.

MÉTHODE SCIENTIFIQUE

Processus pour expliquer un aspect du monde naturel qui consiste en :
une question, une hypothèse,
une prévision, une expérience,
une analyse et une conclusion.

RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE

Période de découvertes significatives et de changements d'attitudes envers la science et le monde naturel aux XVI^e et XVII^e siècles, marquant l'émergence de la science moderne.

THÉORIE

En science, explication formelle et structurée d'un aspect du monde, tenant compte des lois existantes et des faits connus.

THÉORIE DES JEUX

Mathématiques des stratégies associées aux situations de compétition, employées pour modéliser et comparer les stratégies de conflit et de coopération.

THÉORIE DU CHAOS

Explique comment de petites différences dans les conditions initiales d'un système dynamique complexe aboutissent à des résultats divergents et apparemment aléatoires ; relie l'ordre à petite échelle au chaos apparent à grande échelle.

JOHN VON NEUMANN

Mathématicien américano-hongrois (1903–1957), inventeur de la théorie des jeux moderne et de l'expression « à somme nulle » pour les jeux où les gains d'un joueur sont les pertes de l'autre.

EFFET PAPILLON

Référence à la théorie du chaos, qu'Edward Lorenz a décrite en 1972 dans une conférence intitulée « Le battement d'ailes d'un papillon au Brésil déclenche-t-il une tornade au Texas ? »

DATA

EXPÉRIENCE

Procédure pour tester une hypothèse, une théorie, démontrer un fait ou faire une découverte.

CONSTANTES PHYSIQUES

Valeurs universelles et connues qui ne varient jamais, telles que la vitesse de la lumière dans le vide ou la charge électrique de l'électron ; utilisées comme bases du système d'unités SI.

UNITÉ (DE MESURE)

Quantité standard employée pour décrire une autre quantité, souvent adoptée par convention ou imposée par la loi, pour plus de cohérence.

SYSTÈME D'UNITÉS INTERNATIONAL (SI)

Standard mondial des unités de mesure, qui comporte sept quantités de base : masse (kilogramme), longueur (mètre), temps (seconde), intensité électrique (ampère), température (kelvin), quantité de matière (mole) et intensité lumineuse (candela).

THÉORIE DE L'INFORMATION

Étude de la transmission et du stockage de l'information dans les systèmes de communication.

BIT

Pour « *binary digit* ». Unité de base de l'information dans les communications numériques, qui prend pour valeur 0 ou 1.

TEST DE TURING

D'abord appelé test d'imitation par le mathématicien Alan Turing, test à trois personnes pour déterminer si une machine peut faire preuve d'une intelligence équivalente à celle d'un humain.

RÉSEAU DE NEURONES

Technique de *machine-learning* visant à simuler le fonctionnement du cerveau par l'usage d'algorithmes de reconnaissance des motifs implicites dans les ensembles de données sans avoir à suivre de listes d'instructions complètes.

MACHINE-LEARNING

Dérivé de l'IA ; système informatique qui analyse de grandes quantités de données labélisées pour y découvrir des motifs et adapter son fonctionnement.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE (IA)

Intelligence des machines, surtout des ordinateurs, qui leur permet de remplir des tâches habituellement réservées aux humains de façon indépendante.

ORDINATEUR QUANTIQUE

Repose sur l'état quantique des particules pour analyser l'information. La suprématie quantique sera atteinte quand un tel ordinateur résoudra un problème qu'un ordinateur classique ne peut résoudre en temps raisonnable.

QUBIT

Pour « *Quantum bit* ». Unité d'information dans un ordinateur quantique.

Qu'y a-t-il au cœur de la méthode scientifique ?

→ Question, hypothèse, prédiction, expérience, analyse et conclusion sont les étapes clés de la méthode scientifique. Des divergences existent sur son fonctionnement, mais la science moderne ne serait pas ce qu'elle est sans ce procédé d'enquêtes.



Comment se constitue notre connaissance du monde qui nous entoure ? Par la science, bien sûr.

Malgré tout, la question du *comment* faire de la science n'a pas toujours été simple.

Les humains ont fait de la science bien avant qu'on l'appelle comme ça. Il y a des milliers d'années, des astronomes effectuaient déjà des observations détaillées des étoiles et des planètes et des forgerons menaient déjà des expériences sur des minerais de cuivre et d'étain pour obtenir le bronze parfait.

Mais la philosophie naturelle, puisque c'est ainsi qu'on l'appelait, se fondait davantage sur la réflexion que la mesure et l'expérience. Bien des philosophes pensaient pouvoir déduire la vérité du monde de la logique pure. Mais d'autres estimaient que le savoir scientifique leur viendrait plutôt de l'expérience directe. L'un des plus précoces partisans de cette idée était Alhazen, un grand expérimentateur qui étudiait la lumière, les lentilles et autres aspects de l'optique dans l'Égypte du XI^e siècle.

Cette approche a gagné beaucoup de terrain durant la période des incroyables avancées de la Révolution scientifique. L'une de ses illustres figures, le philosophe anglais Francis Bacon, a conçu au XVII^e siècle un

protocole scientifique qui consistait à faire des observations, noter les faits et s'en servir pour formuler des théories. À la même époque, le Français René Descartes avançait que les scientifiques pourraient expliquer le monde par la mesure et les mathématiques.

Les scientifiques ont ensuite multiplié les expériences afin de tester leurs théories, au point que beaucoup estiment de nos jours qu'une théorie n'est scientifique que si elle est falsifiable, c'est-à-dire s'il existe une expérience capable de prouver qu'elle est fautive.

Les expériences doivent aussi être reproductibles, afin que d'autres scientifiques puissent les répéter et vérifier le résultat. Cela peut demander des années de travail à des dizaines de personnes pour qu'une théorie commence à être largement acceptée comme « vraie », ou aussi proche que possible du vrai.

La méthode scientifique nécessite surtout de confronter les idées aux preuves expérimentales, plutôt qu'accepter ce que dit le professeur. La devise de la Royal Society, l'Académie des sciences britannique, c'est : *Nullius in verba*. Une traduction depuis le latin nous indique qu'elle signifie : « Ne croire personne sur parole. » C'est une bonne devise dans la vie, pas seulement pour la science.

ROUTE DU SAVOIR



Voici une manière de décrire la méthode scientifique. D'abord, les scientifiques voient quelque chose qu'ils ne comprennent pas. Ils formulent une hypothèse pour l'expliquer. Puis ils se servent de cette hypothèse pour faire une prédiction et inventent une expérience dont ils mesurent les résultats afin de confirmer ou infirmer cette prédiction. Il n'y a pas qu'une méthode scientifique en réalité, les philosophes des sciences débattent encore du fonctionnement de la science. Mais pour les Einstein en herbe, ce modèle très simple n'est pas un mauvais point de départ.

Le système d'unités international est-il bien constant ?

→ Très constant, de nos jours. Les savants employaient autrefois des objets pour servir d'étalons de référence des mesures. Aujourd'hui, les mesures s'appuient sur sept constantes fondamentales et forment un système international.



Par le passé, les unités de mesure étaient un peu ambiguës. Une coudée était par exemple la distance du coude à la pointe du majeur, et la coudée assyrienne n'était pas la coudée égyptienne. Pire, les unités proliféraient. Qui se rappelle combien il y a de pieds dans une perche ?

C'était embêtant pour les scientifiques, qui n'aiment rien tant qu'un système de mesure redoutablement précis.

Dans les années 1790, l'Académie des sciences, pleine de zèle révolutionnaire, a développé le système métrique afin de fournir un système plus logique d'unités. Il restait toutefois quelques incohérences dans son application et la définition de ses unités de base. Un siècle plus tard, tous les savants du monde se sont donc accordés sur la mesure du mètre et du kilogramme. D'autres unités ont suivi, et en 1960 toutes ont été rassemblées dans le SI, le système d'unités international.

Le SI contient sept unités de mesure, dont la seconde, le mètre et le kilogramme. Ceux-ci étaient autrefois définis à l'aide d'objets précis. Par exemple, un cylindre en alliage de platine-

iridium a défini le kilogramme pendant plus d'un siècle : le grand K, conservé au Bureau des poids et mesures à Sèvres.

Bien d'autres copies de ce kilogramme ont été faites et envoyées partout dans le monde, afin de servir d'étalon du kilogramme et calibrer les balances dans toutes les nations. Avec le temps, la masse de quelques-unes de ces copies s'est modifiée de quelques microgrammes, par absorption de gaz. Mais le grand K a conservé son sacro-saint kilogramme. Pas parce que sa masse n'avait pas varié, mais parce qu'il était, par définition, le kilogramme.

Mais, depuis 2019, les sept unités de base sont définies en fonction des constantes immuables de la physique, telles que la vitesse de la lumière dans le vide, ou la charge électrique de l'électron. Le kilogramme est à présent calculé à partir de la constante de Planck. Ce nombre incroyablement petit est l'énergie de n'importe quel photon de lumière divisée par sa fréquence, un nombre qui devrait être le même partout dans l'Univers. Les coudées ne peuvent en dire autant.

MESURES DE TOUTES CHOSES

Seconde, mètre, kilogramme, ampère, kelvin, mole et candela : ce sont les unités de base qui permettent aux scientifiques de mesurer toutes les choses de l'Univers. Plus de vingt autres unités officielles du SI sont dérivées de ces sept merveilles, dont les becquerels pour la mesure de la radioactivité et les henrys pour celle de l'inductance électrique. Certaines de ces unités étaient autrefois définies par des objets physiques, mais toutes sont aujourd'hui basées sur des constantes fondamentales, telles que la constante de Planck (h).

h



La constante de Planck sert à définir le kilogramme.

Vieilles unités, dont les pieds, les pouces et les nœuds.



Qu'est-ce que la théorie de l'information ?

→ La décomposition de l'information jusqu'à sa forme la plus simple. Elle a entraîné une révolution technologique, de l'intelligence artificielle aux télécommunications et à internet.



Les bases de la théorie de l'information ont été posées par l'ingénieur américain Claude

Shannon dans son article de 1948 *Théorie mathématique de la communication*, plus tard complété dans un livre coécrit avec Warren Weaver. Shannon se demandait quelle quantité maximale d'information un canal donné, par exemple un fil de cuivre ou une radio, pouvait transmettre. Plus précisément, il cherchait des moyens de rendre le transfert d'informations plus efficace et de vérifier à quelle vitesse une information numérique codée pouvait être transmise et traitée.

Avant la théorie de l'information, les télécommunications s'appuyaient sur des signaux analogiques, comme dans le cas d'un message télégraphique. Shannon savait que le signal se dégradait le long de son parcours et que des fluctuations le parasitaient : le bruit.

Il s'est rendu compte qu'en décomposant l'information en petites unités indivisibles, qu'il a appelées des *binary digits*, ou bits, la qualité des communications pouvait être grandement

améliorée. Les messages, convertis en séries de bits représentés par des 1 et des 0, étaient envoyés par câble et reconstruits à l'arrivée. Même en tenant compte du bruit et de l'altération du signal, il demeurait possible de les recevoir et de les reconstruire en raison de leur très grande simplicité.

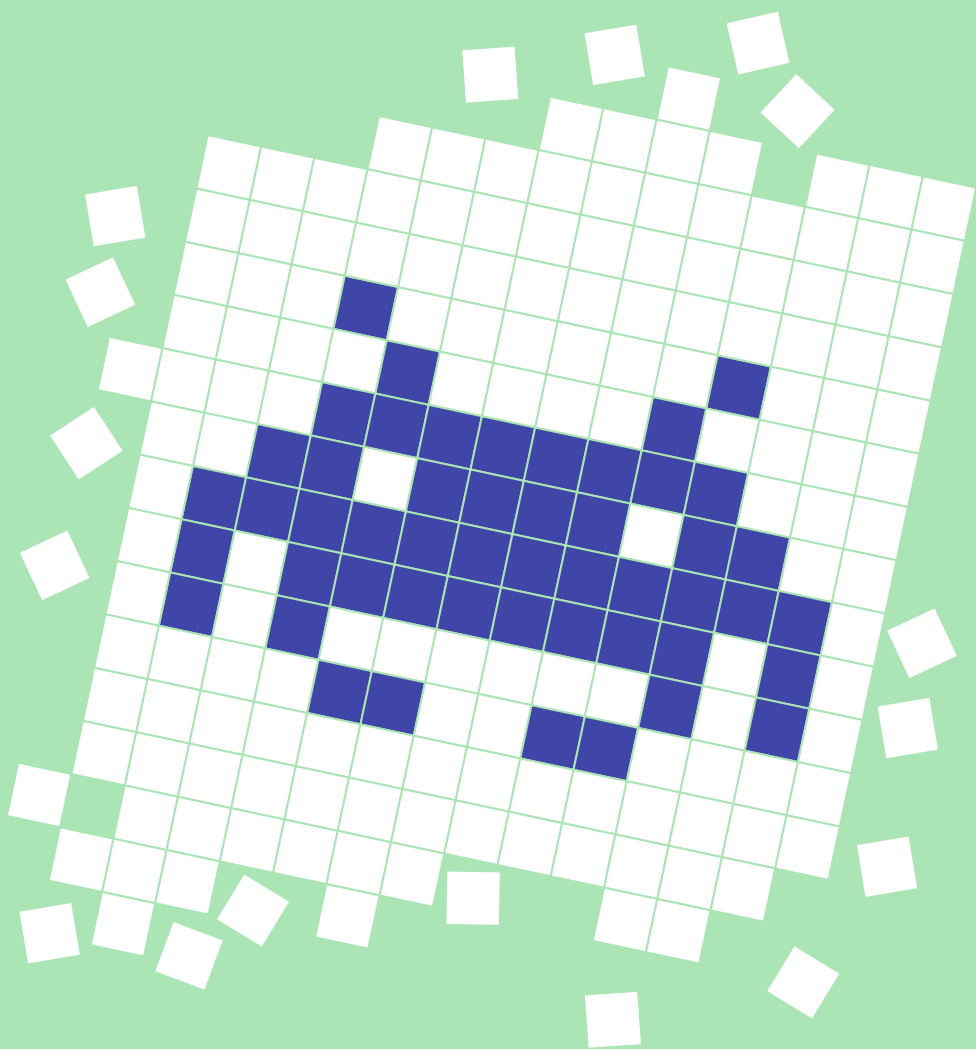
La théorie de l'information a permis de rendre les codes très efficaces et multiplié la vitesse de traitement des ordinateurs. C'était un développement crucial pour la technologie des téléphones portables et des formats comme le CD et le DVD. Elle a fourni la base mathématique nécessaire à un accroissement de la capacité de stockage des données et à une accélération constante de la rapidité et de la précision des informations accessibles par internet ou autres. Chaque bout d'information numérique qu'on croise est le résultat d'un encodage par la théorie de l'information.

Quand on parle de la révolution de l'information qui s'est emparée du monde, c'est toujours ce concept vieux de 70 ans, dû à Shannon, qu'on évoque.

CLASSIQUES BITS

Les jeux, depuis le simple *Space Invaders* (ci-dessous) au plus complexe *Fortnite*, ont évolué à mesure que la théorie de l'information permettait le développement de nouvelles capacités graphiques. Avec l'arrivée des ordinateurs quantiques, où les qubits remplacent les bits classiques, nous

pourrions un jour atteindre des puissances de calcul encore inégalées (page 154). Ce changement dans la transmission des données en bits, en 1 et en 0, n'est pas destiné en priorité au divertissement, mais il est presque certain qu'il aura un jour un impact énorme sur les jeux de la future génération.



Peut-on mettre de l'ordre dans le chaos ?

→ La théorie du chaos décrit comment les systèmes les plus complexes, gouvernés par de nombreuses équations calculables, sombrent néanmoins dans le chaos.



La théorie du chaos, parfois simplement appelée « effet papillon », est une théorie mathématique qui décrit de nombreux comportements naturels et quotidiens.

En 1961, le mathématicien et météorologue Edward Lorenz essayait de prédire les changements météo grâce à des modèles numériques. Un soir, il a lancé la simulation deux fois, en partant de deux situations très légèrement différentes en raison des arrondis. Lorenz s'attendait à ce que l'ordinateur donne dans ce cas deux prédictions légèrement différentes également, mais ce qu'il a obtenu était étrange : les deux scénarios que prédisait l'ordinateur étaient complètement différents. La théorie du chaos était née, par accident.

Lorenz savait que la météo dépendait de nombreuses variables, vitesse du vent, direction, humidité et température, entre autres. Il a découvert que, dans un système suffisamment complexe, de petites modifications des conditions initiales se propageaient et entraînaient de grandes différences dans le résultat final.

On parle dans ce cas de chaos déterministe, parfois plus simplement de système chaotique.

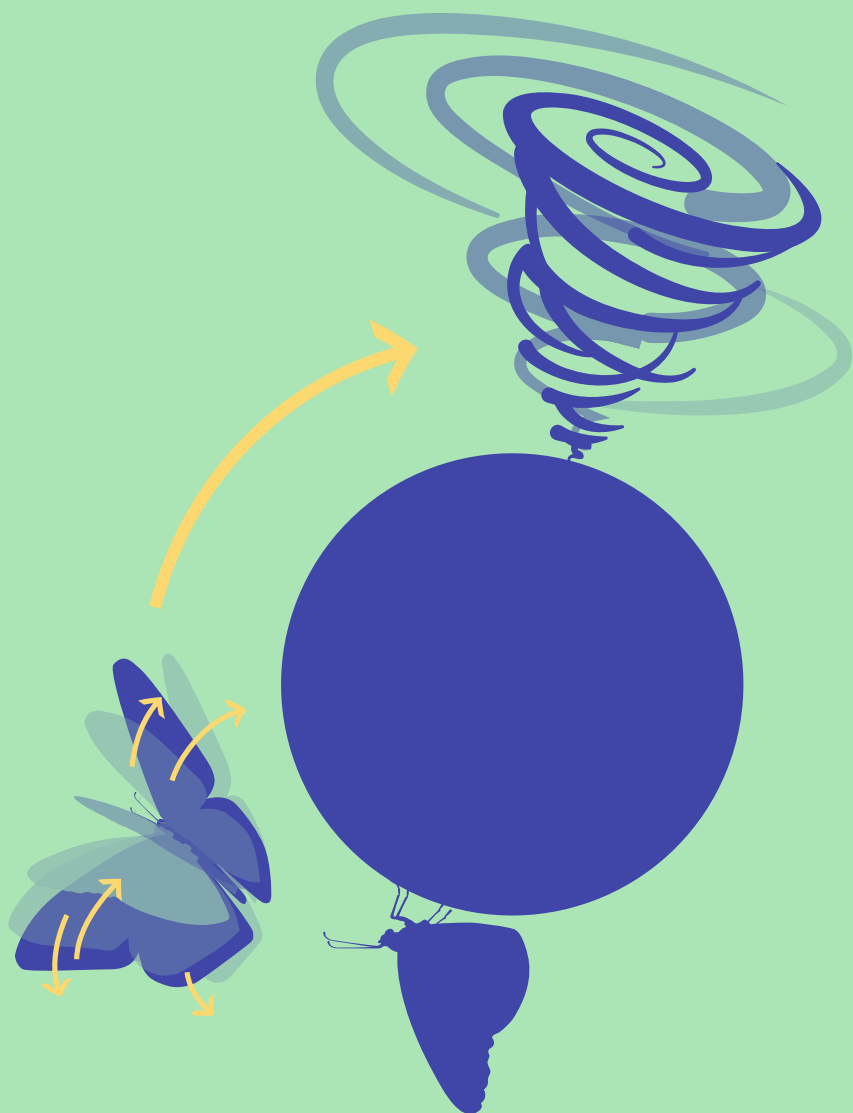
La météorologie, par exemple, fonctionne selon des mécanismes bien identifiés, que les experts savent modéliser à l'aide d'équations mathématiques. Toutefois, la complexité de ces systèmes signifie que le résultat final demeure souvent imprévisible.

Des années plus tard, Lorenz a présenté sa nouvelle théorie au monde lors d'une conférence intitulée « Le battement d'ailes d'un papillon au Brésil déclenche-t-il une tornade au Texas ? » Aujourd'hui, cette théorie nous aide à expliquer de nombreux phénomènes tels que le comportement imprévisible des marchés boursiers, les tendances de la recherche médicale, la robotique et bien d'autres.

Bien que la théorie du chaos paraisse s'occuper d'aléatoire, c'est en réalité une affaire de motifs sous-jacents et de répétition. L'un des domaines d'étude les plus célèbres de la théorie est ainsi celui des fractales, invention du mathématicien Benoît Mandelbrot. Mandelbrot a montré que certains objets présentaient un niveau de détails en apparence infini, mais qui se répétaient la plupart du temps. La beauté mathématique des fractales a depuis colonisé le domaine des arts. Elles ont servi d'inspiration à des films comme *Star Trek* et *Doctor Strange*.

EFFET PAPILLON

Il ne faut pas la prendre littéralement, mais l'analogie du battement d'ailes de papillon au Brésil qui provoque une tornade au Texas illustre bien le concept clé de la théorie du chaos. Dans les systèmes très complexes, comme le climat de la planète, une minuscule fluctuation de la condition initiale (un battement d'ailes de papillon) peut avoir des répercussions immenses sur d'autres niveaux du système.



La vie n'est-elle qu'une théorie du jeu ?

→ Non. Mais les aspects mathématiques de la théorie du jeu se sont avérés très utiles pour expliquer les conflits et la coopération dans des domaines variés : économie, biologie de l'évolution, politique et psychologie.



Il y a plus de cent ans, des mathématiciens ont tenté de fonder une théorie solide de la compétition.

Emanuel Lasker, mathématicien et champion d'échecs, faisait partie de ceux qui espéraient qu'une nouvelle « science de l'opposition » fournirait le moyen rationnel de résoudre les disputes et rendrait les guerres obsolètes.

Le premier pas décisif dans la fondation d'une théorie des jeux a été effectué par le génie américano-hongrois John Von Neumann, avec sa preuve du théorème du minimax en 1928. Ce théorème ne s'applique qu'aux jeux à deux participants dans lesquels les gains de l'un sont les pertes de l'autre. Von Neumann a proposé de parler de jeu à somme nulle pour décrire de tels jeux mettant en scène un conflit total. Il a montré que, pour tous les jeux à somme nulle à deux joueurs, depuis les échecs jusqu'au chifoumi, il existe pour chaque joueur une stratégie garantissant le meilleur résultat du moment que leur adversaire est rationnel et cherche à gagner lui aussi.

Von Neumann a tenté de généraliser sa théorie, afin d'y inclure des jeux à plus de deux joueurs, pas forcément à somme nulle. Il a écrit, avec l'économiste allemand Oskar Morgenstern, et publié en 1944, *Théorie des*

jeux et du comportement économique, qui propose une théorie des jeux « coopératifs » et montre que les joueurs doivent parfois s'allier pour gagner, comme dans le cas d'un cartel qui aligne ses prix aux dépens du consommateur.

Que se passe-t-il si les joueurs ne peuvent ou ne veulent pas collaborer ? En 1950, John Nash a montré que, dans ces circonstances, il existe dans tous les jeux (à somme nulle ou non, avec un nombre quelconque de joueurs), des stratégies appelées « équilibres de Nash », grâce auxquelles les joueurs obtiennent le meilleur résultat possible compte tenu de la stratégie prévisible de leurs adversaires.

La théorie des jeux « non coopératifs » de Nash a été appliquée en économie et ailleurs. Un domaine inattendu était le comportement animal, où elle nous a aidés à comprendre comment la coopération apparaît dans la nature, elle d'ordinaire si violente, par évolution. Des enchères conçues par la théorie ont servi à vendre des fréquences de la bande radio à des opérateurs, faisant gagner des milliards aux gouvernements. Les théoriciens du jeu gagnent de nos jours des millions en concevant des marchés pour la publicité en ligne, des systèmes d'enchères et des algorithmes de classement des produits.

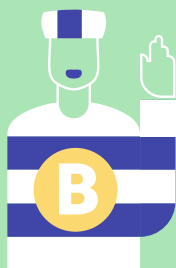
DILEMME DU PRISONNIER

Le plus célèbre des « jeux » nés de la théorie des jeux est le « dilemme du prisonnier », qui décrit une situation où la stratégie la plus rationnelle de chacun des joueurs aboutit au pire résultat pour tout le monde. Développé par des analystes militaires de la RAND Corporation en 1950, le jeu simulait

une certaine vision de la guerre froide et du face à face nucléaire. Le seul équilibre de Nash dans ce jeu est atteint quand les prisonniers confessent un crime qu'ils ont commis ensemble, mais si les deux le font, le résultat est moins bon pour eux que si aucun des deux ne le fait.



CONFESION



CONFESION



SILENCE



Cinq ans



Cinq ans



Libre



Vingt ans



SILENCE



Vingt ans



Libre



Un an



Un an

Les machines pensent-elles comme nous ?

→ Un jour, peut-être. Nous ne comprenons pas complètement le fonctionnement du cerveau, il est donc probable que nous ne puissions pas créer de machines qui pensent comme nous pour quelques décennies encore.



L'intelligence artificielle (IA), terme inventé par l'Américain spécialiste de sciences cognitives John McCarthy dans les années 1950, est une discipline qui se prête aux articles à sensation, dont les plus dystopiques nous expliquent que si nous créons des robots qui pensent comme nous, ils conquerront la planète.

En réalité, aucun ordinateur n'a encore passé le test de Turing, nommé d'après Alan Turing, mathématicien britannique et père de la théorie de l'informatique moderne, mort en 1954. Il vise à établir qu'une machine jouit d'une capacité à se comporter avec une intelligence identique à celle d'un humain.

Aujourd'hui, des machines traduisent de l'hindi vers le maori, battent les grands maîtres aux échecs, identifient des anomalies dans les IRM que les médecins ne voient pas, mais elles ne pensent toujours pas comme nous. Elles dépendent de l'apprentissage automatique ou *machine learning*, qui requiert d'énormes quantités de data, bien plus qu'un humain n'en aurait besoin, pour apprendre. De plus, chacune ne gagne qu'une compétence précise, comme jouer à un jeu vidéo précis. Ce n'est pas une

bonne voie vers la pensée humaine, flexible, qui permet de discuter aussi bien de la sophistique en géopolitique que de l'esthétique du Titien.

Produire un robot à l'intelligence semblable à la nôtre est d'une complexité démentielle. Bien des experts disent que c'est impossible, et personne n'est bien sûr que cela soit souhaitable. Néanmoins, les réseaux de neurones ont permis quelques avancées. C'est un mode de *machine-learning* conçu pour simuler le fonctionnement du cerveau. Leurs algorithmes leur permettent de repérer les motifs sous-jacents des ensembles de données sans instructions explicites. Leur structure imite donc bien, d'une certaine façon, le fonctionnement des neurones de nos cerveaux.

Les logiciels qui se servent de ces réseaux sont entraînés, par essai et erreur, à jouer à des jeux ou reconnaître des visages, par exemple. Cela ne reproduit toujours pas la pensée humaine et ses processus, qui sont conscients, autonomes et réflexifs. Un jour, une machine qui aura la capacité de prédire, désirer, croire, ce que les philosophes appellent une « théorie de l'esprit », réussira peut-être le test de Turing. Ce jour est encore loin.

TEST DE TURING



Le test de Turing est mené par un arbitre impartial. Les sujets du test, une personne et un ordinateur, ne se voient pas. Le juge entre en conversation avec les deux et tente d'identifier lequel est lequel, en se

fondant sur la qualité de leur conversation et la pertinence de leurs réponses. S'il n'y parvient pas, l'ordinateur a bien démontré qu'il se comportait comme s'il avait une intelligence humaine, il a passé le test.

Qui a atteint la suprématie quantique ?

→ Google est le premier. La firme a affirmé en 2019 que son processeur quantique Sycamore de 54 qubits a accompli en 200 secondes un calcul qui aurait pris des siècles à un ordinateur classique.



La suprématie quantique désigne le moment où un ordinateur quantique résout un problème qu'aucun ordinateur classique ne peut résoudre en un temps raisonnable. En 2019, Google a affirmé y être parvenu. Ces rivaux ont contesté cette affirmation, d'autres ont parlé d'une avancée comparable au premier vol des frères Wright.

Pourquoi est-ce important ? Il faut pour le comprendre saisir toute la complexité des ordinateurs quantiques, des appareils qui s'appuient sur l'état quantique des particules subatomiques pour traiter l'information, plutôt qu'en l'encodant en « bits » binaires (page 146) comme les ordinateurs classiques.

L'unité de mémoire de base d'un ordinateur quantique est le qubit ; on les crée à l'aide de particules subatomiques telles que des électrons et des photons. Les qubits ont des propriétés étranges. Un paquet connecté de qubits peut ainsi fournir une puissance de calcul bien plus grande que les bits habituels. Par exemple, à la différence du bit, le qubit peut être 0 ou 1, mais aussi une superposition des deux en même temps. L'intrication est une autre propriété vitale et complexe des qubits, qu'Albert Einstein avait autrefois décrite comme une « inquiétante action à distance ».

Ces propriétés sont ce qui confère aux ordinateurs quantiques leur avantage dans des situations où le nombre de combinaisons possibles est énorme. Par exemple, quand on essaie de prévoir les mouvements futurs des marchés financiers. Les ordinateurs quantiques peuvent tenir compte de toutes les possibilités simultanément, là où les ordinateurs classiques les analysent les unes à la suite des autres. Avec un ordinateur quantique, il devient facile de trouver une aiguille dans une botte de foin.

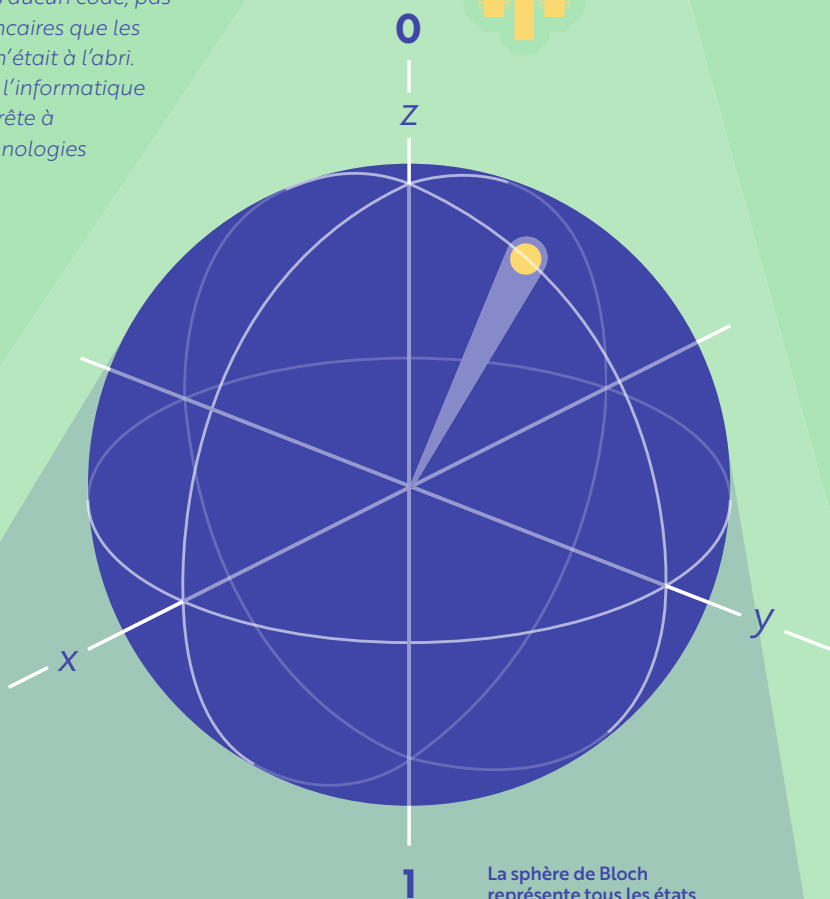
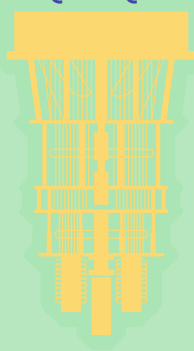
La puissance d'un ordinateur quantique croît exponentiellement avec ses qubits. Un millier de qubits intriqués représentent plus de nombres qu'il y a d'atomes dans l'Univers.

Nous avons encore un peu de temps pour que les applications pratiques des ordinateurs quantiques apparaissent. En attendant, l'état quantique des qubits les rend très fragiles, prompts à l'erreur et aux « plantages », un phénomène appelé la décohérence quantique. Le résultat, c'est qu'ils ont besoin d'un environnement très protégé, de préférence un vide extrêmement froid, pour fonctionner. Autrement dit, dans nos environnements quotidiens, les ordinateurs classiques ont encore de beaux jours devant eux.

INFORMATIQUE QUANTIQUE

Le bit d'un ordinateur classique peut prendre deux états, 0 ou 1. L'information y est transmise dans l'une de ces deux formes. Un qubit peut être un 1, un 0, ou une « superposition » des deux. C'est mathématiquement très compliqué, mais cela signifie que la capacité de l'ordinateur à traiter de l'information augmente de façon exponentielle. Le terme de « suprématie quantique » a été inventé par le physicien théoricien John Preskill en 2012. L'affirmation de Google de l'avoir atteinte, ainsi que des informations similaires venues de chercheurs chinois, ont entraîné la publication d'articles à sensation affirmant que plus aucun code, pas plus vos codes bancaires que les codes nucléaires, n'était à l'abri. La vérité, c'est que l'informatique n'est pas encore prête à remplacer les technologies de l'information classiques.

ORDINATEUR QUANTIQUE



La sphère de Bloch représente tous les états possibles d'un qubit.

ORDINATEUR CLASSIQUE



Arney, Kat. *How to Code a Human*. Londres, Welbeck Publishing, 2017

Asimov, I. *Biographical Encyclopedia of Science and Technology*. New York, Doubleday. Nouvelle édition, 1982

Bhattacharya, Ananyo. *The Man from the Future: The Visionary Life of John von Neumann*. Londres, Allen Lane, 2021

Bodanis, D. *E=mc²: A Biography of the World's Most Famous Equation*. Londres, Pan MacMillan, 2016

Chalmers, A. F. *What Is This Thing Called Science?* Cambridge, Massachusetts, Hackett Publishing Company, 4^e édition, 2013

Clegg, Brian. *Ten Patterns That Explain the Universe*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 2021

Close, F., Marten M. et Sutton C. *The Particle Explosion*. Oxford: Oxford University Press, 1986

Gleick, James. *La Théorie du Chaos*. Albin Michel, 1989

Meadows, D. H. et al. « Limites à la croissance. » rapport du Club de Rome, 1972

Pilcher, Helen. *Life Changing: How Humans are Altering Life on Earth*. Londres, Bloomsbury Sigma, 2020

Pilcher, Helen. *Mind Maps Biology: How to Navigate the Living World*. Cheltenham, The History Press, 2020

Pratt, Carl J. *Quantum Physics for Beginners: From Wave Theory to Quantum Computing. Understanding How Everything Works by a Simplified Explanation of Quantum Physics and Mechanics*. Stefano Solimito, 2021

Rae, Alastair I. M. *Quantum Mechanics*. Cambridge, Cambridge University Press, 2012

Still, Ben. *Mind Maps Physics: How to Navigate the World of Science*. Cheltenham, The History Press, 2020

Strathern, P. *Mendeleyev's Dream: The Quest for the Elements*. Londres, Pegasus Books, 2019

Wooster, Jeremy. *Quantum Physics For Beginners: The Simple Guide to Discovering How Theories of Quantum Physics Can Change Your Everyday Life. The Secrets of New Scientific Knowledge Made Uncomplicated and Practical*. États-Unis, Independently published, 2022

RESSOURCES EN LIGNE

Chemistry World
www.chemistryworld.com

Nature
www.nature.com

New Scientist
www.newscientist.com

Science Focus
www.sciencefocus.com

ÉDITION

Mark Peplow

Mark Peplow est un auteur scientifique, avec 20 ans d'expérience en tant que journaliste et éditeur. Il était autrefois rédacteur en chef des actualités de *Nature* et éditeur pour *Chemistry World*. Ses travaux concernent tout le domaine des sciences physiques : de l'astrophysique à la planétologie, en passant par la chimie et la science des matériaux, la géologie et l'écologie.

Mark a obtenu un Master en chimie à l'Université d'Oxford, ainsi qu'un doctorat en chimie organo-métallique et un Master en Communication scientifique à l'Imperial College de Londres. Il vit à Penrith, au Royaume-Uni, et passe autant de temps que possible en randonnée autour des chutes d'eau de Lake District.

ILLUSTRATION

Robert Brandt

Pendant plus de vingt ans, Robert Brandt a été illustrateur technique pour des sujets scientifiques allant de l'astrophysique à la biochimie. Basé au Royaume-Uni, il travaille avec des experts pour rendre accessibles à un très large public les sujets les plus pointus pour l'édition, l'industrie et l'éducation.

CONTRIBUTIONS

Ananyo Bhattacharya

Ananyo Bhattacharya est diplômé de physique de l'Université d'Oxford avec un doctorat en cristallographie des protéines à l'Imperial College de Londres. Auteur scientifique, il a travaillé pour *The Economist* et *Nature*.

Thomas Buggiey

Thomas Buggiey est un chercheur en post-doctorat au Centre for Electronic Imaging de l'Open University. Il connaît bien les domaines de la physique, de l'astronomie et des instruments spatiaux. Ses domaines de recherche actuels sont le développement de détecteurs montés sur des télescopes spatiaux pour la NASA et l'ESA.

Mick O'Hare

Mick O'Hare s'est spécialisé dans la rédaction scientifique et l'histoire spatiale. Ancien éditeur pour *New Scientist*, il écrit aujourd'hui pour *The Independent* et *The New European*, entre autres.

Helen Pilcher

Helen Pilcher a un doctorat de biologie cellulaire du London's Institute of Psychiatry, ainsi qu'un diplôme de psychologie et de neuroscience. Elle travaillait comme journaliste pour *Nature* et a décroché la bourse Science in Society de la Royal Society. Aujourd'hui, elle écrit et parle de la science. Elle a écrit bien des ouvrages populaires, ainsi que des articles pour le *Guardian*, *New Scientist*, et *Science Focus*.

Sheona Urquhart

Sheona Urquhart est chercheuse et conférencière en astrophysique à l'Open University. Ses domaines de recherche actuels sont les structures à grande échelle de l'Univers et les galaxies à grand décalage.

A

abiogenèse 13, 22
accélération 40
acide désoxyribonucléique *voir* ADN
acides aminés 86, 98
ADN 22, 85, 86, 94–97
Alhazen 142
allèle 86, 96
Ampère, André-Marie 38
antibiotiques 106, 112
anticorps 104, 108, 109
antigènes 104, 108
antimatière 65, 67, 74–75
Apher, Ralph 14
apprentissage automatique 141, 152–153
archées 87, 88, 89
Aristote 52
ARN (acide ribonucléique) 13, 22, 23, 108
Arnold, Frances 98
atomes 48, 50, 52–3

B

Bacon, Francis 142
bactérie 85, 87, 88, 89
bases 87, 94, 95
Big Bang 10, 12, 14–15, 74
biodiversité 120, 123, 126–127
Biot, Jean-Baptiste 58
bits 141, 146
bosons 66, 76, 80
boson de Higgs 65, 66, 77, 80–81
Broglie, Louis de 70
Bruno, Giordano 132

C

Cavendish, Henry 34
cellules 84, 87, 92–93
cellules souches 103, 105, 114
chaîne alimentaire 123, 124
champs magnétiques 28, 30
Chandrasekhar, Subrahmanyan 42
changement climatique 120, 122, 124–126
charge électrique 30, 38
Charpentier, Emmanuelle 116
chat de Schrödinger 67, 73
chiralité 49, 51, 58–59
clonage 105, 114
combustibles fossiles 122, 124, 130, 131
composés 48, 51

constantes physiques 141, 144
Crick, Francis 86, 94, 96
CRISPR-Cas9 105, 116, 117

D

Dalton, John 52
Darwin, Charles 12, 24
demi-vies 13, 18–19
Démocrite 51, 52
Descartes, René 142
désintégration radioactive 13, 18, 19, 74
détecteur de particules 66, 78
dilatation temporelle 40, 41
dilemme du prisonnier 151
Dirac, Paul 67, 68, 74
Doudna, Jennifer 116
Drake, Frank 123
Dualité onde-corpuscule 64, 67–68, 70–71

E

$E=mc^2$ 31, 40, 75
économie circulaire 121, 122, 128, 129
écosystèmes 120, 123, 124–125, 127
Eddington, Arthur 16
édition génomique 103, 105, 116–117
effet papillon 140, 148
effet photoélectrique 68, 69
Einstein, Albert 29, 31, 34, 40, 42, 68, 70
électromagnétisme 28, 30, 38–39
électrons 48, 50, 56
éléments 48, 50, 54
énergie 28, 31, 131
énergie renouvelable 121, 122, 130–131
énergie sombre 29, 30, 44, 76
Englert, François 80
entropie 31, 36
environnement 122, 124, 126, 128
enzymes 85, 86, 94, 98–9
épidémiologie 102, 104, 110–111
équation de Dirac 74
équation de Drake 121, 123, 134
équations de Maxwell 30, 38–39
espace-temps 31, 34, 35, 40, 42
espèces 10, 12, 24, 124, 126
espèces invasives 116, 123, 126
étoiles 10, 12
eucaryote 87, 88
évolution 11, 13, 24
évolution dirigée 87, 98
exoplanètes 121, 122, 132, 133, 134

expérience des fentes de Young 67, 70, 72
expériences 141, 142
extinction 120, 123, 124–5

F

Faraday, Michael 38
fermions 66, 76
Feynman, Richard 61, 68, 155
Fleming, Alexander 105, 112
fond diffus cosmologique (FDC) 10, 12, 14, 15
forces 28, 30, 80
forces fictives 32, 33
Franklin, Rosalind 86, 96
fusion 11, 12, 16, 17

G

galaxies 12, 14, 15, 29, 44–45
Galilée 35
Gauss, Carl Friedrich 38
gaz à effet de serre 120, 122
gènes 85, 86, 94, 96–97
génomique 87, 96, 97, 110, 116
gravité 30, 34–35, 40, 76
GIEC 125
Gurdon, John 114

H

Hawking, Stephen 42
He Jiankui 116
Heisenberg, Werner 72
Helmont, Jan Baptist van 90
Higgs, Peter 80
Hooke, Robert 35, 92
horizon des événements 42, 43
Hoyle, Fred 16

I

immunité 102, 104, 108–109
Informatique quantique 139, 141, 154–155
intelligence artificielle 141–142, 152–153
intrication 67, 68, 154
ions 50, 56, 57
isotopes 50, 53

J

Jenner, Edward 108

K

Kajita, Takaaki 78
Keeling, Charles 125
Kepler, Johannes 35
Koch, Robert 106
Krikalev, Sergei 41

L

Lasker, Emanuel 150
Le Verrier, Urbain 34
Leeuwenhoek, Anton Van 92
Lewis, Gilbert 56
liaisons chimiques 49, 51, 56–57
lignée germinale 105
Limites à la croissance 122, 128–129
Linné, Carl von 84, 88
Lister, Joseph 106
loi de gravitation universelle 34–35
lois de la thermodynamique 36–37
lois du mouvement 28, 30, 32–33
Lorenz, Edward 148

M

machine learning 139, 141, 152–153
maladie 107, 110–111
Mandelbrot, Benoît 148
Manin, Yuri 155
matière noire 29, 30, 44–45, 76
Maxwell, James Clerk 30, 38
McCarthy, John 152
McDonald, Arthur 78
mécanique quantique 64, 67
Mendel, Gregor 96
Mendeleïev, Dmitri 48, 51, 54
méthode scientifique 138, 140, 142–143
microbes 102, 104, 106–107
micro-ondes 10, 13
Miller, Stanley 22
modèle standard 65, 66, 76–77, 78, 80
molécules 49, 51
Morgenstern, Oskar 150
mouvement 28, 30, 32–33
mutation 87, 98, 99

N

nanotechnologie 49, 51, 60–61
Nash, John 150
Neumann, John von 140, 150
neutrinos 65, 66, 76, 78–9, 80
neutrons 48, 50
Newton, Isaac 28, 30, 32, 34

Nightingale, Florence 104, 110
nombre atomique 50, 52, 54
nombre de reproduction de base 111
noyau 48, 50, 52, 56

O

ordinateur quantique 139, 141, 154, 155
oscillations des neutrinos 78, 79

P

pandémie 104, 108, 110
particules fondamentales 65, 66, 78
Pasteur, Louis 58, 104, 106
pasteurisation 104, 106
pénicilline 103, 105, 112
Penzias, Arno 14
photons 64, 66
photosynthèse 84, 87, 90–91
physique quantique 64, 67, 68–69
Planck, Max 64, 68, 145
Platon 52
point de bascule 123, 124, 126
positons 65, 66, 74
principe d'incertitude 64, 67, 68, 72–73
principe zéro 36, 37
programmation cellulaire 105, 114–115
protéines 86, 94
protons 48, 50

Q

qubits 141, 154–5

R

R_0 (nombre de reproduction) 111
rayonnement électromagnétique 13, 29
réactions chimiques 48, 51, 98
réchauffement climatique 120, 122, 124–125
réseau de neurones 141, 152
résistance 103, 105, 112–113
révolution scientifique 138, 140
ribosomes 86, 94

S

Sagan, Carl 17
Schleiden, Matthias 92
Schwann, Theodor 92
Seaborg, Glenn 55
sélection naturelle 12, 24–5
Semmelweis, Ignaz 102, 106
séquençage 87

SETI 121, 123, 134
Shannon, Claude 146
SI voir Système d'unités SI
Snow, John 110
soupe primordiale 13, 22–23
supernova 11, 12
Système d'unités SI 138, 141, 144–145

T

tableau périodique 48, 50, 54–55
taxonomie 84, 87, 88–89
tectoniques des plaques 11, 13, 20–21
test de Turing 141, 152, 153
théorie (définition) 140
théorie de l'information 138, 141, 146–147
théorie de la relativité générale 29, 31, 34, 35, 40, 42
théorie de la relativité restreinte 29, 31, 35, 40
théorie des jeux 139, 140, 150–151
théorie du chaos 139, 140, 148–149
thermodynamique 28, 31, 36–37
tomographie par émission de positons 66, 74
trous noirs 31, 42–43
Turing, Alan 141, 152

U

unités (de mesure) 141
Urey, Harold 22

V

vaccins 108, 109
vie extraterrestre 123, 132, 134–135
Virchow, Rudolf 92
vitesse de la lumière 40–41

W

Watson, James 86, 94, 96
Weaver, Warren 146
Wegener, Alfred 20
Wilson, Robert 14
Woese, Carl 88

Y

Yamanaka, Shinya 114
Young, Thomas 70

Z

zone Boucle d'Or 123, 132–133
Zwicky, Fritz 45

REMERCIEMENTS

Je souhaite ici remercier notre infatigable éditrice d'acquisition Kate Duffy pour tous les conseils qu'elle a nous a apportés dans la création de ce livre, notre éditrice de réalisation Karen Packham pour sa patience et l'attention incroyable qu'elle porte aux détails. Je remercie tous les coauteurs de ce livre pour leurs connaissances dans tous les domaines scientifiques abordés qui vont bien au-delà de mon expertise. J'embrasse mes filles Maia et Emily, qui ont été des testeuses enthousiastes pour bien des idées que ce livre contient. Surtout, je remercie ma femme Lianne, qui a rendu tout cela possible.

Mark Peplow

