

37  
38

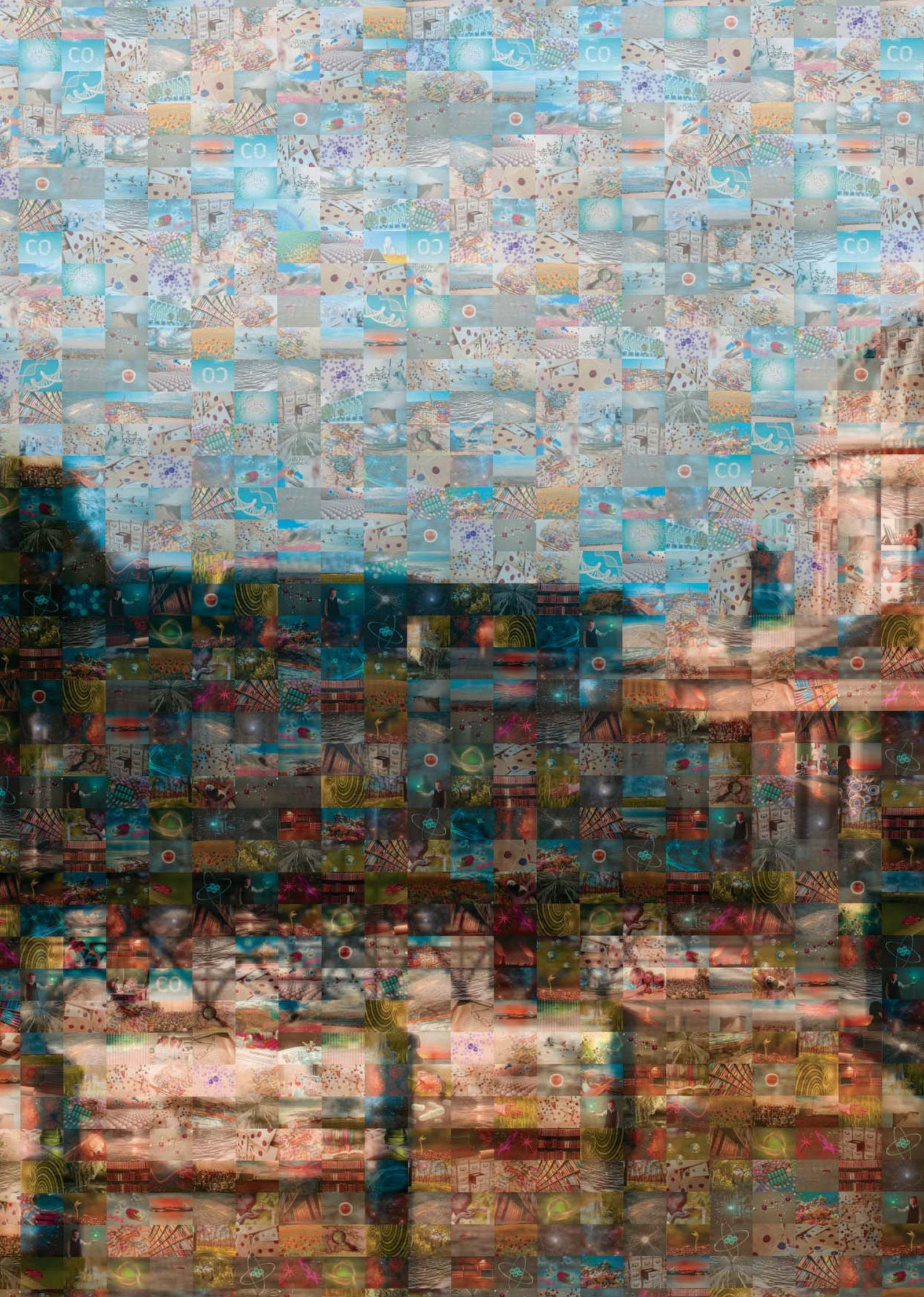
# La Lettre

de l'Académie des sciences

PRINTEMPS-ÉTÉ | AUTOMNE-HIVER 2016



350 ans de science



35



ans

Académie des sciences





1666-2016 : la séance solennelle commémorant les 350 ans de l'Académie des sciences s'est tenue le 28 juin 2016 sous la coupole de l'Institut de France. Huit académiciens, comme autant de sections de l'Académie, ont retracé l'histoire de leur discipline en mettant en lumière les étapes importantes qui ont été franchies et en rendant hommage aux principaux scientifiques, français ou étrangers, qui ont concouru à l'évolution, voire à la révolution, de leur discipline. Ce numéro spécial de *La Lettre de l'Académie des sciences* présente les actes de cette grande journée dédiée à l'histoire des sciences.

# 350 ANS DE SCIENCE



## Dessine-moi une Académie !

Bernard Meunier

Page 6



## La marche de la connaissance

Catherine Bréchnignac

Page 12



## La nouvelle microbiologie

Pascale Cossart

Page 18



## D'une médecine empirique à une médecine de précision

Alain Fischer

Page 24



## À la découverte de l'homme et de son cerveau

Jean-Pierre Changeux

Page 32



## De la cellule aux écosystèmes

Yvon Le Maho

Page 40



## La chimie, science de la matière : comprendre et créer !

Jacques Livage

Page 48



## Des planètes aux exoplanètes

Anne-Marie Lagrange

Page 56



## Des ondes d'Huygens aux photons d'Einstein : une étrange lumière

Alain Aspect

Page 64



## Machines et information

Gérard Berry

Page 72



## Mathématique : comprendre et prédire

Cédric Villani

Page 80

## Dessine-moi une Académie !



© B.Eymann - Académie des sciences

### Bernard Meunier

Président de l'Académie des sciences, directeur de recherche émérite au CNRS

Un soir, Louis XIV s'endort loin de la foule des courtisans, il se sent seul comme un naufragé au milieu de l'océan. Soudain, une petite voix le réveille et lui dit : « *Sire, s'il vous plaît... dessine-moi une Académie !* » Le roi écoute le Petit Prince et lui dit : « *Mais j'en ai déjà une, faite par mon père en 1635, elle s'occupe très bien de notre belle langue française.* » « *Je sais* », dit le Petit Prince, « *mais il en faut une autre, qui s'occupera des sciences, avec des savants qui nous parleront du monde, des planètes,*

*des plantes, des animaux, des maladies et aussi des machines à créer pour rendre votre royaume plus grand, plus fort.* » Le roi est convaincu. Nous sommes en l'an 1666, il demande à Colbert de s'occuper de la création de l'Académie royale des sciences.

### Un recrutement fait d'excellence

En fait, il n'existe pas de documents historiques permettant de savoir comment Louis XIV a pris sa décision : une seule chose est certaine, l'Académie des sciences existe depuis 350 ans ! Le jeune roi, 28 ans en 1666, est soucieux du rayonnement de la France, que ce soit dans la recherche des frontières naturelles ou dans le soutien à la création artistique, dans tous les domaines : l'architecture, la peinture, le théâtre et la poésie. En son début de règne, il manque un groupe de savants, capables de développer les mathématiques et la physique, ce dernier mot couvrant, au milieu du 17<sup>e</sup> siècle, non seulement la physique d'aujourd'hui, mais aussi la chimie, les sciences de la nature et la médecine. Des savants français comme Descartes et Pascal, décédés respectivement en 1650 et 1662, n'ont pas été remplacés et l'Angleterre vient de créer, en 1660, une société savante qui prend immédiatement une place importante en Europe : la *Royal Society*.

Il est urgent pour la royauté française d'afficher sa présence continentale. Colbert mandate son bibliothécaire, Pierre de Carcavi, mathématicien formé par Pierre de Fermat, pour recruter un savant reconnu par ses pairs en Europe, capable d'animer une académie des sciences à Paris. Le choix se



portera sur Christiaan Huygens, mathématicien et astronome hollandais, admiré de tous en Europe et qui vient d'être élu à la *Royal Society*, en 1663. Christiaan Huygens négocie de bonnes conditions pour son arrivée à Paris : un appartement dans la bibliothèque du roi et une pension annuelle de 6 000 livres !

Le recrutement des premiers académiciens se fait à partir de mai 1666. Sept noms sont retenus sur une première liste : Christiaan Huygens, Adrien Auzout (astronome), Jacques Buot (astronome), Pierre de Carcavi, Bernard Frénicle de Bessy (mathématicien), l'abbé Jean Picard

(astronome) et Gilles Personne de Roberval

(mathématicien connu encore de nos jours pour sa balance à plateaux). Ce premier groupe forme la section de mathématiques et commence à se réunir pendant l'été 1666 pour observer deux éclipses, celle de la Lune et celle du Soleil. Ils produisent un rapport qui rassure Colbert sur leur capacité à travailler ensemble.

En octobre 1666, une seconde section est créée, celle des sciences de l'observation, avec l'aide de Charles Perrault, homme de lettres, bras droit de Colbert, auteur des célèbres contes. Sont également recrutés : Marin Cureau de la Chambre (médecin du roi), Claude Perrault (architecte et frère de Charles Perrault – auteur de la colonnade de la façade Est du Louvre, qui a inspiré de nombreux architectes dans le monde entier), Samuel Cottureau du Clos (médecin et chimiste) et Louis Gayant (médecin). Avant décembre viennent s'ajouter Claude Bourdelin (chimiste), Jean Pecquet (anatomiste), Nicolas Marchant (botaniste) et Jean-Baptiste du Hamel – un helléniste qui va se passionner peu à peu pour l'anatomie, et qui sera le premier Secrétaire de l'Académie.



Colonnade de Claude Perrault

Cette énumération de personnalités, sélectionnées pour leurs compétences dans leur domaine, n'est pas seulement un hommage aux premiers académiciens, c'est surtout la marque d'un principe fondateur de notre institution. Une académie doit être une assemblée de scientifiques de très haut niveau dans leur propre discipline, afin de leur permettre de travailler ensemble sur des sujets nécessitant des compétences fortes pour être abordés. L'interaction entre disciplines se fait de manière naturelle, lorsque cela est nécessaire, sans oublier que de nombreux problèmes trouvent leur solution à l'intérieur d'une même discipline. Les interactions entre champs disciplinaires ne doivent pas être subies comme résultant d'une antienne, que l'on chante plus ou moins bien pour se rassurer, faute d'idées, mais doivent être volontaires, associant les compétences des uns et des autres pour aller vers de nouveaux horizons.

Cette conception se retrouve clairement énoncée dans la toute première page des archives de l'Académie :  
*« Ce 22 de décembre 1666, il a été arrêté dans la compagnie qu'elle s'assemblera deux fois par semaine, le mercredi et le samedi. [...] Le mercredi on traitera des mathématiques, le samedi on travaillera à la physique. Comme il y a une grande liaison entre ces deux sciences, on a jugé à propos que la compagnie ne se partage point, et que tous se trouvent à l'assemblée les mêmes jours. »*

La nouvelle académie se réunit donc pour la première fois le 22 décembre 1666, dans la bibliothèque du roi, rue Vivienne. Cette présentation au roi a fait l'objet d'un magnifique tableau d'Henri Testelin, visible au château de Versailles.

## Quelle place dans la Nation ?

Les choses sont dites dès la première page de l'histoire de l'Académie des sciences écrite par Bernard de Fontenelle : *« Le règne des mots et des termes est passé, on veut des choses. On établit des principes que l'on entend, on les suit, et de là vient qu'on avance. L'autorité a cessé d'avoir plus de poids que la raison, ce qui était reçu sans contradiction, parce qu'il l'était depuis longtemps, est présentement examiné et souvent rejeté. »* Les archives de l'Académie parlent d'elles-mêmes : les séances de travail se succèdent sur les thèmes choisis par les académiciens, en veillant aux intérêts de la science et du pays.



Bernard de Fontenelle  
(1657 -1757)

© Archives de l'Académie

© D'après B. Eymann - Académie des sciences

Ce 22 de decembre. 1666. Il a esté arresté dans la compagnie qu'elle s'assemblera deux fois la semaine, le mercredi, et le samedi. 2. que l'on de ces deux jours, Sçavoir le mercredi, on traittera des Mathematiques; le. samedi on travaillera à la Physique. 3. comme il y a une grande liaison entre ces Sciences, on à jugé à propos que la compagnie ne se partage point, et que tous se trouuent à l'assemblée les mesmes Jours.

Ce dernier Jour de l'année 1666. M.<sup>r</sup> Du Clos à proposé un plan des principales matieres qui se doiuent traiter dans la chymie.

Projet d'Exercitations Physiques,  
proposé à L'assemblée, par  
le J.<sup>r</sup> Du Clos.

le vendredi, dernier jour de decembre. 1666.

La Compagnie ayant resolu de commencer les

© C. Manrique - Académie des sciences

Procès-verbal de la 1<sup>re</sup> séance de l'Académie (extrait)

Après un si bon début, évoquons en quelques mots la résilience de l'Académie des sciences : une grande académie se doit de garder le cap, « La raison contre l'autorité ». Sur une période de 350 années, l'Académie aurait pu faiblir, se perdre, oublier sa raison d'être, devenir un simple cénacle heureux de son confort. Il n'en est rien, elle a su traverser des périodes difficiles. Ainsi, agacée par l'adjectif « royale », la Convention décide de supprimer toutes les académies le 8 août 1793. Actifs au sein du Comité d'instruction publique, Talleyrand en 1791 et Condorcet en 1792 avaient proposé la création d'un institut regroupant les différentes académies, et destiné à l'avancement des sciences et des arts. Malheureusement, cette période de la Révolution française n'y est pas propice. Nous sommes au plus fort de la Terreur : « La République n'a pas besoin de savants », aurait-on dit en mai 1794. Même si ces paroles n'ont pas été prononcées, il est sûr que certains révolutionnaires les pensaient fortement. Une chanson a même été écrite sur ce thème. Aujourd'hui encore, de nombreuses personnes doutent de l'intérêt du progrès scientifique. Nous n'oublions pas que l'évolution de la science se présente comme une médaille : il y a toujours un revers. Est-ce une raison pour refuser la création scientifique ? Nous ne gardons pas un bon souvenir des pays qui, à un moment donné de leur histoire, ont essayé de se débarrasser de la science et des scientifiques. Très vite, ces sociétés se sont retrouvées sur le chemin de la régression sociale et culturelle. Il est toujours préférable d'essayer la science que de maintenir l'ignorance.

La jeune République va elle-même revenir assez vite sur sa décision de 1793, et reconnaître le travail des savants qui se sont engagés au service de la Nation. Dans une loi sur l'organisation de l'Instruction

publique, votée le 25 octobre 1795, la Convention thermidorienne crée un Institut des sciences et des arts, destiné « à perfectionner les sciences et les arts par des recherches non interrompues, par la publication des découvertes, par la correspondance avec les sociétés savantes et étrangères. » On sent une pointe de regret sur la période d'arrêt des travaux de l'Académie, et on peut noter la dimension internationale donnée à cet Institut composé de 144 membres répartis en trois classes, la première étant celle des sciences physiques et mathématiques. Cette classe deviendra l'Académie des sciences par l'ordonnance



royale du 21 mars 1816. Deux cents ans plus tard, l'Académie est toujours là, avec le même intitulé.

La prochaine grande étape sera la célébration des 400 ans de l'Académie, que les plus jeunes de nos membres verront en 2066. Ils pourront dire alors : « *Je me souviens des 350 ans de notre jeune Académie.* »

*Tempus fugit, memoria manet.*



Présentation des membres de l'Académie des sciences par Colbert à Louis XIV. On y reconnaît au centre le roi, en rouge, avec à sa droite Colbert et, devant lui, l'abbé du Hamel ; Christiaan Huygens, présenté de face, est immédiatement placé derrière du Hamel. Tableau d'Henri Testelin (1616-1695), d'après Charles Le Brun (1619-1690)

## La marche de la connaissance



© B.Eymann - Académie des sciences

### Catherine Bréchignac

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, ambassadeur délégué à la science, la technologie et l'innovation

*« Tous les hommes ont naturellement le désir de savoir. Ce qui le montre, c'est le plaisir que nous procurent les perceptions de nos sens. Elles nous plaisent par elles-mêmes, indépendamment de leur utilité. »* Ainsi commence Aristote dans le livre premier de *La Métaphysique*, où il s'interroge sur la construction du savoir à partir de l'expérience. Il y partage le savoir entre la science et l'art au sens premier de savoir-faire. *« Le savoir-faire commence lorsque, d'un grand nombre de*

*notions fournies par l'expérience, se forme une seule conception générale qui s'applique à tous les cas semblables. La science [...] traite des premières causes et des principes. »*

Plus de deux mille ans se sont écoulés, et cette réflexion conserve toute sa pertinence. Dans son propos, Aristote dissocie le savoir-faire, dont la base est le savoir empirique, de la science, laquelle s'adosse à la théorie. Cette distinction reflète l'activité de notre cerveau qui, outre l'émotion, fonctionne, pour répondre à une question, soit par comparaison – il puise alors dans l'ensemble des expériences stockées dans sa mémoire une analogie –, soit par déduction théorique. Il a parfois recours à une combinaison des deux. Le mode comparatif, que l'on nomme souvent intuitif, est en général plus rapide que le mode déductif.

### Aussi loin que remonte le savoir des hommes, quels progrès avons-nous accomplis ?

Les peintures rupestres qui ont résisté des dizaines de milliers d'années pour arriver jusqu'à nous sont aussi émouvantes que les tableaux de Dufy, Kandinsky ou Franz Marc ; entre eux, point de progrès. Quand bien même n'en connaîtrions-nous pas le sens, c'est leur capacité à nous émouvoir qui importe. Certes, la peinture a une histoire. Au fil du temps se sont succédé des époques où les artistes ont fixé sur la toile leurs croyances, leur environnement, leurs impressions, leurs symboles, leurs abstractions, mais cette histoire ne peut s'apparenter à un progrès. Il est indiscutable aussi que la maîtrise de la perspective a permis aux peintres de la Renaissance de perfectionner la représentation d'un paysage ; toutefois, cela



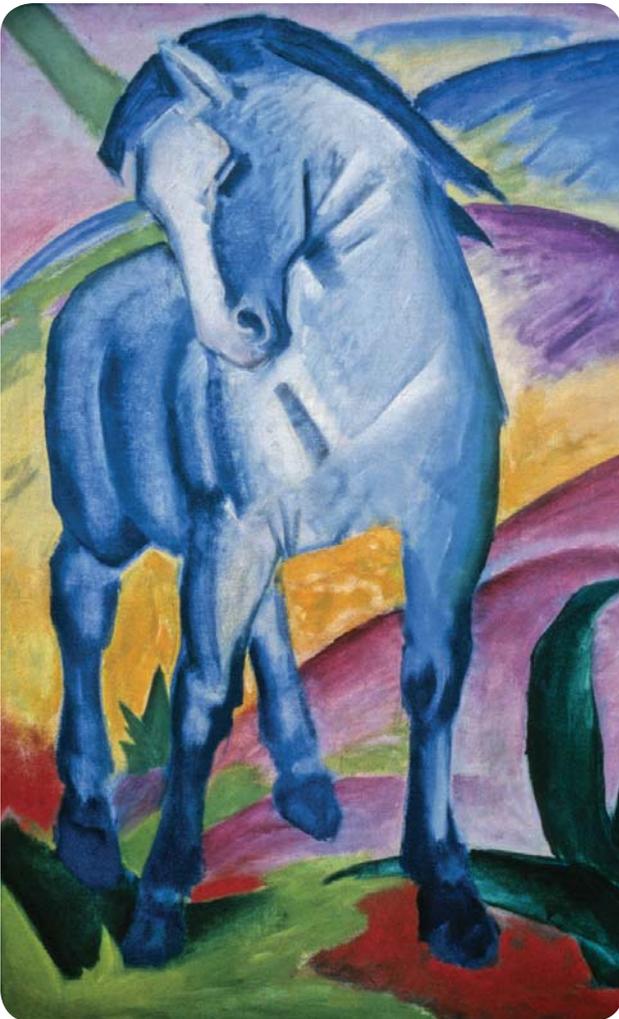
Conseil tenu par les rats, fable de La Fontaine dont la morale est toujours d'actualité.

ne constitue pas, en soi, un progrès. Il n'existe pas de progrès dans l'art, parce qu'il n'existe pas de progrès dans l'esthétique : le beau reste une valeur subjective, un face-à-face personnel entre notre sensibilité et une œuvre, un paysage, un moment, une personne.

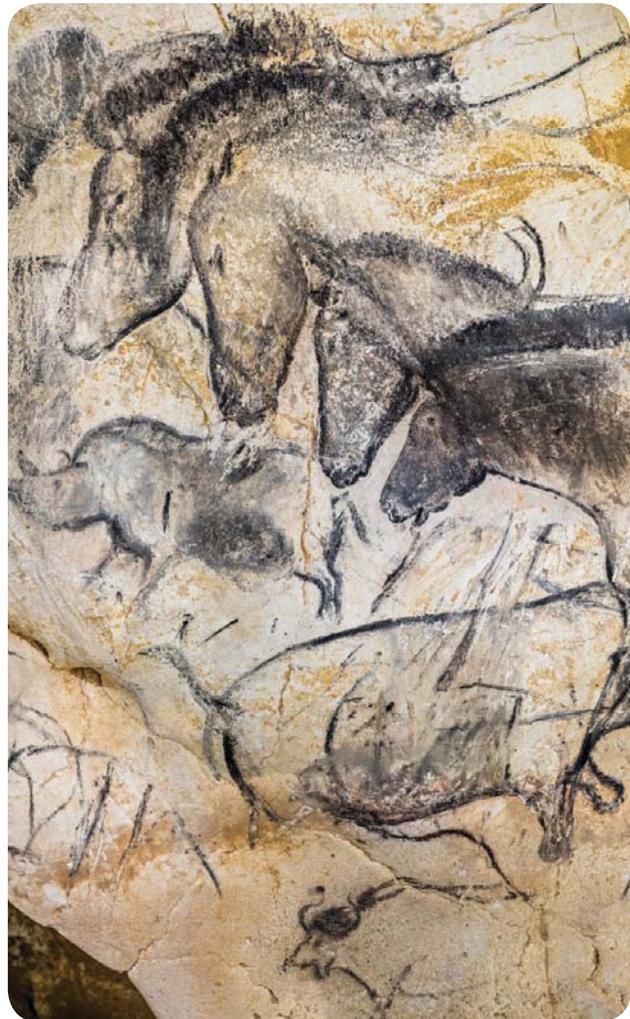
En littérature non plus on ne saurait parler de progrès. L'Iliade et l'Odyssée d'Homère, un poème de Ronsard, une fable de La Fontaine, des vers de Rimbaud ou de Rilke résonnent en nous sans gradation. Victor Hugo nous le rappelle en 1864, dans son livre *William Shakespeare* : « *Shakespeare change-t-il quelque chose à Sophocle ? [...] Non. Les poètes ne s'entr'escaladent pas. L'un n'est pas le marchepied de l'autre.* » En littérature, ce qui importe, ce

sont les mots, les mots qui expriment, les mots qui suggèrent, la force des mots qui déclenche l'émotion. Il y a là une infinité de possibilités qui nous touchent à des degrés divers.

Il y a là une infinité de possibilités qui nous touchent à des degrés divers.



© Albert Knapp - Alamy



© Arnaud Frich/Centre National de la Préhistoire - Ministère de la Culture et de la Communication

Plusieurs dizaines de milliers d'années séparent la fresque rupestre de la grotte Chauvet (à droite) du Cheval bleu de Franz Marc, réalisé en 1911 (à gauche).

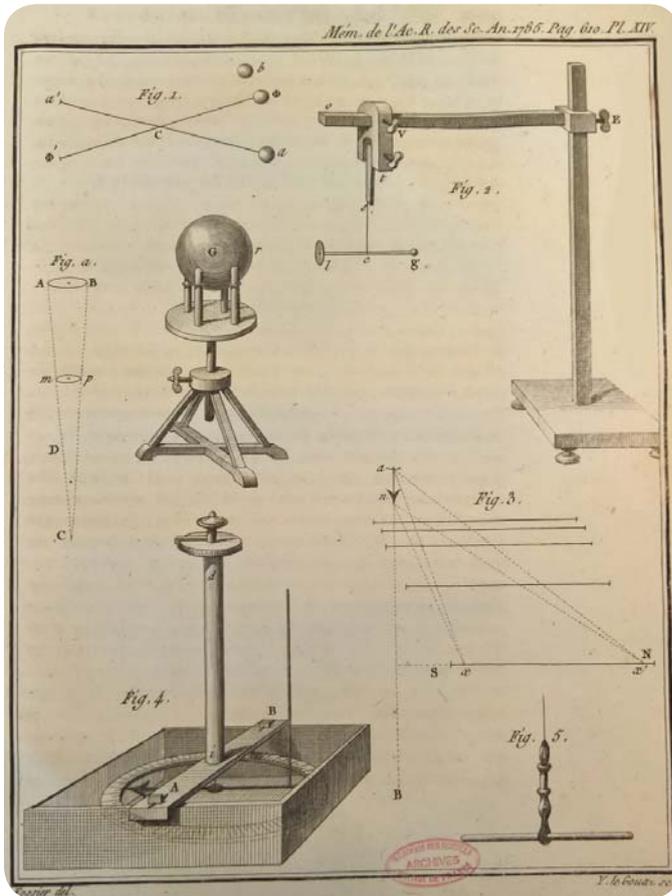
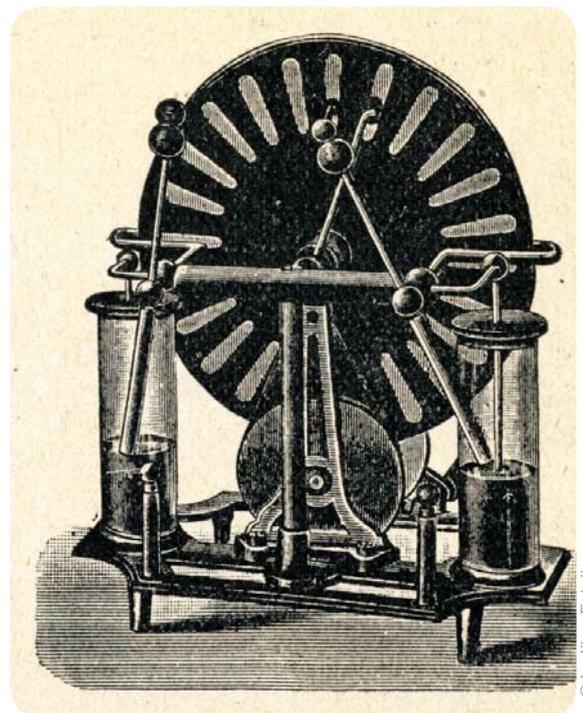


Planche extraite du Premier mémoire sur l'électricité et le magnétisme de Charles Coulomb (1785)

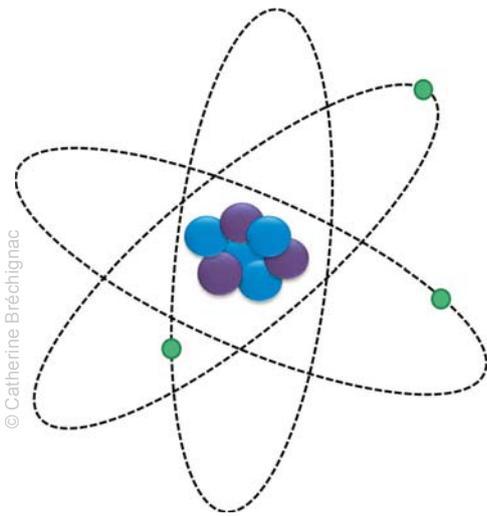
De même signe elles se repoussent, de signe contraire elles s'attirent. En 1785, Charles Coulomb présente un mémoire à l'Académie des sciences explicitant la force entre deux charges électriques. Cette force est proportionnelle aux charges et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les sépare. Puis vinrent les machines électrostatiques pour fabriquer du courant, engendrant la naissance des circuits électriques. À la fin du 19<sup>e</sup> siècle, J.J. Thomson démontre l'existence et le rôle de l'électron qui, quelques décennies plus tard, se révélera être l'une des particules élémentaires qui composent notre univers. En décembre 1947, des chercheurs de la compagnie *Bell Telephone*, aux États-Unis, inventent le transistor, à l'origine de l'électronique. Puis, en changeant d'échelle pour réduire les dimensions du transistor, le début

En revanche, on a coutume de parler du progrès des sciences. C'est parce qu'elles sont cumulatives que les sciences et les technologies progressent : pour ajouter une contribution à la connaissance scientifique, il nous faut connaître tous les maillons de la chaîne de ce qui fut antérieurement acquis. Prenons l'exemple de l'électricité, aujourd'hui devenue indispensable à notre quotidien. Elle fut découverte très tôt dans l'Antiquité. Le mot électron désignait en grec l'ambre jaune, connu pour ses propriétés électrostatiques.

L'étape suivante pour mieux l'appréhender ne fut franchie qu'au début du 18<sup>e</sup> siècle avec Charles Du Fay qui, dans les années 1730, distingue deux sortes d'électricité, selon qu'elle provient du frottement du verre ou de celui de l'ambre. Peu après, Benjamin Franklin les nomme positive et négative.



Machine électrostatique



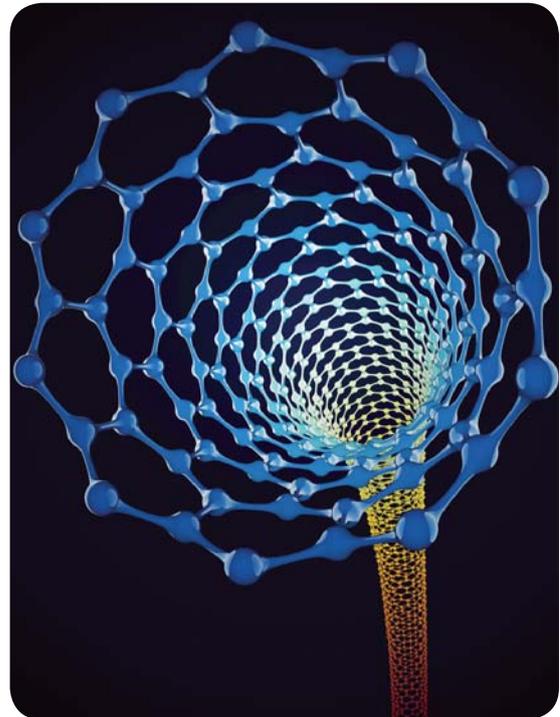
© Catherine Bréchnignac

*Un atome schématisé : le diamètre du noyau est environ 100000 fois plus petit que les orbites des électrons.*

La science diffère ainsi des lettres et des arts. Une avancée scientifique se concrétise lorsque les connaissances acquises sont réunies pour qu'émerge un savoir plus profond. Les hommes de science sont, à niveau égal, interchangeables. Si Einstein n'avait pas existé, un autre aurait trouvé la relativité, sans doute moins vite, ou peut-être aurait-il fallu se mettre à plusieurs. Quoiqu'il en soit, munis de la relativité générale, nous aurions développé nos GPS avec la même précision.

des années 2000 verra naître le nouveau paradigme de l'électronique à un électron.

Cette science cumulative ne se construit pas linéairement, mais progresse par paliers souvent associés à des changements de modèles évoluant toujours vers une compréhension accrue. Les théories successives ne sont que des approximations de théories plus générales. « *La science va sans cesse se raturant elle-même.* », nous dit encore Victor Hugo.



© koyae79 - Fotolia

*Nanotubes de carbone*



© Maxim\_Kazmin - Fotolia

*Le principe du GPS*



© www.neo-cortex.fr - Fotolia

## L'urgence de transmettre

Le caractère cumulatif de la science nous incite à nous adapter à l'accroissement rapide des connaissances. Le temps est révolu où Descartes préconisait aux jeunes, à juste titre à l'époque, de se libérer du dogme des anciens pour redécouvrir par eux-mêmes le savoir avec un esprit critique. Comme en témoigne François-Xavier Bellamy dans *Les déshérités, ou l'urgence de transmettre* (Plon Éd., 2014), il est vain aujourd'hui de laisser croire à quiconque qu'il peut tout redécouvrir par lui-même. Il n'en a tout simplement pas le temps. Au siècle des Lumières, tout savant pouvait acquérir et assimiler l'ensemble des savoirs scientifiques que l'époque rassemblait, et ce que nous appelons de nos jours l'interdisciplinarité germait sans peine dans un seul cerveau. Il en va

différemment aujourd'hui, où chacun d'entre nous ne saurait tout embrasser et doit se limiter à acquérir une discipline. C'est cette segmentation de la science qu'il nous faut connecter afin d'utiliser au mieux l'ensemble des savoirs.

Ainsi progresse la science qui, par son caractère cumulatif, rythme l'irréversibilité qui nous entraîne. Ce progrès n'exclut cependant pas des effets pervers. L'ignorance a toujours fait surgir de l'ombre des croyances qui aident à surmonter la peur de ce qui semble mystérieux car incompris. Il y a quelques siècles encore, ces peurs ancestrales étaient les mêmes pour tous. Mais aujourd'hui, le savoir des uns permet de créer et de produire des objets qui paraissent magiques pour d'autres. Ces derniers n'en comprennent ni le fonctionnement, ni même parfois la finalité, et pourtant ils les utilisent. L'écart entre une minorité qui a acquis des connaissances scientifiques profondes et la très grande majorité qui ne se les approprie pas présente un danger pour la cohésion de nos sociétés. Il crée une brèche croissante dans laquelle s'engouffrent charlatans, idéologues, imposteurs qui utilisent un langage pseudo-rationnel pour abuser ceux d'entre nous pour lesquels le savoir scientifique demeure une énigme. Comme un ressort qui se tend et finira par casser si l'on n'y prend garde, l'abondance des connaissances scientifiques acquises ne peut s'éloigner de nos sociétés. L'éducation ainsi que les réflexions par tous sur l'utilisation de ces savoirs sont plus que jamais primordiales. Dans son livre *La Pensée sauvage* (Plon Éd., 1962), Claude Lévi-Strauss nous invite à laisser coexister nos deux modes de pensée, la pensée scientifique et la pensée sauvage : l'une, plus abstraite, pense le monde de l'extérieur, tandis que l'autre, plus concrète, le pense de l'intérieur, car on ne peut demander à la science de répondre seule à toutes les questions que



nos sociétés doivent affronter. Elle ne le peut pas, et ce n'est pas son rôle.

L'accroissement sans précédent des connaissances scientifiques et technologiques depuis les deux derniers siècles a changé notre vision du monde. Nous l'appréhendons différemment de nos ancêtres. Cela engendre de l'angoisse, l'angoisse associée à ce que nous allons découvrir. Quel sera l'état du savoir scientifique dans quelques centaines d'années, qu'en ferons-nous ? C'est alors que les créations artistiques et littéraires trouvent toute leur mesure, justement parce qu'elles sont stables dans le temps, parce qu'elles ne progressent pas, ou peut-être évoluent-elles comme évolue l'émotion des hommes.

C'est cette construction des sciences par accumulation successive que nous allons, au gré de différents domaines, visiter au cours des pages qui vont suivre. Elle nous rappelle, 350 ans après la création de notre Académie, que la marche de la connaissance est indissociable d'une certaine idée du progrès. L'exercice auquel ont accepté de se livrer nos confrères est difficile. Conscients de cette âpreté, nous les remercions d'autant plus de s'être attelés à cette tâche.



## La nouvelle microbiologie



© B.Eymann - Académie des sciences

### Pascale Cossart

Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences, professeur à l'Institut Pasteur

La microbiologie est une science qui a exactement l'âge de l'Académie des sciences. Elle est aujourd'hui en pleine renaissance, et même en pleine révolution. De nombreux concepts nouveaux sont apparus dans les vingt dernières années, beaucoup d'autres sont en passe d'émerger. Cette révolution va de plus en plus influencer sur notre vie quotidienne, notre alimentation, la médecine et de multiples domaines en biologie, sans oublier l'environnement.

### Un peu d'histoire

Tout commence effectivement en 1666, à Delft : le marchand drapier Antonie van Leeuwenhoek, alors âgé de 34 ans, utilise des microscopes – qui sont loin de ressembler aux microscopes actuels – pour vérifier la qualité de ses étoffes. Il se passionne alors rapidement pour la microscopie et se met à fabriquer lui-même des lentilles d'une qualité et d'une puissance encore jamais atteintes, qui le poussent à observer le contenu du sang, du sperme et de beaucoup d'autres liquides comme l'eau des mares de son village. Cela le mène à découvrir ce qu'il appellera des « animalcules », de petits organismes parfois mobiles. Ces êtres unicellulaires vivants sont capables de se diviser de façon binaire en donnant naissance à des êtres unicellulaires identiques : van Leuwenhoek vient de découvrir les bactéries. Il consigne ses observations dans des lettres qu'il envoie à la *Royal Society* dès 1673. Une importante correspondance s'ensuivra, qui durera jusqu'à sa mort en 1723. La *Royal Society* le reçoit en son sein en 1680, l'Académie des sciences l'admettra comme correspondant en 1699.

Les travaux de van Leeuwenhoek resteront longtemps ignorés, notamment parce que le savant n'avait pas partagé avec d'autres sa technologie de fabrication des lentilles, ce qui empêcha la reproduction de ses observations et la vérification de ses conclusions. À l'époque, les publications des recherches n'étaient pas soumises aux mêmes règles que celles qui sont en vigueur maintenant !

© Photo Researchers, Inc - Alamy

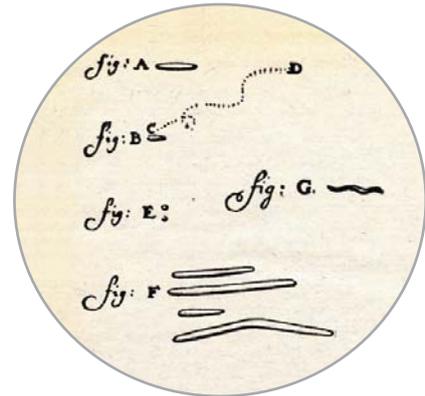


*Antonie van Leeuwenhoek (1632-1723)  
et les débuts de la microbiologie*



*Réplique du microscope de Leeuwenhoek*

© Dorling Kindersley Ltd - Alamy



*"Animalcules" détectées  
dans la salive humaine, 1675*

© Juulijis - Fotolia

C'est finalement à Louis Pasteur et Robert Koch que l'on doit la véritable naissance de la microbiologie à la fin du 19<sup>e</sup> siècle. Ces deux grands scientifiques mirent fin à la théorie de la génération spontanée et, avec leurs nombreux disciples, identifièrent les agents responsables de maladies qui dévastaient l'humanité depuis des millénaires, telles que la peste, le choléra ou, encore, la tuberculose. Ce sont eux qui ouvrirent la voie à de multiples outils de diagnostic, de thérapeutique et, surtout, de prévention : les vaccins.



© Archivart - Alamy

la biologie moléculaire et de ses approches dans des bactéries non pathogènes, telles que la fameuse *Escherichia coli*, pour que démarre, à la fin des années 1980, une nouvelle période dans la compréhension des maladies infectieuses.

On identifie alors les facteurs de virulence produits par les bactéries pathogènes, on commence à comprendre comment agissent certaines toxines, et comment certaines bactéries entrent dans les cellules et se disséminent dans les tissus, en mettant en place une incroyable variété de stratégies pour contrecarrer les défenses immunitaires de l'hôte infecté. Très vite, la biologie cellulaire et ses nombreux types de microscopie – microscopie à fluorescence, microscopie électronique, vidéomicroscopie – permettent aux microbiologistes d'observer en temps réel les infections. Il va sans dire que pour parachever cette traque moléculaire, la génomique entre en jeu, juste avant le début de ce millénaire. Les séquences complètes des génomes bactériens sont publiées les unes après les autres. Ces génomes bactériens sont d'une très grande variabilité

Louis Pasteur et Robert Koch, pères de la microbiologie



Louis Pasteur (1822-1895)

© www.neo-cortex.fr - Fotolia



Robert Koch (1843-1910)

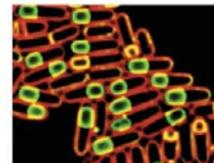
© Juulijis - Fotolia

Bien sûr, leurs connaissances des maladies infectieuses, en particulier des maladies bactériennes, étaient empiriques, et il faudra attendre la découverte de l'ADN et la mise en place de

PASCALE COSSART

## La Nouvelle Microbiologie

Des microbiotes aux CRISPR



Pour mieux comprendre comment la microbiologie a radicalement changé ces dernières décennies (P. Cossart, Odile Jacob Éd., Paris, 2016)

et l'analyse montre leur adaptabilité : les bactéries sont capables, par différents mécanismes, de recevoir ou donner, bref d'échanger, avec d'autres bactéries des fragments de génomes qui leur confèrent des propriétés nouvelles – notamment celle de résister aux antibiotiques – et la capacité de vivre dans des environnements nouveaux.

## Le fléau de la résistance aux antibiotiques

En 2016, on ne peut en effet plus parler de maladies infectieuses bactériennes sans parler d'antibiotiques.

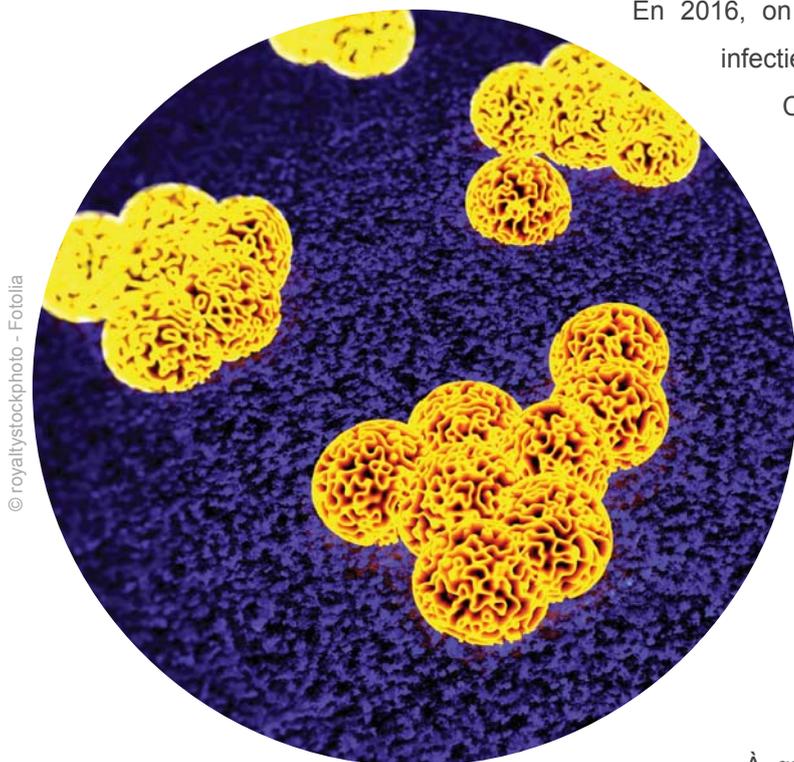
Ces composés, qui ont commencé à être utilisés de façon routinière dans les années 1950 et annonçaient la fin des maladies infectieuses, ont, avec les vaccins, fait reculer de façon significative la mortalité dans les pays développés. Hélas, les premières résistances sont apparues dès la fin des années 1960, et sont devenues si graves qu'elles mènent aujourd'hui à des impasses thérapeutiques dramatiques, et que l'on assiste à un véritable retour à une ère préantibiotique.

À quoi sont dues ces résistances ? En grande partie aux transferts de gènes évoqués plus haut, qui rendent la bactérie capable de modifier l'antibiotique, et ainsi de l'inactiver, ou de modifier la cible de l'antibiotique, ce dernier devenant

inefficace. La résistance peut aussi être due à la présence d'une protéine-pompe qui exporte l'antibiotique une fois qu'il est entré. Beaucoup de bactéries portent plusieurs gènes de résistance, elles sont appelées multirésistantes. Les chiffres de prédiction de décès dus à l'antibiorésistance sont devenus alarmants : si l'on n'agit pas maintenant, ces décès, d'ici 2050, pourraient chaque année concerner 10 millions de personnes à travers le monde. Les pouvoirs publics sont en alerte et il faudra des mesures fortes au niveau de la planète pour stopper cet état de fait, bloquer l'émergence de nouvelles résistances et produire de nouveaux agents antibactériens.

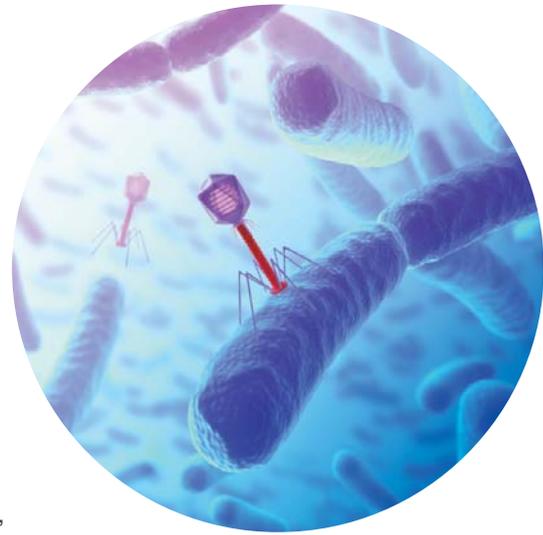
## CRISPR/Cas9, le système bactérien qui révolutionne la génétique ?

Les antibiotiques ne sont pas les seuls agents antibactériens. Dans la nature, les bactéries sont, comme nous, agressées par des virus, qu'on appelle des bactériophages. Ces attaques virales prennent place dans tous les environnements, mais il est des situations où elles peuvent avoir des conséquences désastreuses,



*Bactéries "Superbug"  
résistantes aux antibiotiques*

par exemple dans l'industrie laitière. Certains produits laitiers, tels que les yaourts, sont en effet fabriqués grâce à des bactéries sélectionnées pour l'arôme qu'elles donneront au produit final. Une attaque par un bactériophage peut avoir des effets économiques sévères. L'une des grandes avancées de ces dernières années est la découverte de la capacité des bactéries à s'immuniser contre les bactériophages, et celle de leur système immunitaire très efficace.

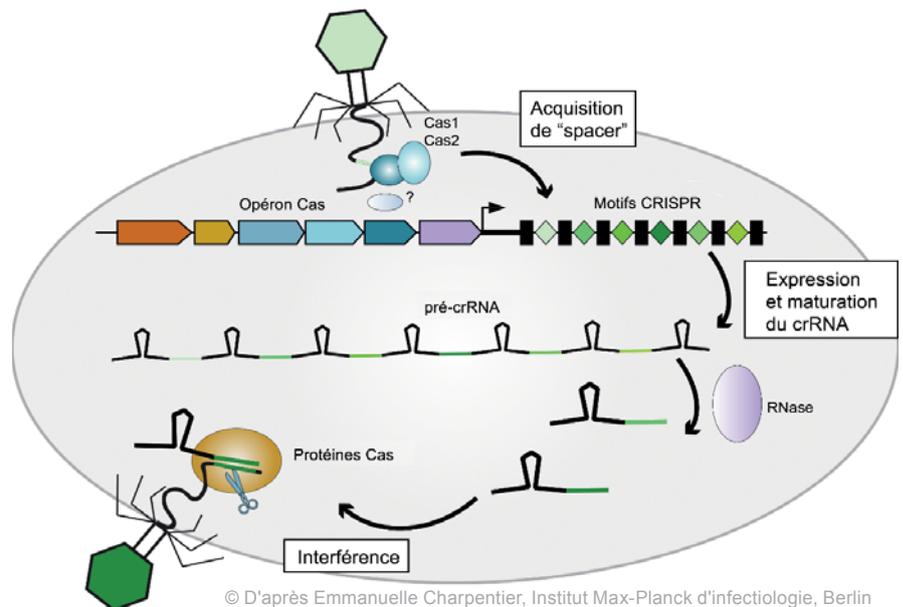


© ktsdesign - Fotolia

Bactériophage infectant une bactérie

Lorsqu'elles rencontrent un virus, la plupart des bactéries peuvent, juste après l'infection, c'est-à-dire après l'interaction du virus avec son récepteur, intégrer une petite partie de l'ADN viral dans un endroit du génome appelé CRISPR. Si ces bactéries rencontrent par la suite ce même virus, elles le reconnaîtront et seront capables de le détruire et d'empêcher l'infection. Cette destruction fait intervenir soit plusieurs protéines Cas, soit une seule protéine,

Cas9. L'efficacité du système CRISPR/Cas9 est si impressionnante que, très vite, l'idée d'utiliser cette machinerie bactérienne pour modifier de façon ciblée les génomes de tous les organismes vivants est apparue et a été mise en pratique. Cette technique est en train de révolutionner la biologie en permettant l'étude des gènes de façon ciblée, soit en les supprimant, soit en les modifiant, ce qui ouvre des perspectives thérapeutiques jamais atteintes, mais pose parallèlement des problèmes éthiques importants.



© D'après Emmanuelle Charpentier, Institut Max-Planck d'infectiologie, Berlin

CRISPR = *Clustered regularly interspaced short palindromic repeats*

Cas = *CRISPR-associated*

CrRNA : *CRISPR targeting RNA*

*Le système immunitaire bactérien CRISPR/Cas*

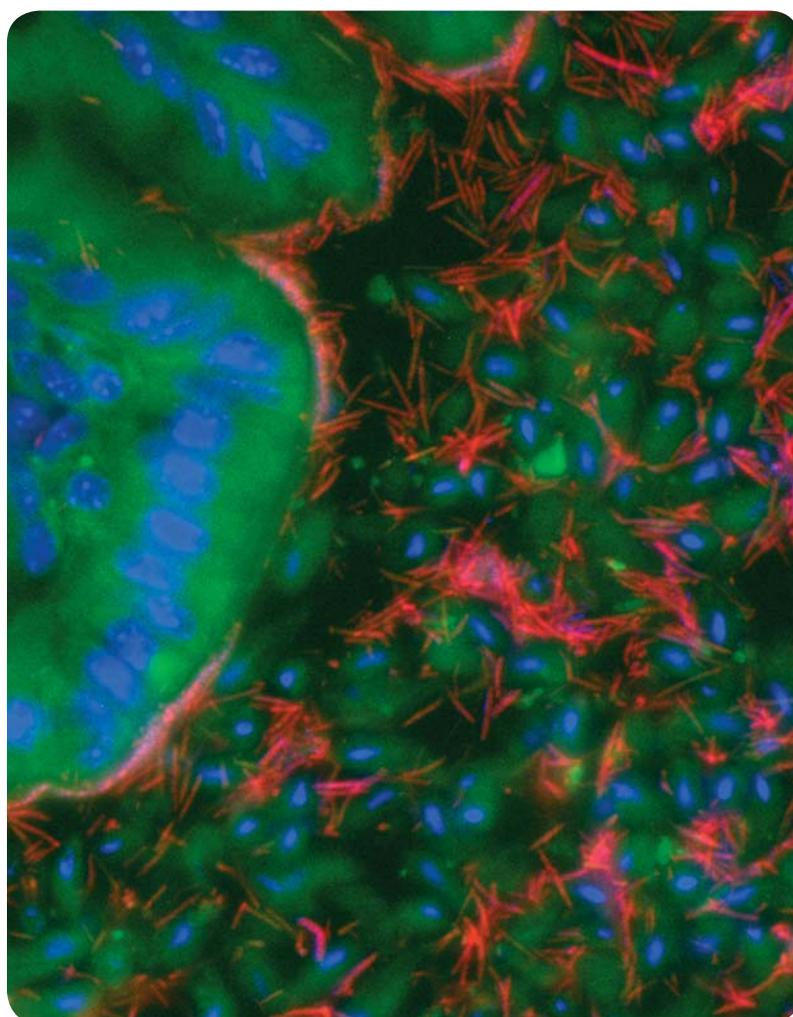
## Les communautés de bactéries

Une dernière facette de la microbiologie est celle de la sociomicrobiologie. En effet, il est rare qu'une bactérie vive de façon isolée : les bactéries vivent en groupes, qui peuvent se former dès que l'une d'elles se dépose sur une surface inerte ou vivante, y adhère, se multiplie, secrète une matrice qui finit par structurer une petite communauté, protégée du milieu extérieur, qu'on appelle biofilm. On trouve ces

biofilms partout dans la nature, mais aussi sur certaines parties de notre corps – notamment les dents –, dans certaines structures industrielles – comme des tuyaux d'arrivée d'eau – ou, encore, sur certaines prothèses ou cathéters en milieu médical. Dans ces biofilms, les bactéries peuvent persister pendant des années, à l'abri des antibiotiques ou des détergents, ce qui pose de sérieux problèmes médicaux ou industriels.

D'autres assemblées microbiennes, beaucoup plus importantes en taille, peuvent se former en symbiose avec tous les organismes vivants, et commencent à être bien documentées : il s'agit des microbiotes. Qui n'a pas entendu parler du microbiote intestinal, qu'on appelait jadis la flore intestinale ? Les progrès de la génomique ont permis des avancées spectaculaires dans notre connaissance de l'importance du rôle de cette flore. Il est maintenant bien établi qu'une grande diversité des espèces présentes est signe d'une bonne

santé et que cette diversité s'appauvrit avec l'âge, que ces microbiotes régulent notre développement, en général, et particulièrement celui de notre système immunitaire, nous protègent des pathogènes et produisent des composés qui migrent jusqu'au cerveau et peuvent affecter notre comportement.



© Gérard Eberl - Institut Pasteur

*Le microbiote intestinal*

*sensing* : l'objectif est d'agir en groupe si le quorum est atteint ! Par exemple, une bactérie pathogène ne produit ses toxines que si les bactéries de la même espèce sont assez nombreuses pour, qu'ensemble, elles aient des chances de réussir une infection en contrecarrant les défenses immunitaires de l'hôte infecté. Les bactéries sont comme les académiciens, elles ne prennent des décisions importantes que si le quorum est atteint !

Ces microbiotes et les biofilms sont de véritables sociétés dans lesquelles les membres d'une même espèce se parlent en utilisant un langage chimique spécifique, perçu par des récepteurs qui permettent aux bactéries d'apprécier le nombre de leurs congénères présents dans leur environnement proche. C'est le *quorum*

## D'une médecine empirique à une médecine de précision



© B.Eymann - Académie des sciences

### Alain Fischer

Membre de l'Académie des sciences – section *Biologie humaine et sciences médicales* –, directeur de l'Institut Imagine (université Paris-Descartes - Sorbonne Paris Cité), professeur au Collège de France, Paris

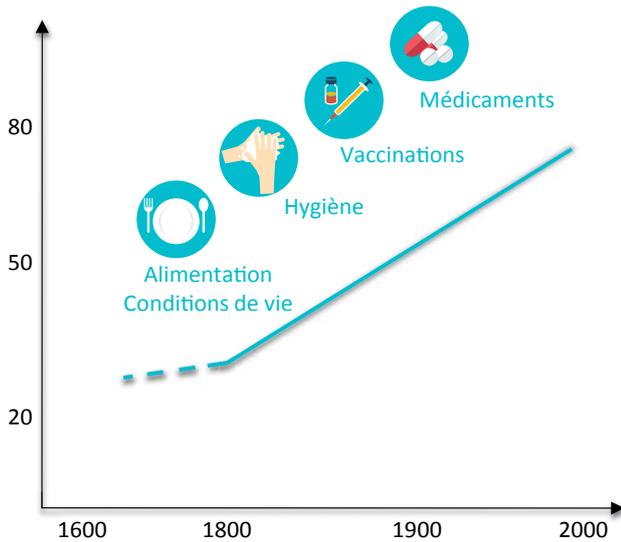
En 1666, Molière faisait jouer *Le Médecin malgré lui*, reflet satirique de la médecine de son temps. Au 19<sup>e</sup> siècle, l'empirisme associé à l'initiation d'une démarche expérimentale ont permis l'émergence progressive d'une médecine qui soigne. Au 20<sup>e</sup> siècle, l'essor des sciences mathématiques (épidémiologie), physique (imagerie), chimique (médicament) et biologique (génétique, biologie moléculaire) ont contribué aux progrès de la médecine, notamment à travers une démarche réductionniste. Demain, l'intégration des données de santé permettra peut-être une approche précise, pourvu que la dimension humaine de la médecine subsiste et que l'accès aux soins pour tous ne soit pas un vain concept.

bué aux progrès de la médecine, notamment à travers une démarche réductionniste. Demain, l'intégration des données de santé permettra peut-être une approche précise, pourvu que la dimension humaine de la médecine subsiste et que l'accès aux soins pour tous ne soit pas un vain concept.

### Des débuts difficiles ?

L'année de la création de l'Académie des sciences, *Le Médecin malgré lui* constituait l'une des nombreuses occasions utilisées par Molière pour railler l'inefficacité de la médecine. Près de 150 ans plus tard, Pierre Simon Laplace, qui réformait l'Académie, indiquait « *Je ne mets pas les médecins à l'Académie des sciences parce qu'ils sont des savants, mais pour qu'ils soient avec des savants.* », vision lucide – comme l'avenir le démontra – mais cruelle d'une médecine toujours aussi peu efficace : en témoigne une espérance de vie quasi inchangée de la préhistoire au début du 19<sup>e</sup> siècle. De fait, l'ère thérapeutique de la médecine ne débute vraiment qu'avec la pénicilline et ne prendra son essor qu'au décours de la seconde guerre mondiale, il y a 70 ans. Le spécialiste américain des sciences humaines S Shryrock écrivait en 1947 : « *Le 19<sup>e</sup> siècle médical est caractérisé par un nihilisme thérapeutique destiné à perdurer jusqu'au milieu du siècle suivant.* » La recherche médicale aura du mal à prendre son essor en France. Ainsi, à propos d'une rencontre après guerre avec le directeur de l'Institut national d'hygiène, François Jacob écrit, dans *La statue intérieure* : « *Il ne pouvait rien pour moi, d'ailleurs la génétique ne l'intéressait pas.* » Est-ce à dire que la médecine n'est réellement née qu'il y a 70 ans, et que les débuts en France de la recherche médicale furent douloureux ?

Espérance de vie (années)



Évolution de l'espérance de vie au cours des 350 dernières années en France, avec les principales causes de son augmentation

La réponse est en grande partie négative, car beaucoup ont contribué à ce que les sciences rencontrent et fertilisent la médecine. L'empirisme médical traditionnel, la qualité de l'observation – celle de Laennec, Bichat, Corvisart (« l'école de Paris ») – au début du 19<sup>e</sup> siècle en ont jeté les bases.



L'empirisme médical : observation d'une maladie cutanée au Mexique (statuette datant d'environ 2000 ans)

Ainsi, dès 1796, Jenner vaccine efficacement contre la variole, en 1847, Ignace Philippe Semmelweis, qui ne connaît pas les microbes, comprend que si les accoucheurs se lavent les mains après avoir pratiqué une dissection et avant d'accoucher, le taux de fièvre puerpérale et la mortalité qui lui est associée chutent considérablement, établissant ainsi par simple observation les bases de l'hygiène. Le 19<sup>e</sup> siècle a produit les concepts essentiels et les découvertes majeures qui ont permis l'essor de la médecine au 20<sup>e</sup> siècle. Citons bien sûr l'importance de la notion d'expérimentation introduite par Claude Bernard, qui écrit dans *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (1865) : « La médecine expérimentale, comme toutes les sciences expérimentales, sera la science qui cherche à remonter aux causes prochaines des phénomènes de la vie à l'état sain et à l'état morbide. » Il crée le concept de physiologie, tandis que Gregor Mendel définit les lois de la génétique, et que Louis Pasteur et Robert Koch découvrent les microbes.



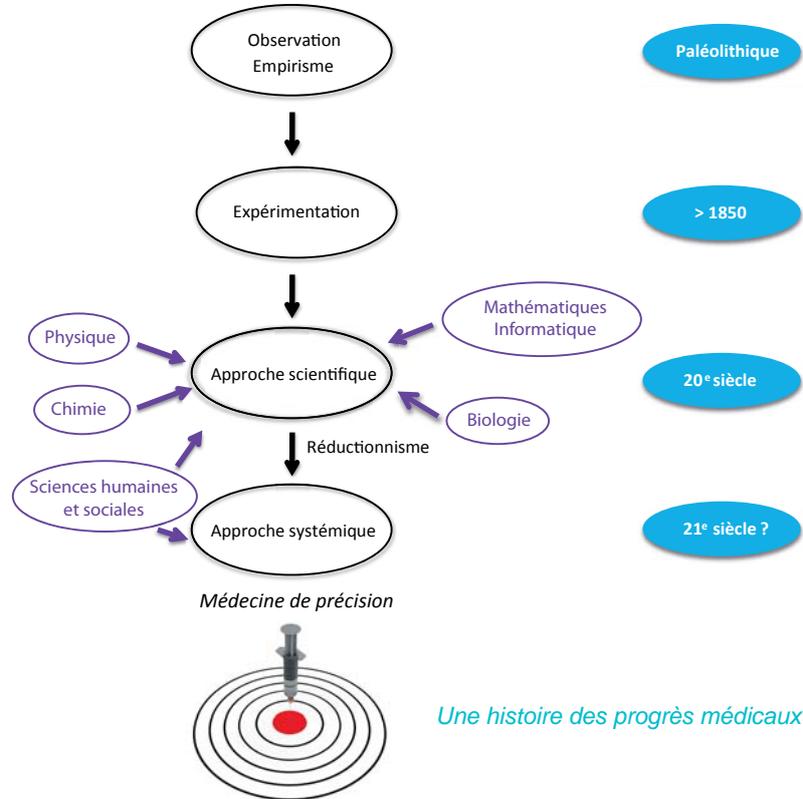
Claude Bernard par Léon Lhermitte (huile sur toile, 1889)

## Une approche scientifique de la médecine

De fait, les progrès de la médecine depuis 1945 proviennent du développement d'une approche scientifique des questions médicales grâce à l'apport des sciences : mathématiques puis informatique, physique, chimie et, bien sûr, biologie. Dans ce contexte, cette dernière a permis d'aborder les maladies à l'échelle moléculaire, dans une perspective réductionniste fructueuse.

L'épidémiologie joue un rôle central en médecine dans l'établissement des facteurs responsables de maladies. Elle implique l'utilisation de modèles dont le premier exemple provient des travaux de Daniel Bernoulli<sup>1</sup> qui démontra, dès 1760, que le procédé de la variolisation (inoculation de la variole) était efficace pour réduire le risque de variole. Depuis

lors, il devient possible de modéliser maladies infectieuses et non infectieuses. Ainsi, l'analyse quantitative de données remplaça « l'opinion » dans l'analyse des causes et conséquences des maladies.



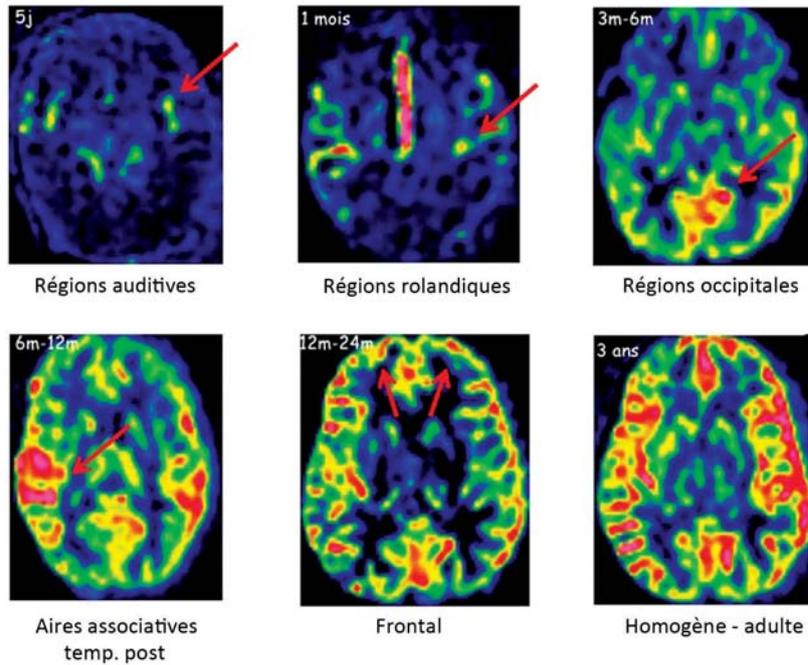
*Une histoire des progrès médicaux*

La physique a, quant à elle, notamment permis le développement des images médicales aujourd'hui omniprésentes en médecine. Le chemin parcouru est prodigieux, depuis la première image radiographiée d'une main, obtenue par Wilhelm Röntgen en 1895, aux applications actuelles dominées par les multiples facettes de l'imagerie de résonance magnétique, mise au point par Paul Lauterbach et Peter Mansfield (prix Nobel 2003) à partir des travaux fondamentaux de résonance magnétique nucléaire d'Anatole Abragam. Ces approches ont

1 - Voir AJ Valleron. CR Acad Sci Paris, Sciences de la vie 2000, 323 : 429-33



*Radiographie de la main de la femme de Wilhelm Röntgen, 1895*



© N. Boddart/Hôpital Necker-Enfants-Malades

*Régions fonctionnelles activées au cours du développement cérébral de l'enfant sain de 5 jours à 3 ans*

bouleversé la médecine en permettant de voir précisément à l'intérieur du corps, d'apprécier les volumes, les formes et certains aspects fonctionnels normaux ou pathologiques de tous les organes. Aujourd'hui combinée à la science algorithmique, leur utilisation constitue un élément clé d'une médecine numérique évoquée plus loin.

La naissance de la chimie organique à la fin du 19<sup>e</sup> siècle, les concepts d'enzyme/substrat, de ligands/récepteurs (Paul Erlich) ont été déterminants. Ainsi est née une recherche qui, de l'utilisation des substances naturelles, a abouti à la création de molécules chimiques médicaments. La conséquence en est l'essor de l'industrie pharmaceutique au cours de ces 70 dernières années, avec un nombre et une diversité impressionnants des classes de molécules actives ainsi élaborées : anti-infectieux, antihypertenseurs, antidiabétiques, neuroleptiques, analgésiques, anesthésiants, etc.



© zneb076 - Fotolia

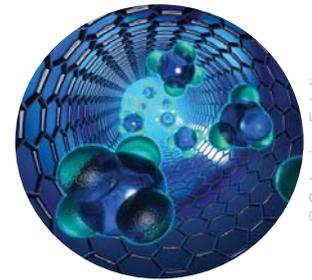


La biologie, avec l'essor de la biologie moléculaire, de la génétique, de la biologie cellulaire – à nouveau grâce aux avancées permises par la physique dans l'élaboration des microscopes – a notamment nourri les études du développement, de l'immunologie, des neurosciences et de la physiologie, avec pour résultats l'identification de nombreux mécanismes de maladies. L'étude des gènes s'est révélée déterminante aussi bien dans l'identification de plus de 3000 maladies héréditaires monogéniques – permettant diagnostic précis et conseil génétique – que dans l'observation d'anomalies génétiques acquises associées au cancer. C'est ainsi que l'identification d'un transcrite de fusion entre les gènes *BCR* et *ABL*, qui donne naissance à une kinase aberrante, a permis de comprendre la physiopathologie de l'une des formes les plus courantes de leucémie, la leucémie myéloïde chronique. Il en est résulté

la mise au point, dès 2000, d'une famille d'inhibiteurs de cette kinase dont l'utilisation contrôle la maladie (rémission complète) et, parfois, la guérit. C'est un exemple particulièrement illustratif de la puissance de l'approche scientifique réductionniste en médecine telle qu'observée au cours de ces 20 dernières années. Citons encore la mise au point d'agents antiinfectieux contre les virus, et celle de nouveaux antihypertenseurs ou de nouveaux anticoagulants.

Globalement, la combinaison de ces approches a conduit à élargir la palette thérapeutique :

- Grâce aux nanotechnologies, la vectorisation des médicaments permet d'envisager une amélioration de leur disponibilité, notamment à l'intérieur des cellules.
- Les biothérapies occupent une part croissante de la production de nouveaux médicaments. Ainsi, le développement d'anticorps monoclonaux (ACM) de plus en plus élaborés et mieux tolérés a contribué à la mise au point de traitements efficaces pour des maladies chroniques – comme la polyarthrite rhumatoïde et la maladie de Crohn (ACM anti TNF) – ou mortelles – lymphomes (ACM anti CD20) et plusieurs cancers au pronostic jusque là fatal, comme le mélanome métastatique ou certaines formes de cancer du poumon (ACM anti PD1, PDL1, CTLA4, etc.).



- Les thérapies cellulaires et géniques, dont les premiers résultats ont été acquis (maladies héréditaires, certaines leucémies), sont susceptibles d'élargir encore l'arsenal thérapeutique.
- La mise au point de dispositifs médicaux – prothèse sophistiquée liée à la recherche en ingénierie ergonomique – est une autre source de progrès, de même que la chirurgie mini-invasive, grâce à la réalité « augmentée » obtenue par l'utilisation de nouveaux logiciels alliés à la robotique.

Et les résultats sont là : l'espérance de vie ne cesse de croître. En France, entre 1990 et 2013, l'espérance de vie des hommes est ainsi passée de 73 ans à plus de 78 ans, celle des femmes de 81 ans à près de 85 ans. Ces résultats spectaculaires sont aussi à attribuer aux progrès sociaux, mais la médecine, et en particulier l'amélioration de la médecine périnatale, les mesures de prévention – hygiène et vaccination – et le traitement effectif de nombreuses maladies, y prend toute sa part. Ces progrès ont deux implications : l'amélioration de l'espérance en vie en bonne santé (gain de 4 ans pour les hommes, 3

ans pour les femmes en France entre 1990 et 2013), mais aussi une augmentation de la fraction de la population vivant avec une ou plusieurs maladies chroniques. Ainsi, dans la classe d'âge 60-69 ans, plus de 75% des personnes souffrent d'au moins une maladie, et près de la moitié d'au moins 5. Associée au vieillissement de la population, cette situation crée un défi de santé et un défi économique à notre société.



© WavebreakMediaMicro - Fotolia



© nobeastsofierce - Fotolia



© Sergey Nivens - Fotolia

## Les défis de la médecine et de la santé de demain

Malgré des avancées spectaculaires, certains domaines de la médecine ont moins progressé car les questions soulevées sont plus complexes : c'est le cas notamment des maladies neurodégénératives ou sensorielles (surdité, cécité) et de la santé mentale. Les changements de l'environnement et l'évolution des comportements sont sources de certaines affections qui sont en progression : obésité, diabète, addiction, maladies allergiques ou autoimmunes, maladies infectieuses bactériennes par résistance aux antibiotiques. La recherche médicale, qui s'appuie sur les avancées de la recherche fondamentale, doit en tenir compte.

Il faut aussi intégrer la complexité du vivant et de l'homme (sain ou malade), dont témoignent nos 22 000 gènes, le million d'éléments régulateurs présents dans notre génome, les  $3 \times 10^{13}$  cellules de notre corps, notre cohabitation avec environ  $4 \times 10^{13}$  bactéries dans l'intestin et plus de  $10^{15}$  virus ! Il faut prendre en compte le temps et le comportement individuel et collectif des hommes. Comment peut-on apprécier cette complexité, la quantifier et en extraire les éléments utiles à la médecine dans un environnement en constante modification ?

De façon fort logique, le nombre et le type de données disponibles pour chaque individu augmentent rapidement, d'autant que l'utilisation d'objets « connectés » facilitant le recueil à distance de nombreux paramètres pertinents dans le contexte d'une maladie donnée (rythme cardiaque, glycémie, etc.) va croissant. Une approche systémique de l'individu, sain ou malade, voit le jour. Se constituent ainsi des entrepôts de données souvent liés à un dossier médical électronique auxquels

peuvent être associées des informations biologiques

multiples – génome, épigénome, protéome, métabolome, images, etc. L'extraction « intel-

ligente » des données pertinentes, un

développement majeur des sciences

algorithmiques, devrait logiquement

faire progresser les connaissances médicales et devenir un

outil de décision médicale de ce

que pourrait être une médecine

de précision. Un enjeu de taille

tiendra à la capacité d'y ad-

joindre les fruits des recherches

en sciences humaines et sociales

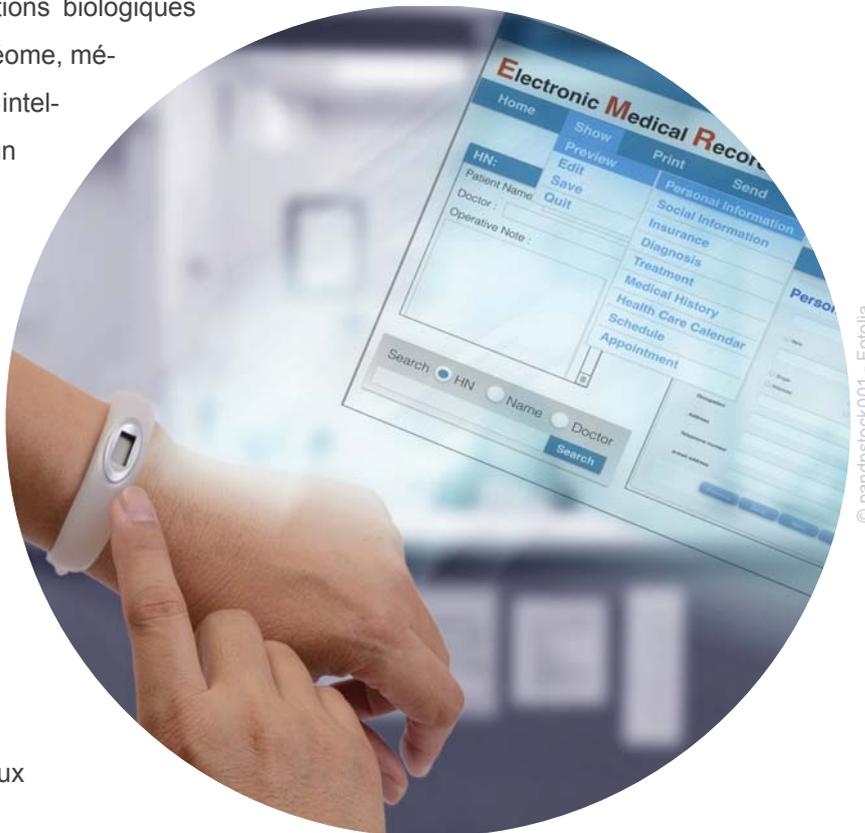
autour de la santé, essentielles à la

compréhension des comportements

humains individuels et collectifs face aux

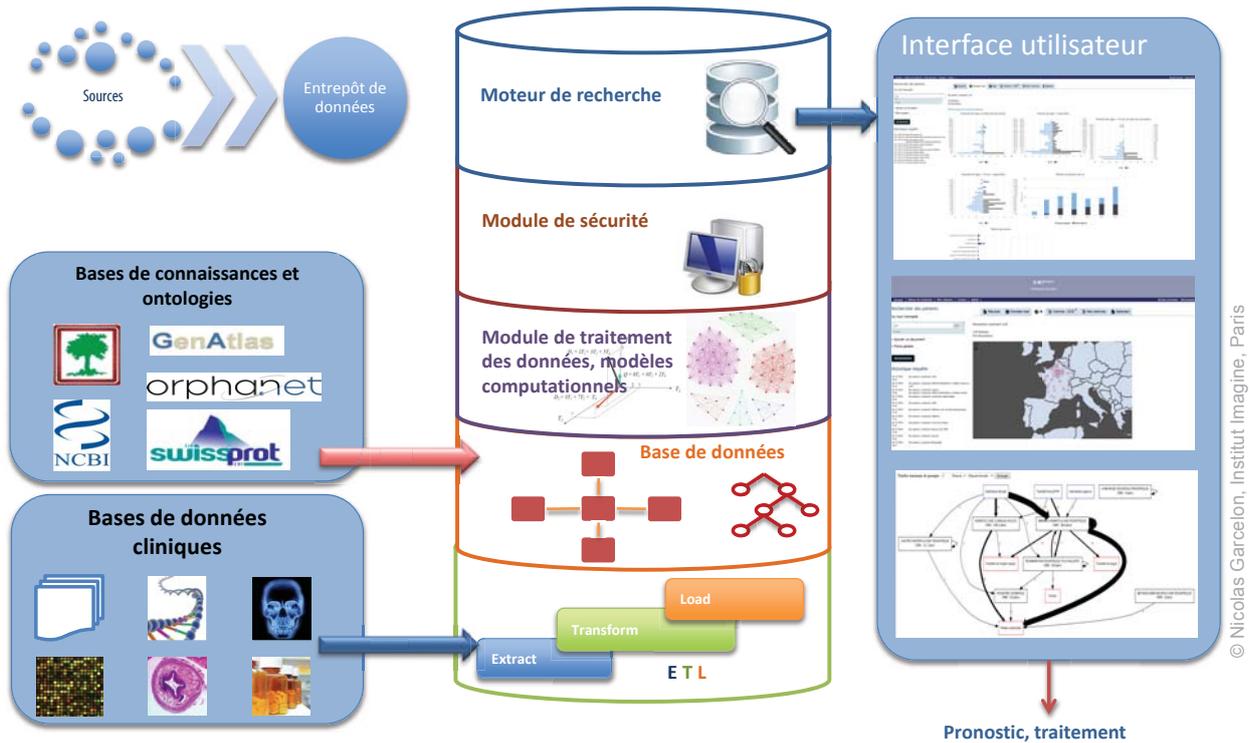
questions de santé.

questions de santé.



© pandpstock001 - Fotolia

La santé est un enjeu de société dont l'importance va croissant, en lien avec les progrès de la médecine fondés sur une approche scientifique. De nombreuses questions se posent : quelle acceptabilité des mesures de prévention et d'éventuelles prédictions en matière de santé ? Où placer le curseur ? Une politique de santé publique efficace implique une éducation sanitaire des citoyens (et des soignants) assez pointue, notamment en ce qui concerne l'appréhension des ordres de grandeur de risque. Quelle accessibilité aux soins ? En France, malgré un système de redistribution relativement efficace, les inégalités face à la santé persistent : différentiel d'espérance de vie, précocité diagnostique variable des maladies à risque mortel, accès disparate à la prévention, etc.<sup>2</sup>



Constitution d'un entrepôt de données médicales et des modules associés d'extraction de données pertinentes

Le coût des traitements innovants – illustré, dans la période récente, par les nouveaux agents anticancéreux – est un lourd facteur de risque d'aggravation de l'inégalité d'accès aux soins. Ces questions requièrent d'approfondir la réflexion éthique qui insère les progrès de la médecine dans une vision humaine, fixe le cadre et évite les dérives possibles. C'est dans ce contexte que les mots de Nicolas de Condorcet – dans *Esquisse d'un tableau historique des progrès de l'esprit humain*, 1794 – prennent toute leur ampleur prophétique : « On sent que les progrès de la médecine préservatrice doivent faire disparaître à la longue les maladies transmissibles et contagieuses, et ces maladies générales qui doivent leur origine aux climats, aux aliments, à la nature des travaux. Il ne serait pas difficile de prouver que cette espérance doit s'étendre à presque toutes les maladies dont il est vraisemblable que l'on saura un jour reconnaître les causes éloignées. »



Nicolas de Condorcet (1743-1794)

## À la découverte de l'homme et de son cerveau



© B.Eymann - Académie des sciences

### Jean-Pierre Changeux

Membre de l'Académie des sciences – section *Biologie moléculaire et cellulaire, génomique* –, professeur honoraire au Collège de France et à l'Institut Pasteur

Descartes écrit vers 1632 le *Traité de l'homme*, qui ne sera publié qu'après sa mort, en 1664, deux ans avant la première séance de l'Académie des sciences. Inachevé, ce texte prophétique anticipe, malgré ses inexactitudes, 350 ans de recherches sur la découverte de l'homme et de son cerveau. À partir des structures élémentaires du corps de l'homme, muscles, nerfs – « *petits et grands*

*tuyaux* » –, il tente d'établir un lien causal entre l'anatomie de cette « *machine* » et ses fonctions physiologiques, niveau après niveau, jusqu'à « *l'âme raisonnable* » avec « *son siège principal dans le cerveau* ».

Descartes termine son traité ainsi : « *Il ne faut concevoir en cette machine aucun autre principe de mouvement et de vie, que son sang et ses esprits, agités par la chaleur du feu qui brûle continuellement dans son cœur, qui n'est point d'autre nature que tous les feux qui sont dans les corps inanimés.* » Une phrase qui constitue le fil conducteur de cette présentation des étapes successives du progrès de nos connaissances sur l'homme, depuis la chimie du vivant jusqu'aux fonctions supérieures du cerveau.

### Première étape : la chimie du vivant

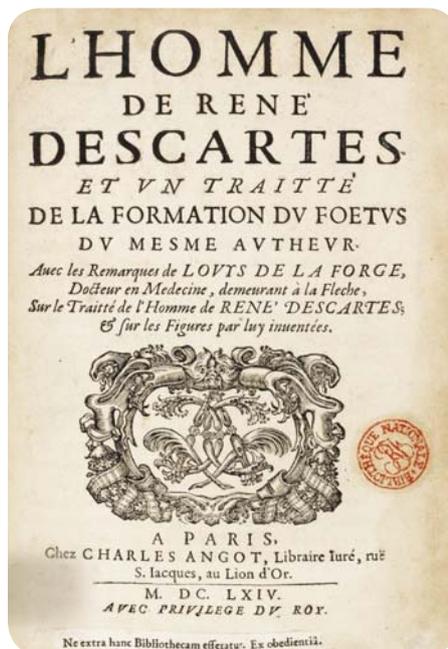
En 1661, l'Irlandais Boyle poursuit la philosophie mécaniste de Descartes et tente d'expliquer les propriétés de la matière sur la base d'atomes qu'il appelle *corpuscules*. Il observe également qu'en pompant l'air d'un vase clos, on éteint une flamme et on tue les animaux placés à l'intérieur.

Lavoisier, fondateur de la chimie moderne, s'intéresse à la combustion. Il démontre, devant l'Académie des sciences le 26 avril 1775, que la combustion du charbon de bois dégage l'air « fixe », qui résulte de la



Descartes, dans son *Traité de l'homme* (1664), anticipe les découvertes sur le cerveau

Pastel de Simon Vouet, collections du Louvre. Identification du portrait à René Descartes par Alexandre Marr (In Times Literary Supplement, 13 March 2015, pp 14-15). Merci à Amauld et Barbara Brejon de Lavergnée pour cette information.



combinaison du carbone avec un gaz, alors mystérieux, l'oxygène.

Progrès majeur, Lavoisier étend sa théorie chimique à la respiration des êtres vivants. En collaboration avec Laplace, il construit le calorimètre pour mesurer la quantité de chaleur dégagée par unité de gaz carbonique produit par une flamme ou par la respiration du cochon d'Inde : la quantité étant identique, Lavoisier conclut que « la respiration est une combustion », comme la flamme d'une chandelle.

Une expérience sur un oiseau avec la pompe à air (Joseph Wright of Derby, 1768)



Cinquante ans plus tard, le Suédois Berzélius poursuit la démarche de Lavoisier et propose la théorie selon laquelle toute réaction chimique résulte de la combinaison de groupes d'atomes, qu'il nomme *radicaux chimiques*. Il invente même le terme *catalyse* pour nommer l'accélération spécifique d'une réaction chimique, et appelle *polymères* les composés « organiques » produits par les êtres vivants à partir de ces mêmes radicaux chimiques. Un débat très vif agite alors la communauté scientifique. Peut-on croire aux théories vitalistes qui, invoquant des forces mystérieuses, distinguent les composés organiques, produits par les êtres vivants, des substances inorganiques ? La synthèse chimique de l'urée par Whöler, en 1825, apporte une première démonstration de l'échec du vitalisme ; les multiples synthèses organiques réalisées depuis confirmeront cet échec.



Jöns Jacob Berzélius  
(1779-1848)

© Georgios Kollidas - Fotolia

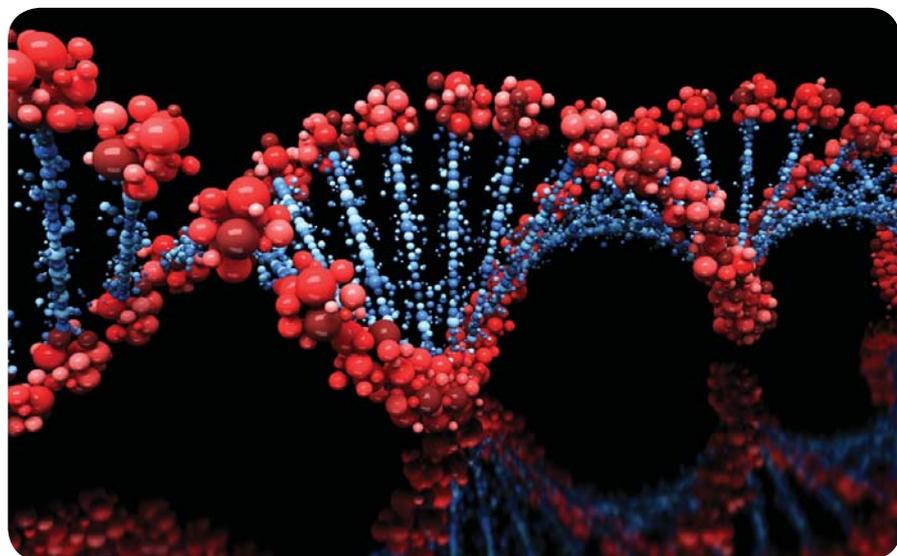
Le répertoire des molécules constitutives des êtres vivants comprend des polymères de masse élevée, ou macromolécules, dont notamment les protéines – encore un terme de Berzélius – qui résultent de la combinaison linéaire de 20 acides aminés différents. D'autres macromolécules sont formées à partir de nucléotides – comme les acides désoxyribo- et ribonucléique (ADN et ARN) –, de sucres – pour les polysaccharides –, etc. En 1833, on découvre que les enzymes qui catalysent les réactions chimiques constitutives des organismes vivants sont des protéines. Enfin, en 1897, Buchner démontre que la totalité des processus complexes de la fermentation alcoolique peut être obtenue *in vitro* à partir d'un extrait de levure, en l'absence même de levure vivante. L'ensemble des enzymes concernées et leurs substrats suffisent. Les êtres vivants – l'homme inclus – sont désormais compris comme de vastes et complexes systèmes chimiques dans lesquels les macromolécules tiennent une place centrale.

Au cours du 20<sup>e</sup> siècle et encore aujourd'hui, les recherches portent sur la structure fine, au niveau atomique, de ces macromolécules. On utilise diverses techniques physiques, dont la diffraction des rayons X. En 1953, c'est le modèle de l'ADN en double hélice décrit par Watson, Crick et Rosalind Franklin qui révo-



Francis Crick  
(1916-2004)

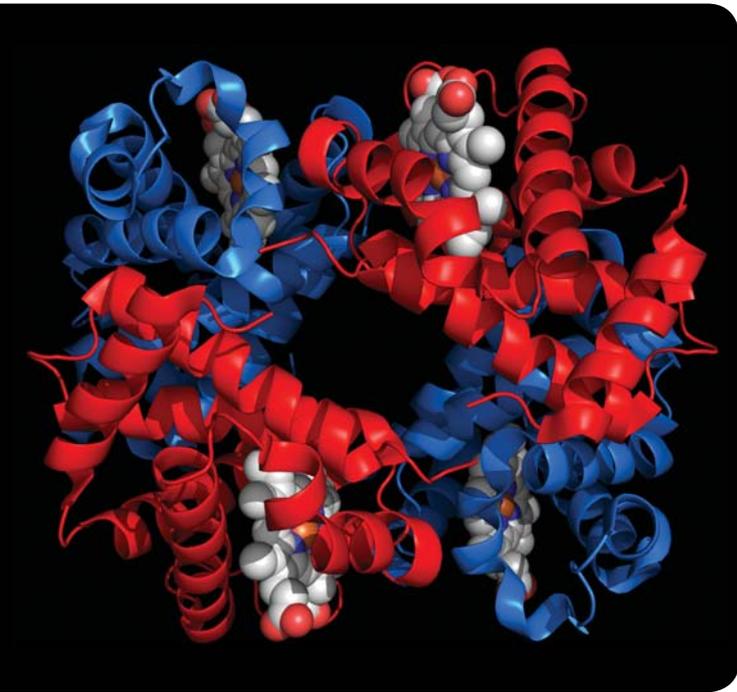
© Alamy



© Leigh Prather - Fotolia

Structure tridimensionnelle de l'ADN obtenue par diffraction des rayons X

lutionne notre compréhension de l'hérédité. Il sera suivi, plus récemment, par l'élucidation de la séquence chimique complète des 3,5 milliards de paires de base (de 4 types) d'un ADN humain. Chaque être humain est désormais « étiquetable » par la séquence de son ADN. En 1960, Perutz et Kendrew mettent en évi-



© Bruno Villoutreix - Inserm



© Alamy

Max Perutz  
(1914-2002)

*Structure tridimensionnelle de l'hémoglobine obtenue par diffraction des rayons X*

dence le repliement en trois dimensions de la chaîne d'acides aminés de l'hémoglobine et de la myoglobine. Suivra le décryptage du mécanisme de reconnaissance, par les protéines, des petites molécules auxquelles elles se lient : la formation d'un complexe spécifique où le ligand entre dans la protéine comme une clé dans une serrure.

Les réactions chimiques qui composent les

systèmes vivants ne sont pas indépendantes mais coordonnées entre elles. Des protéines régulatrices spécialisées, dites allostériques, interviennent comme commutateurs biologiques reliant signal régulateur et action biologique. Un changement de conformation de la protéine assure le couplage entre sites distincts. Ce fut mon travail de thèse dans le laboratoire de Jacques Monod.



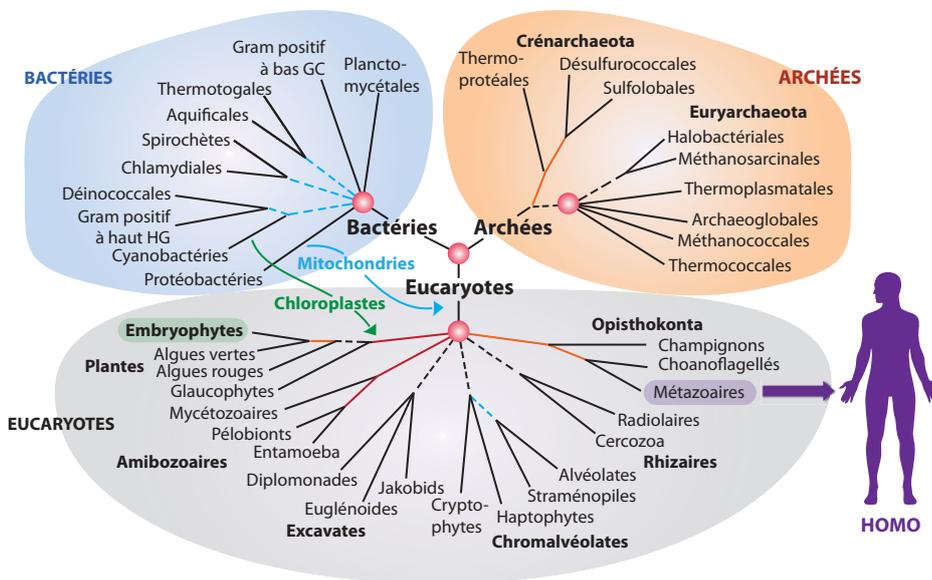
## Seconde étape : la biologie de la cellule et l'évolution

L'être vivant n'est pas simplement un sac d'enzymes : il possède une forme et une organisation. Au niveau le plus élémentaire, on découvre la cellule, qui emmagasine protéines et acides nucléiques. Chez les organismes supérieurs, un noyau se trouve au sein d'un cytoplasme aqueux, circonscrit par une membrane constituée de lipides. « *Toute cellule provient d'une autre cellule* », propose Virchow dès 1855. Au cours du développement de l'embryon, non seulement les cellules se multiplient, mais elles se différencient aussi en types distincts – musculaire, hépatique, etc. Cette diversité microscopique s'inscrit dans une diversification plus générale de la forme globale des êtres vivants.

Commencée avec Aristote, la description des espèces se développe au siècle des Lumières avec le Suédois Linné et, chez nous, avec Buffon. Ces espèces sont classées de manière hiérarchique en un tableau illustrant une « *perfection croissante* ». Au sommet siègent l'homme, puis le Créateur, auteur de cette harmonieuse « *scala naturae* ». Le tableau est fixe et immuable, jusqu'à ce que Lamarck, le 11 mai 1800, dans le discours d'ouverture de son cours au Muséum d'histoire naturelle, abandonne cette vision du monde au bénéfice du concept révolutionnaire de l'évolution des espèces : celles-ci ne sont pas fixes, elles se « *transforment* ». Darwin, 59 ans plus tard, reprend la thèse transformiste mais abandonne l'hérédité des caractères acquis de Lamarck au bénéfice de la sélection naturelle comme mécanisme de l'évolution. Deux siècles de recherches biologiques valideront le modèle darwinien. L'étude des fossiles montre que des espèces, voire des groupes entiers, sont apparus puis ont, en grande partie, disparu. La mort devient le rouage essentiel de l'évolution de la vie. Inattendus, des transferts

de gènes entre espèces parfois très éloignées ont lieu, et l'arbre de la vie devient aléatoire et irrégulier. Il prend la forme d'un buisson où les ancêtres d'*Homo sapiens* apparaissent sur une branche latérale : l'homme ne trône plus au sommet de l'échelle des êtres.

Les développements d'une discipline nouvelle, la génétique, va révéler des liens indissolubles entre évolution et développement.

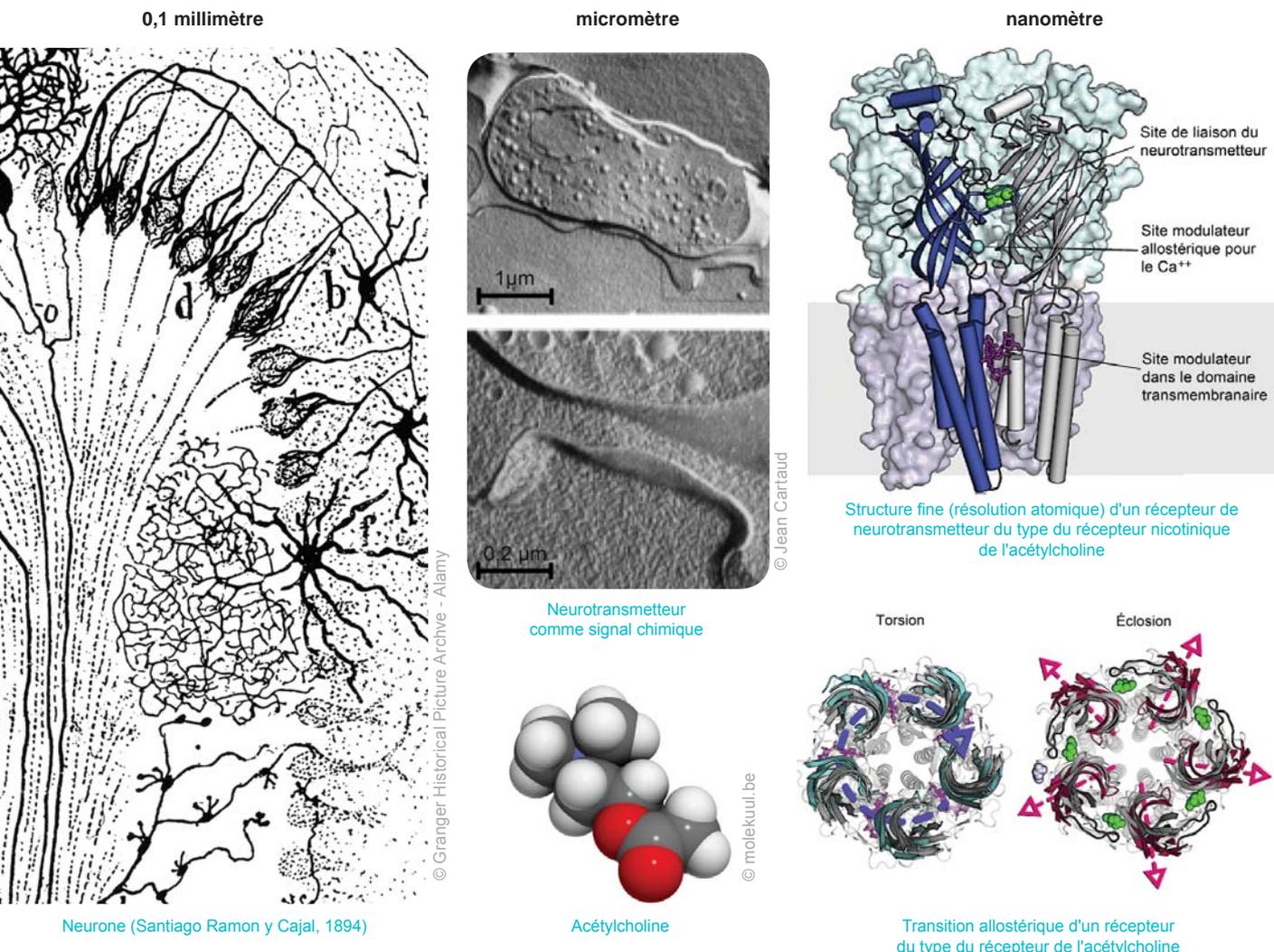


L'étude de la parenté génétique entre espèces vivantes (sur la base de l'ARN ribosomique) révèle un arbre de la vie buissonnant où l'homme apparaît sur une branche latérale.

Dès 1866, Mendel reconnaît l'existence de caractères héréditaires stables et transmissibles – comme la couleur et la forme des pois qu'il cultive dans le jardin de son monastère –, qu'il assigne à des « *facteurs* » invisibles appelés depuis gènes. Morgan, dans les années 1920, démontre chez la mouche que ces gènes sont localisés sur les chromosomes présents dans le noyau cellulaire. Ils sont susceptibles d'être modifiés par des mutations transmissibles par l'hérédité. La biologie moléculaire établit que chaque protéine de l'organisme est codée par une séquence génique de la molécule d'ADN, et que des mutations de ces séquences sont à l'origine

de nombreuses maladies chez l'homme. On constate également que tous les gènes de nos chromosomes ne s'expriment pas au même moment au cours du développement. En accord avec la démonstration magistrale de Jacob et Monod en 1961, des séquences géniques spécialisées, dites *régulatrices*, contrôlent la diversification des lignages cellulaires de l'organisme, notamment celle de la cellule nerveuse, ou neurone.

Le neurone apparaît très tôt au cours de l'évolution, chez les hydres et les méduses. Il assure communication rapide et coordination entre les différentes parties de l'organisme. Il se singularise par de multiples prolongements, axone et dendrites, qui entrent en contact avec des centaines, et parfois des dizaines de milliers d'autres cellules. Comme le proposait Ramon y Cajal dès 1890, les neurones forment des réseaux discontinus où les membranes des cellules nerveuses se trouvent juxtaposées au niveau de synapses. Fait remarquable, les grands traits de l'anatomie et de la physiologie de la cellule nerveuse se conservent des espèces primitives à l'homme. L'axone propage un signal électrique intégralement réductible à des transports d'ions, chargés électriquement. À la synapse, un signal chimique – un neurotransmetteur – prend le relais, diffuse dans l'espace synaptique et se fixe sur un récepteur. Convertissant un signal chimique en signal électrique, les récepteurs font partie de ces commutateurs allostériques mentionnés plus haut. Déjà présent chez les bactéries, ces récepteurs imposent des contraintes irréductibles au traitement de l'information par notre cerveau. Ils sont aussi les cibles de nombreux médicaments. Notre système nerveux est, comme le reste de l'organisme, un vaste système physicochimique dont les composants élémentaires ont peu changé au cours de l'évolution. Ce qui a changé, c'est l'organisation.



Les composants élémentaires du cerveau : la cellule nerveuse, la synapse et la molécule du neurotransmetteur acétylcholine, avec son récepteur

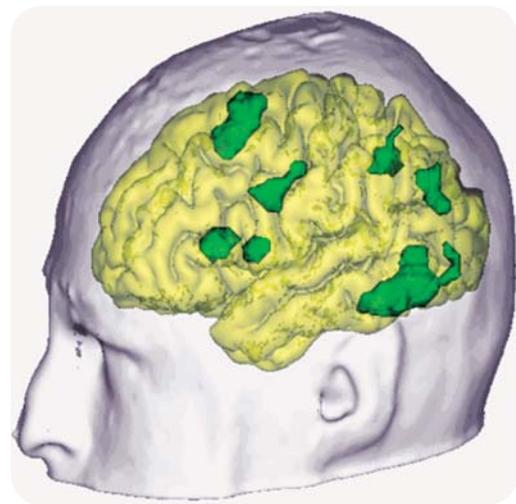
### Troisième étape : l'évolution du cerveau et l'origine de la culture

Le cerveau évolue de manière fulgurante et différentielle, à la fois en taille et en complexité. La taille du cerveau augmente, comme la surface du cortex cérébral et spécialement sa partie antérieure : le cortex préfrontal. L'asymétrie hémisphérique droite-gauche se développe. Le nombre de neurones du cerveau passe de 50 millions chez la souris à près de 100 milliards chez l'homme. En parallèle apparaissent des fonctions psychologiques nouvelles : la conscience de soi, la capacité de se représenter autrui comme soi-même, la vie symbolique, avec le langage parlé puis écrit. Toutes ces fonctions dites cognitives relèvent aujourd'hui de l'approche scientifique. Pour les aborder, il faut faire converger plusieurs disciplines : l'imagerie cérébrale, l'électrophysiologie, la psychophysique et les modèles computationnels. Une révolution de plus est en marche : celle du « *Connais-toi toi-même* » socratique et même du « *Cogito ergo sum* » cartésien !

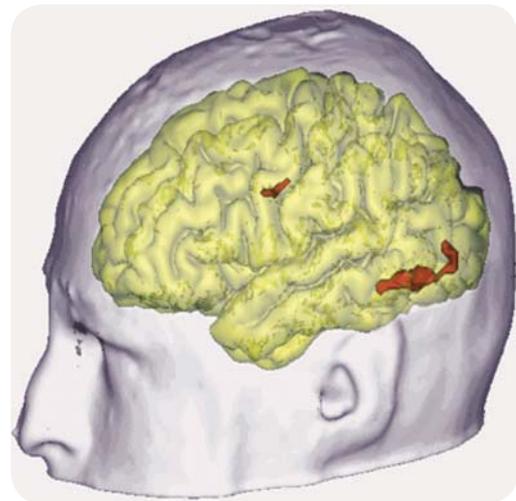
D'éminents scientifiques se sont engagés dans cette voie, Jovet ou Buser, Crick ou Edelman. L'idée forte est que les processus conscients, partagés par tous les êtres humains, se développent dans un espace physique commun de notre cerveau. C'est là que s'effectue, de manière « globale et unitaire », la synthèse d'événements extérieurs perçus et de nos mémoires intérieures. Avec Dehaene, nous avons proposé que des neurones possédant des axones très longs puissent interconnecter ces divers territoires du cerveau et contribuer à construire cet espace conscient. Ce réseau réunit les cortex préfrontal, pariéto-temporal et cingulaire, ce dernier étant impliqué dans les émotions. Il est possible de distinguer, au sein de cet espace neuronal, les images cérébrales obtenues lors de traitements visuels conscient ou non conscient.

### Pas de mystères, mais encore beaucoup à découvrir !

Chacun se demandera quelles modifications génétiques critiques ont pu conduire au formidable accroissement de complexité structurale engagé dans ces fonctions cognitives. En 1830, Geoffroy Saint-Hilaire proposait devant



Lecture consciente



Lecture non consciente

*Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle d'un sujet lisant un mot de manière consciente ou non consciente*

notre Académie l'existence d'une unité du plan d'organisation des espèces animales. Le système nerveux central se trouve à la partie antérieure de ce plan. On sait aujourd'hui, en particulier grâce au travail pionnier de Nüsslein-Volhard, que ce plan est déterminé par un réseau de gènes de régulation dits homéotiques. Leur mutation entraîne des modifications spectaculaires telle, chez la mouche, la substitution d'une antenne par une patte.

Ces gènes interviennent bien dans la biogenèse du cerveau. Toutefois, le déchiffrement récent de la séquence complète du génome crée un paradoxe de plus. De fait, si le génome de la levure contient environ 6 000 gènes contre 13 000 chez la drosophile, il n'y a pas de variation du nombre de gènes codant pour des protéines de la souris à l'homme – environ 25 000 – et, du chimpanzé à l'homme, la séquence totale des gènes codants ne diffère que de 1,2 % ! La complexité anatomique et fonctionnelle du cerveau s'accroît donc beaucoup plus rapidement que la complexité du génome. Une première hypothèse est que cette évolution résulte de la mutation de quelques séquences régulatrices critiques contrôlant le développement du cerveau.

Le petit de l'homme naît avec un cerveau 5 fois plus léger que celui de l'adulte, et la période de maturation qui suit la naissance est exceptionnellement longue comparée à celle d'autres espèces – elle dure plus de 15 ans. Près de la moitié des synapses du cerveau adulte, de l'ordre du million de milliards, se forment après la naissance. Pendant cette période, les apprentissages fondamentaux tels que l'acquisition de la marche, du langage ou des interactions sociales prennent place. Se succèdent des phases d'exubérance synaptique et de variabilité maximale, suivies de phases de sélection, avec stabilisation de certaines connexions et élimination des autres. L'activité du réseau, spontanée ou déclenchée par l'environnement, règle ce processus de sélection synaptique, « darwinienne » mais non génétique. Une variabilité apparaît même entre individus génétiquement identiques. Comme nous l'avons suggéré, avec Courrège et Danchin, « *apprendre, c'est éliminer* ». Du fait de cette intense plasticité synaptique, une culture se développe, se transmet de génération en génération et se diversifie d'un groupe social à l'autre. Des « *circuits culturels* » comme ceux de l'écriture et de la lecture, ou même des règles éthiques, s'inscrivent dans le cerveau. Le cerveau de chaque individu « *internalise* », selon Vygotsky, les traits de son environnement physique, social et culturel. Ainsi se développe la « *personne humaine* » avec son « *habitus* » associé à l'histoire individuelle de chacun.

Cette approche physicaliste – cartésienne, puis darwinienne – conduirait-elle à faire perdre à l'être humain une part de son humanité ? Rien n'est moins sûr. Ainsi, Günther Anders nous dit « *Élargis ta capacité de représentation afin de savoir ce que tu fais.* » (In *Nous, fils d'Eichmann*, Rivages Éd., 1999) Les dispositions de notre cerveau, qui nous permettent de progresser dans la connaissance de ce que nous sommes, nous placent devant une lourde responsabilité éthique. À nous d'inventer, avec notre cerveau, un futur qui nous fasse accéder, selon Ricoeur, « *à une vie bonne avec et pour les autres, dans des institutions justes* » (In *Soi-même comme un autre*, Seuil Éd., 1990) et, j'ajouterai, dans un environnement durable...



## De la cellule aux écosystèmes



© B.Eymann - Académie des sciences

### Yvon Le Maho

Membre de l'Académie des sciences – section *Biologie intégrative* –, directeur de recherche émérite au CNRS, Institut pluridisciplinaire Hubert-Curien, université de Strasbourg et Centre scientifique de Monaco

Un moyen de traiter l'immense champ d'investigation scientifique qui court de la cellule aux écosystèmes est d'aborder la question des « modèles animaux ». On appelle ainsi les animaux grâce auxquels on essaie de comprendre comment fonctionne notre organisme et

comment lutter plus efficacement contre les maladies. Dans ce contexte, la biodiversité animale se révèle une étonnante source d'innovations biomédicales. Invitation au voyage...

### Modèles classiques vs modèles exotiques

Première étape : le désert du Kalahari, avec un animal étrange, le rat-taupe de Damara. En réalité, ce n'est ni un rat, ni une taupe – il fait partie d'une famille proche du cochon d'Inde. Mais, en tant que modèle animal pour la recherche biomédicale, c'est incontestablement un animal exotique. En effet, le modèle « standard » est la souris : elle se multiplie rapidement et, comme elle est de petite taille, coûte moins cher. On dispose aujourd'hui d'une palette de souris manipulées génétiquement permettant toutes sortes d'approches dites « mécanistiques ». Mais la question clé est la pertinence du modèle animal utilisé. Pour l'avoir ignoré, on s'est retrouvé avec la tragédie des malformations fœtales consécutives à la prise de thalidomide par des femmes enceintes.

Revenons à la famille des rats-taupes. Ils sont tous d'une grande longévité, notamment le rat-taupe nu. Moins photogénique que son congénère de Damara, il peut vivre 32 ans, soit 16 fois plus longtemps qu'une souris. Or l'on a découvert qu'il est pourvu d'un mécanisme, inexistant chez la souris, qui empêche la prolifération de cellules cancéreuses. L'éditorial de JM Sedivy, dans les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences américaine qui ont publié ces travaux en 2009, a alors questionné la pertinence de mettre la quasi-totalité des moyens de la recherche sur l'animal standard : « *The situation is in some ways*



Le rat-taupe, ici de Damara : un modèle animal exotique



Désert du Kalahari  
(sud de l'Afrique)

*reminiscent of the old joke of the drunk looking for his keys under the street lamp.*

*The currently mainstream biological model*

*systems sure shine a powerful light, but the keys to some*

*really interesting (and important) questions may simply not be found*

*under it.* » Cela dit, on croyait le rat-taupe nu indemne du cancer, mais des tumeurs viennent d'être découvertes chez des animaux conservés dans des parcs zoologiques américains. Il sera évidemment très intéressant de déterminer les éléments ayant conduit ces animaux à développer des tumeurs afin d'en tirer, si possible, des enseignements pour la santé humaine.

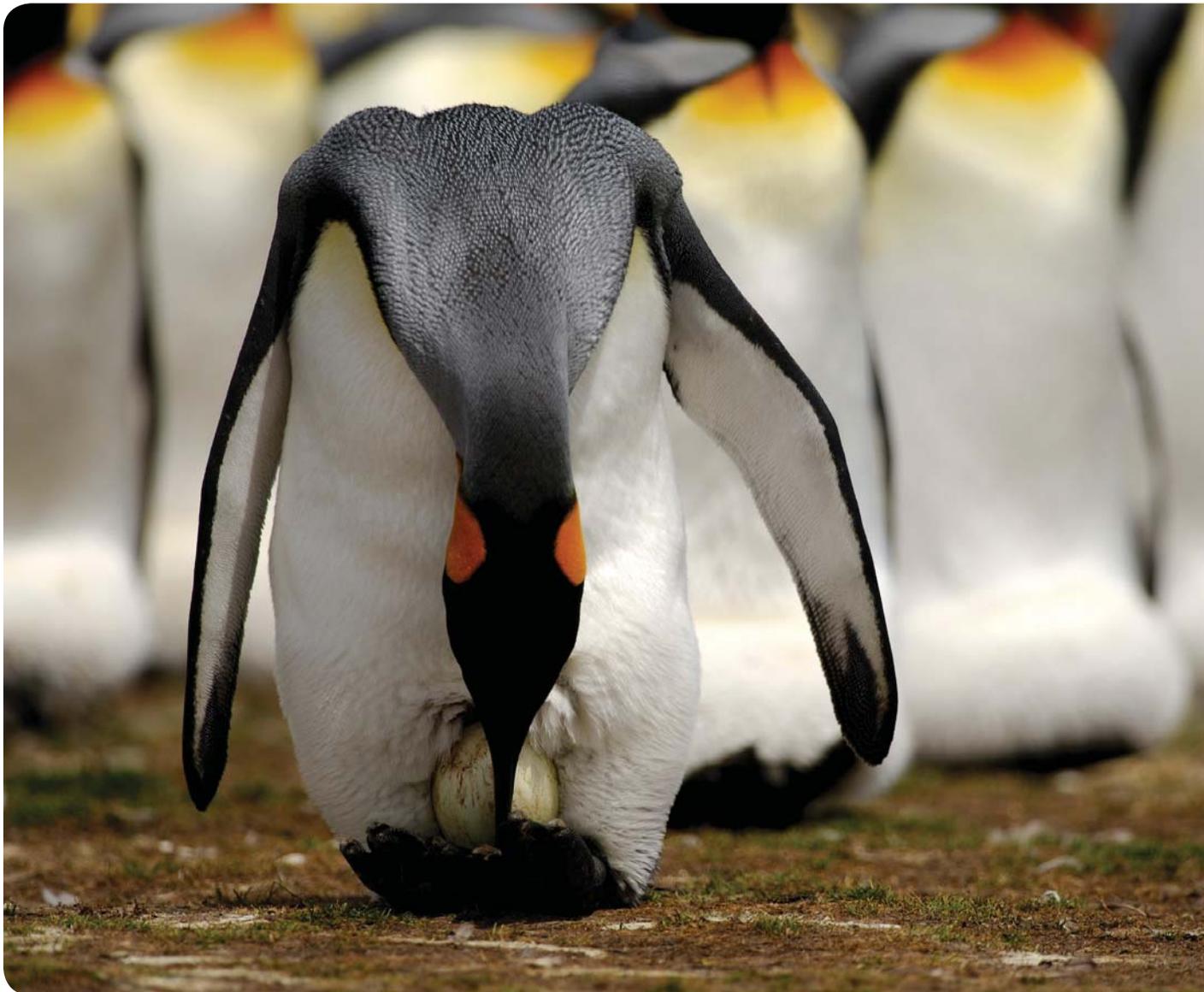
Les recherches sur le rat-taupe sont menées au laboratoire, mais les mécanismes développés par certains animaux exotiques ne peuvent être étudiés que dans la nature. Ainsi, l'un des modèles animaux les plus remarquables est celui de l'ours en hibernation. Comme le montrent des échographies cardiaques réalisées chez l'ours, son cœur bat à environ 60 coups par minute, une fréquence qui se réduit à 5 ou 6 battements par minute lorsqu'il est en hibernation.

Ce qu'il y a d'extraordinaire au cours de ce jeûne d'hibernation, c'est que l'ours utilise exclusivement sa graisse : il épargne ainsi ses muscles et toutes ses autres précieuses protéines corporelles, et c'est pourquoi il n'urine pas et ne défèque pas pendant les 5 à 6 mois d'hibernation. L'ours est l'un des seuls à pouvoir le faire : l'homme ou tout autre animal, avec quelques exceptions comme certaines espèces de chauve-souris, voit sa masse musculaire se réduire lorsqu'il jeûne. Ainsi, dans le traitement de l'obésité sévère, alors même que

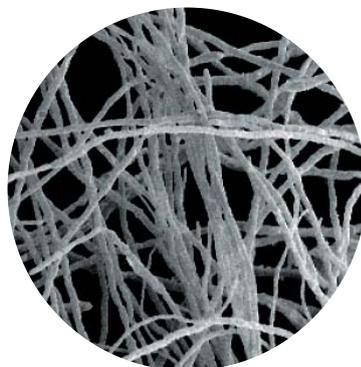


la surcharge graisseuse est encore très importante, les régimes très basses calories ne peuvent être prolongés au-delà d'une certaine durée en raison d'une dégradation musculaire, et notamment du muscle cardiaque. On voit donc l'intérêt qu'il y aurait à élucider et mimer ce mécanisme dans le traitement de l'obésité sévère.

Un autre exemple où le mécanisme physiologique d'intérêt ne peut être étudié que dans la nature est celui du manchot royal incubant son œuf. Mâle et femelle s'alimentent à 300-400 km en mer, un jeûne étant associé à l'incubation qu'ils assurent à tour de rôle à terre. C'est habituellement le mâle qui assure les 2 ou 3 dernières semaines d'incubation, la femelle revenant au moment de l'éclosion pour nourrir le poussin. Elle peut cependant ne pas revenir à temps, notamment en raison du réchauffement lié au phénomène El Niño qui se fait sentir jusque dans l'océan austral, et peut encore éloigner ses proies de plus de 200 km au sud. Ce qui est remarquable, c'est que le mâle est alors capable d'assurer pendant une semaine la survie du poussin en le nourrissant avec des proies marines qu'il a conservé intactes pendant ces 2 ou 3 semaines dans son estomac, pourtant à une température de 37-38°C. Avec le soutien de la Fondation de France, nous avons réussi à associer à cette conservation de nourriture la présence d'une petite protéine



antibactérienne et antifongique. Une fois sa structure déterminée et la molécule de synthèse fabriquée, il a pu être montré qu'elle était très efficace contre deux des principaux agents de maladies nosocomiales, le staphylocoque doré et le champignon pathogène responsable de l'aspergillose. En outre, cette protéine reste très efficace en milieu salin – la salinité de l'estomac des manchots est comparable à celle de nos



© Philippe Bulet

*La sphéniscine, peptide produit par l'estomac du manchot royal, altère la croissance des microorganismes – ici celle d'Aspergillus fumigatus (à gauche, culture témoin ; à droite, en présence de sphéniscine). D'après Thouzeau C, et al. J Biol Chem 2003 ; 278 : 51023-8.*

yeux –, contrairement à la plupart des antibiotiques. Or la résistance des bactéries aux antibiotiques devient une préoccupation de santé publique majeure, et on manque d'agents antimicrobiens pour lutter contre les infections oculaires.

Toute l'expertise nécessaire en biologie pour l'identification d'une telle molécule et de sa structure n'aurait toutefois pas été

suffisante. Il a fallu innover dans de nouvelles méthodes permettant de prélever des microéchantillons de contenus stomacaux aux différentes étapes de l'incubation, avec des conditions d'asepsies satisfaisantes et sans, bien sûr, perturber les animaux et provoquer l'échec de leur reproduction. Un manchot arrêtant de couvrir cesse de conserver sa nourriture dans son estomac et la digère. Mais comment s'y prendre pour étudier un animal dans son environnement ?

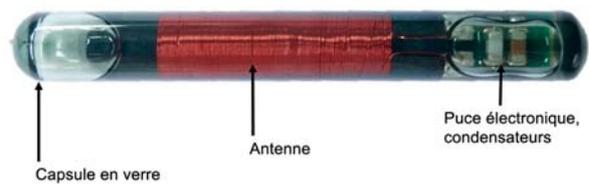
## Adapter les recherches au milieu naturel

Les animaux ont pendant des siècles été étudiés à partir de leur seule dépouille rapportée d'expédition. L'approche consistant à décrire leur mode de vie et leur comportement en les observant sans les perturber est très récente : elle a été rendue possible grâce aux progrès considérables accomplis, au cours des toutes dernières décennies, en matière d'informatique et de miniaturisation électronique.



© D'après B. Eymann - Académie des sciences

Identifier un animal individuellement et le localiser sans le perturber n'est pas simple. Pour cela, on a pendant longtemps utilisé chez les manchots une bague à l'aileron portant des numéros facilement lisibles à distance avec une paire de jumelles. Toutefois, comment s'assurer que la gêne hydrodynamique au déplacement de l'animal en mer n'avait pas de conséquences délétères ? Il fallut au début des années 90 l'invention de la RFID – *radiofrequency identification*, identification par radiofréquence –, utilisant des étiquettes électroniques de moins d'un gramme implantées sous la peau, pour disposer de vrais animaux témoins sans gêne hydrodynamique. Grâce à la Fondation Bettencourt-Schuller, cette technologie, avant même qu'elle soit commercialisée, nous a permis de mettre en évidence l'impact de la bague chez le manchot royal : par rapport aux individus témoins, le succès reproducteur des individus bagués est réduit de 40 % sur dix ans, et leur survie de 16 %. La survie à 3 ans du poussin est réduite de moitié lorsqu'il est bagué .



© Julien Courtecuisse/CNRS-IPHC

*Une bague ou, mieux encore, une étiquette électronique pour repérer les manchots*

© IPEV/IPHC

L'extrême miniaturisation des étiquettes électroniques en RFID est rendue possible car elles fonctionnent sans batteries. L'énergie est fournie par une antenne lorsque l'animal « étiqueté » se trouve à moins de 50 cm d'elle ; en retour, l'antenne récupère le numéro correspondant à l'étiquette. Depuis 18 ans, dans le cadre de l'Institut polaire Paul-Emile-Victor, des antennes enterrées sur trois points de passages situés dans une grande zone de la colonie de l'Île de la Possession, dans l'Archipel de Crozet, permettent d'identifier automatiquement les manchots royaux lorsqu'ils y entrent ou en sortent. En revanche, cela ne permet pas de les localiser au sein la colonie. On pourrait théoriquement identifier et localiser les individus munis d'une étiquette électronique en circulant dans la colonie muni d'un lecteur RFID manuel contenant l'antenne d'activation-détection. Toutefois, approcher ainsi de chaque animal ne peut être envisagé, car la perturbation serait alors phénoménale.

Inspiré par l'exploration de la planète Mars, et avec des moyens fournis par la Fondation Total, nous avons eu l'idée d'utiliser des rovers, c'est-à-dire des véhicules téléguidés. Les manchots royaux couveurs défendent leur territoire contre le rover de la même façon que contre leurs congénères en transit dans la colonie. En les équipant d'un enregistreur cardiaque du type de celui que l'on utilise pour le jogging, on n'observe pas l'importante accélération de la fréquence cardiaque traduisant le stress que provoque une présence humaine, stress qui les fait quitter leur emplacement dans la colonie, la désorganisant ainsi,

avec le risque d'abandons d'œufs. A Kerguelen, nous sommes déjà dans une phase opérationnelle.

Pour le manchot empereur, les choses se sont révélées plus compliquées. En effet, il ne défend pas de territoire lorsqu'il couve œuf ou poussin, car il ne pourrait plus se serrer étroitement contre ses congénères et réduire ainsi sa dépense d'énergie dans le froid polaire. Cependant, en camouflant le rover avec un faux petit poussin, il se laisse approcher à distance d'identification électronique. Mais la dimension d'un rover camouflé par un petit poussin limite le nombre des instruments scientifiques qu'il peut embarquer. En outre, un tel rover n'est utilisable qu'à l'époque des petits poussins.



© Fred Olivier/John Downer productions

*Adulte et poussin manchots empereurs font même des vocalises pour communiquer avec le rover « poussin ». D'après Le Maho, et al. Nat Methods 2014 ; 11 : 1242-4.*

Il fallait donc fabriquer un faux manchot empereur adulte. L'obstacle est de taille : impossible de le faire tenir en position verticale et qu'il se déplace ainsi, car la vitesse du vent dépasse souvent 100 km/h en Terre Adélie. En revanche, on peut voir des adultes se déplaçant sur le ventre en s'aidant des ailerons et des pattes : on dit qu'ils « tobogannent ». C'est ainsi qu'est né notre nouveau projet : dans le cadre du laboratoire international que nous avons créé entre l'Institut pluridisciplinaire Hubert-Curien de Strasbourg et le Centre scientifique de Monaco, et toujours grâce au soutien de la Fondation Total, un premier prototype a été conçu à Strasbourg. Terminé à la mi-janvier, il a été envoyé à la base Dumont d'Urville, en Terre Adélie. Des tests sont actuellement en cours dans la colonie, tandis que les ingénieurs travaillent à Strasbourg sur l'articulation de ses ailes et de ses pattes, qu'il est pour l'instant incapable de mouvoir. Autre obstacle à franchir : les servomoteurs qui animent jusqu'à présent les robots ne peuvent être utilisés, car les sons qu'ils émettent entrent dans le spectre des vocalisations des manchots. Une nouvelle innovation méthodologique s'impose donc.



© Marco Monticone

## Des informations précieuses

L'étude des animaux dans leur milieu naturel permet également de mieux comprendre les changements environnementaux, notamment ceux liés aux variations du climat. Grâce au dispositif de suivi électronique mis en place pour les manchots royaux depuis 18 ans, il sera possible à terme de savoir à l'échelle de la population comment les variations climatiques, en déterminant la localisation et l'abondance de leurs proies marines, impactent le succès reproducteur et la survie des manchots.



En retour, en équipant les animaux de systèmes d'acquisition de données couplés à une balise Argos profilée avec soin, on peut recueillir des données sur l'écosystème dans lequel ils évoluent. Cela a été fait, notamment, pour la tortue olivâtre en Guyane, afin de mesurer l'évolution de la salinité et de la température de son milieu de vie en fonction de la profondeur.

En complément du modèle standard de la souris et du rat, les modèles animaux dits « exotiques » constituent ainsi une mine d'or encore largement inexplorée pour, de la cellule aux écosystèmes, mettre en évidence des mécanismes encore inconnus et, parallèlement, mieux connaître notre environnement.



© Clément Cornec/IPEV-IPHC

*Rover « adulte » au sein d'une colonie de manchots empereurs en Terre Adélie (hiver austral 2016)*

## La chimie, science de la matière : comprendre et créer !



© B.Eymann - Académie des sciences

### Jacques Livage

Membre de l'Académie des sciences – section *Chimie* –, professeur honoraire au Collège de France

La chimie, art de transformer la matière, a joué un rôle essentiel dans l'histoire de l'humanité. Les progrès réalisés pour extraire les métaux de leurs minerais ont marqué les différentes étapes de notre développement. Nous sommes ainsi passés de l'âge de la pierre à celui du cuivre, puis du bronze et du fer. Aujourd'hui, la carboréduction de la silice à très haute température

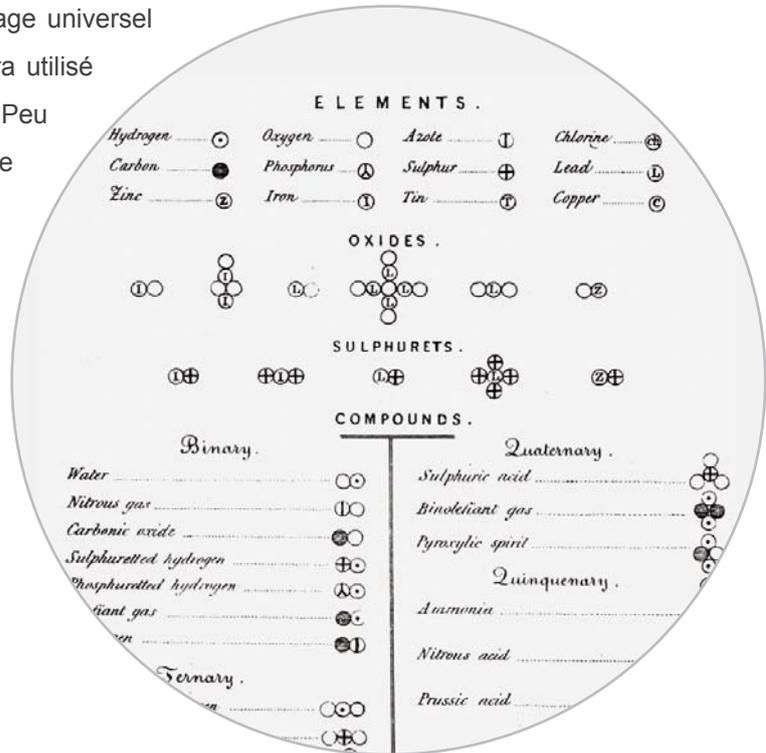
conduit à la formation du silicium, qui est à l'origine du développement de toute l'électronique moderne.

### Les « arts chimiques »

Curieusement, bien que les « arts chimiques » aient été pratiqués depuis la plus haute Antiquité, la chimie en tant que science ne s'est véritablement développée qu'à la fin du 17<sup>e</sup> siècle. Dès sa création en 1666, l'Académie a nommé deux chimistes, Claude Bourdelin et Samuel Cottureau Duclos. En réalité, aucun des deux n'était véritablement chimiste : le premier était apothicaire du duc d'Orléans, le second médecin ordinaire de Louis XIV. À cette époque, la chimie consistait surtout à extraire les principes actifs des plantes ou analyser les eaux minérales, elle se confondait avec la médecine et la pharmacologie.

Pour la chimie, science de la matière, une question essentielle se posait encore au début du 18<sup>e</sup> siècle. Qu'est ce que la matière, de quoi est-elle faite ? On restait encore sur les hypothèses formulées par les philosophes grecs de l'Antiquité. Démocrite prétendait que la matière était formée de grains minuscules (atomes), tandis qu'Empédocle, Aristote et Platon affirmaient qu'elle était constituée de quatre éléments : l'eau, l'air, le feu et la terre – un modèle repris par les alchimistes dont l'ambition était de transformer les métaux en or... Au 18<sup>e</sup> siècle, Ernst Stahl expliquait encore la combustion en faisant intervenir l'élément « flamme » : c'était la théorie du « phlogistique », détrônée par Lavoisier qui mit en évidence le rôle de l'oxygène dans les phénomènes de combustion. *Le Traité élémentaire de chimie* qu'il publia en

1789 marqua la naissance d'un langage universel – la nomenclature chimique – qui sera utilisé par les chimistes du monde entier ! Peu après, John Dalton confirmait le modèle de Démocrite en établissant une distinction entre atome et molécule. Dans son mémoire *Nouveau système de philosophie chimique*, paru en 1808, il montrait que l'air était formé d'un mélange de quatre gaz : l'azote, l'oxygène, le gaz carbonique et la vapeur d'eau ! C'était la naissance de la théorie atomique moderne.

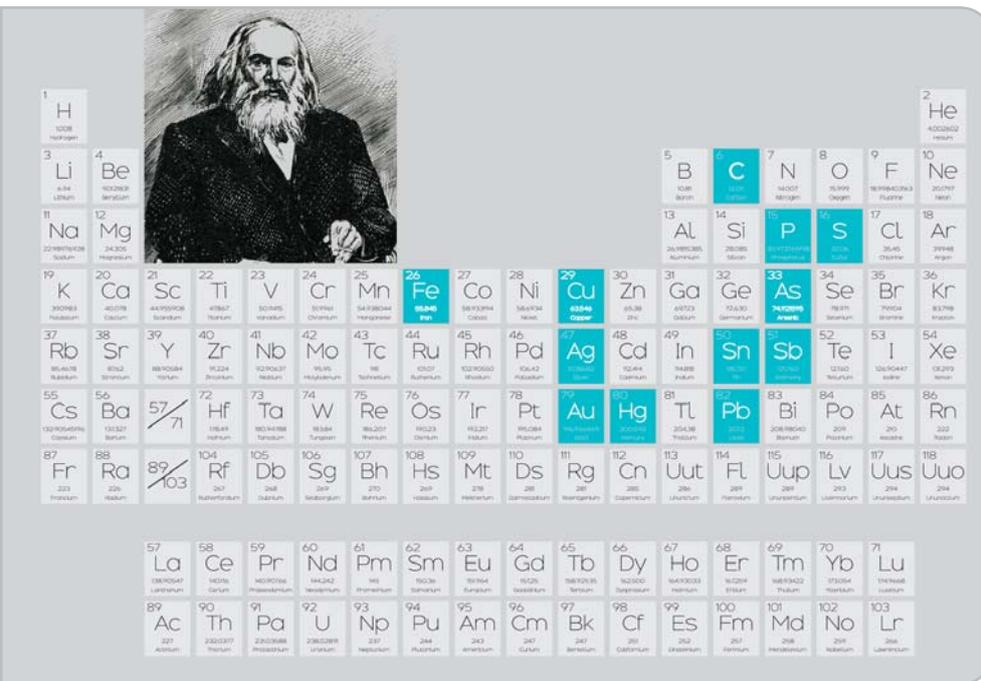


Le tableau des symboles atomiques de John Dalton

### De l'analyse à la synthèse

Le concept d'atomes comme constituants élémentaires de la matière était accepté, mais encore fallait-il savoir ce qu'était un atome. Au début du 18<sup>e</sup> siècle, on n'avait identifié qu'une douzaine d'éléments, tels que l'or, l'argent, le mercure, le plomb, le cuivre, le soufre ou le carbone. Il restait encore à découvrir une centaine d'autres éléments pour savoir enfin de quoi était faite la matière. L'analyse sera donc la première tâche des chimistes qui découvrirent le chrome et le beryllium (Vauquelin), le bore (Thénard), le brome (Balard) et le silicium (Berzelius). Une soixantaine d'éléments chimiques furent ainsi découverts au cours

des deux siècles suivants. Ils seront regroupés dans le tableau périodique publié par le chimiste russe Mendeleïev en 1869. Cette classification révèle l'ingéniosité et le sens de l'observation des chimistes du 19<sup>e</sup> siècle. À cette époque, on ignorait encore l'existence de l'électron et la structure de l'atome qui ne sera décrite qu'en 1913, par Niels Bohr. Chaque élément n'était défini que par sa masse et ses propriétés. De plus, il en



Le tableau périodique des éléments, publié par Dimitri Mendeleïev en 1869, illustre les apports essentiels de la chimie analytique au 18<sup>e</sup> siècle. Toutefois, on ne connaissait à cette époque qu'une douzaine d'éléments chimiques (en bleu sur la figure).

restait encore beaucoup à découvrir. Il fallait donc laisser des cases vides qui, par miracle, correspondront aux éléments que l'on découvrira plus tard ! Le tableau périodique fut sans aucun doute l'une des plus grandes découvertes scientifiques : il montrait que quelques dizaines d'atomes seulement constituaient toute la matière de l'univers. L'existence même des atomes n'était d'ailleurs pas encore unanimement admise : certains chimistes, comme Marcelin Berthelot, s'opposaient violemment à la théorie atomique !



Marcelin Berthelot (1827-1907)

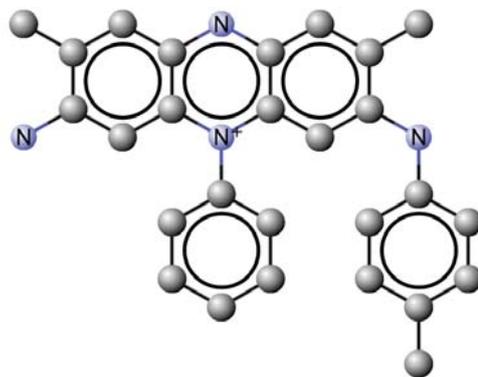
© Archives de l'Académie des sciences

Avec l'analyse, le chimiste comprenait enfin de quoi la matière était faite. Il pouvait à son tour combiner les éléments afin de développer l'aspect le plus créatif de la chimie, la synthèse. Le chimiste devenait capable non seulement de comprendre la nature, mais aussi de créer de nouvelles molécules. La synthèse de l'urée par Wöhler, puis celle de l'acétylène par Berthelot, montrèrent que l'on pouvait réaliser la synthèse d'un composé organique sans avoir recours à la « force vitale ». L'ouvrage de Marcelin Berthelot *La chimie organique fondée sur la synthèse*, publié en 1860, ouvrait une voie triomphale pour la chimie organique.

La chimie est une science, mais c'est aussi une industrie qui, en s'appuyant sur les nouvelles synthèses réalisées en laboratoire, contribuera fortement

à la révolution industrielle du 19<sup>e</sup> siècle. La synthèse des colorants – mauvéine, par Perkin, indigo par Baeyer, prix Nobel en 1905 – a permis l'essor de l'industrie organique et la création de firmes telles que la BASF, en 1865.

*La synthèse des colorants a lancé l'ère de l'industrie chimique : ici la mauvéine, premier colorant synthétique (Perkin, 1856).*



© Bruno Villoutreix - Inserm

En même temps, la chimie minérale développait la fabrication de la soude par le procédé Leblanc, qui fut remplacé 50 ans plus tard par le procédé Solvay.

L'ambition technique et l'intelligence de la mise en œuvre de ces procédés constituent un modèle de ce que l'industrie chimique a pu réaliser.

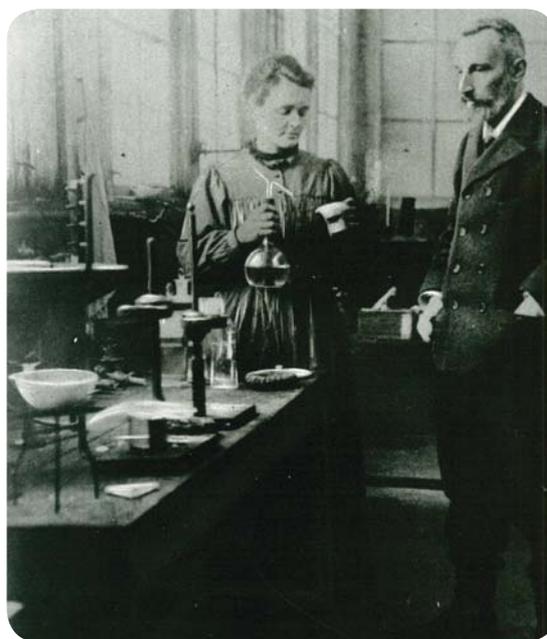


William Henry Perkin  
(1838-1907)

© Pictorial Press Ltd - Alamy

## Au 20<sup>e</sup> siècle, la chimie se diversifie

Le développement des théories quantiques et le perfectionnement des techniques de caractérisation au 20<sup>e</sup> siècle vont entraîner une évolution rapide de la chimie. On observe simultanément un approfondissement et une diversification de la chimie. De nouvelles disciplines vont apparaître : catalyse, chimie du solide, chimie organométallique, chimie théorique, chimie physique, biochimie, géochimie, etc. La découverte des éléments radioactifs – polonium et radium – par Pierre et Marie Curie marque le début de la radiochimie et de toutes ses retombées dans les domaines de la médecine et de l'énergie, et même de l'armement.



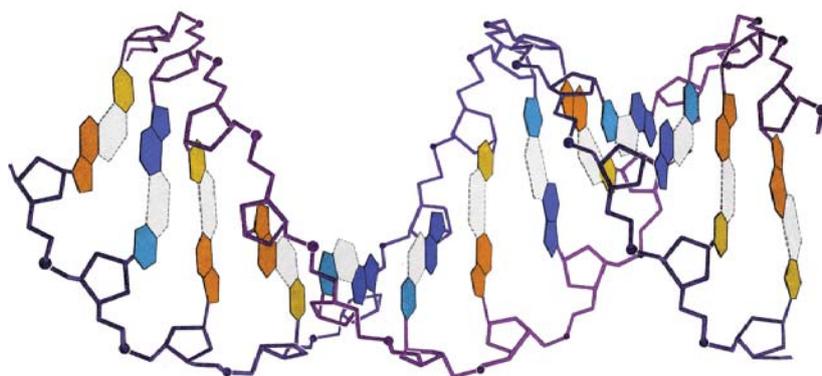
© Archives de l'Académie des sciences

*Pierre (1859-1906) et Marie (1867-1934) Curie*

La description quantique des électrons éclaire d'un jour nouveau leur comportement au sein de la matière. Il devient possible d'établir une description quantitative de la liaison chimique et des propriétés électroniques des molécules (Pauling, Nobel 1954 ; Ken'ichi Fukui et Hoffmann, Nobel 1981). La chimie théorique va jouer un rôle de plus en plus important. Elle devient prédictive et sera récompensée par deux prix Nobel, le premier pour les méthodes quantiques (Pople et Kohn, 1998), l'autre pour les méthodes multiéchelle qui permettent de modéliser le comportement d'une population de plusieurs centaines de milliers d'atomes (Karplus, Levitt et Warshell, 2013).

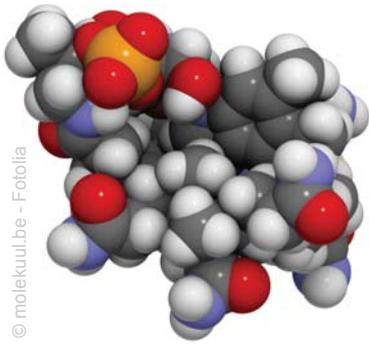
Parallèlement, les moyens d'analyse et les techniques de caractérisation – diffraction des rayons X, RMN, microscopie électronique, microscopie à effet tunnel, etc. – fournissent une image beaucoup plus fine de la structure de la matière. La détermination de la structure de l'insuline (Sanger, Nobel 1958) et celle de la double hélice d'ADN (Crick et Watson, Nobel 1962) en sont des exemples particulièrement significatifs.

Grâce à ces nouvelles données, la synthèse chimique va connaître un développement considérable. Le chimiste devient plus habile à transformer la matière pour synthétiser des molécules de plus en plus com-



© Photo Researchers, Inc. - Alamy

*Le modèle Crick et Watson de la double hélice de l'ADN*



© molekkuul.be - Fotolia

*Molécule de vitamine B12*

La synthèse chimique permet de passer de l'atome à la molécule, puis à la chimie supramoléculaire dans laquelle les molécules s'assemblent pour former des édifices de plus en plus complexes (Cram, Pedersen et Lehn, Nobel 1987). On ne s'intéresse plus seulement aux propriétés d'une molécule, mais à la synergie qu'engendre leur association. Les barrières entre organique et minéral s'estompent, et on voit se développer des composés organométalliques, des complexes de coordination et des hybrides organominéraux dans lesquels des atomes métalliques sont associés à des ligands organiques.

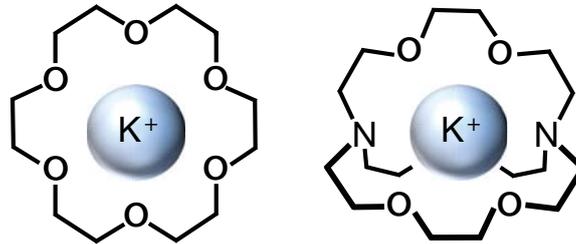
plexes. La vitamine B12 est, à cet égard, tout à fait exemplaire. Cette molécule, essentielle à notre vie, est naturellement synthétisée par des microorganismes – bactéries, champignons, algues. Elle a fait l'objet de nombreuses études qui ont conduit à 4 prix Nobel. Isolée en 1948, sa structure a été élucidée au début des années 1960. Sa synthèse, publiée en 1973, a pu être réalisée en s'appuyant sur les règles de Woodward-Hoffman qui décrivent la liaison chimique en termes de symétrie des orbitales moléculaires.

*La chimie supramoléculaire s'intéresse aux associations complexes de molécules entre elles : ici, un cryptate, dont la découverte a valu à l'académicien Jean-Marie Lehn le prix Nobel de chimie en 1987.*



© DR

Jean-Marie Lehn



Au cours de la deuxième moitié du 20<sup>e</sup> siècle, la chimie minérale se tourne vers l'étude des relations structure-propriétés. Ces recherches, effectuées essentiellement sur des cristaux, en forte interaction avec les physiciens, ont conduit au développement de matériaux présentant des propriétés physiques remarquables – spintronique, semiconduction, magnétisme, supraconductivité, photovoltaïque, etc. On se souvient de la révolution créée en 1986 par la synthèse des céramiques supraconductrices (Berdnoz et Muller, Nobel 1987). La plupart des nouveaux

matériaux développés actuellement dans l'industrie sont issus de ces collaborations entre chimistes et physiciens.

La chimie des polymères a pris son essor après la guerre 14-18. La production de caoutchouc, stimulée par les besoins militaires, a conduit à remplacer la production naturelle par la synthèse chimique. Ces travaux ont été à l'origine des premières synthèses de matières plastiques, telles que le nylon au cours de la seconde guerre mondiale. Les recherches en chimie macromoléculaire (Staudinger, Nobel 1953) vont conduire à l'élaboration d'une nouvelle gamme de matériaux qui ont très vite connu un grand succès industriel. Des polymères structuraux aux polymères fonctionnels, ils continuent à prospérer et à se diversifier. Parallèlement, les études effectuées sur la « matière molle », qui associent également chimistes et physiciens (de Gennes, Nobel 1991), ont conduit à des avancées importantes dans le domaine des cristaux liquides, des émulsions et de la récupération assistée du pétrole.

## 21<sup>e</sup> siècle : chimie et développement durable

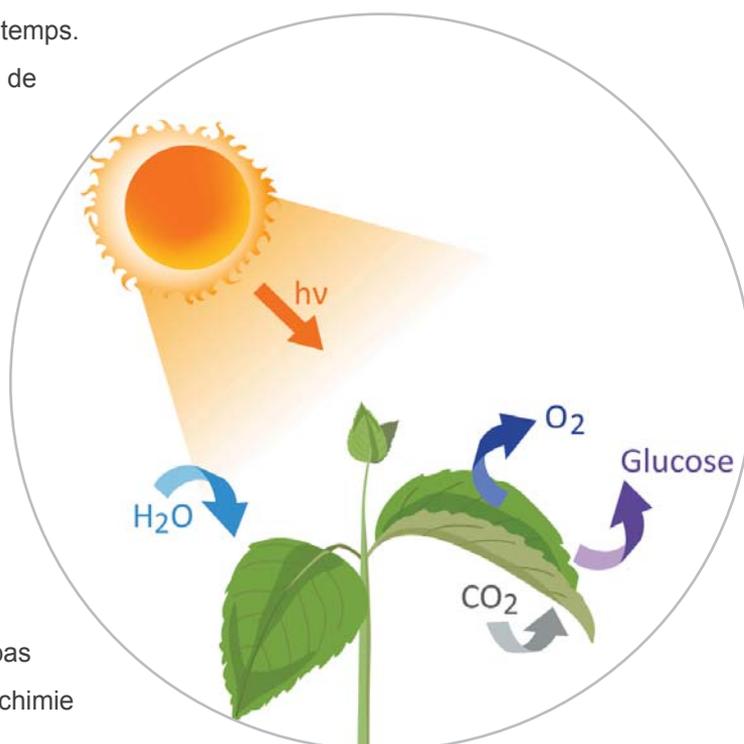
On dit souvent que « la chimie est partout » : elle doit donc se préoccuper des besoins de la société et s'inscrire dans une perspective de développement durable. La synthèse des produits chimiques, que l'on oppose souvent aux produits naturels, s'inspire de plus en plus des processus biologiques. On parle maintenant de « chimie douce », de « chimie verte » ou encore de « chimie bio-inspirée », qui prennent leur source dans l'observation du vivant.



© emaria - Fotolia

Le réchauffement climatique est l'une des préoccupations majeures de notre temps.

Il est lié à la production de gaz à effet de serre tels que le gaz carbonique,  $\text{CO}_2$ . Quel rôle la chimie peut-elle jouer dans le captage, le stockage et le recyclage du  $\text{CO}_2$  ? Pour le chimiste, la molécule de  $\text{CO}_2$  est indispensable à la vie. Grâce à la photosynthèse et sous l'action du rayonnement solaire, elle réagit avec l'eau pour donner de l'oxygène et les molécules organiques – sucres, amidon, cellulose, etc. – nécessaires à la vie sur Terre. Ne pourrait-on pas imiter la nature et développer une « chimie



© D'après Jakimboaz - Fotolia

*Le  $\text{CO}_2$  est un gaz à effet de serre, mais c'est aussi une molécule qui, via la photosynthèse, réagit avec l'eau pour donner toute la matière organique nécessaire à la vie.*

bio-inspirée », qui utiliserait la photoréduction du  $\text{CO}_2$  en  $\text{CO}$ ,  $\text{HCOOH}$  ou  $\text{CH}_3\text{OH}$  ? C'est une voie de recherche prometteuse qui s'appuie sur les progrès réalisés dans le domaine de la catalyse.

L'énergie solaire peut également être utilisée pour produire de l'électricité. Les dispositifs photovoltaïques classiques utilisent des cristaux semiconducteurs pour transformer les photons en électrons. Mais il existe aussi des cellules dans lesquelles cette transformation est réalisée au sein de colorants chimiques. Là encore, la chimie apporte des solutions nouvelles et ouvre la voie à une électronique moléculaire beaucoup plus souple (Heeger, MacDiarmid et Shirakawa, Nobel 2000).



© Catherine Bréchinac

Centrale solaire (Séville)

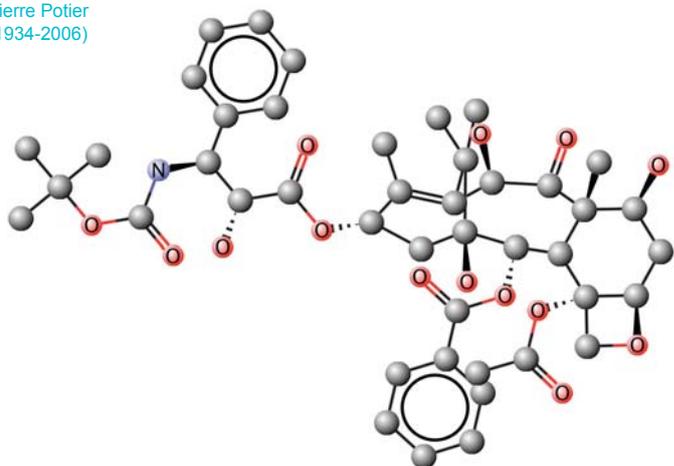
La transition énergétique a pour objectif de trouver de nouvelles formes d'énergie renouvelable. Les centrales nucléaires actuellement développées en France mettent en jeu des réactions sophistiquées pour produire de la chaleur que l'on transforme ensuite, avec un très faible rendement, en électricité. On ne sait pas transformer directement une réaction nucléaire en électricité. Pourtant, une simple réaction chimique d'oxydoréduction entraîne un échange d'électrons entre deux éléments, et il suffit alors de capter ces électrons pour produire directement de l'électricité : c'est le secret de la pile inventée par Volta en empilant des disques de cuivre et de zinc. La réalisation de batteries permet de résoudre simultanément les problèmes posés par la production et le stockage de l'électricité. Les batteries font actuellement l'objet d'intenses recherches dans lesquelles la chimie joue un rôle essentiel ; leurs performances ont été considérablement améliorées au cours des dix dernières années.

Les chimistes jouent également un rôle fondamental dans le domaine de la santé. La synthèse de molécules actives telles que le Taxol®, issu de l'écorce de l'if, a contribué de façon significative à l'amélioration des médicaments anticancéreux. Malheureusement, sa production nécessitait l'abattage



Pierre Potier  
(1934-2006)

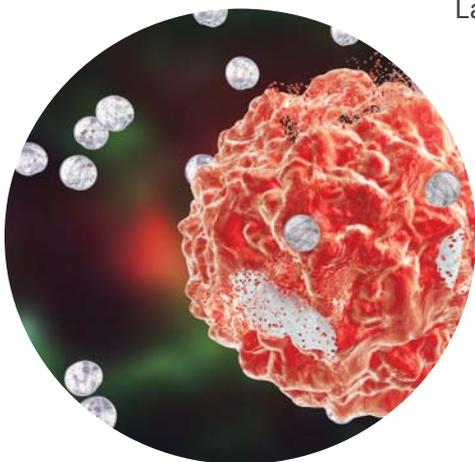
*Le Taxotère®, synthétisé par l'académicien Pierre Potier et ses collaborateurs, a révolutionné le monde de la chimiothérapie anticancéreuse.*



© Bruno Villoutreix - Inserm

de très nombreux arbres. Les recherches effectuées au CNRS de Gif-sur-Yvette ont permis d'identifier un composé encore plus actif – le Taxotère® – qui, depuis sa mise sur le marché en 1995, est devenu le produit le plus utilisé contre les cancers du sein et des poumons. Chimie et médecine se confondent d'ailleurs souvent. Le prix Nobel de chimie 2015 a ainsi été attribué à la découverte des mécanismes de réparation de l'ADN, tandis que le prix Nobel de médecine, la même année, récompensait les travaux portant sur le rôle de l'artémisinine

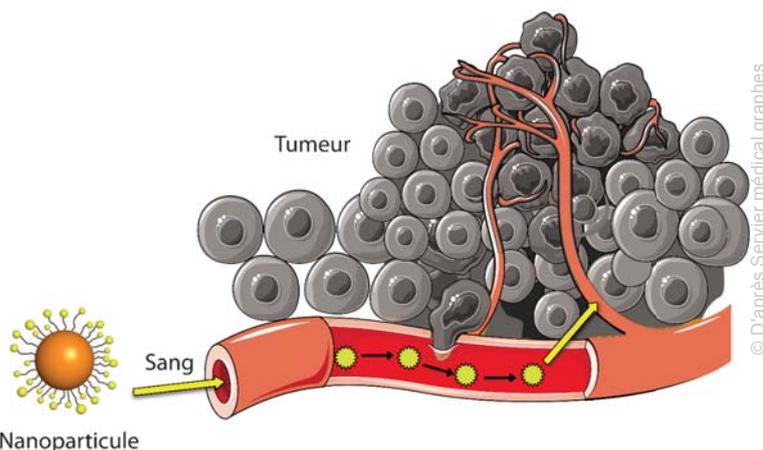
et de l'ivermectine dans la lutte contre les maladies parasitaires. Dans les deux cas, la chimie était directement impliquée.



© Dr\_Kateryna - Fotolia

La chimie ne s'intéresse pas seulement à la découverte de nouveaux médicaments, elle intervient aussi dans leur mode d'administration. L'introduction des nanotechnologies en pharmacologie permet d'élaborer des nanoparticules pouvant servir de vecteur pour transporter un principe actif au sein même des cellules. Dans le cas du cancer, le médicament n'est délivré qu'au sein de sa cible – la tumeur cancéreuse –, évitant ainsi les effets secondaires bien connus de la chimiothérapie. Des progrès rapides sont réalisés aussi bien dans le domaine du diagnostic que dans celui de la thérapie, contribuant au développement de la nanomédecine.

Science moléculaire polyvalente, la chimie établit des ponts entre les différentes disciplines – physique, biologie, médecine, pharmacologie, sciences de la terre, etc. De même qu'elle est intervenue dans la formation de l'Univers et l'apparition de la vie, elle jouera un rôle essentiel dans le développement de la société moderne.



© D'après Servier médical graphes

*En médecine, la chimie utilise des nanoparticules comme vecteur pour transporter des médicaments au sein même des tumeurs.*

## Des planètes aux exoplanètes



© B.Eymann - Académie des sciences

### Anne-Marie Lagrange

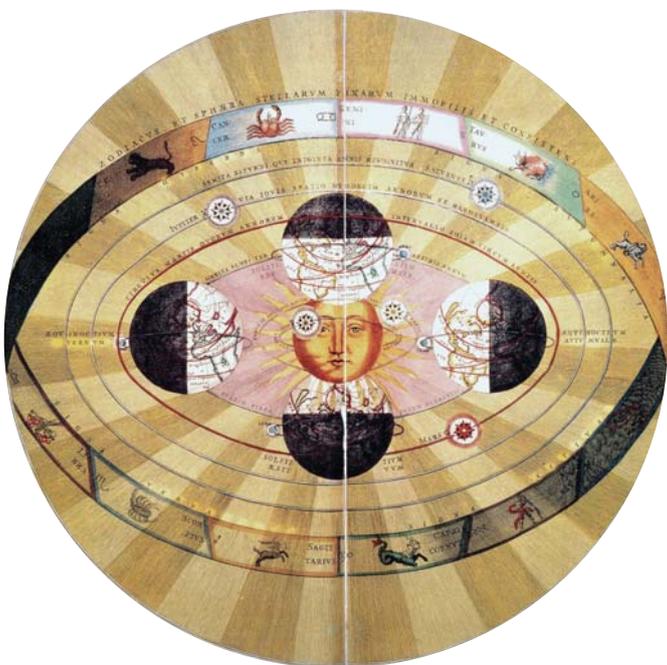
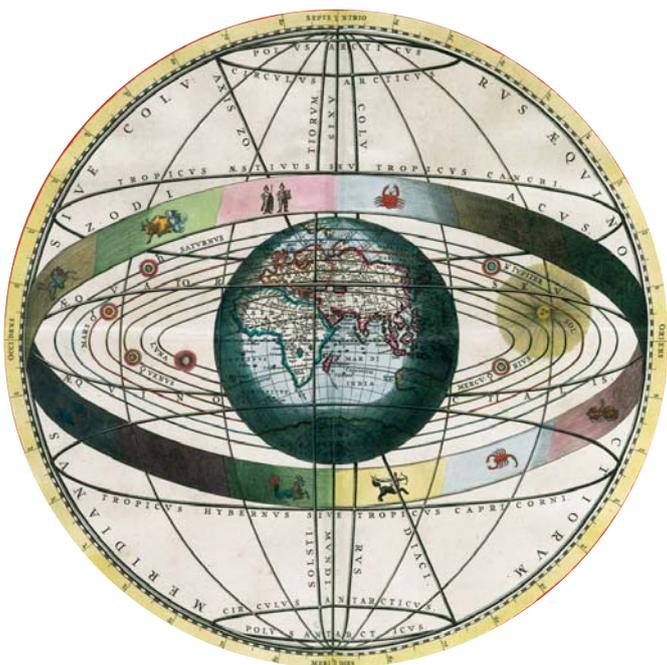
Membre de l'Académie des sciences – section *Sciences de l'Univers* –, directeur de recherche au CNRS, Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble

Au cours des derniers siècles, notre compréhension du Monde a considérablement évolué. La Terre ayant perdu le statut particulier que lui attribuait le système géocentrique, et étant reconnue désormais comme l'une des planètes en orbite autour du Soleil, il devint possible de s'interroger sur la formation du Soleil et de ses planètes. Étoiles, comètes, nébuleuses, galaxies

sont observées, identifiées, cataloguées, étudiées de manière de plus en plus fine grâce aux progrès des lunettes, télescopes et autres instruments, et grâce aussi aux progrès de la physique, de la chimie et de la géologie. L'Univers observable ne cesse de s'enrichir et de s'agrandir. L'existence de planètes en orbite autour d'étoiles autres que le Soleil, les exoplanètes, est envisagée, mais il faudra attendre la fin du 20<sup>e</sup> siècle pour pouvoir en détecter et amorcer l'étude détaillée des quelques exemples connus.

### La place de la Terre dans l'Univers

Aux 16<sup>e</sup> et 17<sup>e</sup> siècles, les conceptions théologique et philosophique qui, depuis l'Antiquité (Aristote, Ptolémée), mettaient la Terre au centre du monde perdent du terrain, au fur et à mesure des avancées dans les domaines de la mécanique céleste et de la gravitation. Les travaux de Copernic, puis de Kepler, Galilée et Newton, vont désormais placer la Terre, puis les planètes, en orbite autour du Soleil, évoluant selon les lois universelles de la physique, et confortant ainsi l'intuition d'Aristarque de Samos au 3<sup>e</sup> siècle avant J-C. La science peut alors prendre son autonomie par rapport à la religion, selon un concept cher à d'Alembert. L'appétit pour les sciences s'accroît, des structures laïques rassemblant les savants sont créées, comme l'Académie des sciences en 1666 et, un an plus tard, l'Observatoire de Paris, lieu de travail des astronomes académiciens du Roi-Soleil.



*Deux systèmes pour décrire le Monde : celui de Ptolémée, en haut celui de Copernic, en bas. The Harmonia Macrocosmica of Andreas Cellarius (1660).*

devient possible d'étudier la composition chimique des atmosphères du Soleil, des planètes du système solaire et, plus tard, des étoiles et des galaxies. L'effet Doppler-Fizeau permet de mesurer la vitesse des astres par rapport à un observateur situé sur la Terre : c'est grâce à lui que, dans les années 1920, Lemaître et Hubble mettront en évidence la fuite des galaxies et l'expansion de l'Univers, ce dont la relativité générale d'Einstein rend compte.

*Champ profond de Hubble montrant des galaxies lointaines*

© R. Williams (STScI), équipe HDF-S, et NASA/ESA

Le Siècle des Lumières s'appliquera à développer le goût de l'exploration scientifique, qu'elle soit sur Terre, sur mer ou encore céleste, et les théories suivront pour expliquer les observations des grands naturalistes (Buffon, Lamarck), géographes (von Humboldt), géologues (Hutton, Cuvier, puis Brongniart) et astronomes (Cassini, Lalande, La Caille) de l'époque. Il est établi que la Terre tourne autour du Soleil, et qu'elle ne s'est pas formée en 6 jours quelques milliers d'années auparavant. De l'étude de la durée de refroidissement de sphères métalliques de différents diamètres, Buffon déduit que notre planète est âgée de 10 millions d'années.

Les astronomes construisent lunettes et télescopes pour sonder le ciel avec une précision et une sensibilité sans cesse améliorées. Les catalogues des étoiles et nébuleuses, à la manière des relevés effectués par les naturalistes, sont de plus en plus précis. Ils permettent à Messier et Herschel de classer les astres de manière de plus en plus fine, un préalable fort utile à leur compréhension physique.

Au 19<sup>e</sup> siècle, les travaux théoriques et expérimentaux de Young, Fresnel, Foucault et Maxwell confortent la nature ondulatoire de la lumière proposée par Huygens en 1670, et permettent de mesurer sa vitesse. Fraunhofer invente le spectroscope et il



La physique nucléaire et l'étude de la radioactivité (Becquerel, Rutherford, les époux Curie) entre 1850 et 1950 fourniront quant à elles les bases pour une explication de l'origine des éléments. Le Soleil est désormais une étoile comme les autres, son énergie provient de réactions de fusion nucléaire (Perrin, Eddington). Des réactions de nucléosynthèse se produisent au sein des étoiles qui, en fin d'évolution, enrichissent le milieu interstellaire d'éléments plus lourds (Burbidge). L'âge de la Terre est estimé grâce à la radioactivité naturelle à 1, puis à 4 milliards d'années au cours de la première moitié du 20<sup>e</sup> siècle.

Au terme de ces avancées, il est établi que le Soleil et son cortège de planètes évoluent dans la Voie Lactée, notre galaxie, qui comporte des centaines de milliards d'étoiles plus ou moins comparables à la nôtre. La Voie Lactée n'est qu'une galaxie parmi quelques centaines de milliards d'autres, au sein d'un Univers en expansion (Shapley, Ross, Hubble).



*Le soleil au sein de la Voie Lactée (vue d'artiste)*

## La formation du système solaire

Une fois le Soleil et la Terre libérés de leur statut particulier, il devenait possible d'envisager une origine qui ne fit pas intervenir la main de Dieu. Les premières théories véritablement scientifiques apparaissent en Europe au 18<sup>e</sup> siècle, avec notamment Buffon, d'une part, et Kant et Laplace, d'autre part. Buffon propose que la Terre et les autres planètes sont des morceaux du Soleil arrachés lors d'une collision avec une comète. En 1785, Laplace propose la théorie de la « nébuleuse primitive », nuage de gaz en contraction et en rotation, au sein duquel le Soleil et les planètes se formeraient. Il pose ainsi les bases de la théorie moderne de la formation du système solaire. Le scénario sera considérablement affiné, précisé au cours du 20<sup>e</sup> siècle, notamment pour ce qui concerne les conditions physiques initiales au sein de la nébuleuse protosolaire et les processus menant aux deux grands types de planètes, les planètes rocheuses comme la Terre, et les géantes gazeuses comme Jupiter.



Georges-Louis Leclerc de Buffon  
(1707-1788)

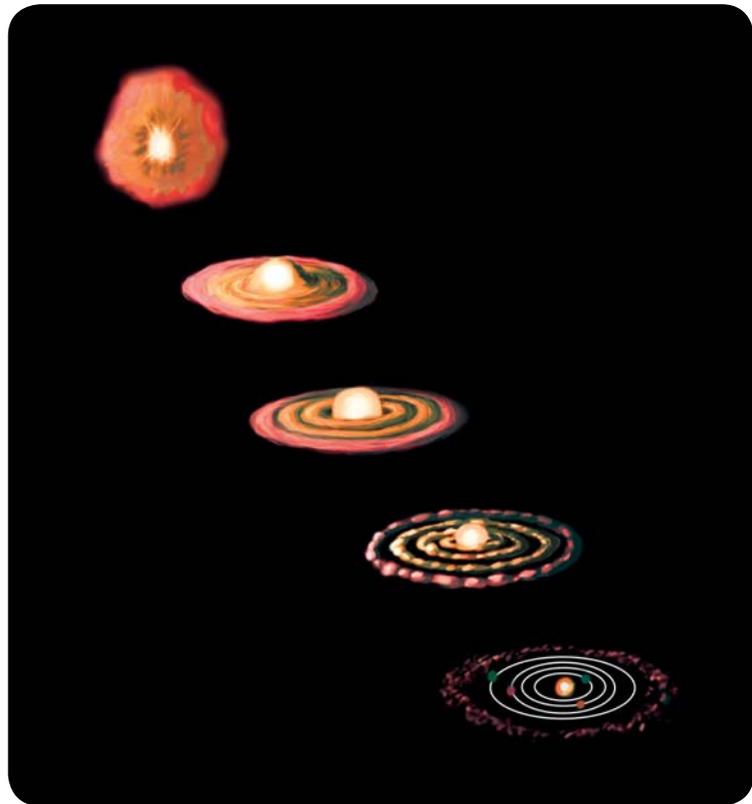
© Archives de l'Académie



Pierre-Simon de Laplace  
(1749-1827)

© Georgios Kollidas - Fotolia

On doit ces améliorations aux progrès des moyens d'observations au sol, à l'exploration spatiale, aux progrès en matière de datation des roches et aux expériences en laboratoire visant à reproduire et étudier en détail certains des processus à l'œuvre. On le doit aussi au développement des moyens de calculs modernes permettant de simuler, certes de manière encore simplifiée, les grandes étapes de la formation du système solaire. Le scénario expliquant le mieux aujourd'hui les propriétés des objets qui le composent prévoit, à partir du gaz et des grains submicroniques du milieu interstellaire, la formation de corps rocheux ou glacés de quelques kilomètres – les planétésimaux et les comètes. Ces corps s'agglomèrent ensuite pour former, dans la partie froide du futur système solaire, des noyaux de quelques masses terrestres ; très rapidement, ces noyaux accrèteront suffisamment



© Photo Researchers, Inc. - Alamy

*Scénario de la formation du système solaire, depuis l'effondrement d'un nuage de gaz et de poussières interstellaires et la formation de la Nébuleuse primitive : formation du futur Soleil et d'un disque protoplanétaire, formation de gros corps solides et de structures dans les disques. Les solides appelés planétésimaux sont les briques de base pour la formation des planètes telluriques et des noyaux solides des planètes géantes.*

de gaz pour former les planètes géantes. Plus près du Soleil, les planètes rocheuses se formeront directement à partir des planétésimaux, en quelques dizaines de millions d'années. Certaines de ces étapes restent encore mal comprises parce qu'il n'est pas possible de les reproduire en laboratoire, parce que les moyens de calcul ne sont pas assez puissants pour les simuler et parce que nous ne disposons que de rares informations directes sur les conditions physiques, dynamiques et chimiques au moment de la formation du système solaire.

## Les exoplanètes

Le Soleil devenu une étoile parmi des milliards d'autres, la spéculation sur l'existence d'autres systèmes formés selon les mêmes lois devenait légitime. La question de l'existence d'autres mondes est restée toutefois ouverte jusqu'à la fin du 20<sup>e</sup> siècle, faute de moyens d'observations adéquats. En 1963,

l'annonce de la découverte d'une planète autour de l'étoile

de Barnard, bien qu'infirmer dix ans plus tard,

lança la chasse aux exoplanètes. Cette

chasse s'appuyait alors sur des

méthodes de détection indirectes

visant à déceler de petites

perturbations des étoiles

induites par la présence

d'une ou plusieurs

planètes en orbite autour

d'elles. Cependant,

aucune planète ne

fut trouvée avant les

années 1990. Pourquoi ?

Les astronomes ont

commencé par rechercher

des analogues de Jupiter,

la plus grosse des planètes

du système solaire, mais de

telles planètes étaient trop difficiles

à détecter avec les moyens de l'époque.

Les premières exoplanètes découvertes

furent, de fait, fort différentes des planètes attendues.

Il s'agissait, pour la première, d'une planète évoluant autour d'un pulsar – reste d'explosion d'étoile – et,

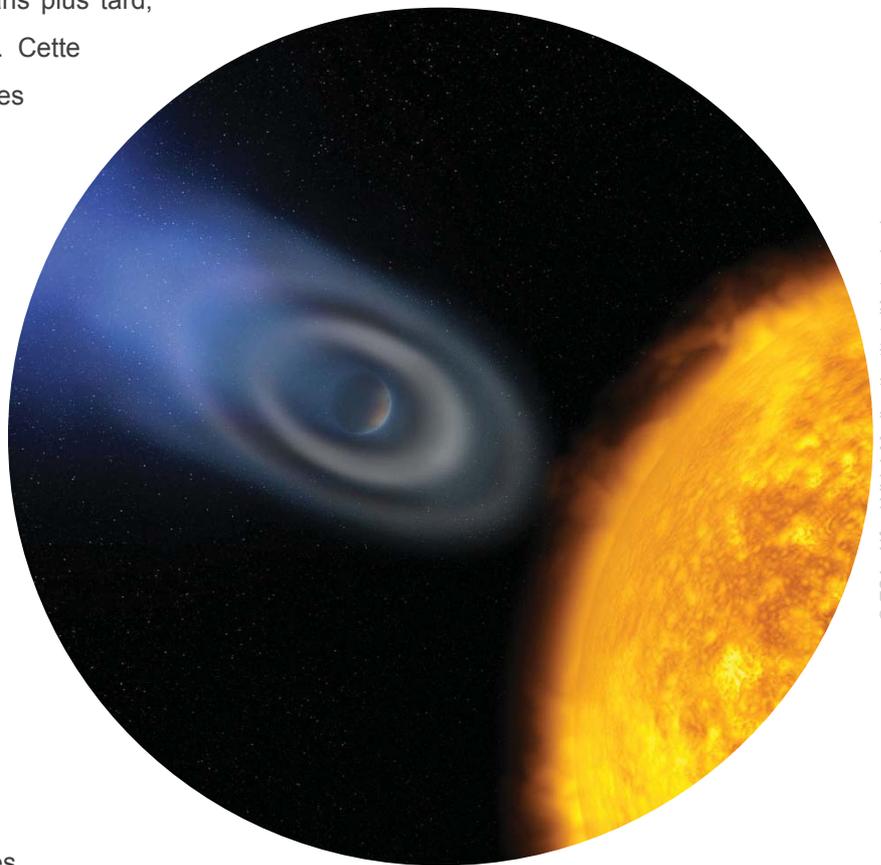
pour la seconde, d'une planète de masse comparable à celle de Jupiter, mais située cent fois plus près

de son étoile que Jupiter ne l'est du Soleil. Les théories de l'époque ne prévoyaient pas l'existence de

tels « Jupiters chauds » (i.e., proches de leur étoile), qui se sont pourtant révélés relativement communs

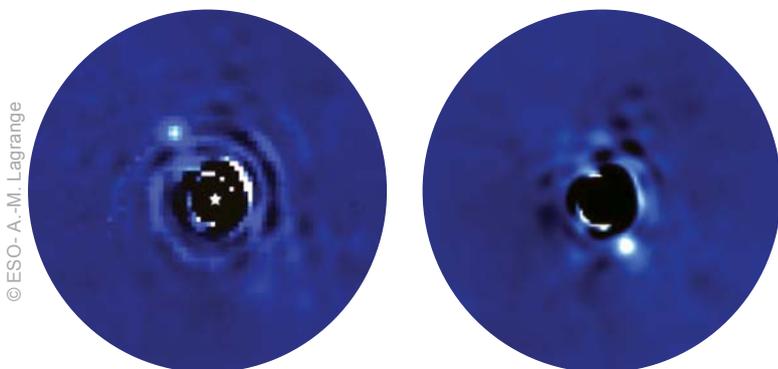
par la suite. Les premières images d'exoplanètes sont enfin obtenues dans les années 2000, grâce à des

développements technologiques sophistiqués.



*Osiris, planète géante en orbite autour de l'étoile HD209458, dans la constellation de Pégase. Cette exoplanète, qui met seulement 3,5 jours pour effectuer un tour autour de son étoile, est entourée d'une couronne d'hydrogène atomique attribuée à de l'évaporation planétaire (vue d'artiste).*

Vingt ans après ces premières découvertes, plus de 3 000 exoplanètes ont déjà été identifiées, et autant attendent confirmation. Leur caractérisation révèle d'ores et déjà une grande variété de masses (depuis quelques masses terrestres jusqu'à plusieurs masses de Jupiter), de rayons et de propriétés orbitales – planètes sur des orbites inclinées ou rétrogrades, ou très lointaines –, dont certaines sont



© ESO - A.-M. Lagrange

*L'exoplanète  $\beta$  Pictoris b est une géante de gaz orbitant à environ 9 ua (1 unité astronomique = distance Terre-soleil, soit 150 millions de km) de son étoile (au centre, symbolisée par une étoile). À gauche, image de  $\beta$  Pictoris b - point lumineux en haut à gauche - le jour de sa découverte en novembre 2003, à droite, 6 ans plus tard.*

sans équivalent dans le système solaire. Une telle diversité ne peut s'expliquer sans envisager l'existence de plusieurs scénarios de formation des planètes. Il apparaît de plus que l'histoire dynamique individuelle des systèmes planétaires extrasolaires jeunes peut être très complexe, encore plus que ne l'a été celle du système solaire : ainsi, l'orbite d'une exoplanète une fois formée peut être considérablement modifiée

en raison d'interactions avec le disque protoplanétaire – ce qui expliquerait l'existence des « Jupiters chauds » – ou avec d'autres objets présents dans le système – ce qui expliquerait l'existence d'exoplanètes sur des orbites inclinées ou rétrogrades.

La diversité des architectures des systèmes planétaires extrasolaires est sans doute le résultat le plus étonnant obtenu en exoplanétologie à ce jour. Il est probable que les intérieurs et les atmosphères des exoplanètes, que nous commençons tout juste à sonder, révéleront aussi une grande diversité. Les propriétés des atmosphères en formation résultent de la capture du gaz présent dans la nébuleuse primitive, mais aussi du dégazage des planètes en formation, d'apports extérieurs éventuels (astéroïdes, comètes), et de processus physicochimiques complexes et variés. Leur évolution dépend de nombreux facteurs (volcanisme, échappement des gaz légers, irradiation stellaire, etc), autant de conditions difficilement prévisibles et de paramètres variables qui rendent extrêmement délicates les prédictions. Les atmosphères jouant un rôle fondamental sur les conditions d'apparition et de développement de la vie, des efforts importants vont être déployés dans les années et décennies à venir, en particulier avec le *James Webb Space Telescope*, successeur du *Télescope Spatial Hubble*, et avec les futurs *Extremely Large Telescopes*, pour sonder les atmosphères d'exoplanètes géantes puis telluriques.



La Terre primitive (vue d'artiste)

Faute de pouvoir effectuer des explorations rapprochées, voire *in situ*, c'est l'étude détaillée des atmosphères qui permettra sans doute de détecter les premiers signes de vie sur des exoplanètes. Encore faut-il déterminer quelles exoplanètes sont propices au développement de la vie. Par analogie avec la Terre, le choix se porte aujourd'hui sur des planètes telluriques situées à une distance de leur étoile permettant la présence d'eau liquide à la surface, celle-ci étant, pense-t-on, une condition nécessaire à l'apparition de vie sur notre planète. Cependant, cette condition n'est sans doute pas suffisante. D'autres facteurs ont en effet pu jouer un rôle important, voire indispensable au développement de la vie – les propriétés du Soleil lui-même, la Lune, les comètes, les astéroïdes, le champ magnétique terrestre, l'activité interne de notre planète (volcanisme, dégazage) ou, encore, la composition de l'atmosphère (effet de serre).

Quelles signatures de vie chercher sur les exoplanètes ? Cette question est extrêmement complexe. Toujours par analogie avec notre planète, un critère privilégié est la présence de dioxygène – et de son dérivé l'ozone – dans une atmosphère qui présenterait, par ailleurs, des propriétés relativement semblables à celles de la Terre. La présence de dioxygène dans notre atmosphère résulte en effet de la photosynthèse et ne pourrait s'expliquer par de simples processus physiques ou chimiques abiotiques. Mais ce critère reste-t-il valable dans le cas de l'atmosphère d'une exoTerre, ayant une histoire physicochimique différente, et orbitant autour d'une étoile différente du Soleil ?

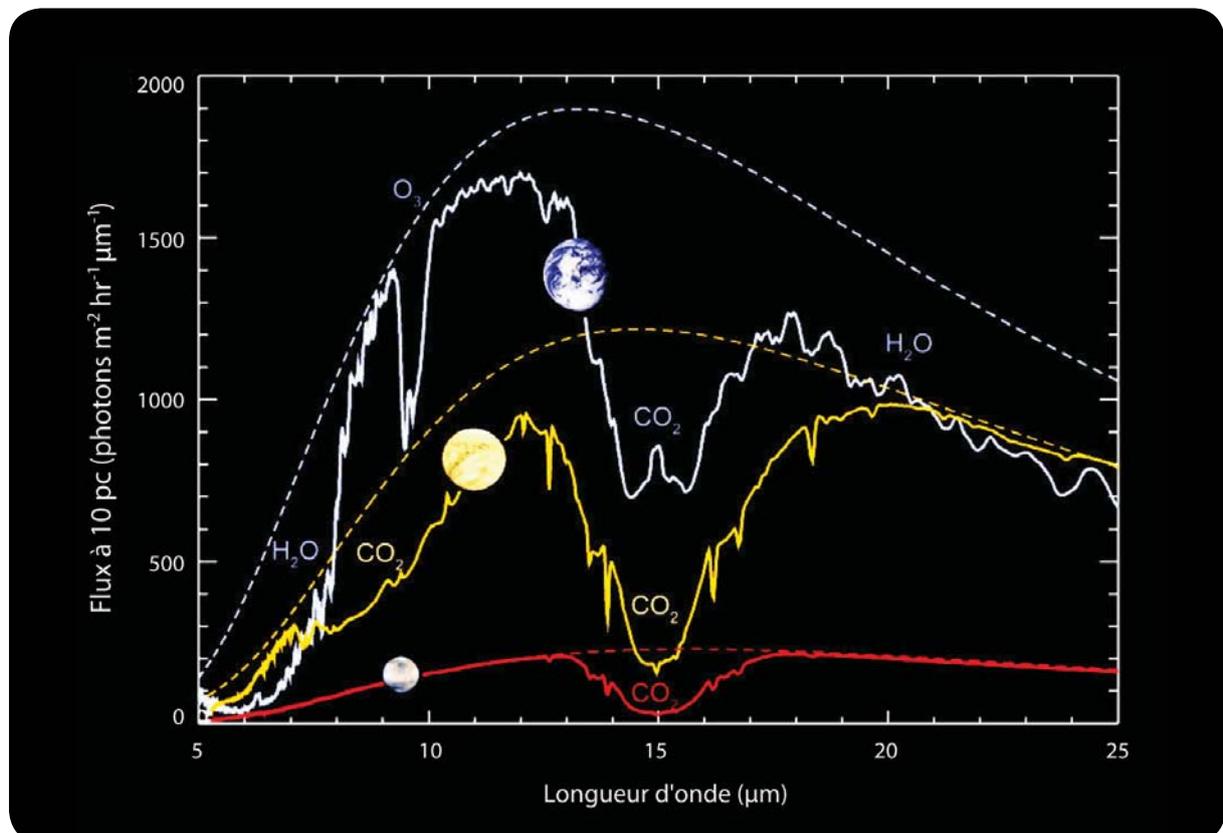
La question du possible rôle de référence que doit jouer la Terre se pose donc de manière très centrale, tout comme celle de notre capacité à appréhender la diversité des atmosphères des exoplanètes, à

imaginer d'autres possibles et à élaborer, sur la base de seules considérations théoriques et avec l'aide de simulations, d'expériences de laboratoires, des scénarios originaux et consistants de formation et de développement de la vie, dans des conditions différentes de celles de la Terre.

### Un grain de sable dans un Univers très vaste...

L'explosion des connaissances au cours des 350 dernières années et l'émergence de disciplines variées – appelées aujourd'hui physique, géophysique, chimie, sciences du vivant et, plus récemment, informatique – ont mené à une vision radicalement différente de la Terre et du système solaire : un grain de sable dans un Univers très vaste. La question de l'existence d'autres mondes est désormais posée de manière scientifique. Les premiers systèmes planétaires extrasolaires n'ont été découverts que récemment, dans les années 90. Après 20 ans d'études, nous constatons une grande variété d'exoplanètes et cette diversité n'est peut-être encore qu'effleurée. La chasse aux exoplanètes n'est pas terminée : nous n'avons pas encore exploré toute la diversité des systèmes – nous ne savons pas encore, par exemple, si des analogues du système solaire existent –, et seul le voisinage immédiat du Soleil a été sondé. Les atmosphères des exoplanètes sont encore largement inexplorées alors que ce sont elles qui, sans doute, constitueront le seul moyen de détecter des signatures de vie. En l'état actuel des connaissances, établir l'existence probable de vie sur une autre planète semble donc être un objectif à très long terme.

Le système solaire est dans ce contexte un élément de comparaison précieux et indispensable, même si nous devons nous rappeler qu'il n'est qu'un cas, pas forcément représentatif, au sein d'une population de systèmes dont la diversité se révèle chaque jour plus grande.



*Le spectre de l'atmosphère de la Terre diffère de celui des deux autres planètes telluriques du système solaire, Mars et Vénus, notamment par la présence d'oxygène provenant de la vie sur Terre. C'est donc probablement l'étude de l'atmosphère des exoplanètes telluriques qui pourra nous renseigner sur l'éventualité d'une vie dans ces nouveaux mondes.*

## Des ondes d'Huygens aux photons d'Einstein : une étrange lumière



© B.Eymann - Académie des sciences

### Alain Aspect

Membre de l'Académie des sciences – section *Physique* –, directeur de recherche émérite au CNRS, professeur à l'Institut d'optique et à l'École polytechnique

Il y a 350 ans, Colbert invitait les grands savants de l'époque à rejoindre l'Académie des sciences. L'un des plus éminents, Christiaan Huygens, né en 1629 et éduqué aux Pays-Bas, avait étudié Descartes, Pascal et Fermat, et déjà produit des résultats majeurs en mécanique, en mathématiques et en astronomie. Il accepta de venir s'établir à Paris où il résida jusqu'à la mort de Colbert et

la révocation de l'Édit de Nantes, événements qui le conduisirent à regagner sa patrie, où il finit ses jours.

### Naissance du modèle ondulatoire

En 1672, Huygens prit connaissance des travaux de Newton sur le modèle corpusculaire de la lumière. À l'époque, le problème majeur était de trouver un modèle justifiant les lois de la réflexion et de la réfraction, qui avaient été énoncées indépendamment par Descartes et Snell. On comprend aisément qu'un corpuscule rebondissant sur un miroir soit un bon modèle pour décrire le fait qu'un rayon lumineux se réfléchit de façon symétrique par rapport à la normale, mais le défi est de comprendre pourquoi le rayon réfracté se rapproche de la normale lorsqu'il passe de l'air vers un milieu plus dense comme l'eau ou le verre. Newton l'explique en invoquant l'attraction par le milieu dense : les particules de lumière sont accélérées perpendiculairement à l'interface, et la trajectoire se rapproche de la normale. Mais Huygens cherche un modèle qui rende compte de tous les phénomènes connus, et notamment du phénomène de double réfraction, que l'on observe avec certains cristaux comme le spath d'Islande. En 1678, il découvre qu'un modèle ondulatoire répond à cette exigence, contrairement au modèle corpusculaire de Newton.

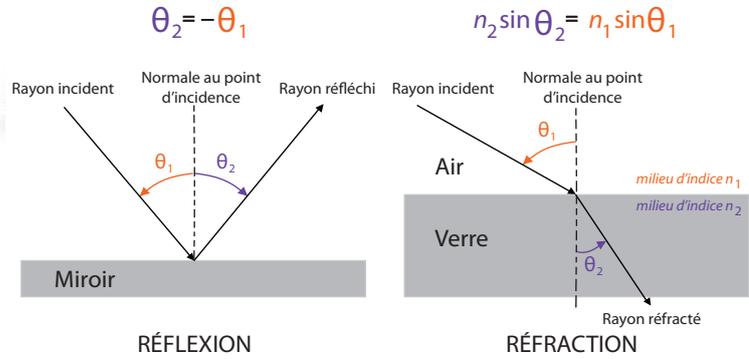
Malgré sa valeur, le modèle ondulatoire d'Huygens présenté dans son *Traité de la lumière* va être ignoré par la plupart des savants pendant plus d'un siècle. S'ils adoptent sans discussion le modèle corpusculaire, c'est en raison du prestige immense de Newton, qui avait su expliquer le mouvement des

© Morphart - Fotolia



Christiaan Huygens (1629-1695)

Christiaan Huygens s'est très vite penché sur la question de la réflexion et de la réfraction des rayons lumineux.

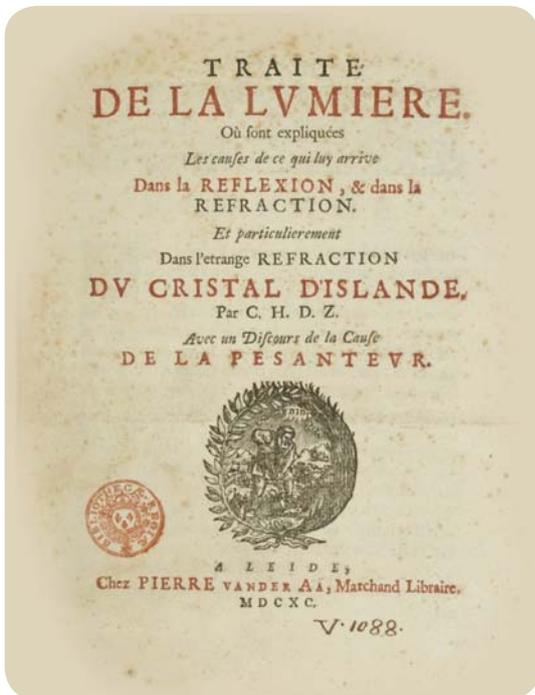


© D'après Fabien2005/Wikipedia

planètes grâce à sa loi de la gravitation universelle. Il faudra attendre plus d'un siècle pour que Thomas Young, en Angleterre, et Augustin Fresnel, en France, développent le modèle ondulatoire de la lumière, seul capable de rendre compte des phénomènes d'interférence et de diffraction qu'ils étudient avec soin dans des expériences remarquables.

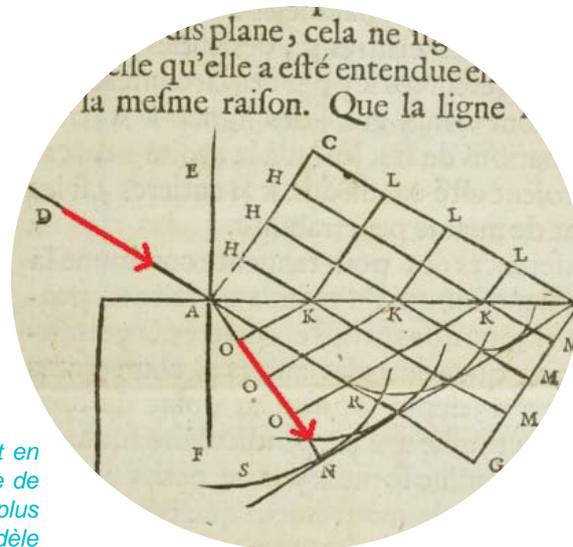


© gallica.bnf.fr - Bibliothèque nationale de France



© gallica.bnf.fr - Bibliothèque nationale de France

Le modèle ondulatoire d'Huygens, émis en 1678 et décrit en détail dans son Traité de la lumière en 1690, rend compte de la réfraction, à condition que la vitesse de la lumière soit plus faible dans le milieu dense que dans l'air, à l'opposé du modèle corpusculaire de Newton.



© gallica.bnf.fr - Bibliothèque nationale de France

## Modèles ondulatoire vs corpusculaire

Young et Fresnel doivent se battre pour imposer le modèle ondulatoire. En témoigne l'histoire du point brillant de Poisson, qui met en scène des académiciens particulièrement... brillants.

Nous sommes en 1819, et l'Académie des sciences a mis au concours la question de la diffraction de la lumière, c'est-à-dire le fait que dans la zone de transition entre l'ombre portée d'un écran et la zone éclairée, on observe des franges faites d'alternance d'ombre et de lumière. Fresnel, jeune polytechnicien

brillant, élève de l'académicien Arago, a présenté son

*Mémoire sur la diffraction de la lumière* qui décrit ses

expériences et donne du problème un traitement

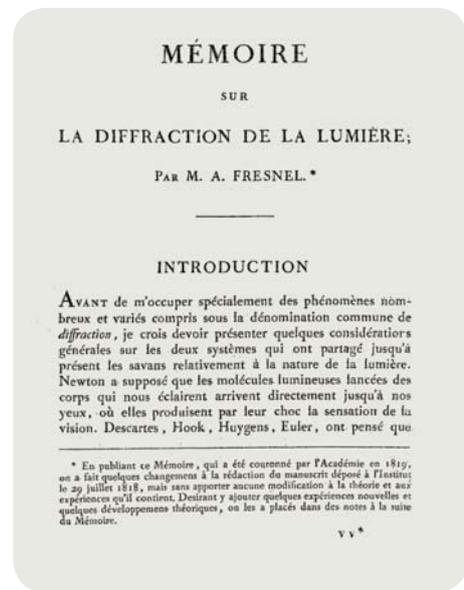
mathématique complet reposant sur un



Augustin Fresnel  
(1788-1827)

*En France, Augustin Fresnel développe le modèle ondulatoire à l'occasion d'un concours lancé par l'Académie des sciences. Thomas Young conduit en parallèle ses travaux en Angleterre.*

modèle ondulatoire convaincant. Mais beaucoup d'académiciens sont des mécaniciens éminents, dont les travaux sont fondés sur la mécanique de Newton, et ils ne peuvent admettre que Fresnel remette en cause leur héros, même dans un domaine autre que la mécanique. Siméon Denis Poisson,



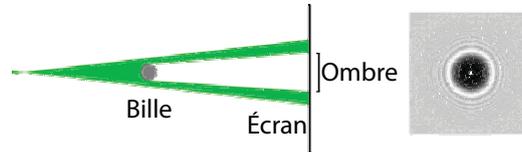
Thomas Young  
(1773-1829)



© FALKENSTEINFOTO - Alamy

Siméon Denis Poisson  
(1781-1840)

l'un des newtoniens convaincus, est un mathématicien sophistiqué, et il découvre une conséquence surprenante des équations de Fresnel : si une source lumineuse est placée sur l'axe d'un obstacle opaque circulaire, la théorie prévoit la présence d'un point brillant derrière l'écran, à un endroit



*Le point brillant de Poisson. La théorie de Fresnel prédit la présence d'un point brillant au centre de l'ombre géométrique de l'écran. L'observation de ce point brillant par Arago joua un rôle clé dans le succès de la théorie ondulatoire de la lumière développée par Fresnel*

où le bon sens nous dit que règne l'ombre la plus profonde. Cela ne montre-t-il pas l'absurdité de la théorie de Fresnel ? C'est alors qu'intervient un coup de théâtre resté dans l'histoire de la physique : Arago

décide qu'il faut faire l'expérience et, à la stupéfaction de Poisson et de l'ensemble des newtoniens, le point brillant est bien observé. L'histoire veut que l'Académie ait alors basculé en faveur de la théorie ondulatoire, décernant à Fresnel le prix mis au concours, et le recevant bientôt comme nouveau membre.

Certains historiens des sciences disent que l'histoire est enjolivée, et que la conversion à la théorie ondulatoire est loin d'être aussi massive. Selon Dominique Pestre (citant John Worrall *In La Recherche*, décembre 2009, p 92), Poisson avait été ébloui par l'élégance et la cohérence mathématique de la théorie de Fresnel, et il ne demandait qu'à accueillir ce dernier à l'Académie, sans toutefois être vraiment convaincu qu'il fallait rejeter l'optique de Newton. Il faut effectivement constater que les partisans de la théorie corpusculaire vont rester actifs dans les années qui suivent, jusqu'à un nouvel épisode qui va clore le débat. Arago, encore lui, va à nouveau jouer un rôle clé en proposant en 1838 une expérience cruciale pour trancher entre la théorie corpusculaire de Newton, alors appelée « système de l'émission », et la théorie ondulatoire de Fresnel, appelée « système des ondulations ». Selon lui, il suffit de comparer

la vitesse de la lumière dans l'air et dans un milieu réfringent, par exemple l'eau. En effet, dans la théorie de Newton, la lumière accélère en pénétrant dans le milieu plus dense ; au contraire, pour la théorie ondulatoire de Huygens et Fresnel, la lumière va moins vite dans le milieu dense.

© Archives de l'Académie



Hippolyte Fizeau  
(1819-1896)

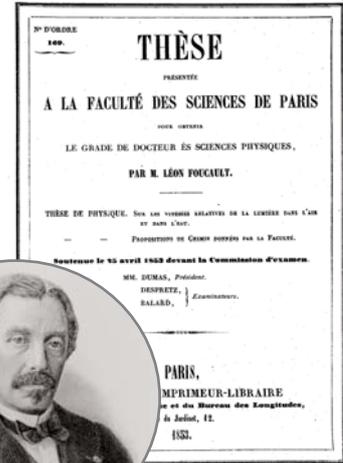
En 1849, Fizeau mesure la vitesse de la lumière entre Montmartre et le Mont-Valérien (le site de l'observatoire de Paris présente une remarquable explication de ces expériences, répétées en 2005 avec un laser). En 1850, Foucault perfectionne le montage et peut effectuer la mesure sur une distance d'un mètre seulement. Il peut alors comparer directement la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau. La thèse du futur académicien,

de 35 pages seulement, conclut sobrement :

« *Toujours la lumière se trouve retardée dans son passage à travers le milieu le plus réfringent. La conclusion dernière de ce travail consiste donc à déclarer le système de l'émission incompatible avec la réalité des faits.* »

Les derniers partisans de la théorie corpusculaire vont donc rendre les armes, ou disparaître : ne dit-on pas que les théories nouvelles ne s'imposent vraiment que par la disparition de leurs détracteurs ?

© gallica.bnf.fr - BNF



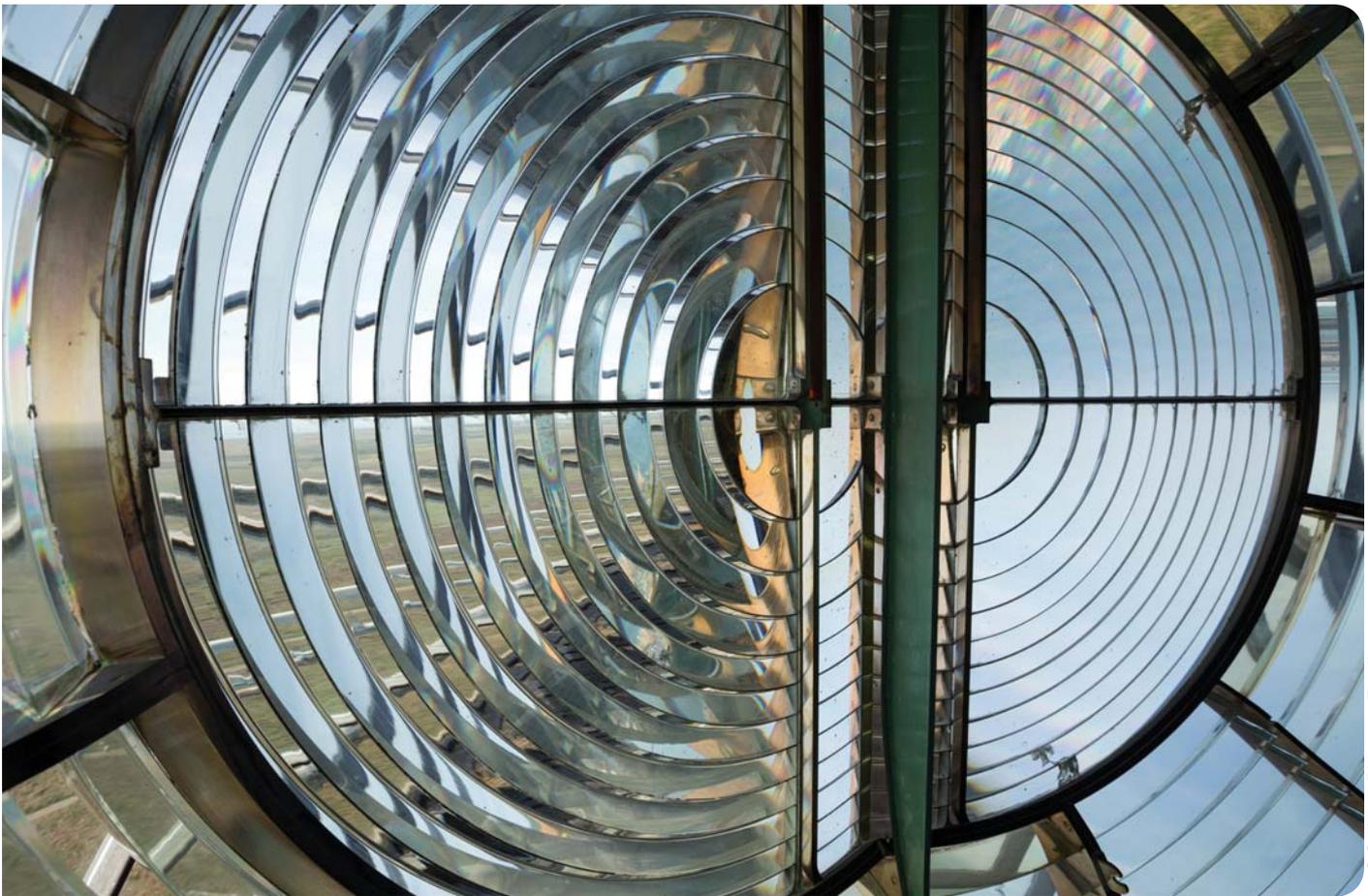
© https://www.bibnum.education.fr/sites/default/files/foucault-texte.pdf

Sur les vitesses relatives de la lumière dans l'air et dans l'eau. Thèse de doctorat de Léon Foucault (1819-1868), présentée à la Faculté des sciences de Paris en 1853

© Observatoire de Paris, Dominique Monseigny



Mesure de la vitesse de la lumière entre l'Observatoire de Paris et Montmartre, en 2005



© Stéphane Bidouze - Fotolia

Une imposante lentille de Fresnel équipant un phare

En ces temps de débat, et parfois même d'opposition entre recherche fondamentale et applications, il convient de souligner que le théoricien Augustin Fresnel est également le père de tous les phares modernes, qu'il a contribué à établir en tant qu'ingénieur des Ponts, et qui sont équipés de ces merveilleuses lentilles de Fresnel. Quant à sa théorie de l'optique ondulatoire décrite dans son mémoire, elle est tellement parfaite que nous pouvons toujours l'utiliser sans rien en modifier. Pourtant, en 1818, il lui manquait une réponse à la question : quelle est la nature de la grandeur qui vibre en se propageant ?

C'est l'immense génie écossais James Clerk Maxwell qui donnera la réponse, en 1864. Il avait écrit des équations permettant de décrire l'ensemble des faits connus à l'époque dans le domaine de l'électricité et du magnétisme. Comme dans toute authentique théorie physique, les équations contiennent plus que ce que l'on y a mis au départ, elles ont des solutions inattendues, dont on peut chercher la trace dans les observations expérimentales. Dans le cas des équations de Maxwell, la nouveauté est de taille : certaines solutions des équations correspondent à des ondes qui se propagent à une vitesse que Maxwell calcule. Et il conclut : « Cette vitesse est si proche de celle de la lumière qu'il semble que nous avons une bonne raison de conclure que la lumière elle-même [...] est une perturbation électromagnétique sous forme d'ondes se propageant au travers du champ électromagnétique selon les lois de l'électromagnétisme. »



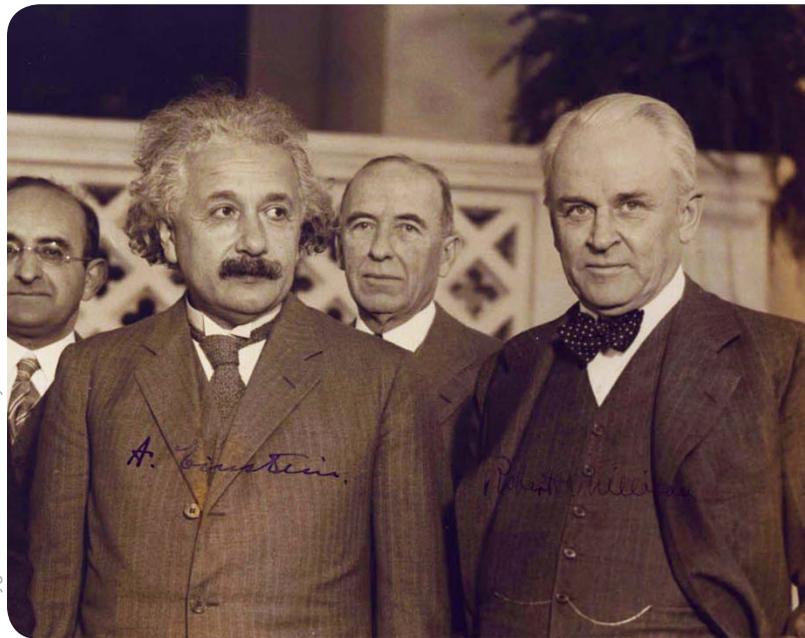
© nickolae - Fotolia

James Clerk Maxwell  
(1831-1879)

La cause semble donc entendue, on sait désormais que la lumière est une onde électromagnétique, c'est-à-dire des champs électriques et magnétiques vibrant de concert, perpendiculairement à la direction de propagation. Ce sont des ondes transversales, comme les ondes de Fresnel, et l'on sait les décrire par une théorie impressionnante à laquelle aucun phénomène ne semble pouvoir échapper. Est-ce la fin de la recherche théorique en physique, et ne reste-t-il plus aux physiciens qu'à raffiner leurs mesures, comme l'opticien américain Michelson l'aurait déclaré ? Il n'en est rien car, en 1900, le grand Kelvin aperçoit deux « nuages au dessus de la théorie dynamique de la chaleur de la lumière » (Lord Kelvin. *Nineteenth century clouds over the dynamical theory of heat and light. Philosophical Magazine Series 6 1901 ; 2 : 1-40*). Ces deux nuages, qualifiés de « très denses » par Kelvin, vont conduire Einstein à poser les bases des deux révolutions de la physique du 20<sup>e</sup> siècle : la relativité, bien sûr, mais aussi la physique quantique, dans l'émergence de laquelle il jouera un rôle clé.

### La dualité onde-corpuscule

Le premier article d'Einstein sur la physique quantique est publié en 1905. Il propose une hypothèse radicale : la lumière est formée de grains, les *LichtQuanten*, qui possèdent une énergie et une quantité de mouvement bien déterminées dépendant de la constante introduite par Planck en 1900. Ces quanta de lumière sont aujourd'hui appelés photons. À l'aide de ce modèle, Einstein interprète l'effet photoélectrique – l'éjection des électrons de la matière sous l'effet de la lumière – comme une collision photon-électron, et il en déduit l'énergie des électrons éjectés. Parmi les publications d'Einstein de l'époque, cet article est certainement le moins apprécié, comme en témoigne une phrase négative figurant dans le rapport qui lui permettra, cependant, d'être élu à l'Académie des sciences de Prusse en 1911. C'est pourtant cet article que retiendra le comité Nobel en 1922, après que Millikan ait confirmé expérimentalement la prédiction d'Einstein pour l'effet photoélectrique, et cela « *contrary to all my expectations* », nous dit Millikan dans ses Mémoires (R.A. Millikan. *Albert Einstein on His Seventieth Birthday. Rev Mod Phys 1949, 21 : 343*).

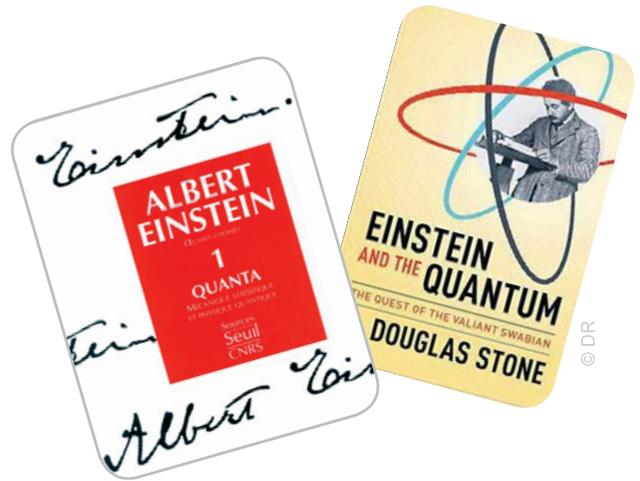


© Bygone Collection - Alamy

Avec Albert Einstein (1879-1955), l'année 1905 marque le retour des particules : ses prédictions sur l'effet photoélectrique seront confirmées dix ans plus tard par Robert Millikan (1868-1953), à son corps défendant.

Voici donc le modèle corpusculaire remis en selle. Mais comment rendre compte des phénomènes d'interférences, diffraction ou double réfraction dont Young et Fresnel ont montré qu'ils ne pouvaient s'expliquer de façon cohérente que par un modèle ondulatoire ? Comment concilier le modèle corpusculaire avec la théorie de Maxwell, qui décrit la lumière comme une onde électromagnétique ? Einstein, admirateur

de Maxwell, ne peut ignorer la question, et il y répond de façon magistrale lors de sa première apparition dans une conférence scientifique, la conférence de la physique allemande qui se tient à Salzburg en 1909. Einstein y développe une série d'arguments et conclut : « *Je n'en ai fait usage que pour illustrer rapidement le fait que les deux caractéristiques structurelles (structure ondulatoire et structure en quanta) [...] ne doivent pas être tenues pour incompatibles.* » Au bout de chaque argument, la conclusion d'Einstein est donc la même : la lumière est à la fois onde et corpuscule. Il faudra attendre quatorze ans pour que Louis de Broglie énonce cette dualité onde-corpuscule non plus pour les particules de lumière, mais pour les particules matérielles.



*Le rôle majeur d'Einstein dans l'émergence de la théorie quantique est mis en relief dans Albert Einstein, Œuvres choisies, Tome 1: Quanta. Textes choisis et présentés par Françoise Balibar, Olivier Darrigol et Bruno Jech. Seuil et Editions du CNRS, ainsi que dans Einstein and the Quantum, A. Douglas Stone, Princeton University press, 2014.*

Avec la dualité onde-corpuscule, la physique quantique moderne était née. L'optique allait continuer ses progrès tout au long du 20<sup>e</sup> siècle, notamment après l'invention du laser ; continuant la tradition de leurs aînés, les Français allaient y tenir une place éminente, fournissant des bataillons importants à notre Académie. Mais la dualité onde-corpuscule de la lumière restait bien mystérieuse, comme en témoignent les questions que se pose le jeune Alfred Kastler, professeur de lycée en 1932 à Bordeaux, et qui le conduiront à la découverte du pompage optique avec Jean Brossel : « *Si cette synthèse satisfait le mathématicien, elle continue à inquiéter le physicien qui ne saurait se contenter de formules abstraites. Pour lui, la dualité entre les aspects ondulatoires et les aspects corpusculaires de la lumière reste un mystère non résolu.* » (Les propriétés corpusculaires de la lumière, *In Procès-verbaux des séances de la Société des sciences physiques et naturelles de Bordeaux*, 1931-1932, pp 32-58)

Trente-deux ans plus tard, élève de terminale au lycée d'Agen, je pose les mêmes questions à un professeur bien en peine d'y répondre malgré ses immenses compétences. Il me faudra encore attendre quinze ans pour trouver, comme beaucoup de mes contemporains, une réponse lumineuse dans les cours au Collège de France de notre confrère Claude Cohen-Tannoudji qui, en clarifiant ces questions, a permis à l'école française d'optique quantique de rayonner dans le monde entier.



Claude Cohen-Tannoudji

*Une interrogation féconde : « Objet de ce cours : essayer [...] de répondre à la question suivante : pourrait-on se passer du concept de photon, au moins dans le domaine optique ? », Claude Cohen-Tannoudji, 1979 (premier cours année 1979-1980 – [www.phys.ens.fr/~cct/college-de-france/](http://www.phys.ens.fr/~cct/college-de-france/))*

## B - Objet du cours 1979-80

LI-5

### ① Idee générale

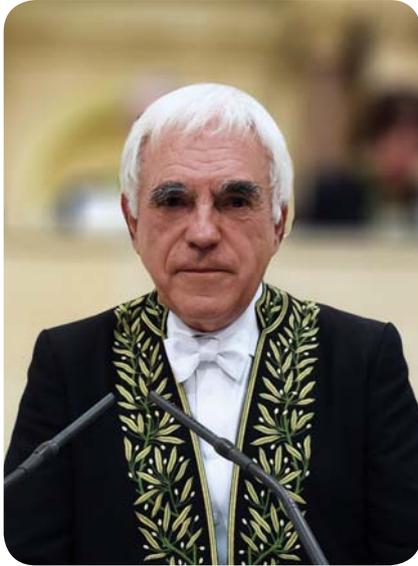
- Dans les processus de détection et d'émission de rayonnement par des atomes, essayer de dégager les aspects qui nécessitent réellement une quantification du rayonnement.

- Au cours des dernières années, plusieurs physiciens ont essayé de construire des théories semi-classiques de l'interaction matière - rayonnement où la matière est traitée quantiquement et le rayonnement classiquement.

Succès de ces approches pour expliquer un nombre important de phénomènes : effet photoélectrique, effet Hanbury-Brown et Twiss, théorie semi-classique du laser, optique non-linéaire...

Objet de ce cours : essayer, en analysant des tests expérimentaux récents, de répondre à la question suivante : pourrait-on se passer du concept de photon, au moins dans le domaine optique ?

## Machines et information



© B.Eymann - Académie des sciences

### Gérard Berry

Membre de l'Académie des sciences – section *Sciences mécaniques et informatiques* –, professeur au Collège de France

Mécanique, mathématiques appliquées, informatique, théorie du contrôle, traitement du signal : tous ces domaines de la section *Sciences mécaniques et informatiques* de l'Académie n'ont bien sûr pas 350 ans, les mathématiques appliquées modernes et l'informatique n'étant nées qu'au 20<sup>e</sup> siècle. Mais une pensée et une action commune les traversent : l'invention et l'optimisation de machines de toutes sortes qui sont au cœur des révolutions industrielles successives, du moteur à l'ordinateur en passant par le train, l'automobile, l'avion, la machine-outil, etc.

La matière et l'énergie ont formé le socle des sciences et des techniques jusqu'au milieu du 19<sup>e</sup> siècle. Les machines mécaniques, puis électriques, utilisent l'énergie pour transporter et travailler la matière, ou encore transforment une forme d'énergie en une autre : toute la grande révolution industrielle née au 18<sup>e</sup> siècle repose sur elles. Puis les ondes électromagnétiques, exploitées à la fin du 19<sup>e</sup> siècle, ont complété le triangle en permettant de connecter les hommes entre eux sans support matériel.

Jusqu'au milieu du 20<sup>e</sup> siècle, la notion d'information n'était pas vraiment explicite, même si son rôle était déjà bien central. Les progrès ont en effet toujours reposé sur une mesure de plus en plus fine de phénomènes naturels comme l'équilibre des forces, les frottements, la combustion et le rayonnement, conduisant à mieux modéliser la nature et à perfectionner les machines grâce à de meilleures architectures et de meilleurs plans. Or, mesures, modèles, calculs, architectures et plans sont tous du domaine de l'information, transmise par des supports matériels standards comme le livre ou le tableau et la craie. Avec l'informatique moderne, l'information et les algorithmes qui la manipulent se trouvent magnifiés, de telle sorte que nous vivons maintenant sur un tétraèdre et plus sur un triangle. Notons en passant que les méthodes algorithmiques de calcul sont anciennes, antérieures à la mécanique, aux mathématiques et même à l'écriture. Le mot algorithme lui-même vient du nom du grand savant persan Al Khuwārizmī, alors que le mot algèbre vient de son traité *Al Jabr* sur la résolution des équations par calcul.



*Al Khwarizmi (~ 783-850), savant persan dont dérive le terme algorithme*

D'Alembert publie en 1743 son *Traité de dynamique*, qui sert de base au traité de *Mécanique analytique* de Lagrange en 1788. En 1765, la machine à vapeur de Watt, fiable car bien régulée, crée la première révolution industrielle. Puis Sadi Carnot comprend en 1824 la transformation de la chaleur en énergie mécanique et introduit la notion de cycle de production de travail. Ses intuitions conduisent au second principe de la thermodynamique et à l'introduction de la notion fondamentale d'entropie.

La mécanique s'étend aux solides déformables avec la théorie générale de l'élasticité de Cauchy et Navier en 1821. Puis Poisson étudie l'équilibre élastique, le comportement des poutres sous efforts et les réservoirs sous pression. Le développement

## Évolutions de la science mécanique

Après les premiers liens entre mécanique et calcul effectués par Galilée et Descartes, Newton établit le principe fondamental de la dynamique. Huygens développe l'horloge à pendule et expérimente avec Papin la force motrice de la vapeur.

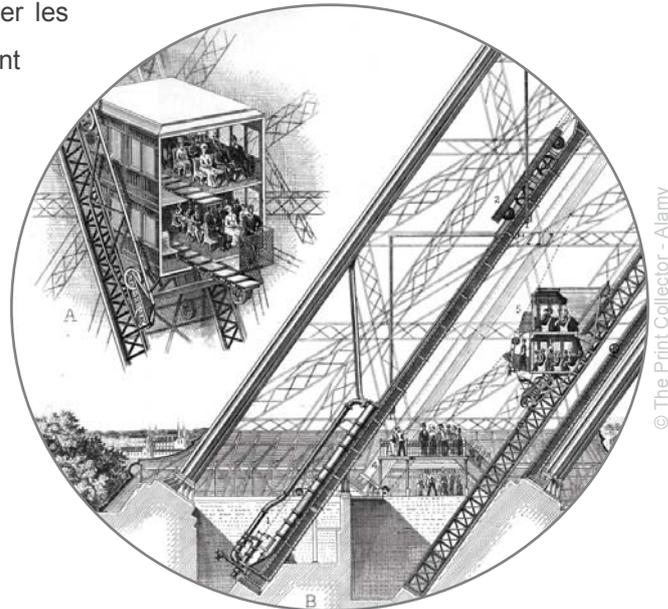


*Denis Papin (1647-1713) et son digesteur (1679), un ancêtre de la cocotte-minute*

de la mécanique des fluides parfaits, engagé au 18<sup>e</sup> siècle par Euler, d'Alembert et les Bernoulli, est poursuivi par Navier et Stokes au 19<sup>e</sup> siècle, avec la représentation des contraintes visqueuses et l'écriture de leurs célèbres équations.

Les transformées de Laplace et de Fourier datent de la même époque. Extrayant les informations fondamentales des signaux, l'analyse spectrale de Fourier, étendue par Wiener en 1930, devient l'outil central pour l'étude des ondes et des vibrations en mécanique, acoustique, et dans tous les domaines de la physique. Les premiers analyseurs/synthétiseurs de Fourier, mécaniques puis électroniques, furent supplantés en 1965 par l'implantation sur ordinateur de la transformée de Fourier rapide, dite FFT. Plus récemment, elle a été étendue par l'analyse en ondelettes, bien plus précise.

À toutes ces époques, il est bien difficile de distinguer les mécaniciens des mathématiciens, les savants jouant sur les deux tableaux. Newton et Leibniz créent le calcul différentiel, Cauchy l'analyse et les fonctions holomorphes, Euler et Lagrange le calcul des variations. Les progrès de la mécanique sont illustrés de façon éclatante en 1889 par la



Ascenseur de la Tour Eiffel en 1889

construction de la Tour Eiffel, qui nécessita des calculs très complexes, puis, en 1909, avec la traversée de la manche par Blériot, dont l'avion et le moteur étaient bien plus efficaces que ceux de ses concurrents, montrant la force jamais démentie depuis de l'aéronautique française.



Dans toute la période qui vient d'être évoquée, les calculs longs et fastidieux sont effectués à la main, avec l'aide de tables de logarithmes, de règles à calcul et, plus tard, de machines mécanographiques. Mais il y a aussi eu des tentatives anciennes de construction de machines à calculer, de Pascal à Babbage.

La Pascaline, machine à additionner et soustraire inventée en 1642 par Blaise Pascal



© Granger Historical Picture Archive - Alamy

## Développement des sciences de l'information

L'acte de naissance des sciences de l'information et du calcul modernes est l'invention de la théorie de la calculabilité par Alan Turing en 1936. Dans un article visionnaire, Turing a introduit ses machines constituées d'un ruban sur lequel on peut écrire des caractères, d'une tête de lecture/écriture et d'un mécanisme qui décide s'il faut remplacer le caractère lu par un autre ou décaler le ruban. Turing a montré que ces machines simplissimes pouvaient effectuer tous les calculs connus, puis a établi deux résultats fondamentaux :

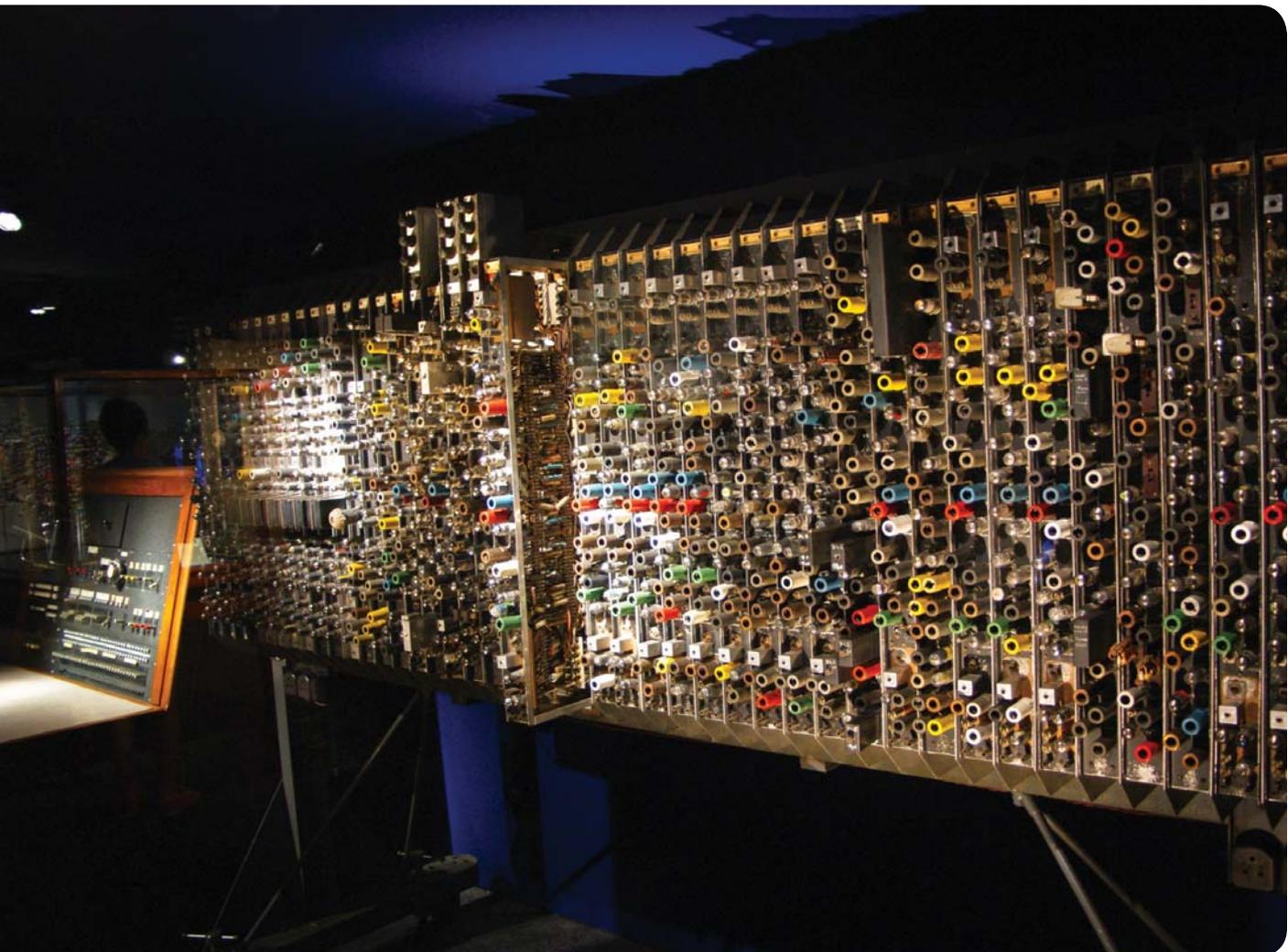
l'existence de machines universelles capables de calculer à partir d'un programme enregistré sur la bande au même titre que les données, et l'impossibilité d'établir par calcul si une machine va s'arrêter ou non. Ainsi, en même temps qu'il définissait la notion de calculabilité, il établissait ses limites. La même année, Alonzo Church introduisait le  $\lambda$ -calcul, langage logique qui sert toujours de fondement aux langages de programmation modernes, et l'a montré équivalent à la machine de Turing. Il a émis la thèse que tout formalisme de calcul effectif à venir leur serait aussi équivalent, ce qui n'a jamais été contredit.

Il a toutefois fallu attendre la fin de la seconde guerre mondiale pour voir la construction des premiers ordinateurs, immédiatement suivie d'une découverte surprenante et toujours d'actualité : la difficulté



Alan Turing  
(1912-1954)

© famouspeople - Alamy



© Mark Dunn - Alamy Stoc

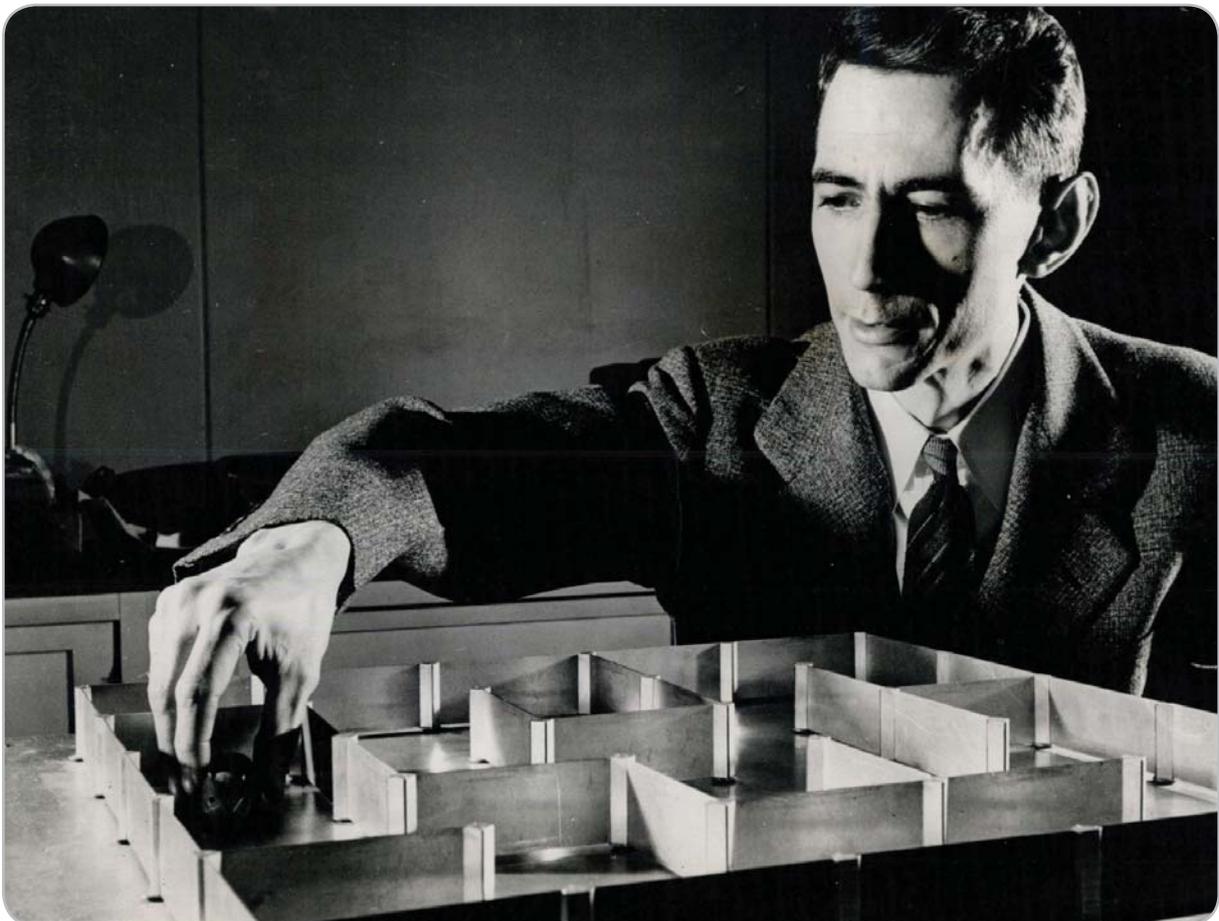
*L'Automatic Computing Engine (ACE) est le prototype du premier ordinateur construit au Royaume-Uni, mis au point en 1950 à partir du projet de calculateur d'Alan Turing.*

d'écrire et de mettre au point des programmes en raison du gouffre qui existe entre des humains intuitifs, mais lents et assez peu rigoureux malgré leurs efforts, et des ordinateurs hyperrapides, incapables de faire des erreurs, mais dénués de bon sens et d'intuition. En informatique, le bug est une panne des auteurs des programmes, pas des programmes eux-mêmes. Turing lui-même s'est alors demandé comment contourner cette difficulté, soit en prouvant mathématiquement la correction des programmes, ce que l'on sait de mieux en mieux faire maintenant, soit à l'aide de logiciels apportant une forme d'intelligence à un ordinateur : la force est toujours dans le logiciel, pas dans le circuit nu.

Au début des années 1950 eurent lieu d'autres révolutions conceptuelles. Celle de la théorie de l'information est due à Claude Shannon. Originellement dédiée à la compréhension et l'optimisation du transport d'informations sur les lignes téléphoniques bruitées, cette théorie a pris une importance majeure dans de nombreux domaines : télécommunications, compression du son et des images, traitement de tous types de signaux, optimisation des grands réseaux de type Internet, etc. En parallèle, l'automatique, nouvelle science de l'analyse et de la conduite des systèmes physiques, dont Maxwell et Wiener furent précurseurs, fut bien illustrée par notre confrère Pierre Faure, y compris sur le plan industriel. Quant à Jacques-Louis Lions, qui a honoré notre compagnie, sa personnalité exceptionnelle a servi l'essor de l'analyse numérique pour le calcul des solutions d'équations de plus en plus complexes et la promotion de toutes les mathématiques appliquées.



© happystock - Fotolia



© Keystone Pictures USA / Alamy

Claude Shannon (1916-2001)

## L'informatique à l'ère industrielle

L'industrie des ordinateurs a réellement démarré son explosion au début des années 1970, avec l'utilisation du transistor, puis l'invention du circuit intégré et la mise en place de la loi de Moore, qui est la décision concertée de l'industrie de doubler le nombre de transistors par unité de surface tous les 2 ans à peu près. On est ainsi passé des 17 500 tubes à vide de l'ENIAC (*Electronic Numerical Integrator Analyser and Computer*) en 1946 aux 2250 transistors de l'Intel 4004 en 1971, puis aux milliards de transistors des microprocesseurs des ordinateurs actuels. Cette loi exponentielle commence toutefois à faiblir, pour des raisons physiques mais aussi et surtout économiques : même si elle produit des objets minuscules, l'industrie des circuits est devenue la plus lourde du monde en coûts d'étude et de fabrication. Or, nous ne sommes encore jamais sortis des circuits électroniques gravés sur des substrats de silicium. D'autres technologies se trouvent enfin libérées et pourraient bien prendre le relais grâce aux physiciens.

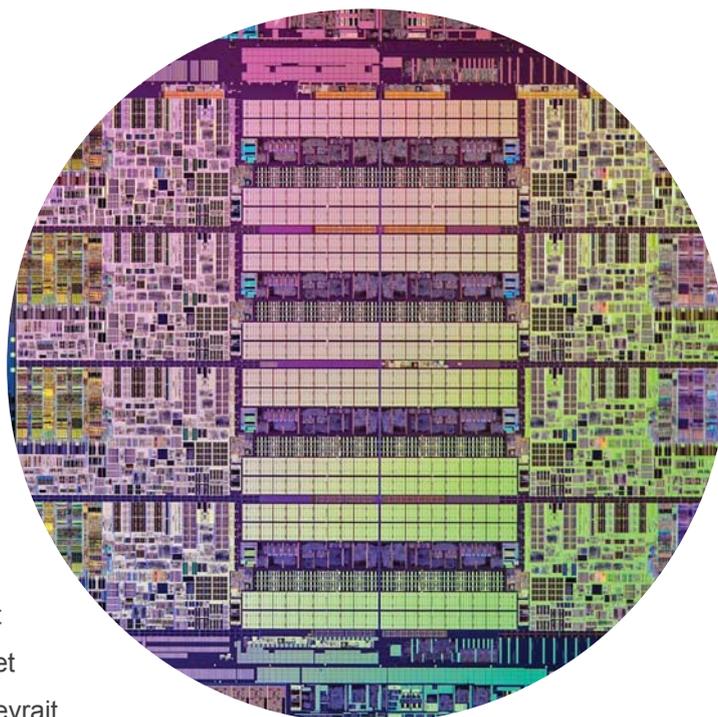
Les ordinateurs ont été progressivement connectés en réseau jusqu'à former l'Internet actuel, qui relie des milliards de machines et devrait encore considérablement s'étendre avec la connexion

d'objets informatisés de toutes sortes. De son côté, la quantité

des données à traiter augmente à une vitesse encore supérieure, en raison de l'interaction croissante entre les usagers, mais aussi des progrès réalisés en termes de mesures et d'expériences dans toutes les sciences et en médecine. On dit qu'il s'est produit au cours des deux dernières années plus de données que depuis la naissance de l'humanité : traiter ce nouveau déluge de données est un point clé pour l'avenir.



L'ENIAC



Processeur Intel® Core™ i7-5960X

© INTERFOTO - Alamy

© Nick Knupffer - Intel

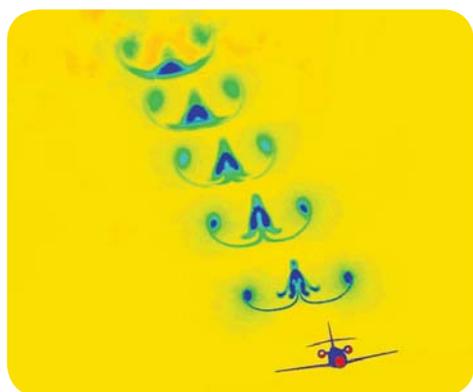


Dans le monde numérique actuel, la science informatique et les mathématiques appliquées gardent un rôle aussi central que l'accroissement de la puissance des ordinateurs. En informatique, on a vu un foisonnement d'algorithmes guidés par des applications de plus en plus variées (images, sons, vidéos, etc.), mais aussi, de façon interne, par la conception et la fabrication des circuits, réseaux, systèmes d'exploitation et logiciels de toutes sortes. La complexité algorithmique, théorie née dans les années 1970, étudie les performances des algorithmes et les optimise. Depuis cette même époque, les fondements mathématiques de la programmation ont été progressivement mieux compris, d'abord sur le plan syntaxique – avec la théorie des langages où s'est illustré notre confrère Marcel-Paul Schützenberger –, puis par la sémantique formelle des langages de programmation, qui a conduit à des langages plus compacts et plus sûrs, ainsi qu'à des techniques de vérification formelle des programmes.

On a vu aussi se créer les bases de données et leurs mécanismes d'indexation rapide, se développer les interfaces hommes-machines modernes et se standardiser les protocoles de communication reliant efficacement les machines dans les réseaux. Puis on a vu apparaître des idées radicalement nouvelles, comme celle des moteurs de recherche sur le Web, dont nous ne pouvons plus nous passer, ou celle de l'utilisation systématique des probabilités en algorithmique. Récemment ont explosé des idées plus anciennes lancées par l'intelligence artificielle, mais qui ont dû attendre la disponibilité d'une très grande puissance de calcul. Ainsi, l'apprentissage par réseaux de neurones profonds bouleverse des domaines aussi divers que le jeu de Go, la reconnaissance de visages ou d'objets dans les images, celle de la parole, la traduction automatique des langues, ou encore l'analyse des données scientifiques. Quand l'on

sait que les nouvelles méthodes efficaces pour la traduction multilingue n'utilisent que peu de concepts linguistiques, on mesure les progrès encore possibles. Pourtant, des domaines essentiels restent insuffisamment compris, le plus critique étant certainement celui de la sécurité informatique, où l'artisanat a atteint ses limites : il demande maintenant de la science au plus haut niveau théorique et pratique.

Il est important de noter qu'au 21<sup>e</sup> siècle, mécanique, mathématiques appliquées, théorie du contrôle et informatique sont de plus en plus imbriquées. C'est directement vrai dans les théories de la turbulence, qui sont au cœur de la mécanique moderne et demandent de grandes simulations informatiques. De façon générale, la conception assistée par ordinateur remplace les plans sur papier et maquettes physiques par des modèles informatiques en trois dimensions, qui permettent également de simuler l'effet des lois de

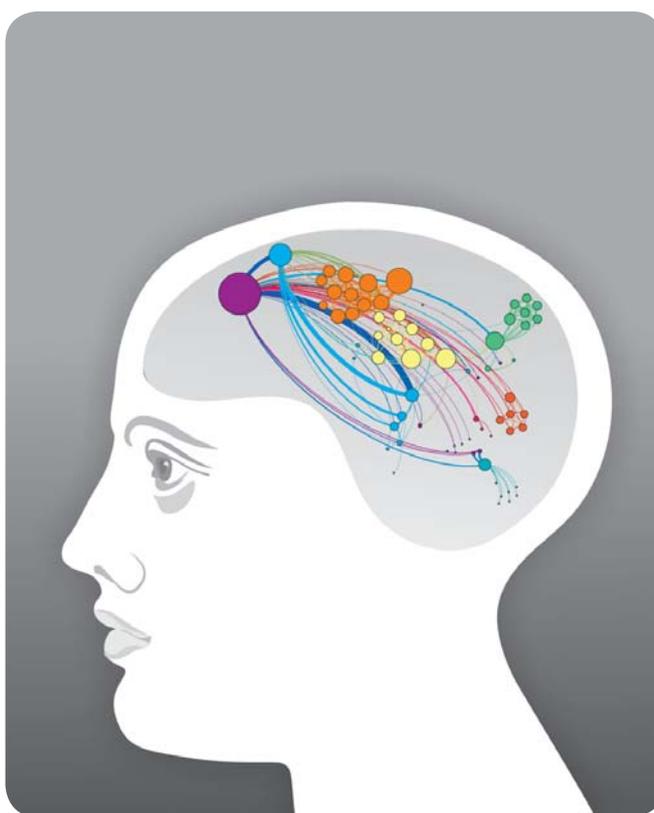


*Modélisation des turbulences dans le sillage d'un avion*



commandes spécifiées par les automaticiens sur l'objet à construire en fonction de son interaction avec l'environnement. Ainsi en est-il de l'aérodynamique d'un avion, domaine où s'est illustré notre confrère Paul Germain. D'autres exemples sont donnés par les machines à commande numérique, la robotique, l'impression 3D, etc.

Enfin, les concepts et outils algorithmiques des sciences de l'information deviennent primordiaux pour la compréhension des phénomènes naturels les plus complexes, de la formation et l'évolution des galaxies à la compréhension fine du vivant par la modélisation progressive des protéines, de la cellule, des organes, des organismes, des populations puis, qui sait, du cerveau. Après la puissance des leviers physiques variés que nous connaissons bien, la puissance du levier unique de l'information n'a pas fini de nous étonner.



## Mathématique : comprendre et prédire



© B.Eymann - Académie des sciences

### Cédric Villani

Membre de l'Académie des sciences – section *Mathématique* –, professeur à l'université Claude-Bernard Lyon 1, directeur de l'Institut Henri-Poincaré (UPMC, CNRS), Paris

C'est dans un climat d'ébullition mathématique que l'Académie des sciences est fondée en 1666. Le mouvement de redécouverte de la science grecque est encore récent ; ainsi, la traduction des écrits de Diophante, « père de l'algèbre », s'est achevée il y a quarante ans à peine. Une génération de mathématiciens audacieux et prolifiques vient de disparaître, mais une extraordinaire relève se prépare aux quatre coins de l'Europe.

Disparus, les Mersenne, Descartes, Pascal, Fermat : ils ont posé les bases de la théorie des nombres et de l'analyse, découvert les ponts entre géométrie et algèbre, initié le calcul des probabilités et celui des variations, défriché les lois de l'optique et de l'acoustique, et même construit les premières machines à calculer. Chez tous on trouvait ce double mouvement des idées mathématiques, l'un tourné vers l'intérieur, dans l'étude des concepts et objets mathématiques en eux-mêmes, l'autre tourné vers l'extérieur, en un perpétuel combat pour décrire, comprendre et prédire les phénomènes de la nature, en l'occurrence de la physique.

Ceux qui s'apprêtent à prendre leur succession ne seront pas moins créatifs. À l'université de Cambridge, un étudiant nommé Isaac Newton fait la plus forte impression ; influencé par Wallis et Barrow, il a aussi lu Fermat et Descartes avec enthousiasme. Tenu à l'écart des cours par une épidémie de peste, il travaille, entre autres sujets, à une nouvelle théorie de la gravitation. Un étudiant de Leipzig un peu plus jeune, Gottfried Leibniz, vient pour sa part de devenir docteur en droit ; il décline un poste de professeur pour continuer l'exploration intellectuelle qui fera de lui l'un des esprits les plus universels de son temps. À Bâle, un riche marchand, Nicolas Bernoulli, éduque son fils Jacob dans l'espoir de le voir reprendre les affaires familiales, loin de se douter qu'il sera le premier représentant de la plus célèbre dynastie de mathématiciens que le monde ait jamais connu. Et pour l'heure, à Paris, le mathématicien le plus à l'honneur est le néerlandais Christiaan Huygens, un trentenaire qui a été formé à La Haye, Paris et

Londres. Son travail sur les pendules a bouleversé la mesure du temps, mais ce n'est que l'un des exploits qui lui valent d'être parmi les toutes premières recrues de Colbert à l'Académie des sciences.

Huygens, Newton, Leibniz, les Bernoulli : ils seront les plus célèbres héros de la révolution mathématique de cette deuxième moitié du 17<sup>e</sup> siècle. De fortes personnalités qui s'influencent, s'allient, se déchirent, se lancent des défis, s'injurient parfois, dans des lettres qu'ils sont presque les seuls à pouvoir apprécier ; en quelques décennies, ils produiront plusieurs traités qui comptent parmi les plus importants de l'histoire des sciences.

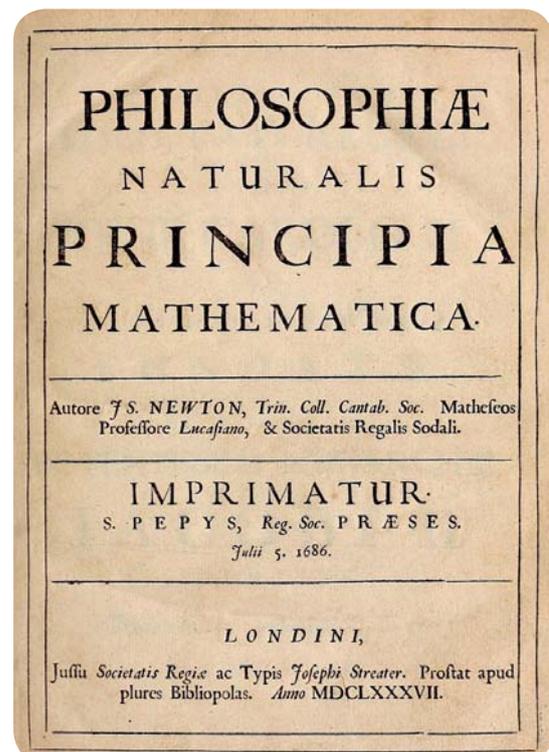
Emblématique de cette période est l'ouvrage de Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, publié en 1687, qui comme l'indique son titre entend développer les fondements mathématiques de la connaissance du monde. Ce programme ambitieux vaudra à son auteur d'être considéré comme l'un des hommes les plus influents de tous les temps. Tout aussi emblématique est la naissance du très puissant calcul infinitésimal, différentiel et intégral, outil majeur de l'analyse moderne, qui permet de quantifier les variations des fonctions.

Et non moins emblématique est la féroce querelle de priorité pour la paternité du calcul différentiel, qui oppose Newton à Leibniz, préambule à un relatif isolement mathématique dont souffrira la Grande-Bretagne pendant deux bons siècles ; plus tragiquement, on assiste aussi en France à la reprise des persécutions religieuses, qui finiront par chasser Huygens de ce pays.

Voici un célèbre extrait d'une lettre écrite par Newton à Leibniz, au temps où ils n'étaient pas encore si fâchés : *6accdae13eff7i3l9n4o4qrr4s8t12ux*. C'est ainsi que Newton, grand amateur de mystères, avait encodé la phrase latine, à peine moins mystérieuse : « *Data aequatione quotcunque fluentes quantitates involvente, fluxiones invenire; et vice versa.* », que le mathématicien Vladimir Arnold a traduite librement par « *Il est utile de résoudre des équations différentielles.* » Aujourd'hui,



© Catherine Bréchinac - Académie des sciences



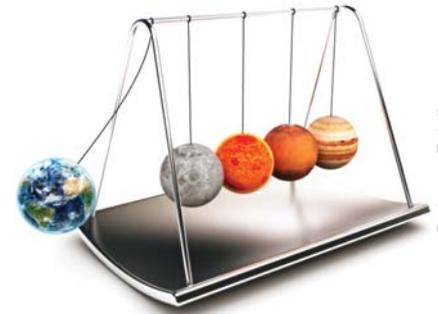
© H.S. Photos - Alamy

*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica (1687) fera d'Isaac Newton (1643-1727) l'un des hommes les plus influents de tous les temps.*

ces cachotteries peuvent paraître puérides, mais l'invention du calcul différentiel était une révolution sans précédent, en ce qu'elle permettait de mettre en équation toutes sortes de problèmes physiques fondés sur des tendances et variations. Albert Einstein lui-même n'a-t-il pas déclaré que c'était le pas le plus important jamais accompli en physique ?

### Calcul différentiel : promesses tenues

Un célèbre exemple est celui de la stabilité du système solaire : connaissant les équations du mouvement des astres, peut-on prévoir que le système solaire restera tel que nous le connaissons ou, au contraire, sera-t-il ravagé par un cataclysme majeur comme la collision de deux planètes ? Grâce aux équations différentielles et à la loi de Newton – la somme des forces gravitationnelles équivaut à la masse fois l'accélération –, le problème peut maintenant se formuler en mathématique. À partir de là, tout ira très vite. Il s'est écoulé 90 générations depuis que Thalès et ses disciples ont rêvé de mathématiser les mouvements des planètes ; mais après la découverte des équations différentielles, il suffira de moins de 12 générations pour que l'on puisse envoyer un être humain sur la Lune, et encore 2 de plus pour qu'une machine puisse se poser sur une comète et nous transmettre une moisson d'informations. Le chemin, cependant, a été semé d'obstacles et de rebondissements, et a impliqué les efforts parallèles de scientifiques toujours plus nombreux.



© storm - Fotolia

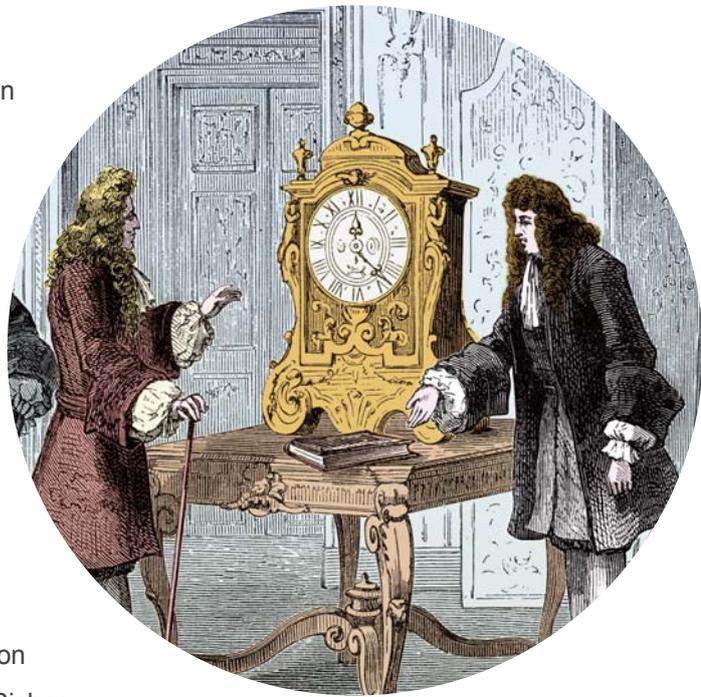
Prenons l'une de ces innombrables histoires initiées par nos héros du 17<sup>e</sup> siècle. Elle commence avec un objet familier, le pendule – une masse au bout d'un fil. Le pendule a toujours été là, sous une forme ou une autre, mais il faut croire que c'est seulement vers 1600 que l'on commence à l'observer vraiment, avec Galilée. L'illustre savant italien note avec raison que la période d'oscillation ne dépend pas de la masse, mais varie en fonction de l'amplitude du mouvement. Quand on voulut utiliser la régularité des battements du pendule pour construire des horloges, cette variation en limitait la précision. Huygens se pose alors une question purement mathématique : peut-on contraindre le mouvement d'un pendule, par une courbe bien choisie, pour rendre sa période d'oscillation indépendante de son énergie ? La solution n'est autre que la



© The Art Archive - Alamy

Galilée (1564-1632) observant une lampe suspendue au plafond de la cathédrale de Pise (fresque de Luigi Sabatelli, vers 1840).

célèbre cycloïde, ou courbe décrite par un point marqué sur une roue qui roule. De fait, si un pendule est contraint par deux « joues » de forme cycloïdale, alors la masse décrit une trajectoire elle-même cycloïdale et, ce qui est remarquable, la période des oscillations sera alors rigoureusement invariante. C'est ainsi qu'Huygens put fabriquer les premières horloges mécaniques de précision, avec une erreur inférieure à 1 seconde par heure.



© Photo Researchers, Inc - Alamy

Christiaan Huygens (1629-1695) présentant son horloge à Louis XIV

Le pendule était loin cependant d'avoir dit son dernier mot. En 1673, l'astronome Jean Richer, recruté comme « élève académicien » dès 1666, découvre que son pendule bat un brin plus lentement à Cayenne qu'à Paris. Huygens et Newton déduisent de cette observation anodine que la Terre, soumise à la force centrifuge, est légèrement aplatie aux pôles, une théorie controversée pendant un demi-siècle, jusqu'à

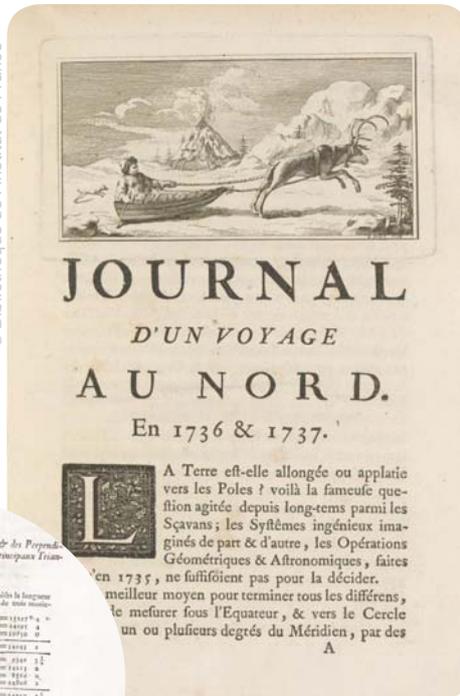
la célèbre campagne de mesures en Laponie que l'Académie des sciences confia à Maupertuis.

© Archives de l'Académie

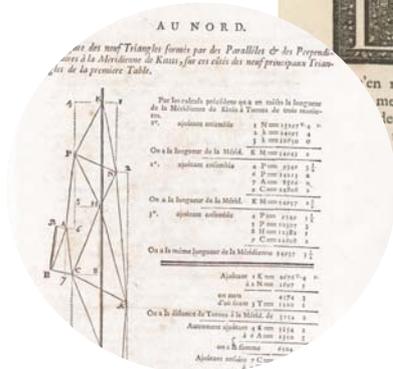


Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759) et la campagne de Laponie

© Bibliothèque de l'Institut de France



Journal de l'expédition, par l'abbé Outhier et Maupertuis, Paris, 1744



On trouve ainsi, à travers ce pendule, les germes de deux grandes épopées scientifiques. L'une est la technologie des horloges de précision, dont l'épisode le plus haut en couleurs fut le chronomètre de 1765 de Harrison, une petite merveille qui ne défailait pas de plus d'une seconde par mois et permettait, par calcul du décalage horaire, le repérage précis en mer. L'autre est la découverte de la forme précise

de la Terre, dont le chapitre le plus dramatique fut l'effort héroïque réalisé par Delambre et Méchain, au lendemain de la Révolution française, pour mesurer la Terre et offrir ainsi au monde une unité vraiment universelle, le mètre.

De telles aventures, avec leur lot d'observations surprenantes, de rebondissements et de révolutions conceptuelles, se multipliaient dans les décennies et les siècles suivants. L'un après l'autre, les problèmes tombèrent dans l'escarcelle de ce qui peut se poser en mathématique. Au 18<sup>e</sup> siècle, Euler, Bernoulli et d'Alembert se lancent à la conquête des insaisissables fluides ; il faudra presque un siècle avant que s'imposent les équations de Navier et Stokes. Avec Condorcet, ce sont les votes et systèmes de décision, avec Laplace les fluctuations statistiques des événements aléatoires, avec Monge la résolution de problèmes opérationnels tels que le déplacement et réarrangement de matière au moindre coût, avec Sophie Germain ce sont les oscillations des membranes, avec Fourier la propagation de la chaleur. Comme le dit le slogan de Fourier : « *Et ignem regunt numeri* » – même le feu est régi par des nombres, par des équations.

### Refondations et révolutions mathématiques

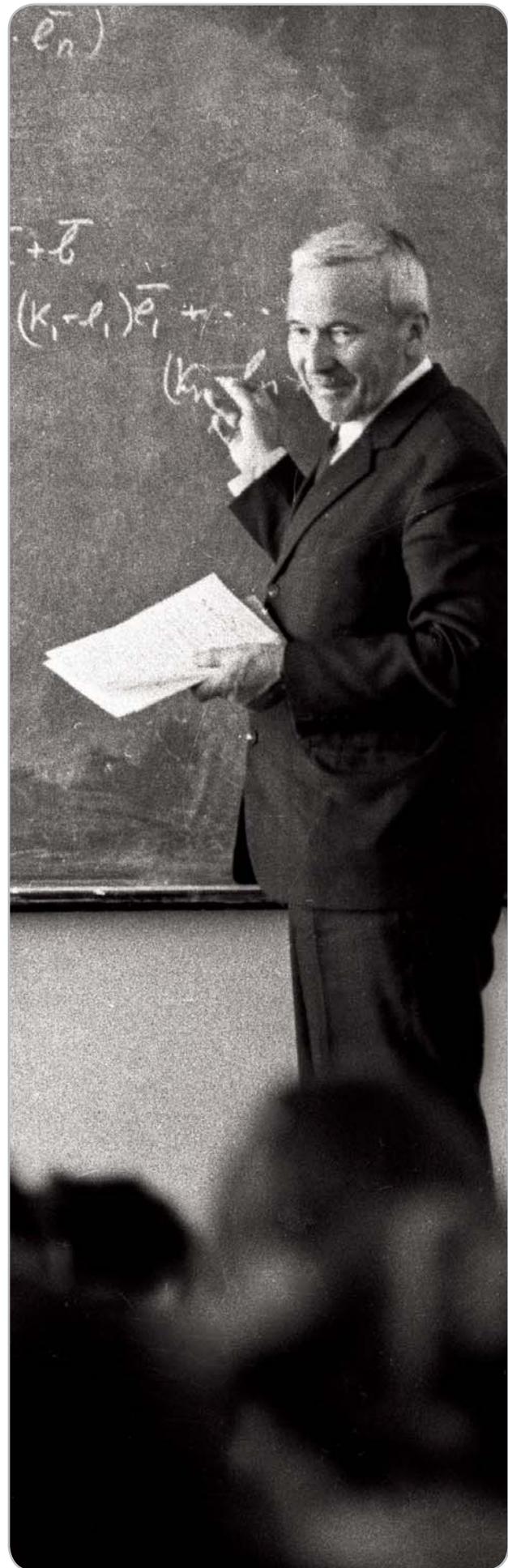
Pour gagner en efficacité, la discipline doit aussi perfectionner sa structure propre et ses outils : tout au long du 19<sup>e</sup> siècle se succèdent les refondations conceptuelles dues à Gauss, Legendre, Cauchy, Jacobi, Abel, Galois, Dirichlet, Riemann, Weierstrass, Cantor, Poincaré, pour ne citer que quelques-uns. On redéfinit l'analyse, l'algèbre, le concept même de nombre ; on fonde la géométrie non euclidienne, la topologie, la notion d'ensemble. La théorie des fonctions complexes permet de systématiser la recherche de solutions, et en même temps on utilise l'algèbre pour démontrer que certains problèmes ne sont pas résolubles. Avec sa théorie des systèmes dynamiques, Henri Poincaré introduit un vaste programme d'étude qualitative des solutions des équations différentielles qui éclaire d'un jour nouveau la mécanique de Newton.



Henri Poincaré (1854-1912)

Le début du 20<sup>e</sup> siècle connut aussi son cortège de révolutions. La théorie de la mesure et celle des probabilités furent refondées par Borel, Baire, Lebesgue et Kolmogorov. La physique statistique, la mécanique quantique et même la finance reçurent toutes leur traitement mathématique personnalisé. Mais le plus étonnant de ces ouragans scientifiques se leva dans la logique, interrogeant les fondements même de la discipline – qu'est-ce qu'un raisonnement ? Qu'est-ce qu'une preuve ? Quels sont les problèmes qui ont une solution et ceux qui n'en ont pas ? Et qu'est-ce que cela veut dire,  $1+1=2$  ? Source des *Principia Mathematica* de Russell et Whitehead dont un volume de près de 400 pages se conclut effectivement par la preuve de  $1+1=2$  ! et de travaux de Hilbert, Church, Gödel et d'autres, ces abîmes de perplexité aideront finalement Von Neumann, Turing et Shannon à imaginer les ordinateurs, machines logiques capables de réaliser n'importe quelle opération mathématique. Il est notable que l'une des premières motivations de ces pionniers de l'informatique était l'étude systématique des équations différentielles, un sujet décidément universel.

Il est impossible ici de rendre justice au développement mathématique du 20<sup>e</sup> siècle, qui fut peut-être le plus riche de tous. Aux côtés des nouveaux exploits conceptuels des Bourbaki, Weil, Noether, Banach, Wiener, Riesz, Atiyah, Cartan, Hardy, Ramanujan, Littlewood, Chern, Grothendieck, Cohen, Leray, Hironaka, Itô, Serre, Gel'fand, Schwartz, Hörmander, Carleson, Nash, De Giorgi, Solovay, Malliavin, Gromov, Langlands, Thurston, Varadhan, Wiles, Perelman et tant d'autres, on vit des centaines



Andrei Kolmogorov (1903-1987)

de nouveaux sujets se former. Pour n'en évoquer qu'un, particulièrement cher à mon cœur, c'est en 1933 que Torsten Carleman effectue la première étude mathématique de l'équation de Boltzmann, qui décrit et prédit l'évolution statistique d'un gaz soumis à d'incessantes collisions ; aujourd'hui, la littérature mathématique sur le sujet couvre des dizaines de milliers de pages.

Et les mathématiciens se comptent maintenant en centaines de milliers, fonctionnant en systèmes de recherche hautement organisés, publiant plus que jamais, et sans doute trop, dans des centaines de revues spécialisées, le plus souvent en collaboration ; ils se retrouvent à travers le monde dans un incessant ballet de colloques et courriels. Le rôle des mathématiciens dans l'industrie est reconnu ; ils se sont fait encenser et vilipender, et à l'occasion traiter de criminels. Si le temps de l'artisanat de Newton et ses collègues est bien loin, leurs questions sont toujours parmi nous, de même que le désir irrésistible de comprendre et prédire les phénomènes, parfois couronné de succès, parfois tenu en échec.

Ainsi, à la question posée par Newton « *Le système solaire est-il stable ?* », après trois cent cinquante ans de travaux – et l'introduction de l'algèbre linéaire, des systèmes dynamiques, du calcul des probabilités, de la théorie du chaos, des systèmes hamiltoniens perturbés, des schémas symplectiques, et les contributions de monstres sacrés comme Laplace, Lagrange, Poincaré et Kolmogorov –, à cette question nous pouvons finalement répondre avec assurance « peut-être » !

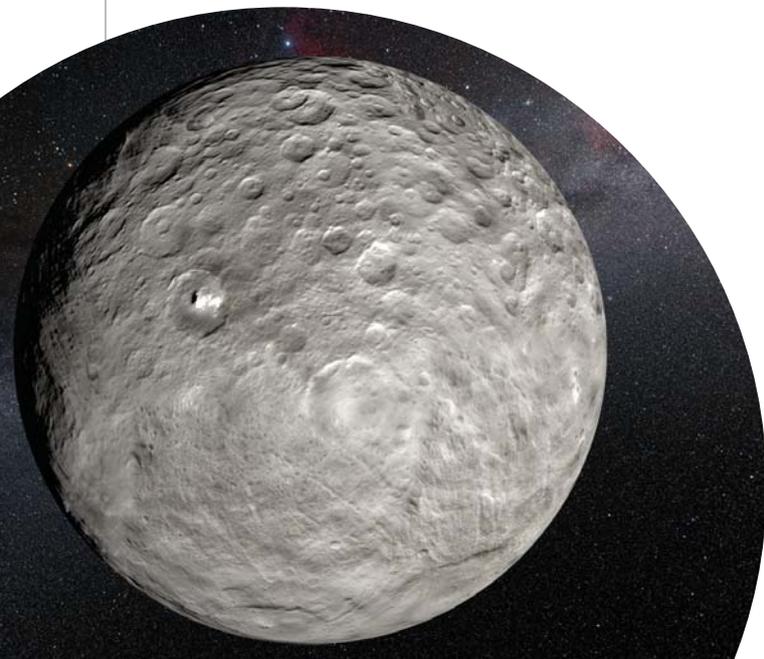
Un « peut-être » qui n'est pas honteux, car il est quantifiable en probabilité, et car on sait que l'on ne peut faire mieux : le sort de l'univers à long terme est régi par un calcul de probabilités, à moins d'avoir accès à une précision infinie inatteignable. Finalement, on a retrouvé dans le problème de Newton ces deux monstres conceptuels que sont le hasard et l'infini. Les thèmes de la prédiction et de l'imprédictibilité s'entrecroisent dans cette longue histoire comme dans un grand



© Photo Researchers, Inc - Alamy

Carl Friedrich Gauss (1777-1855)

roman, avec son lot de rebonds ironiques. Ainsi, quand Gauss parvient à retrouver l'orbite perdue de l'astéroïde Ceres, puis à maîtriser celle de sa petite sœur Vesta, le monde semble si prédictible ; mais quelque deux siècles plus tard, notre confrère Jacques Laskar démontrera l'effet déstabilisant qu'ont Ceres



© ESO

Vue d'artiste de Ceres

© niruftt - Fotolia



et Vesta sur l'ensemble du système solaire, interdisant toute prédiction au-delà de 60 millions d'années. Quant à la mesure du temps, le programme initié par Huygens a tant progressé, au gré des opportunités scientifiques, que les meilleures horloges modernes ne varieraient pas d'une seconde en un milliard d'années.

Mais surtout, les battements du cœur, le temps qu'il fera dans une semaine, les influx électriques au sein de nos neurones, la croissance d'une tumeur ou d'une rumeur, tout cela et bien plus a été mis en équations pour être compris et prédit. Ainsi, la mathématique est fière de

participer, en bonne entente avec bien d'autres sciences,

à certaines des grandes aventures technologiques de notre temps, à travers des algorithmes qui alimentent le cœur artificiel développé par notre confrère

Alain Carpentier, qui coordonnent les sources d'électricité

dans les grilles intelligentes ou, encore, qui

analysent les mesures des détecteurs d'ondes

gravitationnelles. Ce grand brassage de

disciplines, plus actif que jamais, est

à l'image de celui que l'on retrouve

dans notre Académie, et plus

généralement dans notre

monde.

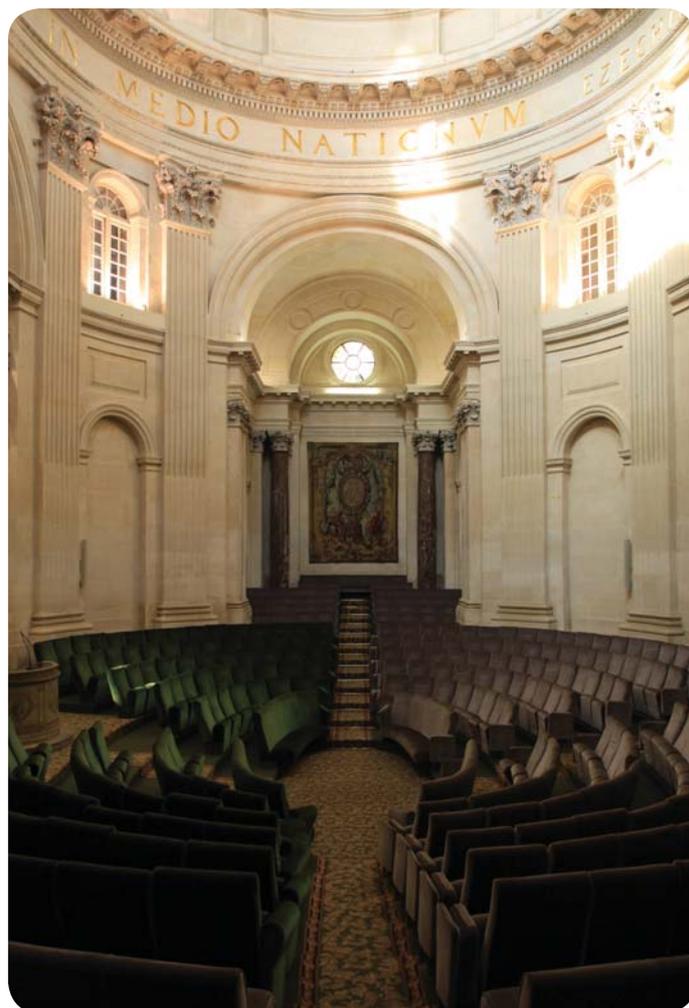


## L'Académie des sciences, une institution tournée vers l'avenir

À l'origine sous la protection du roi, l'Académie des sciences est aujourd'hui une personne morale de droit public placée sous la protection du président de la République. Elle exerce de nos jours, en toute indépendance, son rôle de conseil auprès des décideurs. Forte de 259 académiciens, 138 associés étrangers, 88 membres correspondants<sup>1</sup> – tous élus parmi les meilleurs scientifiques de leur temps, issus des différentes disciplines scientifiques,

### Cinq missions fondamentales

- Encourager la vie scientifique : colloques et séances, remise de prix et médailles, publication *Comptes Rendus*.
- Promouvoir l'enseignement des sciences : éducation scientifique à l'école, comité sur l'enseignement des sciences, activités pédagogiques dans ses musées.
- Transmettre les connaissances : séances publiques, site web, *Lettre* semestrielle, jumelages avec les parlementaires, 350 ans d'archives.
- Développer les collaborations internationales : réseaux interacadémiques, coopérations bilatérales, actions en faveur de pays en émergence.
- Assurer un rôle d'expertise et de conseil : comités thématiques, rapports, avis et recommandations.



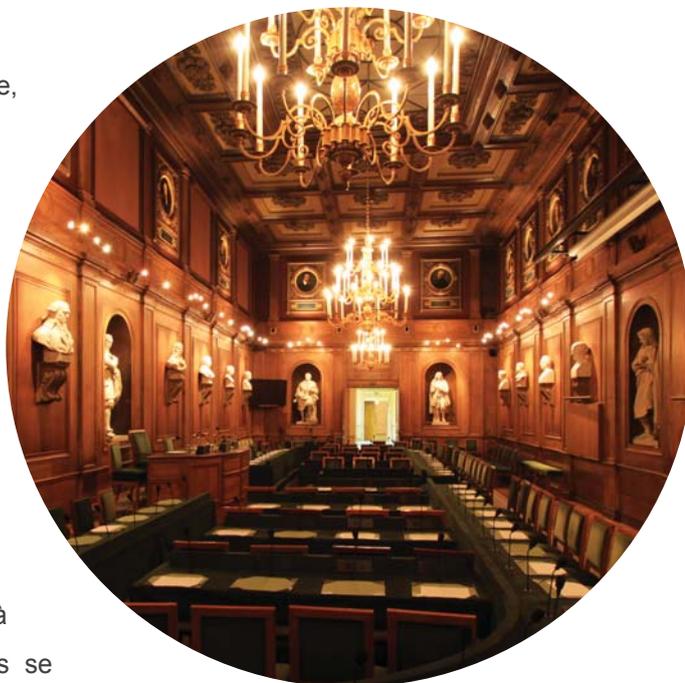
© Institut de France

y compris les plus émergentes –, l'Académie publie des rapports, émet des avis ou des recommandations qui constituent autant d'aides à la décision. Les académiciens sont élus par leurs pairs au sein de sections disciplinaires, mais ils effectuent leurs travaux au travers de comités thématiques pluridisciplinaires qui forment la pierre angulaire de l'activité d'expertise de l'Académie.

Comme le prévoient les statuts de l'Académie, la moitié des nouveaux élus ont moins de 55 ans. C'est là un formidable atout. Ainsi, l'Académie demeure une institution tournée vers l'avenir, ce qui lui permet de répondre toujours mieux aux questions que se pose la société face aux développements de la science et à ses applications.

Depuis la création de la première académie des sciences — l'*Accademia Dei Lincei* — à Rome, en 1603, les académies nationales se sont multipliées en Europe, puis dans le monde entier.

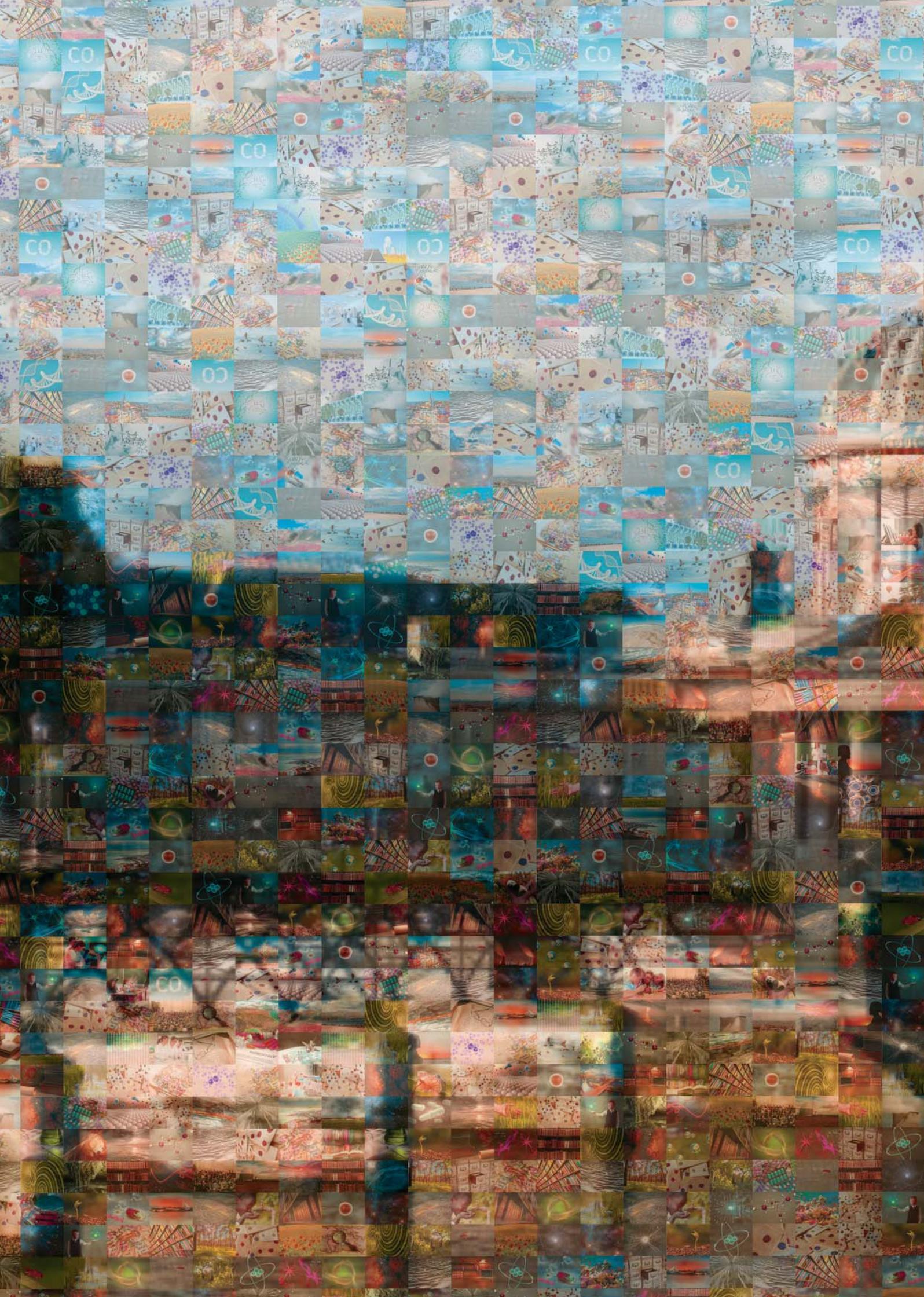
Outre leur rôle national, les académies, rassemblées en réseaux interacadémiques, expriment leurs avis sur les questions à l'échelle planétaire. Par sa notoriété et son expertise construite depuis 350 ans, l'Académie des sciences de France reste aujourd'hui un acteur incontournable de la diplomatie scientifique internationale.

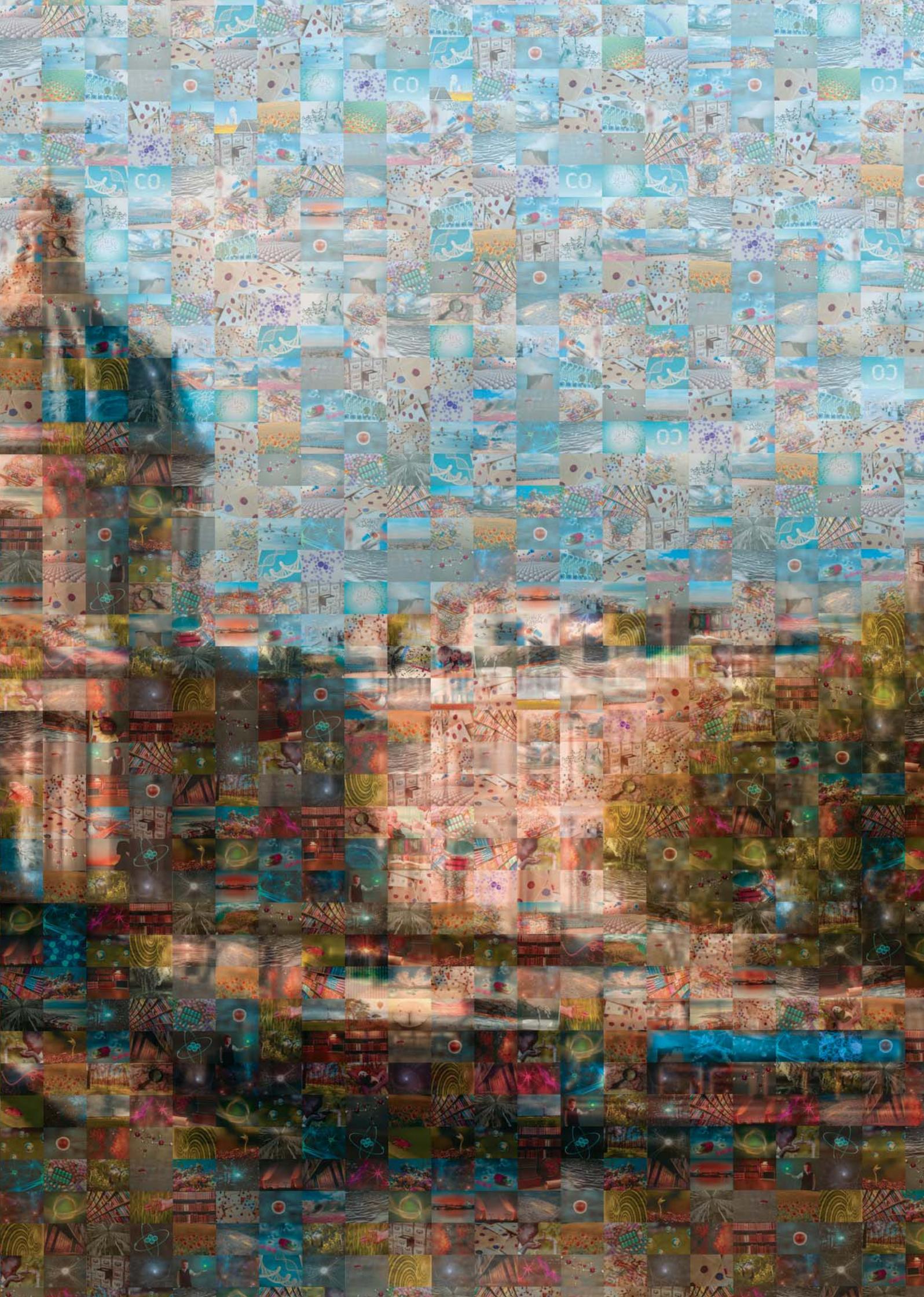


© Institut de France



© Richard - Fotolia







INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences

### **Directrice de la publication**

Catherine Bréchnac

### **Directoire**

Catherine Bréchnac  
Pascale Cossart  
Alain-Jacques Valleron

### **Comité éditorial**

Alain Aspect  
Gérard Berry  
Catherine Bréchnac  
Jean-Pierre Changeux  
Pascale Cossart  
Alain Fischer  
Anne-Marie Lagrange  
Yvon Le Maho  
Jacques Livage  
Bernard Meunier  
Cédric Villani

### **Rédactrice en chef**

Emmanuelle Chollet

### **Direction artistique**

Natacha Oliveira

### **Traduction**

Nicolas Rigaud

### **Impression**

Boudard Imprimeur

**ISSN 2102-5398**

### **Académie des sciences**

23 quai de Conti - 75006 Paris  
Tél.: 01 44 41 44 60  
[www.academie-sciences.fr](http://www.academie-sciences.fr)