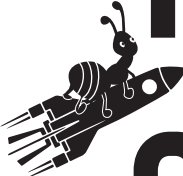


Baptiste Arnaud

Niels Dutrievoz

Arthur Gublin

DE LA FOURMI À LA GALAXIE



100 QUESTIONS POUR COMPRENDRE
LA VIE, LA TERRE, L'INFINI
ET AU-DELÀ



Par les scientifiques du compte
[@ordres.de.grandeur](https://twitter.com/ordres.de.grandeur)

Vuibert

DE LA
FOURMI
À LA
GALAXIE

Couverture, principe graphique, mise en page et illustrations : Esther Pailhou

Images : adaptées de Adobe Stock

ISBN : 978-2-311-15205-0

© Vuibert, octobre 2026

5, allée de la 2^e D.B.

75015 Paris

www.vuibert.fr



Vuibert s'engage
durablement
pour l'environnement



Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit aux ayants cause, est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal. Ce livre ne peut être reproduit ni utilisé à des fins d'entraînement de systèmes d'intelligence artificielle. La fouille de textes et de données est interdite conformément à l'article 4(3) de la Directive (UE) 2019/790.

Baptiste Arnaud

Niels Dutrievoz

Arthur Gublin

DE LA
FOURMI
À LA
GALAXIE

**100 QUESTIONS POUR COMPRENDRE
LA VIE, LA TERRE, L'INFINI
ET AU-DELÀ**

Vuibert

Nous tenons à remercier notre éditrice, Marion Chatizel, qui nous a fait confiance pour la rédaction de notre premier livre, ainsi qu'Esther Pailhou, qui en a réalisé la maquette. Nous remercions également Alexandre Jeanneau, dont l'ouvrage Ordres de grandeur et méthode de Fermi nous a inspirés et beaucoup appris. Et bien sûr, toutes les personnes qui nous ont soutenus et qui ont relu attentivement ce manuscrit : Emilien, Alain et Yannick Arnaud, Emma de Araujo, Jeanne Bosc Bierne, Marie Bouchet, Sébastien Carassou, Lorentz Dutrievoz, Mathis Gublin, Ulysse Gantois, Eliot Jager, Charlotte Janson, Rodolphe Meyer, Pierre Dutrievoz et Cécile Pelaudeix.

*

Un mot sur la méthode. Dans ce livre, nous arrondissons, simplifions et choisissons parfois une hypothèse parmi plusieurs. Le but n'est pas toujours d'obtenir le chiffre exact, mais de trouver le bon ordre de grandeur. Un ordre de grandeur correspond à une puissance de dix : se tromper d'un facteur 10, c'est se tromper d'un ordre de grandeur; se tromper d'un facteur 2, c'est rester dans la même échelle. Parfois, les nombres évoluent avec le temps, une moyenne peut cacher de grands écarts, et certains aspects du monde qui nous entoure sont mal cernés par des approches quantitatives. Les ordres de grandeur ne disent donc pas tout. Mais, souvent, ils permettent de comprendre l'essentiel. Les données chiffrées de ce livre s'appuient sur des publications scientifiques, dont vous trouverez les références en fin d'ouvrage. Malgré nos relectures attentives, il se peut que des coquilles ou des erreurs nous aient échappé, et nous nous en excusons par avance.

Si vous avez des interrogations, des remarques ou des retours, vous pouvez nous écrire à l'adresse suivante : ordresdegrandeur@gmail.com.

SOMMAIRE

Introduction.....	9
-------------------	---

CHAPITRE 1. Des atomes aux cellules

1. À quoi ressemble un atome ?	12
2. Quelle est la masse d'un atome ?	14
3. Du Wi-Fi aux rayons X : qu'est-ce qui change ?	16
4. Comment mesure-t-on vraiment le temps ?	20
5. Êtes-vous plutôt T-Rex ou César ?	23
6. Un univers d'atomes dans une bille ?	27
7. Quelle est la taille d'un virus ?	29
8. Et si les virus de l'océan se tenaient par la main ?	31
9. Combien notre corps possède-t-il de cellules ?	33
10. Combien de fois une cellule peut-elle se diviser ?	36
11. Quelle est la longueur de notre ADN ?	38
12. Combien de bactéries y a-t-il dans un yaourt ?	40

CHAPITRE 2. Les mystères du corps humain

1. Quelle est la longueur totale de nos vaisseaux sanguins ?	44
2. Quelle est la surface de nos poumons ?	47
3. Combien de piles faut-il pour alimenter un humain ?	49
4. Peut-on voir la muraille de Chine depuis la Lune ?	52
5. Quelle est la capacité de stockage de notre cerveau ?	54
6. Combien de cheveux avons-nous sur la tête ?	56
7. Combien de secondes y a-t-il dans une vie ?	58
8. À quel point sommes-nous exposés aux rayons ionisants ?	60
9. Quelle est la longueur totale des neurones de notre cerveau ?	64
10. Combien de globules blancs produisons-nous par seconde ?	67
11. Combien de mutations dans une cellule cancéreuse ?	69
12. Combien de générations depuis les premiers humains ?	71
13. Quelle était l'espérance de vie à la Préhistoire ?	73
14. Combien d'enfants ont été sauvés grâce aux vaccins ?	76
15. Le cancer, une maladie des personnes âgées ?	79

CHAPITRE 3. Le grand inventaire du vivant

1. Combien pèse la population mondiale de fourmis ?	84
2. Combien d'arbres y a-t-il sur Terre ?	86
3. Quelle est la taille du plus grand être vivant du monde ?	88
4. Combien d'espèces vivent sur Terre ?	90
5. Combien d'insectes habitent dans notre jardin ?	92
6. Combien d'araignées vivent chez nous ?	94
7. Combien de feuilles y a-t-il sur un arbre ?	96
8. Combien de fleurs sont butinées pour faire un pot de miel ?	98
9. Combien de grains de blé se cachent dans notre baguette de pain ?	100
10. Quelle est la masse d'une mouche ?	102
11. Qui est responsable du massacre invisible des océans ?	104
12. Quelle est la masse de tous les êtres vivants sur Terre ?	106

CHAPITRE 4. La planète Terre

1. Quelle est la profondeur des océans ?	110
2. Quel est le volume des océans ?	112
3. Quelle est la masse d'un nuage ?	114
4. Combien d'orages éclatent chaque jour ?	116
5. À quelle vitesse grandit une stalagmite ?	119
6. Quel est l'âge de l'eau ?	121
7. À quelle vitesse se déplacent les plaques tectoniques ?	124
8. Quel est le glacier le plus rapide ?	126
9. Et si toutes les glaces sur Terre fondaient ?	128
10. Quelle est l'éruption volcanique la plus violente de l'histoire humaine ?	130
11. Quel est le plus grand cataclysme de l'histoire de la Terre ?	132
12. Et si l'histoire de la Terre se déroulait en 24 heures ?	134
13. Une journée dure-t-elle vraiment 24 heures ?	136
14. Quelle est la plus vieille glace sur Terre ?	139
15. Quelle est la plus haute montagne du monde ?	141
16. Quelle quantité de pluie reçoit la France chaque année ?	144

CHAPITRE 5. L'anthropocène

1. Le climat a-t-il toujours changé ?	148
2. À quoi ressemble un monde à - 6 °C ?	151
3. Quel destin tragique pour les glaciers ?	153
4. Pourquoi chaque kilo de CO ₂ compte ?	155
5. L'Antarctique fond-il vraiment ?	157
6. Pourquoi le niveau des mers monte-t-il ?	159
7. Le pergélisol : une menace climatique ?	161
8. Quelle est l'empreinte carbone moyenne d'un Français ?	163
9. Pourquoi la viande pollue-t-elle autant ?	166
10. Combien de CO ₂ les humains émettent-ils chaque année ?	168
11. La France : 1 % des émissions de CO ₂ ?	170
12. Quelle est la masse de tous les plastiques sur Terre ?	172
13. Quelle est l'ampleur de la pollution plastique des océans ?	174
14. Combien y a-t-il de micro-plastiques dans les océans ?	177
15. Combien d'eau manque-t-il à l'humanité ?	179
16. Pourquoi l'avion réchauffe-t-il le climat ?	181
17. Quel est le rythme de la disparition des forêts ?	184

CHAPITRE 6. Énergie et ressources

1. Quelle quantité de pétrole extrait-on dans le monde ?	188
2. Qu'est-ce qu'un litre de carburant ?	190
3. Quelles sont les émissions de CO ₂ de l'électricité ?	192
4. Vivons-nous comme des pharaons ?	194
5. Tout l'or du monde en un cube ?	196
6. Combien d'énergie y a-t-il dans 1 gramme d'uranium ?	198
7. Quelle est la puissance d'un réacteur nucléaire ?	201
8. Quel est l'ordre de grandeur de l'énergie solaire ?	205
9. Quelle est la puissance d'une éolienne ?	208
10. Combien d'énergie stocke un barrage hydroélectrique ?	212

CHAPITRE 7. Du système solaire à l'Univers

1. Quelle est la distance entre la Terre et la Lune ?	218
2. Quelle est la distance entre la Terre et le Soleil ?	220
3. Pourrions-nous sortir de notre système solaire ?	223
4. Un père peut-il être plus jeune que son fils ?	226
5. Quelle est la durée de vie du Soleil ?	228
6. Qu'est-ce qu'une année pour le Soleil ?	231
7. Combien y a-t-il d'étoiles dans l'Univers ?	234
8. Quel est le nombre de planètes semblables à la Terre ?	237
9. Quelle est la taille de l'Univers ?	240
10. Quelle est l'étoile la plus lointaine ?	243
11. Quel est l'âge de l'Univers ?	245

CHAPITRE 8. La science de l'imaginaire

1. Quelle est la profondeur de la Moria ?	250
2. Combien de ballons faut-il pour soulever une maison ?	251
3. Quelle énergie faut-il à Yoda pour soulever le vaisseau de Luke ?	253
4. Quelle est la puissance de l'Étoile noire ?	255
5. Quelle est la température d'un dragon de <i>Game of Thrones</i> ?	258
6. Peut-on atteindre l'âge canonique d'Aragorn ?	261
7. Quelle est la vitesse du père Noël ?	264
Sources	266

INTRODUCTION

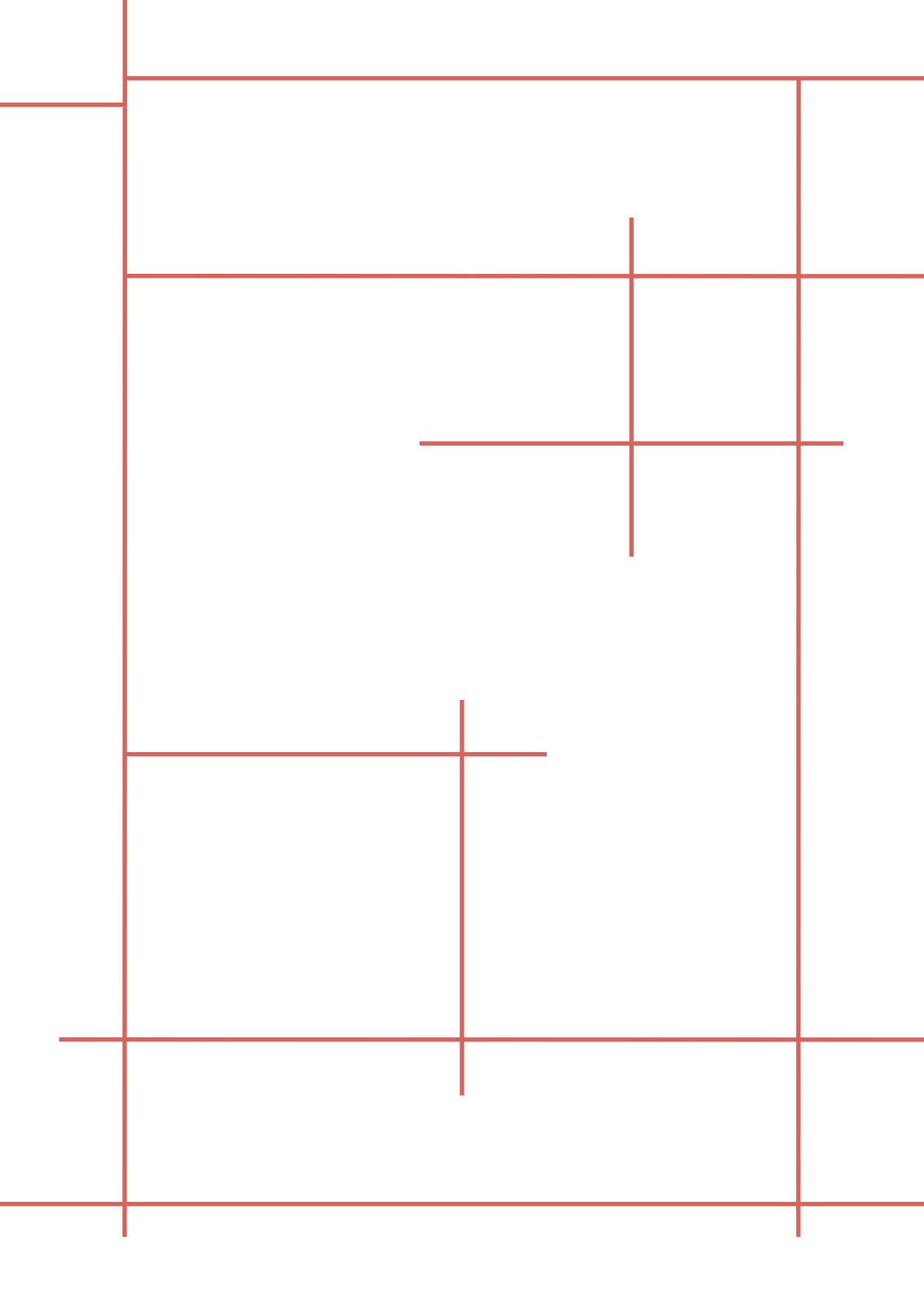
«COMBIEN Y A-T-IL DE FOURMIS SUR TERRE?»

Nous sommes trois amis, Arthur, Baptiste et Niels, et c'est le genre de questions que nous aimons nous poser lors de nos randonnées en montagne. Quelle est la masse de ce nuage? Combien y a-t-il d'aiguilles sur ce sapin? Derrière elles se cache un raisonnement puissant : celui des ordres de grandeur.

On ne cherche pas le chiffre exact, mais la bonne échelle. Un gros nuage d'orage peut peser autant que la pyramide de Kheops. Le sapin porte un million d'aiguilles. Et les fourmis, elles, sont 20 millions de milliards à parcourir la surface de la Terre. Ce jeu entre amis est devenu *Ordres de Grandeur*, notre chaîne de vulgarisation scientifique sur les réseaux sociaux.

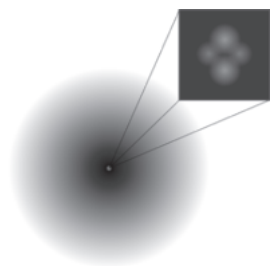
L'histoire de ce livre a commencé sur les bancs de l'École normale supérieure de Paris-Saclay, où nous nous sommes rencontrés. Cela fait quatre ans, en parallèle de nos études, que nous réalisons de la vulgarisation scientifique. Depuis que nous sommes jeunes, les livres de science nous ont bercés; aujourd'hui, nous changeons de format pour fixer sur le papier les ordres de grandeur qui nous passionnent.

Au fil de ces huit chapitres, nous répondons à des questions simples, étranges ou vertigineuses. Nous vous proposons un voyage en 100 ordres de grandeur, de l'infiniment petit à l'infiniment grand. Des atomes aux écosystèmes, des défis de l'humanité aux confins de l'Univers. Certains épisodes s'appuient sur ceux qui les précèdent, mais vous pouvez tout aussi bien ouvrir le livre au hasard et choisir les thèmes qui vous plaisent. Et nous espérons qu'au fil de ces pages, vous prendrez autant de plaisir que nous à explorer la beauté du monde qui nous entoure.
Bonne lecture!



CHAPITRE 1

Des atomes aux cellules



1. À QUOI RESSEMBLE UN ATOME ?

L'**atome** est la plus petite unité de matière qui conserve les propriétés chimiques d'un élément. C'est le constituant élémentaire de la matière, aussi bien solide, liquide, que gazeuse. On imagine souvent un atome comme un petit système solaire, avec des **électrons** qui gravitent autour d'un **noyau**, comme des planètes autour du Soleil. Mais à quoi cela ressemble-t-il vraiment ?

UN ATOME, C'EST SURTOUT DU VIDE

Le noyau d'un atome mesure environ **10^{-15} m**, alors que l'atome lui-même fait environ **10^{-10} m**. Cela signifie que l'atome est **100 000 fois** plus grand que son noyau. Autrement dit, si l'atome faisait la taille de Paris, son noyau serait une boule de pétanque. Contrairement à l'image classique, les électrons ne sont pas vraiment des « petites billes » qui se promènent autour du noyau. Ils forment plutôt ce qu'on appelle un **nuage de probabilité**. Concrètement, nous connaissons seulement les zones où les électrons ont une probabilité de se trouver. Ce nuage occupe le volume de l'atome : c'est ce qui lui donne sa taille, et qui est responsable des interactions chimiques entre atomes.

QUE CONTIENT LE NOYAU ?

Le noyau, lui, est constitué de **protons** (chargés positivement) et de **neutrons** (électriquement neutres, comme leur nom l'indique). Ils sont eux-mêmes constitués de particules, les **quarks**. Les protons et les neutrons ont une taille bien définie, mais ce n'est pas le cas des quarks, qui sont les briques élémentaires de la matière, sans structure ni étendue connues.

L'ORDRE DE GRANDEUR À RETENIR

Un atome est 100 000 fois plus grand que son noyau, et il est presque entièrement vide.

L'atome qu'on imaginait

Cette image de l'atome comme un petit système solaire date du début du ^{xx}e siècle. En 1911, le physicien néo-zélandais Ernest Rutherford mit en évidence l'existence d'un noyau minuscule et massif. Il imagina alors des électrons tournant autour du noyau, comme les planètes autour du Soleil.

Mais très vite, un problème apparut. Selon les lois de l'électromagnétisme, un électron en orbite correspond à une particule chargée et accélérée, qui émet de l'énergie. Donc l'électron devrait petit à petit perdre de l'énergie et finir par s'écraser sur le noyau. En d'autres termes, pour que cette représentation soit valable, les atomes devraient être instables. C'est ce paradoxe qui mena les physiciens à abandonner le modèle de Rutherford.

À partir de 1913, le Danois Niels Bohr attribua des orbites précises aux électrons, puis Werner Heisenberg et Erwin Schrödinger découvrirent qu'à l'échelle atomique, les particules ne suivent pas de trajectoires. C'est le début de la physique quantique, selon laquelle les électrons n'orbitent pas, mais existent plutôt sous forme de nuages de probabilité.



FLASH
SCIENCE

2. QUELLE EST LA MASSE D'UN ATOME ?

Un seul grain de riz contient **2 000 milliards de milliards d'atomes** (2×10^{21}). Le kilogramme est une unité complètement inadaptée pour parler de la masse atomique. Les physiciens en utilisent donc une autre : l'*unité de masse atomique*, notée **u**. La plupart des atomes pèsent entre **1** et quelques centaines de u :

$$1 \text{ u} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

COMMENT PESER UN ATOME ?

Une question se pose : comment mesurer une masse aussi incroyablement faible ? On ne peut pas peser un atome sur une balance. Pourtant, nous connaissons aujourd'hui sa masse avec précision. Le principe repose sur la deuxième loi de Newton :

$$\text{Force} = \text{masse} \times \text{accélération}$$

À force égale, un objet léger accélère davantage qu'un objet lourd. Imaginez deux chariots : l'un est vide, l'autre rempli de pierres. Si vous les poussez avec exactement la même force, le chariot vide accélérera beaucoup plus que le chariot chargé. **La masse se révèle par le mouvement.**

On applique la même idée aux atomes quand on utilise un *spectromètre de masse*. L'idée est de les pousser avec la force magnétique d'un aimant. Le spectromètre de masse fonctionne en trois étapes. Pour mettre en mouvement les atomes, ce qui n'est pas évident, il faut les *ioniser* : on leur ajoute ou on leur enlève des électrons afin qu'ils deviennent des *ions* (Na^+ , K^+ , Cl^- , etc.), porteurs d'une charge électrique. À l'aide d'un *champ électrique*, on peut ensuite les mettre en mouvement en ligne droite. Enfin, on les fait passer

dans le *champ magnétique* d'un aimant qui dévie leur trajectoire : les atomes légers sont déviés plus fortement que les atomes les plus lourds. En mesurant très précisément leur trajectoire, on peut calculer leur masse.

UNE UNITÉ PENSÉE POUR LES ATOMES

L'unité de masse atomique u , aussi appelée *dalton* (Da), n'a pas été choisie au hasard. Par définition, un atome de carbone 12 pèse exactement **12 u** (soit $1,99 \times 10^{-26}$ kg).

- Électron $\approx$ **0,00055 u**
- Proton $\approx$ **1 u**
- Neutron $\approx$ **1 u**

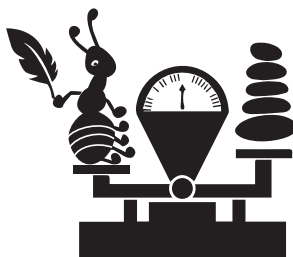
Et pour quelques atomes :

- Hydrogène $\approx$ **1 u**
- Carbone 12 = **12 u**
- Carbone 14 $\approx$ **14 u**
- Oxygène $\approx$ **16 u**
- Uranium 238 $\approx$ **238 u**

On remarque que le proton et le neutron pèsent presque exactement **1 u**, tandis que l'électron est **1 836 fois plus léger** qu'un proton. C'est pourquoi plus de **99,9 %** de la masse d'un atome est concentrée dans son noyau.

L'ORDRE DE GRANDEUR À RETENIR

**Un atome d'hydrogène a une masse de 1 u
et un atome de carbone a une masse de 12 u.**



3. DU WI-FI AUX RAYONS X : QU'EST-CE QUI CHANGE ?

À la seconde précise où vous lisez ces mots, des ondes vous traversent : la radio, le Wi-Fi, la lumière de votre lampe, le rayonnement du Soleil... Toutes ces ondes sont de même nature : **électromagnétiques**. Une onde inoffensive comme le Wi-Fi et une onde dangereuse comme les UV diffèrent surtout par une grandeur : la **longueur d'onde**.

QU'EST-CE QUE LA LONGUEUR D'ONDE ?

Une onde est une perturbation qui se propage dans l'espace et le temps. On peut se la représenter comme une succession de vagues. La longueur d'onde λ correspond donc à la distance au bout de laquelle l'onde se répète, soit la « distance entre deux vagues ». L'énergie transportée par un grain de lumière (un **photon**) tient dans la formule suivante :

$$E = hc/\lambda$$

avec $h \approx 6,6 \times 10^{-34}$ J.s (la constante de Planck)

et $c \approx 3 \times 10^8$ m/s (la vitesse de la lumière dans le vide)

Seule la longueur d'onde λ peut varier, car h et c sont des constantes. L'énergie dépend donc uniquement de λ : plus l'onde est courte, plus le photon est énergétique. Pour calculer facilement l'énergie d'une onde grâce à sa longueur d'onde λ en nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), on utilise l'unité d'énergie électron-volt ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$), plus adaptée à la petite échelle des ondes :

$$E(\text{eV}) = \frac{hc}{\lambda(\text{nm})} \approx \frac{1240}{\lambda(\text{nm})}$$

LA COULEUR, C'EST DE LA LUMIÈRE

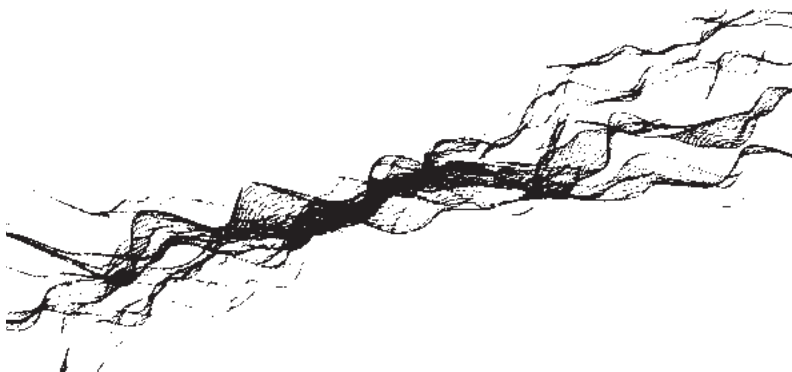
Prenons l'exemple des couleurs. Chacune des couleurs de l'arc-en-ciel possède une longueur d'onde. Le rouge a une longueur d'onde de **700 nm** et le bleu de **450 nm**. On peut donc calculer leur énergie :

$$E(\text{rouge}) \approx \frac{1240}{700} \approx 1,8 \text{ eV} \quad \text{et} \quad E(\text{bleu}) \approx \frac{1240}{450} \approx 2,8 \text{ eV}$$

Les photons bleus possèdent environ **60 % d'énergie** de plus que les rouges.

LA GRANDE FAMILLE DES ONDES

Plus l'onde est petite, plus elle a d'énergie, et plus elle modifie la matière. Voici le spectre électromagnétique en ordres de grandeur : des ondes géantes capables de traverser l'eau, jusqu'aux minuscules rayons gamma du lointain cosmos.



L'ORDRE DE GRANDEUR À RETENIR

Un photon visible a une énergie de 2 eV,
soit 200 000 fois plus qu'un photon de Wi-Fi.

LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

Ondes	Exemple	λ	Énergie d'un photon	Effet sur l'homme
Ondes VLF	Communication avec les sous-marins	30 km	10^{-11} eV	Aucun effet sanitaire prouvé
Ondes radio	Télévision	1 m	10^{-6} eV	Aucun effet sanitaire prouvé
Micro-ondes	5G/Wi-Fi	10 cm	10^{-5} eV	Aucun effet sanitaire prouvé
Infra-rouge	Infrarouge (chaleur)	10 μ m	0,1 eV	Onde que l'on ressent sous forme de chaleur
Domaine visible	Couleurs de l'arc-en-ciel	400-700 nm	2 eV	Onde qui permet la vision et qui, à forte intensité, peut endommager la rétine
Ultra-violets	Soleil	300 nm	4 eV	Onde absorbée par la peau, qui provoque des dommages sur l'ADN, des coups de soleil et des cancers de la peau
Rayons X	Radio médicale	0,1 nm	12 keV	Onde qui traverse jusqu'aux organes, provoque des dommages sur l'ADN, différents cancers, et peut être mortelle à très forte dose
Rayons gamma d'origine nucléaire	Radioactivité	1 pm	1 MeV	Onde qui traverse le corps entier, provoque des dommages sur l'ADN, des cancers, et est mortelle à forte dose
Rayons gamma cosmiques	Trous noirs actifs	10^{-18} m	1 TeV	Onde arrêtée par l'atmosphère

Une onde ou des grains ?

Pendant des siècles, les scientifiques se sont disputés sur la nature de la lumière. Au ^{xvii}e siècle, Newton la voyait comme un jet de minuscules grains tandis que son rival Huygens la pensait comme une onde. L'onde l'emporta au ^{xix}e siècle, jusqu'à ce que tout se complique...

En 1900, Max Planck chercha à expliquer la couleur des objets très chauds, qu'on appelle en physique des « corps noirs », comme le fer rouge ou le Soleil. Échouant à trouver la réponse à l'aide des équations de la physique classique, Planck introduisit alors une nouvelle hypothèse, selon laquelle la matière n'échange son énergie avec la lumière que par des paquets d'énergie, les quanta. Il montra que l'énergie de ces quanta est proportionnelle à la fréquence de la lumière, d'où l'équation $E = h\nu$, qui est équivalente à la formule $E = hc/\lambda$. Cette idée lui valut le prix Nobel, et l'une des grandes constantes fondamentales de l'Univers porte aujourd'hui son nom : h , la constante de Planck.

En 1905, Einstein alla plus loin dans l'interprétation des quanta de Planck : il interpréta la lumière comme étant constituée de grains, qu'on appellera plus tard photons, portant chacun l'énergie $E = h\nu$. Et c'est d'ailleurs pour cette idée qu'il reçut le prix Nobel en 1921.

La conclusion de la physique quantique est que la lumière possède une double nature : elle se comporte à la fois comme une onde et comme une particule. On appelle cela la dualité onde-corpuscule. Et la formule $E = hc/\lambda$ relie précisément ces deux natures : la longueur d'onde côté onde, l'énergie côté corpuscule.



FLASH
SCIENCE

4. COMMENT MESURE-T-ON VRAIMENT LE TEMPS ?

Personne n'a jamais vu le temps. On ne le touche pas, on ne le pèse pas, on ne le met pas en bouteille. Alors, que signifie « mesurer le temps » ?

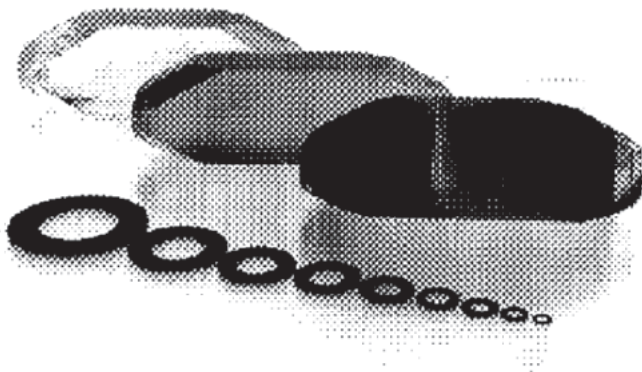
Quand on compte le temps, on mesure un mouvement comparé à un autre : le Soleil qui revient au zénith, un pendule qui balance, du sable qui s'écoule. Mesurer le temps, c'est avant tout compter les battements d'un mouvement qu'on espère régulier.

COMMENT MESURER LE TEMPS ?

Pendant des millénaires, le ciel fut le métronome de l'humanité. Le Soleil rythmait les jours, la Lune les mois, et les saisons cadençaient l'année. Mais pour découper la journée, il fallait des instruments. Le premier fut le cadran solaire, inventé vers 3000 av. J.-C., qui suivait l'ombre du Soleil. Arriva ensuite la clepsydre, qui mesurait le temps grâce à l'écoulement de l'eau.

Au Moyen Âge, les horloges mécaniques virent le jour en Europe. Pour la première fois, on mesura le temps avec une machine autonome : des poids, des roues dentées, un mécanisme qui libère le mouvement petit à petit. Cependant, ces horloges restaient très approximatives : elles pouvaient se dérégler de plusieurs minutes par jour.

Le vrai bond technologique survint en 1656, avec le *pendule de Huygens*, un balancier qui oscille régulièrement et devient le cœur de l'horloge. Le progrès fut énorme, car l'erreur tomba à quelques secondes par jour. C'est à partir de ce moment que les horloges devinrent suffisamment précises pour afficher les secondes.



En 1927, furent créées les premières horloges à quartz. Quand on applique un courant électrique à un cristal de quartz, il vibre très régulièrement : c'est ce qu'on appelle l'*effet piézoélectrique*. La fréquence de cette vibration peut être mesurée par un circuit électronique : on a alors un nouveau métronome, beaucoup plus précis. On remplace ainsi les roues, les poids et les balanciers par un cristal minuscule. Les horloges gagnèrent alors en compacité et en fiabilité, devenant par là même plus faciles à produire. Ce principe est encore utilisé de nos jours dans les montres ou les ordinateurs, par exemple. Mais le quartz a un défaut : deux cristaux taillés ont des différences et ne vibrent jamais exactement de la même façon. La quête du métronome idéal ne s'est pas arrêtée là.

UNE HORLOGE ATOMIQUE ?

La physique quantique a démontré qu'un atome peut absorber des ondes électromagnétiques à seulement certaines fréquences très précises, qui sont celles où l'atome bascule entre deux niveaux d'énergie : on appelle cela une *transition*. En 1949, on commença à utiliser ces fréquences pour calibrer des nouvelles horloges, dites *horloges atomiques*.

Les scientifiques choisirent une transition du **césium 133**, dont la fréquence vaut exactement 9 192 631 770 Hz, soit environ **9 milliards de « battements » par seconde**.

Cette fréquence a une propriété qu'aucun pendule ni aucun quartz ne possèdera jamais : elle est identique pour tous les atomes de césium 133 de l'Univers. Nous avons donc notre étalon absolu. La précision est immense : l'horloge au césium NIST-F4 ne dérive que de **1 seconde** tous les **100 millions d'années**.

QU'EST-CE DONC QU'UNE SECONDE ?

Historiquement, une seconde était définie comme la fraction d'un jour. Mais depuis 1967, la seconde est désormais déterminée à partir du césium 133. Dès que le signal associé à cette transition a effectué **9 192 631 770 périodes**, le compteur de l'horloge déclare : « une seconde vient de passer ». L'atome de césium 133 ne fait donc pas que donner la seconde, il la définit.

L'ORDRE DE GRANDEUR À RETENIR

**Une seconde est le temps que met
un atome de césium 133 pour osciller
environ 9 milliards de fois.**



5. ÊTES-VOUS PLUTÔT T-REX OU CÉSAR ?

Les atomes de notre corps ont une histoire. Formés à la naissance de l'Univers ou nés au cœur d'une étoile, ils ont voyagé à travers les roches, l'eau, l'air, et dans des êtres vivants, avant d'arriver jusqu'à nous par la nourriture que nous mangeons. Rien de ce qui nous compose n'est neuf. Alors posons une question absurde. Prenons le dernier tyrannosaure, mort il y a **66 millions d'années**. Que reste-t-il de lui dans notre corps ?

LE CARBONE SUR TERRE

La matière vivante est composée notamment d'atomes de carbone. Nous allons donc suivre le devenir des atomes de carbone du T-Rex sur Terre. Le carbone de la Terre se répartit dans quelques grands réservoirs :

- l'atmosphère : **885 milliards de tonnes**
- la biomasse vivante terrestre (végétation, animaux, humains) : **450 milliards de tonnes**
- les sols : **3 100 milliards de tonnes**
- les océans et leurs sédiments : **40 000 milliards de tonnes**
- les roches : **75 000 000 milliards de tonnes**

Les roches emprisonnent donc **99,94 %** du carbone. Les **0,06 %** restants qui sont à notre portée (atmosphère, océans, plantes, animaux...) sont appelés le *carbone actif*. Il pèse **44 000 milliards de tonnes** (4×10^{16} kg).

LE CARBONE DES HUMAINS

Les glucides, les protéines... tous nos aliments contiennent des atomes de carbone qui viennent constituer notre corps : on mange



ainsi **300 g** de carbone par jour. La même quantité de carbone est expulsée chaque jour de notre corps, principalement via le CO_2 que nous expirons. Un humain de **60 kg** contient environ **10 kg** de carbone.

La fraction du carbone de notre corps présente dans le carbone actif sur Terre répond à l'équation suivante :

$$f_{\text{humain carbone actif}} = \frac{\text{masse carbone humain}}{\text{masse carbone actif}} = \frac{10}{4 \times 10^{16}} \approx 2 \times 10^{-16}$$

Nous possédons dans notre corps **$2 \times 10^{-14} \%$** du carbone actif terrestre.

SUR LA PISTE DES ATOMES DE T-REX

Un T-Rex avait une masse d'environ **7 tonnes**, composé comme nous d'à peu près **18 %** de carbone, soit **1,3 tonne**. Nous pouvons déterminer le nombre d'atomes de carbone du T-Rex ($N_{\text{carbone T-Rex}}$) en divisant sa masse par la masse d'un atome de carbone (voir p. 15) :

$$N_{\text{carbone T-Rex}} = \frac{\text{masse carbone T-Rex}}{\text{masse d'un atome de carbone}} = \frac{1,3 \times 10^3}{1,99 \times 10^{-26}} \approx 6,5 \times 10^{28} \text{ atomes}$$

Après sa mort, il y a **66 millions d'années**, son corps s'est décomposé : ses atomes de carbone se sont d'abord mélangés dans l'atmosphère, puis dans les océans, les plantes et le sol. Au cours des millions d'années, les atomes de carbone du T-Rex se

sont répartis dans les réservoirs : **99,94 %** de ses atomes se sont enfouis dans les roches et **0,06 %** sont devenus du carbone actif. Le nombre d'atomes de carbone du T-Rex dans le carbone actif ($N_{\text{carbone T-Rex actif}}$) est donc :

$$N_{\text{carbone T-Rex actif}} = 0,0006 \times N_{\text{carbone T-Rex}} = 0,0006 \times 6,5 \times 10^{28} \approx 4 \times 10^{26} \text{ atomes}$$

Pour trouver le nombre d'atomes de carbone du T-Rex que nous possédons dans notre corps, il suffit de multiplier le nombre d'atomes de T-Rex dans le carbone actif par la fraction d'atomes de carbone actif total dans notre corps :

$$N_{\text{carbone T-Rex humain}} = N_{\text{carbone T-Rex actif}} \times f_{\text{humain carbone actif}} = 4 \times 10^{26} \times 2 \times 10^{-16} \approx 10^{10} \text{ atomes}$$

Ainsi, chacun d'entre nous porte environ **10 milliards d'atomes** du dernier tyrannosaure. Comme le raisonnement vaut pour n'importe quel dinosaure de même calibre, une conclusion s'impose : on possède une quantité immense d'atomes de tous les gros dinosaures ayant jamais vécu.

QU'AVONS-NOUS EN NOUS DE JULES CÉSAR ?

Ce raisonnement ne se limite pas aux dinosaures, il fonctionne à presque toutes les échelles de temps. Le dernier souffle de Jules César, poignardé en - 44, vous évoque sans doute quelque chose. L'homme d'État aurait murmuré à Brutus : « Toi aussi, mon fils ! » (« *Tu quoque, mi fili* ! », en VO). Ce dernier souffle correspond à environ un demi-litre d'air, contenant à peine **10 mg de carbone** sous forme de CO_2 :

$$N_{\text{souffle César}} = 5 \times 10^{20} \text{ atomes}$$

Ces atomes ont été mélangés à l'atmosphère en 2 ans, puis dilués dans tout le carbone actif pendant 20 siècles. On peut refaire exactement le même calcul pour trouver le nombre d'atomes de carbone du dernier souffle de César dans notre corps ($N_{\text{carbone César humain}}$) :

$$N_{\text{carbone César humain}} = N_{\text{souffle César}} \times f_{\text{humain carbone actif}} = 5 \times 10^{20} \times 2 \times 10^{-16} \approx 10^5 \text{ atomes}$$

LA SCIENCE N'A JAMAIS ÉTÉ AUSSI VERTIGINEUSE !

Saviez-vous que nous portons en nous 10 milliards d'atomes du dernier tyrannosaure ?

Que notre ADN, une fois déroulé, permettrait de relier 50 fois la Terre au Soleil ?

Qu'un gros nuage d'orage pèse 1 million de tonnes ?

Qu'il y a 10 fois plus d'arbres sur Terre que d'étoiles dans notre galaxie ?

Que le plastique de la planète pèse 2 fois plus lourd que l'ensemble des animaux ?

Qu'un terrain de foot de forêt tropicale disparaît toutes les 3 secondes ?

Que le père Noël file à la vitesse d'une comète ?

En 100 histoires courtes et rigoureusement documentées, trois jeunes scientifiques nous emmènent à la découverte des ordres de grandeur qui structurent notre monde et ses grands enjeux actuels. Santé, faune, flore, climat, pollution, énergie, technologies, espace... De la fourmi à la galaxie, chaque chapitre répond à une question simple et révèle une réalité bien souvent surprenante !

**Un livre pour mesurer, comparer, s'étonner...
et ne plus jamais regarder le monde
de la même façon !**



Créateurs du compte Instagram **@ordres.de.grandeur**, les auteurs se sont rencontrés à l'ENS Paris-Saclay. **Baptiste Arnaud**, agrégé de biochimie-génie biologique, prépare un doctorat d'immunologie à l'Institut Pasteur. **Niels Dutrievoz** est docteur en modélisation du climat au LSCE de l'université Paris-Saclay. **Arthur Gublin** est doctorant en physique atomique au CEA.

Vuibert.fr



21,90 €

978-2-311-15205-0



9 782311 152050