

DÉCOUVERTE

Revue du Palais de la découverte

SCIENCE EN SOCIÉTÉ

**L'égalité des genres,
force motrice
d'une croissance durable**

SCIENCES DU NUMÉRIQUE

**Le bruit de Perlin
ou comment générer
des paysages numériques**

MATHÉMATIQUES

**L'art de bien faire
des erreurs**





cité

sciences
et industrie

renaissances

exposition
du 6 juillet 2021 au 6 mars 2022

DERNIERS JOURS



RÉSERVATION CONSEILLÉE
M > Porte de la Villette
cité-sciences.fr
#ExpoRenaissances

En partenariat avec

Dauphine PSL

TFI Ushuaïa Libération LOBS Usbek & Rica
philosophie JDN melty RMC

**Bruno Maquart**

Président d'Universcience –
Établissement public
du Palais de la découverte
et de la Cité des sciences
et de l'industrie

D

écouverte aborde dans ce premier numéro de l'année la question de l'égalité des genres, en documentant, chiffres à l'appui, la place des femmes dans l'économie et la société. Est évoqué notamment leur accès à la santé ou à l'éducation : est rappelée ainsi leur sous-représentation dans les filières des sciences, des technologies, de l'ingénierie et des mathématiques qui sont des secteurs d'avenir en termes d'emploi. Peu de femmes sont aujourd'hui, par exemple, spécialisées dans l'intelligence artificielle. Un constat

qui invite à l'action, pour tendre vers une plus juste répartition entre les genres des charges et des chances.

Prévoir un phénomène physique en fonction de différents scénarios, comme le comportement de structures soumises à des contraintes météorologiques, nécessite l'utilisation d'outils de modélisation.

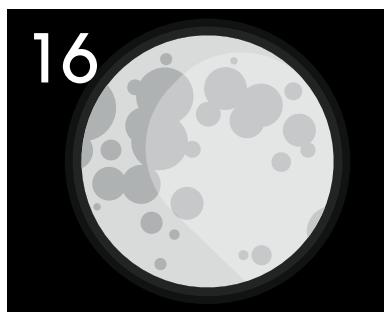
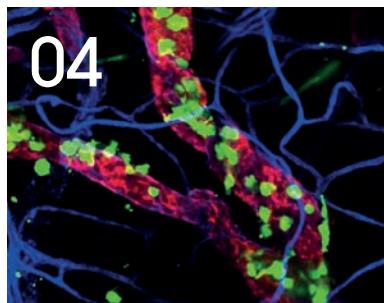
La modélisation mathématique passe par une mise en équations du système étudié et leur résolution numérique par ordinateur. En réalité, les résultats obtenus tout au long du processus sont entachés d'erreurs, comme l'explique *Découverte*. C'est là qu'interviennent les mathématiciens, dont le travail améliore le résultat des prévisions numériques : un gain de précision utile aux ingénieurs du génie civil ou de l'aéronautique.

Dans le monde des jeux vidéo, la qualité, la variété et le réalisme des environnements sont les clés d'une immersion réussie. La création d'univers virtuels n'a pas échappé à l'automatisation grâce à des outils dits de génération procédurale. *Découverte* s'intéresse à l'un d'entre eux, le bruit de Perlin, qui permet de produire des valeurs contraintes et cohérentes, et à l'une de ses applications les plus spectaculaires, la génération de paysages numériques. *Découverte* détaille le fonctionnement de cette méthode élaborée dans les années quatre-vingt, encore utilisée de nos jours.

Pour en savoir plus sur l'informatique et les sciences du numérique, les Étincelles du Palais de la découverte, dans le 15^e arrondissement de Paris, proposent des exposés accessibles dès l'âge de 12 ans. Une occasion d'explorer la numérisation de données, la simulation ou encore les algorithmes et leurs applications. Cette discipline est à retrouver également sur le site Internet du Palais de la découverte, qui propose des expériences d'informatique à faire chez soi ou en ligne (<https://bit.ly/3oMJm9u>).

DÉCOUVERTE

N° 436 \ JANVIER-MARS 2022



01

ÉDITORIAL

04

SCIENCES ACTUALITÉS

Brèves d'actualité scientifique multidisciplinaires

10

PRIX NOBEL 2021

Éclairage sur les prix Nobel de physiologie/médecine, physique et chimie

16

CURIOSITÉS CÉLESTES

Janvier-mars 2022

20

TERRE & UNIVERS

**Formation des chaînes de montagnes de l'Europe hercynienne
Une nouvelle approche**
par Olivier Coulon

30

MATIÈRE & ÉNERGIE

**Réactions oscillantes
En mal d'équilibre**
par Kamil Fadel

40

VIVANT \ SANTÉ & ENVIRONNEMENT

**L'électroencéphalographie,
cent ans d'exploration cérébrale**
par Billel Khouader

Fondateur :
A. Jean Rose (1915-1992)

Directeur de la publication :
Bruno Maquart,
président d'Universcience -
Établissement public du Palais de la découverte et de la Cité des sciences et de l'industrie

Directrice de la rédaction :
Valérie Mathey

Rédacteur en chef :
Jean-Philippe Bricka,
assisté de Kamil Fadel
et Emmanuelle Lambert

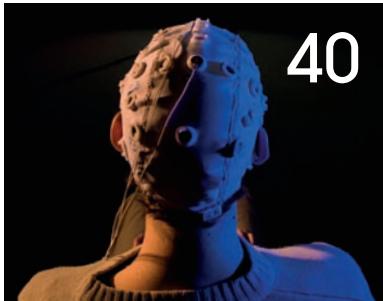
Secrétaire de rédaction :
Gaëlle Courty

Maquettiste :
Régis Paillard

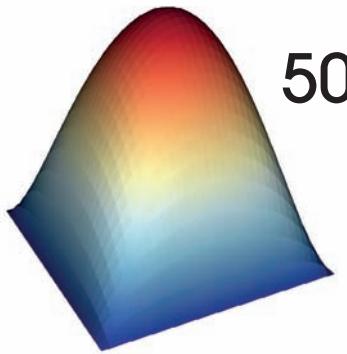
Comité de rédaction :
France Agid, Valentine Baud,
Michèle Chouchan,
Olivier Coulon, Antonio
Gomes da Costa, François Gros,
Robin Jamet, Jérôme Kirman,
Olivier Las Vergnas, Arnaud

Mayrargue, Pascal Pica,
Véronique Polonovski, Anne
Prugnon, Andy Richard, Michel
Van Praet

**Chargé de la gestion
administrative et de la diffusion :**
Ismaël Muñoz
Courriel :
ismael.munoz@universcience.fr



40



50



56

MATHÉMATIQUES

- 50 **L'art de bien faire des erreurs**
par Amélie Fau et Thomas Wick

SCIENCES DU NUMÉRIQUE

- 56 **Le bruit de Perlin ou comment générer des paysages numériques**
par Émilien Cornillon

SCIENCE EN SOCIÉTÉ

- 64 **L'égalité des genres, force motrice d'une croissance durable**
par Augusto Lopez-Claros
et Nadia Caïd-Holzer

74

REGARD SUR...

- L'Aquarium tropical du palais de la porte Dorée**
(Paris, France)
par Sabine Collin et Gaëlle Courty

90

- LA SCIENCE À PORTÉE DE MAIN**
Rencontre lumineuse entre curcuma et polystyrène
par Jonathan Piard, Ulysse Garnier,
Clément Morel et Sacha Marynberg

92

- COUPS DE CŒUR**
LA SCIENCE EN ACTION

94

Vente par correspondance et abonnements :
Valérie Parra y Rodrigo
Courriel : revue@universcience.fr

Pour plus d'informations et toute correspondance, se reporter à la dernière page du numéro.

Maquette originale :
Serge Nicolas

Photographie de couverture :
© Photo12 / Alamy / SOPA Images

Recherches iconographiques :
Florence Chanez, Claire Jullion

Réalisation et adaptation des schémas :
Régis Paillard

Imprimerie Dupli Print
733, rue Saint-Léonard
53100 Mayenne

Palais de la découverte, un lieu Universcience,
avenue Franklin-D.-Roosevelt,
75008 Paris

Dépôt légal : février 2022



Physique

Cliché du premier cristal de Wigner

Pour la première fois, des chercheurs de l'université américaine de Berkeley ont réussi à fabriquer, photographie à l'appui, une glace électronique

ou cristal de Wigner. Ce dernier tire son nom d'Eugene Wigner (1902-1995), physicien ayant prédit en 1934 que les électrons, de faible densité, qui traversent normalement les matériaux peuvent se figer sur place à des températures très basses. Le cristal de Wigner est donc une structure stable composée exclusivement d'électrons positionnés de sorte qu'ils ne se repoussent plus, c'est-à-dire en nid d'abeilles. Pour l'obtenir, les chercheurs ont su dompter les particules élémentaires, une véritable prouesse expérimentale. Comment ? En coinçant les électrons, dont la densité a été établie grâce à un champ électrique, entre une couche de disulfure de tungstène et une autre de disélénium de tungstène. Puis, les chercheurs ont refroidi l'ensemble à une température proche du zéro absolu. Pour photographier cette structure grâce à un microscope à effet tunnel sans qu'elle ne fonde, ils ont recouvert le cristal d'une feuille de graphène. En réalité, c'est l'impression des électrons sur cette dernière qui a été photographiée.

MARINE CYGLER

Pour en savoir plus : https://news.berkeley.edu/story_jump/physicists-snap-first-image-of-an-electron-ice/

Premières images de l'IRM la plus puissante du monde

Unique au monde, l'IRM (imagerie par résonance magnétique) à 11,7 teslas (T) du projet Iseult du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) vient de livrer ses premières images d'une précision remarquable. Destiné à la recherche de pointe en imagerie cérébrale pour mieux comprendre les structures et le fonctionnement du cerveau, le scanner IRM permettra d'obtenir des clichés dix fois plus précis qu'avec les appareils trouvés actuellement dans les hôpitaux, dont le champ magnétique varie de 1,5 à 3 T. En septembre 2021, c'est un potimarron qui a inauguré l'instrument aux dimensions elles-mêmes hors norme (5 mètres de long, 5 mètres de diamètre, 132 tonnes). Sa fabrication a nécessité le recours à des innovations de rupture : l'utilisation de fils supraconducteurs pour l'aimant et le refroidissement à -271,35 °C, pratiquement le zéro absolu, permettent d'obtenir un champ magnétique très puissant. La conception et la fabrication de cet imageur unique au monde ont nécessité vingt ans. M. C.

Pour en savoir plus : <https://www.cea.fr/presse/Pages/dossiers/2021/dp-1ere-image-iseult-2021.aspx>

L'IRM à 11,7 teslas du projet Iseult à Neurospin au CEA-Paris-Saclay.

© F. Rhodes / CEA.



Climatologie \ Astrophysique



Avec le réchauffement climatique, les montagnes verdissent. Ce phénomène affecte en particulier les sommets les plus inhospitaliers, comme vient de le montrer une équipe française. Ici, les montagnes de Nockberge dans les Alpes autrichiennes.

© iStock / Getty Images Plus.

Les sommets inhospitaliers verdissent plus vite

Avec l'augmentation marquée des températures estivales en montagne depuis les années quatre-vingt, les plantes colonisent peu à peu les espaces de haute altitude et les sommets verdissent. Ce phénomène présente une dynamique plus rapide au niveau des points chauds de verdissement (*greening hotspots* en anglais) tels que les massifs alpins de l'Oisans ou du Mercantour. Grâce à l'utilisation d'images satellite des Alpes, des scientifiques du Laboratoire d'écologie alpine (LECA – Centre national de la recherche scientifique / université Grenoble Alpes / université Savoie Mont-Blanc) ont déterminé que le verdissement affecte

principalement les versants pierreux, exposés au nord et situés au-dessus de 2 200 mètres d'altitude. Autrement dit, ce sont les plantes – graminées, arbustes et arbres pionniers – des milieux les plus inhospitaliers qui semblent profiter le plus des changements climatiques en cours. Différents facteurs qui dépendent des conditions locales – comme la durée d'enneigement, la disponibilité en eau, la fertilité et la stabilité des sols, l'activité pastorale – devront être analysés pour mieux comprendre les causes de la variabilité géographique du verdissement. M. C.

Pour en savoir plus : <https://www.inee.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/les-sommets-des-alpes-verdissent-et-c certains-beaucoup-plus-vite-que-d'autres>

Planète faite du même bois que son étoile

L'existence d'un lien entre la composition des planètes rocheuses et celle de leur étoile respective est supposée depuis longtemps.

Cette hypothèse vient d'être confirmée partiellement par une équipe internationale. Les astrophysiciens ont mesuré la lumière émise par les étoiles, car elle présente l'empreinte spectroscopique caractéristique de la composition de ces dernières. Quant aux planètes rocheuses, leur densité et leur composition ont été déduites de manière indirecte à partir de leurs masse et rayon mesurés. Pour comparer de façon pertinente les compositions des deux types d'objets célestes, qui sont de nature très différente, il a fallu procéder à un ajustement : les chercheurs ont eu recours à une version refroidie et théorique des étoiles. Ils ont constaté que si le lien supposé est bien établi globalement, certains éléments peuvent être plus abondants que prévu. Le taux de fer, par exemple, est parfois plus élevé dans les planètes que dans leur étoile. Cette anomalie pourrait s'expliquer par des impacts géants avec d'autres protoplanètes, qui auraient détaché la matière légère mais seraient sans effet sur le noyau de fer. M. C.

Pour en savoir plus : https://www.unibe.ch/actualits/medias/media_relations_f/communiques_de_presse/2021/communiques_de_presse_2021/la_plante_ne_tombe_jamais_loin_de_ltoile/index_fra.html



Le parasite sanguin *Toxoplasma gondii* est responsable de la toxoplasmose. Un nouvel antiparasitaire prometteur empêche sa reproduction. Il serait aussi efficace pour lutter contre l'agent responsable du paludisme.

© iStock / Getty Images Plus.

Nouvel antiparasitaire ?

Des chercheurs de l'institut Paul-Scherrer (Suisse) ont identifié un composé chimique baptisé parabuline qui pourrait être utilisé comme principe actif contre plusieurs parasites unicellulaires, dont ceux à l'origine du paludisme (*Plasmodium sp.*) et de la toxoplasmose (*Toxoplasma gondii*). Cette substance prometteuse empêche la formation de longs filaments protéiques stables de tubuline, indispensables à la réussite de la division cellulaire. Les chercheurs ont constaté qu'en présence de parabuline, le parasite *Toxoplasma gondii* ne peut pratiquement plus se reproduire dans des cellules humaines. En revanche, la parabuline n'affecte pas ces dernières. La tubuline, présente chez tous les êtres vivants dont les cellules possèdent un noyau, constitue déjà une cible privilégiée des médicaments anticancéreux. M. C.

Pour en savoir plus : <https://www.psi.ch/fr/media/actualites-recherche/nouvel-antiparasite>

Première greffe réussie d'un rein de cochon

Une équipe du New York University Langone Transplant Institute (États-Unis) a réalisé avec succès la greffe d'un rein de cochon génétiquement modifié à une femme en mort cérébrale. Plus précisément, le rein est demeuré à l'extérieur du corps de la patiente, relié grâce à deux vaisseaux sanguins. Première mondiale annoncée fin octobre 2021, cette expérimentation a duré 54 heures, ce qui a permis de vérifier que non seulement le rein animal n'était pas rejeté, mais qu'il fonctionnait correctement, c'est-à-dire qu'il produisait de l'urine et que le taux de créatinine dans le sang baissait. En prévision d'une xénotransplantation, les cochons sont modifiés génétiquement

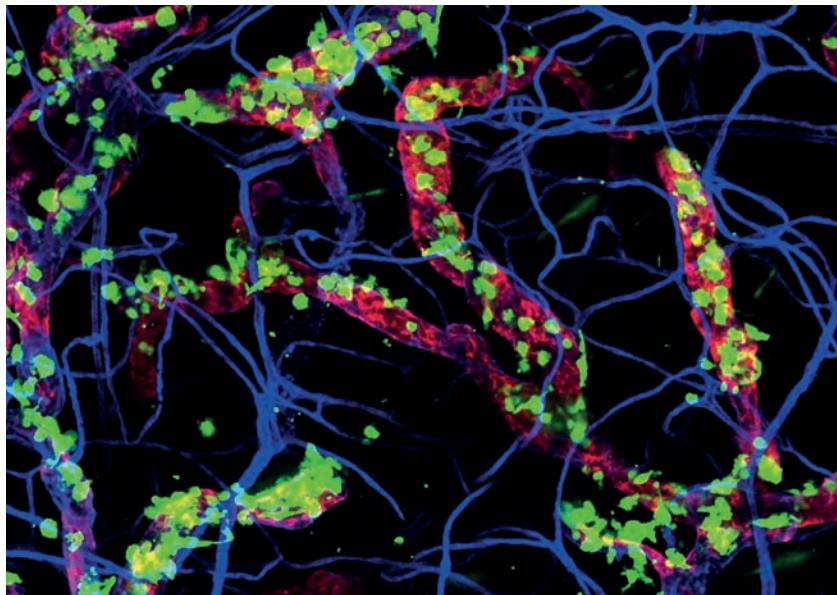
de manière que leurs cellules soient dépourvues de sucre alpha-gal à leur surface, afin d'éviter un rejet par l'hôte pour incompatibilité. De plus, la technique des ciseaux moléculaires CRISPR-Cas9 (se reporter à l'article de Quitterie Largeteau, Découverte n° 435, oct.-déc. 2021, p. 30-39) permet de retirer le matériel génétique du rétro-virus endogène porcin (PERV), qui est intégré dans le génome même du porc. Ainsi, la xénotransplantation ne présente pas de risque de contamination par le PERV. M. C.

Pour en savoir plus : <https://nyulangone.org/news/progress-xenotransplantation-opens-door-new-supply-critically-needed-organs>



Le Dr Robert Montgomery, qui dirige le département de chirurgie du New York University Langone Transplant Institute (États-Unis), a réalisé la première xénotransplantation au monde. Ici, il est en train de greffer un rein provenant d'un cochon génétiquement modifié à une patiente en état de mort cérébrale. © J. Carrotta for NYU Langone Health.

Neurosciences \ Physiologie



La migration des cellules dendritiques de la peau dans les vaisseaux lymphatiques dépend du moment de la journée. Cellules dendritiques (en vert) en cours de migration dans les vaisseaux lymphatiques (en rouge) de la souris. Les vaisseaux sanguins sont en bleu. © UNIGE / C. Scheiermann.

Le système immunitaire est du matin

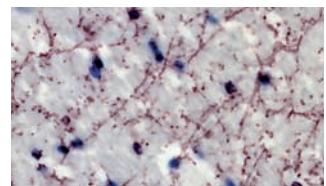
L'activité du système immunitaire oscille tout au long de la journée, avec un pic en phase de repos juste avant la reprise de l'activité, ce qui correspond à l'après-midi pour les animaux nocturnes et au matin tôt pour les êtres humains. En effet, des biologistes de l'Université de Genève (Suisse) et de l'université de Munich (Allemagne) ont découvert que la migration des cellules dendritiques de la peau vers les ganglions lymphatiques oscille sur une période de 24 heures, en fonction de l'alternance entre le jour et la nuit. Dans les ganglions lymphatiques, les antigènes sont présentés aux cellules dendritiques, ce qui déclenche une réponse immunitaire contre l'agent étranger. Grâce à des cellules de peau humaine, prélevées à différents moments de la journée, les chercheurs ont identifié plusieurs molécules, notamment des chimiokines, qui participent non seulement au processus migratoire, mais dont l'expression est régulée par les horloges circadiennes. Ces travaux mettent en évidence la possible prise en compte du moment de la journée choisi pour la vaccination ou l'administration d'immunothérapies contre le cancer, afin d'en accroître l'efficacité. M. C.

Pour en savoir plus : <https://www.unige.ch/communication/communiques/2021/le-systeme-immunitaire-humain-est-plutot-matinal/>

Liaison dangereuse dopamine-glutamate

Lorsqu'une personne consomme une substance addictive, cette dernière accroît la concentration d'un neurotransmetteur, la dopamine, dans les zones du cerveau impliquées dans le circuit de la récompense. Or l'augmentation de la concentration de dopamine modifie aussi les transmissions qui dépendent d'un autre neurotransmetteur, le glutamate. Des chercheurs de plusieurs équipes françaises viennent d'identifier plus précisément les bases moléculaires de ces modifications : le récepteur de la dopamine et celui du glutamate se lient entre eux, un phénomène nommé hétérodimérisation. Si celle-là est empêchée, cela protège des comportements pathologiques provoqués par la cocaïne, du moins chez la souris. Une nouvelle cible thérapeutique a été découverte peut-être ainsi. Aujourd'hui, aucun traitement pharmacologique efficace durablement contre l'addiction n'est disponible. M. C.

Pour en savoir plus : <https://www.cnrs.fr/fr/une-nouvelle-cible-therapeutique-pour-lutter-contre-les-addictions>



Détection de la proximité entre récepteurs à partir de tissus post-mortem humains. Le signal de proximité entre récepteurs correspond au marquage de couleur brune. © A. Andrianarivo et P. Vanhoutte / laboratoire Neuroscience Paris-Seine (CNRS / Sorbonne Université / Inserm).

Des batteries au soufre plus vertes

Le soufre peut-il révolutionner la façon dont l'électricité est stockée dans des batteries ?

C'est ce que pense une équipe de l'université d'Adélaïde (Australie) depuis qu'elle étudie la chimie du soufre. Cet élément chimique est en train de transformer la conception des électrodes des batteries métal-soufre, car il présente l'avantage d'être très abondant dans l'environnement et de permettre une grande capacité de stockage. Les chercheurs ont montré pour la première fois la possibilité d'une oxydation électrochimique réversible au niveau d'une cathode au soufre. Puis ils ont appliqué cette découverte pour concevoir des piles aluminium-soufre (Al-S), lesquelles sont parvenues expérimentalement à une tension électrique de 1,8 volt. Par comparaison avec les batteries commerciales lithium-ion (Li-ion), cette prochaine génération de batteries est plus économique et a un impact moindre sur l'environnement. M. C.

Pour en savoir plus : <https://www.adelaide.edu.au/newsroom/news/list/2021/10/01/new-sulphur-chemistry-possible-key-to-greener-batteries>

D'où vient le mercure de l'océan ?

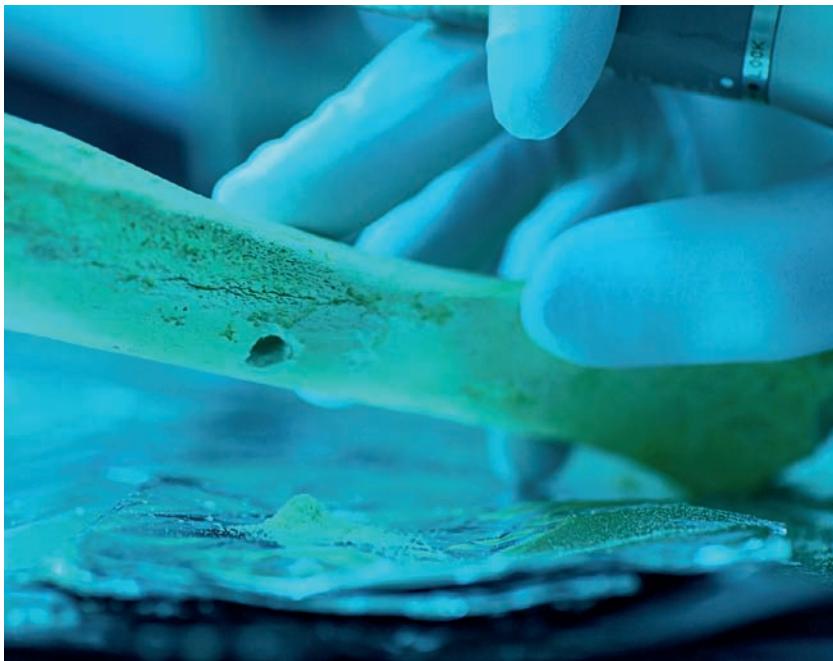
Gaz polluant provenant de la combustion du charbon et des activités minières, le mercure retombe dans l'océan, où il contamine la chaîne alimentaire marine. Contrairement à ce qui était imaginé jusqu'à présent, ce n'est pas sa dissolution dans les eaux de pluie qui contribue majoritairement à l'apport de mercure. Des chercheurs de l'IRD (Institut de recherche pour le développement) et du CNRS (Centre national de la recherche scientifique) ont découvert que l'océan en « respire » une bonne part, c'est-à-dire que le mercure est absorbé par l'océan pour moitié lors d'échanges gazeux. Ils ont mis en évidence ainsi que les plantes terrestres filtrent une partie du mercure transporté par la pluie, mais sans effet sur la baisse de la contamination des poissons pour le moment. Cela dit, de par les engagements de diminution des émissions de ce gaz de la convention de Minamata sur le mercure, entrée en vigueur en 2017, l'observation d'une moindre contamination des poissons, donc un impact positif sur la santé humaine, est attendue. M. C.

Pour en savoir plus : <https://www.ird.fr/sur-les-traces-du-mercure-oceanique>

Étude de la contamination aux métaux lourds de poissons démersaux des Seychelles. © IRD / T. Vergoz.



Paléontologie \ Biologie-science des matériaux



Des chercheurs de l'institut Max-Planck (Allemagne) ont analysé l'ADN extrait de restes humains préhistoriques à la recherche d'indices génomiques de liens de parenté.

© Max-Planck Institute for Evolutionary Anthropology.

Les Hommes préhistoriques ne se reproduisaient pas entre cousins

Les mariages entre cousins sont réprouvés par la plupart des sociétés humaines d'aujourd'hui. Mais qu'en était-il il y a des milliers d'années ? Pour le savoir, des scientifiques de l'institut Max-Planck (Allemagne) et de l'université de Chicago (États-Unis) ont analysé les données génétiques de 1 785 individus ayant vécu ces 45 000 dernières années. Pour apprécier le degré de parenté des géniteurs d'un individu, ils ont comparé ses chromosomes. Plus les deux chromosomes d'une même paire présentent de longues régions identiques, plus les parents sont proches génétiquement, donc potentiellement de la même famille. De fait, chaque paire de chromosomes est constituée d'un

exemplaire maternel et d'un autre paternel. Les chercheurs ont découvert très peu d'accouplements entre individus de la même famille lors de leurs analyses. Seul l'ADN (acide désoxyribonucléique) de 54 individus montre que leurs parents étaient cousins. Ces 54 individus ne vivaient ni à la même époque ni au même endroit. Cela met en évidence que la reproduction entre cousins était un événement rare, y compris dans les petites populations de chasseurs-cueilleurs d'il y a plus de 10 000 ans. M. C.

Pour en savoir plus : <https://www.mpg.de/17505368/0914-evan-prehistoric-humans-rarely-mated-with-their-cousins-150495-x?c=2249>

La super-colle de la moule

Une équipe internationale dirigée par l'Université McGill (Canada) a réussi, au terme d'une dizaine d'années de travail, à identifier les mécanismes cellulaires aboutissant à la production d'une colle sous-marine très puissante permettant aux moules de se fixer aux rochers et à leurs congénères. Elle a découvert que des protéines liquides contenues dans de petites vésicules sont acheminées vers des cuticules à l'intérieur du pied de la moule. Là, des ions métalliques (fer et vanadium, extraits de l'eau de mer) sont relâchés lentement et se mélègent aux protéines liquides pour former la colle solide en deux à trois minutes seulement. Les chercheurs pensent que le vanadium, que très peu d'organismes sont capables d'hyperaccumuler, joue un rôle essentiel dans le durcissement de la colle. Ce mécanisme pourrait inspirer les scientifiques à la recherche de la formule adéquate permettant de créer des matériaux adhésifs efficaces en milieu humide, pour des opérations chirurgicales ou des soins dentaires par exemple. M. C.

Pour en savoir plus : <https://www.mcgill.ca/newsroom/fr/channels/news/comment-les-moules-fabriquent-une-colle-sous-marine-puissante-333875>

Prix Nobel 2021

Physiologie / médecine

Les Américains David Julius (65 ans) et Ardem Patapoutian (54 ans) se partagent le prix Nobel de physiologie ou de médecine pour leur découverte des récepteurs à l'origine de la perception de la chaleur, du froid et des forces mécaniques. Des travaux qui, au-delà de leur aspect fondamental, pourraient conduire à des avancées majeures dans le domaine du traitement de la douleur.

PAR JEAN-PHILIPPE BRICKA, MÉDIATEUR SCIENTIFIQUE, UNITÉ SCIENCES DE LA VIE DU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

Répérer une proie, échapper à un prédateur ou admirer tout simplement le rouge vif d'une rose et s'enivrer de son parfum... Aucune de ces actions ne serait possible sans la présence, chez l'Homme et la plupart des animaux, d'un système efficace leur permettant de se faire une représentation du monde qui les entoure et de leur propre corps. Basée sur l'activité des sens, cette perception implique de pouvoir transformer les divers types d'informations (lumineuses, chimiques, mécaniques...) provenant de l'environnement et de l'organisme sous une forme exploitable par le cerveau. Chaque sens dispose ainsi de récepteurs spécifiques capables de traduire ces stimuli en impulsions électriques. Générés dans les neurones sensoriels, ces influx nerveux sont transmis ensuite aux différentes zones du système nerveux central chargées de leur traitement. Si certains de ces récepteurs, comme ceux de la vision ou de l'olfaction, sont connus et étudiés depuis longtemps, d'autres ont été plus difficiles à identifier. Les thermorécepteurs, sensibles au chaud et au froid, et les récepteurs du toucher n'ont été découverts respectivement par David Julius et Ardem Patapoutian qu'en 1997 et 2010. Des travaux qui valent aujourd'hui aux deux scientifiques américains de se partager le prix Nobel de physiologie ou de médecine.

DES RECHERCHES ÉPICÉES

Pourquoi le piment, et plus particulièrement son principe actif la capsaïcine, provoque-t-il une sensation de brûlure ? Grâce aux travaux de Julius, nous savons désormais que c'est parce que ces deux stimuli

activent les mêmes récepteurs. En effet, c'est en cherchant, au début des années quatre-vingt-dix, à déchiffrer les mécanismes d'action de la capsaïcine que le chercheur américain a mis au jour une toute nouvelle famille de récepteurs sensibles à la chaleur. À cette époque, l'activation par la capsaïcine de cellules nerveuses responsables de la sensation de douleur est un phénomène déjà connu. Mais la manière dont ce composé agit réellement et produit un influx nerveux reste un mystère. Julius et son équipe de l'université de Californie à San Francisco décident de constituer alors une sorte de « bibliothèque » contenant un grand nombre de gènes exprimés dans ces neurones sensoriels « sensibles » à la douleur. Ils partent du principe que l'un d'entre eux doit coder pour la protéine ciblée par la capsaïcine. Après avoir fait s'exprimer ces différents gènes les uns après les autres dans des cellules cultivées ne réagissant normalement pas à la capsaïcine, ils finissent par en identifier un capable de rendre ces cellules sensibles au composé. En poursuivant leurs travaux, ils démontrent que le gène en question code pour un canal ionique, qu'ils nomment TRPV1 (pour *transient receptor potential vanilloid 1*).

Mais les scientifiques constatent surtout qu'au-delà de la capsaïcine et d'autres composés similaires de la famille des vanilloïdes, comme la vanilline, le récepteur se révèle sensible également à des températures élevées, supérieures à 44 °C. L'analyse de sa structure dévoile que lorsqu'il est confronté à l'un de ces stimuli, le canal ionique, enchâssé dans la membrane de neurones sensoriels innervant la peau, modifie sa



David Julius.
© Photo12 / Alamy / UPI.



Ardem Patapoutian.
© Scripps Research.

conformation. Ce changement de forme entraîne son ouverture et l'entrée massive, dans la cellule, d'ions calcium et sodium à l'origine de l'influx nerveux. En appliquant la même méthode à d'autres composés, comme ceux du wasabi ou du menthol, l'équipe de Julius découvre ensuite toute une série de récepteurs sensibles à différentes gammes de température, parmi lesquels TRPM8 (pour *transient receptor potential cation channel subfamily M member 8*) activé par le froid.

LE TOUCHER DÉVOILÉ

Après avoir participé, indépendamment de Julius, aux recherches sur les thermorécepteurs, Patapoutian, second lauréat du prix Nobel, se concentre sur la découverte des récepteurs du toucher au début des années deux mille. Là encore, le travail entrepris par le scientifique et son équipe de l'institut de recherche Scripps à La Jolla, en Californie, est long et minutieux. La première étape consiste à repérer, puis à cultiver en laboratoire des cellules capables de produire un influx nerveux en réponse à une force mécanique exercée à l'aide d'une micropipette. Partant du principe que le récepteur traqué est également un canal ionique, l'équipe sélectionne alors soixante-douze gènes candidats inactivés les uns après les autres dans la cellule modèle. Après un an de travail, elle finit par identifier, en 2010, un gène dont l'inactivation supprime la réponse de la cellule à la pression exercée par la micropipette. Le premier récepteur du toucher vient d'être découvert. Nommé Piezo1, en référence au terme grec signifiant « pression » (*píesi*), il est suivi rapidement de Piezo2, identifié peu de temps après.

Suite à ces travaux, d'autres études mettent en évidence le rôle joué par ces récepteurs dans la régulation de divers processus biologiques cruciaux nécessitant la détection de forces mécaniques, comme la pression artérielle, la respiration ou le contrôle de la vessie. Enfin, en 2014, une équipe américaine démontre de son côté l'implication de Piezo2 dans la proprioception, un sens qui informe notre cerveau de la position précise de chacun de nos membres.

LA DOULEUR EN LIGNE DE MIRE

Les travaux récompensés cette année ont conduit sans conteste à une meilleure compréhension de la manière dont nous percevons notre environnement et notre propre corps. Mais les récepteurs découverts par les deux scientifiques américains constituent également des cibles de choix dans la lutte contre diverses pathologies, responsables notamment de douleurs chroniques. Car au-delà de leur rôle dans la perception de la chaleur et du froid, les thermorécepteurs contribuent aussi, via les voies de la nociception, à la perception de la douleur, lors d'une brûlure par exemple. Certains d'entre eux sont impliqués également dans l'hypersensibilité à la chaleur ou dans les douleurs ressenties en cas d'inflammation. Et les récepteurs du toucher ne sont pas en reste. Ainsi, Piezo2 fait l'objet actuellement de recherches ciblant certains troubles liés à la proprioception ou au phénomène d'allodynie, qui transforme un stimulus normalement indolore, comme le simple contact des vêtements, en véritable torture. Autant de pistes qui, de l'aveu même des deux nobélisés, nécessiteront encore quelques années de travail avant d'aboutir à des traitements. J.-P. B.

Prix Nobel 2021

Physique

Le prix Nobel de physique de l'année 2021 a été décerné pour moitié à l'Italien Giorgio Parisi (73 ans) pour la découverte du jeu de désordre et des fluctuations dans les systèmes physiques. L'autre moitié a couronné l'Allemand Klaus Hasselmann (89 ans) et le Japonais Syukuro Manabe (90 ans) pour leurs travaux sur la modélisation du climat et la prédition du réchauffement climatique.

PAR KAMIL FADEL, RESPONSABLE, UNITÉ PHYSIQUE DU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

L'histoire du prestigieux prix Nobel montre que le lien entre les deux moitiés d'une récompense partagée n'est pas toujours très fort. C'est le cas en 2021. Malgré tout, comme le comité Nobel l'a indiqué, ce prix vient saluer globalement des travaux portant sur la compréhension des systèmes physiques dits complexes et leur étude à différentes échelles.

Un tel système est formé d'un nombre important d'éléments en interaction. En raison de ces interactions multiples et enchevêtrées, l'évolution du système est *a priori* difficile, voire impossible à prédire et son comportement réserve souvent des surprises, car il n'est pas à l'image de celui de chacune de ses parties. Le comportement individuel de chaque fourmi est très différent de celui global et cohérent de la colonie. La cohérence émerge du désordre et des fluctuations. « Le tout est plus que la somme des parties » écrivait déjà Aristote (384-322 av. J.-C.). Nettement plus proche de nous, l'Américain Philip Anderson (1923-2020), prix Nobel de physique en 1977, exprime cela par la maxime devenue célèbre : « More is different » (« Plus c'est différent »). Bien que ce genre de système soit omniprésent, de la circulation routière aux nuées d'étourneaux, en passant par l'évolution du climat et le comportement des atomes dans un matériau magnétique, la science moderne née au XVII^e siècle s'est fixée comme stratégie d'étudier la nature selon le précepte cartésien à travers une approche réductionniste.

Cependant, malgré ses succès et son intérêt, cette approche est insuffisante pour appréhender le comportement des systèmes complexes et prédire leur évolution, y compris avec les outils standards de la physique statistique. C'est la raison pour laquelle la science de la complexité, dont les bases ont été jetées il y a près de cinquante ans, constitue un tournant épistémologique, salué cette année par l'Académie royale des sciences de Suède avec l'attribution du prix aux trois lauréats. En un mot, alors que les travaux de Syukuro Manabe et

Klaus Hasselmann portent sur un exemple de système complexe – le climat –, ceux de Giorgio Parisi sont au cœur de l'étude de ces systèmes de manière générale et montrent comment il est possible de réaliser des prédictions malgré le désordre et les fluctuations.

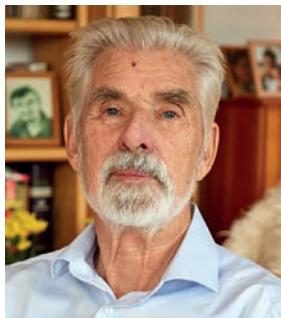
PARISI, DES VERRES DE SPIN À LA COVID-19

Un matériau non aimantable dans lequel des atomes possédant un moment magnétique, comme le fer, auraient été dispersés au hasard est appelé *verre de spin*. « Verre » pour évoquer le désordre (le verre n'étant pas un solide cristallin), les atomes de fer et leurs moments magnétiques ne suivant aucun ordre, chacun étant influencé différemment par les autres. « Spin », car le moment magnétique est dû essentiellement au spin. Dans un verre de spin à température ambiante, les spins cherchent à s'orienter de la manière la plus favorable afin de tenter de minimiser l'énergie potentielle due aux multiples interactions entre les spins. Cependant, cela crée de la *frustration*, tous les atomes ne pouvant être « satisfaits ». En effet, supposons qu'il y ait seulement trois atomes disposés aux sommets d'un triangle. Sachant que les spins opposés abaissent l'énergie, alors que ceux dans le même sens la rehaussent, deux des trois seront forcément dans le même sens, donc... dans le mauvais sens, d'où l'emploi du terme *frustration* par les physiciens.

Dans un système comportant bien plus que trois atomes, la situation devient nettement plus complexe et le nombre de frustrés plus élevé. De plus, il existe de multiples configurations de même énergie ou d'énergie proche, sans qu'aucun minimum global ne soit identifiable. Dans ces conditions, comment prédire la configuration finale, c'est-à-dire la manière dont les spins s'agenceront lorsque le système sera abandonné à lui-même ? Quel sera son état d'équilibre ? Pourra-t-il évoluer facilement vers un autre ? Lequel ? Ce sont les questions auxquelles les physiciens s'intéressent dans les années soixante-dix. Une méthode astucieuse pour étudier ce genre de



Giorgio Parisi.
© Photo12 / Alamy / IPA.



Klaus Hasselmann.
© Photo12 / Picture Alliance.



Syukuro Manabe.
© Photo12 / Alamy / UPI.

système consiste à en fabriquer des répliques, afin de pouvoir l'observer dans de nombreuses configurations. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux de Parisi. En 1979, il montre qu'en dépit des apparences, toutes les configurations ne sont pas équivalentes en matière de désordre. Un paramètre qu'il imagine à partir de considérations théoriques, destiné à mesurer l'écart entre deux répliques, permet de classer alors les désordres en familles, groupes, sous-groupes... comme dans un arbre phylogénétique reliant les espèces les unes aux autres. Ce travail effectué, il devient plus facile de déduire certaines propriétés fondamentales du système telles que son entropie, ses transitions, son évolution... La méthode développée par Parisi possède une portée universelle dans la mesure où elle peut s'appliquer à tous les systèmes complexes, tant et si bien que la manière dont la Covid-19 (maladie à coronavirus 2019) se répand est un exemple que l'Italien approfondit actuellement. Elle permet d'étudier aussi des problèmes comme celui du voyageur de commerce*.

MANABE ET HASSELMANN, L'ÉVOLUTION DU CLIMAT

Météorologue de formation, le Japonais Manabe s'intéresse aux systèmes complexes au cours des années soixante, en particulier au climat. Avec son collègue Richard Wetherald (1936-2011), il met au point le tout premier modèle informatique reliant la sensibilité de l'évolution climatique aux variations du taux de dioxyde de carbone (CO_2 , gaz à effet de serre) atmosphérique. Ne prenant en considération qu'une seule colonne d'air, leur modèle s'appuie d'une part sur l'énergie reçue par la Terre sous forme de rayonnement solaire, d'autre part sur l'énergie renvoyée par le ciel et les nuages, la différence correspondant à l'énergie atteignant le sol. Il tient compte également de la présence de vapeur d'eau – un gaz à effet de serre dont la concentration augmente avec la température – et des

mouvements de convection, l'air frais descendant au profit de l'air chaud ascendant. Manabe parvient à la conclusion que le réchauffement climatique est inéluctable compte tenu des rejets anthropiques de ce gaz à effet de serre et montre qu'un doublement du taux de CO_2 atmosphérique devrait provoquer un réchauffement de 2,4 °C. Aujourd'hui encore, presque tous les modèles climatiques s'appuient sur les travaux pionniers de Manabe. À ce sujet, il convient de souligner qu'une étude menée en 2015 a mis en évidence que la publication la plus citée dans ce domaine est justement celle de Manabe et Wetherald... remontant pourtant à 1967.

Près de dix ans plus tard, Hasselmann introduit du bruit dans le modèle de Manabe, c'est-à-dire des fluctuations de paramètres ignorées par le Japonais par souci de simplification. Il s'inspire en partie des travaux d'Albert Einstein (1879-1955) sur le mouvement brownien d'un petit grain de pollen dans une goutte d'eau. En effet, Hasselmann suppose qu'il serait possible de comparer le climat au grain de pollen et, à une autre échelle, les variations rapides de la météorologie à l'agitation aléatoire des molécules. Selon lui, le climat possède une variabilité interne indépendante des causes extérieures comme le rayonnement solaire et son évolution serait une réponse aux stimulations météorologiques fluctuantes. Hasselmann montre ainsi que les variations météorologiques sur une échelle de temps de quelques jours peuvent influer sur l'océan sur une échelle de temps de plusieurs années. Il introduit l'interaction de l'atmosphère avec les océans dans ses propres modèles et met en évidence que les prédictions de Manabe relatives au réchauffement climatique sont fiables. Par ailleurs, Hasselmann développe une méthode permettant d'identifier la part des différents facteurs influençant le climat – des signaux qu'il désigne par *empreinte digitale* – et révèle l'importance de la part anthropique. K. F.

* Il s'agit d'un problème d'optimisation pour déterminer le plus court voyage passant une et une seule fois par les villes d'une liste.

Prix Nobel 2021

Chimie

Le prix Nobel de chimie 2021 a été attribué à l'Allemand Benjamin List (53 ans) et au Britannique David W. C. MacMillan (53 ans) pour avoir développé, indépendamment l'un de l'autre, un nouveau type de catalyse : l'organocatalyse asymétrique. Ce procédé permet l'accélération de réactions chimiques via l'ajout d'un composé organique. Si le faible coût et la toxicité réduite des catalyseurs organiques suffisent à expliquer l'engouement suscité, c'est aussi leur capacité à conduire des synthèses asymétriques qui est saluée par ce Nobel.

PAR CLAIRE JOSSE, MÉDIATRICE SCIENTIFIQUE, UNITÉ CHIMIE DU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

La chimie est une science qui étudie la matière et ses transformations. L'un de ses enjeux consiste à synthétiser des molécules utiles au quotidien, dans des domaines tels que l'énergie, la santé... Un objectif simple sur le papier, mais qui l'est moins en laboratoire.

LA CATALYSE, OU MIEUX CONTRÔLER, TOUJOURS PLUS VITE

Obtenir les nouvelles molécules souhaitées n'est pas toujours une mince affaire. Certaines transformations de la matière ne sont pas spontanées, d'autres peuvent être très lentes ou mener à l'apparition de sous-produits indésirables... Pour surmonter certaines de ces difficultés, les chimistes ont développé des outils, comme les catalyseurs organiques*. Le rôle d'un catalyseur est de jouer sur la vitesse de la réaction chimique, en général pour l'accélérer. En outre, certains catalyseurs permettent de favoriser la synthèse d'un produit plutôt qu'un autre : on parle alors de catalyse asymétrique. Avant l'organocatalyse, qui se développe à grande vitesse depuis les années deux mille, deux types de catalyseurs étaient utilisés majoritairement : les enzymes et les métaux.

LIST ET LE RETOUR DE LA PROLINE OUBLIÉE

Les enzymes sont des protéines (grosses molécules constituées d'une ou de plusieurs longues chaînes de centaines d'acides aminés) dotées de propriétés catalytiques. Dans chaque être vivant, ce sont les enzymes qui dirigent et accélèrent les réactions chimiques complexes nécessaires à la vie. Il n'est pas étonnant que ces catalyseurs naturels à l'efficacité redoutable aient inspiré les chimistes.

C'est justement en réfléchissant aux enzymes et à leurs propriétés catalytiques que Benjamin List ouvre la voie à l'organocatalyse. Il remarque que dans de nombreuses réactions catalysées par des enzymes, seul un acide aminé ou une poignée participent en réalité au processus. Cette constatation établie, une question vient naturellement : ces acides aminés doivent-ils faire partie de l'enzyme pour catalyser la réaction chimique ou peuvent-ils conserver leur efficacité catalytique hors de l'enzyme ? Reprenant des travaux des années soixante-dix sur la proline, List teste l'efficacité de cet acide aminé comme catalyseur dans des réactions, dont celle d'aldolisation. L'expérience rencontre un double succès : la proline est un catalyseur efficace et démontre un potentiel dans la catalyse dite asymétrique.

En effet, au cours de la synthèse d'une nouvelle molécule, il arrive que deux structures différentes se forment. Images l'une de l'autre dans un miroir, mais non superposables – comme nos mains gauche et droite –, ces deux molécules aux atomes identiques et à la structure distincte sont appelées énantiomères. Cette différence de conformation entraîne une différence de propriétés.

* Les molécules dites organiques sont constituées d'atomes de carbone et d'hydrogène, ainsi que d'autres atomes comme l'oxygène, l'azote, le chlore, le phosphore, le soufre...



Benjamin List.
© Photo12 / Alamy / UPI.



David W. C. MacMillan.
© Photo12 / Alamy / UPI.

Dans le domaine pharmaceutique, il n'est pas rare que seul l'un des deux énantiomères soit le produit recherché. Pouvoir guider la réaction afin de ne synthétiser majoritairement que l'énantiomère souhaité (synthèse dite asymétrique) représente un gain écologique et financier en diminuant la quantité de déchets produits, tout en limitant le risque de produire des énantiomères aux effets indésirables ou dangereux.

La proline se révèle ainsi être un merveilleux exemple d'organocatalyseur : une petite molécule bon marché et à faible impact écologique, permettant de ne synthétiser rapidement que le produit désiré. List publie sa découverte en février 2000.

MACMILLAN, LA QUALITÉ DES MÉTAUX... SANS LE MÉTAL

C'est quasi simultanément, en janvier 2000, que David W. C. MacMillan soumet pour publication un article de recherche sur ce même nouveau type de catalyse, qu'il nomme organocatalyse. Un concept identique, mais résultant d'une approche différente. Ce sont les catalyseurs métalliques qui servent ici de point de départ. De par leur capacité à fournir ou stocker temporairement et facilement des électrons au cours d'une réaction chimique, les métaux constituent d'excellents catalyseurs, facilitant la rupture et la formation de liaisons covalentes. Néanmoins, les métaux peuvent être onéreux, nocifs pour l'environnement et complexes à utiliser (car sensibles à la présence d'oxygène et d'humidité). Ce qui explique qu'ils soient relativement peu utilisés dans l'industrie malgré l'intérêt suscité dans le monde de la recherche.

Fort de ce constat, MacMillan laisse derrière lui les catalyseurs métalliques tout en s'en inspirant. Son idée de génie ? Concevoir des molécules organiques présentant des propriétés similaires aux catalyseurs métalliques. Ses connaissances en chimie l'incitent à chercher du côté des iminiums. Un sel d'iminium est un composé organique dont la structure s'organise autour d'une double liaison reliant un atome de carbone à un atome d'azote. Ce dernier possède une forte affinité pour les électrons, ce qui lui confère un intérêt non négligeable dans les procédés catalytiques, comme certains métaux.

MacMillan conçoit et teste comme catalyseur plusieurs molécules capables de former un ion iminium. Le succès est au rendez-vous, certaines de ces molécules organiques démontrant un fort potentiel pour la catalyse asymétrique : sur les deux énantiomères possibles produits au cours de la réaction, un seul l'est rapidement et majoritairement, à plus de 90 %.

Ainsi, ces deux découvertes de l'an 2000 ont ouvert la voie de l'organocatalyse asymétrique, qui connaît depuis un essor extraordinaire. Toujours pionniers dans ce domaine, les deux lauréats ont créé depuis une multitude de nouveaux catalyseurs organiques, qui peuvent servir dans une grande variété de réactions chimiques. Ce prix Nobel récompense une avancée fantastique pour rendre la pratique de la chimie plus verte. Cette découverte a un impact formidable dans de nombreux domaines, en particulier celui pharmaceutique qui requiert fréquemment des catalyses asymétriques. C. J.

Phénomènes intéressants 2022

Cet hiver nous permet de distinguer l'ensemble des planètes, partagées entre coucher et lever du Soleil. Au début, Jupiter, Saturne et Mercure occupent le ciel du couchant, tandis que Mars et Vénus accompagnent le lever du Soleil. L'équinoxe de printemps dans l'hémisphère nord annonce la fin des longues nuits ; Jupiter disparaît derrière le Soleil. Profitez donc du début d'année pour observer les planètes.

PAR ANDY RICHARD ET ÉDOUARD RICHARD, MÉDIATEURS SCIENTIFIQUES, UNITÉ ASTRONOMIE-ASTROPHYSIQUE DU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

Janvier-Février-Mars

Il y a...

17 ans

Le 14 janvier 2005, après pratiquement sept ans de voyage, la sonde européenne *Huygens* atterrissait sur le sol de Titan, la plus grosse lune de Saturne. Pourvu d'une atmosphère dense, dont les processus physiques sont proches de ceux de la Terre, Titan devient le quatrième monde extraterrestre exploré par l'humanité après la Lune, Mars et Vénus. Les mesures collectées par *Huygens* dévoilent un monde aux reliefs familiers : des lacs asséchés, un paysage côtier et ses grappes d'îles baignant dans un matériau bien plus exotique, une mer de méthane. **É. R.**



Vénus, Mars et la Lune vues depuis Paris le 29 janvier 2022 à 7 h 00, heure locale.

Logiciel libre Stellarium GNU General Public License.

- **1^{ER}** : la Lune passe au périgée (distance minimale à la Terre) à 22 h 51 à 358 033 km.
- **4** : au coucher du Soleil, Saturne et Mercure se trouvent au-dessus de l'horizon sud-ouest. Entre les deux planètes, un mince croissant de Lune les accompagne. Jupiter se situe à l'est des trois astres.
- **6** : Jupiter, Saturne et Mercure sont visibles dans le ciel du couchant. C'est à l'est de Jupiter que le croissant de Lune, plus important, est retrouvé cette fois.
- **14** : la Lune passe à l'apogée (distance maximale à la Terre) à 9 h 26 à 405 805 km.
- **29** : en toute fin de nuit, la lumière vive de Vénus qui accompagne Mars au-dessus de l'horizon sud-est est retrouvée. Les deux planètes sont approchées par un dernier croissant de Lune. Les trois astres disparaissent ensemble dans la lumière du Soleil levant.
- **30** : la Lune passe au périgée à 6 h 34 à 362 252 km. **A. R.**

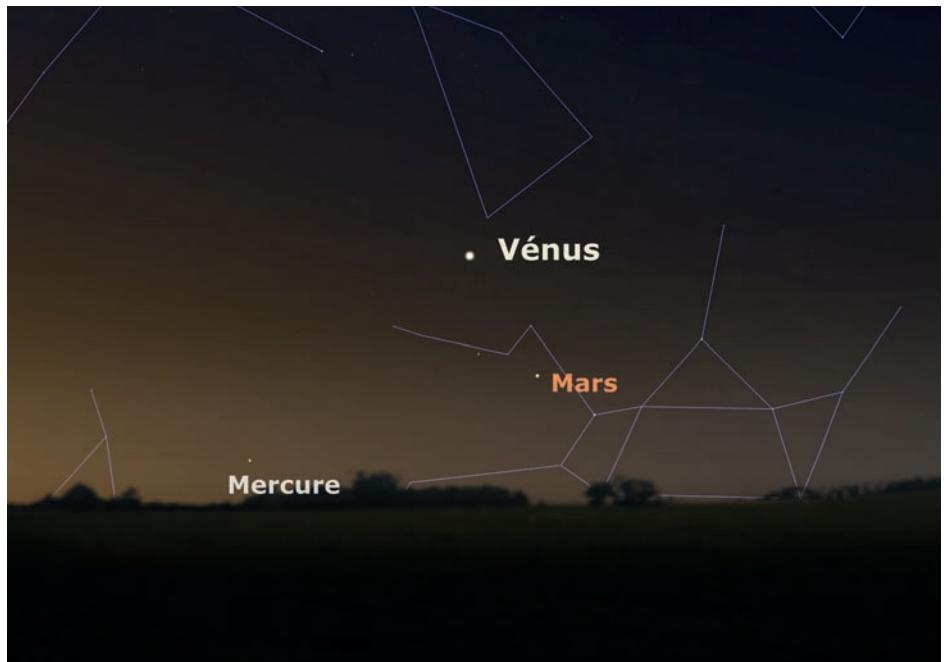


Janvier-Février-Mars

Il y a...
92 ans

Le 18 février 1930, la comparaison des différentes photographies prises par le télescope de l'observatoire Lowell (Arizona) permet à Clyde Tombaugh (1906-1997) de constater qu'un objet change de position par rapport aux étoiles situées en arrière-plan. Son équipe annonce la découverte de Pluton, neuvième planète du Système solaire. Mais depuis une trentaine d'années, la détection de nombreux objets situés au-delà de l'orbite de Neptune, aux dimensions proches de celles de Pluton, remet en question son statut de planète. En 2006, l'Union astronomique internationale décide que pour être une planète, un objet doit éliminer de son voisinage tous les autres objets de taille comparable à la sienne. Pluton est déclassée et rangée dans la catégorie des planètes naines.

É. R.



Vénus, Mars et Mercure vues depuis Paris le 13 février 2022 à 7 h 00, heure locale.

Logiciel libre Stellarium GNU General Public License.

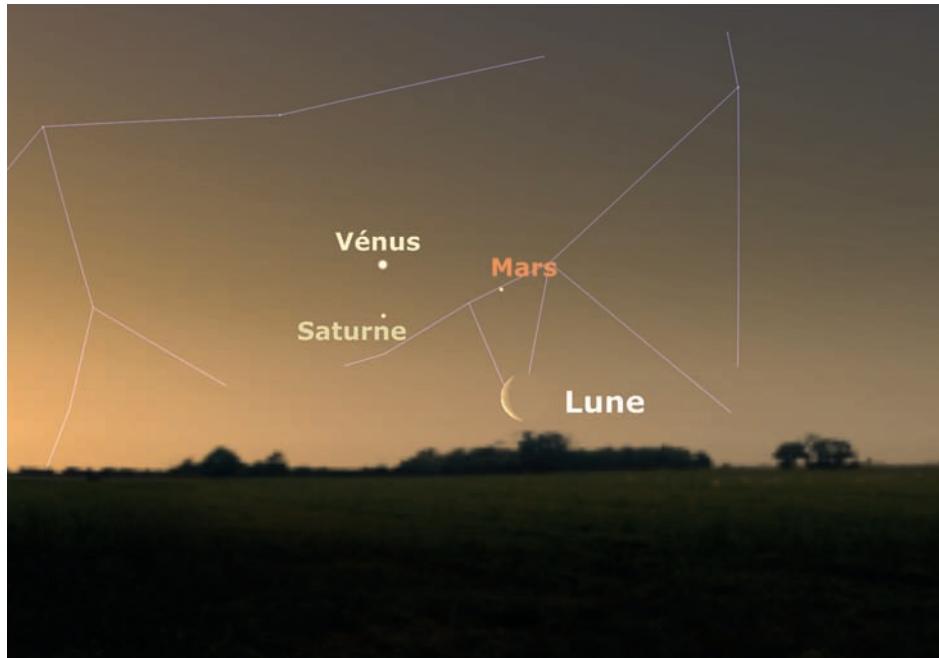
- **2** : au coucher du Soleil, Jupiter est visible au-dessus de l'horizon sud-ouest. Sous la planète se cache un mince croissant de Lune.
- **11** : la Lune passe à l'apogée à 2 h 36 à 404 897 km.
- **13** : au petit matin, Vénus et Mars s'accompagnent l'une l'autre juste au-dessus de l'horizon sud-est. Peu avant le lever du Soleil, Mercure les rejoint pour un magnifique triangle planétaire.
- **26** : la Lune passe au périhélie à 22 h 29 à 367 789 km.
- **27** : dans la même configuration que le matin du 13 février, Vénus et Mars se retrouvent dans les lueurs du levant. Elles sont accompagnées cette fois par un dernier croissant de Lune, tandis que Mercure se cache dans la lumière du Soleil levant. **A. R.**

Sauf contre-indication, les heures sont données en temps universel. Il convient d'ajouter une heure pour obtenir l'heure légale, puis deux heures à partir du 27 mars. Les distances angulaires exprimées lors des rapprochements entre les planètes, ainsi qu'entre la Lune ou le Soleil (depuis leur centre) et les planètes, correspondent à des conjonctions en ascension droite et sont calculées pour un observateur situé au centre de la Terre.

Janvier-Février-Mars

Il y a...
367 ans

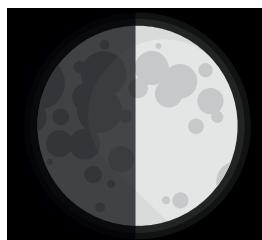
Lors de la nuit du 25 mars 1655, Christian Huygens (1629-1695), équipé d'un télescope de sa propre manufacture, découvre un point brillant au plus près des anneaux de Saturne. Traquant son mouvement les nuits suivantes, il met en évidence la révolution de l'objet autour de la planète : ce point brillant n'est autre que la lune Titan. L'année suivante, Huygens établira que les « oreilles » de Saturne observées par Galilée (1564-1642) sont en réalité un « anneau plat et mince ». É. R.



Vénus, Mars, Saturne et la Lune vues depuis Paris le 28 mars 2022 à 7 h 00, heure locale. Logiciel libre Stellarium GNU General Public License.

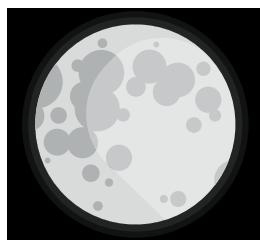
- 10 : la Lune passe à l'apogée à 22 h 56 à 404 268 km.
- 12 : au lever du jour, Vénus et Mars nous offrent un nouveau rapprochement au-dessus de l'horizon sud-est. Une troisième planète se lève juste avant le Soleil : Saturne, qui réapparaît dans le ciel après une opposition en février.
- 20 : équinoxe de printemps dans l'hémisphère nord, la durée du jour est égale à celle de la nuit. Ce jour, le Soleil franchit l'équateur céleste et passe dans l'hémisphère nord.
- 23 : la Lune passe au périgée à 23 h 41 à 369 760 km.
- 28 : le lever du jour offre un spectacle saisissant. Vénus, Saturne et Mars sont approchées par un mince croissant de Lune. Les quatre astres disparaissent ensemble dans la lumière du Soleil levant. A. R.

Phases de la Lune



PREMIER QUARTIER

JANVIER	FÉVRIER
9 18H 11	8 13H 50
MARS	
10 10H 45	



PLEINE LUNE

JANVIER	FÉVRIER
17 23H 48	16 16H 56
MARS	
18 7H 18	

Images : Freepik.com.

Visibilité des planètes (à l'œil nu)

Les positions des planètes, de la Lune et du Soleil sont représentées sur l'écliptique à travers les constellations du zodiaque pour le 15 du mois. Cette disposition permet d'appréhender la proximité de certaines planètes avec le Soleil. Les astres situés à l'est du Soleil sont observables au coucher, ceux situés à l'ouest sont visibles au lever.

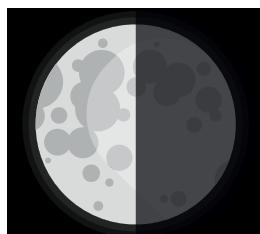
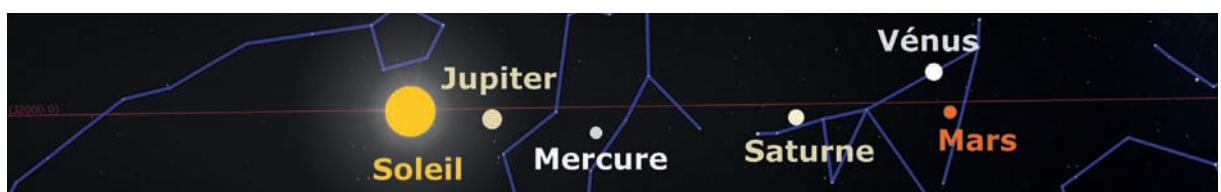
JANVIER FÉVRIER MARS AVRIL MAI JUIN JUILLET AOÛT SEPTEMBRE OCTOBRE NOVEMBRE DÉCEMBRE



JANVIER FÉVRIER MARS AVRIL MAI JUIN JUILLET AOÛT SEPTEMBRE OCTOBRE NOVEMBRE DÉCEMBRE



JANVIER FÉVRIER MARS AVRIL MAI JUIN JUILLET AOÛT SEPTEMBRE OCTOBRE NOVEMBRE DÉCEMBRE



DERNIER QUARTIER

JANVIER 25^{13H}₄₁ FÉVRIER 23^{22H}₃₂
MARS 23^{22H}₃₂



NOUVELLE LUNE

JANVIER 2^{18H}₃₃ FÉVRIER 1^{ER} 5^H₄₆
MARS 2^{17H}₃₅

FORMATION DES CHAÎNES DE MONTAGNES DE L'EUROPE HERCYNIENNE

Une nouvelle approche

L'existence du supercontinent Pangée est relativement bien connue, notamment car ce regroupement massif de tous les continents actuels a accueilli les premiers pas des dinosaures, avant de se fragmenter suite à la formation des océans Atlantique et Indien. En revanche, l'histoire de sa genèse est traitée moins souvent et mérite pourtant que l'on se penche sur ses conséquences en Europe : la formation de la chaîne hercynienne, un ensemble de montagnes imposantes et complexes.

PAR OLIVIER COULON,
MÉDIATEUR SCIENTIFIQUE,
UNITÉ GÉOSCIENCES
DU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

Monts d'Arrée au Roc'h Trevezel.

© M. Rivrin / Getty Images.



La Pangée est née de la suture ultime entre trois grandes masses continentales : Laurussia au nord, Gondwana au sud et Sibérie – avec les blocs intermédiaires chinois et kazakh – à l'est (fig. 1). D'imposants reliefs montagneux ont souligné jadis ces zones de collision : les Appalaches aux États-Unis (en Virginie et Caroline du Nord), la chaîne hercynienne⁽¹⁾ en Europe et l'Oural en Russie. Pour ce qui concerne notre continent, cette collision s'avère complexe et suscite des interprétations parfois contradictoires. Des modèles récents tentent de résoudre ce dilemme en apportant un éclairage nouveau sur ces chaînes de montagnes, particulièrement bien documentées en France.

Apprendre à reconnaître de vieilles montagnes

RELIEFS TROMPEURS

Puisqu'un bon dessin vaut mieux qu'un long discours, utilisons une bande dessinée de l'humoriste Jean-Marc Reiser (1941-1983) en guise d'introduction⁽²⁾. Dans la série *La famille Oboulot en vacances* (1989), un père demande à son fils, devant un paysage de sommets d'altitude moyenne aux contours arrondis, s'il s'agit de montagnes jeunes ou anciennes. Très sûr de lui, l'enfant affirme qu'elles sont anciennes, car remplies de vieux randonneurs en Pataugas qui mangent des œufs durs sous les sapins. Le père s'enquiert alors de la définition d'une montagne récente. Le fils répond qu'une montagne jeune est pleine de skieurs, de remontées mécaniques, d'alpinistes japonais,

de boîtes de nuit et de pizzerias. Et l'adulte de conclure que le raisonnement est fantaisiste, mais la description géologiquement exacte...

En réalité, elle ne l'est pas totalement. Si le parallèle entre l'âge des touristes et celui de la montagne fonctionne du point de vue humoristique, c'est parce qu'il implique aussi que les reliefs de massifs anciens tels que les Vosges ou le Massif central (appartenant à la chaîne hercynienne) sont bien moins imposants que ceux des Alpes ou de l'Himalaya (formés trois cent millions d'années après les précédents). Que dire alors des Ardennes ou du Massif armoricain, qui partagent la même identité géologique sans être assimilés spontanément à des montagnes ? A contrario, les reliefs alpins récents du cap Corse (au nord-est) sont bien moins élevés que ceux de la Corse centrale (du nord-ouest au sud-est), qui relève également de cette histoire ancienne. Vous l'aurez compris, le relief observé actuellement n'est pas un indice suffisant pour juger s'il y a orogenèse (élaboration d'une chaîne de montagnes), encore moins pour déterminer son âge.

Déjà, il va de soi que l'érosion, qui rabote inlassablement les sommets, n'agit pas uniformément à la surface de notre planète. Mais surtout, la formation de volcans ou de bassins d'effondrement (dont les bords remontent) constituent des phénomènes créateurs de reliefs, qui ne sont pas assimilables à des montagnes au sens tectonique. Ainsi, l'altitude actuelle des Vosges et du Massif central résulte en grande partie de la formation des fossés du Rhin et de la Limagne ; leur équivalent occidental n'a pas bénéficié de cet effet puisqu'il se situe dans les plaines angevines. Oublions donc les reliefs et élargissons notre focale des Asturies espagnoles à la Bohême tchèque pour découvrir l'histoire d'un équivalent ancien de l'Himalaya actuel.

(1) Appellation issue du massif du Harz en Allemagne, mais la dénomination « chaîne varisque » est utilisée également du fait de l'orientation sud-ouest/nord-est des plissements associés.

(2) La causticité du trait et des dialogues est édulcorée inévitablement par cette description simplifiée...

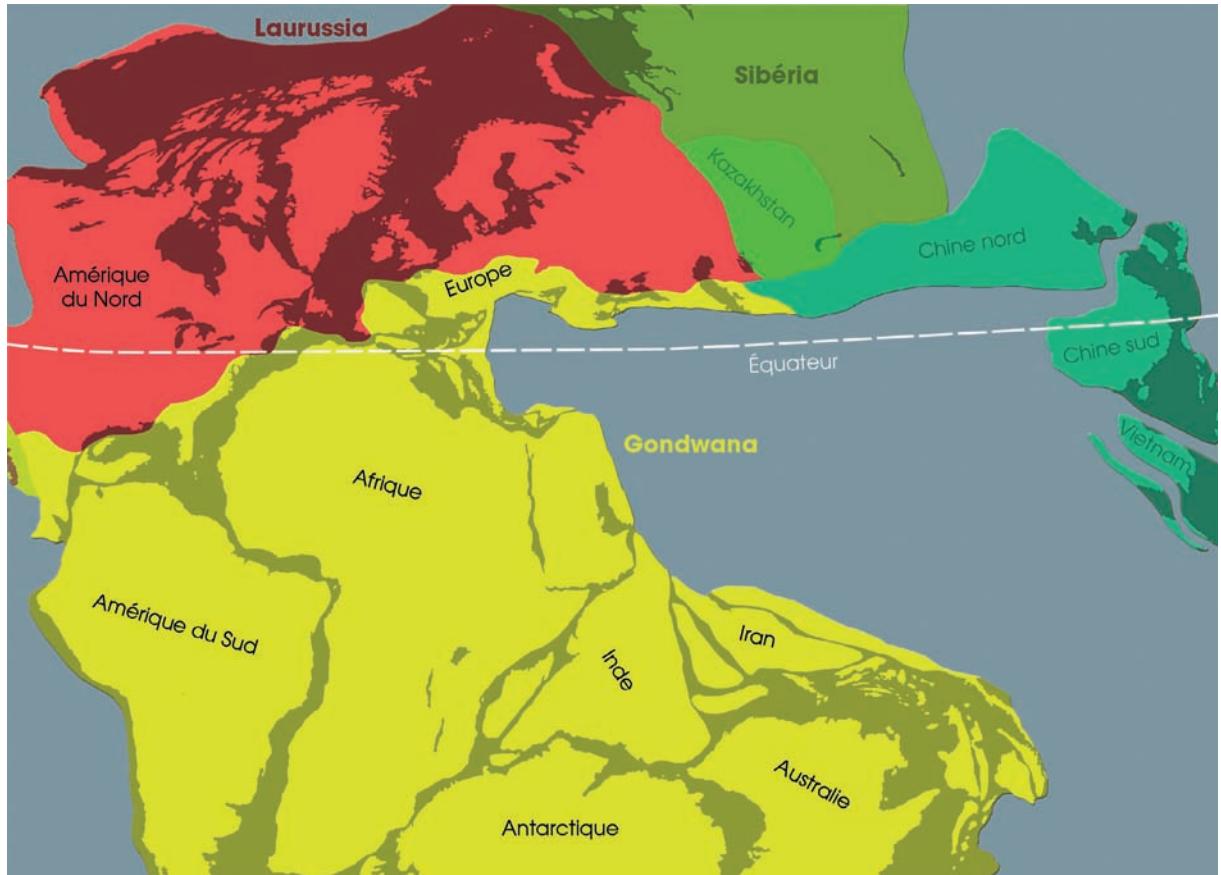


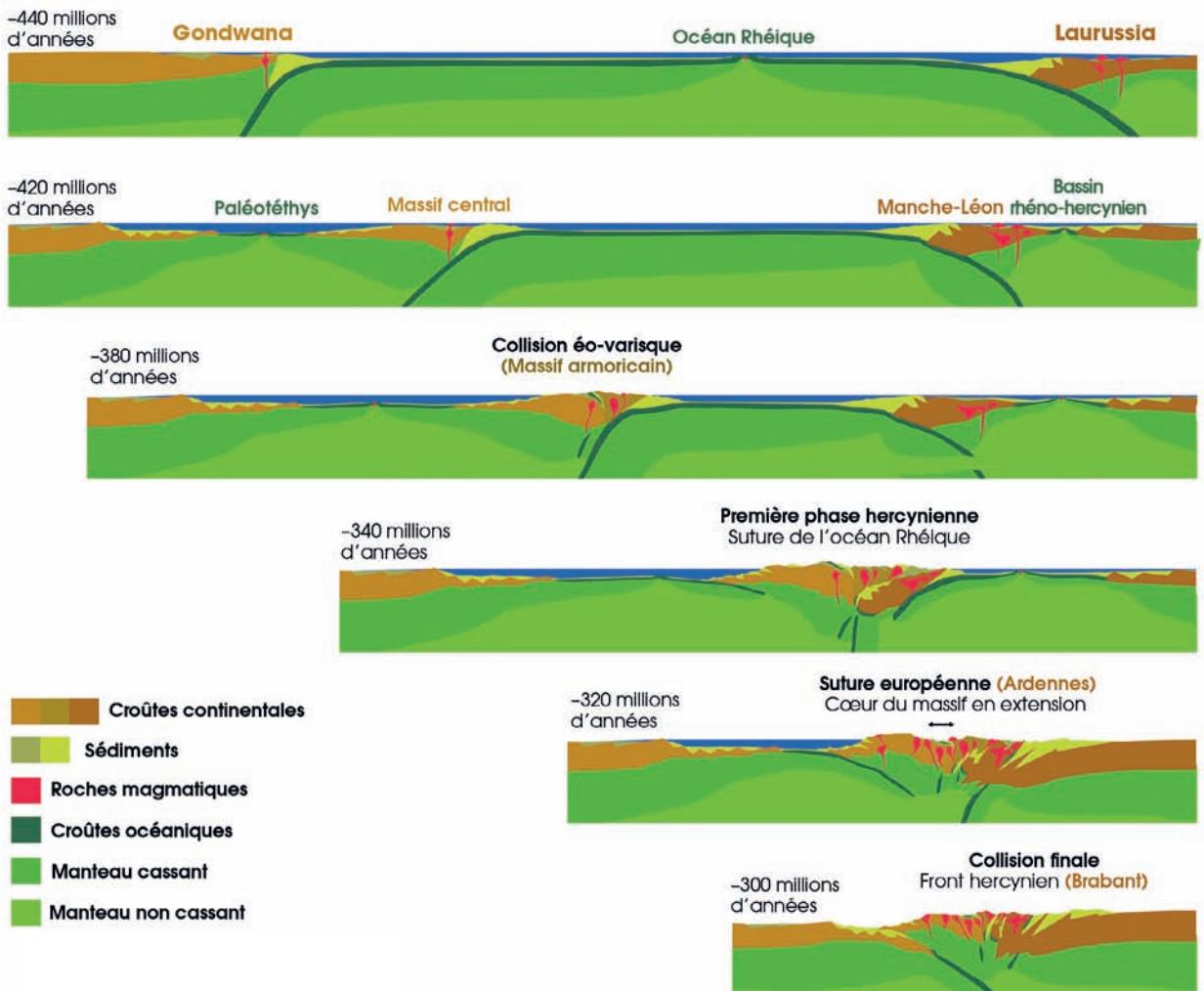
Figure 1. Détails des principales masses continentales amalgamées lors de la formation de la Pangée il y a 300 millions d'années (en gris, croûte océanique). © O. Coulon / Universcience.

EN QUÊTE DU TÉMOIGNAGE DES ROCHES

Ce sont la nature des roches et les structures géologiques (failles et plissements) qui, bien plus assurément, témoignent de l'avènement d'une orogenèse. La recette classique pour fabriquer une chaîne de montagnes implique un domaine océanique qui, en se refermant, rapproche inexorablement deux continents disjoints originellement.

L'océan se referme peu à peu lorsque sa croûte est devenue suffisamment dense pour plonger dans le manteau solide sous-jacent. Ce phénomène, nommé subduction océanique, s'accompagne fréquemment de la formation de roches magmatiques dans la croûte continentale (voire océanique) sous laquelle s'effectue la plongée. Une fois le domaine océanique résorbé en profondeur, le système se bloque car la croûte continentale possède une trop faible densité





pour plonger à sa suite. Elle est découpée alors en écailles, enfouies les unes sous les autres, puis ramenées progressivement à la surface au fur et à mesure que la collision entre les continents s'opère. Des lambeaux de croûte océanique sont pris parfois en sandwich entre ces roches continentales plus ou moins transformées par les fortes pressions qu'elles ont subies pendant l'enfouissement. Ces zones de suture constituent les meilleurs marqueurs d'une orogenèse classique, mais le magmatisme résultant de la subduction, les grands chevauchements issus de l'écaillage et les minéralisations de haute pression représentent des indices tout aussi parlants. L'analyse des roches affectées par l'orogenèse hercynienne révèle ainsi de multiples domaines distincts tectoniquement. Cependant, leur interprétation ne fait pas

Figure 2. Coupes tectoniques (du sud-ouest au nord-est) présentant le synopsis des événements tectoniques responsables de l'orogenèse hercynienne.

© O. Coulon / Universcience.

consensus. Le domaine maritime qui sépare l'Europe de la Laurussia de celle reliée à la partie africaine du Gondwana a été nommé océan Rhéique. Toutefois, il existerait d'autres bassins de taille plus modeste (un phénomène fréquent dans le Pacifique actuel), voire des océans plus importants au sein du Gondwana (fig. 2). La présence restreinte de véritables reliques de croûte océanique, ainsi que leur répartition complexe et morcelée rendent les interprétations hasardeuses. Tentons d'identifier tout de même les différents protagonistes géologiques de cette histoire.

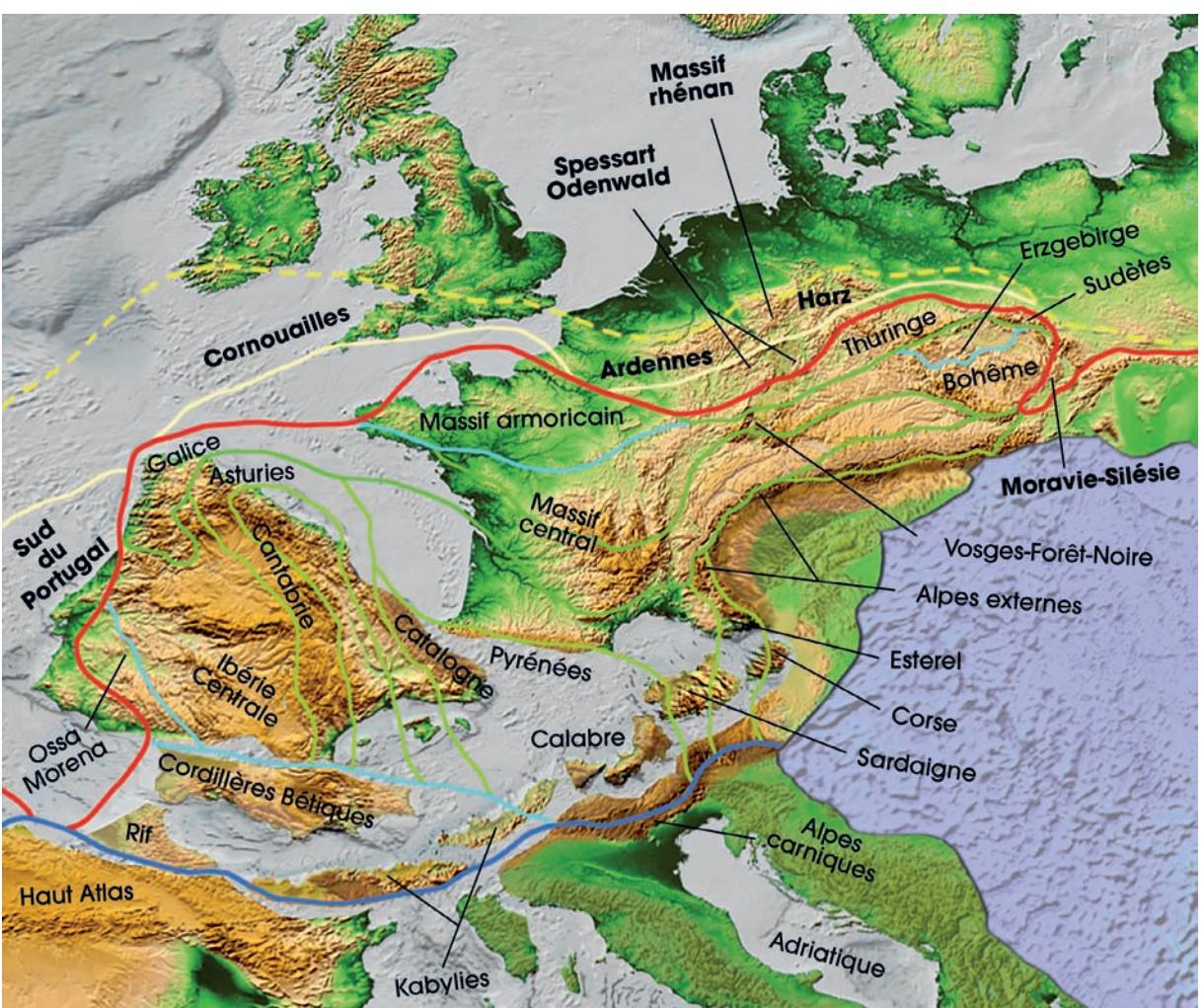


Figure 3. Paléogéographie de l'Europe il y a 300 millions d'années, à la fin de l'orogenèse hercynienne. Les zones de contact tectonique majeures sont représentées par des traits pleins colorés. En jaune pâle, suture interne à la Laurussia. En rouge, suture de l'océan Rhéique. En vert, sutures internes aux blocs gondwaniens. En bleu clair, suture spécifique de l'événement éo-varisque. En bleu foncé, suture potentielle de la Paléotélithys sur la marge nord du Gondwana (se reporter à la fin de l'article). © O. Coulon / Universcience.

Sutures en stock DES PARENTÉS RÉGIONALES COMPLEXES

La figure 3 propose une reconstruction de la partie européenne de la Pangée, à laquelle ont été retranchés les effets de la tectonique postérieure (notamment la formation des Alpes à l'est et l'ouverture océanique du golfe de Gascogne, entre Bretagne et Espagne, à l'ouest). Le front hercynien de déformation – en tirets sur la figure – définit la limite septentrionale des roches affectées par la collision (Irlande du Sud, Cornouailles, Ardennes et Brabant, puis

massifs schisteux rhénans du Taunus et du Harz). La suture située au sud – en jaune pâle sur la figure – représente très vraisemblablement une tête de pont du continent européen, séparée de celui-là par un petit domaine océanique : le Bassin rhénocercynien, dont les reliques océaniques sont visibles dans le massif du Lizard, à la pointe sud-ouest de l'Angleterre. Ce microcontinent européen (Sud du Portugal, Manche et bloc du Léon breton, Odenwald et Spessart allemands) serait entré en collision avec les blocs du sud avant l'amalgame final au nord. La frontière entre l'Europe et le Gondwana – suture en rouge sur la figure –



Magmatisme

- 355 Ma
- 330 Ma
- 320 Ma
- 300 Ma

Minéraux

- Barytine, fluorine
- Uranium
- Plomb, zinc, cuivre
- Or

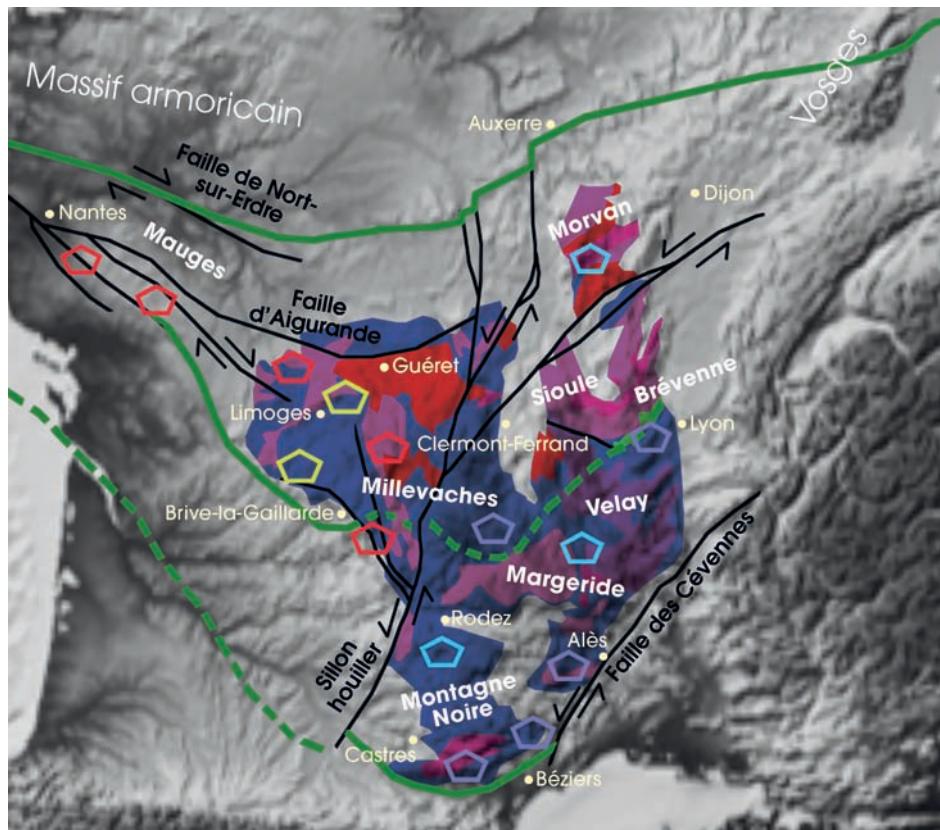


Figure 4. Géologie hercynienne du Massif central. Sont représentées en bleu les roches gondwanaises originelles (affectées toutefois par l'orogenèse) et dans la gamme rouge-violet celles d'origine magmatique (Ma = millions d'années). Les contacts tectoniques majeurs sont indiqués en vert. Les pentagones correspondent aux principaux gisements de minéraux associés.

© O. Coulon / Universcience.

se situerait donc à l'ouest de la Sierra Morena espagnole, dans la suture du Conquet en Bretagne (et au large des îles anglo-normandes), puis dans les massifs saxo-thuringiens allemands et les Sudètes plus à l'est.

Au sein des blocs gondwanais, l'affaire se complique sérieusement. Les grands chevauchements repérés dans le paysage contiennent peu de reliques océaniques et la difficulté principale consiste à appartenir des régions éloignées les unes des autres, dont la potentielle continuité a été effacée amplement depuis. Il apparaît clairement que les chaînes cantabriques espagnoles constituent le cœur d'un repliement massif, avec les chaînes catalanes et basques au nord (remobilisées ultérieurement par la formation des Pyrénées) et le Massif ibérique au sud. En revanche, les liens entre le sud du Massif central (montagne Noire), le massif des Maures (massif de l'Esterel, mais aussi Corse et Sardaigne) et les massifs cristallins externes de la future chaîne alpine⁽³⁾ sont nettement plus diffus.

OÙ SONT LES OCÉANS ?

Pour démêler cet écheveau complexe, il serait pratique d'imaginer une multitude de petits bassins océaniques. Certains sont attestés d'ailleurs (reliques océaniques de la Brévenne dans les monts du Lyonnais ou dans le massif alpin de Chamrousse), mais leur multiplication *ad libitum* demeure peu crédible. Il en va de même pour un accident majeur, la suture éo-varisque, qui correspond aux collisions plus anciennes ayant affecté les blocs gondwanais, près de cinquante millions d'années avant la phase ultime – en bleu clair sur la figure 3. Cette frontière tectonique juxtapose des roches aux signatures bien distinctes : tous les blocs situés au-dessus sont marqués par une ancienne orogenèse, alors qu'elle semble absente en dessous (la collision cadomienne datée à -550 millions d'années).

Pour de nombreux géologues, cela implique l'existence d'un domaine océanique intermédiaire qui, en se refermant, aurait accolé les régions situées à l'ouest de l'axe Cordoue-Coimbra à l'Ibérie Centrale, et la partie nord

(3) Du sud au nord : Argentera, Belledonne, Aiguille-Rousse-Mont-Blanc et Aar-Gothard.

du Massif armoricain à sa partie sud et au Massif central. Plus à l'est, la zone de Teplá dans l'Erzgebirge serait entrée également en collision avec la Bohême. Pour autant, les données paléontologiques et paléomagnétiques ne révèlent aucune différence notable entre espèces planctoniques et paléolatitudes de part et d'autre des sutures, ce qui suppose une forte proximité géographique entre les différents blocs. Des données qui infirment donc l'existence d'un tel océan, ou du moins lui imposeraient une taille extrêmement réduite... En outre, le bloc saxothuringien situé au-dessus du massif Vosges-Forêt-Noire (équivalent oriental du Massif central) n'est pas apparenté au Massif nord-armoricain. Au nord-ouest, ce dernier n'a également aucun équivalent puisque l'Estrémadure et la Galice espagnoles présentent des similitudes géologiques avec l'île de Groix, le Limousin et le Massif central (nord ou sud, la question reste ouverte).

La continuité des sutures est rompue une fois de plus et les remaniements advenus pendant les trois cents millions d'années qui ont suivi l'orogenèse n'en sont pas les seuls responsables. La clef du problème réside plutôt dans l'analyse des perturbations qui se sont produites au moment même de l'édification des massifs hercyniens.

Ruban continental et cisaillements multiples

UN MASSIF ÉMINEMMENT MAGMATIQUE

Tout au long de son élaboration, cette chaîne de montagnes est caractérisée par une intense fusion des roches du manteau (ou de la croûte), qui se traduit par une profusion de roches magmatiques mises en place à différents stades d'évolution (contrairement aux chaînes alpines par exemple). Les formations issues du volcanisme accompagnant la subduction d'une croûte océanique révèlent deux pics d'activité (à -390 et -350 millions d'années) qui permettent de dater respectivement la suture éo-varisque, puis celle de l'océan Rhéique. Mais de -330 à -300 millions d'années, de multiples plateaux granitiques sont

érigés, alors que la collision continentale est déjà bien avancée. L'explication de ce phénomène peu commun porte le doux nom d'extension synorogénique : sous l'effet de la compression aux frontières nord et sud, les zones internes du vaste ensemble gondwanien subissent un amincissement nord-est/sud-ouest qui favorise la fusion. Du point de vue minier, les conséquences du magmatisme et de l'hydrothermalisme qui l'accompagne sont appréciables : une grande part des gisements de minerais européens (or, étain, tungstène, uranium) se superposent parfaitement aux massifs hercyniens. De même, l'extension a permis la mise en place de tous les grands bassins houillers caractéristiques de l'essor de l'Europe industrielle. En revanche, du point de vue du tectonicien, les roches formées tardivement ont une fâcheuse tendance à recouvrir les frontières paléogéographiques majeures et la formation des bassins s'accompagne de fractures qui décalent les structures (fig. 4). Toutefois, la clef du patchwork hercynien réside peut-être dans la prise en considération de ces multiples failles, et particulièrement celles qui fonctionnent en décrochement⁽⁴⁾. En effet, elles permettent des mouvements transversaux susceptibles de déplacer, sur des distances conséquentes, les blocs que nous ne parvenons pas à relier à leurs voisins.

RECOMPOSITION EN MODE OBLIQUE

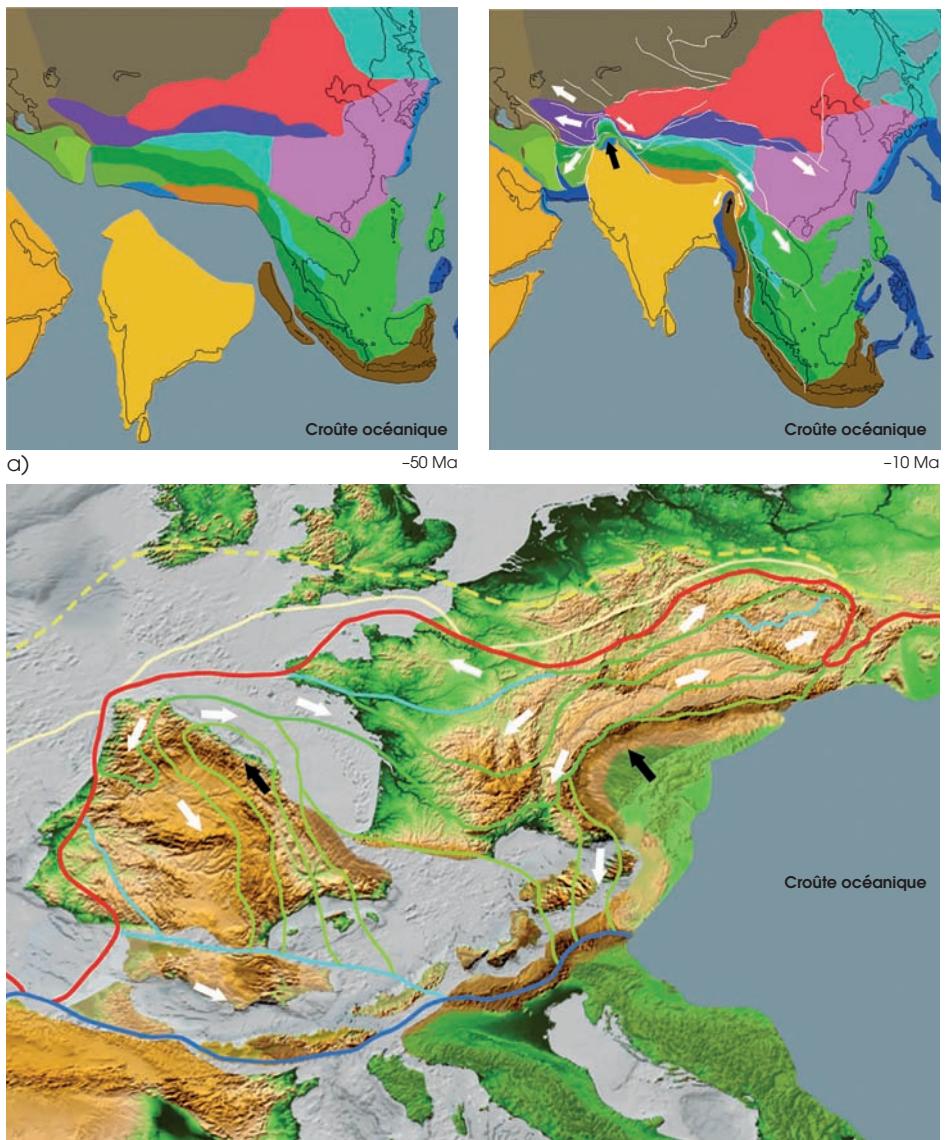
Le principe d'expulsion latérale de blocs continentaux de part et d'autre d'une collision a été parfaitement mis en évidence et modélisé dans le cadre de l'orogenèse himalayenne. La collision de l'Inde avec l'Asie est responsable de la formation de l'Himalaya et des mouvements des blocs afghan et pakistanais à l'ouest, chinois et vietnamien à l'est (fig. 5). Ce modèle pourrait s'appliquer à l'Europe hercynienne, mais faut-il l'envisager à l'identique, c'est-à-dire après les premières phases de la collision finale ?

Tous les blocs concernés dans le cadre himalayen étaient rattachés à l'Asie ; la géométrie de la collision provoque leur réorganisation. Mais en Europe, ce sont les blocs du domaine équivalent à l'Inde qui sont affectés. En outre, les mouvements identifiés

(4) Les blocs séparés par la faille coulissent l'un par rapport à l'autre.

Figure 5. a) Modélisation de l'extrusion liée à l'orogenèse himalayenne.
b) Extrapolation de ce modèle à l'orogenèse hercynienne.

© O. Coulon / Universcience.



Olivier Coulon

Olivier Coulon a réalisé une thèse en géodynamique à l'École normale supérieure.

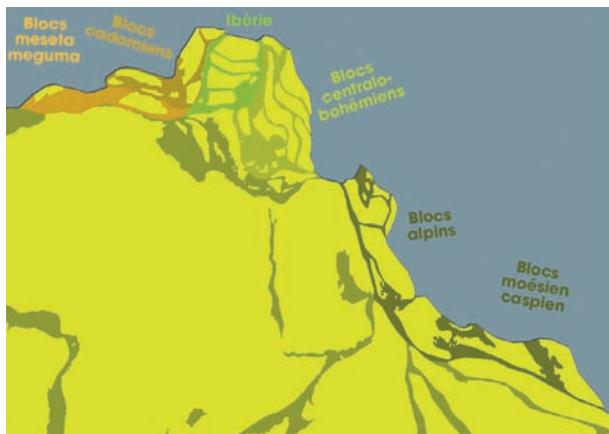
Son inclination pour la transmission des connaissances l'a conduit à rejoindre ensuite l'équipe des médiateurs scientifiques de Géosciences du Palais de la découverte. Particulièrement intéressé par la tectonique des plaques et la théorie de l'évolution, il a participé notamment à la conception des expositions Séismes et volcans en 2007 et *La faim des dinosaures* en 2010.

b)

sur le terrain (le long des grandes failles encore visibles à l'heure actuelle) ne sont pas toujours en accord avec la modélisation et celle-là n'explique pas toutes les sutures ni l'ambiguïté de leurs relations. La solution consiste à imaginer des mouvements concomitants, voire antérieurs à la collision : plusieurs sous-domaines continentaux détachés du Gondwana sous forme d'un long ruban auraient été assemblés progressivement par le biais de collisions obliques, avant d'être amalgamés avec le continent européen au nord (fig. 6). Dès lors, le fait que des sutures océaniques puissent juxtaposer

géographiquement l'une au-dessus de l'autre des régions situées initialement à des latitudes relativement semblables s'explique, réconciliant les données tectoniques avec les enregistrements fossiles et paléomagnétiques.

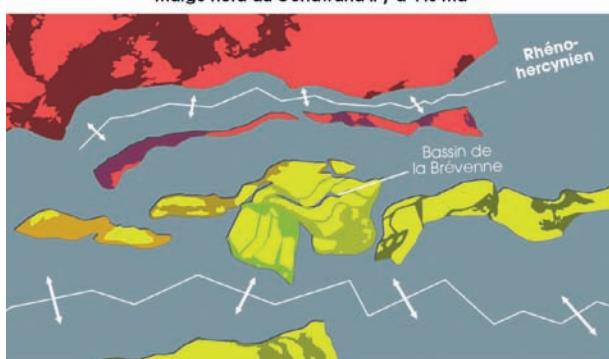
En revanche, ce modèle implique l'existence d'un nouvel océan, la Paléotéthys, situé au sud de la majorité des blocs gondwaniens concernés par ces translations à grande échelle. Si les données sédimentaires et magmatiques au nord de l'Afrique permettraient d'attester l'initiation de son ouverture il y a 420 millions d'années, les



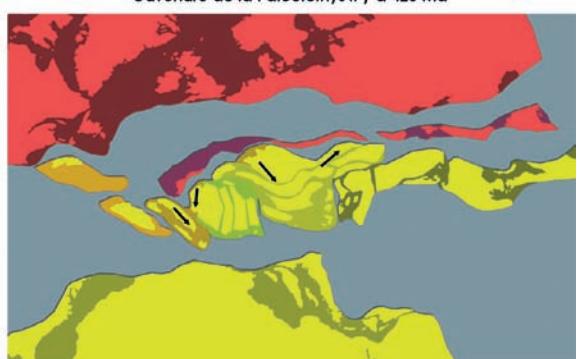
Marge nord du Gondwana il y a 440 Ma



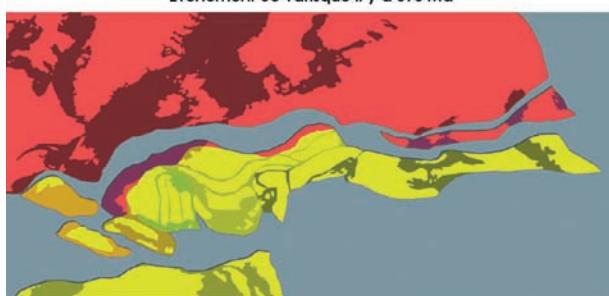
Ouverture de la Paléotéthys il y a 420 Ma



Événement éo-varisque il y a 390 Ma



Fermeture de l'océan Rhélique il y a 360 Ma



Première phase hercynienne il y a 340 Ma



Collision finale il y a 300 Ma

reliques océaniques attestant de sa fermeture près de 100 millions d'années plus tard sont nettement plus hypothétiques. La chaîne du Haut Atlas africain s'est bien formée lors de l'orogenèse hercynienne, mais elle correspond à une suture purement continentale (à l'image du front européen au nord). Il faut donc imaginer une suture située au-dessus – en bleu foncé sur la figure 3 – qui aurait été oblitérée ensuite par la collision des blocs kabyles pendant le cycle alpin. Plus à l'est, le massif des Alpes carniques italiennes, situé au nord de l'Adriatique, peut s'inscrire dans un tel

scénario. Des recherches sur le terrain sont nécessaires encore pour identifier des formations équivalentes dans les régions du Maghreb et de la Sicile. O. C.

Pour en savoir plus

Coulon O., « Hauts et bas de la modélisation des chaînes de montagnes », *Découverte* n° 410, mai-juin 2017, p. 60-67.

Delorme P., « L'Himalaya, ruptures et tremblements », *Découverte* n° 405, juillet-août 2016, p. 14-23.

Pasquier V., « Naissance de la « dérive des continents » – L'art d'en faire des montagnes », *Découverte* n° 398, mai-juin 2015, p. 12-21.

Figure 6. Modèle de repliement d'un ruban de blocs continentaux par collisions obliques : synopsis paléogéographique appliquée à l'orogenèse hercynienne. © O. Coulon / Universcience (d'après le modèle de Gérard Stampfli).

RÉACTIONS OSCILLANTES

En mal d'équilibre

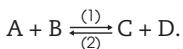
Dans le premier volet de cet article (paru dans *Découverte* n° 435, oct.-déc. 2021), nous avons présenté la notion d'équilibre chimique et évoqué la découverte de réactions oscillantes. Ce second volet a pour objectif de montrer pourquoi ces dernières ont été rejetées dans un premier temps, avant d'être étudiées sérieusement et de constituer l'un des points tournants de l'histoire des sciences du XX^e siècle.

PAR KAMIL FADEL, RESPONSABLE, UNITÉ PHYSIQUE
DU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE



Structure révélant les fronts de concentration et leur propagation, obtenue dans une couche mince de réactifs dans la réaction de Belousov-Zabotinski. CC BY 2.0 - S. Morris.

Avant d'aborder les réactions oscillantes, rappelons les principaux éléments exposés dans le précédent volet en y apportant quelques compléments et précisions. Considérons la réaction qui, à partir des réactifs A et B, donne les produits C et D. Elle peut s'écrire sous forme d'équation :



Une fois A et B mis en présence, la réaction (1) débute. En général, elle ne s'effectue pas en une seule fois mais en plusieurs étapes élémentaires, souvent mal connues, faisant apparaître des espèces intermédiaires avant d'aboutir aux produits C et D, absents au départ. Ainsi, tandis que les concentrations de A et B diminuent, celles des produits augmentent. Au bout d'un certain temps – qui peut être réduit considérablement grâce à l'emploi d'un catalyseur –, les concentrations n'évoluent plus, l'équilibre est atteint. Il ne correspond pas nécessairement à une absence de réactifs, car les produits peuvent *a priori* réagir plus ou moins efficacement et donner A et B via la réaction inverse (2) ; cela dépend des chances de réussite des deux réactions, de leurs facilités ou probabilités relatives.

Réactions chimiques, les clés du succès

Cette réussite est gouvernée par la conjonction de deux facteurs, l'un énergétique et l'autre entropique. Le facteur énergétique traduit l'importance plus ou moins grande de l'énergie d'activation, c'est-à-dire de l'énergie seuil à dépasser pour déclencher la réaction. Elle est distincte pour les deux réactions (1) et (2), leur différence étant égale à la quantité de chaleur Q dégagée par la réaction globale. Si la pression est maintenue constante, ce qui est souvent le cas

puisque de nombreuses réactions – en particulier biochimiques – se déroulent à la pression atmosphérique, alors Q ne dépend que des états initial I et final F, et non du chemin emprunté pour aller de l'un à l'autre. De ce fait, elle est fonction d'état et peut donc s'exprimer comme une différence notée traditionnellement ΔH , appelée variation d'enthalpie. La lettre H rend hommage au Russe Germain Henri Hess (1802-1850), le premier à avoir compris cela.

Le second facteur, entropique, correspond en particulier aux contraintes géométriques liées à l'orientation convenable que les espèces chimiques doivent adopter pour réagir. Ces contraintes ne sont pas forcément identiques non plus pour les espèces en jeu dans les deux réactions. De même, si A et B donnent les produits C, D, E et F, la réaction inverse au cours de laquelle quatre espèces doivent réagir (au lieu de deux) est nettement plus contraignante. Sa probabilité d'aboutir est moindre... sauf si elle « tente sa chance » beaucoup plus souvent, c'est-à-dire si les concentrations de C, D, E et F sont suffisamment élevées par rapport à celles de A et B. Ainsi, à l'équilibre, les concentrations finales des espèces sont telles qu'à chaque instant, la réaction (1) se produit aussi souvent que la réaction (2), avec la même cinétique, éventuellement nulle pour une réaction dite totale.

Insistons sur le fait que l'état d'équilibre n'est pas déterminé uniquement par l'énergie et sa minimisation, mais aussi par l'entropie S. Pour mieux saisir ce point, il convient de noter que le comportement des espèces en jeu dans une réaction chimique ressemble à celui des molécules de l'atmosphère, les lois fondamentales de la physique gouvernant le monde étant les mêmes en chimie. En effet, s'il n'y avait que



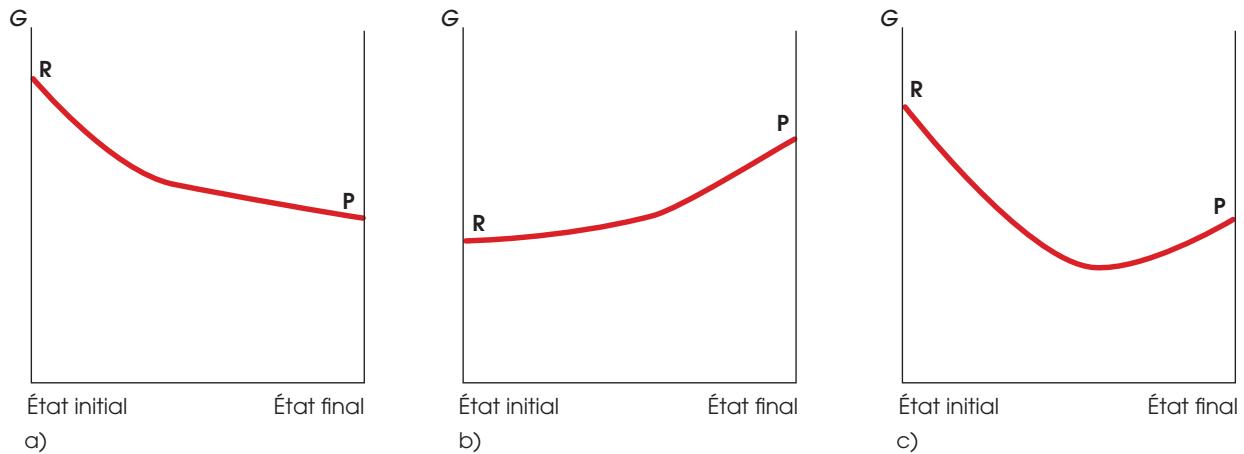


Figure 1. Évolution de la concentration en réactifs R et produits P. De gauche à droite, la concentration des réactifs diminue et celle des produits augmente. a) Le processus est possible, puisque l'énergie de Gibbs G diminue en permanence. b) Le processus est impossible, puisqu'il augmente en permanence. c) Le processus est possible dans les deux sens. © K. Fadel / Universcience.

→ → →

l'énergie potentielle en jeu, toutes les molécules de l'air tomberaient au sol ; s'il n'y avait que l'entropie S en jeu, elles s'échappereraient toutes, laissant la Terre sans atmosphère. À l'équilibre, et seulement à l'équilibre, ces deux tendances antagonistes se compensent tout juste.

En chimie, cela se traduit par le fait que la variation d'enthalpie ΔH entre un état donné et l'état d'équilibre est compensée par la variation d'entropie ΔS correspon-

dante. Sachant que l'unité de l'énergie est le joule (J), alors que l'entropie s'exprime en joule par kelvin (J/K), la compensation des deux tendances ne s'écrit pas en égalisant ΔH et ΔS , mais à travers la relation $\Delta H = T\Delta S$, soit $\Delta H - T\Delta S = 0$, T étant la température constante de l'environnement dans lequel se déroule la réaction. Cette relation permet de définir alors une nouvelle grandeur notée $G = H - TS$, appelée énergie de Gibbs ou encore enthalpie libre, avec $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$. L'énergie de Gibbs joue le rôle d'une énergie potentielle, de manière analogue à l'énergie potentielle en gravitation. Fonction d'état comme l'enthalpie et l'entropie, elle ne dépend que de l'état du système, lequel évolue spontanément dans le sens qui tend à la diminuer jusqu'à atteindre le minimum, correspondant à l'état d'équilibre (fig. 1). La décroissance de G (soit $\Delta G < 0$) jusqu'à sa valeur minimale constitue le critère permettant de déterminer l'évolution d'une réaction et l'état final du système à l'équilibre. Si le système est isolé, c'est-à-dire sans échange de matière ni d'énergie avec son environnement, la condition $\Delta G < 0$ est équivalente à $\Delta S > 0$ (fig. 2).

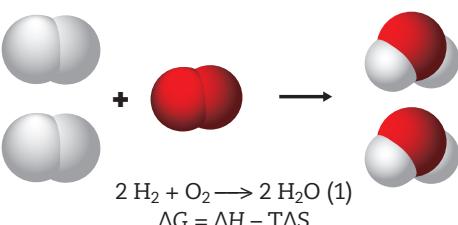


Figure 2. À température ambiante, $T\Delta S$ est négligeable devant ΔH , si bien que le signe de ΔG est celui de ΔH . Comme cette réaction libère de la chaleur ($\Delta H < 0$), c'est elle qui a lieu à température ambiante ($\Delta G < 0$). À haute température, c'est le terme $T\Delta S$ qui s'impose. Dans ce cas, $\Delta G < 0$ si $\Delta S > 0$. C'est donc la réaction inverse qui devient plus probable, puisque dans (1) $\Delta S < 0$ (le nombre de molécules diminue, passant de trois à deux).

© K. Fadel / Universcience.

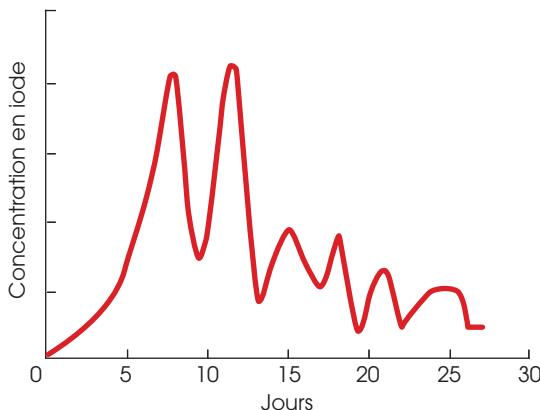


Figure 3. Variations de la concentration en iodé dans la réaction de Bray (1921). © K. Fadel / Universcience.

Ainsi, à partir de principes fondamentaux relatifs à l'énergie et l'entropie, la thermodynamique construit un critère d'extremum et une loi universelle la rapprochant de l'optique (principe de moindre temps de Fermat) et de la mécanique (principe de moindre action de Maupertuis).

Rejet de l'observation de Bray et modèle de Lotka

Nous venons de montrer que jusqu'à l'obtention de l'équilibre, la concentration des réactifs ne peut que diminuer régulièrement au profit de celle des produits. La tendance ne peut jamais s'inverser. En réalité, cette impossibilité est levée si le mélange réactionnel comporte des hétérogénéités. En 1921, le chimiste américain William Crowell Bray (1879-1946) n'est donc pas pris au sérieux lorsqu'il annonce avoir observé en phase homogène une évolution irrégulière, pulsée, de la production catalytique d'oxygène (O_2) à partir d'eau oxygénée (H_2O_2), ainsi que des oscillations de la

couleur du mélange réactionnel durant vingt-huit jours, avant leur arrêt à l'équilibre. Pourtant, plus de dix ans auparavant, l'Américain Alfred James Lotka (1880-1949) avait publié un article⁽¹⁾ dans lequel il mettait en évidence, à l'aide d'un modèle mathématique, la possibilité théorique d'une réaction chimique évoluant vers l'état d'équilibre à travers des oscillations... amorties (fig. 3), correspondant précisément aux observations de Bray.

En réalité, Lotka lui-même ne croyait pas à l'existence d'une réaction chimique empruntant une telle voie, sans doute en partie parce que son modèle incluait de l'autocatalyse, c'est-à-dire une étape catalysant sa propre cinétique. Au contraire, pour Bray, les travaux de Lotka indiquaient qu'une telle étape était forcément en jeu dans la réaction oscillante qu'il avait découverte de manière inattendue. Quoi qu'il en soit, l'expérience étant sensible à divers paramètres, les tentatives de sa reproduction échouaient souvent. De plus, les oscillations annoncées étant non

(1) « Contribution to the Theory of Periodic Reaction », *The Journal of Physical Chemistry*, 1910, volume 14, p. 271-274.
<http://dx.doi.org/10.1021/j150111a004>.



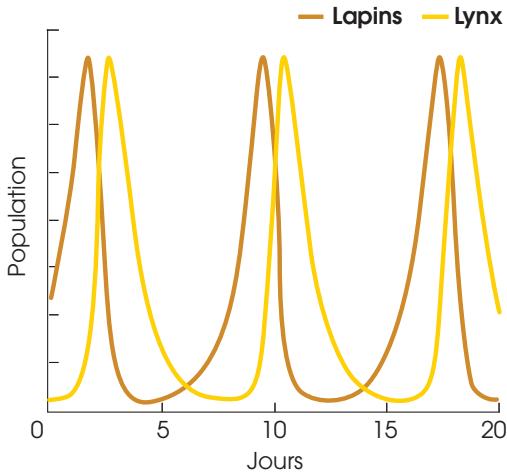


Figure 4. Prédiction d'un modèle de Lotka-Volterra de l'évolution de populations de lapins et de lynx. Les deux populations oscillent à la même fréquence, mais pas en phase. © K. Fadel / Universcience.

→ → →

conformes au dogme de l'époque, la découverte de Bray est récusée pendant cinquante ans, hormis par quelques rares esprits plus ouverts⁽²⁾, dont son étudiant Herman Liebhafsky (1905-1982) avec qui Bray poursuit ses recherches. Durant cette période, le rejet est justifié souvent en invoquant la présence probable d'inhomogénéités non maîtrisées dans le mélange réactionnel. Signalons que aujourd'hui encore, le mécanisme réactionnel n'est pas élucidé de manière totalement satisfaisante.

Malgré le scepticisme qu'il affichait concernant la pertinence de son modèle pour une réaction chimique, Lotka faisait remarquer que la multiplication des êtres vivants pouvait être considérée comme une réaction autocatalytique. Au cours des années dix-neuf cent vingt, Lotka et – indépendamment de lui – l'Italien Vito Volterra (1860-1940) mettent sur pied un modèle décrivant l'évolution

de la population d'un couple proie-prédateur. Ce modèle exhibe des oscillations déphasées des deux populations et remporte quelque succès auprès des zoologistes écologistes (fig. 4). Aussi, maintes variantes de ce modèle ont été imaginées par la suite et sont employées encore en écologie de nos jours. En dépit de la ressemblance avec les oscillations chimiques, aucune réaction oscillante connue ne suit le modèle de Lotka-Volterra, trop simple.

Cependant, ce modèle a été fructueux dans la mesure où il a servi de socle aux modélisations et réflexions théoriques ayant abouti vers 1970 à l'acceptation de la réalité de la réaction de Bray-Liebhafsky et des oscillations chimiques de manière générale. En effet, un grand nombre de réactions de combustion d'hydrocarbures s'effectuant à basse température (sous certaines conditions) et apparaissant de manière pulsée sont découvertes au cours des années trente. Ces *flammes froides* sont responsables parfois des cliquetis dans les moteurs à combustion interne. Malgré les exemples accumulés, c'est la découverte fortuite en 1951 de la réaction de Belousov-Zabotinski ou BZ (pour Belousov-Zhabotinsky en anglais) qui éveille progressivement l'intérêt des physico-chimistes pour le sujet. Facile à réaliser et spectaculaire en raison des changements de couleur du mélange réactionnel, elle présente de nombreux avantages par rapport à la réaction de Bray-Liebhafsky, notamment une reproductibilité bien meilleure. C'est donc sans surprise qu'elle est devenue la réaction oscillante emblématique, l'une des plus étudiées et mieux comprises.

(2) Cela rappelle l'improbable découverte des cristaux quasi périodiques (se reporter à l'article de l'auteur « Les cristaux quasi périodiques, une symétrie d'ordre interdit », *Découverte* n° 412, sept.-oct. 2017, p. 24-33).

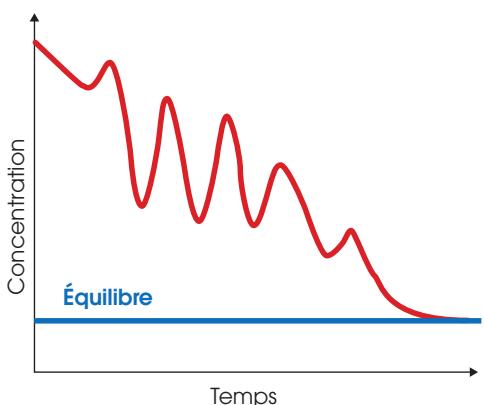
Acceptation des réactions oscillantes

Durant de nombreuses années avant et après la découverte de la réaction BZ, tandis que certains étudiaient les oscillations chimiques et cherchaient à en comprendre la thermodynamique, d'autres publiaient des articles « démontrant » leur impossibilité. Selon une légende, l'un des journaux ayant rejeté l'article du chimiste soviétique Boris Pavlovitch Belousov (1893-1970) lui aurait signifié « l'impossibilité de sa prétendue découverte ». Le refus du comité de rédaction des revues scientifiques s'appuyait souvent sur le fait que l'apparition d'un rythme, d'un phénomène cyclique, est une signature d'organisation traduisant une diminution de l'entropie au sein du système, ce qui semblait en contradiction avec le deuxième principe de la thermodynamique stipulant au contraire une croissance de l'entropie.

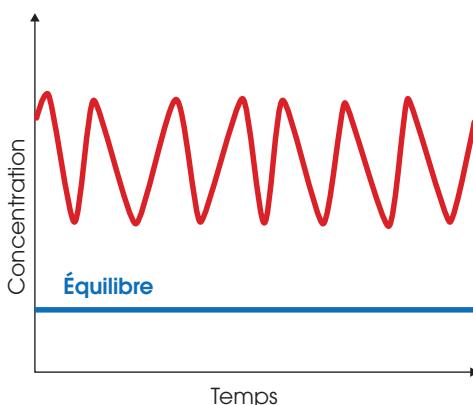
C'est justement cette dernière qui interdit le mouvement perpétuel des oscillations d'un pendule, lequel finit par s'immobiliser dans son état d'équilibre. Certes, mais les oscillations dans les réactions de Bray-

Liebhafsky, BZ... finissent également par s'arrêter. Cependant, afin de ne pas être en contradiction avec la thermodynamique et son deuxième principe, il ne faut pas, lors de ses oscillations, que le système chimique passe par son état d'équilibre – comme lorsqu'un pendule passe par la verticale. Dans le cas contraire, il y restera en l'atteignant la toute première fois. Le pendule échappe à cette immobilisation malgré ses nombreux passages par la verticale, car il ne dissipe que très peu d'énergie, en conservant à chaque fois une bonne part sous forme cinétique grâce à son inertie.

Toutefois, une réaction chimique étant purement dissipative, elle ne peut osciller comme un pendule autour de son point d'équilibre, mais autour d'un point loin de l'équilibre. À partir de ce point, la réaction progresse toujours dans le même sens, la marche arrière étant interdite, si bien que la concentration des réactifs diminue au cours du temps au profit de celle des produits. Ce qui oscille, provoquant les alternances périodiques de couleur, n'est pas la réaction elle-même, mais la concentration de certains intermédiaires réactionnels (fig. 5). S'il fallait établir une



a) Système oscillant fermé



b) Système oscillant ouvert

Figure 5. a) Oscillations d'un intermédiaire réactionnel jusqu'à l'obtention de l'état d'équilibre si le système est fermé. b) Mêmes oscillations si le système est ouvert. © K. Fadel / Universcience.

La thermodynamique hors équilibre, œuvre de de Donder, Onsager et surtout Prigogine, est le prolongement naturel de la thermodynamique de l'équilibre. Elle autorise l'apparition de structures organisées, spatiales et/ou temporelles impossibles à l'équilibre. Sa nécessité était pressentie en biologie dès les années trente par von Bertalanffy et Schrödinger.



analogie, la réaction chimique oscillante ne serait pas représentée par un pendule, mais par une horloge ancienne. Alors que le contrepoids descend, diminuant toujours son énergie potentielle, le balancier effectue des oscillations. Le contrepoids n'oscille pas lui-même, mais provoque les oscillations du balancier. Pareillement, la réaction libératrice d'énergie n'oscille pas elle-même, elle fait osciller la concentration des intermédiaires réactionnels. Cependant, au risque de vous surprendre et vous perturber quelque peu, nous allons voir que ces oscillations sont bel et bien dues en réalité à des oscillations de la réaction elle-même, mais des oscillations d'un nouveau genre, inconnu en thermodynamique classique !

Thermodynamique moderne

SYSTÈMES OUVERTS, HORS ÉQUILIBRE

Comme indiqué précédemment, les oscillations finissent par s'arrêter lorsque la réaction atteint l'équilibre (fig. 5a). Toutefois, il est possible de l'en empêcher en maintenant les concentrations loin de l'équilibre (fig. 5b). Dans ce cas, les oscillations perdurent indé-

finiment. Pour cela, il faut alimenter en permanence le milieu réactionnel avec des réactifs afin de compenser leur disparition et retirer les produits de manière à éviter leur accumulation. Le système est dit alors ouvert, car il peut échanger matière et énergie avec son environnement. De plus, il est hors équilibre.

Quel est l'outil théorique permettant d'étudier l'évolution d'un système « ouvert hors équilibre » ? Sachant que la thermodynamique classique s'applique aux systèmes fermés⁽³⁾ et se prononce sur les états d'équilibre, l'entropie elle-même n'étant définie que pour des systèmes isolés à l'équilibre. Par ailleurs, la thermodynamique classique est statique, en ce sens qu'elle n'intègre pas le temps dans ses lois, ne statuant pas sur la voie empruntée pour aller d'un état d'équilibre à un autre. Inadaptée au non-équilibre et à l'évolution des processus irréversibles, elle a dû être amendée afin d'être étendue au-delà de ses limites. Cela a donné naissance à la thermodynamique moderne, issue des travaux pionniers des physiciens belge Théophile de Donder (1872-1957), américain d'origine norvégienne Lars Onsager (1903-1973)... et surtout du physico-

(3) Un système fermé ne peut échanger de matière avec son environnement.

chimiste belge d'origine russe Ilya Prigogine (1917-2003)⁽⁴⁾. Cette nouvelle thermodynamique intègre explicitement le temps dans les équations, ce qui la rend véritablement « dynamique ».

Signalons que les lacunes de la thermodynamique classique et la nécessité de les combler étaient pressenties fortement dans les années trente, notamment par le biologiste autrichien Karl Ludwig von Bertalanffy (1901-1972) et son compatriote physicien Erwin Schrödinger (1887-1961), auteur du livre *Qu'est-ce que la vie ?* En effet, le vivant constitue un système ouvert, hors équilibre, siège de phénomènes irréversibles.

ÉMERGENCE DE STRUCTURES ORGANISÉES

En réalité, des systèmes nettement plus simples qu'un être vivant avaient interpellé déjà les thermodynamiciens du XIX^e siècle. Comme exemple, prenons une tige métallique dont l'une des extrémités est chaude, l'autre étant maintenue froide. À partir de cet état initial très inhomogène, « accidenté » du point de vue de la distribution thermique le long de la tige, la situation évolue vers l'état final, plus homogène. Cette tendance vers l'homogénéisation correspond à une augmentation d'entropie. Cependant, de manière concomitante, un autre phénomène diminuant l'entropie se met en place : les électrons, répartis uniformément dans la tige au départ, se redistribuent avec un excès du côté froid, ce qui donne naissance à une tension électrique (effet Thomson) et éventuellement à un courant électrique, si le circuit est fermé en reliant les deux extrémités avec un conducteur (effet Seebeck). Le système n'étant pas isolé, puisque traversé par un flux de chaleur, l'état final est qualifié de stationnaire.

À la fin du XIX^e siècle, les physiciens étaient donc conscients qu'au sein d'un système non isolé hors équilibre, une structure orga-

nisée – ici le courant électrique – peut se mettre en place. Avec raison, le physicien allemand Rudolf Clausius (1822-1888) fait remarquer que le bilan entropique total incluant l'environnement doit quand même être positif. En effet, il est important de retenir que sous certaines conditions, un phénomène irréversible dans un système non isolé peut s'accompagner d'une diminution d'entropie dans le système. Pour cela, il faut que l'entropie reçue de l'environnement soit assez faible par rapport à celle expulsée vers lui, afin que le bilan soit suffisamment négatif pour surcompenser la production d'entropie par les processus irréversibles au sein du système.

LE RÔLE DES NON-LINÉARITÉS

L'exemple de la tige chauffée et des effets thermoélectriques qui s'ensuivent possède son pendant en mécanique des fluides, connu depuis la fin du XIX^e siècle : les cellules/rouleaux de Bénard. Toutefois, la situation est plus complexe dans ce phénomène en raison d'effets non linéaires, c'est-à-dire non proportionnels aux causes, comme un effet amplificateur, autocatalytique... La figure 6 montre un gradient de

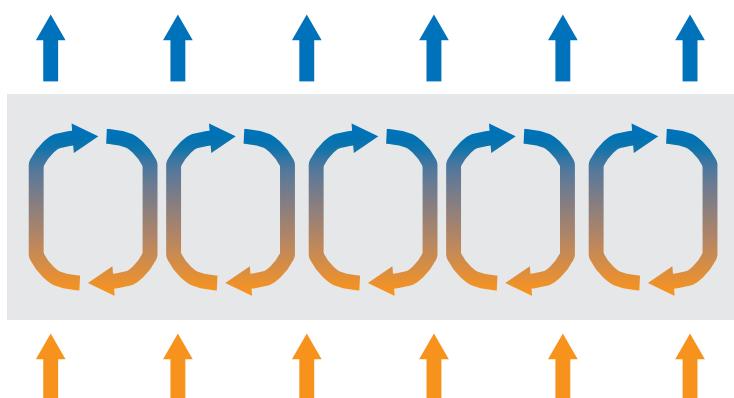


Figure 6. Un gradient de température dans un fluide, chaud en bas, froid en haut, peut donner naissance à une structure formée de rouleaux de convection, dont le sens de rotation alterne d'un rouleau à l'autre. La figure représente un état possible, mais un second état avec tous les rouleaux tournant en sens inverse est possible également. © R. Paillard / Universcience.

(4) Pour leurs travaux dans ce domaine, Onsager et Prigogine ont reçu le prix Nobel de chimie en 1968 et 1977 respectivement.

Kamil Fadel

Après une formation en biologie de l'évolution, Kamil Fadel a poursuivi ses études en physico-chimie moléculaire, puis en histoire des sciences.

Entré au Palais de la découverte en 1989, il est actuellement responsable de l'unité Physique. Par ailleurs, il est l'auteur de nombreux articles (*Cosinus, Histoire, Guerres & Histoire, Atlas, Espèces...*) et de plusieurs livres aux éditions Weka, Larousse, Le Pommier et Dunod.

température qui donne naissance à des mouvements de matière exhibant une structure en rouleaux de convection, mais elle ne révèle pas la différence capitale avec le mouvement des électrons dans l'exemple de la tige chauffée. Cette différence repose sur le fait qu'en raison des mouvements engendrés, l'apparition d'un rouleau favorise l'apparition du voisin, et ainsi de suite. Il y a un effet boule de neige amplificateur, une non-linéarité absente de l'effet thermoélectrique.

Par ailleurs, il faut noter aussi que dans le cas des rouleaux de Bénard, il existe deux états stationnaires symétriques dépendant du sens de rotation des rouleaux. Justement, l'un des résultats les plus importants de la thermodynamique moderne est le fait que suffisamment loin de l'équilibre, l'unicité d'un état stationnaire n'est pas garantie : il peut y en avoir deux, voire davantage. Si la réaction a le choix entre deux voies, elle opte pour celle compatible avec les paramètres du moment. Cependant, si ces paramètres changent suffisamment, le système bascule vers l'autre voie.

Mécanisme des oscillations

Toutes les réactions oscillantes connues partagent les trois caractéristiques suivantes : elles possèdent une étape non linéaire (souvent autocatalytique), évoluent suffisamment loin de l'équilibre et sont bistables dans un certain domaine de paramètres.

Voici un scénario d'oscillation. Au cours de la réaction progressant suffisamment loin de l'équilibre, il y a libération d'énergie de Gibbs consécutivement à la transformation des réactifs en produits. Pour ce faire, la réaction peut emprunter au moins deux voies différentes, V_1 ou V_2 , correspondant à deux états stationnaires stables. Cependant, tandis que V_1 produit un certain intermédiaire réactionnel X autocatalyseur, V_2 le consomme. Or, la concentration de X, notée [X], joue le rôle de commutateur, déclen-

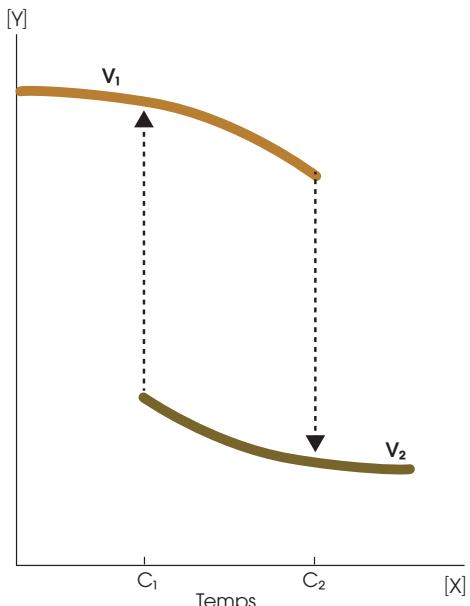


Figure 7. La réaction peut emprunter deux voies différentes : V_1 ou V_2 . V_1 produit l'intermédiaire autocatalyseur X, V_2 le consomme. De plus, X joue le rôle de commutateur, faisant basculer la voie empruntée, selon que sa concentration cherche à dépasser C_2 ou devenir inférieure à C_1 . Cela produit des oscillations périodiques de la concentration de X. Y est un autre intermédiaire. © K. Fadel / Universcience.

chant les changements de voie $V_1 \leftrightarrow V_2$. Alors que la voie productrice V_1 domine en dessous d'une certaine concentration critique C_1 , la voie consommatrice V_2 s'impose au-dessus d'une valeur critique C_2 supérieure à C_1 . Pour des concentrations situées entre C_1 et C_2 , le système est bistable, les deux voies sont possibles. La figure 7 montre que la réaction bascule périodiquement de V_1 à V_2 , puis de V_2 à V_1 . C'est en ce sens qu'elle oscille. Ce faisant, elle fait osciller [X], provoquant un changement périodique de couleur. L'oscillation de [X] correspond à une structure temporelle. Sous d'autres conditions, l'oscillation peut correspondre à une structure spatiale (figure en ouverture d'article). Le moteur de cette structure étant la réaction



chimique – c'est-à-dire la dissipation de l'énergie de Gibbs par redistribution des liaisons interatomiques –, Prigogine et son collègue belge Paul Glansdorff (1904-1999) forgent l'expression « structure dissipative » pendant les années soixante pour désigner l'auto-organisation apparaissant consécutivement à la dissipation de l'énergie et de l'entropie par un processus irréversible loin de l'équilibre (fig. 8). Pour conclure, signalons qu'en 1952, le mathématicien britannique Alan Turing (1912-1954) publie un article sur les bases chimiques de la morphogenèse. Il y expose

la manière dont le couplage de réactions permettrait d'obtenir théoriquement des formes et autres structures spatiales et temporelles. Cependant, cela paraissait si saugrenu que son article fut accueilli avec la même indifférence que celui de Bray. Aujourd'hui, les recherches dans le domaine de la thermodynamique des structures dissipatives sont nombreuses. Elles visent à mieux comprendre les formes auto-organisées, allant des rythmes et formes biologiques à la genèse d'une tornade, en passant par la structure des galaxies et l'évolution de la vie elle-même. K. F.

Figure 8. Cellules de Bénard dans une boîte (vue du dessus)
témoignant de l'apparition d'une structure auto-organisée. © Science Photo Library / S. Camazine.

Remerciements.

Merci à Hervé Toulhoat pour ses relectures et commentaires des deux volets de cet article. Chimiste retraité de l'Institut français du pétrole Énergies nouvelles, il est collaborateur bénévole émérite au Laboratoire de réactivité de surface de Sorbonne-Université. Il est également membre de la SFC (Société française de chimie) et du comité de rédaction de sa revue, l'*Actualité Chimique*.

L'ÉLECTRO- ENCÉPHALOGRAPHIE

Cent ans d'exploration cérébrale

Le cerveau est un organe complexe dont le fonctionnement implique des activités électriques. Connectés les uns aux autres, des dizaines de milliards de neurones communiquent par le biais de courants électriques. En mesurant, à l'aide d'électrodes disposées à la surface du crâne, les différences de potentiel engendrées par l'activité de larges populations de neurones, l'électroencéphalographie permet d'étudier le fonctionnement cérébral. Nous vous proposons de découvrir les pionniers à l'origine de cette technique centenaire, ainsi que les applications qui en ont découlé.

PAR BILLEL KHOUADER, UNITÉ SCIENCES DE LA VIE DU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

En 1750, les effets de l'électricité sur le corps humain commencent à être étudiés. Les scientifiques savent déjà que lorsqu'un courant électrique traverse un membre, cela provoque sa contraction. Le fait que le cerveau contrôle les muscles par l'intermédiaire des nerfs est connu également. Dans son traité *L'Homme*, le mathématicien, physicien et philosophe français René Descartes (1596-1650) établit le postulat selon lequel des « fluides subtils » s'écoulent dans les nerfs afin de contrôler les muscles. Cependant, le lien entre électricité et contrôle de la motricité, loin d'être intuitif, n'est pas démontré encore. Ce fameux fluide évoqué par Descartes pourrait-il être l'électricité ?

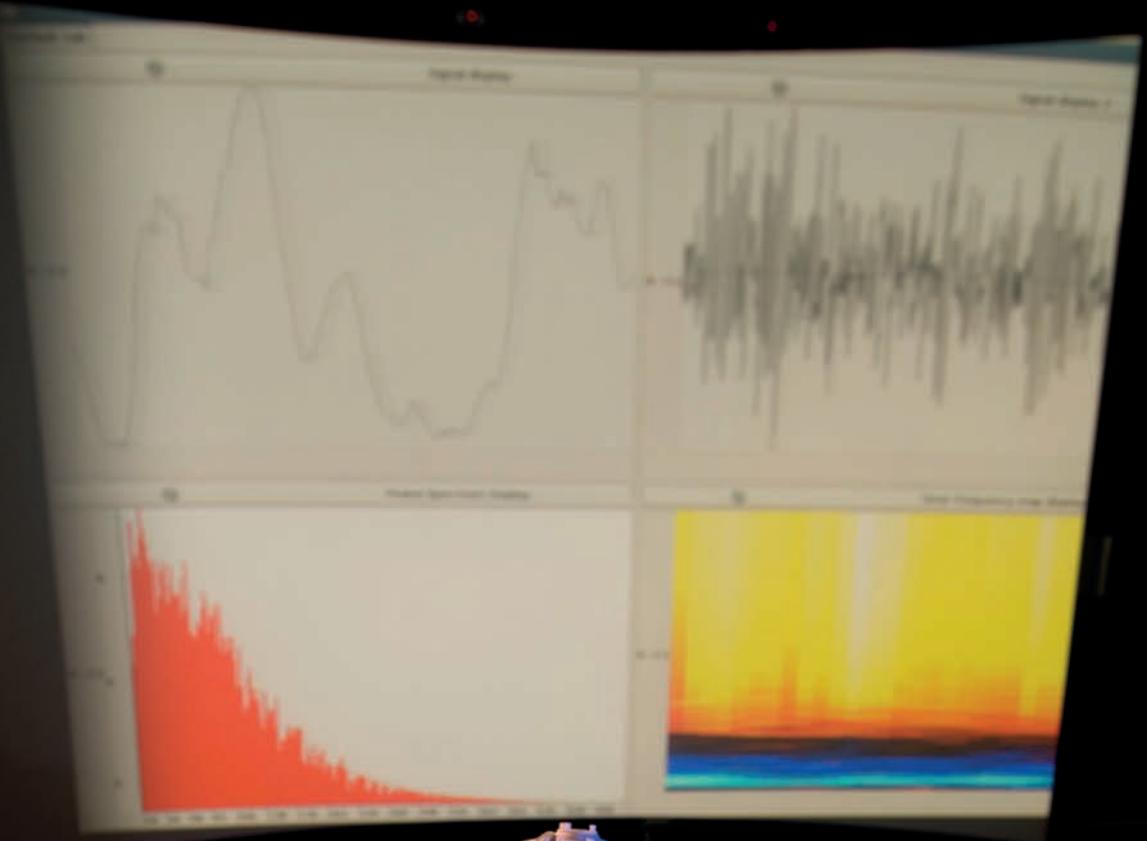
ÉLECTRICITÉ ANIMALE

À la même époque, Luigi Galvani (1737-1798), médecin, biologiste et physicien italien, s'intéresse à l'électrostatique ainsi qu'à l'anatomie comparée. Alors qu'il effectue une dissection de grenouille dans son laboratoire, l'un de ses assistants touche le nerf crural (ou fémoral) de l'animal avec son scalpel. Au même moment, une étincelle jaillit dans l'un des appareils d'électrostatique posés sur la table et la patte de la grenouille morte effectue un mouvement vif. Galvani réalise que l'étincelle, le fait de toucher le nerf avec le scalpel et le mouvement de la patte sont liés. Curieux, il essaye de comprendre cet étrange phénomène qui semble unir électricité et vivant. Cette histoire marque le début de l'une des plus grandes découvertes en biologie de l'époque.

Galvani conçoit ensuite pendant plusieurs années des expériences faisant intervenir la grenouille, ainsi que différents métaux et matériaux non conducteurs (fig. 1).

Brain Computer Interface (BCI) ou interface cerveau-machine, acquisition en temps réel par un système d'électroencéphalogramme (EEG) des signaux du cerveau dans le but de créer un nouveau moyen d'interagir avec un ordinateur. Le contexte applicatif de ce travail concerne l'augmentation de la capacité d'interaction de personnes lourdement handicapées. Cette image a été réalisée dans le cadre de recherches sur l'interaction Homme-machine menées par le laboratoire de l'Institut de recherche en informatique et systèmes aléatoires.

© H. Raguet / CNRS Photothèque.



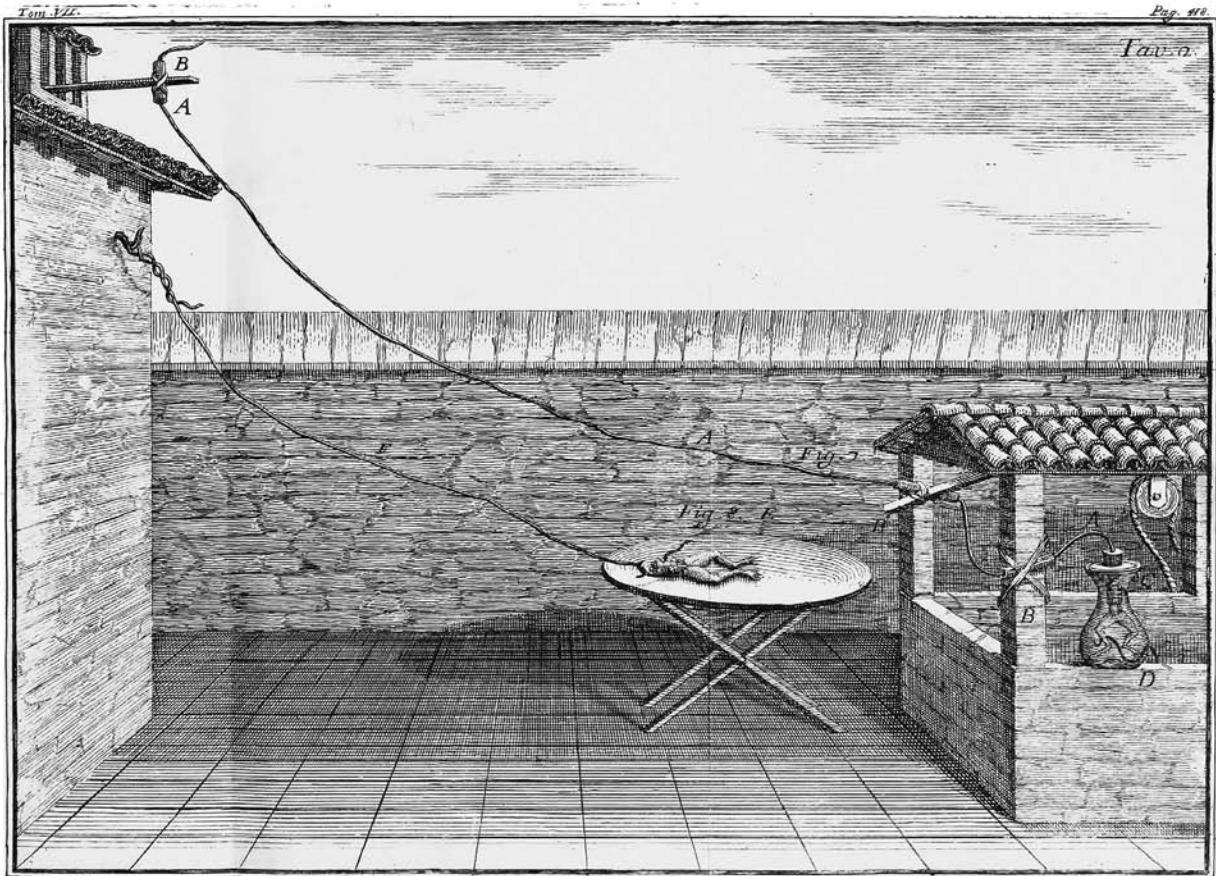


Figure 1. Expérience de Luigi Galvani (1737-1798). Une grenouille est posée sur une table en extérieur, accrochée à une barre de métal fichée dans un mur par un long câble. Un jour d'orage, Galvani remarque qu'à chaque éclair, les pattes de la grenouille se contractent. Bononiae : Ex Typographia Instituti Scientiarium / Smithsonian Libraries / Domaine public.

→ → →

Ces travaux intéressent particulièrement Alessandro Volta (1745-1827), physicien italien inventeur de la pile. Toutefois, il ne cache pas son scepticisme. Selon lui, l'électricité responsable des contractions musculaires de la grenouille a une origine externe. Il considère qu'elle est apportée par les métaux utilisés par Galvani.

En 1797, ce dernier réalise une expérience qui permet enfin de prouver l'existence de l'électricité animale. En faisant se toucher deux nerfs de pattes de grenouille précisément, il constate que celles-là se contractent de la même manière que lorsqu'un courant électrique extérieur traverse le nerf. Cette fois, plus de doute, aucun métal n'est présent. Malgré la rigueur de l'expérience, Volta est toujours sceptique.

LE CERVEAU, UNE MACHINE ÉLECTRIQUE

Bien que Galvani ait démontré la présence d'électricité dans le corps des animaux en 1797, il faut attendre un peu plus de soixante-quinze ans pour constater qu'au-delà des nerfs, des courants électriques traversent également le cerveau. C'est à Richard Caton (1842-1926), médecin britannique, que cette découverte est due. Dans les années dix-huit cent soixante-dix, il anesthésie des animaux, les trépane et place des électrodes à la surface de leur cerveau. Les électrodes sont connectées à un galvanomètre à miroir de Thomson (nom en hommage à Galvani) (fig. 2). Cet appareil,

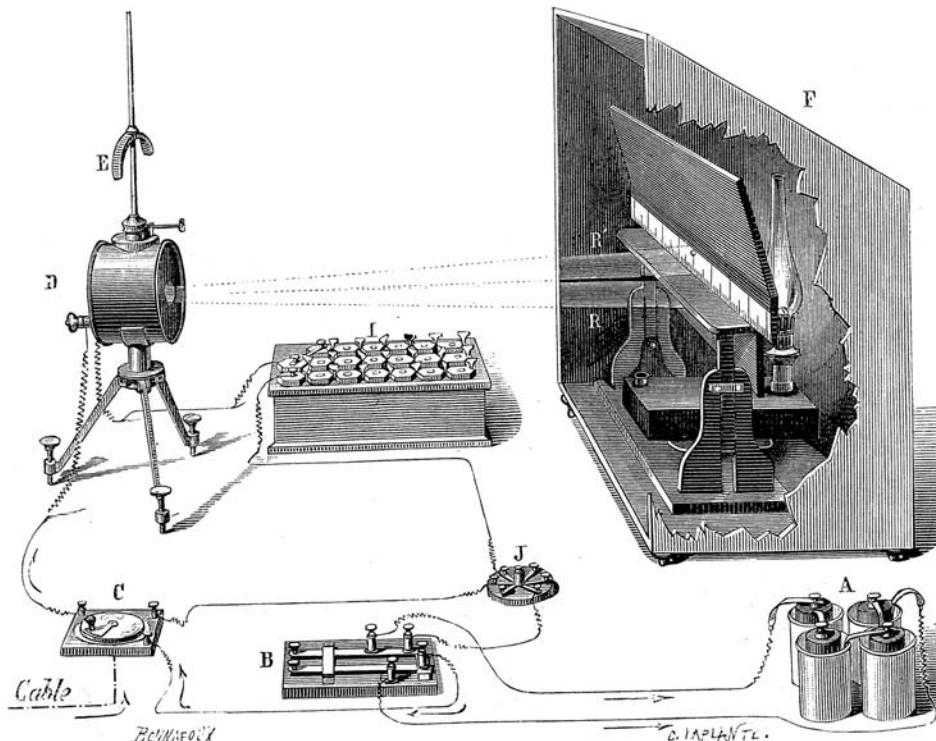


Figure 2. Galvanomètre de Thomson. Les courants électriques font bouger un miroir, qui permet de changer la direction d'un faisceau de lumière. Ce faisceau oscille de haut en bas en fonction de la polarité du courant. Cet appareil, révolutionnaire pour l'époque, a été inventé initialement afin de mesurer les faibles courants électriques des premières lignes télégraphiques transatlantiques. Richard Caton (1842-1926) y voit un moyen de mesurer les courants électriques dans le cerveau. © Science Photo Library / Heritage Images / Oxford Science Archive.

révolutionnaire pour l'époque, a été inventé initialement pour mesurer les faibles courants électriques des premières lignes télégraphiques transatlantiques. Caton y voit un moyen de quantifier les courants électriques du cerveau. Il est le premier à observer ces courants. Malheureusement, l'appareil ne permettait pas de sauvegarder les enregistrements effectués pour les étudier ultérieurement. Nous n'avons donc qu'une simple trace écrite des expériences réalisées à l'époque : « Dans tous les cerveaux examinés, le galvanomètre indique la présence de courants électriques. La surface externe de la matière grise est en général positive par rapport à l'intérieur [...]. De très légers courants [...] passent lorsque les électrodes sont placées en deux points de la matière grise ou entre un point de la matière grise et le crâne », écrit Caton en 1875. Avant d'ajouter : « les courants électriques à la surface de la matière grise semblent être en lien avec son fonctionnement ». Il constatera également que ces courants augmentent pendant le sommeil et disparaissent après

la mort. Cette découverte passe relativement inaperçue malgré son importance, Caton ayant publié ses résultats dans un journal de médecine peu lu.

À cette époque, les essais sur l'Homme sont limités dans la mesure où l'observation de l'activité électrique du cerveau passe par l'ouverture du crâne. Son enregistrement par une méthode non invasive est dû à l'acharnement scientifique d'un psychiatre allemand, Hans Berger (1873-1941).

VERS DES TECHNIQUES MOINS INVASIVES

En 1892, Berger (fig. 3) souhaite devenir astronome. Toutefois, il quitte l'université après quelques mois et s'engage dans l'armée en tant que cavalier. Lors d'un entraînement, il chute, manquant de se faire écraser par un carrosse. Le soir même, il reçoit un télégramme de son père faisant état de l'inquiétude de sa sœur, conséquence, croit-il, d'un message télépathique adressé à sa sœur au moment critique. « Il s'agissait là d'un cas spontané de télépathie pendant lequel, à un moment de danger immédiat alors que



Figure 3. Hans Berger (1873-1941). © Université d'Iéna / Allemagne.

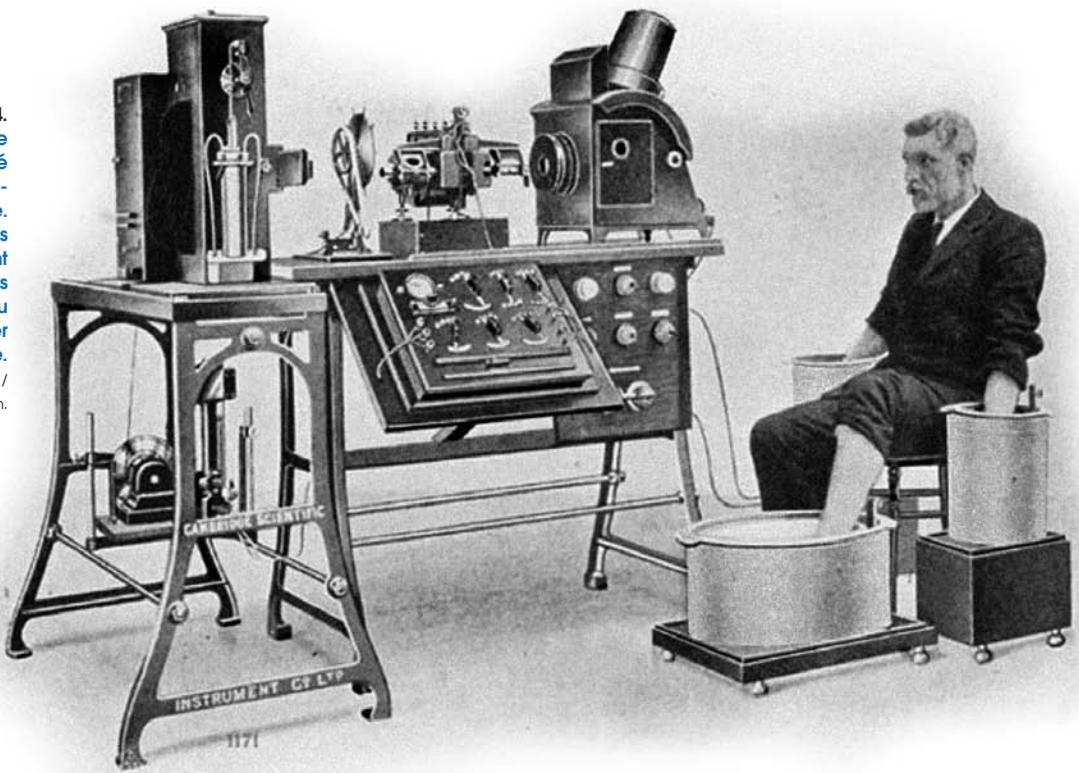


Figure 4.

Galvanomètre à corde utilisé pour un électrocardiogramme.

Les membres du patient sont plongés dans des bassines d'eau afin d'augmenter leur conductivité.

© Photo12 / Alamy / The History Collection.



→ → →

j'attendais une mort certaine, j'ai transmis mes pensées à ma sœur, particulièrement proche de moi, qui s'est alors comportée comme un receveur », relatera-t-il en 1940 dans son dernier ouvrage *Psyche*.

Se passionnant alors pour la psyché humaine, il devient médecin psychiatre et maître de conférences à l'université d'Iéna. La nuit, il travaille dans un laboratoire secret afin de tenter de démontrer que cet épisode est bien le reflet de l'énergie psychique et de la communication télépathique. Craignant les moqueries, Berger taira ses travaux pendant de nombreuses années.

En 1902, Berger se sert d'un électromètre à capillaire afin d'enregistrer l'activité électrique à la surface du cerveau de chiens. Cet appareil était utilisé habituellement pour effectuer des électrocardiogrammes (ECG) (fig. 4). L'électrocardiographie est une technique voisine de l'électroencéphalographie, qui permet d'observer les

activités électriques du muscle cardiaque. Ces dernières étant plus simples à mesurer que celles du cerveau, le développement de l'ECG a été plus rapide que celui de l'électroencéphalogramme (EEG). Grâce à cet appareil, Berger parvient à reproduire les résultats de ses prédecesseurs, dont ceux de Caton (fig. 5).

Il se dote ensuite d'un nouvel appareil de mesure, un galvanomètre à corde d'Edelman, bien plus précis que l'électromètre à capillaire. En 1924, il enregistre le premier EEG humain chez un patient de 17 ans ayant subi une ablation partielle du crâne lors d'une opération chirurgicale, qu'il peut sauvegarder grâce aux progrès techniques réalisés. Malgré tout, le galvanomètre employé se révèle à peine suffisamment sensible pour observer les oscillations du courant électrique. Berger parvint à distinguer néanmoins des ondes de grande amplitude (de période 120-180 microsecondes –



$1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ s}$) et de plus petite (de période 30-45 μs) qu'il nomme respectivement ondes alpha et bêta. Les ondes alpha sont présentes lorsque le sujet a les yeux fermés et sont remplacées par les ondes bêta lorsqu'il les rouvre. Déçu par la qualité insuffisante de ses enregistrements, Berger acquiert un galvanomètre à double bobine de Siemens, presque dix fois plus précis que le précédent.

ÉVEIL DE L'EEG

En 1927, ce nouveau galvanomètre lui permet d'effectuer des EEG sur des sujets au crâne intact, tels que son fils Klaus ou lui-même. Cependant, pris de doute quant à la qualité de ses travaux, il en retarde la publication jusqu'en 1929. Dans son article*, Berger est l'un des rares scientifiques de l'époque à citer les travaux de Caton, qu'il considère de grande valeur. Il y fait état également de centaines d'enregistrements à crâne ouvert et d'une douzaine chez des patients au crâne intact. À travers cette publication, Berger rapporte pour la première fois dans la littérature scientifique l'existence de ces ondes alpha de 10 hertz, appelées aussi ondes de Berger. Leur rôle et leurs mécanismes de génération seront étudiés largement par la suite. Ses recherches sur l'énergie spirituelle et la télépathie demeurant infructueuses, Berger sombra dans une dépression et mit fin à ses jours en 1941. Ses travaux techniques ont été fondamentaux pour le développement de l'EEG, sans avoir eu le temps d'explorer les méandres de notre cerveau avec son outil fraîchement développé.

Les années suivantes, son utilisation a permis de commencer à comprendre l'activité électrique de notre cerveau. Alfred Lee Loomis (1887-1975) entre alors en scène. Après des études de mathématiques et sciences à Yale et

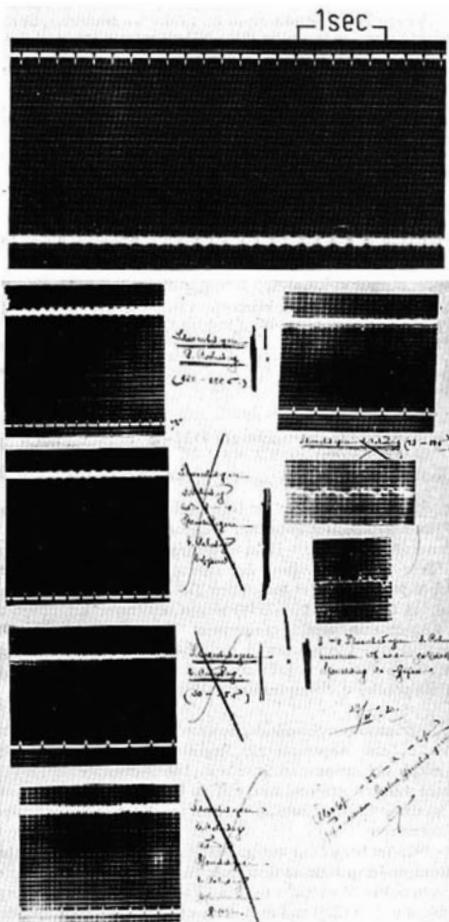


Figure 5. L'un des premiers enregistrements de Berger. Le galvanomètre utilisé était à peine suffisamment sensible pour observer les oscillations du courant électrique. De grandes ondes de 120 à 180 microsecondes ($1 \mu\text{s} = 10^{-6} \text{ s}$) ainsi que de plus petites de 30 à 45 μs sont visibles difficilement. Berger les nommera respectivement ondes alpha et bêta. Domaine public.

un diplôme de droit à Harvard, il fait fortune à Wall Street dans les années dix-neuf cent vingt. Passionné de sciences, il utilise ses ressources pour ouvrir un laboratoire de recherche privé à Tuxedo Park, non loin de New York. Des ingénieurs et des chercheurs y œuvrent pour concevoir des instruments de mesure de plus en plus précis et performants, notamment des amplificateurs qui se révéleront utiles pour la captation des courants électriques du cerveau. Au départ, Loomis travaille sur



* « Über das Elektrenkephalogramm des Menschen » (« À propos de l'électroencéphalogramme humain »).

Les phases de sommeil

Le sommeil est un état physiologique, primordial pour notre santé, de réduction de la conscience et de la vigilance. Lorsque nous dormons, notre cerveau oscille entre deux états de sommeil principaux : lent et paradoxal.

Le sommeil lent représente 75 % de notre temps de sommeil total. Il est subdivisé en trois niveaux. Le premier est l'état de sommeil le plus léger, au cours duquel le moindre bruit est susceptible de nous réveiller. Il s'agit en réalité d'une phase d'endormissement composée de plusieurs micro-sommeils. D'une durée d'environ 10 minutes, il peut être plus long chez des personnes peinant à s'endormir. Durant cette phase, des ondes théta (entre 4 et 7 hertz) apparaissent à l'EEG (électroencéphalogramme). Le deuxième niveau correspond à une phase plus profonde de sommeil. Il est toujours facile de réveiller la personne, mais elle aura conscience d'avoir dormi. L'EEG montre alors des ondes particulières : les fuseaux de sommeil et les complexes-K. Enfin le troisième niveau, le sommeil lent profond, correspond, comme son nom l'indique, à l'état de sommeil le plus profond. Il est difficile de réveiller quelqu'un pendant cette phase. L'EEG change considérablement et affiche des oscillations lentes (entre 1 et 3 hertz) de grande amplitude : les oscillations delta. Le sommeil paradoxal représente le reste de notre sommeil, soit 25 %. Pendant cette phase, l'EEG montre un signal qui ressemble à s'y méprendre à celui de l'éveil, pourtant il est bien visible que la personne dort : d'où le paradoxe (fig.). En anglais, le sommeil paradoxal se nomme *rapid eyes movement* (« mouvement rapide des yeux »), car nos yeux bougent au cours de cette phase. Bien que nous rêvions pendant les deux phases de sommeil, les rêves du sommeil paradoxal nous paraissent plus réels et étranges que ceux du sommeil lent, qui s'apparentent plutôt, quant à eux, à des situations de la vie quotidienne.



des expériences de physique. Cependant, la lecture de l'article de Berger et la description des ondes alpha le poussent à mener des expériences sur son fils Henry. Il se concentre sur la réalisation d'EEG durant le sommeil et l'hypnose. Il décrit alors deux types d'ondes cérébrales se manifestant uniquement lors du sommeil : les complexes-K et les fuseaux de sommeil. Ces découvertes sont à l'origine de la classification des différents stades de sommeil (encadré *Les phases de sommeil*). Pauline Davis (1896-1942), l'une de ses collaboratrices, sera la première à observer sur l'EEG la présence de potentiels évoqués chez l'être humain, des courants électriques apparaissant en réponse à un stimulus. Davis le mettra en évidence à l'aide de stimuli auditifs, d'abord sur des patients endormis, puis éveillés. En outre, le laboratoire de Loomis est, à l'époque, le lieu de rencontre de nombreux grands scientifiques comme Albert Einstein (1879-1955), qui aurait été présent au moment de la découverte des fuseaux de sommeil. À l'approche de la Seconde Guerre mondiale, Loomis décide d'arrêter ses travaux et

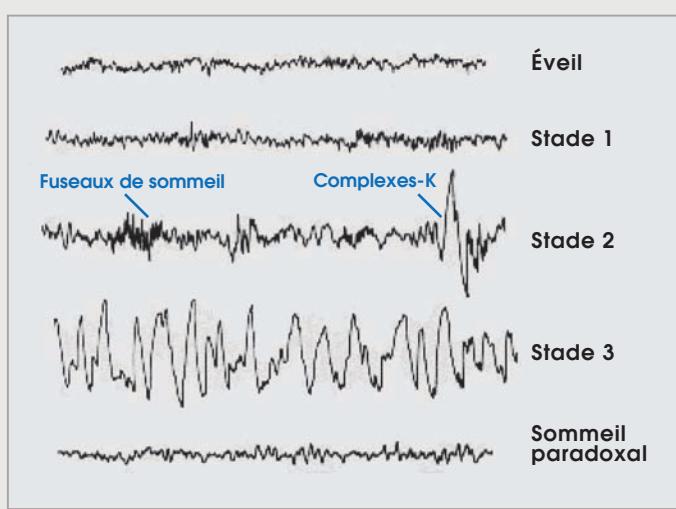
de donner son matériel d'EEG. Son équipe scientifique se concentre alors sur les ondes radio et participe à l'invention du radar.

Depuis les travaux fondateurs de Caton, Berger et Loomis, la technique d'électroencéphalographie a gagné nettement en sensibilité et précision spatiale ; elle est aujourd'hui incontournable en neurologie. Elle permet de vérifier le bon fonctionnement global du cerveau, ainsi que l'étude et le diagnostic de certaines pathologies telles que l'épilepsie.

L'ÉPILEPSIE PASSÉE AU PEIGNE FIN

L'épilepsie est une pathologie cérébrale caractérisée par des crises au cours desquelles des groupes de neurones se synchronisent : ils s'activent et se désactivent à l'unisson, perturbant le fonctionnement normal du cerveau. Ces crises peuvent avoir des manifestations diverses : mouvements anormaux des membres, convulsions, perte de connaissance ou du tonus musculaire, hallucinations...

En 1934, Frederic Gibbs (1903-1992) et William Lennox (1884-1960), deux médecins américains, assistent à une démonstration de l'utilisation de l'EEG par Hallowell Davis (1896-1992). Très rapidement, ils



Aperçu de l'EEG en fonction de l'état d'endormissement d'un patient.

- Éveil : ondes alpha et bêta
- Stade 1 : onde thêta
- Stade 2 : fuseaux de sommeil et complexes-K
- Stade 3 : onde delta
- Sommeil paradoxal : ondes alpha et bêta.

Domaine public.

comprennent que cet outil pourrait être extrêmement utile pour étudier l'épilepsie. Gibbs contacte alors Davis et lui fait découvrir un article présentant des enregistrements d'EEG de chiens ayant reçu une substance convulsivante. Les chercheurs avaient observé des changements dans l'activité corticale des animaux qu'ils nommèrent décharge de grand mal. Gibbs pense qu'il serait intéressant d'enregistrer des EEG de patients épileptiques pendant leurs crises. Un soir de décembre 1934, deux patients épileptiques sont observés en présence de Hallowell et Pauline Davis, Frederic (1903-1992) et Erna Gibbs (1906-1987), et Lennox. Tous deux souffrent d'épilepsie de type petit mal, appelé encore absence. Ce dernier est caractérisé par une perte de conscience sans perte de tonus musculaire : la personne ne parle plus, a le regard fixe, mais garde sa posture, puis revient à elle-même spontanément au bout de quelques instants. Lennox choisit ces patients, car ils sont plus simples à étudier que ceux ayant des crises convulsives. Au moment de leur crise, l'EEG des patients montre distinctement trois grandes oscillations par seconde. C'est la première utilisation de l'EEG en clinique (fig. 6).

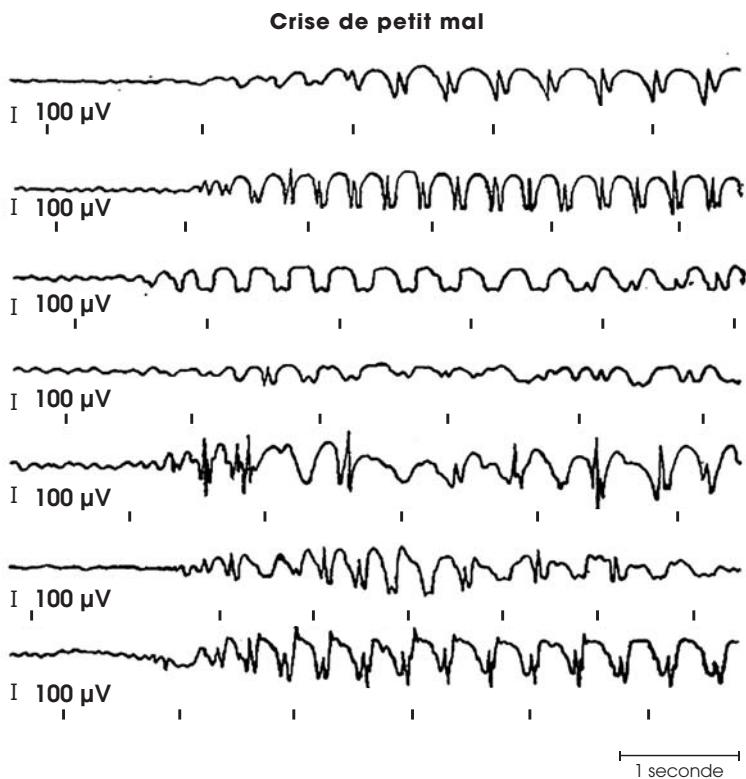


Figure 6. Altération de l'EEG (électroencéphalogramme) pendant des crises d'absence. Chaque ligne correspond à un patient différent. Le trait sous les tracés montre un intervalle de 1 seconde. $1 \mu\text{V}$ (microvolt) = 10^{-6} V . Domaine public.



En 1935, ces chercheurs publieront un article sur des travaux incluant dix patients supplémentaires, confirmant les résultats obtenus sur les deux premiers. Ces recherches ont permis d'intégrer l'EEG à l'hôpital dans le but de diagnostiquer plus rapidement l'épilepsie.

L'EEG À L'HÔPITAL

Aujourd'hui, l'augmentation du nombre d'électrodes permet de localiser précisément la zone du cerveau responsable des crises d'épilepsie (fig. 7). La limite de l'electroencéphalographie réside dans le fait qu'elle n'enregistre que la surface du cerveau, le cortex, sans voir ce qu'il se passe en profondeur. Si l'EEG et les méthodes complémentaires ne suffisent pas, des électrodes peuvent être placées à l'intérieur du cerveau au cours d'une opération chirurgicale, une technique appelée électroencéphalographie stéréotaxique. Le patient conserve les électrodes

implantées le temps de déterminer la position exacte du foyer épileptique. Cela réalisé, il est possible parfois d'effectuer une chirurgie de résection, afin de retirer la zone du cerveau à l'origine des crises.

L'EEG ne trouve pas son utilité uniquement dans le diagnostic de l'épilepsie. Il permet d'explorer aussi notamment les troubles du sommeil. En France, l'Inserm (Institut national de la santé et de la recherche médicale) estime qu'une personne sur trois est concernée par un trouble du sommeil (insomnie ou hypersomnie), ce qui en fait un enjeu de santé publique capital. Il est très difficile pour les patients d'estimer eux-mêmes la qualité et la quantité de sommeil réelles au cours d'une nuit. Pour y pallier, EEG, rythme cardiaque, saturation en oxygène, mouvements oculaires, ainsi que d'autres paramètres peuvent être surveillés au cours d'une ou plusieurs nuits. C'est ce qui est appelé une polysomnographie.

Figure 7. Casque EEG avec 256 électrodes.

Ces dernières sont réparties sur le crâne afin de capter l'activité électrique de différentes régions corticales.

© S. Jarlier / UNIGE.





L'EEG permet de réaliser un hypnogramme, graphique décrivant l'état d'éveil et les phases de sommeil (encadré) au cours de la nuit. Ces informations ont pour but d'évaluer quantitativement la nuit du patient et peuvent donner des indices sur l'origine du trouble (de l'endormissement, du maintien du sommeil...).

Enfin, l'EEG joue un rôle déterminant dans le diagnostic de la mort encéphalique. Autrefois, la mort était définie par l'arrêt du cœur. Cependant, depuis les années dix-neuf cent soixante, elle correspond à la cessation d'activité du cerveau. Lorsqu'un patient se trouve dans un état de coma avancé, un doute sur l'état de fonctionnement du cerveau peut subsister. Deux EEG plats à quatre heures d'intervalle permettent de confirmer l'état de mort encéphalique.

Aujourd'hui, ces techniques sont maîtrisées parfaitement et routinières en clinique. Toutefois, l'EEG est loin de nous avoir livré toute sa puissance. Il existe de nouvelles applications qui font l'objet de recherches : c'est le cas notamment des interfaces cerveau-machine.

AGIR PAR LA PENSÉE

Une interface cerveau-machine est un système permettant d'interagir avec l'environnement via une machine (ordinateur, voiture, bras mécanique...) uniquement grâce à la pensée. Pour ce faire, les signaux d'un EEG sont envoyés directement, dans un délai le plus bref possible, sur un ordinateur. Il existe deux méthodes principales pour que l'ordinateur comprenne ce qu'il se passe dans notre cerveau. La première, nommée calibration, consiste à demander au sujet de s'imaginer réaliser une action. Par exemple : « Pensez fort au fait que la voiture avance. » L'algorithme va établir le lien entre les signaux reçus et l'action à effectuer. Cela est répété pour une série d'actions. Une fois la phase de calibration terminée, il suffit de penser. L'algorithme reconnaît les signaux de l'EEG et effectue l'action associée pour nous.

La seconde méthode s'appuie sur la détection de signaux cérébraux connus et très stéréotypés, tels les potentiels évoqués dont le P300, signe d'attention, est un exemple. Il

est possible d'en tirer avantage afin de construire une interface cerveau-machine pour contrôler un clavier. Des lettres sont disposées sur un écran dans une grille de 6×6 . Des actions telles que « parler », « espace » ou encore « quitter » sont présentes aussi. Il est demandé à un sujet de penser à la première lettre d'un mot qu'il souhaite épeler. Les lignes et colonnes du carré se mettent à clignoter alternativement. Un ordinateur surveille en direct l'EEG à la recherche du potentiel évoqué P300, qui apparaît lorsque la lettre recherchée fait partie de la ligne ou de la colonne qui clignote. Après plusieurs itérations, la lettre à laquelle le sujet pense s'affiche à l'écran. Le sujet peut penser alors à la lettre suivante et épeler ainsi un mot complet. Ce système est lent, mais en constante amélioration. En 1988, les sujets s'exprimaient à une vitesse de 2,4 lettres par minute. Elle avoisine aujourd'hui les 11 lettres par minute. Cet outil peut-être très utile pour des personnes en situation de handicap, ne pouvant ni bouger, ni parler.

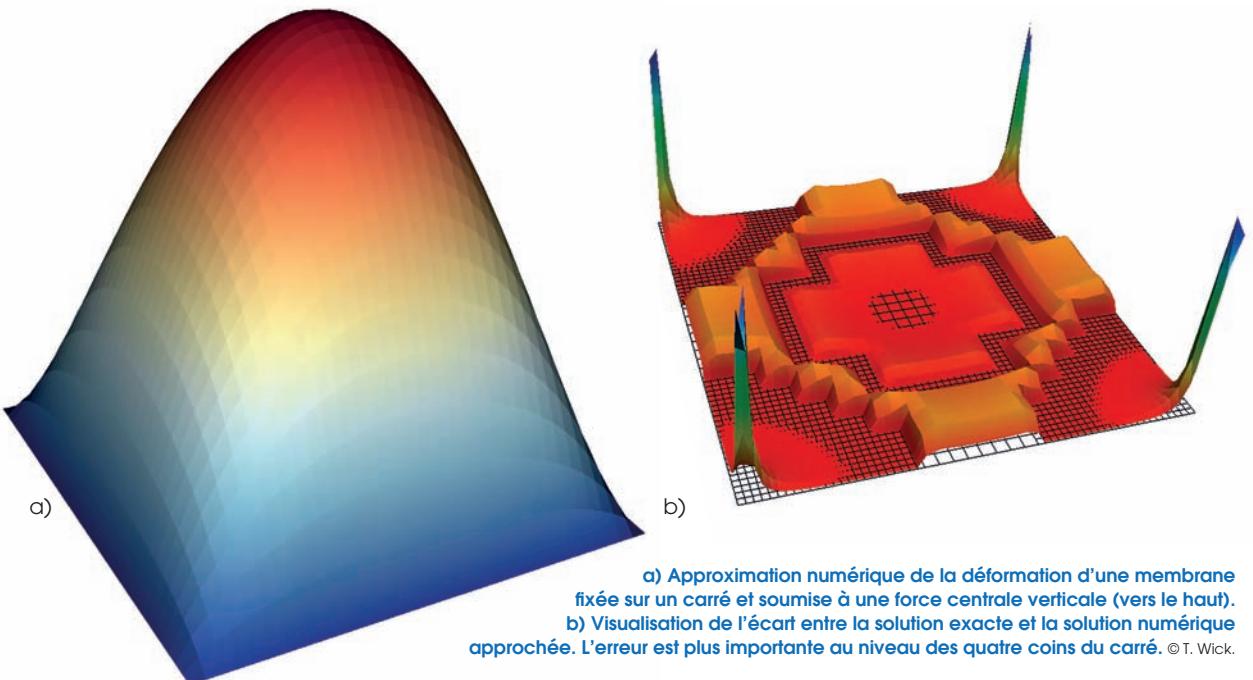
L'EEG peut être réalisé en surface dans les cas les plus simples (contrôle d'un clavier d'ordinateur) ou en intra-crânial pour les cas plus complexes (contrôle d'un bras robotisé). Les applications de ces interfaces n'ont que l'imagination pour limite. Un réveil qui se déclenche à la fin de votre sixième cycle de sommeil ? C'est possible. Produire un son dans une voiture lorsque le conducteur devient moins vigilant ? C'est possible également. L'électroencéphalographie, dont le développement s'est échelonné sur plus de un siècle, est une technique peu coûteuse, facile à mettre en œuvre et non invasive, qui permet d'observer les courants électriques à la surface du cerveau. À l'hôpital, elle est utilisée couramment pour diagnostiquer des pathologies et étudier le sommeil des patients. En recherche, l'EEG permet de sonder les mystères du cerveau et développer des outils afin d'améliorer le quotidien, notamment celui de personnes en situation de handicap, tels qu'une interface permettant de contrôler un fauteuil roulant électrique par la pensée. **B. K.**

Billel Khouader

Étudiant en double cursus médecine-sciences, après avoir validé sa troisième année de médecine,

Billel Khouader s'est lancé dans la réalisation d'une thèse en neurosciences. Il est actuellement en troisième année à l'Institut du fer à moulin.

Son travail consiste à comprendre l'activité du cerveau pendant le sommeil à l'aide de techniques telles que l'électro-encéphalographie.



a) Approximation numérique de la déformation d'une membrane fixée sur un carré et soumise à une force centrale verticale (vers le haut).

b) Visualisation de l'écart entre la solution exacte et la solution numérique approchée. L'erreur est plus importante au niveau des quatre coins du carré. © T. Wick.

L'art de bien faire des erreurs

De nos jours, les ingénieurs bénéficient d'outils numériques pour modéliser

le comportement des structures qu'ils conçoivent selon une variété de scénarios possibles. Les résultats obtenus ne sont pas toujours fiables. En réalité, ils sont même systématiquement faux ! Mais les mathématiciens ont développé des outils pour quantifier les erreurs induites par la résolution numérique et améliorer ainsi les prévisions.

Mathématiques et ordinateurs fournissent rarement des réponses exactes aux problèmes qu'ils nous aident à étudier. En fait, simuler parfaitement une réalité complexe par calcul informatique est impossible. Au sein du collège doctoral franco-allemand *Approches numériques et expérimentales avancées*, les deux auteurs de cet article collaborent au développement d'outils spécifiques permettant de comprendre et d'estimer les erreurs qui apparaissent lors de la résolution numérique d'équations, avec une approche pluridisciplinaire.

MODÉLISER, C'EST FAIRE DES ERREURS

Pour représenter la réalité, les physiciens ont créé des modèles conceptuels tels que la mécanique classique de sir Isaac Newton (1643-1727) ou la mécanique quantique. Dans ce cadre, et à partir d'un ensemble d'hypothèses données, la modélisation d'un phénomène physique repose, dans de nombreux cas, sur des équations aux dérivées partielles, qui mettent en jeu des dérivées de fonctions à plusieurs variables. Jusqu'à la moitié du XX^e siècle, en l'absence de machines capables de réaliser des calculs, seules les équations les plus simples pouvaient être résolues « à la main ». Le développement d'outils numériques offre de multiples possibilités pour résoudre ces équations dans des cas plus complexes. Des solutions sont obtenues ; cependant, garantir qu'elles représentent bien le problème réel est un défi : il faut non seulement valider le modèle (c'est-à-dire s'assurer qu'il reflète la réalité) mais aussi vérifier la solution (s'assurer que les équations du problème sont bien résolues). Ce domaine se situe

PAR **AMÉLIE FAU**, MAÎTRE DE CONFÉRENCES EN GÉNIE CIVIL À L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE PARIS-SACLAY, ET **THOMAS WICK**, PROFESSEUR DES UNIVERSITÉS EN MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES À L'UNIVERSITÉ GOTTFRIED-WILHELM-LEIBNIZ DE HANOVRE



à l'interface entre les mathématiques, qui regorgent de théorèmes, et l'ingénierie, qui recherche la robustesse de ces méthodes (c'est-à-dire le fait qu'elles fonctionnent) pour une grande variété d'applications spécifiques complexes. Ici, nous allons illustrer notre propos en exposant un modèle simple pour étudier la déformation de la tour Eiffel. Toutefois, la même théorie est utilisée pour simuler la production d'énergie par les éoliennes, les comportements météorologiques, l'aérodynamique des avions ou les battements du cœur.

La démarche adoptée par les scientifiques face à un problème physique consiste à commencer par modéliser mathématiquement le problème au moyen d'équations, puis à les analyser pour savoir si une solution existe et enfin à calculer cette dernière. Malheureusement, les mathématiques ne nous donnent pas systématiquement des réponses exactes. Modéliser parfaitement une réalité complexe avec des formules est pratiquement impossible. Étudier l'existence de la solution et la trouver théoriquement constitue également un problème très complexe dans la plupart des cas. Par ailleurs, la solution du problème peut être calculée « à la main » uniquement pour des situations simples (solution dite analytique). Pour les applications complexes, seule une solution estimée par un calcul informatique est disponible (solution dite numérique). En outre, les ordinateurs et les outils numériques développés pour approcher les solutions théoriques fournissent également des résultats en

partie erronés. Comment évaluer de façon pertinente l'erreur commise au regard de critères particuliers dictés par la pratique ? Les mathématiciens élaborent des outils avec les ingénieurs pour transmettre des résultats de calculs par ordinateur les plus justes possibles. Il faut que ces calculs soient les moins coûteux et les plus rapides possibles, et utilisables de préférence dans le cadre d'applications très variées.

DES ERREURS DE TOUTES SORTES

Lorsque les scientifiques modélisent mathématiquement un phénomène physique et résolvent numériquement les équations obtenues, les erreurs engendrées peuvent être de plusieurs natures. Prenons un exemple : nous cherchons à prédire comment la tour Eiffel se déforme sous l'effet du vent (fig. 1). Dans un premier temps, nous mesurons le déplacement du sommet de la tour lors de grosses rafales. Cette mesure s'accompagne nécessairement d'erreurs expérimentales. En lisant une mesure de distance sur l'un des sept télémètres installés sur la tour Eiffel, une variation de plus ou moins un millimètre peut être introduite notamment par rapport à la valeur réelle. Ensuite, à partir des mesures récoltées, les scientifiques établissent un modèle mathématique pour décrire la déformation du monument sous l'effet du vent. Le choix du modèle et l'identification de paramètres liés au problème sont des sources potentielles d'erreurs de

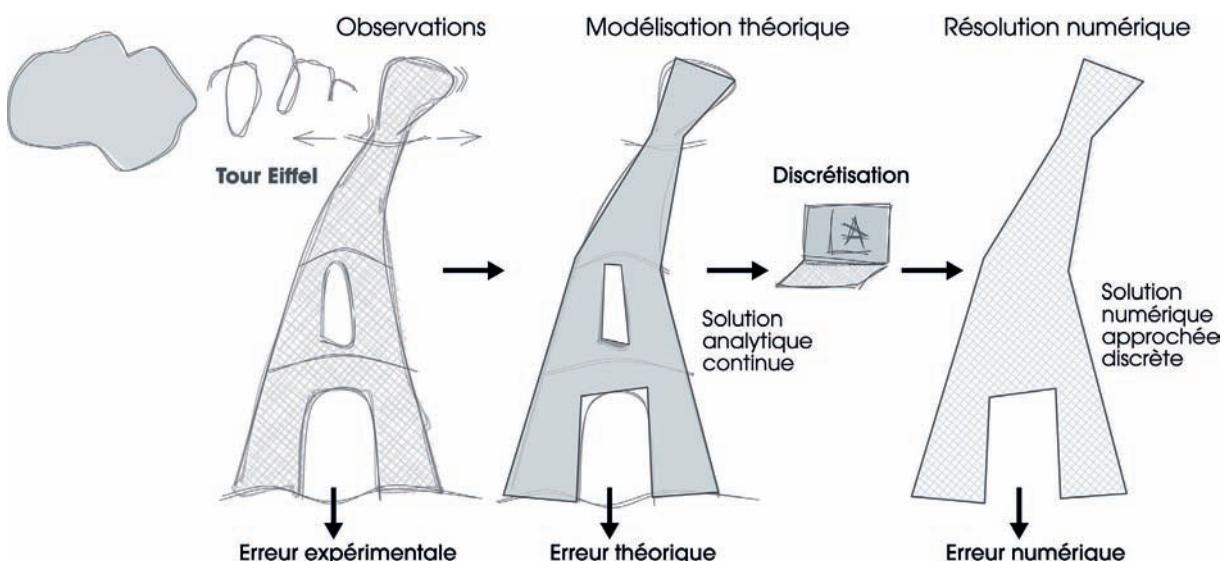


Figure 1. Étudier et prévoir la résistance au vent de la tour Eiffel s'accompagne de trois types d'erreurs potentielles : expérimentales, théoriques et numériques. © S. Coudry / Universcience.

Figure 2. Borner l'erreur exacte pour en obtenir la meilleure estimation possible.

© S. Coudry / Universcience.



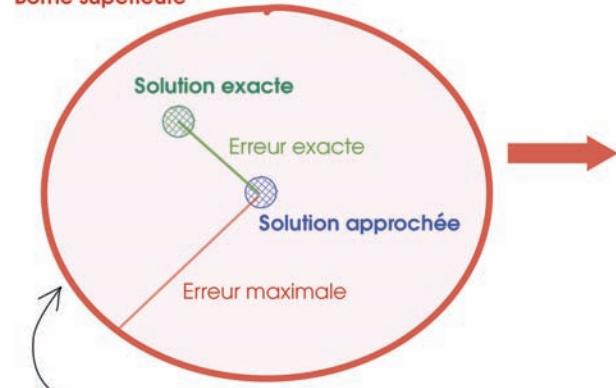
type théorique. Le déplacement prévu sera pratiquement toujours approximatif. De plus, si le calcul est effectué par un ordinateur, le phénomène ne peut être étudié de façon continue : la tour sera représentée par quelques points dont le déplacement ne sera prévu que pour quelques pas de temps (par exemple, la position de la tour Eiffel ne sera précisée qu'à chaque seconde : le problème est dit discréétisé). Des différences d'estimation peuvent apparaître alors, en fonction du nombre de points et du pas de temps choisis : le résultat est entaché d'erreurs numériques. Ces trois sources d'erreurs (expérimentales, théoriques et numériques) sont impliquées naturellement dans l'étude de la majorité des systèmes scientifiques.

Concentrons-nous sur le dernier type d'erreurs. Généralement, l'écart entre la solution exacte du modèle mathématique et l'approximation numérique calculée par ordinateur n'est pas nul : la solution discrète approchée n'est pas égale à la solution exacte. Pour connaître la justesse d'une résolution numérique et quantifier

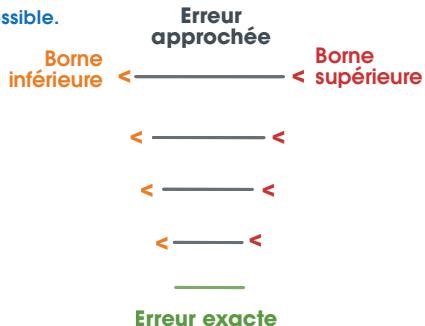
En un point

■ Estimation de l'erreur maximale

Borne supérieure



Domaine dans lequel se trouve nécessairement la solution exacte



l'erreur de discréétisation, les mathématiciens proposent d'évaluer cet écart. Mais, dans la plupart des cas, si les ingénieurs recherchent une solution approchée, c'est qu'ils ignorent la solution exacte. Comment les mathématiciens peuvent-ils estimer alors l'écart entre un point connu et un point inconnu ?

BORNER LES ERREURS...

L'idée est d'encadrer cet écart entre deux bornes donnant les estimations inférieure et supérieure de l'erreur exacte, puis de les rapprocher pour avoir une estimation de l'écart exact la plus précise possible (fig. 2). En général, obtenir ces deux bornes est plus simple que de calculer l'écart exact et peut être accompli en connaissant uniquement la solution approchée. Plus ces bornes, appelées estimateurs d'erreur, sont proches, plus l'estimation sera précise.

Plusieurs points sur la tour Eiffel

■ Estimateur de fiabilité

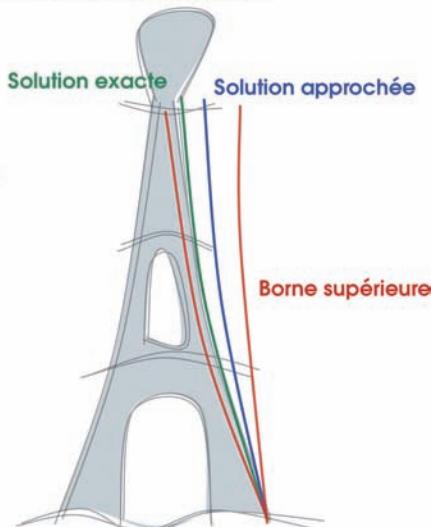


Figure 3a. En un point donné, la solution exacte se trouve nécessairement à une distance de la solution approchée majorée par l'erreur maximale. Sur l'ensemble de l'édifice, cela fournit une solution exacte bornée par l'estimateur de fiabilité. © S. Coudry / Universcience.



La borne supérieure permet d'estimer l'écart *maximal* entre la valeur approchée et la valeur exacte. Il s'agit de ce qui est cherché naturellement : cet écart définit les limites du plus grand domaine autour de la solution approchée dans lequel se trouve nécessairement la solution exacte (fig. 3a). L'erreur exacte ne peut dépasser cette borne. En connaissant ce domaine, nous savons à quel point la solution estimée numériquement est fiable. La borne inférieure permet d'estimer l'écart *minimal* entre la valeur approchée et la valeur exacte (fig. 3b). Cet écart est obligatoirement positif et, au mieux, nul quand l'estimation est exacte. Il délimite le plus petit domaine autour de la solution approchée dans lequel la solution exacte ne peut se situer. Il peut sembler surprenant qu'il soit possible de calculer un tel écart, voire même qu'il présente un intérêt... Pourtant, cette borne permet de déterminer l'efficacité de la méthode, car plus cet écart est proche de l'écart maximal, mieux l'erreur est approchée et plus l'estimateur est efficace. Ainsi, un estimateur efficace donnera l'estimation optimale de l'erreur exacte. Si nous le calculons en divers points de la tour comme illustré sur la figure 3, nous savons où l'erreur est la plus petite et la plus grande. Cela permet d'identifier les zones qui contribuent le plus à l'erreur totale.

Ces estimateurs sont conçus spécifiquement pour chaque problème et chaque équation, de manière à donner la meilleure information sur l'erreur des calculs et évaluer aussi précisément que possible le niveau de

connaissance sur un problème donné. L'information quantifiée par ces bornes constitue un trésor pour l'ingénieur : elle lui permet de mesurer l'erreur et donc de disposer d'une évaluation précise de son niveau de connaissance. Il sait à quel point sa solution approchée est imparfaite, mais aussi à quel point il peut l'améliorer encore pour obtenir la meilleure estimation possible.

... POUR MIEUX LES RÉDUIRE

L'intérêt des estimateurs d'erreur ne se limite pas à qualifier la pertinence des calculs réalisés : ils permettent de développer aussi des méthodes très efficaces dites *adaptatives* pour réduire l'erreur commise. En effet, s'il connaît les bornes d'erreur, l'ingénieur peut optimiser la manière de recalculer la solution, c'est-à-dire restreindre significativement le niveau d'erreur tout en limitant l'augmentation du besoin en performances de l'ordinateur, voire en diminuant fortement le temps mis par la machine à accomplir une simulation. L'idée consiste à focaliser les calculs seulement sur les parties qui contribuent le plus à l'erreur totale, en accroissant la résolution seulement lorsque c'est nécessaire. Par exemple, sur la figure en ouverture d'article, vous pouvez deviner un maillage plus fin au niveau des coins, où l'erreur est la plus grande. Pour résoudre notre problème, nous pouvons commencer par une solution grossière requérant peu de ressources informatiques. Dans notre cas, il s'agit de représenter le profil de la tour Eiffel avec seulement quatre points

En un point

■ Estimation de l'erreur minimale

Solution exacte



Plusieurs points sur la tour Eiffel

■ Estimateur d'efficacité

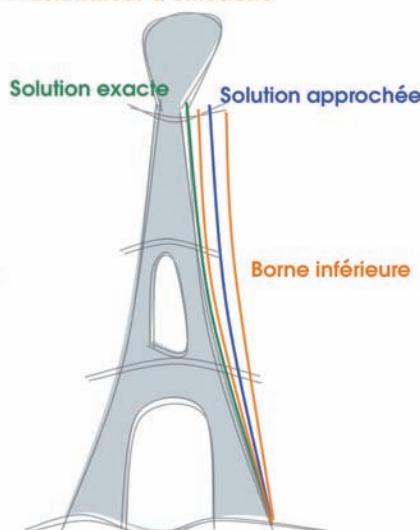


Figure 3b. En un point donné, la solution exacte se trouve nécessairement plus loin de la solution approchée que l'erreur minimale. Sur l'ensemble de l'édifice, cela fournit une solution approchée bornée par l'estimateur d'efficacité. © S. Coudry / Universcience.

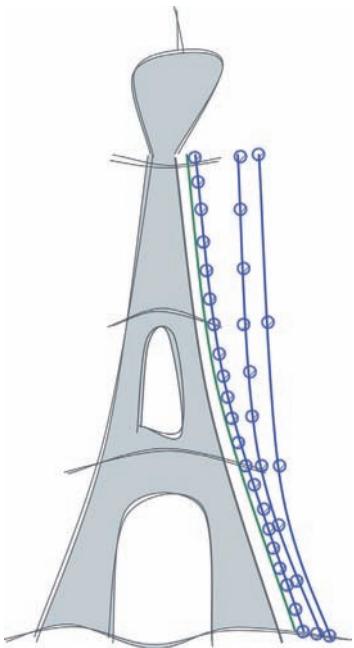


Figure 4. En bleu, trois solutions approchées utilisant de plus en plus de points. En vert, la solution exacte. © S. Coudry / Universcience.

(courbe bleue la plus à droite sur la figure 4). Nous obtenons alors une approximation de la déformation de la tour assez éloignée de celle réelle (la courbe verte). Comment améliorer le niveau de résolution ? En ajoutant des points à notre solution grossière : nous pouvons obtenir ainsi des solutions plus fines, donnant une meilleure approximation de la solution exacte.

Sans connaître les estimateurs d'erreur, l'ingénieur peut toujours rajouter des points à l'aveugle ou en s'appuyant sur ses expériences précédentes, avec le risque de faire figurer des points inutiles. Mais, lors du calcul, plus le nombre de points considérés est élevé, plus l'ordinateur sollicité doit être puissant ou plus le temps de calcul sera long : placer des points au hasard et en utiliser plus que nécessaire est délétère. Ingénieurs et mathématiciens se servent donc de la

Amélie Fau

Amélie Fau a obtenu un diplôme d'ingénieur en génie civil à l'INSA (Institut national des sciences appliquées) de Toulouse, une agrégation de génie civil et un doctorat en mécanique à l'École centrale Paris. Après avoir été enseignant-chercheur pendant cinq ans en Allemagne, elle est devenue maître de conférences au département d'études et de recherche en génie civil et environnement de l'École normale supérieure Paris-Saclay et au laboratoire de Mécanique et technologie en 2019. Ses activités de recherche portent sur le développement de méthodes numériques efficaces pour des applications en mécanique des matériaux, telles que le comportement à échelle électronique, les chargements très longs ou ceux incertains.

connaissance des estimateurs d'erreur pour adjoindre des points supplémentaires là où l'erreur est la plus importante, afin que le bénéfice des ajouts soit optimal. Seules ces parties sont recalculées avec une plus grande précision. Pour ajouter des points pertinents, nous pouvons nous concentrer aussi sur l'erreur spécifique, qui concerne une zone précise de l'objet ciblé. Par exemple, puisque la base de la tour Eiffel ne bouge pratiquement pas, l'ingénieur peut choisir d'étudier seulement la déformation de la flèche ou de la partie supérieure gauche (fig. 5).

S'ADAPTER À L'ERREUR

Voici la force de cette méthode mathématique des estimateurs d'erreur : à partir de la seule connaissance d'une solution approchée rudimentaire, ceux-là permettent d'estimer la justesse de l'approximation (savoir où se situe la solution par rapport à l'erreur maximale possible) et d'identifier ses points faibles pour l'améliorer. Une solution approchée grossière peut donc s'avérer suffisante, une fois enrichie et complétée par des méthodes adaptatives fondées sur la connaissance apportée par les estimateurs d'erreur. Le niveau de discrétisation sera choisi alors selon l'erreur acceptable. Malheureusement, cela ne fonctionne pas systématiquement : un scénario délétère pour cette méthode est celui où les valeurs des bornes ne sont pas modifiées par les différentes estimations (fig. 6a). Dans cette situation, la connaissance des erreurs ne nous apporte aucune information vraiment pertinente. Heureuse-

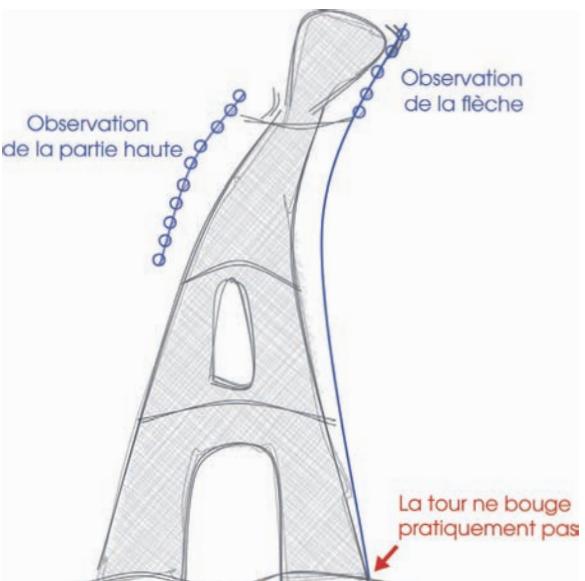


Figure 5. Deux zones d'intérêt identifiées par l'ingénieur, où la déformation de la tour est plus importante. © S. Coudry / Universcience.

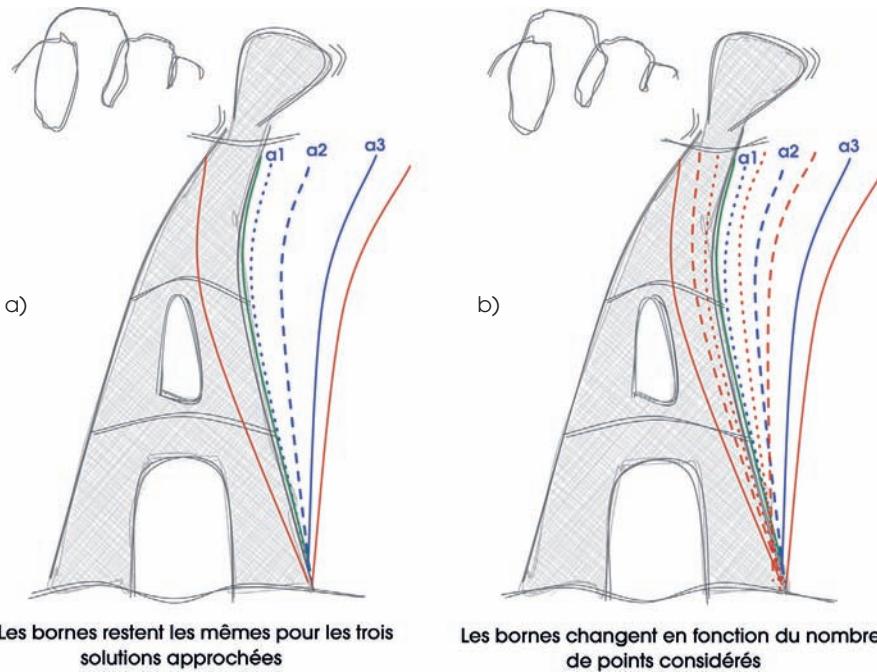


Figure 6. Les bornes d'erreur peuvent être stables (a) ou s'améliorer au fur et à mesure des simulations (b). © S. Coudry / Universcience.

ment, dans la majorité des cas, les bornes sont modifiées par les diverses solutions approchées. L'ingénieur obtient ainsi des spectres de fiabilité/efficacité qui s'améliorent au fur et à mesure (fig. 6b) et sait à quel point la solution a été améliorée. L'un des défis pour les mathématiciens consiste donc à fournir les bornes les plus proches des solutions approchées.

SEUL L'OBJECTIF COMPTE

Les estimateurs permettent de quantifier et de savoir à quel point la solution obtenue est imparfaite mais acceptable, c'est-à-dire suffisamment proche de la solution exacte. Cela met en avant aussi une notion capitale : la manière de quantifier le manque de connaissance vis-à-vis d'un problème. Il est possible de se concentrer sur un paramètre spécifique qui intéresse particulièrement l'ingénieur. Par exemple, au lieu d'étudier la déformation de l'édifice, ce dernier pourrait porter son intérêt également sur les efforts de cohésion dans le fer constituant la tour, c'est-à-dire les forces interatomiques qui créent la cohésion de la matière. Les estimateurs peuvent se calculer ainsi en fonction des paramètres étudiés, qui peuvent être parfois très nombreux. Par exemple, si nous voulons estimer le temps que la peinture mettra avant de s'effriter, nous devons prendre en compte des paramètres thermiques, chimiques et mécaniques. Il devient de plus en plus difficile alors de résoudre les équations. Depuis la seconde moitié du XX^e siècle, les calculs numériques ont été développés et étendus largement pour résoudre des problèmes d'ingénierie. En parallèle,

les analyses et estimations d'erreur ont été proposées, aboutissant de nos jours à un savoir-faire assez mature, applicable à des problèmes complexes. Bien sûr, il reste des pistes à explorer. Par exemple, les problèmes mettant en jeu de multiples équations ou paramètres qui interagissent constituent toujours des défis. Il faut estimer alors les erreurs, proposer des schémas adaptatifs pour optimiser les stratégies, établir des compromis sur des objectifs parfois contradictoires... Mais, grâce aux nombreuses collaborations entre mathématiciens et ingénieurs, les estimations d'erreur et les calculs adaptatifs permettent de résoudre des problèmes d'une taille inatteignable par le passé. Ils ont permis aussi de démocratiser l'utilisation des simulations, qui peuvent être menées avec des moyens de calcul plus modestes (les ordinateurs à hautes performances ne sont plus systématiquement nécessaires), des temps de calcul plus courts et des coûts réduits. A. F. et T. W.

Thomas Wick

Thomas Wick est professeur des universités à l'université Gottfried-Wilhelm-Leibniz de Hanovre depuis octobre 2017. Il a effectué sa thèse de doctorat en 2011 à l'université de Heidelberg. Par la suite, il a accompli des missions post-doctorales et a été maître de conférences en Allemagne, aux États-Unis, en Autriche et en France. Ses activités de recherche portent sur l'analyse numérique, le calcul scientifique et l'optimisation pour les équations aux dérivées partielles, les problèmes couplés et la multiphysique pour diverses applications.

Le bruit de Perlin

Ou comment générer des paysages numériques



© Minecraft / Mojang Studios.



Aujourd’hui, la puissance des ordinateurs nous facilite la tâche dans bon nombre de domaines. En particulier dans la conception de jeux vidéo, au cours de laquelle le travail long et fastidieux de la création d’un univers peut être allégé par l’utilisation d’un ensemble d’outils de génération automatique appelé *génération procédurale*. Dans cet article, nous allons découvrir l’un des plus connus : le *bruit de Perlin*.

PAR ÉMILIEN CORNILLON, MÉDIATEUR SCIENTIFIQUE, UNITÉ INFORMATIQUE ET SCIENCES DU NUMÉRIQUE DU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE



Lors du développement d'un jeu vidéo, la qualité de l'environnement dans lequel le joueur va évoluer est primordiale pour une immersion réussie. Or créer un environnement réaliste, suffisamment vaste et varié pour que le joueur ne s'ennuie pas, peut s'avérer long et fastidieux. Heureusement, il existe aujourd'hui la *génération procédurale*. Ce terme désigne des méthodes de création de contenus automatiques et peut s'appliquer à la production d'environnements, d'objets, d'êtres vivants ou encore de scénarios ou de dialogues. Ce sont généralement des algorithmes qui s'appuient sur de l'aléatoire pour générer de nouveaux éléments capables de présenter une certaine cohérence, voire d'imiter la réalité.

Dans cet article, nous allons parler essentiellement de l'une des méthodes les plus connues dans ce domaine : le *bruit de Perlin*. Ce dernier est employé dans des applications très diverses, mais nous nous concentrerons ici sur la plus spectaculaire : la génération de paysages numériques.

Si l'objectif des méthodes de génération procédurale est d'utiliser l'aléatoire, une application basique de ce dernier ne donne pas de résultats très intéressants. La figure 1 présente un paysage purement aléatoire : la figure 1a correspond à une carte de hauteur générée, où la hauteur de chaque

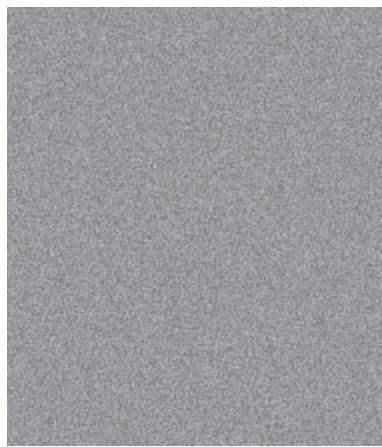
point est représentée par sa luminosité – plus un point est clair, plus il est haut –, et la figure 1b au résultat en 3D (trois dimensions) – un ensemble de pics acérés.

La méthode du bruit de Perlin permet de produire une certaine cohérence, en faisant en sorte que la hauteur d'un endroit soit contrainte de manière à ne pas diverger excessivement de celle des alentours.

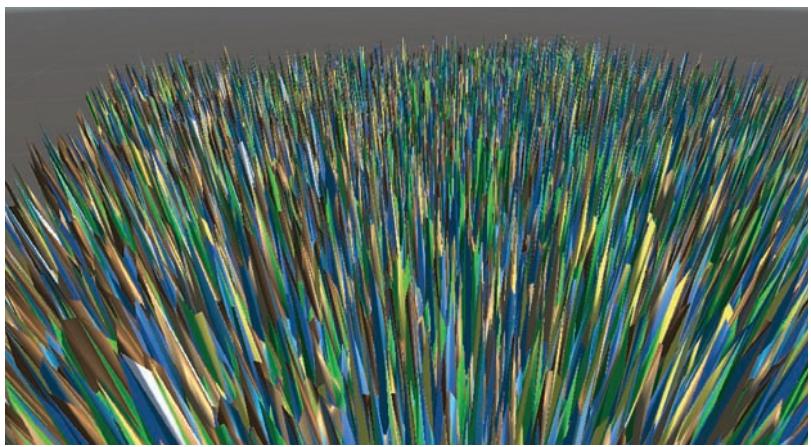
LA MÉTHODE DE PERLIN

Remontons en 1982, à la sortie de *Tron*. Ce film a été créé en très grande partie avec des effets spéciaux numériques. Or, à cette époque-là, le résultat était assez peu convaincant. C'est dans ce contexte que l'Américain Ken Perlin, appartenant à l'équipe dédiée à la production des effets spéciaux du film, a conçu la méthode qui s'appellera par la suite le bruit de Perlin. Il publierait officiellement ses travaux en 1985.

Cette méthode peut être considérée comme une sorte de générateur de valeurs pseudo-aléatoires lissées. Dans les grandes lignes, il s'agit d'une fonction mathématique qui prend des valeurs en entrée et donne un résultat qui semble aléatoire en sortie. Cependant, si, pour la génération de plusieurs valeurs, les entrées sont très proches les unes des autres, les résultats seront très similaires, contrairement à un bruit brut. En utilisant la méthode du



a)



b)

Figure 1. a) Carte de hauteur générée aléatoirement avec un bruit brut (plus un point est clair, plus il est haut). b) Visualisation en 3D (trois dimensions) de cette même carte. © É. Cornillon / Universcience.

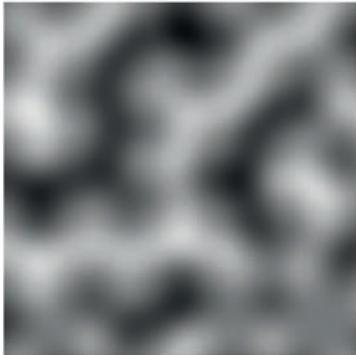


Figure 2. Exemple de bruit de Perlin en deux dimensions. © É. Cornillon / Universcience.

bruit de Perlin, le résultat ressemblera à celui de la figure 2 : des structures qui peuvent représenter des chaînes de montagnes (en blanc) ou des vallées (en noir) apparaissent. Nous allons détailler dans la suite de cet article comment obtenir ce résultat.

CONSTRUCTION DU GÉNÉRATEUR

La méthode du bruit de Perlin peut être utilisée avec une, deux, trois voire quatre dimensions. Dans la suite de cet article, nous développerons la version à deux dimensions*. La fonction de bruit prend alors deux valeurs différentes en entrée et donne une valeur en sortie (qui, dans notre cas, sera liée à une hauteur). Le générateur de Perlin est constitué d'une grille de taille infinie dont chacune des cases est un carré de côté 1 (grille rouge sur la figure 3). À chaque coin de chacune des cases est placé un vecteur (une flèche définie par son orientation et sa longueur, en jaune sur la figure 3), commun à toutes les cases adjacentes. Dans notre exemple, les vecteurs affichent seulement quatre directions possibles : en haut à droite, en haut à gauche, en bas à droite ou en bas à gauche. C'est l'une des étapes les plus importantes de la méthode. En effet, c'est là que l'aléatoire apparaît : la direction de chaque vecteur est choisie selon un générateur aléatoire uniforme classique (toutes les directions ont la même probabilité d'être choisies). Chaque vecteur caractérise un gradient. Pour établir

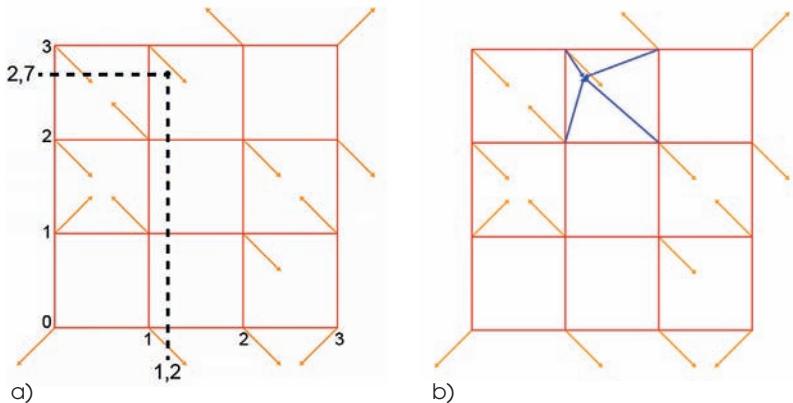


Figure 3. La grille infinie (réduite à neuf cases ici) est représentée en rouge et les vecteurs en jaune. a) Position du point de sélection. b) Vecteurs du point. © É. Cornillon / Universcience.

une analogie avec un relief, c'est un peu comme s'il indiquait la direction d'une pente par rapport au coin où il se trouve. Le haut de la pente est situé dans la direction de la flèche et le bas à l'opposé. C'est sur cette base que le générateur de bruit de Perlin pourra donner les valeurs de hauteur recherchées.

LA GÉNÉRATION DE VALEURS DE PERLIN

Les deux valeurs d'entrée peuvent être interprétées comme des coordonnées et celle de sortie comme la hauteur de ce point dans la grille infinie. Pour observer le processus de génération d'une valeur de Perlin, prenons deux coordonnées : par exemple, 1,2 horizontalement et 2,7 verticalement. Dans notre générateur, le point correspondant à ces coordonnées est le point noir de la figure 3a.

Pour commencer, il faut regarder quels sont les vecteurs des quatre coins les plus proches. L'étape clé consiste à déterminer à quelle hauteur est situé notre point par rapport à chacun de ces vecteurs. L'astuce de Perlin repose sur l'utilisation d'un outil mathématique très courant : le produit scalaire de deux vecteurs. Celui-là permet de comparer deux vecteurs. Le résultat du produit dépend de leur direction et de leur taille l'un par rapport à l'autre.

Pour pouvoir effectuer ce calcul, il faut qu'il y ait deux vecteurs par coin. Pour cela, nous allons créer quatre nouveaux vecteurs, non aléatoires quant à

* Les valeurs représentées par les nuances de gris sont positionnées sur un plan. Même s'il est possible de générer un paysage en trois dimensions avec, la fonction de bruit demeure en deux dimensions.

eux, qui partent de chacun des coins et sont orientés vers notre point (en bleu sur la figure 3b). Dorénavant, il est possible de calculer le produit scalaire pour chacun d'entre eux.

Le résultat obtenu peut se traduire de la façon suivante : – les deux vecteurs sont dirigés dans le même sens, une grande valeur sera obtenue (donc une grande hauteur) ; – les deux vecteurs sont dirigés en sens opposés, la valeur sera négative (donc une hauteur très faible) ; – les deux vecteurs sont perpendiculaires, la valeur sera nulle (donc une hauteur moyenne).

Par exemple, sur la figure 3b, les deux vecteurs situés en haut à gauche de la case sont très proches l'un de l'autre, donc la hauteur sera élevée dans ce coin. À l'inverse, les deux vecteurs situés en bas à droite de la case sont en sens opposés, donc la hauteur sera très faible dans ce coin-là. Les valeurs obtenues pour chacun des coins commencent à donner une idée de la hauteur de notre point. Si, pour tous les coins, les valeurs sont

grandes, le point sera haut *a priori* ; si toutes les valeurs sont négatives, le point sera plutôt bas. Mais comme elles n'ont aucun rapport les unes avec les autres pour l'instant, il est impossible de savoir à quelle hauteur sera le point. À cette étape du processus, un traitement supplémentaire est nécessaire : l'interpolation.

Dans notre cas, le principe de l'interpolation est assez simple : calculer une sorte de hauteur moyenne du point pondérée par sa proximité avec les différents coins. En effet, plus le point est proche d'un coin, plus la valeur de ce coin pèsera dans la détermination de la hauteur finale du point. Sur la figure 3, le placement du point implique que le coin en haut à gauche aura le poids le plus fort, car il est très proche. À l'inverse, le coin avec le poids le plus faible sera celui en bas à droite, car il est très éloigné. C'est le résultat de cette interpolation qui fournira la hauteur finale du point, et donc la valeur de Perlin donnée par le générateur.

Échantillonnage de la réalité

La réalité est infiniment précise, grande et complexe, à l'antipode de ce qu'est un ordinateur, dont la mémoire est très limitée. Il est impossible de représenter la réalité de manière parfaitement fidèle. Il faut donc l'échantillonner : relever des informations parcellaires qui, mises bout à bout, permettent de donner l'illusion de la réalité. Plus le nombre d'informations est conséquent, plus la représentation se rapproche de la réalité.

Par exemple, dans le cas d'une image, il faut la découper en petites zones, appelées pixels, dont la couleur est déterminée par une moyenne des couleurs présentes dans cette zone. La précision est limitée à des pixels. Plus le nombre de pixels est élevé (donc plus leur taille est faible), plus la précision de l'image sera importante.

Un son est une onde constituée de zones dans lesquelles l'air est compressé et d'autres dans lesquelles il est décompressé. Dans le cas de la numérisation d'un son, l'échantillonnage s'effectue par la mesure, à intervalles réguliers, de la pression de l'air. Plus le nombre de mesures est élevé, plus la restitution du son sera proche de la réalité. Pour la génération d'un paysage numérique, il est donc nécessaire de procéder de la même façon : définir une unité insécable de terrain qui contiendra une hauteur unique.

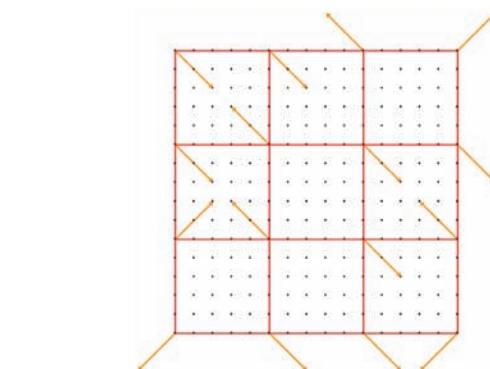


Figure 4. Échantillonnage de la hauteur de 256 terels adjacents lors de la création du terrain. Chaque point correspond à une valeur de Perlin générée pour un terel. © É. Cornillon / Universcience.

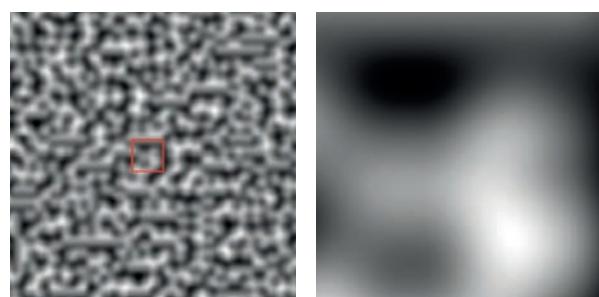


Figure 5. Effet du changement de l'intervalle d'échantillonnage. a) Résultat pour une valeur de 0,006. Le carré rouge contient le motif présent sur la figure 5b. b) Résultat pour une valeur d'intervalle de 0,001. © É. Cornillon / Universcience.

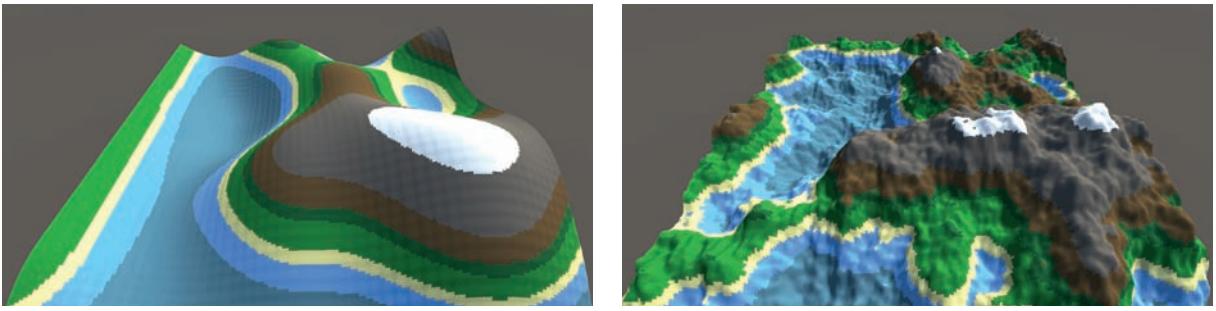


Figure 6. a) Simulation en 3D du bruit du motif obtenu sur la figure 5. b) Même simulation en 3D en ajoutant un effet fractal. Ici, les couleurs des terels sont déterminées en fonction de la valeur donnée par la matrice. © É. Cornillon / Universcience.

Grâce au déroulement de la méthode que nous venons de voir, la cohérence du bruit de Perlin prend tout son sens. En effet, pour deux points situés à proximité dans le générateur, les vecteurs respectifs orientés vers chaque point (en bleu) ne seront pas très différents, donc les produits scalaires seront proches. Par conséquent, l'interpolation pour un point donnera une valeur très légèrement plus haute ou plus basse que celle pour l'autre point. De plus, l'interpolation permet d'adoucir et de lisser l'aléatoire brut inhérent au placement des vecteurs des coins sur la grille du générateur.

CRÉATION DU PAYSAGE

Le générateur de Perlin étant une fonction mathématique, sa taille et sa précision sont infinies. Les valeurs données en entrée du générateur peuvent posséder un nombre infini de chiffres après la virgule et être aussi grandes que souhaité, il sera toujours capable de renvoyer une valeur.

À l'opposé, l'ordinateur est un objet concret. Malgré une taille très importante, sa mémoire est finie. Il est donc impossible de générer un terrain avec la même précision que celle du générateur. Il est nécessaire d'échantillonner des valeurs du générateur de la même façon qu'un son ou une image est échantillonné·e pour être numérisé·e (*encadré Échantillonnage de la réalité*). Ici, nous appellerons la plus petite unité de base dont sera constitué notre terrain le *terel*, un élément de terrain. Pour générer un paysage, une valeur de Perlin doit être obtenue pour chaque terel. Il faut établir alors un intervalle d'échantillonnage, c'est-à-dire la distance à laquelle le générateur va prélever la hauteur de deux terels successifs. Par exemple, si l'intervalle est de 0,2, la valeur de chacun des terels sera obtenue en regardant la valeur de Perlin tous les 0,2 pour les coordonnées verticales et horizontales. Sur la figure 4, chaque

point représente les coordonnées d'échantillonnage des seize premiers terels horizontaux et verticaux (donc pour 256 terels adjacents) avec l'intervalle 0,2. Le choix de l'intervalle est primordial pour le résultat obtenu. Plus l'intervalle est grand, plus les échantillons seront espacés et plus le paysage sera « dézoomé ». La figure 5b correspond à la zone encadrée en rouge sur la figure 5a, avec un intervalle six fois plus important. Si l'intervalle est augmenté de manière considérable, le résultat sera tellement dézoomé qu'il ne ressemblera plus qu'à un simple bruit brut (comme sur la figure 1). Une fois la carte de hauteur de notre paysage générée, il faut la traiter pour obtenir une visualisation en trois dimensions. Par défaut, les valeurs données par le générateur de Perlin sont comprises entre 0 et 1, 1 étant la hauteur maximale. Il faut donc augmenter proportionnellement ces valeurs afin que notre paysage possède de véritables reliefs, comme le montre la figure 6a. Dans cette représentation,



Le générateur de Perlin étant une fonction mathématique, sa taille et sa précision sont infinies.

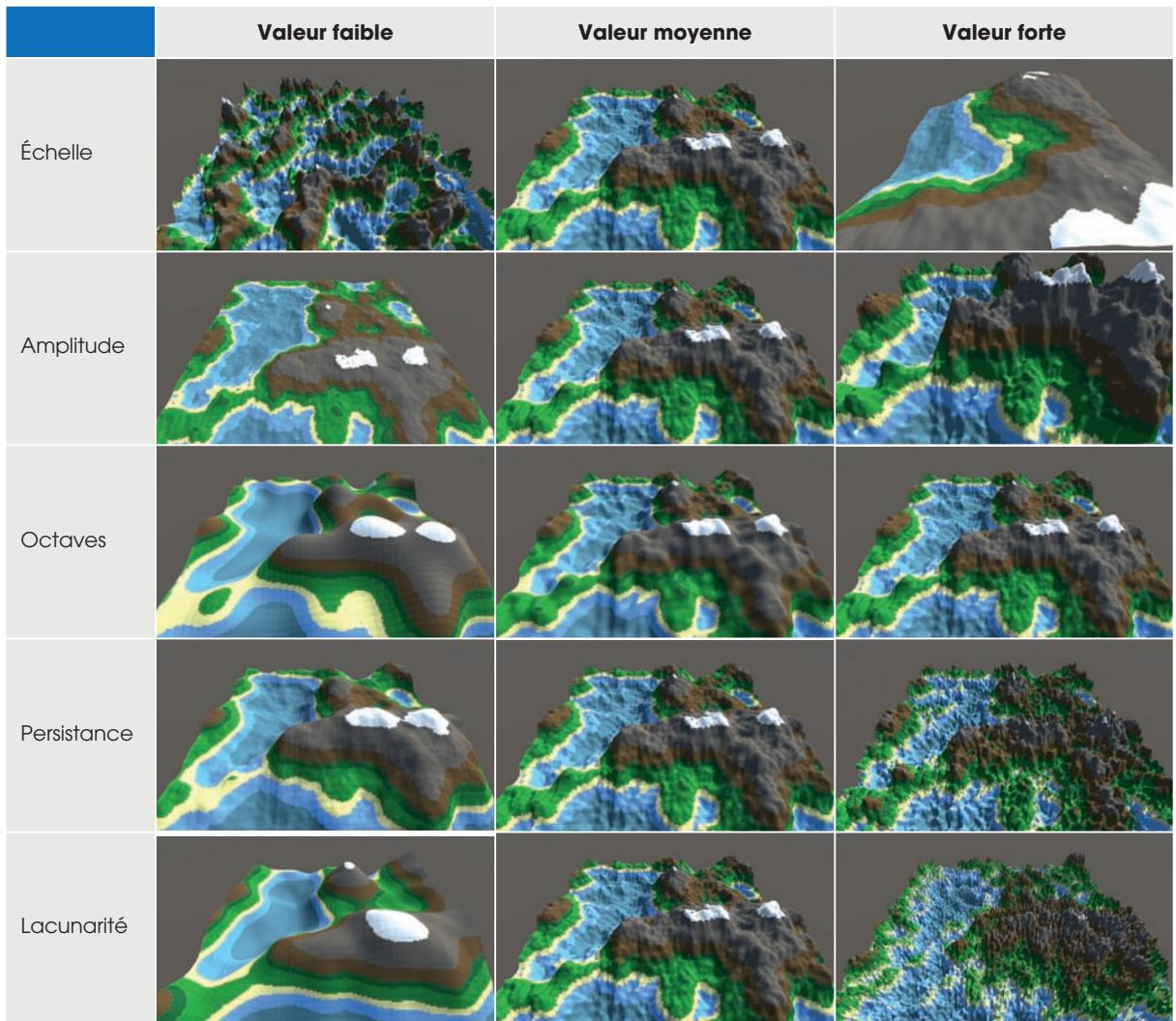


Figure 7. Comparaison des modifications des différents paramètres sur un paysage en 3D. © É. Cornillon / Universcience.

la valeur de hauteur obtenue pour chacun des terels a servi à deux choses : d'une part, déterminer la hauteur du terel par rapport aux autres et d'autre part, choisir une couleur pour rendre le résultat plus agréable. En effet, les hautes valeurs sont blanches ou marron, et les plus basses bleues pour imiter la réalité. En premier lieu, nous constatons l'aspect très lisse du paysage. Un paysage réel est nettement plus déchiqueté et rugueux. Sur les flancs d'une montagne, la vue d'une simple pente laissera apparaître un découpage de détails constitués de rochers,

de minuscules falaises et autres reliefs à échelle plus réduite. Un rocher est recouvert lui-même d'aspérités. Cette structure avec des niveaux de détails toujours plus petits s'appelle une fractale. Mais apporter ce niveau de détail à notre paysage est problématique. Comme il est impossible de découper les terels et que chaque terel ne possède qu'une seule valeur, il faut trouver une astuce permettant d'aboutir à un résultat similaire. Celle proposée par Perlin est la suivante : modifier les valeurs de chacun des terels par le biais d'une nouvelle série de valeurs générées.

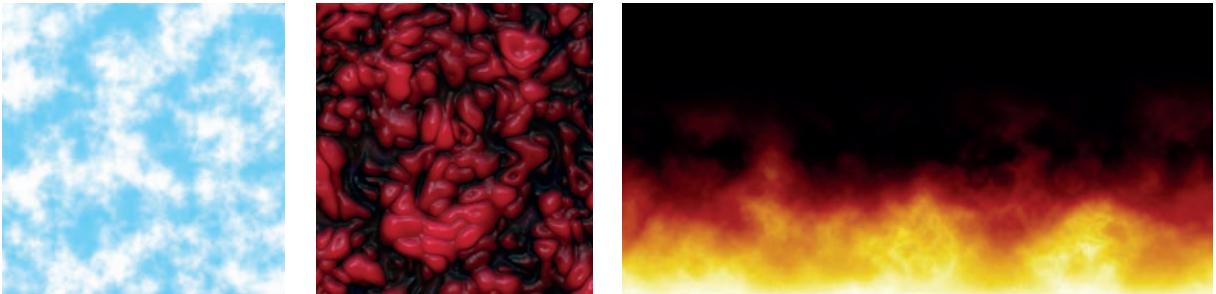


Figure 8. Exemples de textures générées à partir d'un bruit de Perlin. © Texture organique : S. Strandgaard.

Imaginons que pour un terrel, la valeur soit 0,32 et la nouvelle série de valeurs de Perlin successives (ici trois) soit 0,2, 0,65 et 0,02. Il faut additionner alors 0,32 à la moitié de 0,2 (donc 0,1), ce qui donne 0,42. Puis, il faut additionner 0,42 au quart de 0,65 (donc 0,162), ce qui donne 0,582. Enfin, il faut additionner 0,582 au huitième de 0,02 (donc 0,002 5), ce qui donne finalement 0,584 5 comme nouvelle valeur de terrel. Le terme utilisé pour désigner le nombre de valeurs ajoutées à la valeur du terrel d'origine est *octave*. Il provient du fait que lors de l'addition, la valeur ajoutée est divisée par 2 par rapport à la valeur ajoutée précédemment, de la même façon que la fréquence de notes de différentes octaves. Dans cet exemple, nous avons donc appliqué trois octaves. Comme nous pouvons le constater sur la figure 6b, l'aspect très lisse du paysage de la figure 6a a disparu complètement et notre paysage est nettement plus réaliste.

AFFINAGE ET TEXTURES

Dans le processus que nous avons étudié dans cet article, cinq valeurs peuvent être modifiées. Des augmentations ou diminutions de chacune d'entre elles entraînent des modifications d'aspects distincts du paysage. Les cinq paramètres concernés sont les suivants :

- l'échelle, soit l'intervalle d'échantillonnage. Plus la valeur est grande, plus le terrain est dézoomé ;
- la hauteur, soit l'amplitude. Plus la valeur est grande, plus les reliefs sont hauts ;
- les octaves, soit le nombre de valeurs ajoutées pour l'effet fractal. Plus la valeur est grande, plus le niveau de détail est important ;
- la persistance, soit la division des valeurs lors de l'addition des octaves. Plus la valeur est grande, plus celle des terrels change considérablement ;

- la lacunarité, soit l'intervalle entre les échantillons des octaves. Plus la valeur est grande, plus le terrain est chaotique.

La figure 7 montre l'effet des changements de chacun des cinq paramètres sur un paysage en trois dimensions.

Outre ces cinq paramètres, il est possible de jouer sur bon nombre d'autres aspects qui permettent une diversité de résultats spectaculaire, non seulement en matière de paysages, mais également de textures, dont la figure 8 montre quelques exemples.

Dans le domaine du jeu vidéo, l'un des exemples les plus extraordinaires de l'utilisation poussée du bruit de Perlin en trois dimensions est Minecraft. À chaque nouvelle partie, le jeu génère un monde entier en 3D, contenant du relief, différents biomes (zones avec des caractéristiques géographiques et des ressources spécifiques) grâce à des modifications des couleurs des terrels (des cubes de un mètre de côté) ou des valeurs présentées plus haut. Il est possible même d'explorer des cavités souterraines, que le bruit de Perlin est capable de générer en 3D.

Aujourd'hui, il existe de multiples algorithmes de bruits plus efficaces (bruit simplex, bruit de valeur...), mais de nombreux concepts qui le constituent sont issus du bruit de Perlin, l'un des pionniers de la génération procédurale. É. C.

Émilien Cornillon

Émilien Cornillon est médiateur scientifique en informatique. Après un doctorat dans le domaine de la modélisation pour la biologie obtenu à l'Université Côte d'Azur, il a intégré l'unité Informatique et sciences du numérique du Palais de la découverte en 2017. Il co-anime également la chaîne YouTube « Qu'est-ce que tu GEEKes ? » et est membre du Café des sciences, une association de vulgarisateurs de tous domaines scientifiques.

L'ÉGALITÉ DES GENRES

Force motrice d'une croissance durable

La pandémie de coronavirus qui sévit dans le monde depuis de longs mois a mis en exergue le rôle essentiel des femmes, dont certaines se sont retrouvées en première ligne face au virus. Cet article présente un « état des lieux » de la place des femmes dans des secteurs importants de l'économie et de la société au sein du G7 et dans le monde. Au moment où la France assume la présidence du Conseil de l'Union européenne au premier semestre 2022, cet article apporte aussi un éclairage sur la capacité de l'Hexagone à combattre l'inégalité des genres dans une période de grands bouleversements sociaux.

PAR **AUGUSTO LOPEZ-CLAROS**, PRÉSIDENT DU GLOBAL GOVERNANCE FORUM, ET **NADIA CAÏD-HOLZER**, DIRECTRICE SCIENTIFIQUE DU WOMEN'S FORUM

© Photo12 / Alamy / SOPA Images.





Lun des premiers secteurs dans lequel le rôle des femmes s'est révélé essentiel à la faveur de la lutte contre le coronavirus est sans conteste celui de la santé, auquel s'ajoute également celui de la prise en charge des tâches domestiques au sein des foyers, avec des répercussions non négligeables sur leur état de santé.

Deux outils d'analyse essentiels

PAR ANNE-GABRIELLE HEILBRONNER, PRÉSIDENTE DU WOMEN'S FORUM, MEMBRE DU DIRECTOIRE ET SECRÉTAIRE GÉNÉRALE DE PUBLICIS GROUPE

En 2020, le Women's Forum, filiale du groupe Publicis, a lancé le premier Baromètre sur l'égalité des genres dans l'entrepreneuriat, le changement climatique, la santé et la technologie au sein du G7 (Groupe des sept). Ce Baromètre met en lumière la perception du grand public face aux questions d'égalité des genres et la compare avec l'analyse des données les plus récentes sur la question. Cette étude inédite couvre différents segments sociétaux dans lesquels les distinctions de genres émergent de manière édifiante. Le Baromètre est un outil analytique qui permet d'aider les décideurs politiques, les parties prenantes et les dirigeants d'entreprise à mieux comprendre l'état actuel de disparités entre les hommes et les femmes, ainsi que ses coûts dans des secteurs économiques fondamentaux. Il fournit des orientations en vue d'un progrès majeur au niveau mondial dans l'inégalité des genres.

L'indice 2020 sur l'égalité des genres et la gouvernance (GEGI), quant à lui, a été élaboré par le Forum sur la gouvernance mondiale. Il permet une compréhension large, fondée sur l'analyse de données comparative de la discrimination entre les genres dans cinq domaines essentiels que sont la gouvernance, l'éducation, le travail, l'entrepreneuriat et la violence contre les femmes. Cet indice couvre 158 pays. Le GEGI est un outil efficace pour les décideurs politiques, qui peuvent évaluer ainsi les progrès réalisés en matière d'égalité des genres dans leur pays et identifier les domaines spécifiques que le redressement mené par les femmes devrait privilégier.

Au travers des deux outils précédents, qui identifient les domaines d'amélioration essentiels pour une reprise économique inclusive, le Women's Forum for Economy and Society et le Forum sur la gouvernance mondiale affichent leur ambition de défendre une société plus égalitaire en soulignant l'impact déterminant et le rôle primordial qu'y jouent les femmes. A.-G. H.

LES FEMMES ET LA SANTÉ

La pandémie a eu un impact négatif sur la santé mentale et physique des femmes, car elles constituent la majorité des travailleurs et soignants en première ligne face au coronavirus. Ainsi, 77 % des soignants, 78 % des travailleurs sociaux et plus des deux tiers des employés des supermarchés sont des femmes.

Du fait du confinement, les enfants sont restés à la maison, ce qui a eu pour conséquence d'augmenter leurs tâches associées au travail non rémunéré. En outre, les besoins en soins des personnes âgées ont augmenté. Étant donné que les responsabilités domestiques sont assumées traditionnellement par les femmes, l'augmentation de ce type de travail a eu des répercussions sur leur santé.

La part de la mortalité féminine causée par les maladies mentales et les troubles du comportement est impressionnante également au sein des pays du G7 (Groupe des sept) (encadré *Deux outils d'analyse essentiels*). Les femmes sont plus exposées aux problèmes de santé mentale que les hommes, en raison de nombreux facteurs qui englobent les effets généraux de l'inégalité entre les genres (c'est-à-dire les disparités de revenus, une plus grande exposition à la pauvreté et au surmenage, la discrimination socio-économique, la violence sexiste...).

Il existe une différence d'environ 6 ans entre l'espérance de vie des femmes et celle des hommes. En effet, en France, les femmes peuvent espérer vivre jusqu'à 85,6 ans, alors que les hommes atteindraient en moyenne 79,7 ans. Cependant, après 65 ans, seul un faible pourcentage de femmes au sein des pays du G7 se sentent encore en bonne santé. Elles ont une moins bonne perception de leur état de santé que les hommes (fig. 1).

Ainsi, l'analyse des données montre que la proportion de femmes de plus de 65 ans traitées dans les hôpitaux pour des soins de longue durée est nettement plus élevée que celle des hommes. Les statistiques révèlent que les femmes vieillissent en moins bonne santé que les hommes (fig. 2).

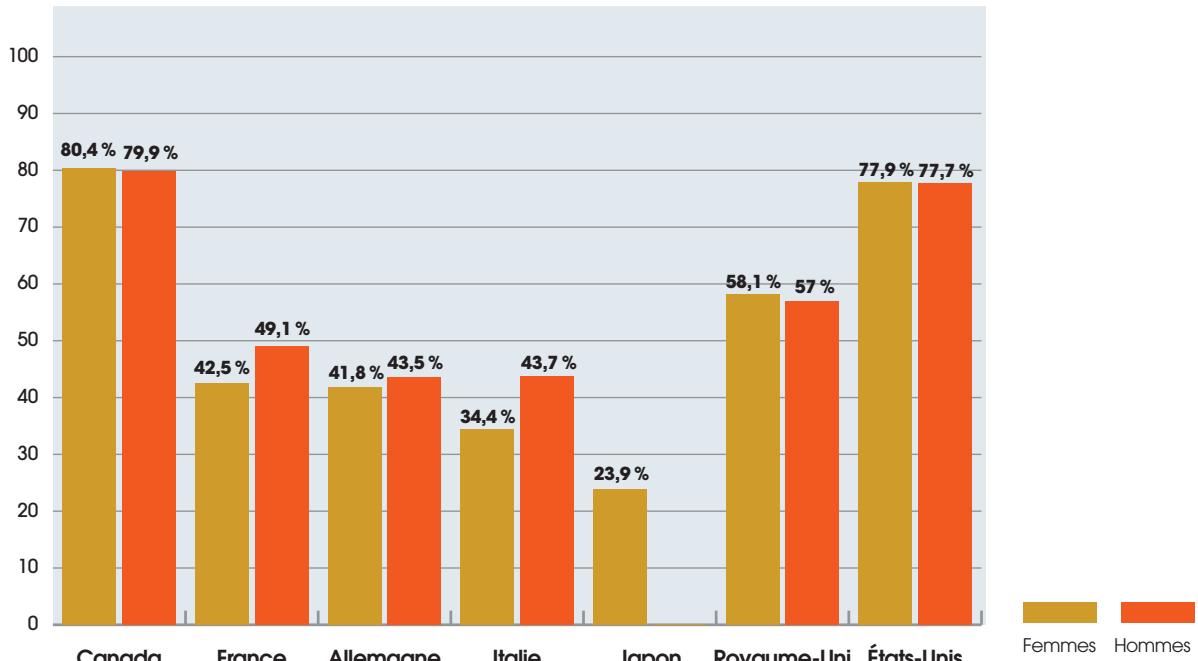


Figure 1. Perception d'un bon état de santé chez les plus de 65 ans au sein des pays du G7 (Groupe des sept) en 2018. © R. Paillard / Universcience, source : Base de données Égalité femmes-hommes, institutions et développement (GID-DB), OCDE 2019.

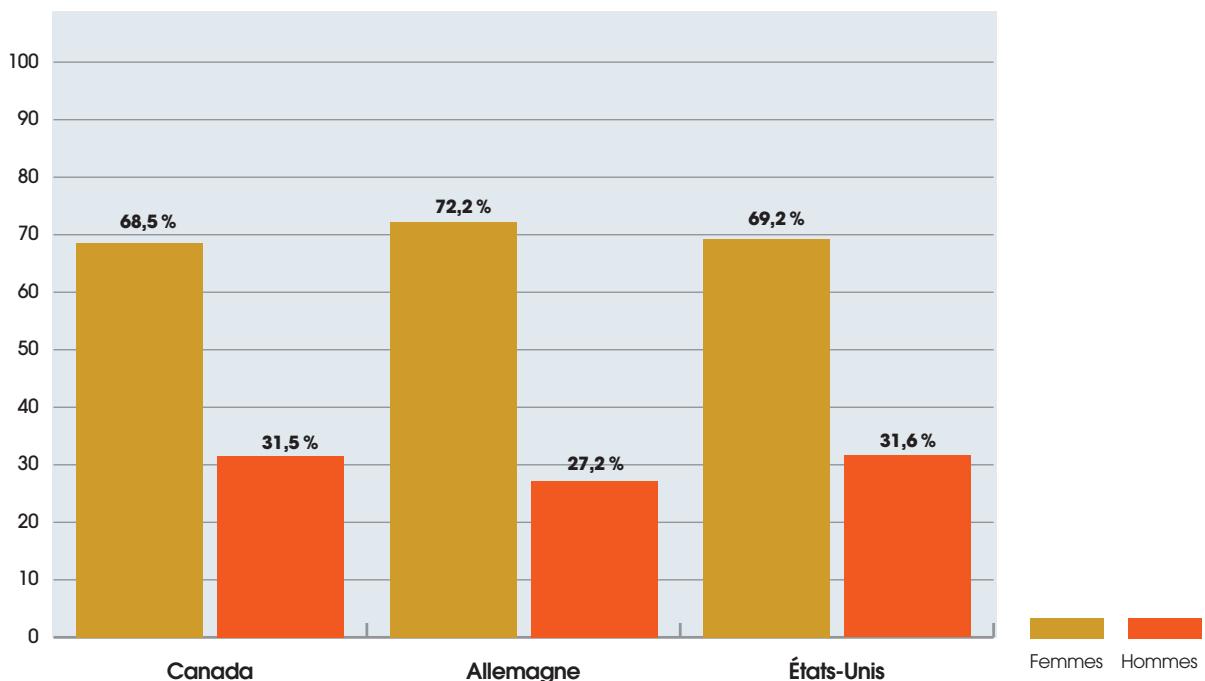
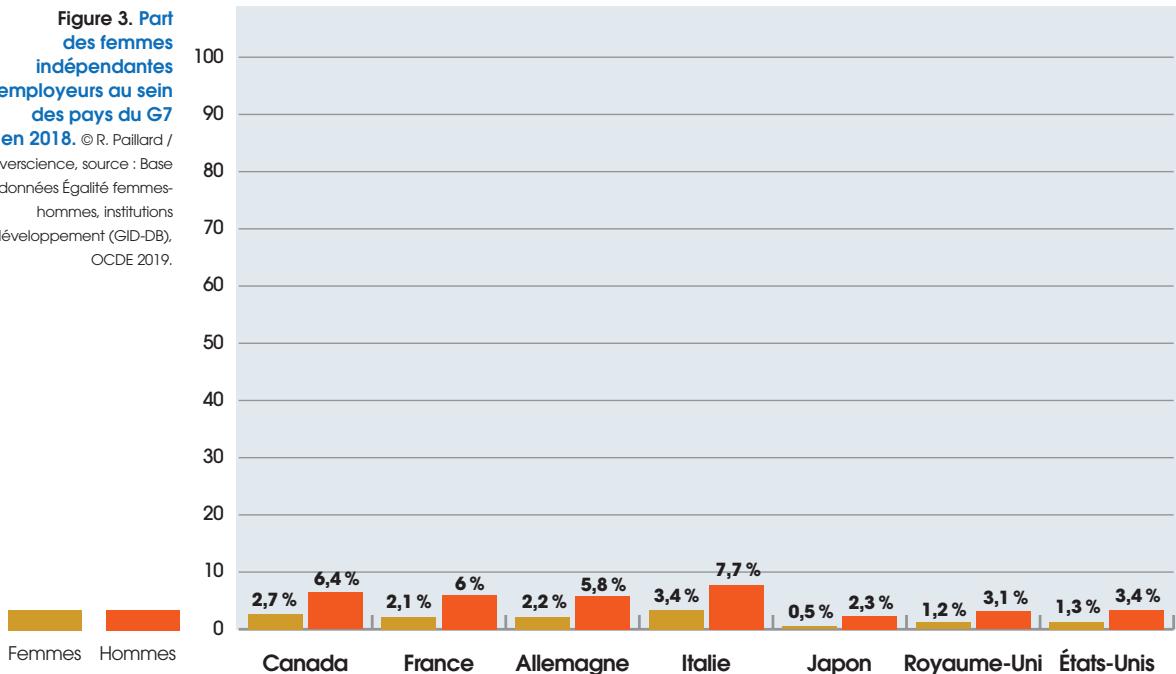


Figure 2. Résidents en soins de longue durée à l'hôpital âgés de 65 ans et plus (en pourcentage du total des bénéficiaires) au Canada, en Allemagne et aux États-Unis en 2018. © R. Paillard / Universcience, source : Base de données Égalité femmes-hommes, institutions et développement (GID-DB), OCDE 2019.



Figure 3. Part des femmes indépendantes employeurs au sein des pays du G7 en 2018. © R. Paillard /

Universcience, source : Base de données Égalité femmes-hommes, institutions et développement (GID-DB), OCDE 2019.



Par conséquent, la priorité est de renforcer la capacité des personnes âgées à vivre cette période importante de leur vie en meilleure santé possible. En effet, les maladies non transmissibles qui touchent principalement les femmes âgées pourraient être réduites fortement en effectuant des choix sains tout au long de la vie. L'adaptation des systèmes de santé pour répondre aux besoins des femmes âgées est une question fondamentale pour nos économies et nos sociétés. Ainsi, dans ce contexte, un défi crucial consiste à faire en sorte que les femmes vieillissent en bonne santé.

Afin que les femmes aient accès aux soins de santé dont elles ont besoin tout au long de leur vie, une coopération étroite entre les secteurs privé et public, complémentaires dans leur action, est nécessaire. En outre, le rôle des femmes décideurs est essentiel pour développer et mettre en œuvre un accès qui soit plus équitable et facile pour les femmes âgées et créer un environnement favorable aux personnes âgées. En permettant aux femmes d'avoir une voix significative dans les politiques et

les décisions qui ont un impact sur leur bien-être, les résultats en matière de santé pour les femmes âgées – et les hommes – peuvent s'améliorer substantiellement.

LES FEMMES ET L'ÉDUCATION

Les inégalités en matière d'éducation réduisent considérablement le vivier de talents dans lequel les entreprises et les gouvernements pourraient puiser naturellement. Ainsi, un moyen direct et efficace de stimuler la croissance économique est d'étendre les possibilités d'éducation des jeunes filles.

Le monde a accompli des progrès considérables dans l'éducation de ces dernières, ainsi que dans celle des femmes au cours des décennies passées. Toutefois, ces progrès ne sont pas répartis uniformément. Une étude récente de la Banque mondiale souligne que dans de nombreux pays, dont l'Angola (136^e sur 158), le Bhoutan (96^e), le Burkina Faso (93^e), le Cambodge (69^e), le Cameroun (138^e), l'Éthiopie (77^e), le Mali (137^e) et le Népal (84^e), plus de la moitié des femmes n'ont même pas achevé un cycle

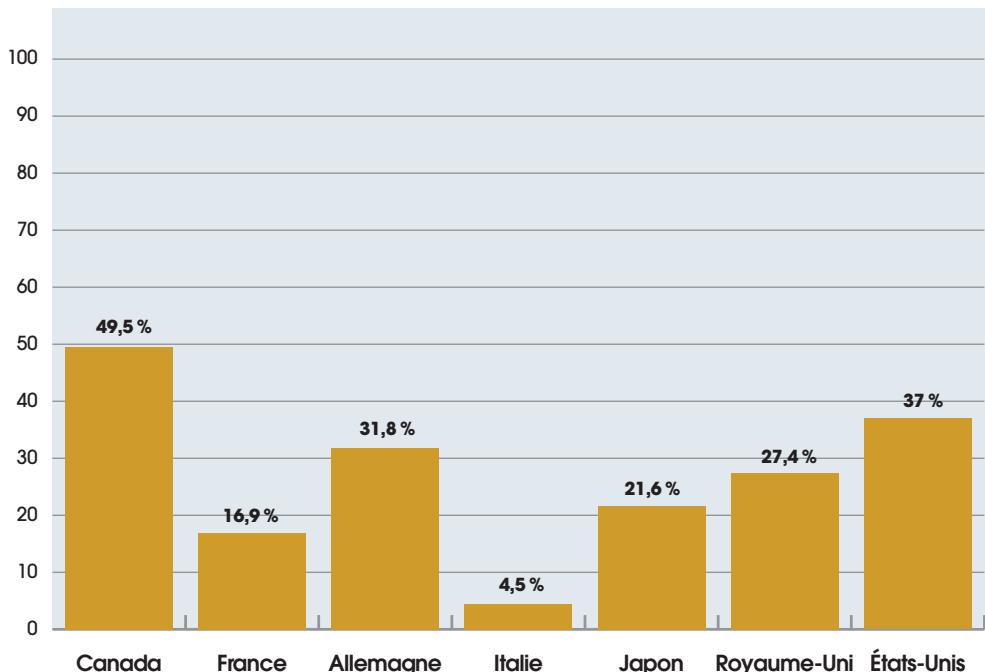


Figure 4. Part des femmes bénéficiant d'un accès suffisant aux fonds et aux ressources pour créer leur propre entreprise au sein des pays du G7 en 2018.

© R. Paillard / Universcience,
source : Base de données Égalité
femmes-hommes, institutions
et développement (GID-DB),
OCDE 2019.

d'éducation du niveau primaire. En 2016, cinq cents millions de femmes étaient analphabètes dans le monde, soit plus de 60 % de la population totale qui n'a appris ni à lire ni à écrire. Consacrer davantage de ressources à l'égalité de l'éducation peut permettre aux femmes de s'autonomiser, tant dans la sphère domestique que sur le marché du travail. Chaque année supplémentaire d'éducation des jeunes filles se traduit par des reportés dans l'âge du mariage et des premières grossesses, une réduction des maladies sexuellement transmissibles, une augmentation des revenus au cours de la vie et une amélioration des soins de santé au sein des familles.

LES FEMMES DANS L'ENTREPRISE

L'esprit d'entreprise des femmes constitue un moteur important de l'innovation, de la croissance et de l'emploi. Étant donné que seulement 7 % des femmes des pays à faible revenu sont employées comme salariées, le travail indépendant est une voie essentielle qui mène à l'autonomisation des femmes. Toutefois, selon la Banque

mondiale, les femmes ne possèdent qu'un tiers des entreprises dans le monde. En 2018, au sein des pays de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE), moins de une femme active sur dix (9,6 %) était indépendante, ce qui représente plus de la moitié de la part des hommes entrepreneurs (16,9 %) (fig. 3). En ce qui concerne la répartition par secteurs économiques, plus de 70 % des femmes indépendantes travaillaient dans celui des services, contre 50 % pour les hommes. Les entrepreneuses pourraient contribuer de manière significative à l'innovation et à la croissance économique si elles avaient accès à la même formation, au même capital, au même crédit et aux mêmes droits que les hommes. Toutefois, la Société financière internationale a constaté que les entrepreneuses sont confrontées à un déficit de financement mondial de 1,5 milliard de dollars (1,33 milliard d'euros environ). Ainsi, à titre d'exemple, en France, seulement 16,9 % des femmes ont accès à un financement suffisant pour créer leur propre entreprise (fig. 4), contre





26,7 % des hommes. En outre, le manque d'accès des femmes à des comptes personnels et aux services financiers est très élevé dans les pays à faible revenu, où seulement 32 % des femmes, en moyenne, possèdent un compte bancaire ou postal.

L'élargissement des possibilités de formation et de mentorat, ainsi que le soutien des pouvoirs publics sous forme de services de garde d'enfants et de congés parentaux, peuvent encourager les femmes à se lancer dans l'entrepreneuriat. Un autre moyen efficace de surmonter les obstacles à l'entrepreneuriat féminin consiste à réduire la complexité et le nombre de réglementations, de même que la charge administrative pesant sur les entreprises. La mise en œuvre de la diversité au sein de la chaîne d'appro-

visionnement – tant dans le secteur privé que public – est essentielle également pour contribuer à réduire l'écart entre les genres dans le secteur des entreprises.

La société a beaucoup à gagner en comblant l'écart entre les genres en matière d'entrepreneuriat. En effet, il est important de souligner qu'en moyenne, les femmes réinvestissent 90 % de leurs revenus dans leur communauté, contre 35 % seulement pour les hommes.

LES FEMMES ET LA TECHNOLOGIE

Les femmes continuent d'être sous-représentées dans les domaines des sciences, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques (STEM), qui sont les secteurs les plus prometteurs à l'avenir (fig. 5). En effet, seules

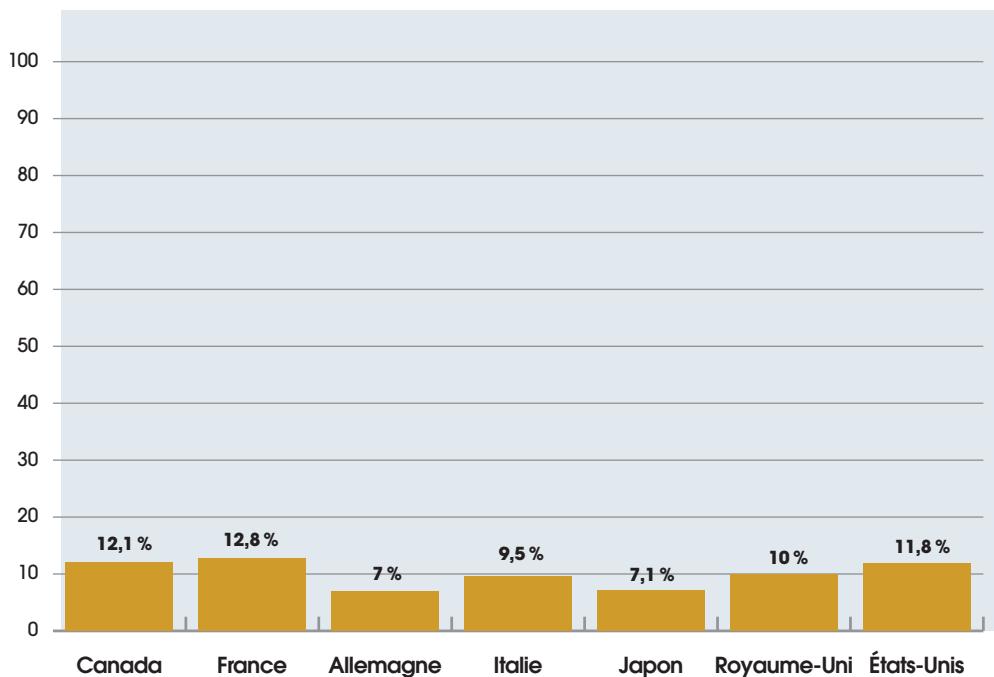


Figure 5. Part des femmes inventrices au sein des pays du G7 en 2017. © R. Paillard / Universcience, source : Base de données Égalité femmes-hommes, institutions et développement (GID-DB), OCDE 2019.



22 femmes ont reçu un prix Nobel de science (physique, chimie, physiologie ou médecine) entre 1903 et 2020 contre 611 hommes.

En 2020, les États-Unis détenaient le plus haut pourcentage – parmi les pays du G7 – de femmes travaillant dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA, 32 %), suivis de près par l'Italie (31 %). Une recherche menée par le Fonds monétaire international (FMI) a révélé qu'en moyenne – tous secteurs et postes confondus –, les femmes effectuent davantage de tâches susceptibles d'être réalisées par automatisation que les hommes. Ainsi, environ 26 millions d'emplois féminins dans 30 pays (28 pays membres de l'OCDE, Chypre et Singapour) présentent un risque élevé d'être remplacés par la technologie au cours des vingt prochaines années. En général,

les postes féminins sont confrontés à un plus grand risque d'automatisation que les postes masculins. Environ 47 % des emplois vont disparaître avec la révolution numérique, 65 % de ces emplois étant occupés actuellement par des femmes. Les nouveaux emplois qui seront créés vont se concentrer sur les secteurs des STEM, où les étudiantes devraient être bien plus nombreuses qu'à l'heure actuelle afin de préparer le vivier des emplois du futur.

Le manque de participation des femmes aux filières d'études STEM et, par la suite, aux carrières dans ces domaines constitue un problème sérieux qui se pose dans le monde entier (fig. 6). En effet, les STEM sont essentielles pour atteindre les objectifs de développement durable, en permettant de concevoir et mettre en œuvre des solutions innovantes

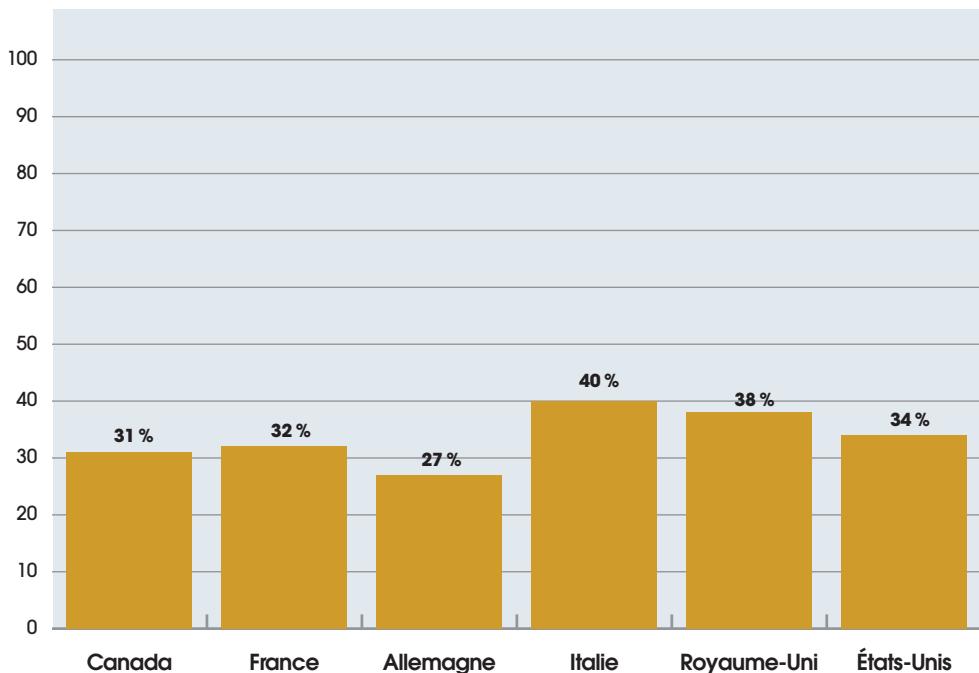


Figure 6. Part des femmes diplômées des STEM (sciences, technologie, ingénierie et mathématiques), en pourcentage de l'enseignement supérieur, au sein des pays du G7 en 2017. © R. Paillard / Universcience, source : Banque mondiale.

Les femmes continuent d'être sous-représentées dans les domaines des sciences, de la technologie, de l'ingénierie et des mathématiques, qui sont les secteurs les plus prometteurs à l'avenir.

Augusto Lopez-Claros

Augusto Lopez-Claros, président du Global Governance Forum, est un économiste international qui compte plus de trente ans d'expérience dans des organisations internationales, dont la plus récente à la Banque mondiale où il était directeur du groupe des indicateurs mondiaux. Auparavant, il était économiste en chef au Forum économique mondial. En 2018, la Fondation suédoise Global Challenges lui a décerné le prix New Shape pour son ouvrage *La gouvernance mondiale et l'émergence d'institutions mondiales pour le XXI^e siècle*.

pour résoudre les défis du XXI^e siècle tels que, entre autres, les maladies infectieuses émergentes et ré-émergentes. L'implication des femmes et des jeunes filles dans ces secteurs devrait être une priorité, afin de leur permettre de jouer un rôle majeur dans les emplois d'avenir.

La faible part des femmes dans les STEM n'est pas due à un manque de compétences cognitives, mais à l'environnement culturel et à l'héritage social qui inclut les croyances, les comportements et les choix. L'une des principales raisons pour lesquelles les carrières en technologie ne sont pas embrassées par les femmes tient au manque de confiance en soi et à l'absence de modèles féminins qui les aideraient à se projeter dans l'avenir.

Des efforts significatifs doivent être fournis pour inverser la tendance et permettre d'augmenter drastiquement la présence des jeunes filles et des femmes dans les carrières STEM et technologiques. L'instrument clé qui peut permettre ce changement est l'éducation. Les compétences STEM constituent une source d'innovation, créativité et compétitivité. Elles modifient radicalement le marché du travail. En effet, 85 % des

emplois de 2030 n'existent pas encore. L'acquisition de compétences STEM est un parcours d'apprentissage tout au long de la vie. Elle conduit à l'autonomisation des femmes sur le marché du travail. Il est donc essentiel de lutter contre les stéréotypes, les croyances idéologiques et les préjugés inconscients liés aux STEM. En effet, la construction de l'identité scientifique des jeunes filles commence dès le plus jeune âge, à l'école primaire.

Par ailleurs, les dirigeants publics et privés doivent mettre en œuvre des stratégies fortes pour attirer les filles et les femmes dans les STEM, des écoles aux salles de conseil d'administration. Il s'agit notamment de plans d'action visant à développer des programmes de requalification, mais aussi de compétences croisées et de perfectionnement pour les femmes dans les domaines des STEM. En outre, il convient de promouvoir les technologies inclusives qui bénéficient à l'humanité dans son ensemble.

LES FEMMES ET LA GOUVERNANCE

Selon l'Union interparlementaire, seuls 25 % des représentants des parlements nationaux dans le monde sont des



femmes. Parmi les plus grands pays du GEGI (indice 2020 sur l'égalité des genres et la gouvernance) où la participation des femmes au sein des gouvernements est particulièrement faible se trouvent le Brésil (15 %), l'Inde (12 %), le Nigeria (5 %) et la Russie (16 %).

En Inde, la mise en place d'un quota national de femmes au Parlement a bien été discutée depuis 1996, sans toutefois être promulguée. Au niveau local, cependant, les quotas dans les conseils de village ont eu un impact positif majeur sur l'opinion publique à l'égard du leadership féminin. De plus en plus de pays utilisent des quotas pour les organes législatifs élus, avec des résultats prometteurs. Là où ces lois existent, une augmentation des dépenses publiques en matière d'éducation, de santé publique et d'infrastructures qui améliorent la qualité de vie de la communauté est constatée. Les pays qui appliquent des quotas de femmes au sein de leur parlement affichent également des taux de participation des femmes à la population active plus élevés.

QUELLES PERSPECTIVES POUR DEMAIN ?

Les écarts entre les genres sont encore très marqués dans le monde, mais également dans les pays du G7, qui représentent pourtant 62 % de la richesse mondiale. Cela est particulièrement prononcé dans les domaines de la technologie, de l'accès à la santé, des affaires et de l'inégalité salariale. En effet, l'écart salarial entre les genres reste élevé dans les pays du G7. En outre, le fait que les femmes prennent en charge une part importante des tâches ménagères et des soins non rémunérés a des conséquences néga-

tives pour elles, minimisant leur rôle au sein de l'économie et de la société. Certains pays du G7 ont réalisé des progrès quant à la part des femmes en politique, ce qui est un moteur essentiel des progrès futurs vers l'égalité des sexes. Pourtant, les progrès sont lents pour faire évoluer les mentalités du public mondial concernant l'accès des filles aux domaines des STEM et de l'IA. En effet, elles continuent d'être sous-représentées dans les domaines STEM, secteurs d'avenir.

Bien que le congé parental rémunéré ait augmenté, dans la pratique, les stéréotypes liés au congé paternel restent ancrés fortement. Ainsi, étant donné que l'écart entre les sexes demeure élevé dans les pays les plus développés du monde, il faudra de longues années pour le réduire. Afin d'accélérer les progrès, il est essentiel de se baser sur des données désagrégées par genre qui permettent de développer des indicateurs pertinents et des instruments efficents contre l'inégalité des genres. Toutefois, ces données n'étant souvent pas disponibles ou partielles, un grand travail de collecte, de compilation et d'analyse doit être entrepris dans l'avenir.

Ainsi, pour parvenir à une croissance économique durable et à un réel progrès social, le moment est venu pour les pays de prendre des mesures fortes en faveur de l'égalité des genres. Un effort spécial doit être fourni pour écouter les voix des femmes, donner la priorité à leurs points de vue et les placer au centre de la reprise, en corrigeant autant que possible les biais actuels. Cette période de pandémie pourrait fournir peut-être une opportunité de changement de modèle. **A. L.-C. et N. C.-H.**

Nadia Caïd-Holzer

Nadia Caïd-Holzer, directrice scientifique au sein du Women's Forum - Publicis Groupe - est une économiste spécialisée dans l'environnement, la santé et le développement.

Elle a été directrice du programme « Environnement et transport » au sein de l'OCDE, économiste responsable de plusieurs publications phares. Elle a créé également une revue scientifique internationale consacrée aux actions et bonnes pratiques de terrain dans les pays en développement dans les domaines de l'environnement, de la santé, de l'agriculture et de l'éducation.





Regard sur... L'Aquarium tropical du palais de la porte Dorée

(Paris, France)

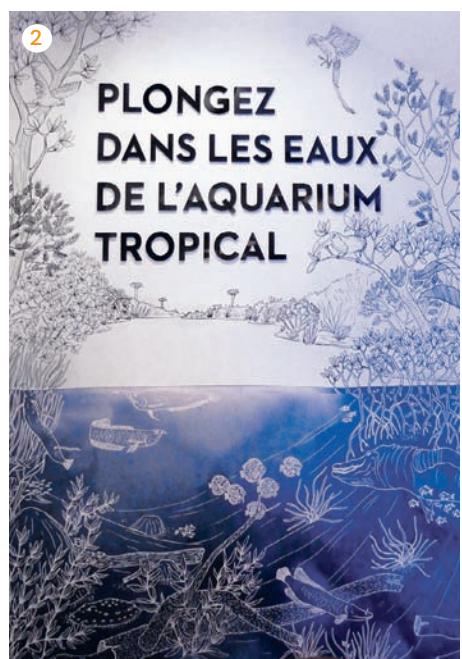
Depuis son ouverture en 1931, à l'occasion de l'Exposition coloniale internationale, l'Aquarium tropical du palais de la porte Dorée a pour vocation de présenter la faune et la flore aquatiques des régions tropicales. Pour son 90^e anniversaire et après un an de fermeture pour travaux, il a repensé ses espaces, décors, bacs et bassins tout en menant à bien son objectif principal : renforcer ses missions de sensibilisation des visiteurs à la protection des écosystèmes aquatiques et à la conservation des espèces qui les peuplent.

PAR **SABINE COLLIN**, BIOLOGISTE, LABORATOIRE DU VIVANT DU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE, ET **GAËLLE COURTY**, SECRÉTAIRE DE RÉDACTION DE *DÉCOUVERTE*

Photographies : sauf mentions contraires, Sabine Collin et Gaëlle Courty, avec l'aimable autorisation de l'Aquarium tropical du palais de la porte Dorée.

1 Bâtiment de 17 000 m² construit pour l'Exposition coloniale internationale de 1931, le palais de la porte Dorée abrite aujourd'hui le musée national de l'Histoire

de l'immigration et l'Aquarium tropical. Considéré comme un joyau de l'Art déco, il est classé monument historique depuis 1987. CC BY-NC-ND 2.0 - P. Beard.

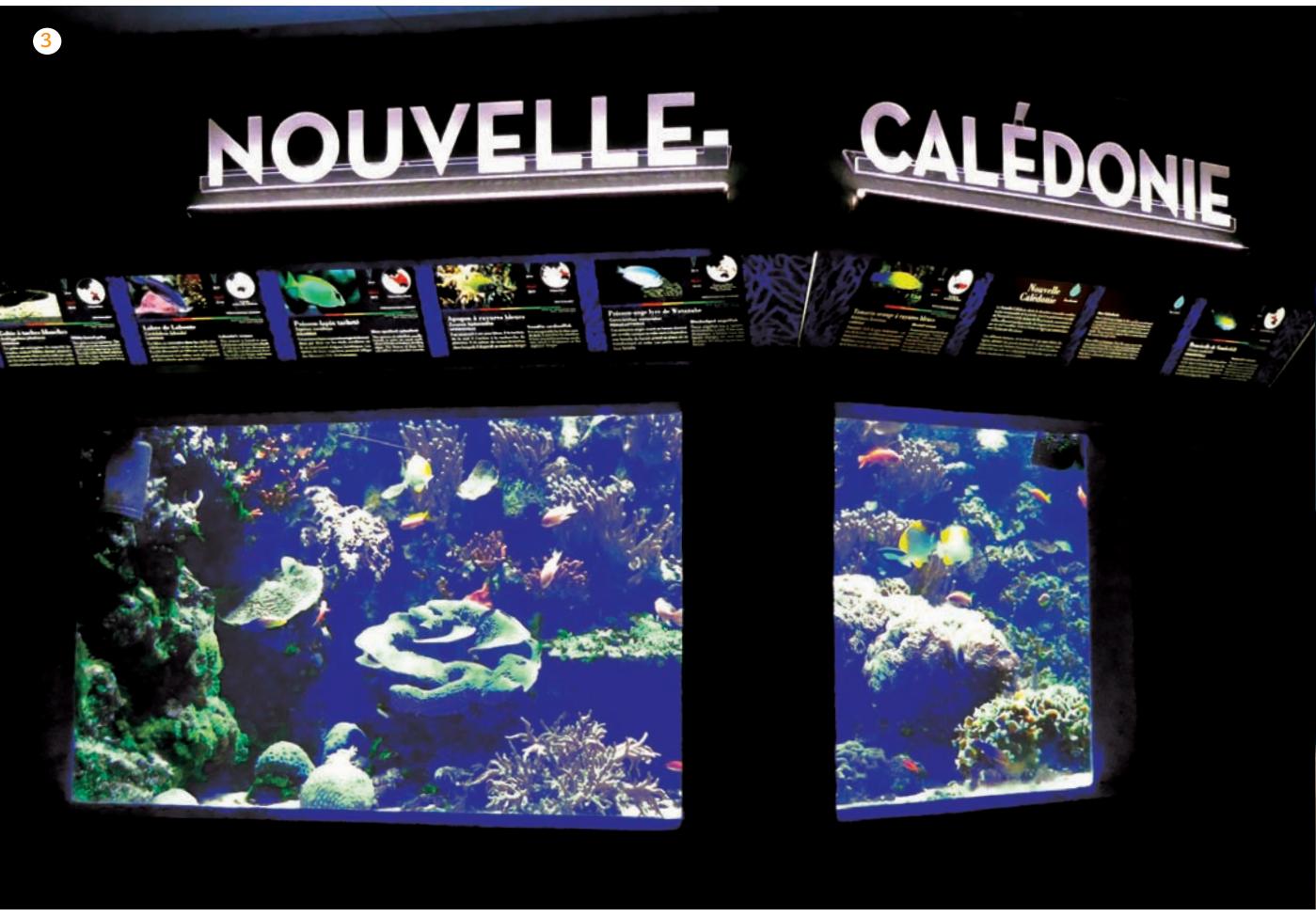


2 L'Aquarium tropical se situe au rez-de-chaussée du bâtiment. Cette fresque aux tons bleutés et aux dessins réalistes nous met tout de suite dans l'ambiance, nous invitant à plonger dans les profondeurs aquatiques et partir à la découverte d'un monde étonnant.



Cette rubrique n'est pas la présentation exhaustive d'un lieu ou centre de science ; il s'agit d'un coup de projecteur sur quelques aspects qui ont marqué le ou les auteur(s) de cette rubrique. Si vous voulez en savoir plus sur ce lieu ou centre de science, consultez son site Internet.

3



Tour du monde en 80 aquariums

Environ 10 000 animaux appartenant à 600 espèces différentes se partagent les 84 bacs présentés au public. D'une capacité de 50 à 16 000 litres, ces aquariums d'eau douce, saumâtre et de mer nous dévoilent certains écosystèmes et habitats particuliers, tout en mettant en avant les caractéristiques morphologiques et physiologiques de leurs habitants.

3 La Nouvelle-Calédonie abrite une diversité exceptionnelle de coraux et poissons, dont nous avons un bref aperçu en contemplant cet aquarium. D'ailleurs, savez-vous que les lagons et récifs coralliens de cet archipel français de l'océan Pacifique sud sont inscrits au patrimoine

4

MADAGASCAR

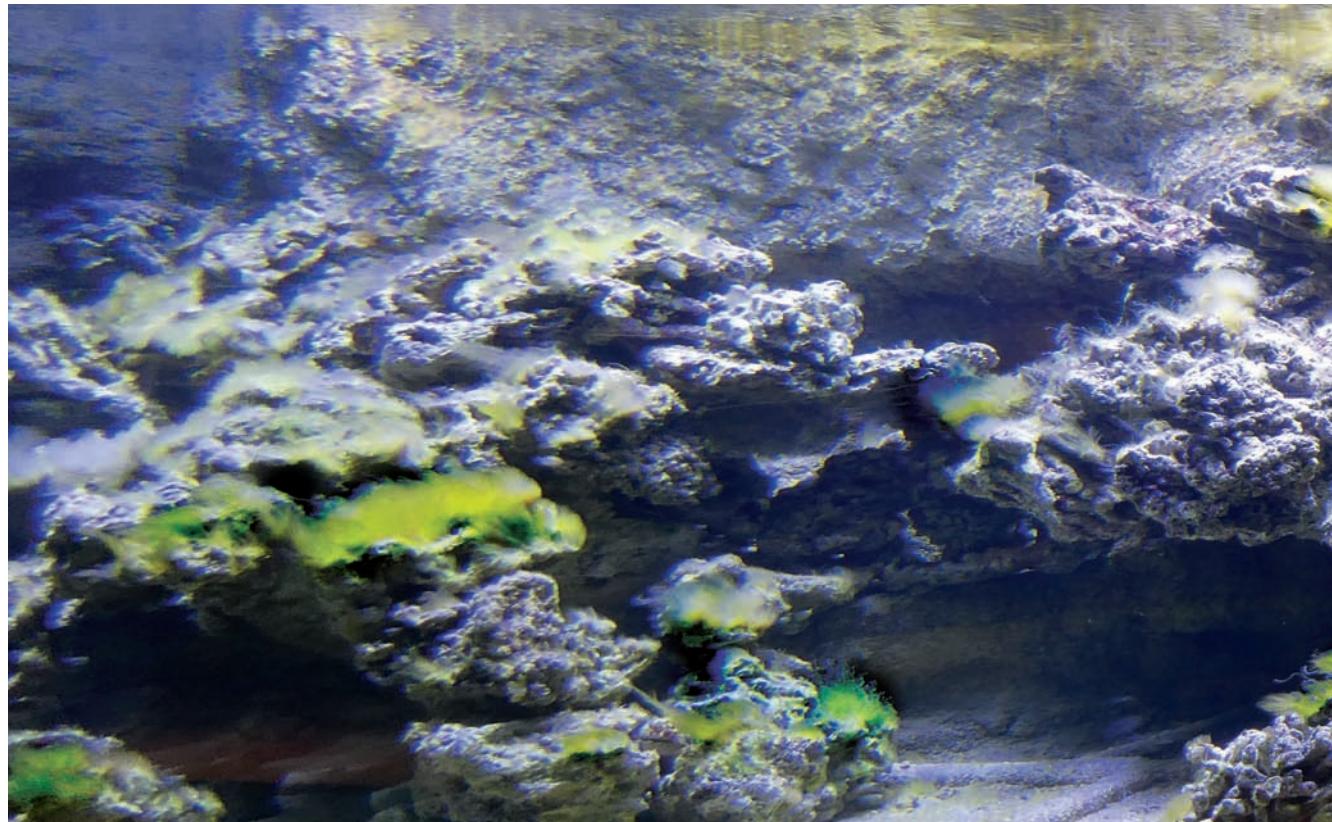
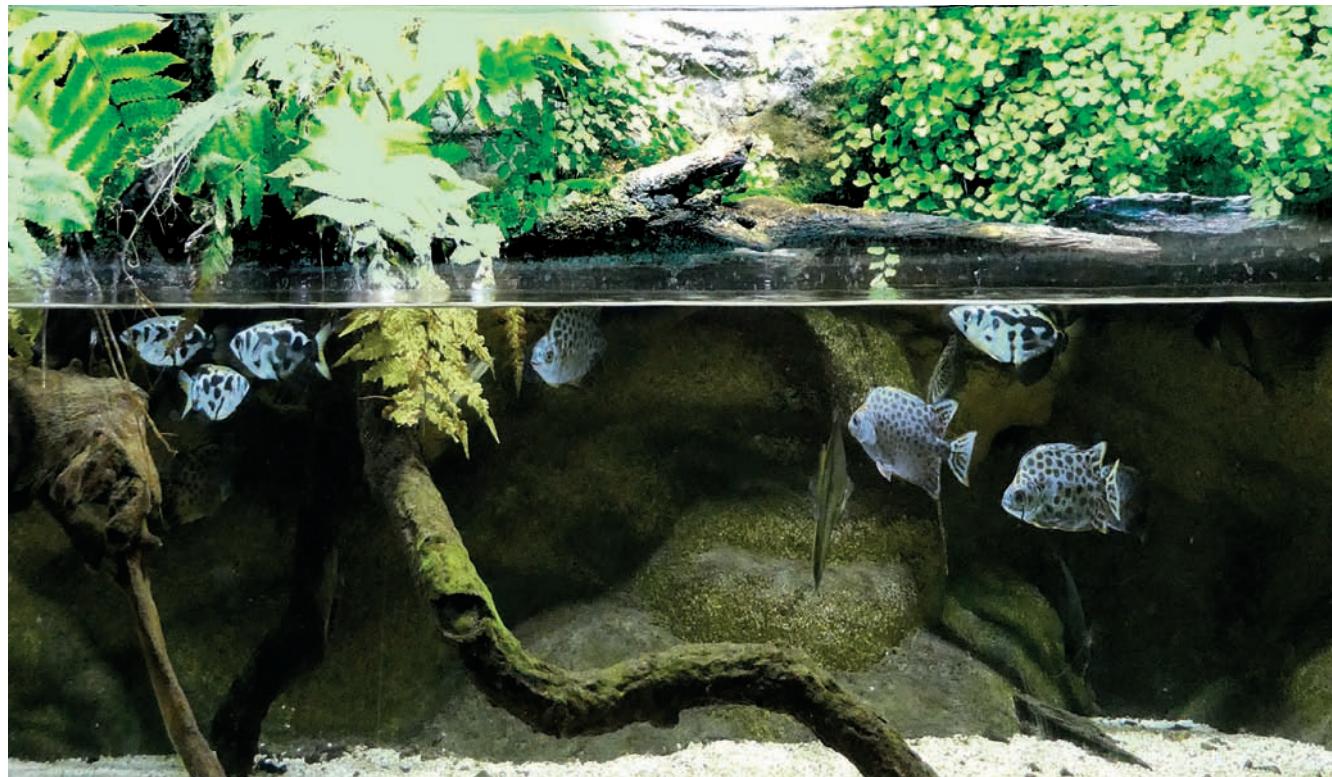


mondial de l'UNESCO (Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture) depuis 2008 ?

4 Outre le fait de présenter certains poissons endémiques de Madagascar, ces trois aquariums d'eau douce mettent

l'aquaponie sur le devant de la scène. Une technique faisant intervenir trois acteurs principaux : les poissons, les plantes et les bactéries. Mais on ne vous en dit pas plus... À vous de découvrir cela de vos propres yeux.







5

5 Véritable trait d'union entre la terre et la mer, la mangrove forme un écosystème unique occupé par une faune et une flore abondantes, dont vous pourrez avoir un léger avant-goût dans cet aquarium. Mais cette « forêt sur la mer » est un milieu fragile, car soumis aux fortes pressions des activités humaines.



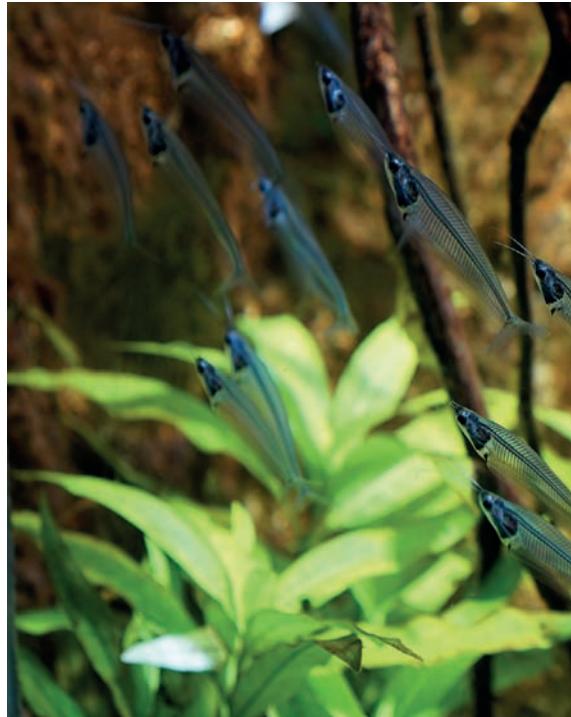
6

6 Où se trouvent les occupants de cet aquarium ? Comme nous l'explique une petite étiquette, il va falloir attendre quelques semaines avant que poissons et invertébrés y soient installés. En effet, il faut laisser le temps au bac de mûrir, afin que s'y établisse un équilibre tant sur le plan physico-chimique que biologique. Depuis la réalisation de ce photoreportage, les pensionnaires ont-ils pris leurs quartiers dans ce nouveau bac ? Une visite s'impose pour en avoir le cœur net.

7 Faire-valoir des hôtes de l'aquarium, les plantes sont reléguées trop souvent à un rôle strictement décoratif. Pourtant, elles participent activement à l'équilibre de l'écosystème recréé. Elles offrent des supports de repos, ponte ou refuge. Certains aquariophiles passionnés s'adonnent à l'*aquascaping*, authentique paysagisme aquatique privilégiant une végétation luxuriante et foisonnante.



7



Lumière sur quelques pensionnaires

En déambulant d'un aquarium à l'autre, une foule d'animaux aquatiques, aussi surprenants les uns que les autres, s'offre à nous. Découvrons ensemble quelques-uns de ces hôtes aux particularités insoupçonnées !



COLLECTION DE POISSONS

8 Le gymnarque du Nil (*Gymnarchus niloticus*) se rencontre dans les eaux marécageuses d'Afrique tropicale. Outre le fait qu'il respire par ses branchies mais aussi par sa peau, ce poisson émet de faibles décharges électriques de façon continue et régulière. Cette particularité se révèle très utile pour ce prédateur nocturne, notamment lors de la détection de ses proies.

9 Des silures de verre *Parailia pellucida* nous dévoilent l'intimité de leur anatomie et leurs arêtes alignées impeccablement. Ces poissons-chats de quelques centimètres évoluent dans les profondeurs des rivières et fleuves du Nord-Ouest de l'Afrique. Comme de nombreux écosystèmes présentés dans l'enceinte du bâtiment, les biotopes africains sont menacés par les activités humaines et le réchauffement climatique.

10 Malgré sa silhouette serpentiforme, le dipneuste australien appartient à une famille distincte de celle des anguilles.

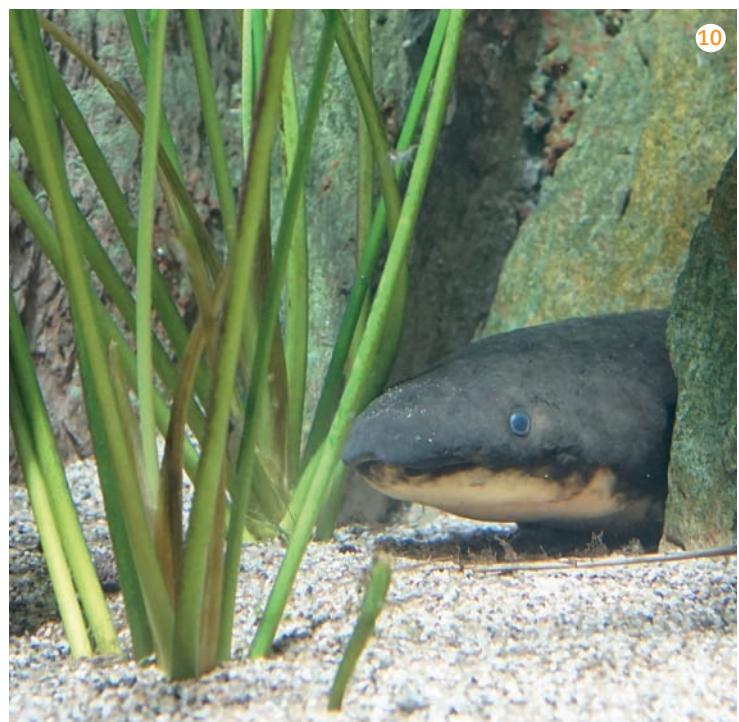
Ce poisson est doté d'un double système respiratoire : des branchies d'une part, un poumon d'autre part, issu de la transformation d'une partie de son tube digestif. Son cousin africain est capable de réaliser une performance époustouflante : survivre hors de l'eau plusieurs mois pendant la période sèche !

11 Outre une certaine ressemblance physique, le syngnathe partage une autre caractéristique avec l'hippocampe : chez ces deux espèces de la même famille, c'est le mâle qui porte les œufs dans une poche ventrale après ponte et fécondation. Plus de 250 espèces de syngnathes ont été identifiées à travers le monde, dont certaines visibles dans les eaux françaises.

12 Parmi la multitude de poissons hébergés, remarquez-vous des divergences comportementales ? Certains, dits pélagiques, évoluent en pleine eau, tandis que d'autres, les benthiques,



9

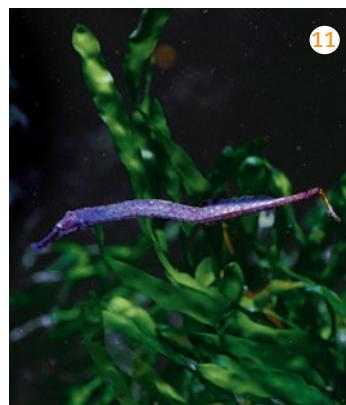


demeurent proches du substrat. Ce gobe à taches blanches appartient à la seconde catégorie. Pour se nourrir, il gobe du sable, le filtre à travers ses branchies, capte les éléments nutritifs (plancton...), puis rejette le reliquat via ses ouïes.

13 La majorité des poissons sont ovipares : la femelle pond des œufs qui écloront dans le milieu extérieur. *Thorichthys aureus* ne déroge pas à la règle. Chez cette espèce vivant en couple, les deux parents protègent leur progéniture des prédateurs. En cas de danger, la femelle peut abriter les alevins (tout jeunes poissons) dans sa bouche.

14 Le poisson-clown est connu pour sa relation symbiotique avec l'anémone de mer. Autre caractéristique notable, il est hermaphrodite protandre. Lorsque la femelle dominante vient à disparaître, le plus grand mâle change de sexe pour lui succéder. Lui-même est remplacé par l'un des mâles jusque-là inactif, qui est hissé au rang de reproducteur.

© Deodat Manchon / Palais de la porte Dorée.



11



13





D'AUTRES ESPÈCES À NE PAS MANQUER

15 Cette tortue d'eau douce est unique en son genre. Son nez en forme de groin, qui lui a valu son nom de tortue à nez de cochon (*Carettochelys insculpta*), lui permet de fouiller la vase à la recherche de proies. Malheureusement, cette espèce est menacée aujourd'hui, notamment par la destruction de son habitat et son commerce en tant qu'animal de compagnie.

16 Mais qu'y a-t-il de l'autre côté de cette paroi transparente pour attirer petits et grands ? Voici quelques indices : arrivées en 2014, ce sont les stars incontournables de l'aquarium ; elles sont albinos et occupent la fosse des crocodiles, mais pourtant n'en sont pas. Alors, avez-vous identifié ces animaux ? Il s'agit de Laury et Dundy, deux alligators (*Alligator mississippiensis*). © Aquarium de la porte Dorée.



15



16





17 À l'instar de ses précédents compagnons d'infortune, cette raie d'eau douce perlée (à gauche) est incapable de produire de la mélanine. Dans la nature, l'albinisme rime avec handicap. Les individus albinos sont repérables plus facilement par leurs proies et/ou leurs prédateurs.

18 La crevette barbier cardinal, ou crevette de sang. Ne vous fiez pas à sa modeste taille (5 centimètres), ce crustacé gréginaire s'attaque à de plus gros poissons que lui... pour les délester de leurs parasites, dont il se repaît. Un exemple typique de mutualisme : chacun des partenaires tire des bénéfices de cette relation, mais pourrait survivre seul.



19



19 Mou ou dur, le corail est un animal constitué de colonies de polypes, qui vivent en symbiose avec des zooxanthelles. Ces algues unicellulaires nourrissent leur hôte grâce aux produits issus de la photosynthèse et le parent de couleurs. En cas de stress, le corail peut libérer ces algues et... blanchir ! L'Aquarium tropical soutient la recherche en collaborant notamment avec des partenaires scientifiques, tels que le Muséum national d'histoire naturelle dans le cadre d'études sur les coraux.

20 En observant attentivement les scènes de vie aquatique, vous repérerez probablement des habitants dépourvus d'écaillles, tel ce pagure appelé couramment bernard-l'hermite. Il a subtilisé la coquille vide d'un mollusque pour protéger son corps mou. Au cours de leur croissance, ces crustacés sont amenés à « emménager » dans une coquille plus spacieuse, en espérant que le marché du logement leur soit favorable !

20





22

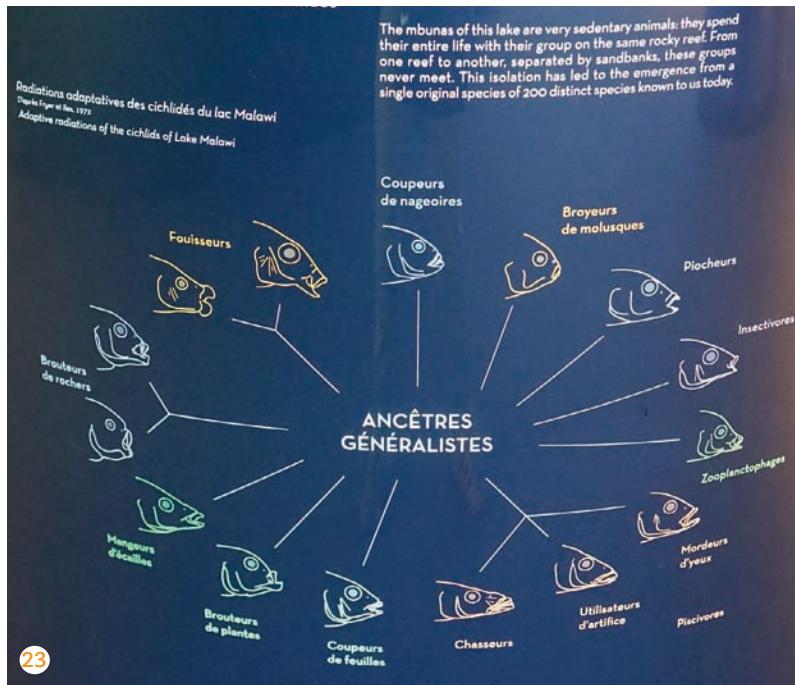
**Les espèces****Les vidéos****Des dispositifs variés pour apprendre et comprendre**

Que ce soit pour identifier ce joli poisson jaune, connaître le milieu de vie de cette raie ou encore découvrir les coulisses de l'aquarium, voici un aperçu des différents supports pédagogiques mis à disposition des visiteurs pour assouvir leur curiosité.

21 Grande nouveauté de l'Aquarium tropical : le Spot. Cet immense mur numérique vous invite à une immersion totale dans les profondeurs des océans à la rencontre des cétacés. Mais il faudra donner de votre personne, que ce soit pour nourrir ces baleines à bosse ou prendre soin de leur baleineau.

22 Vous voulez en savoir plus sur la reproduction des poissons, vous avez un doute quant au régime alimentaire de ce labre nettoyeur ou de cette crevette ? Pas de panique ! Des bornes informatiques, munies d'écouteurs, vous attendent à différents endroits de l'aquarium, prêtes à vous transmettre leurs savoirs.





Des espèces à protéger

Beaucoup d'espèces de poissons d'eau douce sont aujourd'hui menacées d'extinction dans leur milieu naturel. Les causes sont multiples : la destruction de leur habitat, les pollutions de l'agriculture, l'introduction d'espèces invasives... et bien sûr le changement climatique. L'Aquarium participe à des programmes de conservation des espèces. C'est par exemple le cas avec la famille des goodéidés, des petits poissons vivipares dont la reproduction est très particulière : les embryons sont rattachés à leur mère par une sorte de cordon ombilical.

Protecting
Many spec
fish are no
extinction in
The causes
destruction,
the introd
species, cl
participate
species cons
with the fa
viviparous
system of
embryos are
by a kind o



23 Prenez le temps de parcourir textes, photographies, graphiques, schémas tapissant les piliers pour enrichir vos connaissances scientifiques. Ce focus sur l'évolution des cichlidés d'un lac africain vous apprend que des barrières géographiques peuvent isoler des individus d'une même espèce. Au fil du temps, des espèces distinctes apparaissent, issues d'un ancêtre commun et adaptées aux contraintes de leur nouveau milieu, aboutissant à une diversité du vivant fabuleuse.

24 Grâce aux multiples contenus didactiques, le visiteur oscille entre découverte d'individus aux noms plus ou moins fantaisistes et compréhension de la gravité des menaces qui pèsent sur les environnements aquatiques. Dérèglement climatique, acidification de l'océan, pollution plastique, habitats et espèces en voie de disparition... Des mesures s'imposent.

25 Les expositions temporaires proposées régulièrement par l'Aquarium tropical constituent une excellente opportunité de sensibiliser les plus jeunes et leur faire prendre conscience de l'importance de protéger mers et océans, de même que fleuves et rivières. Ces milieux d'une grande richesse étant, hélas, fragiles et menacés.

26 Qu'elles soient sous forme d'ateliers ou de visites guidées, de nombreuses activités pédagogiques sont proposées aux enfants, aux familles, mais aussi aux groupes scolaires. Elles constituent un moyen ludique et interactif d'aborder les questions liées à la biodiversité et à la protection des milieux aquatiques.

© A. Volery / Palais de la porte Dorée.

Pour en savoir plus

<https://www.aquarium-tropical.fr/>

Science et matière

Rencontre lumineuse entre curcuma et polystyrène

Le polystyrène est un polymère bien connu en tant qu'emballage. Ces petites boules blanches qui s'accrochent partout peuvent servir aussi à confectionner des objets plastiques fluorescents, faits maison et à base de... curcuma ! Mais comment s'y prendre ? Suivez le guide, pas à pas.

PAR JONATHAN PIARD, PROFESSEUR AGRÉGÉ, ULYSSE GARNIER, CLÉMENT MOREL ET SACHA MARYNBERG, ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE PARIS-SACLAY

DISSOLUTION ET AGGLOMÉRATION DU POLYSTYRÈNE

Qu'est-ce qu'un polymère ou plastique ? C'est un matériau constitué de macromolécules, elles-mêmes constituées de l'enchaînement de nombreux motifs caractéristiques dont le nombre moyen est noté n . Le polystyrène (fig. 1) est un polymère rencontré au quotidien. Il est utilisé comme matériau dense et rigide pour fabriquer des gobelets transparents ou des boîtiers de CD. Il est retrouvé également sous forme de polystyrène dit expansé (PSE), un polymère auquel de l'air a été incorporé servant couramment d'emballage.

Lorsqu'il est mis dans un solvant tel que l'acétate d'éthyle, il développe des interactions avec ce dernier et s'y dissout (comme le sucre dans l'eau). Dans le cas

du polystyrène expansé, la dissolution entraîne la libération de l'air emprisonné. Le polystyrène étant constitué à 98 % d'air, une grande quantité peut être dissoute dans très peu de solvant (fig. 2). Ce même polymère, désormais en solution, peut s'agglomérer de nouveau si le solvant est changé. En effet, lorsque de l'éthanol est ajouté à la solution précédente, les propriétés du solvant varient et l'affinité de ce dernier avec le polystyrène diminue nettement : les interactions s'affaiblissent. Cela entraîne l'agglomération des différentes macromolécules pour former une pâte qui, après séchage et évaporation du solvant, se solidifie et retrouve une structure compacte (fig. 2). Ce processus de dissolution-agglomération peut permettre d'incorporer au sein du polystyrène un colorant, afin de fabriquer des objets en plastique colorés.

LE CURCUMA, UNE MOLÉCULE LUMINEUSE

Le curcuma est une plante d'Asie du Sud, dont les racines permettent de produire une poudre de couleur orange très marquée. Cette dernière est utilisée en

Figure 1. Le polystyrène est issu de la polymérisation du styrène. Son code d'identification est 06 PS.

© J. Piard.

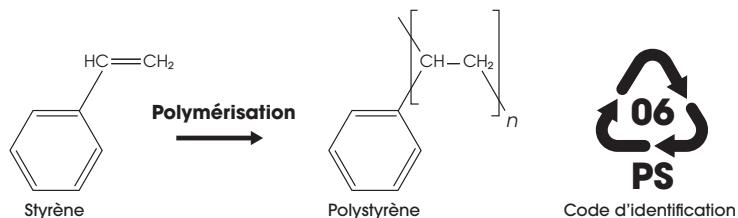
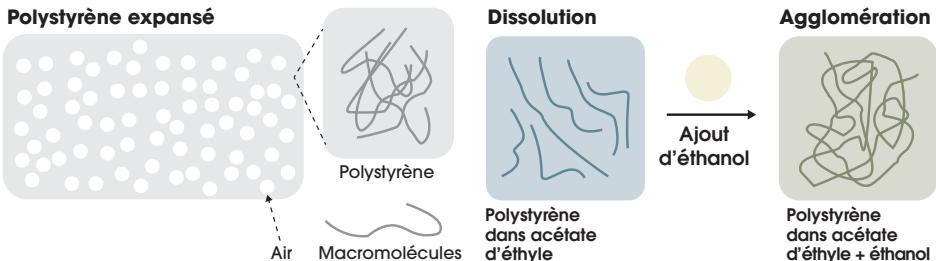


Figure 2. Polystyrène expansé et processus de dissolution-agglomération par changement de solvant. © J. Piard.





a)



b)

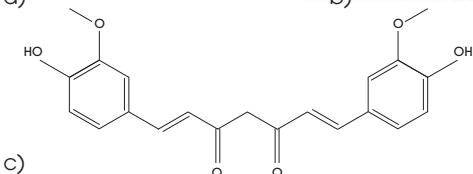


Figure 3. Fleur (a), racine et poudre de curcuma (b). c) Structure chimique de la curcumine. a) © stanballik / Pixabay ; b) CC BY-SA 3.0 / Simon A. Eugster.

cuisine, en tant qu'épice ou colorant, et possède également des propriétés thérapeutiques. La curcumine (fig. 3), principe actif du curcuma, est fluorescente : sous lumière UV (ultraviolette), elle émet de la lumière intense de couleur verte. Ce phénomène résulte d'un processus d'excitation par la lumière UV, suivi d'une désexcitation par émission de lumière de la molécule de curcumine.

FABRICATION D'OBJETS EN PLASTIQUE FLUORESCENTS

Comment fabriquer des objets fluorescents en polystyrène ? Vous aurez besoin du matériel suivant (fig. 4) : pot en verre (yaourt ou confiture), balance de cuisine, moule (en plastique ou silicone), curcuma, polystyrène expansé (matériau d'emballage), acétate d'éthyle (disponible en droguerie ou dans certains dissolvants à ongles), éthanol (alcool à 90 % vendu en pharmacie ou supermarché) et lampe UV (quelques euros sur Internet). Attention, l'acétate d'éthyle et l'alcool étant inflammables, l'expérience doit être réalisée dans un lieu bien aéré. Ces produits étant dangereux, il est impératif de respecter les conditions d'utilisation indiquées sur l'étiquette. La lampe UV ne doit pas être dirigée vers les yeux. Il est donc indispensable pour les enfants de réaliser cette expérience en présence d'un adulte. Dans le pot, versez environ 50 millilitres d'acétate d'éthyle (1/5 d'un verre d'eau environ ou 46 grammes), ajoutez une pincée



Figure 4. Matériel nécessaire à la fabrication d'objets fluorescents à base de polystyrène et de curcuma. © J. Piard.

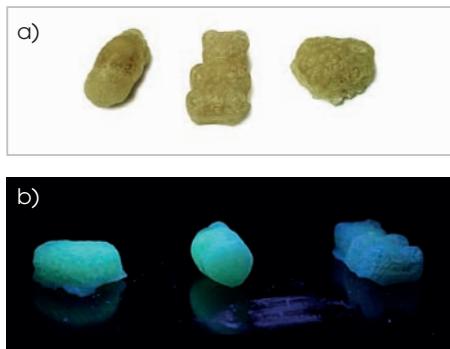


Figure 5. Objets en polystyrène observés sous lumière blanche (a) et ultraviolette (à 405 nanomètres - 1 nm = 10⁻⁹ m) (b).

© J. Piard.

de curcuma et remuez à l'aide d'une cuillère à café. La solution devient jaune. Si elle devient orange voire marron, c'est qu'il y a trop de curcuma. Ajoutez ensuite environ 10 g de polystyrène expansé par petits bouts. Agitez vigoureusement jusqu'à ce que la solution soit homogène. Versez 35 mL d'alcool à 90 % (environ 1/3 d'un flacon de 100 mL) et agitez à nouveau. Le polystyrène s'agglomère immédiatement et piège le curcuma pour former une pâte. Récupérez cette dernière et placez-la sur du papier absorbant, avant de la mettre dans un moule pour réaliser votre plus belle œuvre. Laissez sécher 1 à 2 jours à l'air libre. Et voilà un magnifique objet jaune qui s'illumine en vert dans le noir sous lumière UV. C'est le curcuma présent dans le polystyrène qui fluoresce (fig. 5). Et cerise sur le gâteau, ces objets se conservent plusieurs semaines, tout en continuant à briller sous lumière UV. À vous de jouer ! J. P., U. G., C. M. et S. M.



L'or vert - Quand les plantes inspirent l'innovation,
d'Agnès Guillot
et Jean-Arcady Meyer, Paris,
CNRS Éditions, 2020,
224 pages, 16 x 21 cm, 23 €.

L'or vert

Quand les plantes inspirent l'innovation

Explorez l'univers des plantes et de leurs propriétés remarquables. Ce modèle, pris en exemple dans de nombreux progrès scientifiques et technologiques en architecture, design, informatique ou santé, est imité, loin d'être égalé et source inépuisable d'émulation pour la recherche.

PAR CHRISTINE WARIN

Les plantes « condamnées » à rester au même endroit ont développé une « intelligence » étonnante en matière d'adaptation et de survie, basée sur la mémoire de leur environnement et la reconnaissance de leurs semblables. Nul anthropomorphisme dans ces révélations savamment expliquées par les auteurs, mais la transcription de l'avancée de nos connaissances sur la nature. En découle la mise à contribution de plus en plus fréquente des végétaux dans des domaines variés : l'industrie, la médecine, l'architecture, la robotique ou la mode. Leurs propriétés extraordinaires font le miel de bien des inventions et progrès présentés par nos deux chercheurs : grand théâtre de Pékin au toit autonettoyant inspiré de micro-algues, prototypes de pneus fabriqués avec du latex issu des racines de pissenlit, velcro tiré de la très « attachante » fleur de bardane, méthode de désalinisation suggérée par les palétuviers producteurs d'eau douce, nanorotors d'appareils électriques calqués sur la vrille du concombre, pull en tissu de feuilles de thé, technique du lotus utilisée pour éradiquer les biofilms des instruments chirurgicaux... L'innovation emprunte ses idées aux processus d'interaction des plantes avec l'eau, l'air et le Soleil. Ces inventions font le grand écart entre bienfait de l'humanité, gadget pour start-up avide de publicité ou objet de recherche et développement purs. Les auteurs, bien enthousiastes, livrent un message clair. Paradoxalement, la bio-inspiration végétale n'est pas toujours écologique et inscrite dans une démarche de développement durable. Elle devrait témoigner que les plantes sont indispensables à notre survie et leur préservation nécessaire. Sortir de l'effet de mode et de la prouesse technologique et instaurer un label « totalement inspiré par la nature », voilà l'étape prochaine à franchir. Inspiré par le végétal oui, à condition de ne pas le faire expirer à moyen terme au nom de l'innovation à court terme, et au risque d'expirer avec lui à long terme. C. W.

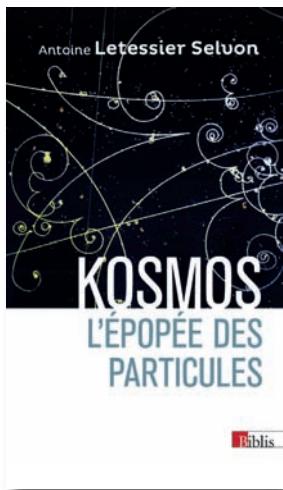


Kosmos

L'épopée des particules

Une incursion enthousiaste et éclairée aux confins de cette ère nouvelle de la physique apparue au début du XX^e siècle avec la découverte des rayons cosmiques, bousculant à jamais notre vision du monde.

PAR CHRISTINE WARIN



Kosmos - L'épopée des particules,
d'Antoine Letessier Selvon,
Paris, CNRS Éditions, 2019,
184 pages, 14 x 22 cm, 18 €.

« **I**n'y avait rien avant le Big Bang car le temps n'existe pas. » Avouons-le, pour qui n'est pas comme l'auteur, directeur de recherche au CNRS (Centre national de la recherche scientifique), physicien des hautes énergies, expert ès particules élémentaires, ce type de phrase tirée de son ouvrage peut plonger dans la perplexité, voire le vertige. C'est précisément le but de l'auteur que de sortir le lectorat de ce gouffre. Conscient d'exercer un métier difficile à expliquer, il manie l'art de conter simplement les origines de la physique fondamentale moderne. S'ouvre à nous un beau roman, riche en rebondissements, peuplé de héros, d'observations et de théories. La compréhension de l'Univers à la fin du XIX^e siècle semblait aboutie, mais voici que d'un épiphénomène, la décharge spontanée des objets chargés, va naître la découverte de rayons galactiques ou extragalactiques. Le monde mystérieux et envoûtant des particules élémentaires, de la relativité restreinte et de la mécanique quantique nous est révélé au gré des aventures de Pierre (1859-1906) et Marie Curie (1867-1934), Albert Einstein (1879-1955), Victor Hess (1883-1964), Pierre Victor Auger (1899-1993), Georges Charpak (1924-2010), Takaaki Kajita et tant d'autres. Des rayons alpha aux neutrinos, de la chambre à nuages à l'accélérateur de particules, émerge le modèle standard de la physique des particules. Cependant, ce fabuleux roman est loin d'être clos, bien des défis restent à relever. Comment réunir en une seule théorie espace-temps et relativité générale ? Entamons-nous une autre révolution pour la conquête d'un nouveau monde ? L'auteur est optimiste, avec le monde quantique nulle limite désormais pour borner nos connaissances ! Vous en doutez ? Alors suivez son exemple : regardez des enfants jouer au football tout en écoutant la musique du divin Jean-Sébastien Bach (1685-1750). Dégustez vite ce livre et vous comprendrez pourquoi... C. W.

La science en action

Universcience, l'établissement public du Palais de la découverte et de la Cité des sciences et de l'industrie, propose à ses publics une offre riche et diversifiée (expositions, expériences, exposés, animations) dont les pages qui suivent donnent un aperçu. Pour en savoir plus, www.palais-decouverte.fr et www.cite-sciences.fr.

Expositions → À la Cité

Banquet

→ Du 16 novembre 2021
au 7 août 2022

Ludique et conviviale, l'exposition Banquet propose de vivre des expériences multisensorielles et immersives aussi gourmandes que festives. Tous les sens sont stimulés : manger, c'est voir mais aussi sentir, goûter, toucher, entendre. Le visiteur se glisse d'abord dans la peau d'un apprenti cuisinier. Coaché par des professionnels, il participe à « Top gestes », admire la danse des ustensiles ou essaie des mariages aromatiques inédits. Au sein de l'espace sensoriel « L'amuse-bouche », il affine sa capacité à déguster en prenant part à des expériences gustatives déroutantes. Enfin, le visiteur devient convive. Le banquet est un moment chaleureux favorisant les interactions sociales. Temps fort de l'exposition, un spectacle collectif mêle images projetées, mapping, sons et odeurs, où une table s'anime en une succession d'ambiances féériques. Le parcours se termine par un éclairage sur le banquet à travers les cultures, époques et mémoires.

e-LAB – jeu vidéo #2 Les nouvelles frontières du jeu vidéo

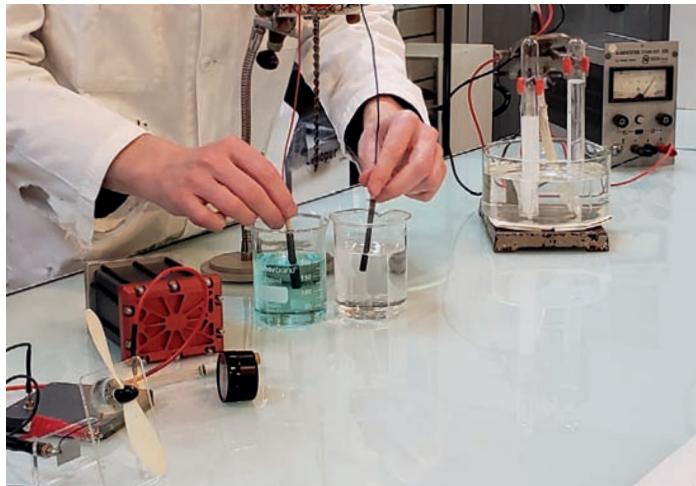
→ Une exposition permanente

Accessible dès 7 ans, l'e-LAB – espace jeu vidéo propose de vivre des expériences inédites et décrypter le phénomène des jeux vidéo. Conçu comme une passerelle entre public, scientifiques et professionnels, ses 700 m² s'organisent autour d'une muséographie innovante et d'une offre de médiation évolutive. Permettant d'aborder le jeu vidéo dans toutes ses dimensions – plaisir, éducation, création, industrie, addiction, violence ou place des femmes... –, les contenus présentés sont en prise avec l'évolution du secteur. Cet espace exhibe une nouvelle thématique annuelle, « Les nouvelles frontières du jeu vidéo », soulignant la question des évolutions d'usages et de pratiques du jeu vidéo au cours des dernières années. Différents domaines d'application s'en sont emparés – médical, pratique professionnelle (eSport), champ artistique... Ces applications contribuent au développement de l'industrie vidéoludique et interrogent la notion de ses « frontières ».



© P. Levy / Universcience.

Exposés → Aux Étincelles du Palais de la découverte Dans le 15^e arrondissement de Paris



© L. Fournier, V. Polonovski / Universcience.

Hydrogène et énergie renouvelable

→ Un exposé proposé par l'unité Chimie
À partir de 14 ans, sur réservation

Avec la transition énergétique, on entend parler régulièrement de l'hydrogène, mais qu'en est-il exactement ? Pensons à tous ces appareils que nous utilisons quotidiennement : téléphone, ordinateur, cafetière, bouilloire, réfrigérateur, four à micro-ondes, lampe... Ils ont tous un point commun : l'électricité. Aujourd'hui, à l'échelle mondiale, elle provient principalement de ressources non renouvelables comme le charbon. Pour intégrer des ressources renouvelables telles que le rayonnement solaire ou le vent, il est nécessaire de pallier l'intermittence de ces ressources. C'est ici que la chaîne hydrogène intervient. Par exemple, lorsqu'une éolienne fonctionne et que l'électricité n'est pas utilisée directement, la chaîne hydrogène permet de la stocker sous forme d'un gaz : le dihydrogène (H_2). À travers plusieurs expériences, au gré de l'inspiration du médiateur et de vos questions, nous vous proposons de découvrir cette chaîne hydrogène constituée de trois parties : l'électrolyseur, la zone de stockage et la pile à combustible.

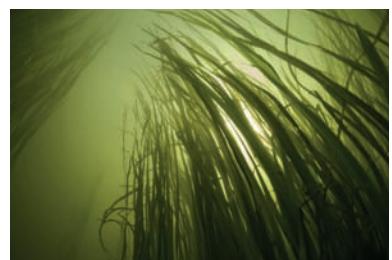
La biodiversité de la Seine

→ Un exposé proposé par l'unité Sciences de la vie

À partir de 6 ans, sur réservation

Les activités humaines se sont développées souvent le long des fleuves et autres cours d'eau. Il y a 13 000 ans déjà, des chasseurs de rennes installaient leurs tentes en bord de Seine près de Paris, à Étiolles et aux Tarterêts. Si les fouilles ont montré qu'ils consommaient rennes, chevaux, bisons et lièvres, peut-être capturaient-ils aussi des saumons dans les eaux claires de la Seine.

Aujourd'hui, le bassin versant de la Seine regroupe 30 % de la population française et 40 % de l'activité économique, autant de sources de pollution. Malgré cette forte empreinte humaine, d'autres formes de vie sont présentes. Dans cette eau troublée par le courant et le trafic fluvial se cachent des micro-organismes, des algues, des plantes, des crustacés, des éponges, des coquillages et bien sûr des poissons. Le saumon évolue toujours dans la Seine, même s'il est géné dans sa migration par les barrages. Ce prédateur se nourrit très jeune de proies minuscules mais indispensables. Grâce à l'observation d'échantillons de plancton vivant et de maquettes, partez à la découverte de la biodiversité actuelle de la Seine sous toutes ses formes, de leurs relations et évolution sous l'influence de l'Homme et du climat.



© Y. Lefranc.

DÉCOUVERTE

Revue du Palais de la découverte

Un magazine scientifique à destination d'un large public qui propose des articles de fond couvrant un champ étendu de disciplines en lien avec l'actualité, les problématiques de société et les expositions de l'établissement.

Trimestriel - 4 numéros par an

Prix d'un numéro :

- franco France métropolitaine : **9 €**
- franco France DOM : **10 €**
- franco France TOM et étranger : **10,90 €**

- Grâce à **Découverte**, prenez connaissance de nombreux sujets en relation avec l'actualité scientifique et les expositions du Palais de la découverte et de la Cité des sciences et de l'industrie.
- **Extrêmement accessibles et très illustrés**, les articles de fond s'articulent autour de cinq grandes rubriques : Terre & Univers, Matière & Énergie, Vivant \ Santé & Environnement, Mathématiques, Sciences du numérique. Ils informent sur l'évolution des sciences et de leurs applications. Une sixième rubrique analyse les problématiques de Science en société, alors que *En coulisses* vous permet de voir l'envers du décor ou la naissance d'une exposition, par exemple.
- **Retrouvez également** les Sciences Actualités, Curiosités célestes, Formes mathématiques, Coups de cœur...



Bulletin d'abonnement n° 436

**à retourner avec votre règlement à : Cité des sciences et de l'industrie,
Service Revues, 30, avenue Corentin-Cariou, 75930 Paris cedex 19**

Je souscris un abonnement de 1 an à la revue Découverte (4 numéros par an) et je joins mon règlement par chèque ou par virement à l'ordre de l'**agent comptable de l'EPPDCSI**.

Identifiant national de compte bancaire - RIB (relevé d'identité bancaire)

Code banque	Code guichet	N° de compte	Clé RIB	Domiciliation
10071	75000	00001000045	42	TPPARIS RGF

Identifiant international de compte bancaire - IBAN (International Bank Account Number)

FR76	1007	1750	0000	0010	0004	542	BIC (Bank Identifier Code)
							TRPUIFRP1

- Tarif annuel : 25 €/an
- Tarif réduit (titulaire du Pass/carte Sapade n°) : 20 €/an
- Abonnement de soutien : 35 €
- Tarif étranger : 31 € (par avion, supplément de 15 €)

Règlement uniquement par chèque français ou virement avec les frais d'opérations à votre charge. Pour l'étranger, nous contacter pour plus de renseignements : revue@universcience.fr

M. M^{me}

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal :

Ville :

Profession :

Courriel :

Conformément à l'article 27 de la loi Informatique et libertés, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des données vous concernant. Sauf opposition de votre part, ces informations pourront être utilisées par des tiers. Si vous ne le souhaitez pas, cochez cette case

les nourritures
cycles thématiques,
tables rondes, rencontres

février — juin 2022

accès gratuit

+ d'infos sur cite-sciences.fr

MARS

- 8** Se faire peur pour éviter le pire : le pouvoir des dystopies
- 11>12** Régions polaires : quels enjeux pour l'Europe ?
- 15** Plasticité cérébrale : à vos stimuli !
- 16** Publicité et alimentation : un cocktail explosif *
- 22** Fruits et légumes : l'équilibre dans l'assiette
- 24** Qu'est-ce que la science ? *
- 26** Climat : quelle politique énergétique pour l'UE ?
- 29** Insectes comestibles : l'assiette augmentée

AVRIL

- 5** La vie intraterrestre, rencontre dans les profondeurs
- 7** Où en est l'empowerment féminin ? cycle Ma planète demain
- 12** Comment le sol façonne notre monde ?
- 13** Paysages, un régal pour les yeux *
- 19** Des SOL-utions, pour la sécurité alimentaire et le climat
- 21** Algorithmes et jeux combinatoires : toute une histoire

MAI

- 18** Décarboner l'aviation : de nouvelles avancées
- 19** Microbiote : des microbes qui nous font du bien *

JUIN

- 1** Le miel : comment font les abeilles ? *
- 9** Volcans : bouches de la Terre ? *
- 11** Le satellite Gaïa, mètre de la galaxie
- 18** James Webb Space Telescope : un œil neuf sur l'Univers

*Cycle Ma première conférence à destination du jeune public.

Programme susceptible d'être modifié.

En partenariat avec



Avec le soutien de



Les Étincelles du Palais de la découverte



EPIDCST photo : A. Robat



RÉSERVATION
IMPÉRATIVE
palais-decouverte.fr

LES ÉTINCELLES



Jardin Caroline-Aigle • 186 rue Saint-Charles • 75015 Paris