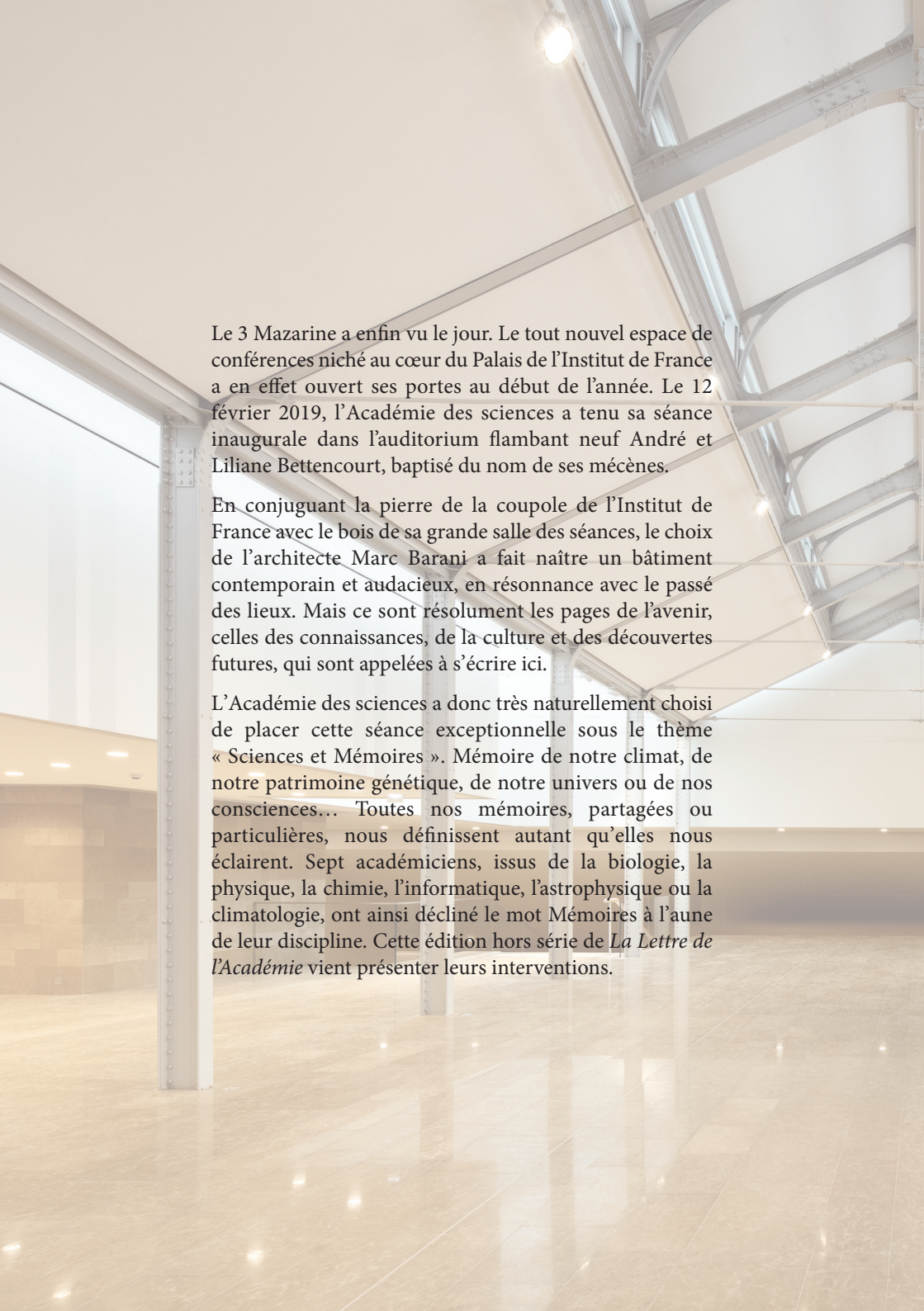
La Lettre

de l'Académie des sciences

Octobre 2019 | **Hors série 1**

Conférences inaugurales de l'auditorium André et Liliane Bettencourt 12 février 2019



Le 3 Mazarine a enfin vu le jour. Le tout nouvel espace de conférences niché au cœur du Palais de l'Institut de France a en effet ouvert ses portes au début de l'année. Le 12 février 2019, l'Académie des sciences a tenu sa séance inaugurale dans l'auditorium flambant neuf André et Liliane Bettencourt, baptisé du nom de ses mécènes.

En conjuguant la pierre de la coupole de l'Institut de France avec le bois de sa grande salle des séances, le choix de l'architecte Marc Barani a fait naître un bâtiment contemporain et audacieux, en résonnance avec le passé des lieux. Mais ce sont résolument les pages de l'avenir, celles des connaissances, de la culture et des découvertes futures, qui sont appelées à s'écrire ici.

L'Académie des sciences a donc très naturellement choisi de placer cette séance exceptionnelle sous le thème « Sciences et Mémoires ». Mémoire de notre climat, de notre patrimoine génétique, de notre univers ou de nos consciences… Toutes nos mémoires, partagées ou particulières, nous définissent autant qu'elles nous éclairent. Sept académiciens, issus de la biologie, la physique, la chimie, l'informatique, l'astrophysique ou la climatologie, ont ainsi décliné le mot Mémoires à l'aune de leur discipline. Cette édition hors série de *La Lettre de l'Académie* vient présenter leurs interventions.

Allocution du président de l'Académie des sciences
Pierre Corvol
p. 4

Les mémoires de l'informatique
Gérard Berry
p. 8

Viellissement et mémoire dans la matière désordonnée
Jean-Philippe Bouchaud
p. 12

Décrypter l'histoire de l'univers
Catherine Cesarsky
p. 16

Le cerveau humain, matière à mémoires
Stanislas Dehaene
p. 20

Les mémoires du génome
Denis Duboule
p. 26

Mémoire du climat
Jean Jouzel
p. 30

Vers une chimie douce bio-inspirée - Le tableau périodique des éléments chimiques
Jacques Livage
p. 34

Allocution du président de l'Académie des sciences

Pierre Corvol

Président de l'Académie des sciences, professeur émérite et administrateur honoraire du Collège de France.

Le 11 février 2019, le chancelier de l'Institut de France inaugurait officiellement l'auditorium André et Liliane Bettencourt. Il rappelait en quelques mots qu'il est bâti en partie sur l'ancien jardin potager et le verger du directeur du Collège des Quatre-Nations, Collège qu'occupe l'Institut depuis son déménagement du Louvre en 1805. La parcelle de terrain en question fut octroyée à titre provisoire en l'an IV de la République à la Monnaie de Paris pour y installer de nouveaux ateliers. Le provisoire a duré 220 ans… la parcelle de l'an IV a été restituée à l'Institut en 2015 grâce à l'opiniâtreté du chancelier Gabriel de Broglie.

Le manque de place à l'Institut s'est fait très vite sentir. Depuis longtemps, l'Institut souhaitait disposer d'un lieu suffisamment spacieux, équipé de façon moderne, qui puisse accueillir les colloques, les conférences-débats, les travaux des académies, des évènements culturels, bref un espace qui facilite des échanges entre académies ou sociétés savantes, nationales et internationales.

Ce souhait s'est concrétisé grâce au mécénat généreux apporté par la famille Bettencourt. L'auditorium porte le nom d'André et de Liliane Bettencourt, André Bettencourt a lui-même été membre de

l'Académie des Beaux-Arts. D'autres mécènes ont contribué à la restauration des bâtiments voisins de la deuxième et de la troisième cour du palais.
La construction de l'auditorium a été précédée d'une campagne de fouilles archéologiques préventives qui a montré ce qui était attendu mais pas plus : le mur d'enceinte de Paris de Philippe Auguste et les vestiges d'une tour de guet. Ceci a permis à l'architecte, Marc Barani, de réaliser en trois ans l'auditorium et ses dépendances, un véritable tour de force.

L'auditorium emprunte à la coupole du XVII^{e} siècle ses pierres blanches ; son mobilier rappelle aussi le bois de la grande salle des séances du XIX^{e} siècle. Le système de projection est ultra-moderne et une disposition des sièges des premiers rangs en demi-arc de cercle facilite les échanges et les dialogues. L'auditorium est doté de 350 places et permettra d'accueillir, outre les 270 académiciens de notre compagnie, un public de plus en plus nombreux lors des séances de l'Académie des sciences. Il pourra aussi servir de lieu de rencontre entre académies et organismes de recherche.

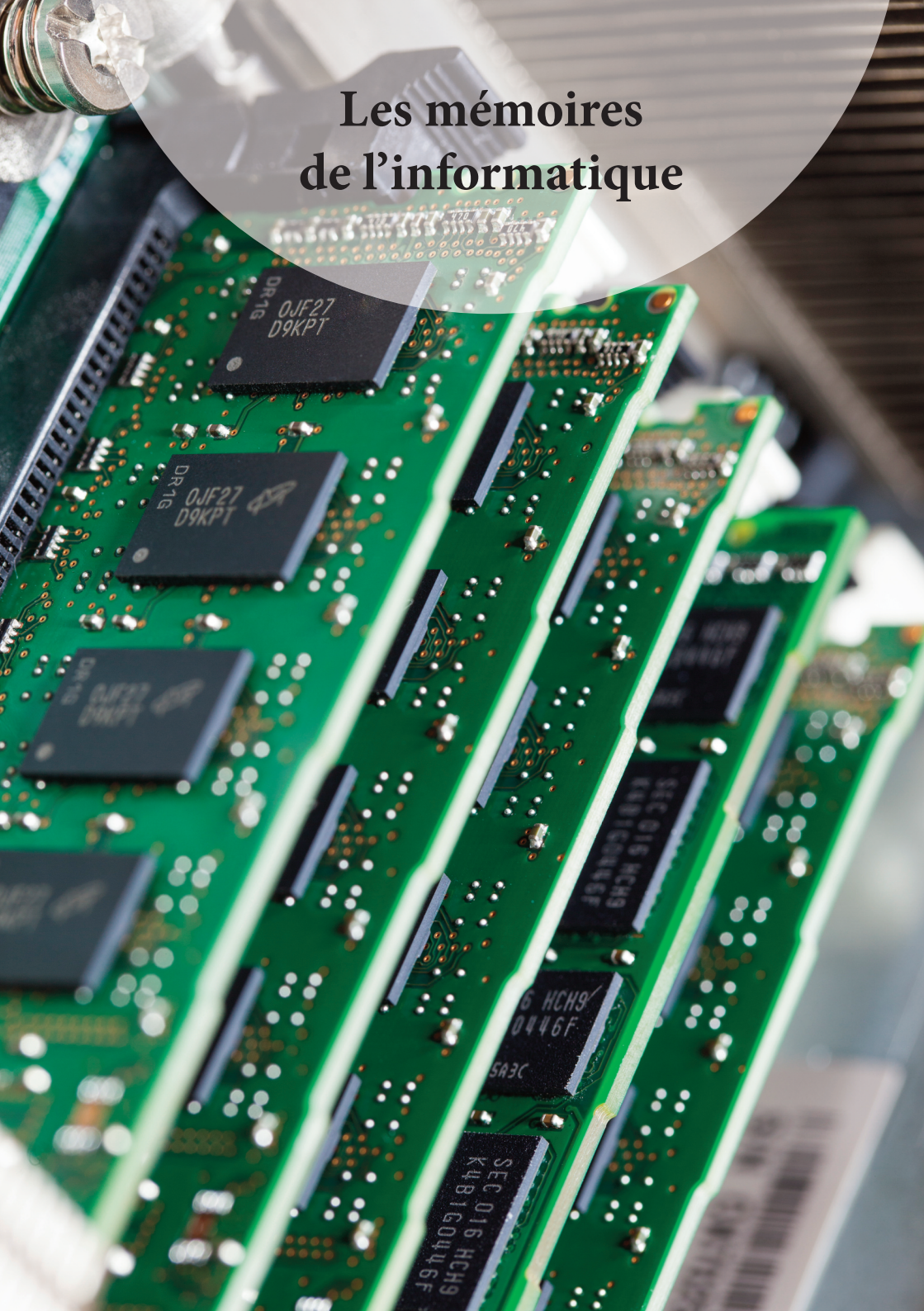
L'origine étymologique du mot inauguration rappelle que l'on prenait dans l'antiquité les augures en commençant un acte quelconque. Souhaitons que les prévisions des augures soient fastes à la réalisation du projet. Aujourd'hui, ne croyant plus aux vols des oiseaux pour

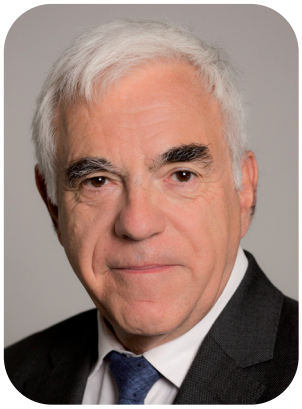
prédire l'avenir, c'est à nous, académiciens, qu'impartit la responsabilité de faire de cet auditorium un outil de travail au service de la culture, de la science et de la société. C'est à nous qu'il appartient de faire vivre ce lieu, de lui donner sa personnalité, de lui construire son histoire propre. En un mot, il nous revient de nous l'approprier.

Un amphithéâtre, un auditorium sont des lieux de mémoire. Je pense à la coupole de l'Institut, aux éloges des académiciens disparus qui y ont été prononcés mais aussi à d'autres moments forts comme l'installation au siège d'académicien des toutes premières femmes à l'Académie française ou à l'Académie des sciences ; je pense aux grandes premières scientifiques qui ont été révélées dans la grande salle des séances ; je pense au grand amphithéâtre de la Sorbonne, à ses peintures de Puvis de Chavanne, le « bois sacré » de la connaissance, et en même temps au lieu de vifs débats socio-politiques qu'il fut il y a quelque temps. A nous de construire, pas à pas, l'histoire de l'auditorium André et Liliane Bettencourt.

Le comité et le bureau de l'académie ont choisi comme premier thème « Science et mémoires », mémoires au pluriel, un thème transversal qui intéresse tous les domaines scientifiques couverts par nos sections. C'est en quelque sorte notre première contribution à l'édification de l'histoire et de la mémoire de cet auditorium.

Les mémoires de l'informatique





Gérard Berry

Membre de l'Académie des sciences, section Sciences mécaniques et informatiques, professeur au Collège de France, chaire Algorithmes, machines et languages

La mémoire joue un rôle essentiel en informatique. Permettant de sauvegarder l'information pérenne ou temporaire, elle est d'abord l'un des trois composants fondamentaux des ordinateurs, avec les unités de calcul et les entrées-sorties. Grâce aux physiciens, sa technologie a évolué très vite depuis les années 1950, des tubes à vide aux matrices de tores de ferrite câblées à la main puis aux transistors séparés pour terminer avec les circuits intégrés et disques magnétiques actuels. Ces derniers pourraient eux-mêmes bientôt disparaître au profit des circuits intégrés modernes. La taille des mémoires est ainsi passée des kilo-octets (milliers) à des téra-octets (milliers de milliards) en moins de 40 ans. Les vitesses d'écriture et de lecture croissent hélas bien moins vite que la taille, ce qui demande des prodiges d'optimisation logique pour bien architecturer les circuits de calcul, avec hélas des impacts négatifs découverts récemment en termes de sécurité informatique.

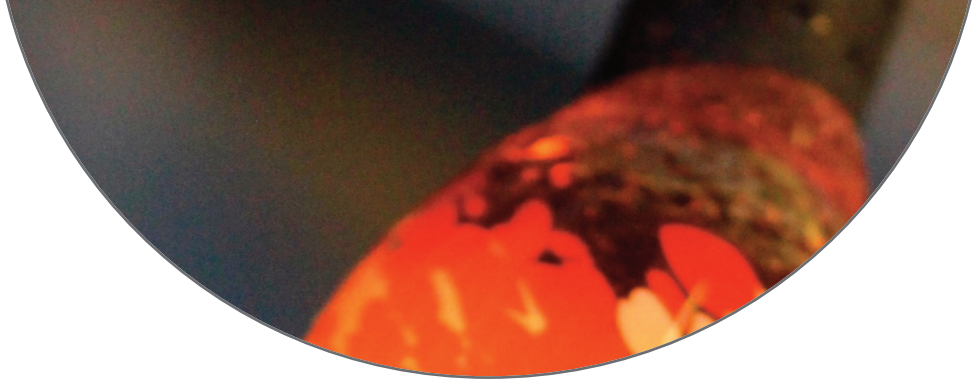
Une caractéristique fondamentale de la mémoire informatique est son universalité : textes, sons, vidéos, mesures scientifiques, tout se stocke de la même façon sur des supports indifférents, ou plutôt ne différant que par leur performance et leur prix. Cette indifférence des données (et du calcul) au support physique est une des caractéristiques les plus spécifiques et les plus importantes de l'informatique.

Mais que contiennent les mémoires informatiques ? Des données produites indifféremment par les hommes et les machines, qu'elles soient physiques ou elles-mêmes informatiques. Une des fonctions les plus importantes des ordinateurs, certainement pas envisagée lors de leur naissance, est de servir de mémoire du monde à l'aide du grand réseau Internet décentralisé qui les relie, avec de plus une indexation ultra-rapide grâce à l'extraordinaire invention du moteur de recherche. Accessible n'importe quand de n'importe où, cette mémoire totale modifie en profondeur la vie de tous les jours, les sciences, la musique, la photo, le cinéma, le commerce, etc. Wikipédia devient l'encyclopédie multilingue universelle. Un site comme *Internet Archive* stocke l'historique de millions de livres et de textes et de centaines de milliards de pages Web volontaires, déjà plus que la

bibliothèque du Congrès aux États-Unis. Pour garder la mémoire de cette grande création humaine qu'est le logiciel, le site Inria / Unesco stocke 5 milliards de fichiers correspondant à 83 millions de projets informatiques, etc. Les exemples abondent, et nous sommes encore loin d'en avoir mesuré toutes les conséquences.

Mais, restant dépendantes des supports physiques, les mémoires informatiques peuvent être fragiles. Les problèmes bien connus des papyrus, du papier, des photos ou des films ne sont pas éradiqués. Cependant l'universalité de l'informatique aide beaucoup sur ce point : contrairement à la matière, il est possible de dupliquer rapidement et exactement l'information autant de fois qu'on veut. Selon son importance, on peut utiliser des supports plus ou moins volatils et faire un nombre variable de copies réparties à travers le monde ; cela demande de bien documenter les techniques pour être capables de retrouver l'information longtemps après. Mais tordons le cou à une légende tenace : il sera à tout jamais impossible de sauvegarder Internet en entier, avec sa centaine d'exa-octets (10^{20}) échangés tous les ans !

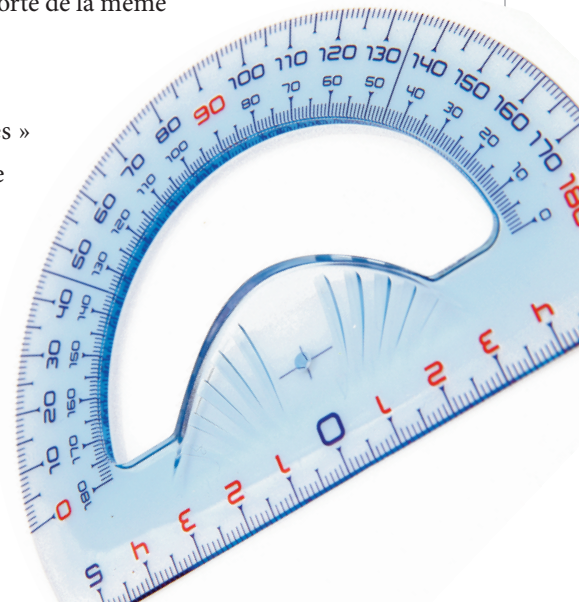
Vieillissement et mémoire dans la matière désordonnée



Jean-Philippe Bouchaud

Membre de l'Académie des sciences, section Physique, président et fondateur de CFM

Les corps qui nous entourent sont souvent à l'équilibre thermodynamique. C'est en tout cas une hypothèse simplificatrice qui est souvent invoquée par le physicien pour décrire les propriétés thermiques, mécaniques, ou électromagnétiques de la matière. Et en effet, le temps que mettent les matériaux à atteindre l'équilibre est en général assez court pour que cette hypothèse soit justifiée. Mais cet état d'équilibre signifie que toute mémoire de l'histoire passée est abolie. Il n'y a plus de passé ni de futur. Ceci permet d'ailleurs que les mesures physiques soient reproductibles : la matière à l'équilibre se comporte de la même manière à midi et à minuit.

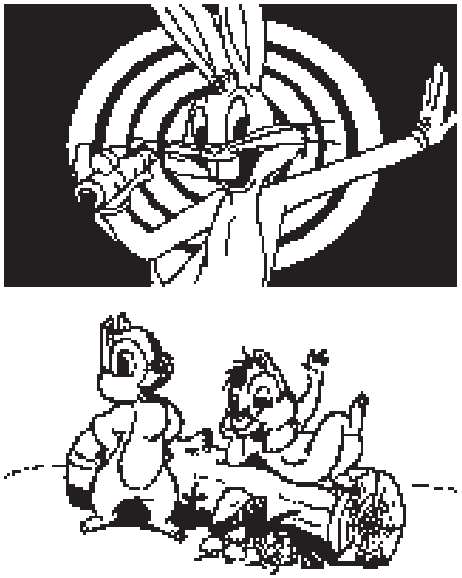


Néanmoins, certains systèmes dits « complexes » n'atteignent jamais l'équilibre (verres, verres de spin, pâtes et colloïdes, etc.). Leur âge, c'est-à-dire le temps écoulé depuis leur fabrication, devient une variable pertinente. On dit que ces systèmes « vieillissent ». Plus leur âge est grand, plus ils répondent lentement aux perturbations extérieures. Une règle d'écolier en plexiglass ne se déforme pas de la même façon un mois ou un an après sa

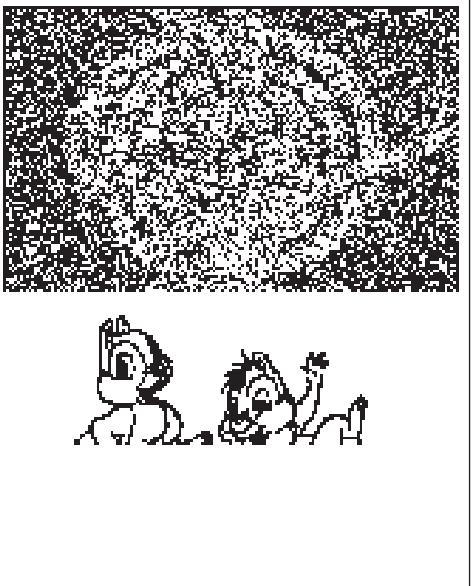
fabrication. Mais si ces systèmes vieillissent c'est donc qu'ils se souviennent, d'une certaine façon, de leur histoire. Ces effets de mémoire se révèlent de manière spectaculaire lors de cycles en température : une petite baisse de température entraîne un « rajeunissement » apparent du système, mais lorsque l'on remonte la température, on retrouve le système exactement dans l'état où on l'avait laissé, sans affecter son âge malgré un temps très long passé à plus basse température. Le système semble donc pouvoir se souvenir de son histoire passée, sans que l'on ne comprenne encore parfaitement où et comment cette mémoire est stockée.

Du point de vue de la théorie, la possibilité de rajeunir le système tout en conservant sa mémoire semble suggérer une organisation hiérarchique des états d'équilibre, prédite par Giorgio Parisi en 1980. La température permettrait de « zoomer » sur des structures spatiales de plus en plus petites au fur et à mesure que l'on refroidit le système. Mais la nature précise de ces structures reste encore inconnue.

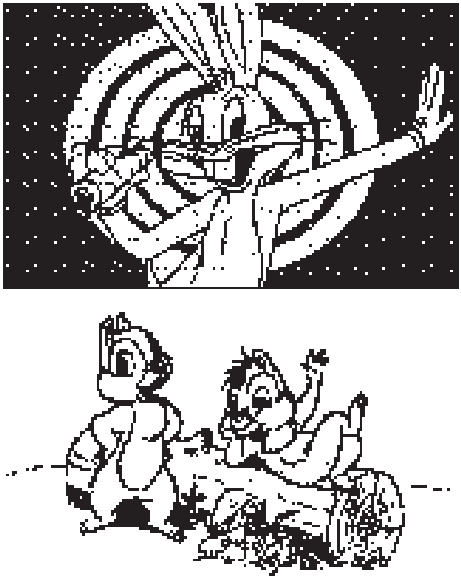
On peut cependant s'inspirer de ces systèmes complexes mais inertes pour proposer des modèles de mémoire neuronale, vivante. L'idée est que le réseau d'interaction des neurones peut être « sculpté » pour reproduire ces fameuses structures dans lesquelles la mémoire est stockée. L'existence de plusieurs états d'équilibre d'un ensemble de neurones en interaction permet de stocker et de retrouver de l'information en « labourant » le paysage énergétique. Ce modèle schématique mais très inspirant d'apprentissage et de mémoire neuronale, initialement proposé par John Hopfield, a conduit à de très nombreux développements, et présente des analogies fortes avec les « codes correcteurs d'erreur », qui permettent de reconstruire des messages corrompus par un bruit de transmission – une autre forme de mémoire.



Original



Dégradé



Reconstruction

Décrypter l'histoire de l'univers

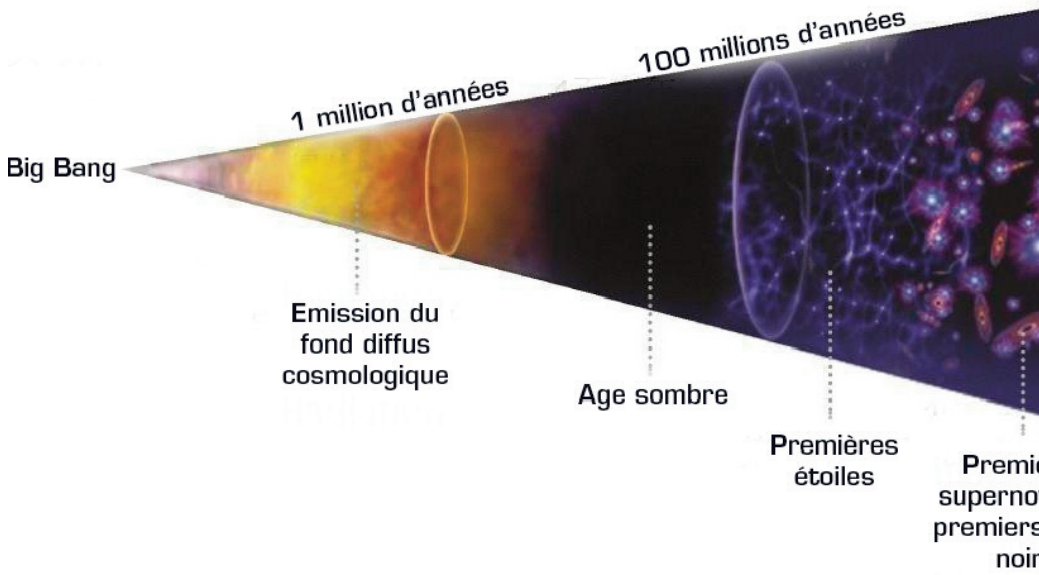
Catherine Cesarsky

Membre de l'Académie des sciences, section Sciences de l'univers, Haut Conseiller scientifique au CEA

L'univers n'est accessible que par l'observation, et la lumière est le principal messager. Aujourd'hui, l'astrophysicien ne se contente pas de capter la lumière visible des astres, la seule à laquelle ses yeux sont sensibles ; il sonde le ciel dans toutes les couleurs de l'invisible, des douces ondes radio aux violents rayons gamma, en passant par les micro-ondes, l'infrarouge, le visible, l'ultraviolet et les rayons X. Chacun de ces rayonnements apporte des indications distinctes, qu'il faut décrypter, sur les phénomènes physiques qui régissent l'univers.

Mais la lumière n'est pas uniquement le messager, elle porte aussi une grande partie de la mémoire de l'univers. Si la vitesse de la lumière était infinie, on verrait l'univers tel qu'il est maintenant. Mais comme la lumière se propage à une vitesse finie, lorsque l'on observe un astre lointain, on le voit comme il était dans le passé. La lumière nous révèle que l'univers a changé au cours du temps.

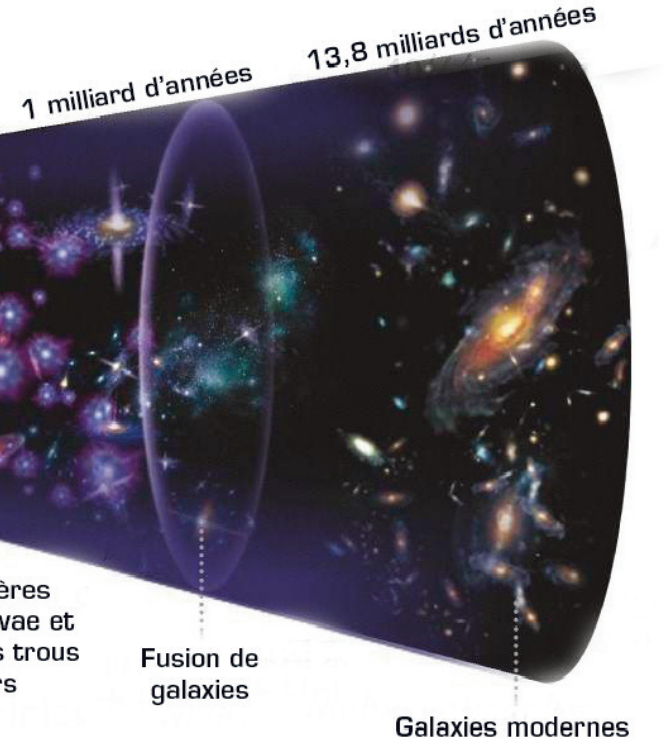
Sur la base d'un ensemble d'observations très diverses mais concordantes, les astrophysiciens considèrent aujourd'hui que l'univers est né dans une grande explosion, le Big Bang, il y a 13,8 milliards d'années. Il était, au départ, extrêmement chaud et dense. Il entra immédiatement en expansion, entraînant une baisse continue des densités énergétiques de lumière et de matière. La matière normale était majoritairement de l'hydrogène. La lumière empêchait que des atomes neutres d'hydrogène, un proton lié à un électron, puissent perdurer. Les électrons se déplaçaient librement, et déviaient fortement les rayons lumineux, les obligeant à décrire des trajectoires désordonnées, chaotiques, de sorte que la lumière était piégée. Mais au bout de 380 000 ans, ce fut la recombinaison : l'énergie des photons de lumière avait tellement diminué comme conséquence de l'expansion qu'ils n'étaient plus capables d'arracher les électrons aux atomes d'hydrogène, et le gaz devint neutre. En l'absence d'électrons libres, les trajectoires des rayons lumineux n'ont plus été perturbées de façon significative, la lumière et la matière ont été découplées. La lumière originelle a continué son expansion, sa répartition a gardé l'empreinte de petits grumeaux initiaux, fruits de fluctuations quantiques, à partir desquels toute la structure de l'univers actuel allait émerger. Aujourd'hui, le rayonnement fossile du Big Bang est toujours là, maintenant dans les microondes, et il a été scruté par le satellite Planck. Ainsi les inhomogénéités originelles, qui sont de l'ordre du millionième, ont été mesurées. En décryptant les données de Planck, on a pu déterminer le contenu en matière et énergie de l'univers. La matière « normale », celle dont nous-mêmes et la Terre sommes faits, est en fait moins de 5% de la matière/énergie totale ; la majeure



partie de la matière est de la « matière noire », de nature inconnue, révélée par les effets de son attraction gravitationnelle. La composante dominante est l'énergie noire, qui se comporte comme une force répulsive, accélérant l'expansion de l'univers.

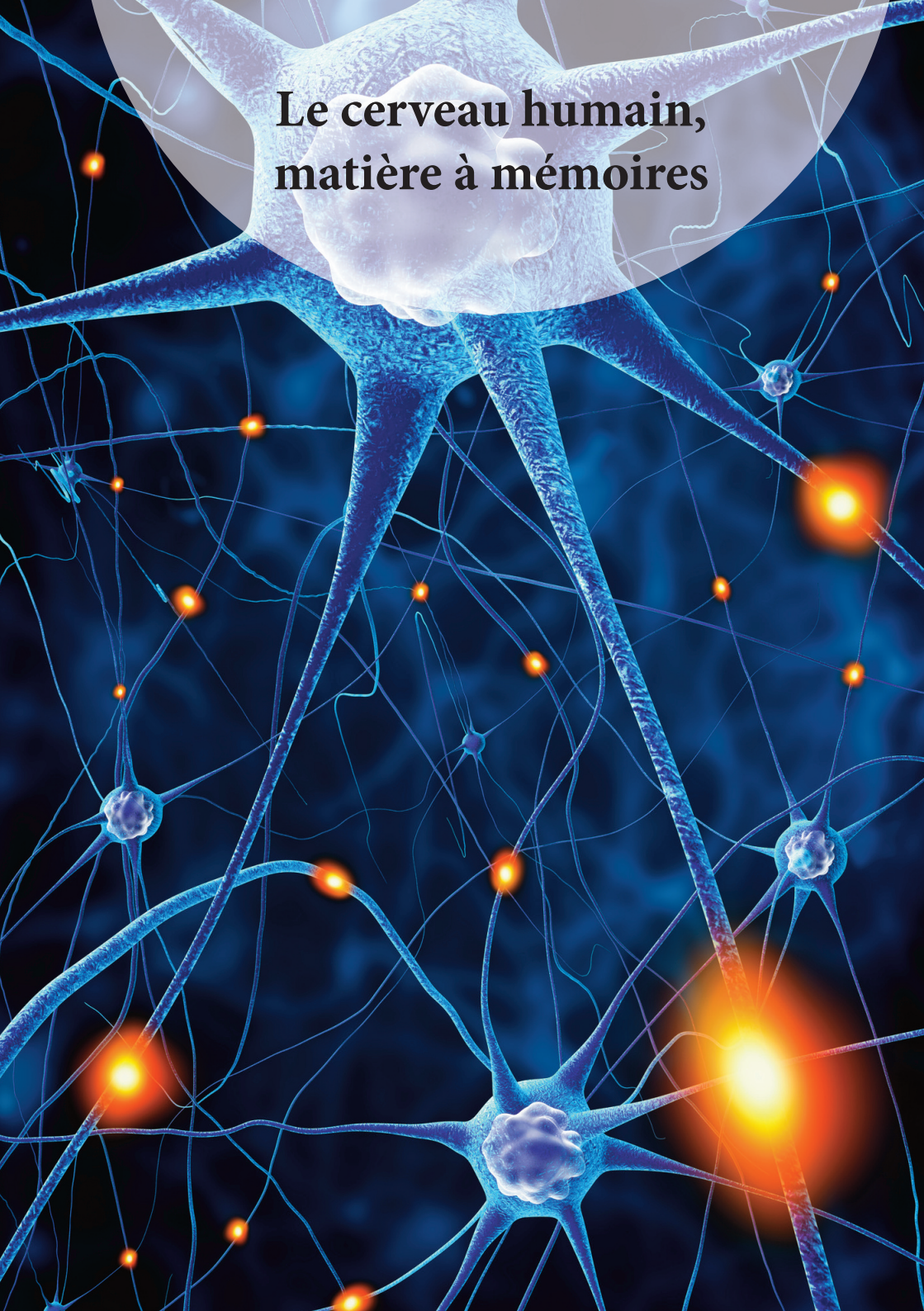
Tandis que l'expansion se poursuivait, la gravité jouait son rôle de grand rassembleur et remodelait les inhomogénéités originelles, densifiant les zones denses, vidant encore plus les zones vides, la matière noire prenant la forme d'un immense macramé à trois dimensions, la matière normale s'assemblant dans les puits de potentiel de la matière noire, déclenchant la formation d'étoiles, celle de galaxies puis celle d'amas de galaxies.

À la recombinaison, il y avait uniquement du gaz neutre. On appelle cette période les âges sombres. Les âges sombres furent suivis quelques centaines de millions d'années plus tard par l'aube cosmique, grâce à la formation des premières étoiles et galaxies. Les atomes d'hydrogène neutre émettent un rayonnement à une longueur d'onde de 21 centimètres. On pourra dans quelques années, à l'aide des radiotélescopes très sensibles du projet SKA, observer l'évolution passée de la structure en fromage emmenthal prise par le gaz d'hydrogène neutre, troué par les nouvelles étoiles et galaxies.



Aujourd'hui, l'énergie portée par la lumière que nous recevons de l'ensemble des galaxies, essentiellement de la lumière visible ou infrarouge, équivaut à peu près à 5% de celle du fond cosmologique qui emplit l'univers. Cette lumière porte la mémoire de l'histoire de la matière cosmique depuis l'aube cosmique jusqu'à nos jours.

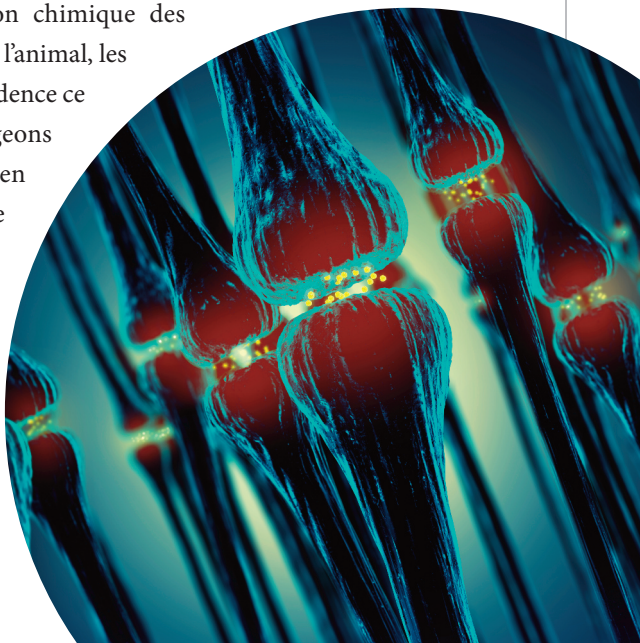
Le cerveau humain, matière à mémoires



Stanislas Dehaene

Membre de l'Académie des sciences, section Biologie humaine et sciences médicales, professeur au Collège de France, directeur du centre *NeuroSpin*

Comment notre cerveau enregistre-t-il les informations ? Dans nos circuits neuronaux, la mémoire est sans doute la chose au monde la mieux partagée : il n'est guère de circuit de notre cortex qui ne soit susceptible de se modifier en fonction de l'expérience. Le terme de plasticité cérébrale doit être pris au sens le plus littéral : les cellules nerveuses sont mobiles, et leurs arborisations se modifient en permanence, surtout au niveau des synapses, ces points de contact qui assurent la transmission chimique des informations d'un neurone à l'autre. Chez l'animal, les avancées de la microscopie ont mis en évidence ce phénomène remarquable : les bourgeons synaptiques gigotent sans cesse, et en quelques minutes, une synapse peut se défaire ou, au contraire, se renforcer, voire se dupliquer. On estime à quelques millions le nombre de synapses qui se font et se défont chaque seconde dans le cortex d'un enfant !



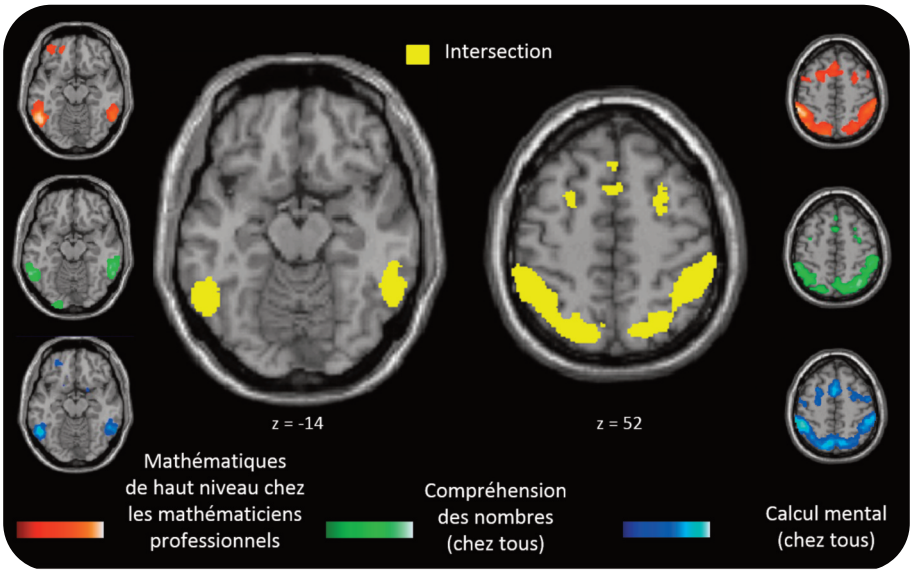
Il ne faudrait pas, pour autant, penser que tout est modifiable et que notre cerveau n'est qu'une ardoise vierge

soumise à l'empreinte de son environnement. Très tôt, les cellules nerveuses s'auto-organisent pour former des aires, des cartes et des circuits hautement reproductibles d'un individu à l'autre, quoique dotés d'une marge de variabilité. Dès le troisième trimestre de grossesse, le cortex, déjà organisé, se plisse et s'interconnecte. À la naissance, le cerveau est déjà fortement structuré et plissé selon une configuration propre à l'espèce humaine. Et cette architecture anatomique est déjà en grande partie fonctionnelle. L'imagerie cérébrale du nouveau-né a démontré à quel point chaque région du cortex répond, certes avec lenteur (les faisceaux de connexions n'ont pas encore reçu leur gaine de myéline qui les isole et les accélère), mais avec efficacité et déjà un début de spécialisation. Dès la naissance, par exemple, les aires auditives et visuelles sont en place, et l'on y voit déjà un embryon de réponse sélective aux visages. De même, les aires du langage répondent déjà sélectivement à la parole, particulièrement à celle de la mère. Même dans le domaine des mathématiques, le bébé n'est pas dépourvu de compétences pour la perception des petits nombres ou de la quantité approximative d'un ensemble d'objets, et c'est son cortex pariétal qui répond, au même endroit que chez l'adulte, lorsqu'on attire son attention sur ces représentations que l'on pourrait appeler « proto-mathématiques ».

Au carrefour de l'auto-organisation et de l'apprentissage, entre contrainte et plasticité, mêlant l'acquis et l'inné, comment le cerveau de l'enfant s'accommode-t-il de son environnement ? Le cerveau de notre espèce présente, dans ce domaine, une compétence unique dans le règne animal : celle de s'éduquer, c'est-à-dire de modifier, volontairement, son propre fonctionnement cérébral pour le réorienter vers des domaines inattendus, jamais anticipés par l'évolution. L'éducation s'appuie à la fois sur les compétences innées de nos circuits corticaux, et sur leur marge de plasticité. Lecture, arithmétique recyclent donc des circuits anciens pour faire du neuf avec du vieux.

La thèse que j'ai défendue dans mes livres *La bosse des maths*, *Les neurones de la lecture* et tout récemment *Apprendre ! Les talents du cerveau, le défi des machines*, c'est que chaque apprentissage doit trouver sa « niche neuronale » : un ensemble de circuits pré-organisés, dont la fonction est suffisamment proche de celle requise, et capables de se réorienter grâce

à leur plasticité. Dans le cas des mathématiques, ce sont particulièrement les circuits des aires pariétales, dans les deux hémisphères, qui présentent une prédisposition innée pour le sens des nombres et de l'espace, et qui vont apprendre à se réorienter vers des objets mentaux de plus en plus abstraits : d'abord les chiffres arabes, représentation symbolique des quantités ; puis les opérations arithmétiques, qui s'appuient sur la métaphore de la ligne numérique (additionner, c'est activer des circuits qui représentent un déplacement vers la droite ; et soustraire, c'est se déplacer vers la gauche) ; puis l'algèbre, dont les variables x, y, z se substituent à n'importe quel nombre ; et ainsi de suite, jusqu'à construire toute la pyramide des mathématiques. Au laboratoire, nous avons scanné par IRM fonctionnelle de nombreux mathématiciens de haut niveau. Lorsqu'ils évoluent dans les espaces les plus abstraits de la géométrie algébrique, ils continuent d'activer les mêmes aires corticales que nous possédons tous et qui nous servent à représenter les nombres et l'arithmétique (voir figure ci-dessous). D'une manière qui n'est pas encore bien comprise, la plasticité cérébrale a permis à ces aires de se recycler et de se différencier pour étendre le jeu de concepts qu'elles sont capables de représenter et de manipuler.



Lors de l'apprentissage de la lecture, un recyclage similaire se produit dans le domaine du langage et de la vision. Si chaque écolier possède, dès la naissance, des circuits spécialisés pour le langage parlé, il doit, vers six ans, les accommoder à une tâche radicalement nouvelle : le traitement des mots écrits. La lecture recycle une partie des circuits cérébraux qui nous servent à nommer des objets. En apprenant à lire, nous réorientons une partie de nos circuits visuels afin qu'ils reconnaissent, avec la plus grande efficacité, d'infimes différences dans les chaînes de lettres ; et surtout, qu'ils envoient le mot ainsi reconnu en direction des mêmes circuits qui nous servent à comprendre la parole. Le cerveau d'une personne alphabétisée présente donc des réseaux, non pas nouveaux, mais réorientés : en imagerie cérébrale, si l'on compare le cerveau d'un lettré avec celui d'un analphabète, on voit une région visuelle, qui s'intéresse normalement à la reconnaissance des objets et des visages, se dédier aux lettres de l'alphabet, et ses connexions en direction des aires du langage se renforcer et s'accélérer.

Mais la « matière à mémoire » qu'est notre cortex ne peut se modifier à l'infini. Sa plasticité est bien plus grande chez l'enfant que chez l'adulte, et elle semble décliner fortement aux alentours de la puberté. Dans l'enfance, même un événement aussi dramatique que la perte d'un hémisphère cérébral peut se compenser : on observe alors que l'hémisphère restant prend en charge, à lui seul, la quasi-totalité des fonctions normalement dévolues aux régions gauche et droite. L'exemple de Nico, un jeune adulte qui a perdu son hémisphère gauche à l'âge de trois ans, nous montre que l'on peut parler, écrire, passer le baccalauréat, devenir champion d'escrime et même peindre de beaux tableaux avec son seul hémisphère gauche ! Cela serait totalement impossible si la même lésion survenait à l'âge adulte.

On parlait autrefois de la petite enfance comme d'une « période critique » pour les apprentissages, mais les chercheurs d'aujourd'hui préfèrent parler de « période sensible », pour souligner qu'année après année, la plasticité cérébrale décline sans toutefois disparaître. Cela dépend d'ailleurs beaucoup des circuits impliqués : la capacité de reconnaître les phonèmes d'une langue étrangère s'établit dès la première année de vie et s'évanouit dans les années suivantes, tandis que

l'apprentissage du vocabulaire s'étend tout au long de la vie.

A tout âge, cependant, nous pouvons apprendre à mieux utiliser l'extraordinaire potentiel de plasticité de notre cerveau. L'attention, l'engagement actif, le retour sur erreur et l'automatisation sont des ingrédients essentiels de ces apprentissages : plus on les déploie, et plus l'information s'inscrit profondément dans nos circuits, de façon efficace et durable. L'une des grandes découvertes des neurosciences des dernières décennies, c'est le rôle fondamental du sommeil. Loin d'être une simple période de jachère, le sommeil est un moment d'activité cérébrale intense et structuré, au cours duquel l'hippocampe et le cortex rejouent, en duo, les épisodes les plus marquants des journées qui précèdent. Et ils le font à très grande vitesse, jusqu'à vingt fois plus vite que dans la vie réelle. Notre cerveau augmente ainsi sa base d'apprentissage, il répète (avec variations) ce qu'il a engrangé jusqu'à bien le maîtriser. Et ces effets sont jusqu'à trois fois plus importants chez l'enfant de deux ou trois ans, qui plonge plus rapidement dans un profond sommeil et se réveille, le lendemain, avec des compétences nettement consolidées. Même si les simulations informatiques des réseaux de neurones ont considérablement progressé, nous ne savons toujours pas, à l'heure actuelle, reproduire l'algorithme d'une impressionnante efficacité avec lequel un jeune apprend à reconnaître les objets, les visages ou les langues.

La petite enfance est, de toute évidence, une époque bénie pendant laquelle le cerveau engrange, sans difficulté, des millions d'informations chaque jour. Sachons fournir à ce super-ordinateur à l'efficacité inégalée, véritable « matière à mémoire », des stimulations à la hauteur de ses capacités : c'est tout l'enjeu de l'école de demain.

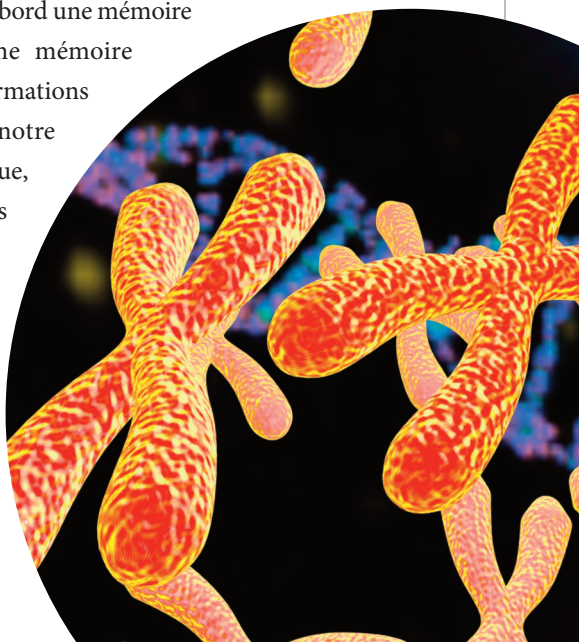
Références :
Amalric, M., & Dehaene, S. (2016). Origins of the brain networks for advanced mathematics in expert mathematicians. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201603205. https://doi.org/10.1073/pnas.1603205113
Amalric, M., & Dehaene, S. (2017). Cortical circuits for mathematical knowledge: evidence for a major subdivision within the brain's semantic networks. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 373(1740). https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0515
Dehaene-Lambertz, G., & Spelke, E. S. (2015). The infancy of the human brain. Neuron, 88(1), 93–109. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2015.09.026
Dehaene, S. (2018). Apprendre ! Les talents du cerveau, le défi des machines. Paris : Editions Odile Jacob.

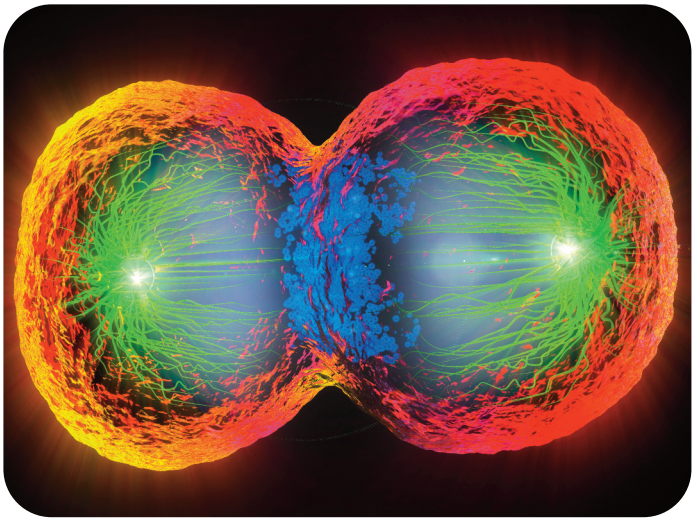
Les mémoires du génome

Denis Duboule

Membre de l'Académie des sciences, section Biologie intégrative, professeur au Collège de France - chaire Évolution des génomes et développement, professeur à l'université de Genève et à l'École polytechnique de Lausanne

Parler des mémoires du génome, de notre ADN, est d'actualité puisque la facilité actuelle à synthétiser ce polymère et sa grande stabilité en font un candidat de choix pour le stockage d'informations de toutes sortes. Mais au-delà de cette utilisation potentielle, l'ADN est lui-même une source de nombreuses mémoires de natures différentes et qui s'intègrent dans des référentiels temporels multiples. J'en vois quatre au minimum. Il y a d'abord une mémoire chimique, celle de sa séquence, ainsi qu'une mémoire génétique, dans laquelle sont contenues les informations nécessaires à notre construction et à notre fonctionnement. Puis une mémoire épigénétique, qui est une sorte de mémoire de travail, plus rapide, plus fugace, qui facilite et coordonne la lecture de notre mémoire génétique. Il y a enfin une mémoire phylogénétique, celle qui convoque notre passé animal et qui, par sa traçabilité indélébile, inscrite comme un code-barres dans nos chromosomes, nous rappelle constamment qui nous sommes et d'où nous venons.





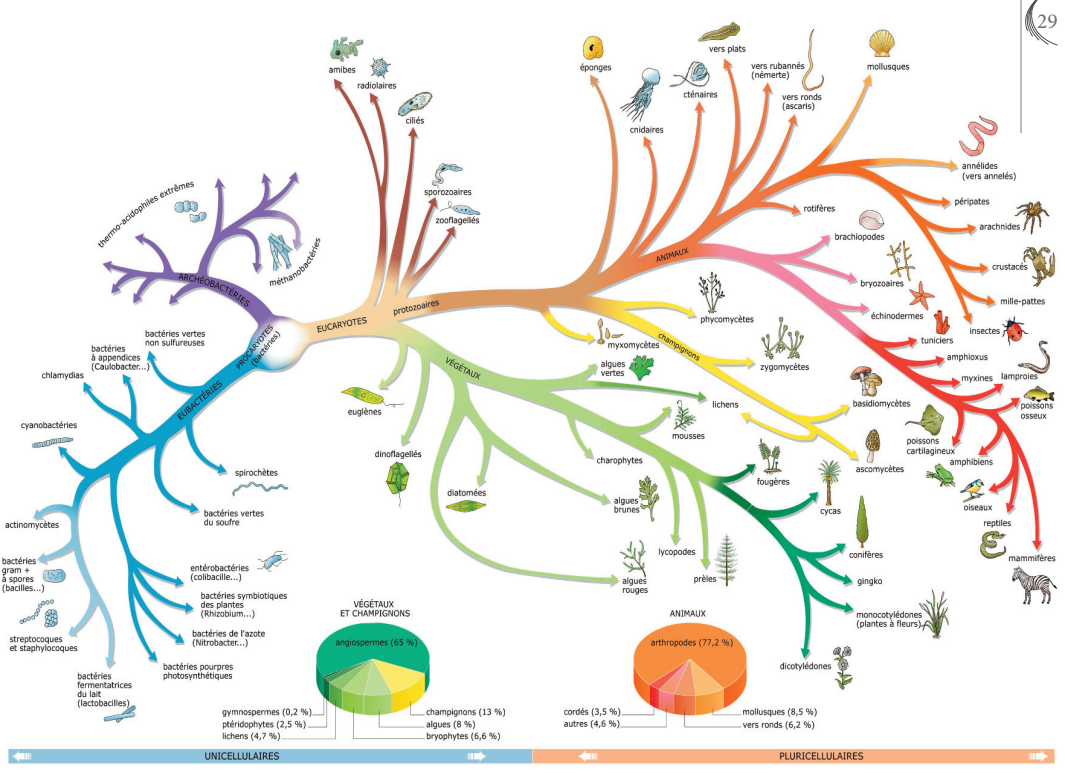
Le premier niveau de mémoire, la mémoire ontologique de l'ADN, fait qu'à chaque division cellulaire, cet ADN est recopié afin que les deux cellules filles reçoivent le même héritage. La précision de ce mécanisme de réplication est essentielle pour que cette mémoire soit respectée et pour la bonne lecture de la deuxième mémoire que contient cette molécule, la mémoire génétique des instructions de la construction et du fonctionnement de l'individu. Ces deux mémoires sont intimement liées l'une à l'autre, car la mémoire du programme ne peut être rappelée, ravivée que par des cellules se divisant, donc des cellules elles-mêmes mémorisant leur ADN, division après division.

Cette mémoire génétique est accompagnée par la mise en œuvre de mécanismes épigénétiques, qui ne relèvent donc pas seulement de la séquence de l'ADN mais d'aménagements temporaires de cette séquence, dépendant de l'état fonctionnel de notre ADN. Bien que les mécanismes de cette transmission épigénétique et les vraies relations de causalité impliquées restent à définir pleinement, il est plausible que ces modifications épigénétiques participent à la transmission de cette mémoire du déroulement de notre programme génétique dans le temps et dans l'espace. Cependant, cette mémoire épigénétique cellulaire ne doit pas être confondue avec une mémoire épigénétique de l'organisme. Dans cette deuxième hypothèse, les inscriptions définitives de ces modifications acquises seraient dès lors transmises à la descendance avec l'ADN lui-même. C'est là un champ de recherche très actif et très controversé, car ces phénomènes de transmission intergénérationnelle de caractères acquis sont observés de façon convaincante chez certaines plantes ou chez quelques animaux invertébrés.

Les supports structurels et moléculaires de ces deux mémoires chimique et génétique restreignent les variations possibles de notre programme tout en permettant à la fois

l'apparition de quelques modifications ici et là qui elles, seront les bases de la quatrième mémoire de notre ADN, la mémoire phylogénétique. Ces traces sont si fortes et indélébiles qu'elles permettent à chacun de reconstituer son ascendance, une indication d'origine infalsifiable puisque faisant partie intégrante du programme lui-même. Cette mémoire, inscrite dans chacune de nos cellules, nous permet d'évoquer des souvenirs – certes diffus – remontant jusqu'à l'explosion cambrienne, il y a 530 millions d'années, du temps où nos ancêtres n'avaient pas de mâchoire et où nous vivions en milieu aquatique ; seuls nos chromosomes s'en souviennent, ils en sont les derniers témoins.

Comprendre comment ces mémoires génomiques tangibles et transmissibles construisent les bases d'une mémoire neuronale intangible et effaçable reste l'un des défis majeurs de la neurobiologie. Espérons qu'une fois ces mécanismes complexes compris, la nature des liens qui existent entre cette mémoire neuronale et notre génome sera également clarifiée. Nous saurons alors si nos neurones s'affranchissent totalement de ces mémoires physiques ou si, au contraire, cette propriété étonnante nécessite tout de même un minimum de déterminisme génétique, si cette mémoire immatérielle se bâtit sur d'autres plus anciennes, comme un dernier étage nécessaire dans la construction de cet édifice immense du souvenir.

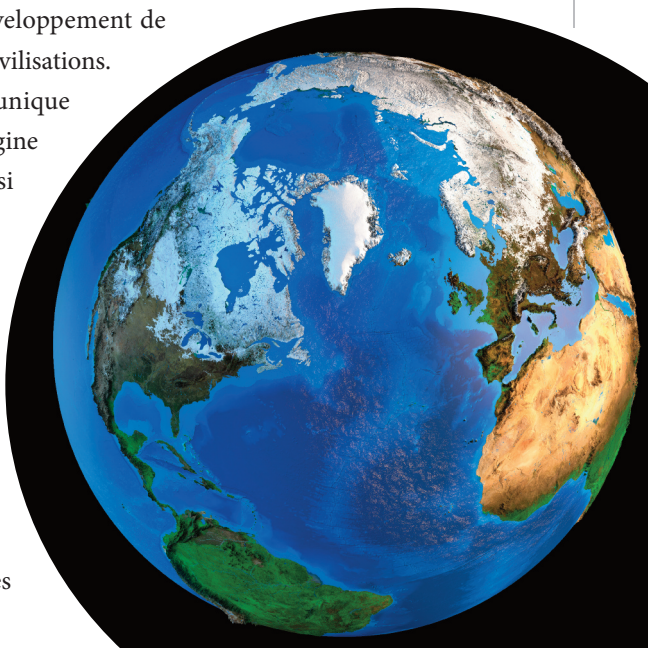


Mémoire du climat

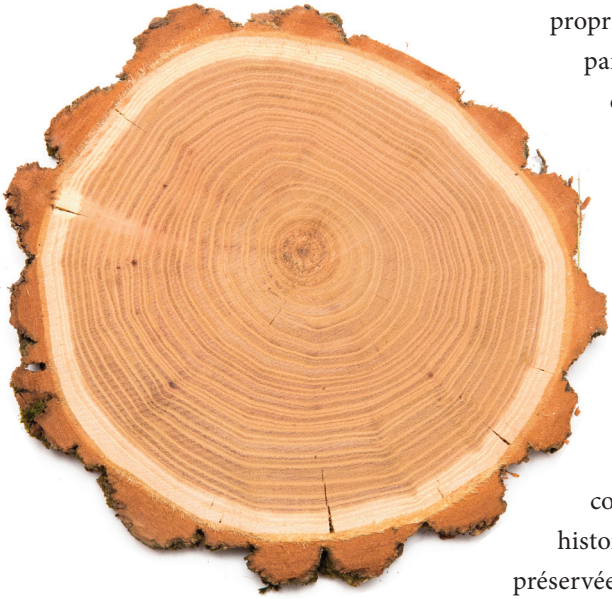
Jean Jouzel

Membre de l'Académie des sciences, section Sciences de l'univers, directeur de recherche émérite au CEA

Depuis sa formation, il y a un peu plus de 4,5 milliards d'années, le climat terrestre s'est constamment modifié. Même si elle a connu des périodes extrêmement froides, notre planète était en moyenne plus chaude qu'aujourd'hui ; ainsi les périodes chaudes représentent 75% des 540 derniers millions d'années. Diverses motivations conduisent à s'intéresser à l'évolution passée de notre climat. Elles vont de la curiosité, du souhait de connaissance à celui de mieux cerner les interactions entre cette évolution, l'émergence du vivant, le développement de notre espèce et, plus récemment de nos civilisations. Par ailleurs, cette évolution est source unique d'informations sur les mécanismes à l'origine des variations climatiques passées. Ainsi elle permet de mieux appréhender l'évolution future de notre climat et de tester la capacité des modèles climatiques utilisés pour réaliser des projections, dans des conditions différentes de celles d'aujourd'hui.



Cette reconstruction des climats passés s'appuie sur des archives, sédiments ou autres, dont la composition et/ou les



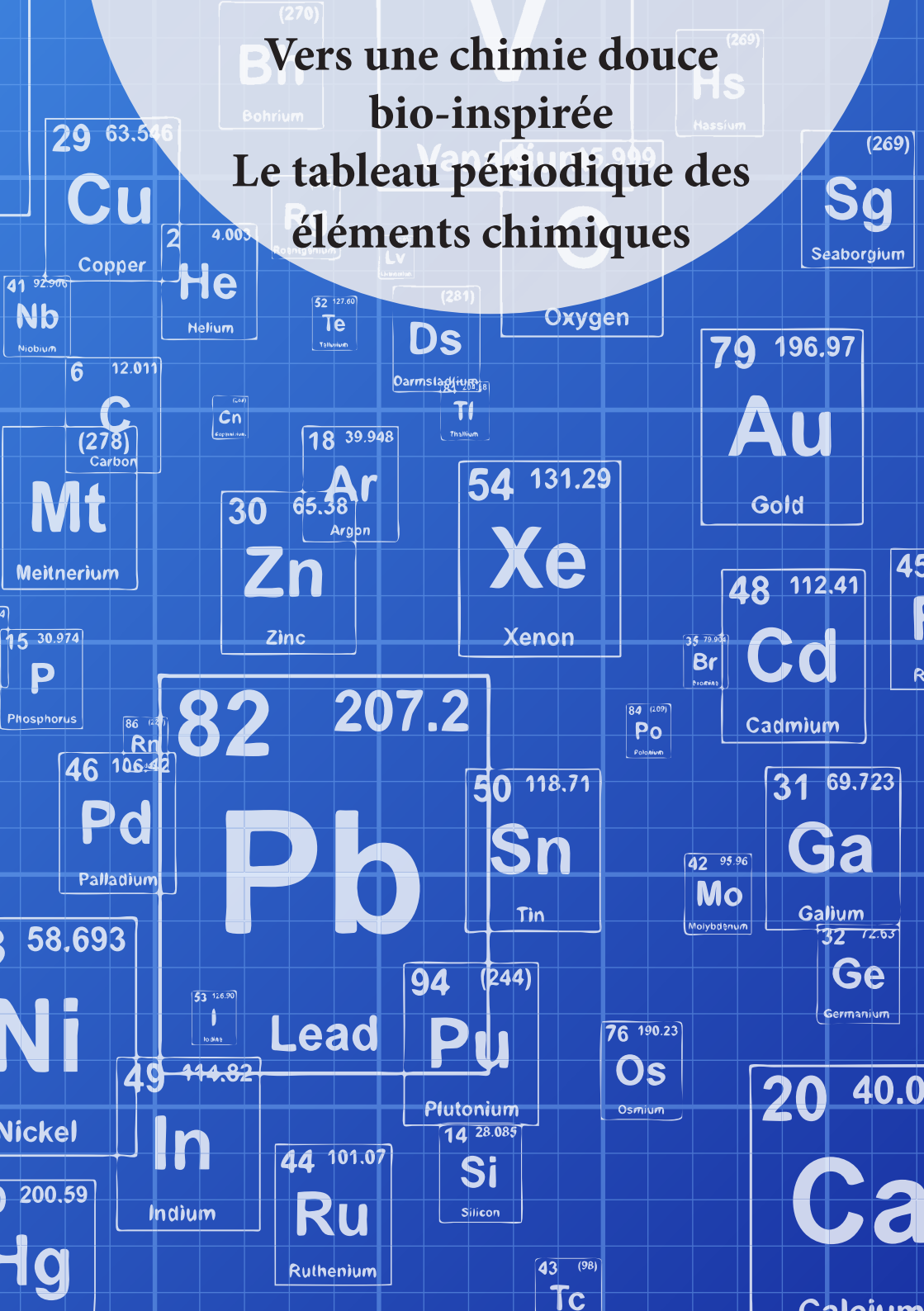
propriétés sont affectées par les paramètres climatiques et/ou par ceux influençant le climat ; il peut s'agir de propriétés physiques, de composition chimique ou isotopique, de répartition des espèces… Pour être utilisées de façon optimale, ces archives – témoignages géologiques, sédiments marins, continentaux ou lacustres, glaces polaires, spéléothèmes, coraux, cernes d'arbres, documents historiques – doivent être accessibles, préservées et non perturbées. Autant que possible continues, elles doivent offrir la possibilité d'être datées de façon soit absolue, soit relative ; l'établissement de chronologies fiables est essentielle pour le paléoclimatologue.

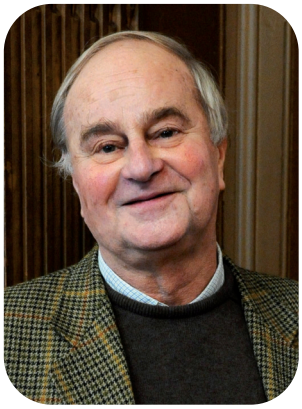
L'analyse isotopique constitue une approche de tout premier plan, qu'il s'agisse d'isotopes stables de l'hydrogène, de l'oxygène, du carbone, de l'azote, des gaz rares… ou d'isotopes radioactifs qui sont à la base de diverses méthodes de datation. Cette analyse est un atout essentiel pour l'étude du cycle de l'eau : il y a plus d'isotopes lourds dans la pluie et la neige que dans la vapeur d'eau dont elles sont issues et à chaque étape la vapeur restante dans le nuage s'appauvrit en isotopes lourds. Il en est de même pour les précipitations qui en sont issues ; elles contiennent de moins en moins d'isotopes lourds à mesure que la température diminue. Cette relation entre la température de formation des précipitations et leur composition isotopique est particulièrement bien observée, et expliquée, dans les régions polaires, ce qui permet de définir un « thermomètre isotopique » d'utilisation particulièrement simple en Antarctique. En outre, l'accumulation, en période glaciaire, de glace sur les continents et l'abaissement du niveau de la mer qui y est associé se traduit par un enrichissement des eaux océaniques.

Quatre exemples illustrent l'intérêt de s'appuyer sur notre connaissance de la « Mémoire de notre climat » pour mieux appréhender son évolution future. Le premier concerne les carottages de glace réalisés en Antarctique avec des enregistrements qui couvrent les 800 000 dernières années. Ils permettent non seulement de reconstituer les variations de température,

de précipitation et de circulation atmosphérique mais aussi celles des paramètres susceptibles d'y contribuer, concentration des gaz à effet de serre, retombées de poussières, activité volcanique et activité solaire. Le deuxième exemple porte sur les variations climatiques rapides enregistrées tout au cours de la dernière période glaciaire dans les glaces du Groenland et dans de nombreux enregistrements océaniques et continentaux. Très marquées dans les régions adjacentes de l'Atlantique Nord, elles se répercutent à l'ensemble de la planète et sont perçues jusqu'en Antarctique. Le troisième illustre la sensibilité du niveau de la mer - plus élevé de 6 à 10 mètres lors du dernier interglaciaire - vis à vis de réchauffements relativement modestes. Enfin, la reconstruction des deux derniers millénaires combine de nombreuses méthodes (séries météorologiques anciennes, données documentaires et indicateurs mesurés dans des cernes d'arbres, des coraux, des carottes de glace, des sédiments lacustres et des spéléothèmes) ; elle permet de conclure que les trente dernières années ont été les trente années les plus chaudes de cette période.

Vers une chimie douce bio-inspirée
Le tableau périodique des éléments chimiques





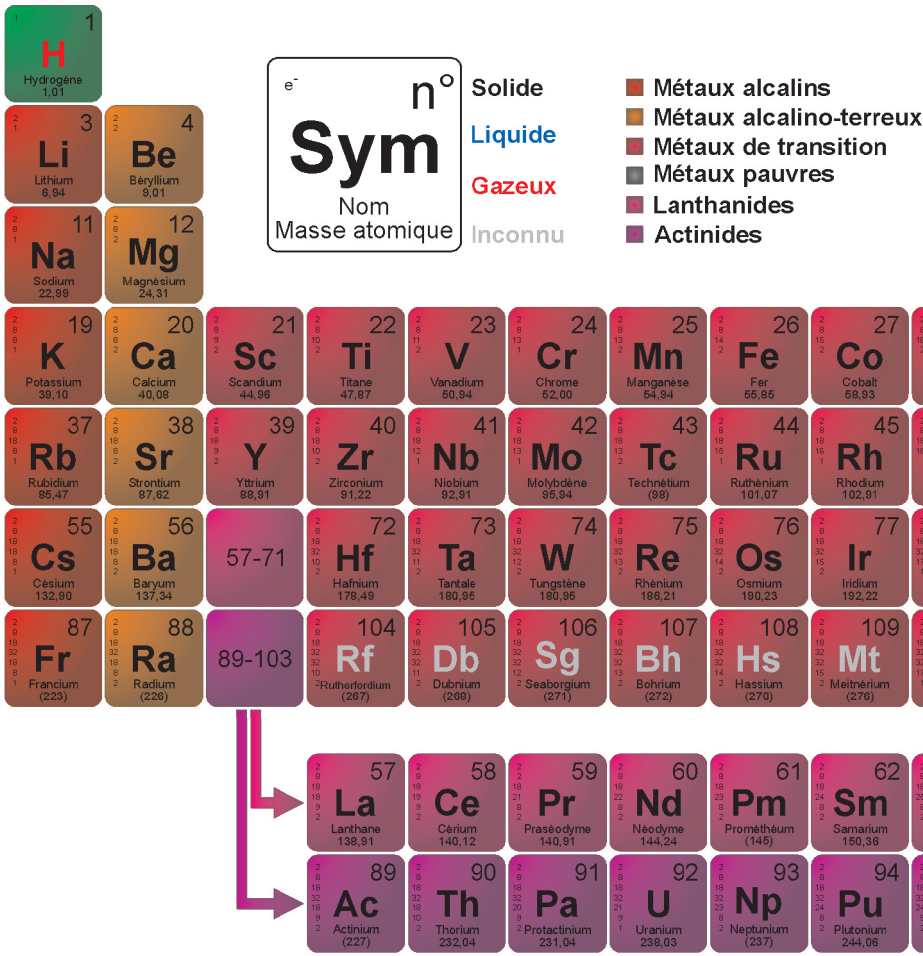
Jacques Livage

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

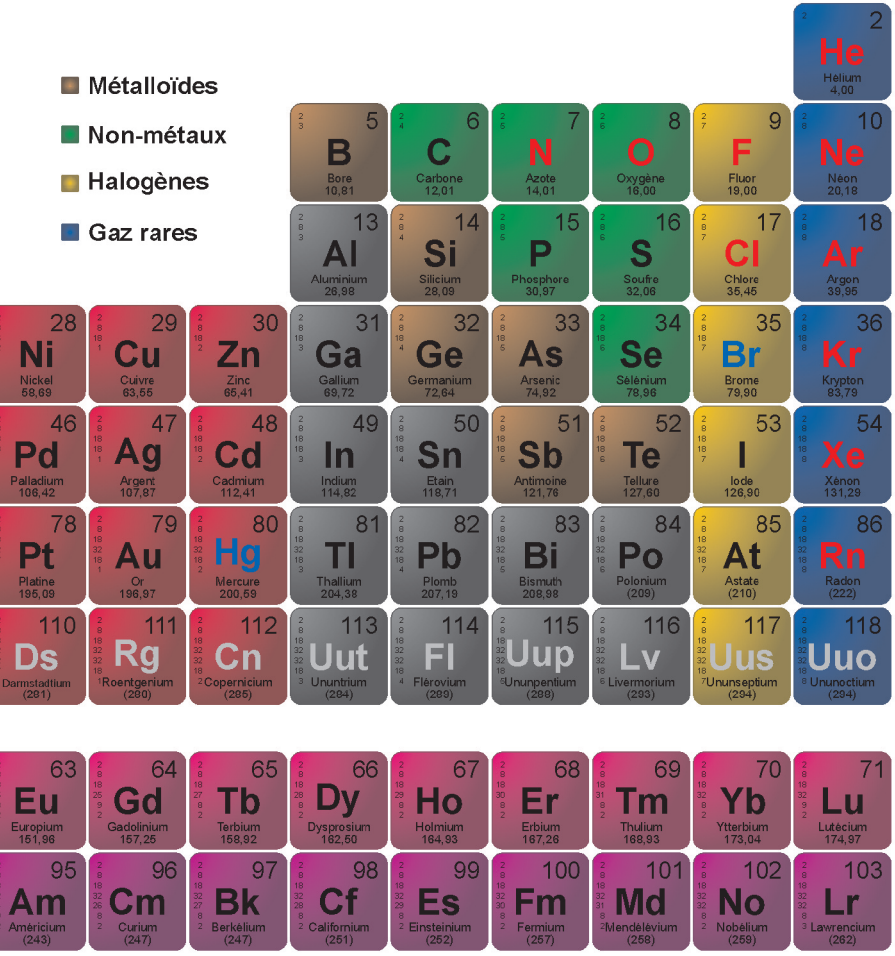
L'UNESCO a décrété que 2019 serait « l'année du tableau périodique des éléments chimiques ». Il y a en effet 150 ans, Dimitri Mendeleïev publiait le tableau périodique qui proposait une classification raisonnée des éléments chimiques, connus et même inconnus ! Ce tableau a marqué un tournant important pour la chimie, qui avait été jusque là une science de l'analyse cherchant à déterminer de quels éléments était constituée la matière. Certains croyaient encore à la théorie de Platon et Aristote, suggérant que la matière était constituée des quatre éléments, le feu, la terre, l'eau et l'air ! C'est en s'appuyant sur le tableau périodique qu'au XIX^{e} siècle, la chimie « fondée sur la synthèse » a ouvert la voie à l'industrie chimique, qui va prendre une importance prépondérante dans le développement de la société. La synthèse de l'indigo entraine l'essor de la BASF tandis que le procédé Solvay ouvre de nouveaux horizons à la chimie minérale. Le chimiste devient capable de créer de nouvelles molécules et de nouveaux

matériaux. La chimie se diversifie en ouvrant des voies nouvelles ; les polymères, la chimie du solide, la biochimie, la chimie théorique… Des progrès importants vont être réalisés dans le domaine de la santé avec la synthèse de nombreux médicaments. Les batteries vont jouer un rôle fondamental pour la production et le stockage de l'énergie électrique. L'élaboration de matériaux possédant des propriétés électriques, optiques ou magnétiques va permettre le développement de toute l'électronique moderne. Cependant, malgré ces avancées significatives, la chimie reste souvent associée à la pollution ! De nombreux progrès restent à faire pour améliorer l'image de la chimie ! C'est dans cette perspective que nous suivrons le précepte de Léonard de Vinci qui disait : « Observez la nature, là est notre futur ! ».

De nombreux efforts sont maintenant consacrés au développement d'une chimie douce qui s'inspire de l'exemple de la nature pour imaginer de nouveaux procédés. Le CO_2, auquel on



attribue le réchauffement climatique, est en fait une molécule fondamentale pour le développement de la vie. C'est en utilisant l'énergie solaire que la photosynthèse fait réagir l'eau et le gaz carbonique pour élaborer les molécules du vivant. Un exemple que l'on essaye d'imiter en développant des systèmes catalytiques permettant d'effectuer des réactions de photosynthèse artificielle. De la même façon, en s'inspirant des matériaux du vivant, les chimistes ont développé des procédés de polymérisation inorganique qui permettent d'élaborer des verres et des céramiques dans des conditions particulièrement douces. Ces procédés, connus sous le nom de « procédés sol-gel », ont conduit à l'élaboration de matériaux hybrides organo-minéraux, véritables nanocomposites à l'échelle moléculaire. Aujourd'hui, toute une nouvelle chimie douce se développe, qui s'inspire de la nature pour le bien être de l'humanité !



Créée par Colbert en 1666, l'Académie des sciences est une assemblée de scientifiques, choisis parmi les plus éminents spécialistes français et étrangers. Les réflexions et débats qu'elle conduit ont pour rôle de fournir à tous un cadre d'expertise, de conseil et d'alerte vis-à-vis des enjeux politiques, éthiques et sociétaux que pose la science. En vertu de cette mission, elle œuvre au partage de la science pour éclairer les choix des citoyens, et formule des recommandations, sur lesquelles peuvent s'appuyer les autorités gouvernementales. Elle soutient en outre la recherche, s'engage pour la qualité de l'enseignement des sciences et encourage la vie scientifique sur le plan international.

crédits photographiques : ©Simon Cassanas_Académie des sciences (illustrations de couverture)
©Simon Cassanas_Académie des sciences (p3, 5) ; © Juliette Agnel (p3, 31) ; ©Patrick Tourneboeuf_Oppic. 2018 (p4, 5, 6, 7) ; stock.adobe.com : ©ultramcu (p8, 9), ©christianchan (p9), ©ekaphon (p10), ©spainter_vfx (p10, 11), ©Blue Bug Studios (p12, 13), ©illustrez-vous (p13), ©knssr (p14), ©dmitr86 (p16, 17), ©passmil198216 (p17), ©adimas (p20, 21), ©nobeastsofierce (p21), ©archikatia (p22, 23), ©Sebastian Kaulitzki (p24), ©azotsuka (p25), ©ktsdesign(p26, 27), ©Dr_Kateryna (p27), ©Christoph Burgstedt (p28), ©Kristy (p30, 31), ©MozZz (p31), ©Mateusz (p32), ©staphy (p33), ©Eyematrix (p34, 35), ©Abel Tumik (p35), ©Guillaume Le Bloas (p36, 37) ; ©DR (p3, 9, 13, 15, 17, 18, 19, 21, 23, 27, 29, 34, 35)

INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Directrice de la publication
Pascale Cossart
Rédactrice en chef
Marion Doucet
Conception graphique
Aurore Lopez
Impression
Boudart Imprimeur

Octobre 2019
ISSN 2102-5398

Académie des sciences
23 quai de Conti - 75006 Paris
www.academie-sciences.fr
@AcadSciences