

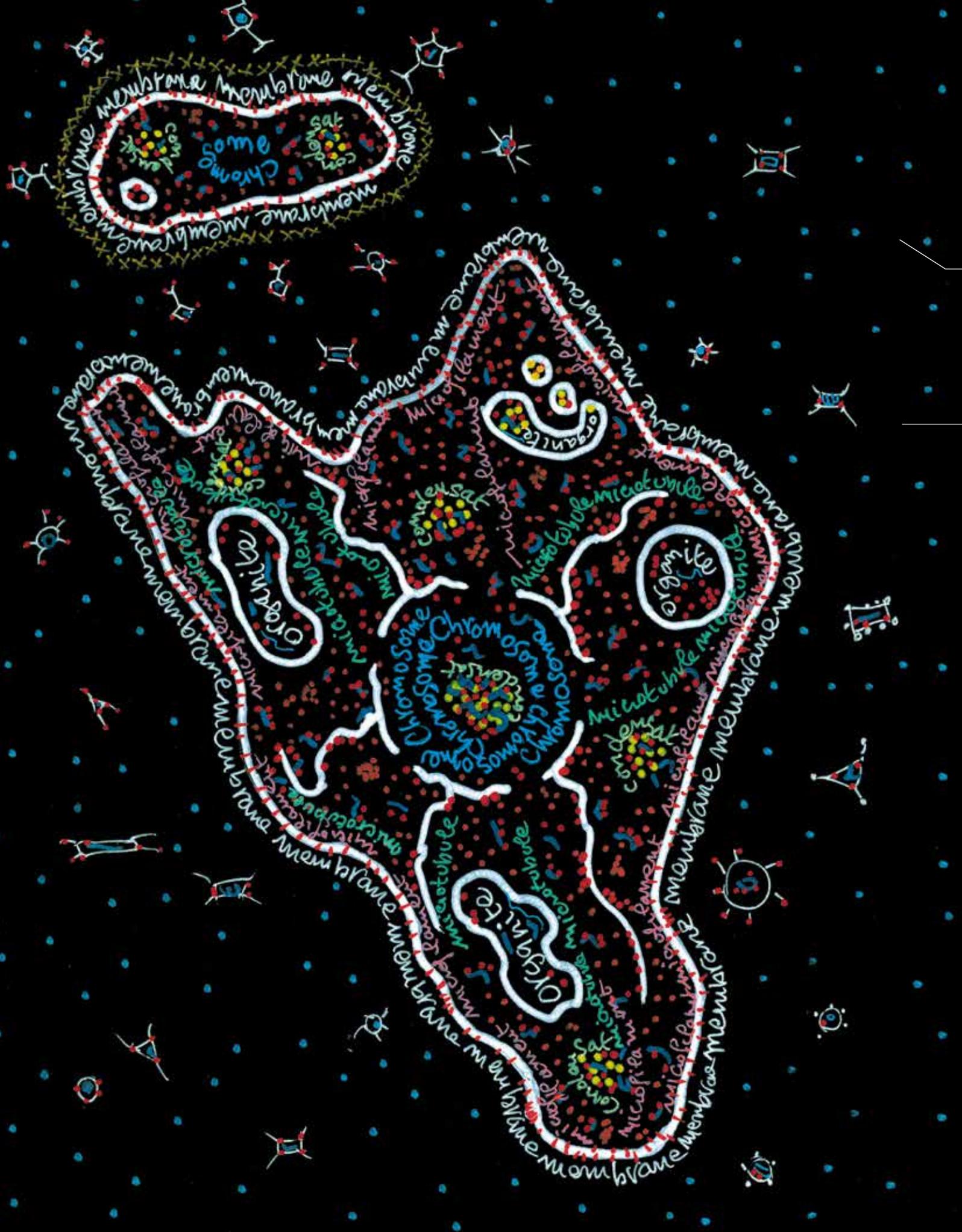
Christian Sardet

LES
CELLULES

Une histoire de la vie

Préface Éric Karsenti

ulmer



CELLULES
CALLIGRAMMES

Une cellule de bactérie ○
ou une archée ○. Cette cellule
procaryote est entourée d'une
membrane ■ et d'une paroi
et contient un chromosome ■
circulaire et des condensats
dans son cytoplasme.

Une cellule d'un animal plus
volumineuse et complexe. Elle est
aussi entourée d'une membrane ■.
Cette cellule eucaryote est
caractérisée par la présence
d'un noyau ● en son centre
contenant des chromosomes
linéaires ■ et un condensat.
Outre le noyau délimité par des
membranes intracellulaires,
la cellule contient d'autres
organites et des condensats ainsi
que des microtubules ■ et des
microfilaments ■ du cytosquelette.

Dans le fond
sont figurés des virus.

CALLIGRAMMES

Pour les dessins de cellules,
nous nous sommes inspirés
des calligrammes de Guillaume
Apollinaire qui constituent
une forme de poésie visuelle.
Voici ce que le poète écrit dans
ses *Poèmes de la paix et de
la guerre 1913-1916* : « Quant aux
calligrammes, ils sont une idéalisation
de la poésie vers-libriste et une
précision typographique à l'époque
où la typographie termine brillamment
sa carrière, à l'aurore des moyens
nouveaux de reproduction que sont
le cinéma et le phonographe ».

Préface d'Éric Karsenti p. 6

I
QU'EST-CE QUE LA VIE ?

Les cellules & l'évolution p. 8

II
LES MATÉRIAUX DE LA VIE

ADN, ARN, protéines & nanomachines p.34

III
UN RÉCIT DES ORIGINES

De LUCA aux bactéries & archées p. 58

IV
LA VIE DEVIENT COMPLEXE

L'avènement des protistes p. 78

V
DES UNICELLULAIRES AUX PLURICELLULAIRES

Des protistes aux animaux, champignons, plantes & algues p. 98

VI
LES VIRUS Baignent LE VIVANT

Manipulateurs bénéfiques & maléfiques p. 112

VII
LES MOTEURS DE LA VIE

Énergie & métabolisme p. 126

VIII
LE CYCLE CELLULAIRE

Activation, signalisation & division p. 140

IX
L'INFORMATION & L'HÉRÉDITÉ

Des gènes aux protéines p. 154

X
SE REPRODUIRE, VIEILLIR & MOURIR

Et quelques maladies p. 170

XI
CE QU'EST LA VIE

Un réseau social de cellules p. 194

Index p. 218

Crédits p. 221

Bibliothèque cellulaire p. 222

L'auteur p. 224



PRÉFACE D'ERIC KARSENTI

European Molecular Biology Laboratory
& *Tara Oceans*

Nous sommes tous composés de milliards de cellules très différentes les unes des autres qui dérivent de la rencontre d'un spermatozoïde de notre père avec un ovule maternel. Confusément nous nous demandons tous et toutes par quel miracle nous sommes apparus sur terre. Comment ce système de reproduction du vivant et les activités incroyablement complexes qui en découlent se sont mis en place. Ces questions ont tellement travaillé nos ancêtres que nombre d'entre eux ont cherché la solution dans des croyances religieuses qui se sont toutes avérées terriblement naïves et insatisfaisantes.

Les progrès de la connaissance rationnelle scientifique depuis le début du XVIII^e siècle ont apporté des réponses à beaucoup de questions même si LA question de l'origine de la vie reste encore sans réponse précise. Cependant, au cours des 50 dernières années, la compréhension de la complexification du monde vivant qui a donné naissance à un *Homo sapiens* capable de se projeter dans l'univers, dans des échelles de temps et d'espace qui n'ont rien à voir avec son espérance de vie, a fait des progrès colossaux. Au point qu'une vision assez globale de la position de la vie et de sa complexité dans l'univers devient possible. On commence même à deviner comment les molécules complexes du vivant peuvent se construire à partir des atomes et des molécules produits au sein de ces chaudrons extraordinaires que sont les étoiles.

Aujourd'hui il existe différents types de cellules : des bactéries, des archées et les cellules qui nous composent, les eucaryotes. Toutes partagent un certain nombre de points communs : elles sont délimitées par une membrane composée de lipides (des graisses dont beaucoup de cholestérol), elles contiennent de l'ADN et toutes les molécules complexes qui permettent leur fonctionnement, leur reproduction et leur prolifération. La difficulté est d'imaginer comment l'ensemble

de ces composants se sont retrouvés encapsulés dans une bulle de lipides pour fabriquer la première cellule capable de se reproduire et de proliférer.

La cellule est considérée comme la structure irréductible de la vie. Il peut y avoir des molécules complexes dans l'univers. Mais sans un environnement favorable, point de cellule et point de vie. Les virus posent souvent la question de leur nature « vivante » dans ce contexte. Mais aucun virus ne peut se reproduire sans infecter une cellule. Donc un virus fait partie intégrante de la cellule sauf qu'il peut exister seul, mais sans se reproduire.

Les cellules et nous-mêmes sommes des êtres « auto-organisés »

L'une des caractéristiques des cellules et donc de la vie est qu'il s'agit d'objets qui évoluent loin de l'équilibre thermodynamique. Une molécule chimique à une température donnée est dite stable thermodynamiquement car elle n'a pas besoin d'énergie pour sa stabilité. Ce n'est pas le cas d'une cellule : tout être vivant a besoin d'absorber de l'énergie en permanence pour maintenir son intégrité. Les organismes photosynthétiques puisent leur énergie dans les photons envoyés par le soleil, certaines bactéries la puisent dans la chimie et les autres dits « hétérotrophes » en mangeant d'autres organismes. Ce flux d'énergie qui passe à travers tout être vivant est responsable de la sophistication et de la dynamique des organismes vivants : les cellules et nous-mêmes sommes des êtres « auto-organisés ». C'est-à-dire que les molécules qui composent la vie interagissent en utilisant de l'énergie pour créer des structures complexes qui acquièrent des activités

particulières. C'est la raison pour laquelle un virus hors de sa cellule n'est pas vivant: c'est une sorte de « germe » dormant qui reprend vie en utilisant l'énergie de la cellule qu'il infecte. Dès que le flux d'énergie s'arrête, la cellule s'arrête et « meurt ». De même l'origine de la vie est à rechercher dans cette direction: il a fallu que des molécules interagissent pour former le premier « métabolisme » capable de produire de l'énergie localisée à l'intérieur d'une bulle de lipides pour que la première cellule existe. On retrouve dans ce livre beaucoup d'exemples de structures cellulaires auto-organisées comme les condensats, des agrégats de molécules qui acquièrent des fonctions, mais aussi le fuseau mitotique et en fait, quasiment tous les éléments cellulaires dynamiques.

Écrire un livre sur la cellule pour le grand public est une aventure inquiétante... La biologie est complexe et il semble très difficile à un scientifique de parler de la vie telle qu'un biologiste cellulaire et moléculaire d'aujourd'hui se la représente, sans utiliser un jargon compliqué. C'est aussi inquiétant pour l'auteur, car on ne peut parler de la vie sans parler de son origine et de sa place dans l'univers et au sein de notre planète (et peut être d'autres).

J'ai rencontré Christian il y a bien longtemps et nos chemins se sont croisés à plusieurs reprises, que ce soit pendant notre période de biologistes cellulaires ou pendant l'aventure *Tara Océans*. Je crois que nous partageons le même désir: tenter de faire comprendre au plus grand nombre ce qu'est la vie, sa relation à l'environnement, l'intrication profonde du monde vivant avec l'évolution de notre planète, le système solaire et l'univers en général. On ne peut parler de la cellule sans commencer par ses composants chimiques et les forces physiques en jeu et des grandes questions qui concernent la complexification du vivant. Il y a aussi une importante composante esthétique au vivant. Nous admirons toujours la beauté des plantes, des

animaux et des hommes et femmes... On retrouve cet émerveillement en observant les cellules au microscope, aussi bien les nôtres, que la profusion des formes cellulaires qui composent le plancton et plus encore les molécules de la vie que nous parvenons maintenant à « voir » en utilisant des méthodes physiques sophistiquées.

Dans ce livre, Christian a magistralement combiné art, contenu scientifique exhaustif et facilité de compréhension. Le choix de pages imagées associées à des planches superbes permet de suivre cette odyssée de la vie de son début à nos jours avec légèreté et plaisir. On y découvre également la complexité de l'architecture des cellules, leur diversité et leurs fonctions. Il y a eu quelques livres sur la cellule mais qui étaient à mon avis trop scolaires. Celui de Christian est différent et j'espère sincèrement qu'il fera redécouvrir la beauté de la biologie et son importance philosophique à ceux qui ont trouvé son enseignement trop aride à l'école. S'intéresser à notre nature profonde peut paraître inquiétant de complexité pour beaucoup d'entre nous et finalement de peu d'intérêt pour notre vie de tous les jours. Rien n'est plus faux. Comprendre d'où nous venons et comment nous fonctionnons permet de vivre plus sereinement et même d'aborder notre fin, la mort, avec tranquillité et sagesse en nous replaçant de façon solide au sein de l'univers.

*Dans ce livre, Christian
a magistralement combiné
art, contenu scientifique
exhaustif et facilité
de compréhension.*

QU'EST-CE
QUE LA VIE ?

Les cellules & l'évolution

LA DÉCOUVERTE DES CELLULES ET DE L'ÉVOLUTION	p. 10
1660 — <i>L'invention du mot cellule et la découverte d'un monde microscopique</i>	p. 12
1839 — <i>Les animaux et les plantes sont constitués de cellules avec noyaux</i>	p. 14
1860 — <i>De la génération spontanée à la fécondation</i>	p. 15
LA VIE ÉVOLUE SUR TERRE DEPUIS 4 MILLIARDS D'ANNÉES	p. 16
DEUX CATÉGORIES DE CELLULES — PROCARYOTES & EUCARYOTES	p. 18
LES ÉVOLUTIONS CROISÉES DE LA PLANÈTE ET DE LA VIE	p. 20
<i>Des traces d'une vie ancestrale et la première grande oxygénation (GOE)</i>	p. 22
<i>Une deuxième oxygénation (NOE) à la base des explosions de vie complexe</i>	p. 23
<i>Des extinctions de masse sculptent l'arbre de vie</i>	p. 24
LES ARBRES DE VIE — L'ÉVOLUTION ET LA BIODIVERSITÉ	p. 26
<i>La théorie de l'évolution et les premiers arbres de vie</i>	p. 28
<i>Les arbres de vie évoluent en buissons</i>	p. 30
<i>Les arbres de vie du XXI^e siècle s'enrichissent des analyses moléculaires</i>	p. 31
<i>L'évolution de la planète et de la vie</i>	pp. 32-33



LA DÉCOUVERTE DES CELLULES ET DE L'ÉVOLUTION

DE L'*HOMUNCULUS* (1694)
AU SPERMATOZOÏDE –
300 ANS D'ÉVOLUTION
DE L'IDÉE DE CELLULE

Qu'est-ce que la vie ? La réponse à cette question est restée essentiellement philosophique et religieuse jusqu'au XVII^e siècle, pendant lequel la nature du vivant prend une dimension matérielle. Alors qu'à cette époque les télescopes bouleversent la vision de l'univers, les microscopes révèlent que la vie est faite d'animalcules et d'entités minuscules auxquelles on donne le nom de « cellules ».

Deux siècles d'observations minutieuses d'une multitude de plantes, d'animaux et d'êtres unicellulaires aboutissent à la formulation d'une théorie cellulaire. Elle stipule que tout ce qui vit est fait de cellules qui se reproduisent par division.

Au milieu des années 1800, Charles Darwin ajoute à cette matérialité cellulaire de la vie une dimension temporelle, celle de la sélection naturelle comme moteur de l'évolution. Darwin pressent que tous les êtres vivants sont issus d'un ancêtre commun lointain et qu'un arbre de vie relie entre eux tous les organismes et espèces. Sous l'impulsion de Ernst Haeckel, ces arbres de vie intègrent les êtres unicellulaires – des bactéries aux protistes. Ils figurent à la base de l'arbre et sont considérés dès la fin du XIX^e siècle comme les cellules ancestrales dont l'évolution a permis l'apparition des organismes pluricellulaires – animaux, plantes, algues et champignons.

La découverte des cellules en tant qu'unités de base du vivant ne met pas tout de suite fin aux croyances ancestrales selon lesquelles la vie naît spontanément de la matière inanimée. Il faudra attendre les expériences de Louis Pasteur dans les années 1860 pour que les croyances en la génération spontanée soient réellement mises en doute. Ces idées subsistent néanmoins sous de nouvelles formes, car les hypothèses actuelles sur les origines de la vie postulent une genèse spontanée des cellules à partir de molécules et d'énergie.

Enfin, les dimensions dynamiques et énergétiques de la vie apparaissent à la fin du XIX^e siècle. La chimie naissante des éléments et molécules dévoile les principes physiologiques et moléculaires de la respiration, de la fermentation, de la photosynthèse et du métabolisme – les transformations chimiques qui sont les moteurs de la vie.

Trois siècles se sont écoulés depuis que le savant hollandais Nicolas Hartsoeker imagine qu'un homme en réduction, un « *homunculus* », est blotti à l'intérieur d'une cellule de sperme humain observée dans les premiers microscopes optiques.

Depuis, les observations avec des microscopes optiques et électroniques ont révélé que chaque spermatozoïde est entouré d'une membrane et qu'il se déplace grâce à un flagelle qui le propulse pour rencontrer et féconder un ovocyte.

La fécondation a pour but d'injecter les chromosomes du mâle, situés dans la tête du spermatozoïde, à l'intérieur de l'ovocyte femelle et de le transformer en un embryon qui deviendra un adulte. L'énergie nécessaire à la nage du spermatozoïde est fournie par un organite (une mitochondrie) située à la base du flagelle qui propulse le spermatozoïde grâce aux microtubules du cytosquelette.



1660. L'invention du mot « cellule » et la découverte d'un monde microscopique

Inspiré par les cellules dans lesquelles vivaient les moines et prisonniers, le savant anglais Robert Hooke eut l'idée d'utiliser ce mot « cellule » pour désigner les compartiments microscopiques visibles dans une fine tranche de liège. Il dessine ces premières cellules dans son livre *Micrographia*. Adopté par ses successeurs, le mot « cellule » s'est imposé pour désigner les unités élémentaires constituant tous les êtres vivants.

La découverte d'êtres vivants microscopiques est due à des artisans néerlandais passés maîtres dans la confection de lentilles grossissantes au milieu du XVII^e siècle. À travers ses microscopes, Anton Van Leeuwenhoek voit grouiller dans tous les liquides et les fluides corporels des sortes de créatures minuscules qu'il nomme des « animalcules ». À la même époque, Nicolaas Hartsoeker a même imaginé que dans le liquide séminal, chaque spermatozoïde véhiculait un homme en réduction qu'il baptise un « homunculus » (voir dessin page précédente).



ANTON VAN LEEUWENHOEK RÉVÈLE L'EXISTENCE D'UNE VIE MICROSCOPIQUE

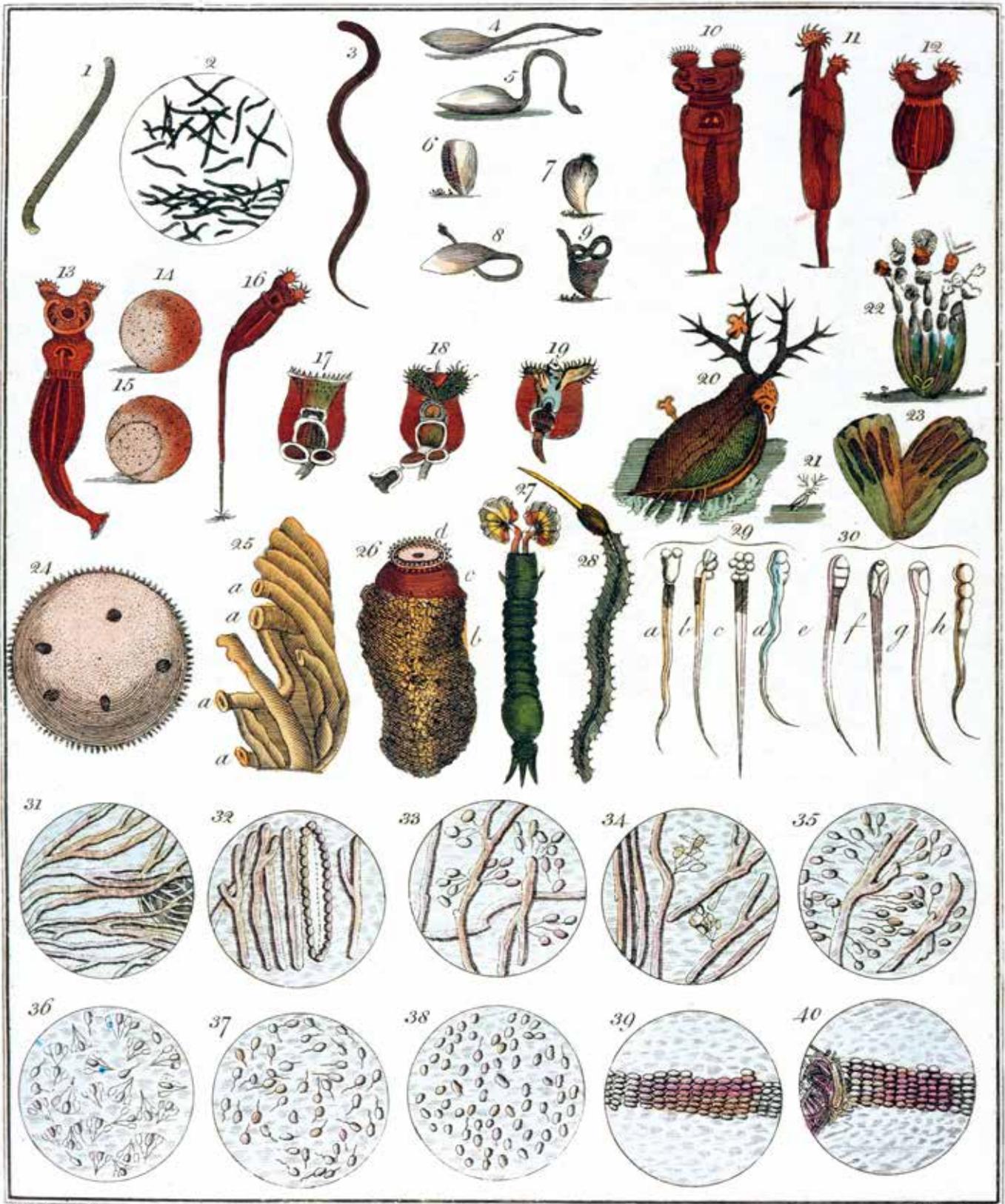
Portrait de Van Leeuwenhoek, tenant dans sa main son minuscule microscope, par Ernest Boar commandité par H. S. Wellcome en 1913 pour célébrer l'histoire de la médecine. Commerçant drapier, puis employé de la ville de Delft en Hollande, Anton Van Leeuwenhoek perfectionne le polissage des lentilles. Il confectionne à partir des années 1660 les meilleurs microscopes de l'époque. Grossissant 200 à 300 fois, ils permettent de voir pour la première fois des bactéries. Van Leeuwenhoek examine sous son microscope un grand nombre d'organismes y compris les bactéries (2) et des protistes (10 à 19). Il dessine les spermatozoïdes d'animaux (29 à 30) et même ceux d'un humain qui venait de décéder (31 à 40). Van Leeuwenhoek adresse 190 lettres en hollandais à la « Royal Society » anglaise qui d'abord ignore ses découvertes puis finit par les diffuser. Longtemps considéré comme un amateur, Van Leeuwenhoek est enfin reconnu et devient membre des sociétés savantes en Angleterre et en France. Il reçoit les visites des rois et reines de son temps.

Ci-contre

ROBERT HOOKE DÉCOUVRE DES CELLULES DANS SON MICROSCOPE

Dans *Micrographia*, son magistral traité de microscopie publié en 1664, Robert Hooke représente son microscope à doubles lentilles inspiré des télescopes de l'époque. Le microscope grossit l'échantillon une vingtaine de fois et permet à Hooke de distinguer des partitions dans une fine tranche de liège. Il baptise du nom de « cellules » ces structures qui sont en fait les parois cellulodiques entre les cellules de liège mortes, vidées de leur contenu.



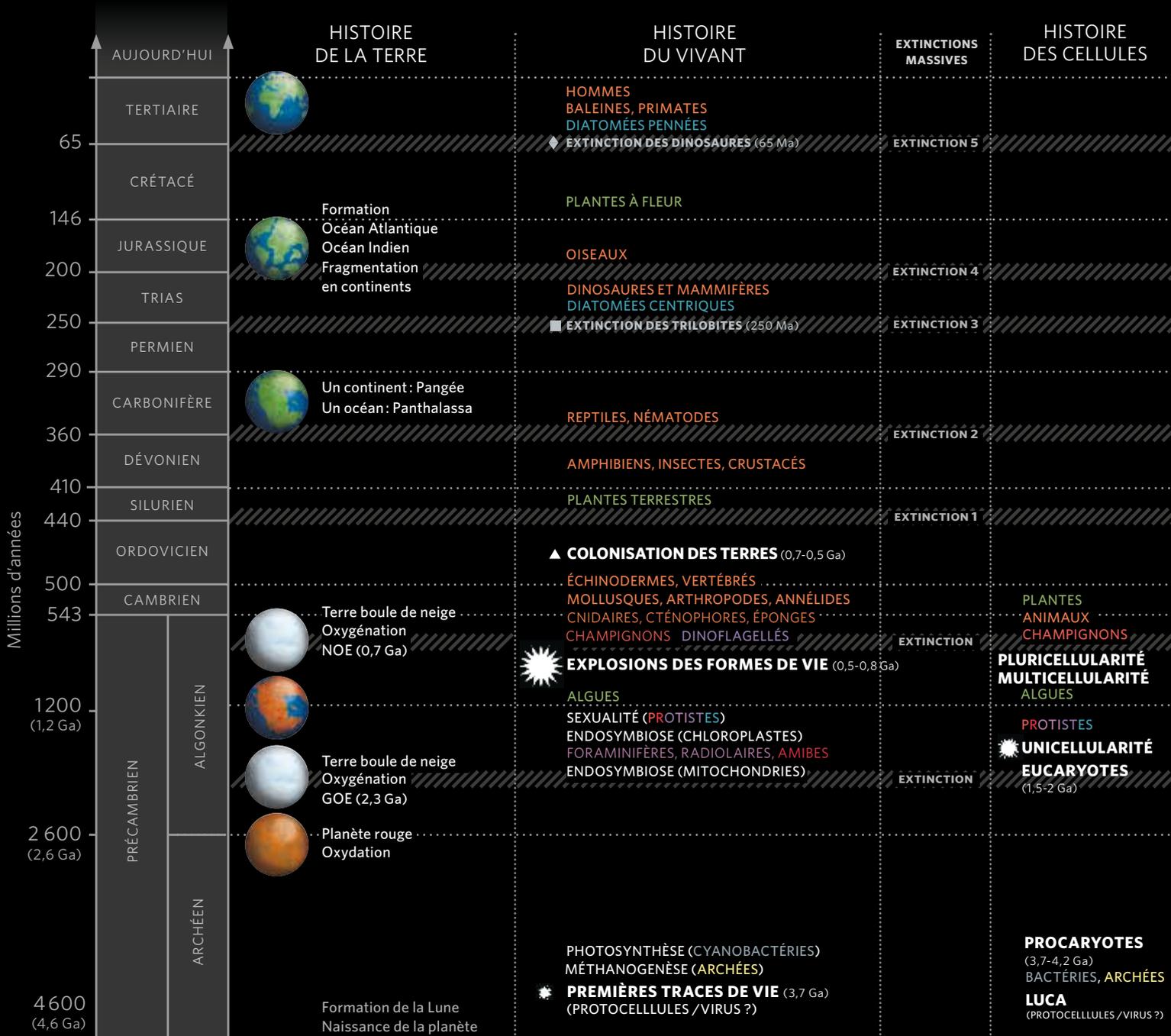


Dodd. Delin.

Animalcules.

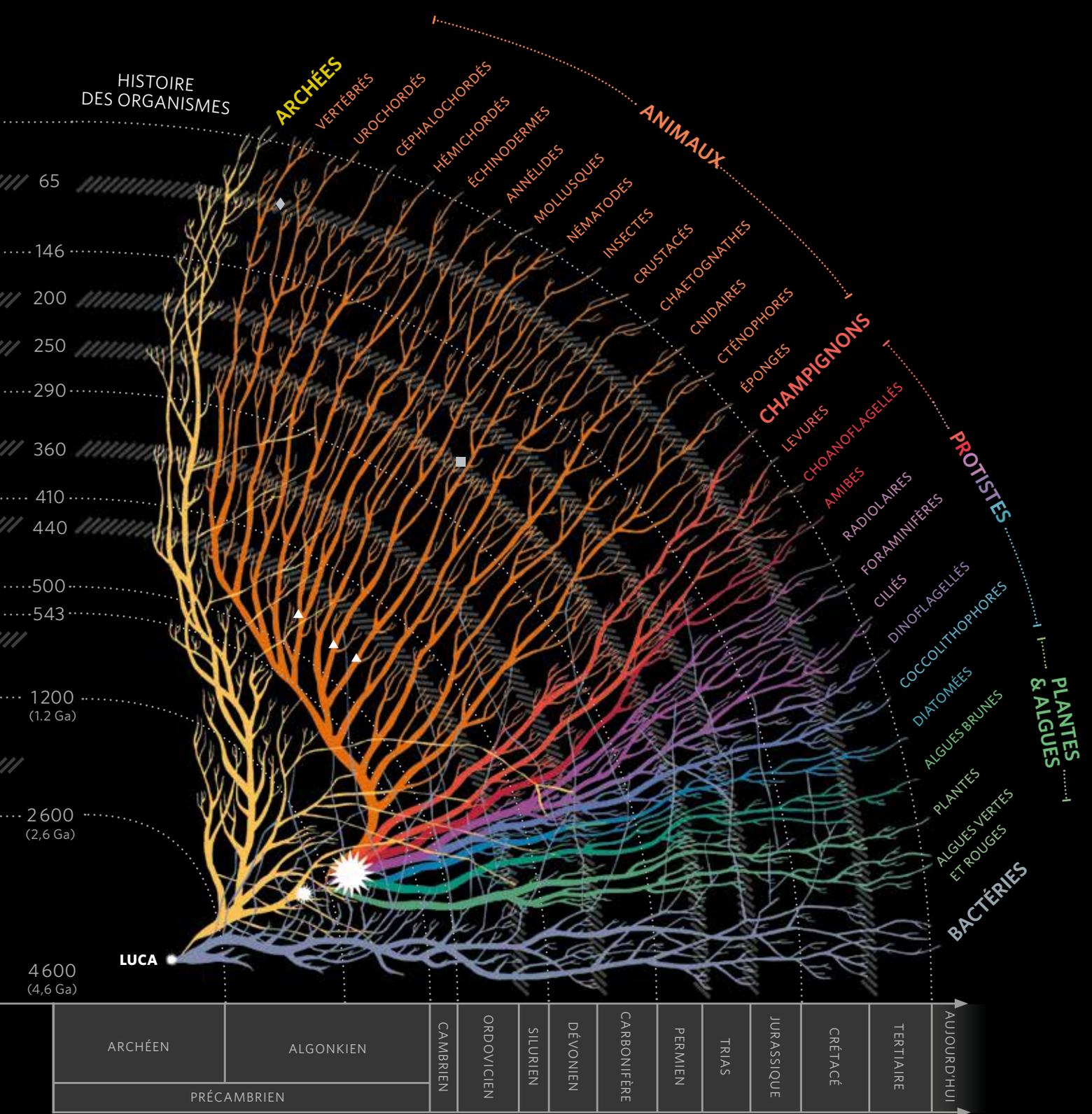
Papa. Sculp.

Cette image est inspirée des croquis en noir et blanc de Leeuwenhoek, transcrits quelques dizaines d'années plus tard par le naturaliste anglais Henri Baker. Ces représentations ont ensuite été rassemblées dans un poster et colorisées par un auteur non identifié.



L'évolution de la planète et de la vie

Les premières traces de vie datent d'au moins 3,7 milliards d'années (Ga). La cellule ancestrale LUCA – *Last Universal Common Ancestor* – est à l'origine de toutes les formes de vie connues. Deux domaines de vie (bactéries et archées, les procaryotes) apparaissent en premier et les virus étaient probablement déjà présents. Des bactéries (les cyanobactéries) inventent la photosynthèse permettant de tirer de l'énergie de la lumière du soleil. Ces cyanobactéries génèrent des quantités considérables d'oxygène, cause d'une grande oxygénation (GOE *Great Oxygenation Event*) et de l'oxydation massive du fer (Planète rouge) suivi d'un refroidissement et d'une grande glaciation (Terre boule de neige). Cette congélation anéantit maintes formes de vie originelles. La planète se réchauffe, des phénomènes d'endosymbioses impliquant des bactéries et des archées permettent à un type de cellule plus complexe d'apparaître (les eucaryotes) possédant des noyaux et d'autres organites comme les mitochondries, et les chloroplastes (pour les végétaux).

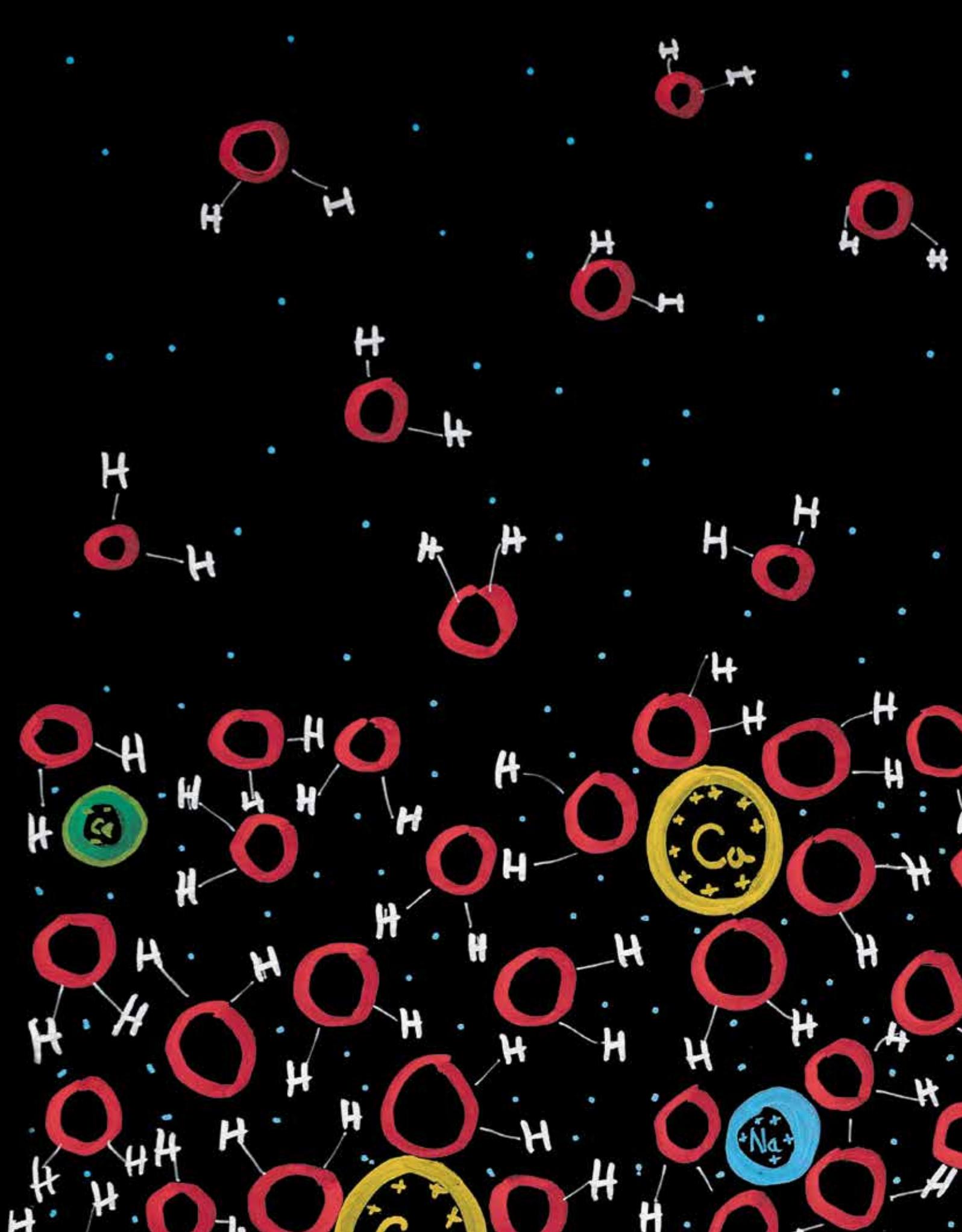


Les premiers organismes eucaryotes sont des unicellulaires, ancêtres des protistes animaux (radiolaires, amibes, levures, choanoflagellés, ciliés, etc.) et des protistes végétaux (dinoflagellés, diatomées, coccolithophores, etc.). Puis des protistes multicellulaires apparaissent qui évoluent en organismes pluricellulaires avec différents types de cellules, ancêtres des plantes, animaux et champignons. Des explosions de vie (☀), probablement dues à un deuxième grand épisode d'oxygénation (NOE – *Neoproterozoic Oxidation Event*), et à la formation d'une couche d'ozone protectrice (-700-600 millions d'années) sont à l'origine de formes de vie multicellulaire macroscopiques. Plusieurs types de plantes, champignons et animaux colonisent les terres (▲). Depuis 500 millions d'années (Cambrien), 5 grandes extinctions du vivant ont eu lieu (///). Elles sont la cause de la disparition d'innombrables formes de vie dont les trilobites (- 250 millions d'années ■) et les dinosaures (- 65 millions d'années ◆). Des formes de vie disparaissent et d'autres continuent à se diversifier après chaque extinction.

LES MATÉRIEAUX DE LA VIE

ADN, ARN, protéines & nanomachines

LES ÉLÉMENTS POUSSIÈRES D'ÉTOILES	p. 36
<i>Les éléments du vivant – des étoiles à l'océan</i>	p. 39
<i>L'hydrogène – fuel de l'univers et de la vie</i>	p. 39
<i>Carbone à tout faire</i>	p. 40
<i>L'oxygène – combustion & respiration</i>	p. 40
<i>Minéraux et métaux vitaux</i>	p.43
L'EAU, SOLVANT UNIVERSEL – ÉLIXIR DE LA VIE	p. 44
<i>Le Lego de la vie</i>	p. 46
<i>Les briques moléculaires élémentaires</i>	p. 47
<i>Membranes – des bulles de vie faites de lipides</i>	p. 48
<i>Graisses et sucres – de l'énergie en stock</i>	p. 49
DES PROTÉINES, ADN ET ARN AUX NANOMACHINES	p. 50
<i>Des molécules de vie aux polymères – ADN, ARN et protéines</i>	p. 52
<i>Les protéines – bêtes de somme</i>	p. 54
<i>Actines et tubulines – les protéines qui polymérisent</i>	p. 56
<i>Les nanomachines – des machines moléculaires</i>	p. 56



LES ÉLÉMENTS POUSSIÈRES D'ÉTOILES

LES ÉLÉMENTS
DANS L'UNIVERS,
SUR TERRE ET DANS LES
ORGANISMES VIVANTS

Les molécules et minéraux entrant dans la composition de la matière vivante sont constitués des éléments atomiques nés du Big Bang il y a 13,77 milliards d'années. Tout commence dans les minutes qui suivent le Big Bang avec la genèse d'hydrogène, l'élément primordial et le plus abondant dans le cosmos. Avec l'hélium, l'hydrogène est la source de tous les autres éléments, du carbone à l'uranium en passant par l'oxygène, l'azote ou l'or. La centaine d'éléments existants sont nés et continuent de naître des transmutations de l'hydrogène et de l'hélium au cœur des étoiles, dans la surchauffe des réactions thermonucléaires. Projetés dans l'espace, ces éléments/poussières d'étoiles se sont agglutinés en particules, météorites, astéroïdes et planètes. L'hydrogène (H), combiné avec l'oxygène (O), a donné la molécule d'eau (H₂O), le solvant essentiel des minéraux, des molécules, des macromolécules et des cellules.

Tout ce qui vit est constitué de poussières d'étoiles dans la mesure où les molécules de la vie sont des assemblages d'atomes d'un peu plus d'une vingtaine d'éléments essentiels sur la centaine produits dans le Cosmos. Quelque part dans l'Univers et/ou sur Terre, des molécules de vie se sont organisées en cellules originelles. Elles ont évolué depuis 4 milliards d'années sur Terre en une extraordinaire diversité d'organismes au sein d'écosystèmes constitués d'un quart des éléments existant dans l'Univers.

Parmi tous les éléments existants, 6 d'entre eux (les CHNOPS – Carbone, Hydrogène, Nitrogen, Oxygène, Phosphore et Soufre) sont les éléments principaux dont les atomes s'associent en molécules de vie. Parmi eux, le carbone occupe une place à part. Il constitue le squelette des molécules de vie, les briques élémentaires du vivant: acides aminés, nucléotides, lipides, sucres et métabolites. Les acides aminés s'enchaînent et s'associent pour former des protéines, et les nucléotides s'apparient et s'enroulent en hélices d'ADN et d'ARN. D'autres briques élémentaires (les lipides) associent leurs chaînes carbonées fuyant l'eau pour former spontanément les membranes qui enveloppent et protègent les cellules et leurs organites. Toutes ces molécules de vie coopèrent et se transforment pour maintenir la vie des cellules et des organismes.

Tous les éléments atomiques proviennent de l'hydrogène (H) et de l'hélium (He) générés immédiatement après le Big Bang, il y a 13,7 milliards d'années. Ils demeurent les éléments les plus abondants du cosmos.

Les réactions thermonucléaires dans les étoiles transforment l'hydrogène et l'hélium en une centaine d'autres éléments atomiques dont un quart sont essentiels pour la vie.

L'atmosphère est composée de 78 % d'azote (N) et de 21 % d'oxygène (O) et un tout petit peu de carbone (C) sous forme de CO₂.

Les organismes vivants sont particulièrement riches en C, H, N et O les éléments représentés dans le poisson, l'humain et l'arbre.

La croûte terrestre des continents est riche en oxygène (O), silice (Si), et aluminium (Al). Les océans sont de l'eau (H₂O) et des minéraux.

BIG BANG





Les éléments du vivant – des étoiles à l’océan

Depuis l’origine de l’univers, une centaine d’éléments continuent de naître dans la fournaise d’étoiles mourantes. Toute la matière faite d’atomes est la somme d’agrégats dynamiques de protons, de neutrons et d’électrons. Eux-mêmes sont constitués de particules élémentaires aux noms étranges; bosons, fermions, leptons, quarks, gluons, charmes, etc.

La matière vivante est constituée d’un quart seulement des éléments existants combinés en une infinie variété de molécules de vie, des molécules comme le glucose faites de quelques dizaines d’atomes et de macromolécules comme les protéines constituées de centaines à milliers d’atomes. Certains éléments atomiques (l’hydrogène, l’oxygène, le carbone) abondent, tandis que d’autres, comme le zinc ou le sélénium, ne sont présents qu’à l’état de traces.

Pourquoi la vie utilise-t-elle un peu plus d’une vingtaine d’éléments et pas les autres parmi la centaine existants dans le fameux tableau périodique des éléments? La réponse est probablement dans le fait que ces éléments étaient abondants dans l’océan où la vie s’est développée il y a plus de 3 milliards d’années.

L’hydrogène – fuel de l’univers et de la vie

Hydrogène vient du mot grec «générateur d’eau». C’est le nom que lui donne Antoine Lavoisier en 1783, parce que le mélange explosif d’oxygène (O_2) et d’hydrogène (H_2), génère de l’eau (H_2O) mouillant les parois du récipient. Pour la première fois, la nature d’une réaction chimique est révélée.

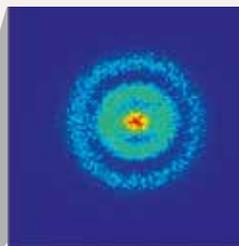
L’hydrogène, doté d’un proton et d’un électron, est le plus léger et le plus simple d’entre tous les éléments. Né immédiatement après le Big Bang, l’hydrogène demeure l’élément le plus abondant (73%) dans le cosmos, celui dont tous les autres éléments sont issus au sein des étoiles. L’hydrogène est une source inépuisable d’énergie. Chaque seconde, le soleil brûle 600 millions de tonnes d’hydrogène en hélium par fusion thermonucléaire. L’énergie produite sous forme de rayons gamma génère la lumière captée par les cellules végétales qui vivent de la photosynthèse et nourrissent les autres organismes.

L’hydrogène est aussi le fuel de la vie, parce que sous sa forme d’ions positifs (de protons: H^+), il est au cœur du métabolisme énergétique. Nous y reviendrons (voir chap. VII).

Ci-contre

LA MORT D’UNE ÉTOILE GÈNÈRE LES ÉLÉMENTS ATOMIQUES

L’évolution pendant une année de la nébuleuse Monoceros photographiée par le télescope spatial Hubble. Au centre, l’étoile géante rouge V838 Monocerotis à 20 000 années-lumière de la Terre en voie d’explosion, a envoyé dans l’espace une partie de sa matière chargée d’atomes de carbone, d’oxygène, d’azote et d’éléments plus lourds.



ANATOMIE DE L’ATOME D’HYDROGÈNE

L’atome d’hydrogène est observé pour la première fois en 2017 grâce à un microscope quantique. L’expérience confirme l’existence d’une fonction d’onde qui décrit l’orbite périphérique de l’électron, théorisée par les physiciens au début du xx^e siècle.

Publié dans *Physical Review Letters* 110, 213001 (2013)
© Courtoisie Marc Vrakking, Max-Born Institute, Berlin

LES ÉLÉMENTS DU VIVANT ET L’EAU DE MER

L’abondance relative des éléments dans l’eau de mer est représentée par la hauteur des barres (échelle logarithmique) du plus léger, l’hydrogène (H) en haut à gauche, aux éléments lourds situés en bas comme l’or (Au) ou le platine (Pt). Les éléments les plus abondants dans les cellules et êtres vivants (les CHNOPS et les minéraux Na, K, Ca, Mg, Cl) sont représentés en jaune. Les éléments-trace considérés comme essentiels à la vie sont en vert (V, Mo, Fe, Co, Cu, Zn, B, Si, Se, I). Quelques éléments additionnels représentés en rose jouent un rôle dans la survie d’organismes particuliers.

Publié dans *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 373: 20140188 (2015)

© Courtoisie Rosalind Rickaby, Oxford University



UN RÉCIT DES ORIGINES

De LUCA aux bactéries & archées

DES POUSSIÈRES D'ÉTOILES À LUCA, LA CELLULE ANCESTRALE	p. 60
UN SCÉNARIO DE L'APPARITION DE LA VIE AU FOND DES OCÉANS	p. 62
DE LUCA AUX BACTÉRIES ET ARCHÉES	p. 64
<i>Imaginer et imager les protocellules</i>	p. 66
<i>La vie dans les environnements extrêmes</i>	p. 68
LE MONDE DES BACTÉRIES ET DES ARCHÉES	p. 70
<i>Les archées — découverte surprise il y a 50 ans</i>	p. 73
<i>Les cyanobactéries — des bactéries ancestrales toujours abondantes</i>	p. 74
<i>Escherichia coli — une bactérie modèle</i>	p. 77



DES POUSSIÈRES D'ÉTOILES À LUCA, LA CELLULE ANCESTRALE

DES MOLÉCULES DE BASE
AUX MOLÉCULES DE VIE

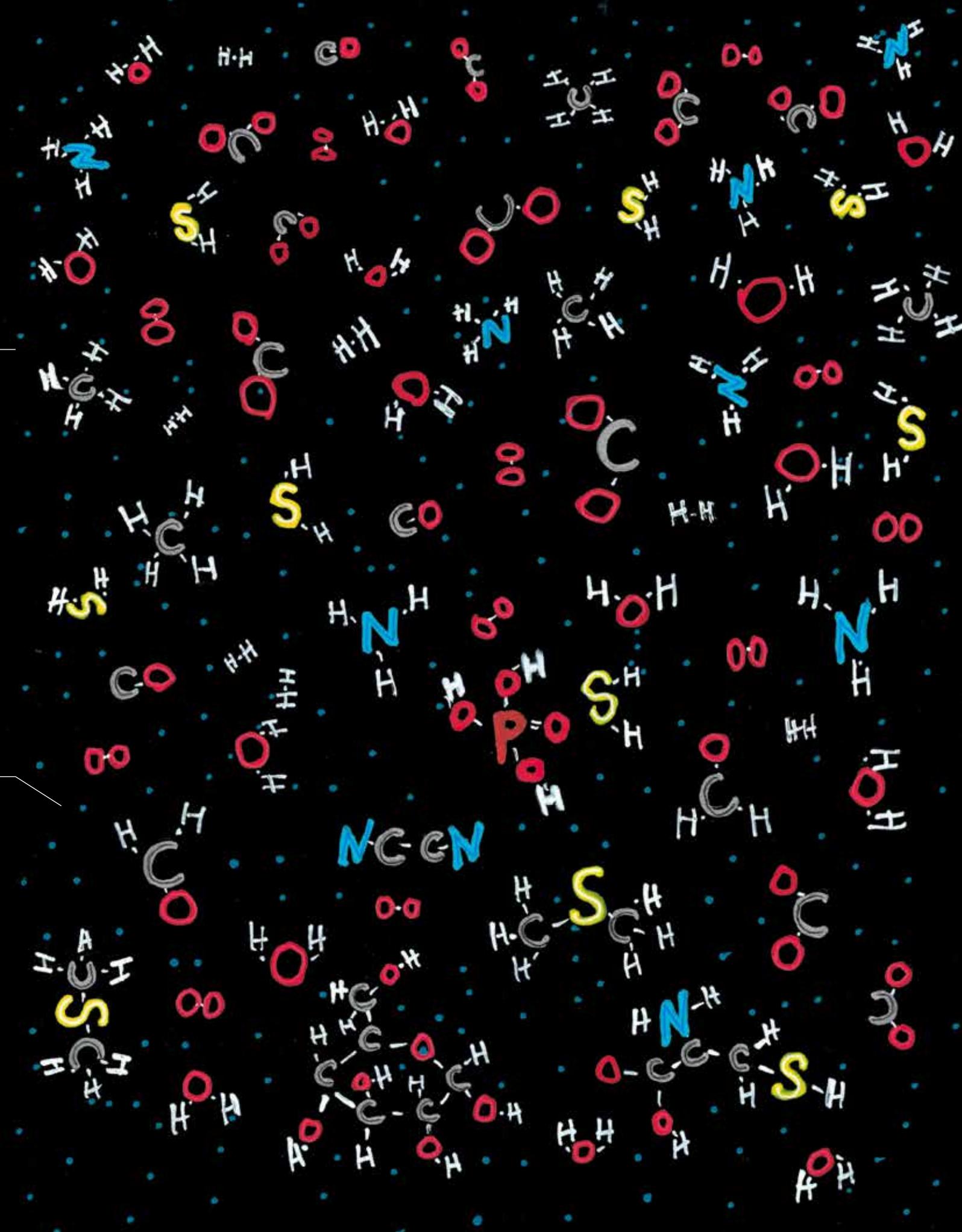
La genèse des éléments atomiques, nés dans les étoiles à partir du Big Bang il y a 13,77 milliards d'années, fait l'objet d'un récit simplifié, relaté dans le chapitre précédent.

Le récit des origines de la vie (quand, comment et où la vie est apparue sur Terre) est plus compliqué et plus incertain. L'histoire commence il y a environ 4 milliards d'années. Les molécules de base et les molécules de vie constituées de 6 éléments principaux (les CHNOPS) associés à une vingtaine de minéraux abondent ainsi que les sources d'énergie. Il est probable qu'une évolution par sélection naturelle d'ensembles moléculaires capable de complexification et de duplication s'est déroulée dans des environnements favorables au cours des premières centaines de millions d'années d'existence de la planète. Des prototypes de cellules (des protocellules) auraient émergé de ces agrégats ou condensats macromoléculaires. Parmi ces protocellules, une cellule ancestrale baptisée LUCA (de l'acronyme anglais *Last Universal Common Ancestor*) aurait généré les premiers micro-organismes autonomes dotés de membranes. LUCA aurait engendré des descendants dont les bactéries et les archées, les deux familles de micro-organismes qui ont survécu et évolué jusqu'à nos jours depuis plus de 3 milliards d'années. D'autres cellules primordiales ont probablement existé mais, à la différence de LUCA, n'ont pas laissé de descendance.

La façon dont le monde inanimé des éléments/poussières d'étoiles et des molécules et macromolécules de vie s'est auto-organisé en de premières cellules vivantes demeure le mystère principal des origines. Pour répondre à cette question, astrophysiciens, géologues, chimistes et biologistes confrontent leurs visions des planètes et des énergies mobilisables avec les propriétés d'auto-organisation et d'évolution d'ensembles moléculaires incluant les ancêtres des protéines et des acides nucléiques. Certains chercheurs pensent que les premières protocellules sont nées d'associations de ces molécules au sein des sources hydrothermales alcalines au fond de l'océan. D'autres argumentent que des geysers intermittents voisins de dépôts d'uraniums, source de radiations ionisantes, ou des sources thermales en surface étaient des environnements tout aussi propices. Tous ces environnements procuraient des flux d'énergie puissants et permanents. Ils permettaient l'accomplissement d'innombrables réactions chimiques et énergétiques hors équilibre, nécessaires à l'émergence de la vie. Parmi les scénarios plausibles, nous prendrons à titre d'exemple celui de l'apparition de la vie au fond de l'océan.

Six éléments principaux – les CHNOPS : (carbone (C), hydrogène (H), azote (N), oxygène (O), phosphore (P) et soufre (S)) – sont les atomes constituant les molécules de base : hydrogène (H₂), oxygène (O₂), hydrogène sulfuré (H₂S), gaz carbonique (CO₂), méthane (CH₄), monoxyde de carbone (CO), ammoniac (NH₃), acide phosphorique (H₃PO₄) et eau (H₂O).

À partir de ces molécules de base, des molécules réactives tel le formaldéhyde (CH₂O) le sulfure de diméthyle (CH₃)₂S et d'autres se sont formés qui ont réagi chimiquement pour aboutir à des molécules de vie à squelette carboné comme le glucose (C₆H₁₂O₆) ou l'acide aminé cystéine (C₃H₇NO₂S) qui sont des briques élémentaires dont sont faits les polysaccharides et les protéines (voir les modèles moléculaires 3D correspondants pp. 46-47).



UN SCÉNARIO DE L'APPARITION DE LA VIE AU FOND DES OCÉANS

DES CELLULES NAISSENT
AU SEIN DES SOURCES
THERMALES ALCALINES

Revenons 4 milliards d'années en arrière. La planète refroidit, et au fond de l'océan, les volcans crachent des gaz — hydrogène, méthane, azote, ammoniac, sulfures, qui percolent dans les méandres de micro-canaux rocheux. Au contact de l'eau de mer chargée en CO_2 , d'immenses cheminées minérales s'élèvent des abysses. Ces roches truffées de milliards de milliards de micro-chambres tapissées de surfaces cristallines et de complexes métalliques riches en fer, sulfures et nickels sont propices au déroulement de réactions électrochimiques.

L'idée du scénario d'apparition de la vie au sein de sources alcalines au fond de l'océan primordial est qu'une force énergétique y a favorisé l'émergence de la vie. Selon certains chercheurs, cette force venait de l'établissement de concentrations différentes de protons (H^+ : la forme ionisée de l'hydrogène) à travers les parois poreuses des cheminées abyssales. Ce gradient de protons aurait été de nature à soutenir la réduction du CO_2 par l'hydrogène et la production de molécules carbonées et sulfurées des plus simples: méthane (CH_4), formaldéhyde (CH_2O), cyanures (HCN), sulfures (H_2S), puis de leurs associations en molécules de vie, une kyrielle d'acides aminés, de sucres, de nucléotides, de lipides et autres. Cette ménagerie moléculaire complexe a complété celle des nombreuses molécules organiques parvenues sur Terre et dans l'océan avec les météorites.

Des dizaines de millions d'années passant, dans les innombrables micro-chambres des abysses, auraient ainsi pu naître les premières réactions chimiques en chaînes.

Un « monde du métabolisme » générateur en continu des molécules de vie et des premières macromolécules aurait vu le jour. Seraient apparues de courtes chaînes d'acides aminés (des peptides) ébauches de protéines, des acides nucléiques (peut-être les premiers ARN) et des lipides formant micelles et membranes. Ces ensembles macromoléculaires se seraient naturellement concentrés et perpétués en de rares occasions. L'étape suivante aurait été celle du perfectionnement et de l'évolution des molécules porteuses d'information. Il s'agissait probablement de molécules comme les ARN associées à des peptides, des entités moléculaires capables de se copier avec modifications. Cela aurait constitué une sorte d'évolution chimique basée sur la sélection naturelle des ensembles moléculaires les plus aptes à se reproduire. Se serait ainsi développé un « monde des ARN-peptides » source d'information et d'organisation également doté de propriétés enzymatiques. Ce monde débutant de l'information et des transformations chimiques aurait évolué et se serait stabilisé en intégrant les molécules d'ADN et des protéines-enzymes.

5 - Un processus de complexification des assemblages de molécules dans d'innombrables micro-chambres poreuses pendant des millions d'années aboutit à la formation de protocellules plus ou moins viables : un début de vie.

4 - Des membranes faites de lipides concentrent et protègent les assemblages moléculaires.

3 - Des molécules de vie (des acides aminés, des nucléotides, des sucres) réagissent et s'enchaînent pour ébaucher des polymères : protéines, ARN, ADN et des polysaccharides.

2 - En présence d'un gradient électrochimique de protons à travers les parois minérales poreuses, le contact avec l'eau (H_2O) de mer riche en gaz carbonique (CO_2), permet de fabriquer des molécules carbonées et d'amorcer les réactions chimiques d'un métabolisme primitif.

1 - Des mélanges de gaz — hydrogène (H_2), hydrogène sulfuré (H_2S), ammoniac (NH_3) — percolent à travers des micro-chambres poreuses chargées de complexes métalliques $\text{Fe}/\text{Ni}/\text{S}$.

CE QU'EST
LA VIE

Un réseau social de cellules

CONVERSATIONS CELLULAIRES p. 196

Trafics de gènes et bavardages de phages p. 198

Quand calmars et bactéries dialoguent p. 199

MESSAGES & VOIES DE COMMUNICATION p. 200

Hormones messagères p. 202

Les jonctions communicantes du cœur électrique p. 204

Tunnels, bulles et baisers cellulaires p. 205

NOUS SOMMES TOUS DES HOLOBIONTES À MICROBIOTES p. 206

Le microbiote — de la naissance à la mort p. 208

ESSENTIELLES SYMBIOSES p. 210

Quand plantes, bactéries et champignons coopèrent p. 212

L'holobionte lichen — champion des symbioses p. 213

Des esclaves et des zombies dans le plancton p. 215

Des animaux végétaux — des méduses aux coraux et mollusques p. 216

NOUS SOMMES TOUS DES HOLOBIONTES À MICROBIOTES

LA VIE EMMÊLÉE:
L'HOLOBIONTE HUMAIN
ET SON MICROBIOTE

Ce titre peut paraître barbare, mais il définit le vivre ensemble d'un point de vue biologique, c'est-à-dire l'imbrication de multiples partenaires dans la constitution et le fonctionnement d'un organisme entier. Ainsi, notre corps humain est composé de 40 000 milliards de cellules humaines et à peu près autant de cellules non humaines qui pèsent 2 kg. Cette collection de cellules étrangères (le microbiote humain) est constituée principalement de milliers d'espèces de bactéries, d'archées et de protistes, de leurs cohortes de virus ainsi que de quelques espèces d'animaux et champignons microscopiques. Ensemble, ils constituent un microbiote fort de plus de 30 millions de gènes, soit 1 400 fois plus que les 22 000 gènes humains. Les micro-organismes du microbiote habitent notre système digestif, nos voies respiratoires, notre peau et orifices. Certaines espèces de bactéries et les virus s'installent à l'intérieur des cellules et s'établissent même à l'intérieur de leurs organites.

Pour qualifier ces ensembles vivants, ces chimères d'organismes en interactions, le terme « super-organismes » est d'abord venu à l'esprit des biologistes. Mais « super-organismes » ne convenait pas vraiment, car il est utilisé traditionnellement pour décrire les insectes coloniaux (fourmis, abeilles ou termites) chez lesquels différents types d'individus se spécialisent. C'est pourquoi les biologistes se sont mis d'accord pour utiliser le terme « holobionte », un terme introduit par Lynn Margulis dans les années 1990. Holobionte désigne l'association étroite entre différentes espèces (les « biontes ») vivant en communauté à la surface et à l'intérieur d'un hôte principal plus volumineux : un bionte animal, plante, champignon ou protiste.

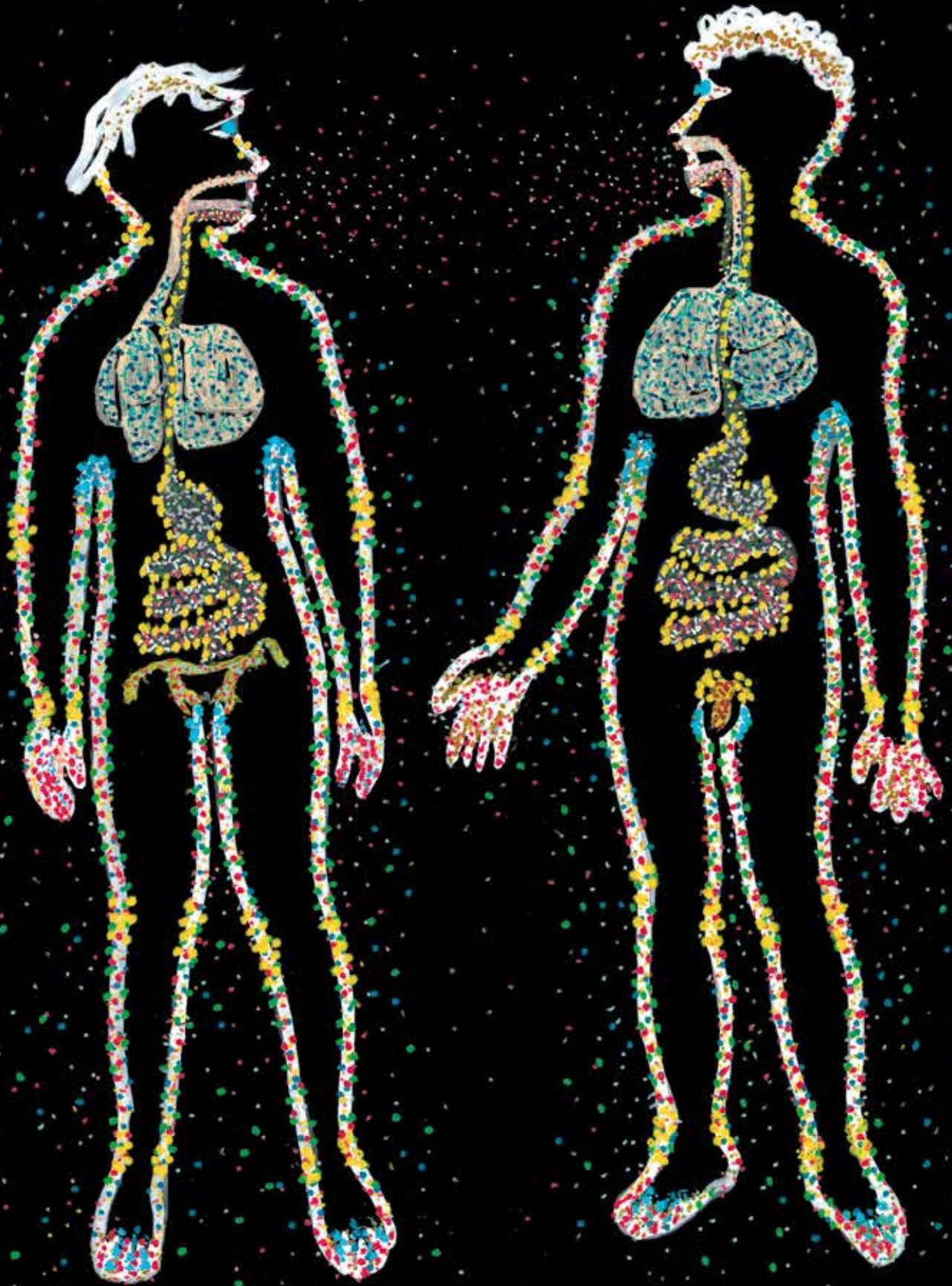
L'holobionte type est le corail dans le sens où les polypes du corail sont les hôtes de micro-algues symbiotiques communément appelées zooxanthelles. Les zooxanthelles sont des protistes du phytoplancton – des dinoflagellés photosynthétiques. Ces symbiotes végétaux fournissent de l'oxygène, du glucose, et des acides aminés aux cellules du corail qui en retour protègent les dinoflagellés de la prédation. L'holobionte corail inclut également d'autres espèces de protistes ainsi que des bactéries et des archées, et dans une certaine mesure, des animaux qui sont dépendants d'espèces spécifiques de coraux.

Un grand nombre de protistes animaux sont eux-mêmes des holobiontes incluant des associations avec des protistes végétaux ou des cyanobactéries. Quant aux plantes, elles entretiennent, des racines aux feuilles, des relations complexes avec une multitude de microbes, de champignons et une microfaune animale spécifique. Et tous les holobiontes ont bien sûr leurs propres parasites avec lesquels ils co-évoluent !

Chaque femme, chaque homme est l'hôte de micro-organismes représentant autant de cellules que les cellules d'un corps humain. Ces micro-organismes constituent le microbiote humain.

Des espèces particulières de bactéries, d'archées, de protistes et même d'insectes et d'animaux vivent en différents endroits de notre peau, de nos intestins, de notre bouche, de nos voies respiratoires, de nos organes génitaux et autour de nos poils et cheveux.

Nous diffusons et déposons autour de nous un nuage de micro-organismes dont les traces génétiques permettent même de nous identifier.



Le microbiote humain — de la naissance à la mort

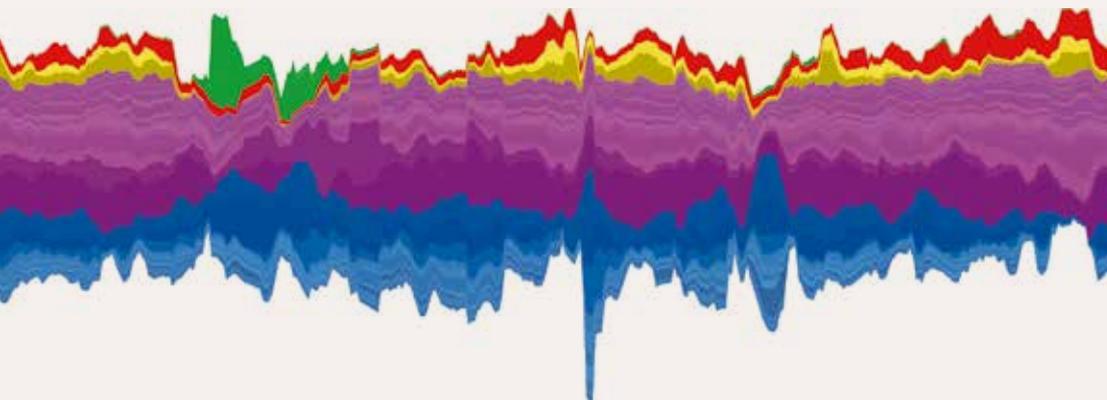
Lorsqu'il naît par les voies naturelles, en passant par le vagin puis au contact du périnée et de la région anale, le bébé hérite d'une collection de microbes maternels. Sa mère lui transmet ses micro-organismes et leurs virus qui constituent le premier microbiote du nouveau-né. Si le bébé naît par césarienne, son microbiote est celui de la peau de sa mère et des accoucheurs. Pour se rapprocher des conditions naturelles, certains accoucheurs badigeonnent le bébé né par césarienne avec du mucus vaginal. Puis, l'allaitement et les contacts du nourrisson avec ses familiers et les animaux domestiques modifient progressivement le microbiote du nouveau-né.

Même si les différences entre les enfants nés naturellement ou par césarienne s'estompent au bout d'une année, les enfants nés par césarienne sont plus sensibles aux maladies inflammatoires, aux allergies ou à des problèmes d'obésité. Cela est probablement lié au fait que le microbiote est l'activateur du système immunitaire du nouveau-né à travers des molécules sécrétées par des bactéries qui en font partie. La composition du microbiote a bien d'autres effets, y compris sur le comportement. Une étude finlandaise indique que les nourrissons particulièrement « radioux » possèdent un microbiote intestinal beaucoup plus riche en bactéries bénéfiques du genre *Bifidobacterium* que les autres bébés. Une explication possible est que certaines espèces bactériennes produisent des métabolites, de petites molécules comme le butyrate qui sont nécessaires au bon fonctionnement de nos tissus et ont des effets sur notre immunité et notre mental.

Avec l'âge, les différences entre les microbiotes de type vaginal ou cutané acquis à la naissance tendent à

disparaître. Chaque individu développe un mix de micro-organismes qui lui est propre et constitue sa signature : son microbiote. Au même titre que les empreintes digitales, le microbiote d'un individu fait partie de son identité. La composition du microbiote adulte est la résultante de l'hérédité, des habitudes alimentaires, des pratiques hygiéniques, des maladies contractées et de l'exposition aux antibiotiques et d'autres drogues. Un simple séjour à l'étranger suffit à modifier transitoirement la composition des principales bactéries intestinales du voyageur. Les effets d'un changement de pays peuvent être durables. Ainsi, moins d'un an après leur arrivée aux USA, les immigrants sud-asiatiques, africains ou sud-américains acquièrent un nouveau microbiote, moins diversifié, très proche de celui des Américains d'origine européenne.

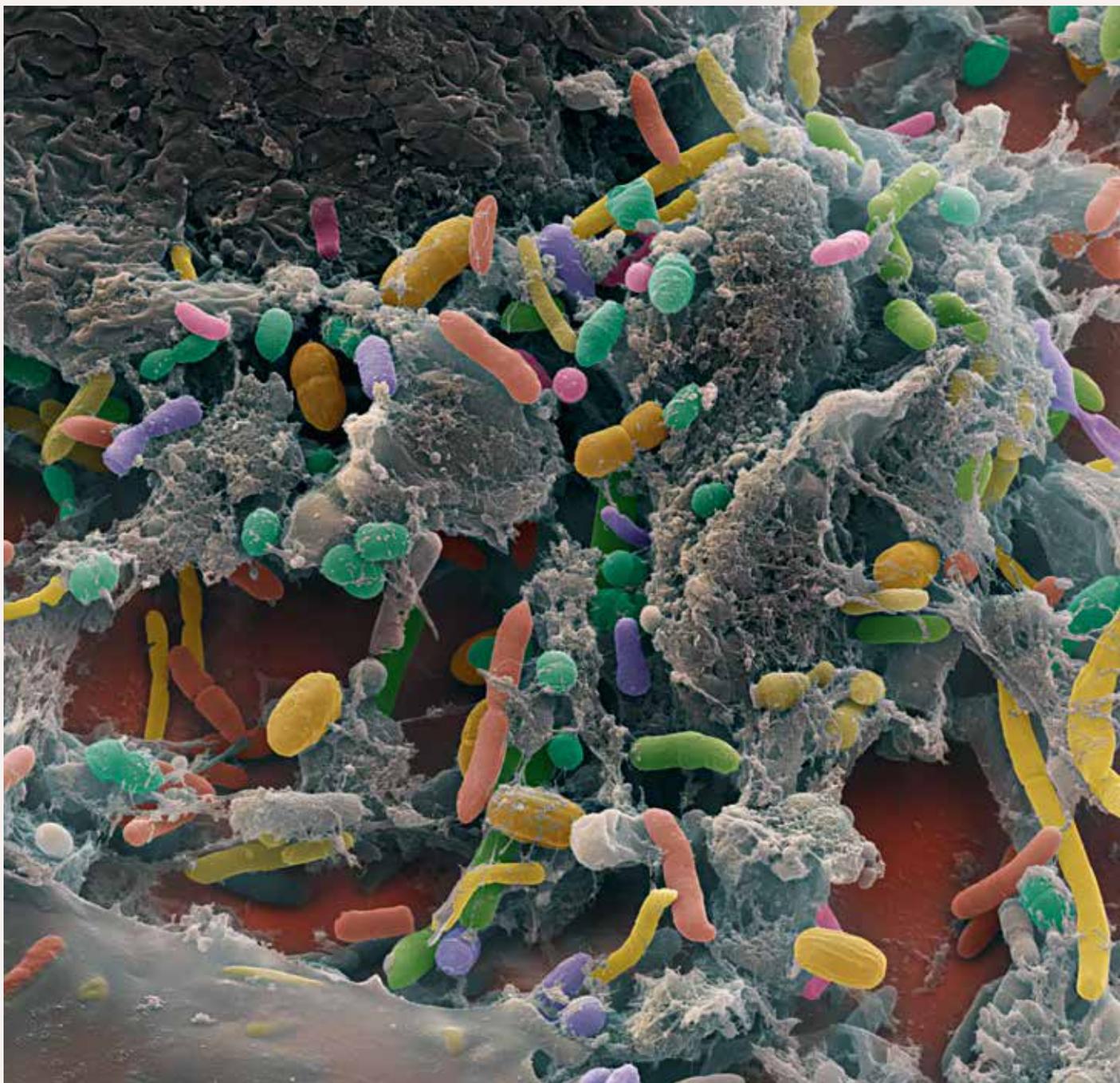
Enfin, le microbiote évolue de façon prévisible pendant la vie, à tel point que l'on peut prédire l'âge approximatif d'un individu à partir de la composition des bactéries dans ses selles. Vieillir va généralement de pair avec une perte de diversité du microbiote dont on pense qu'elle favorise l'apparition de maladies inflammatoires et auto-immunes et peut-être d'états dépressifs. De là à penser que des transplantations fécales de jeunes vers les aînés pourraient aider ! Et en fait, des transplantations fécales sont effectuées avec succès chez des souris âgées dont le système immunitaire est amélioré à la suite de la transplantation de selles provenant de souris jeunes. Des transplantations fécales sont aussi pratiquées avec succès chez les humains pour lutter contre des infections intestinales causées par des bactéries *Clostridium difficile* résistantes aux antibiotiques. D'un point de vue plus général, les laboratoires publics et privés investissent d'énormes moyens pour maîtriser micro-organismes et microbiotes pour des applications thérapeutiques.



UNE ANNÉE DANS LA VIE D'UN MICROBIOTE HUMAIN

Ce graphique illustre l'évolution des principales classes de bactéries du microbiote intestinal d'une personne réalisé en prélevant et en analysant ses selles pendant 365 jours (de gauche à droite). La relative stabilité de son microbiote a été transitoirement altérée par un voyage en Asie (autour de 100 jours), avec une apparition spectaculaire des protéobactéries (en vert) et la quasi-disparition des bactéries tenericutes (en rouge).

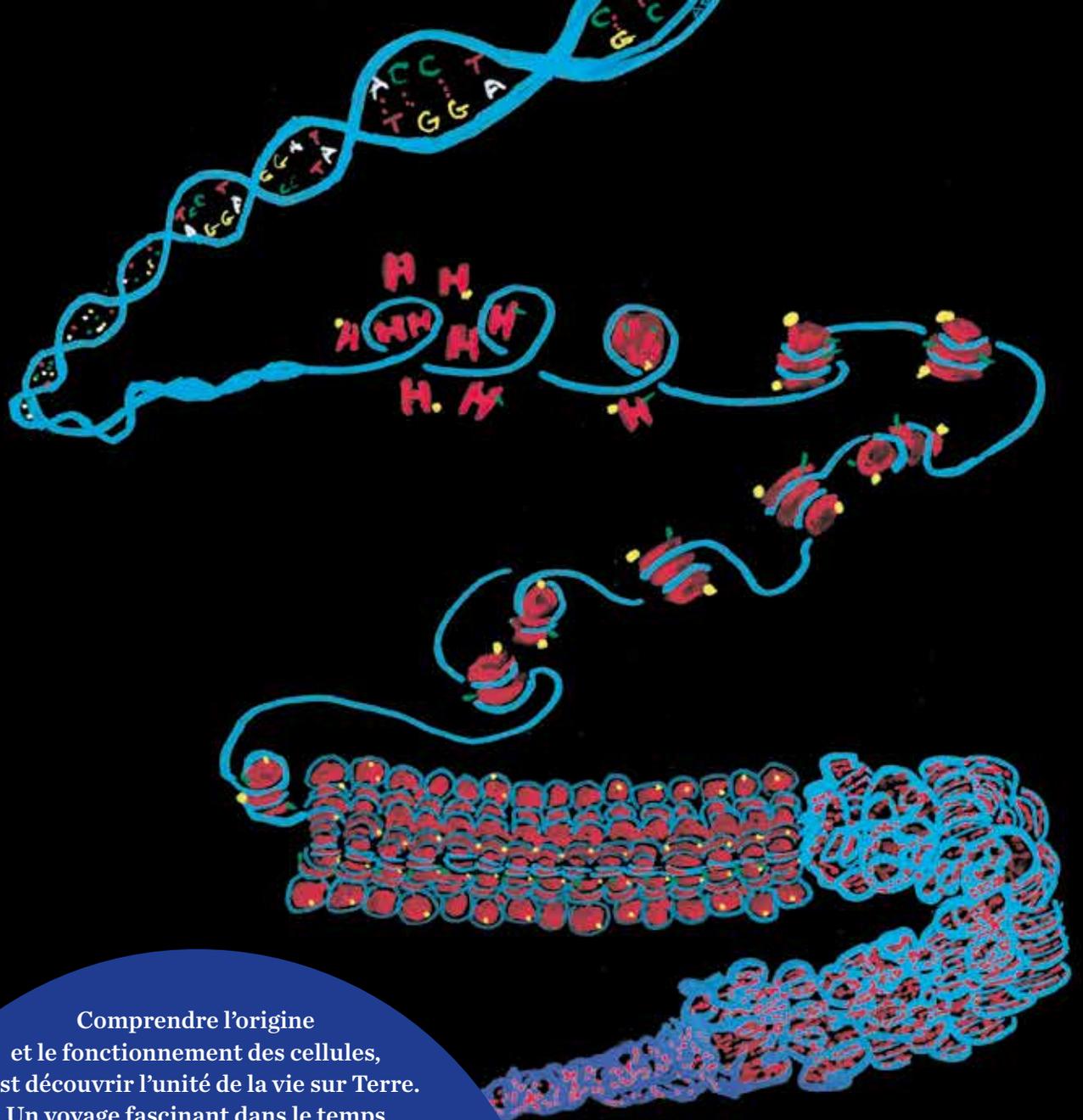
© Courtoisie Laurence David, Duke University, Durham, USA



LE MICROBIOTE DU CACA

Le microbiote des selles est constitué de milliers d'espèces de micro-organismes — bactéries, archées, protistes et leurs virus. Ces micro-organismes digèrent les aliments, sécrètent des vitamines et bien d'autres molécules. Les microbes sont expulsés dans les selles avec les résidus de digestion. Cette image microscopique des selles illustre la diversité des micro-organismes.

MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE À BALAYAGE COLORISÉE
© Courtoisie Nicole Ottawa et Olivier Meckes,
eye of science, Allemagne



**Comprendre l'origine
et le fonctionnement des cellules,
c'est découvrir l'unité de la vie sur Terre.
Un voyage fascinant dans le temps
et l'infiniment petit !**

Tout ce qui vit sur Terre, des bactéries aux arbres
et aux humains, est constitué de cellules ayant toutes pour
origine une même cellule ancestrale commune :

LUCA (*Last Universal Common Ancestor*).

Comprendre comment cette première cellule est apparue il y a
des milliards d'années, puis a évolué pour former tous les
organismes anciens et actuels est une plongée au cœur même
du vivant. Passionné de cellules, d'embryons et de plancton,
auquel il a consacré sa vie de chercheur et d'artiste,
Christian Sardet, de la façon la plus simple
et la plus imagée possible, nous raconte comment
fonctionnent et communiquent les cellules,
et ce que nous en savons aujourd'hui.

ISBN : 978-2-37922-356-3



9 782379 223563

Prix TTC France : 35 €