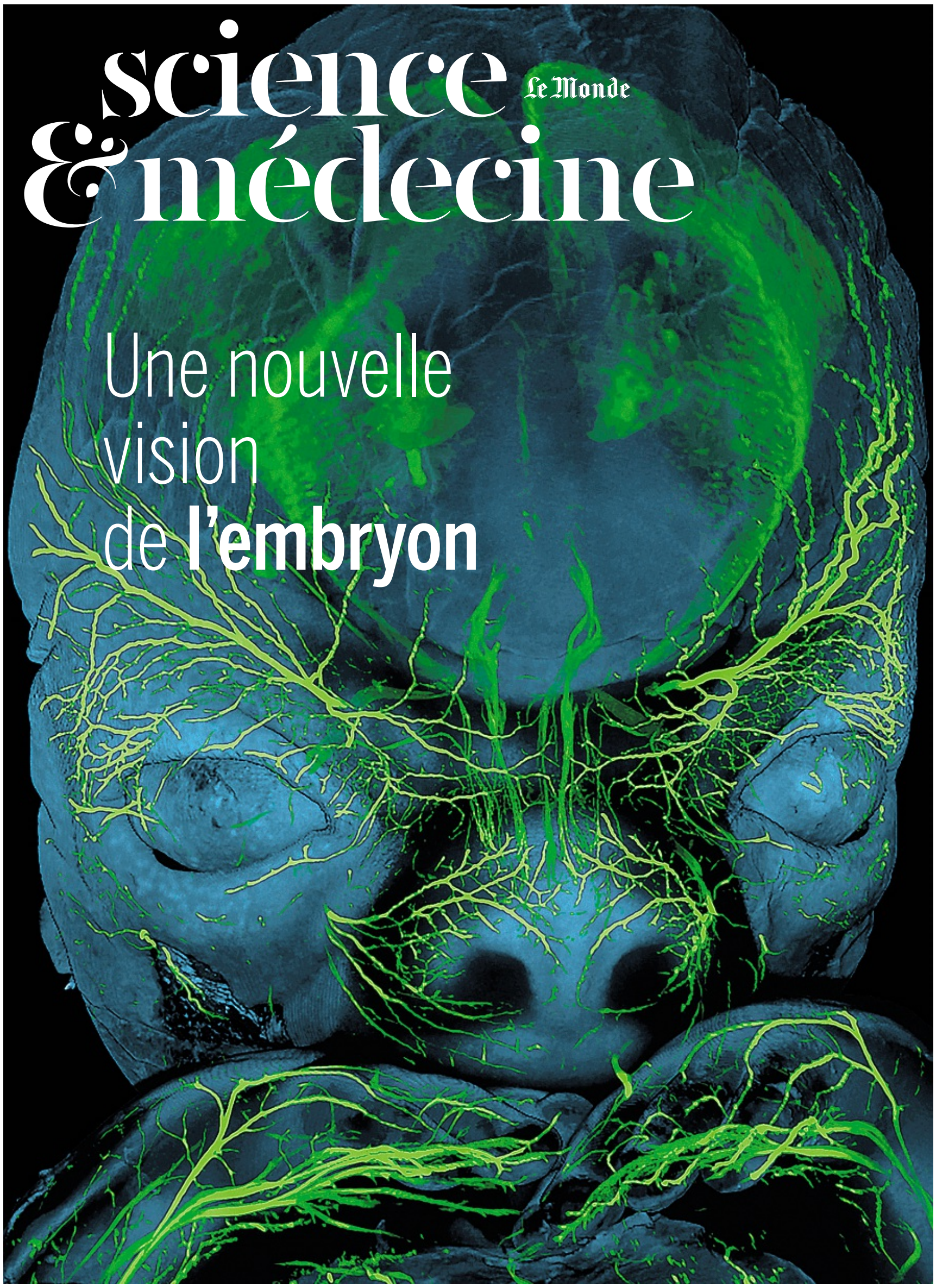
science & médecine
Le Monde

Une nouvelle vision de l'embryon



En vert, l'innervation sensitive de la face d'un embryon d'environ 8 semaines de développement.
FONDATION VOIR ET ENTENDRE/INSTITUT DE LA VISION.

Des équipes françaises ont obtenu des images d'embryons et de fœtus humains d'une précision inégalée. De quoi tirer un nouvel atlas d'anatomie moléculaire de notre développement et espérer des avancées médicales, par delà ces représentations fascinantes de nos premières semaines de vie

FLORENCE ROSIER

Une main de tanagra, ornée de sa dentelle de nerfs bleus, verts ou violets. Un pied lilliputien où court l'arborescence des vaisseaux sanguins – jaunes, pourpres, turquoise. Un tout petit bras avec les palmes de ses muscles naissants. Et ce délicat, saisissant profil où file une arabesque verte : le système nerveux périphérique.

Et puis cette face étrange qui semble nous fixer, surgit de sa nuit utérine. Pour nous confier quelles lois de son développement ? Pour nous livrer, sur nos premières semaines de vie, quelle mémoire-fantôme ? Nous avons tous vécu ces étapes de vie primordiale, nichée dans le ventre maternel, sans qu'elles inscrivent, dans nos cerveaux en devenir, la moindre trace consciente.

Ces images subjuguent ou dérangent, ravissent ou donnent le frisson. Toutes proviennent d'embryons ou de fœtus humains morts, âgés de 6 à 14 semaines (on parle de fœtus à partir de la 8e semaine de vie). Ces poids plume de 1,5 gramme (à 6 semaines) à 110 grammes (à 14 semaines) mesurent respectivement huit millimètres et neuf centimètres de long, du sommet du crâne au bas du dos – les bourgeons des jambes sont alors repliés sur l'avant.

Leur anatomie est ici révélée dans ses détails les plus purs, à l'échelle de la cellule dont chaque sous-type peut être identifié avec certitude. Des vidéos associées permettent d'appréhender dans l'espace le développement de cette architecture arachnéenne. Une finesse de cristal. Prenez garde : face à ces chefs-d'œuvre de la nature, vous risquez le syndrome de Stendhal, ce vertige qui saisit l'écrivain visitant l'Italie, en 1817.

Ces épures qui ourlent les lignes, retracent la construction des organes embryonnaires ou fœtaux, nous les devons à des miniaturistes français. Avant 8 semaines de développement, l'embryon est relativement bien connu car il est encore peu complexe. Quant au fœtus, après 15 semaines de développement, son anatomie se rapproche de celle de l'enfant ou de l'adulte. « *Mais une période obscure s'étend entre la huitième et la quinzième semaine de développement : on ne sait pas très bien comment se construit le fœtus* », indique Alain Chédotal, directeur de recherche à l'Institut de la vision (Inserm, CNRS, université Pierre-et-Marie-Curie, à Paris).

C'est donc à l'Institut de la vision que son équipe a rendu transparentes ces esquisses de vie humaine. Paradoxal ? Non, car l'enjeu est bien de les observer en 3D. C'est ce qui a permis aux chercheurs de construire un atlas moderne de l'embryon humain. Un travail associant également Paolo Giacobini, du centre de recherche Jean-Pierre Aubert (Inserm, université de Lille).

➔ LIRE LA SUITE PAGES 4-5

Archéologie : l'Inrap s'enracine

Dominique Garcia a été reconduit à la tête de l'Institut national de recherches archéologiques préventives en décembre. Il revient sur ces années qui ont fait de la France un grand site archéologique.

PAGE 8

Mystères en cascade

Pourquoi un glaçon flotte-t-il sur l'eau ? Simple en apparence, la question continue de susciter des controverses. De nouvelles expériences semblent se contredire.

PAGE 2

Des plumes supernoires pour mieux séduire

L'oiseau de paradis mâle, afin de sublimer sa parade nuptiale, s'est doté d'atours absorbant plus de 99 % de la lumière. Non pas grâce à des pigments, mais à une découpe microscopique particulière des barbules de ses plumes.

PAGE 2

Guerres de l'eau chez les physiciens

PHYSIQUE - Pourquoi l'eau peut-elle, dans certaines conditions, rester liquide en dessous de zéro degré ? Parce qu'elle serait double, prétendent certains chercheurs. A cause de liaisons hydrogène labiles, avancent d'autres. Le débat fait rage

ÉRIC FRANCESCHI/DIVERGENCE

La situation commence à devenir agaçante. La molécule parmi les plus essentielles à la vie et les plus simples qui soient, H_2O, échappe encore à notre entendement, se comportant des plus bizarrement par rapport à ses congénères. Un exemple simple. Refroidir un liquide diminue les mouvements des molécules en son sein, donc les rapproche et donc augmente la densité. Si bien qu'un solide se forme, plus lourd que le liquide de départ. Sauf, qu'à l'inverse, un glaçon d'eau flotte.

Idem, en pressurant un liquide, il devient plus visqueux puisque les molécules se rapprochent. Sauf l'eau, qui peut couler même deux fois mieux à forte pression, comme l'a démontré en septembre 2017 une équipe de l'Institut Lumière Matière (Lyon) dirigée par Frédéric Caupin, professeur à l'université Lyon-I.

Des anomalies comme celles-ci, la petite molécule d'eau en compte en fait des dizaines. Abandonner l'espoir de les comprendre n'empêchera pas les glaçons de flotter, mais a des inconvénients. *« Nous ignorons quelle est exactement la probabilité que l'eau se transforme en glace en fonction de la température,* note Frédéric Caupin. *Or, ce paramètre est important pour modéliser les nuages et donc leur effet sur le climat. »*

Entre deux eaux

Evidemment, sur ces problèmes, les physico-chimistes ne sont pas secs, et les hypothèses ne manquent pas. L'une d'elles, évoquée dès 1892 par le découvreur des rayons X, Wilhelm Rœntgen, vient de refaire surface dans deux articles parus dans *Science* le 22 décembre 2017 et dans *Physical Review Letters* (*PRL*) le 5 janvier.

Elle est assez troublante. Il n'y aurait pas une seule eau liquide, mais deux, dont l'une plus dense que l'autre. Si bien que, dans certaines conditions de température et de pression, elles pourraient coexister, l'une flottant sur l'autre, comme l'huile sur l'eau. Leur différence est que les molécules seraient plus ou moins agrégées dans chacune de ces deux phases. Le problème est que personne ne les a jamais vues, car il faut soit titiller les basses températures, soit les hautes pressions, ce qui transforme le liquide en glace, empêchant de voir ces fameux deux états.

Cependant, depuis plus de vingt ans, les chercheurs, comme ceux de l'équipe de l'université de Stockholm dans *Science,* traquent des indices de la double personnalité de l'eau, avant la funeste glaciation.

Premier exploit, ils ont observé de l'eau liquide jusqu'à – 45 °C ! Le liquide s'est refroidi plus rapidement que n'apparaissaient des cristaux en utilisant des gouttes de quelques micromètres, projetées dans le vide. L'évaporation est ainsi plus rapide, tout comme le refroidissement donc.

Seconde prouesse, ils ont mesuré, grâce à des lasers à rayons X, l'évolution de la compressibilité de l'eau en fonction de la température. Plus on refroidit, plus les molécules se rapprochent et plus un liquide devient difficile à comprimer. Sauf l'eau, bien sûr : sa compressibilité… augmente. Mais seulement jusqu'à – 44 °C, avant de baisser, selon les chercheurs. *« En 2014, nous avions déjà atteint ces températures, mais nous n'avions pas pu observer ce pic de compressibilité,* souligne Anders Nilsson, professeur à l'université de Stockholm et responsable de l'équipe. *Nos expériences confirment les hypothèses du modèle à deux liquides. »*

Des résultats critiqués

Fin de l'histoire ? Loin de là. *« Nous pensons que les Suédois ont une température plus élevée que celle qu'ils donnent »*, estime Frédéric Caupin, coauteur avec des collègues allemands de l'étude dans *PRL*. Leurs gouttes sont deux fois plus petites, donc devraient être plus froides. Or, elles sont aussi froides que les gouttes allemandes…

« Pas du tout. Ce sont eux qui se trompent sur leur estimation de température », rétorque Anders Nilsson, qui vient juste d'envoyer un article à *PRL*, pour critiquer le travail de ses collègues, qui pourront répondre.

« 2018 s'annonce très combative », dit Frédéric Caupin. Incidemment, il note que ses confrères n'ont pas fait référence à un de ses travaux présentés quelques mois plus tôt, montrant aussi ce maximum…

« Ce sont de belles expériences mais je suis sceptique », affirme José Teixeira, chercheur émérite du CEA, qui baigne dans cette controverse depuis plus de trente ans. En 2010, il avait déjà relevé une erreur d'interprétation de ces confrères suédois. Et il constate que, malgré quelques ajustements, cette erreur persiste. Pour lui, il n'y a pas d'« agrégats » de molécules d'eau et pas deux liquides. Il a même, selon lui, montré en 2015, par exemple, l'incohérence de ces modèles avec des observations expérimentales. Il n'y aurait qu'un liquide, au comportement certes curieux, mais qui s'explique par une propriété bien connue de l'eau, les liaisons hydrogènes. Ces dernières font se tenir par la main les molécules entre elles, mais ces liens se font et se défont rapidement. Cette dynamique expliquerait toutes les anomalies.

« Mon "camp" a une vision bien plus simple de l'eau, mais nous publions moins, pensant que cette discussion relève plutôt d'une bulle spéculative », constate le chercheur, qui note aussi avoir déjà observé et expliqué ce fameux maximum de compressibilité. *« Il y a trois, quatre groupes expérimentaux dont je ne partage pas les interprétations, qui en plus sont incompatibles entre elles ! »,* s'amuse José Teixeira, qui pointe aussi des faiblesses de principe dans les simulations numériques à l'origine du renouveau de l'hypothèse des deux liquides, il y a vingt-cinq ans. *« Non, nos simulations sont très rigoureuses et montrent que le modèle à deux liquides reproduit beaucoup de propriétés expérimentales »,* répond Paola Gallo, professeure à l'université de Rome et auteure d'un article dans *Science* présentant celui de ses confrères suédois.

Alors, les expériences vont continuer. Anders Nilsson veut augmenter la pression pour se rapprocher d'un moment où le liquide, s'il est bien un mélange, devrait devenir plus opaque, *« comme du lait »*. Mais il garde ses idées confidentielles pour l'instant. Et Frédéric Caupin a d'autres expériences en cours pour sonder d'autres régions de température et de pression. Futures batailles (navales) en perspective. ■

DAVID LAROUSSERIE

Pour l'oiseau de paradis, noir c'est noir

ÉTHOLOGIE - Une équipe américaine révèle l'étrange structure des plumes du volatile, qui explique l'intensité du « supernoir » des mâles

On ne devrait pas avoir le droit de mourir sans avoir vu la parade nuptiale d'un oiseau de paradis. *« D'une beauté indicible »,* résumait, en 1857, le naturaliste Alfred Wallace. *« Le plus extraordinaire et le plus bel habitant à plume de notre planète »,* poursuivait le co-découvreur, avec Charles Darwin, de la théorie de l'évolution.

En 1522, déjà, les plumages colorés rapportés au Portugal par le seul navire « survivant » de l'équipage de Magellan avaient fait sensation. Près de cinq siècles plus tard, ces fameuses plumes ont livré un nouveau secret. Une équipe américaine est parvenue à expliquer la provenance du « supernoir » exhibé par les mâles lors de leur superparade. Ces étonnants résultats ont été publiés, mardi 9 janvier, dans la revue *Nature Communications*.

Un paradisier superbe en pleine parade devant une femelle. ED SCHOLES

Le noir se caractérise par une absorption particulièrement importante de la lumière : environ 97 %. C'est du reste à peu près le niveau qu'a observé l'équipe américaine sur deux espèces cousines des oiseaux de paradis, utilisées comme témoins. Le supernoir, c'est bien autre chose, un taux d'absorption qui dépasse les 99 %, et même 99,95 % pour les meilleurs matériaux produits par les humains pour réduire les lumières parasites des télescopes spatiaux ou des lunettes à infrarouge des militaires. Ici, le phénomène n'est plus d'origine chimique mais physique. La lumière se trouve piégée par la structure même de la surface exposée.

C'est précisément ce que les ornithologues américains ont découvert chez les cinq espèces d'oiseaux de paradis qu'ils ont étudiées. Par microscopie électronique à balayage, ils ont observé les barbules, ces filaments portés par les barbes, elles-mêmes situées à l'extrémité des plumes. Ils y ont trouvé *« presque une structure de fractale, où chaque branche cache une nouvelle structure complexe,* souligne Dakota McCoy, de l'université Harvard. *En continuant de zoomer apparaissent de nouveaux dessins – selon les espèces, des aiguilles de pin, des goupillons, des coraux… »*

Les cavités ainsi créées piègent les rayons lumineux avec une efficacité redoutable. Les scientifiques ont ainsi trouvé sur certaines plumes un taux d'absorption de 99,7 % à 99,95 %. Même en recouvrant la plume d'une pellicule d'or, la lumière reste piégée et la plume demeure noire. De quoi effacer toute trace de volume et créer cet aspect que les chercheurs assimilent à du velours.

Des plumes en première ligne

Un flou qui cache une extrême complexité. En effet, toutes les plumes ne sont pas supernoires. Grâce à des scanners 3D, l'équipe en a simulé la position lors des parades des mâles. Ils ont établi que les plumes ainsi sculptées se trouvaient précisément en première ligne lors du show masculin et que leurs dessins trouvaient leur efficacité maximale vus de la position traditionnellement occupée par les femelles.

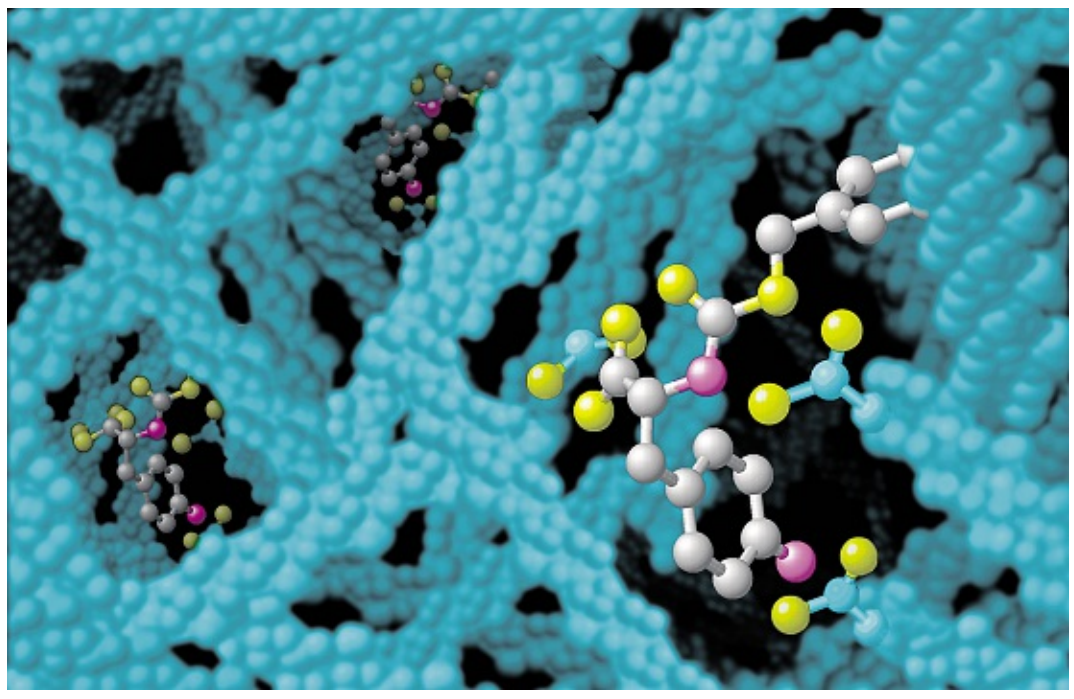
Le but de l'opération ? *« Nous faisons l'hypothèse que cela produit une illusion d'optique qui permet aux couleurs voisines de briller plus intensément »,* poursuit Dakota McCoy. L'expression se veut prudente, car l'œil de l'oiseau ne fonctionne pas exactement comme le nôtre. Mais quand on sait que l'avenir reproductif du mâle réside dans la qualité de sa parade, on comprend l'avantage évolutif que procurerait alors le supernoir.

Avec ces travaux, l'équipe américaine éclaire d'une nouvelle lumière cet animal emblématique. Il ouvre également la voie à de futurs travaux de « biomimétisme ». En effet, les ingénieurs de la NASA s'étaient déjà inspirés des ailes du papillon morpho pour concevoir le supernoir de certains de leurs télescopes. Mais les performances des plumes de l'oiseau de paradis dépassent largement celles du lépidoptère ou de certains serpents. Partir de l'oiseau de paradis pour mieux connaître le ciel ? Le programme est tentant, avouons-le. ■

NATHANIEL HERZBERG

Contre les mauvaises odeurs corporelles, des anticorps en plastique

INGÉNIERIE MOLÉCULAIRE - Ces polymères de synthèse pourraient fournir la base de déodorants non toxiques. Ils servent déjà pour la détection de contaminants présents dans les eaux



Modélisation d'un polymère (bleu turquoise) et de sa molécule cible (gris). KARSTEN HAUPT, UTC-CNRS

Ce sont des matériaux bio-inspirés aux vertus prometteuses. Leurs applications potentielles ? La cosmétique : ils pourraient donner naissance à une nouvelle génération de déodorants corporels, plus respectueux de l'écosystème de notre peau. Mais aussi l'imagerie biomédicale, le traitement des cancers… Certains sont déjà commercialisés pour la détection de contaminants (mycotoxines, antibiotiques, pesticides et herbicides, hormones, perturbateurs endocriniens…), dans les eaux ou les denrées alimentaires.

Ces matériaux sont des anticorps artificiels, nommés « polymères à empreintes moléculaires » ou MIP (acronyme anglais). En clair, ce sont des réseaux 3D de polymères de synthèse. Ils sont dotés de cavités sur-mesure, abritant des « récepteurs chimiques », choisis pour reconnaître des molécules-cibles (un contaminant, par exemple).

Comment fabriquer ces pseudo-anticorps ? L'astuce consiste à ajouter la molécule-cible dans le milieu réactionnel, à base de monomères dotés de ces récepteurs : ces monomères s'organisent en se moulant autour de la molécule-cible. On laisse la réaction de polymérisation se produire, puis on ôte la molécule-cible. Résultat : le polymère apparaît creusé de cavités *« complémentaires en forme, en taille et en groupes chimiques fonctionnels »* de la molécule cible, explique Jeanne Tse Sum Bui, qui vient de recevoir la médaille de cristal 2017 du CNRS pour ses travaux dans ce domaine, à l'Université de technologie de Compiègne (UTC) en France.

Ces fac-similés reconnaissent leur cible avec une affinité et une spécificité comparables à celle des anticorps naturels. Leur point fort ? *« A température ambiante, ils sont bien plus stables que les anticorps naturels : pas besoin de les conserver à 4 °C. Autre atout : leur production est rapide, simple et peu coûteuse. Et elle ne nécessite pas le sacrifice de vies animales »,* relève Jeanne Tse Sum Bui.

A vrai dire, le concept n'est pas neuf : il a été forgé par deux Allemands, Günter Wulff et Klaus Mosbach. *« En 1993, l'équipe de Mosbach a montré qu'un MIP pouvait être utilisé pour doser des médicaments dans le sang. »* Le procédé est désormais classique, mais sans cesse amélioré. *« Le choix du monomère est crucial. En amont, la modélisation moléculaire nous aide souvent. »* Pour produire ces MIP, le laboratoire de l'UTC que dirige Karsten Haupt s'intéresse à une large gamme de polymères.

Comment cibler les mauvaises odeurs liées à la transpiration ? Par des MIP à base d'acrylate ou de méthacrylate, répond ce laboratoire. Les déodorants actuels sont des antiperspirants ou des antibactériens (biocides), souvent suspectés d'effets nocifs pour la santé ou l'environnement. Les premiers, à base de sels d'aluminium, bloquent la sécrétion de la sueur : ils obstruent les canaux des glandes sudoripares. Mais ces sels sont soupçonnés d'être cancérigènes. Les seconds, à base d'antibactériens à large spectre (triclosan, chlorhexidine…), peuvent perturber la flore cutanée, barrière de défense contre d'autres microbes. De plus, le triclosan est un perturbateur endocrinien. En juin 2017, 206 experts ont lancé un appel exhortant la *« communauté internationale à limiter la production et l'utilisation du triclosan »* aux seules applications médicales.

En partenariat avec L'Oréal, l'UTC a donc conçu des MIP qui piègent les molécules de la sueur, elles-mêmes inodores. D'où cet effet vertueux : les bactéries présentes sur notre peau ne peuvent plus convertir ces précurseurs en acides organiques volatiles… et fétides. Sous forme de particules d'environ 0,5 micromètres, ces MIP ne pénètrent pas la peau. Ils peuvent être alors incorporés dans des rollers ou des sprays.

Brevets déposés

« En 2014, quatre brevets ont été déposés par L'Oréal sur ces produits », indique Mme Tse Sum Bui. Les tests d'efficacité sont prometteurs. Reste à prouver que ces produits ne sont ni irritants ni allergisants. *« Sur des cellules en culture, nous observons une bonne tolérance. »*

Les MIP ont bien d'autres applications. Chaque année, ils donnent lieu à 800 à 1 000 publications. Un Institut fédéral suisse des sciences et technologies de l'eau, Eawag, fait appel à ces anticorps de synthèse : *« Les MIP nous permettent d'extraire sélectivement des échantillons d'eau les micropolluants organiques, en vue de réaliser ensuite leur analyse en isotopes stables »,* explique Thomas Hofstetter, de l'Eawag. L'enjeu : mieux comprendre les voies de dégradation des micropolluants dans l'eau.

Autre espoir d'application : le diagnostic biomédical. *« Dans le cadre d'un projet européen, nous explorons l'intérêt des MIP dans le diagnostic des cancers »,* explique Karsten Haupt. L'idée : doser des biomarqueurs (glycosides, protéines…) présents sur les cellules cancéreuses. Des applications thérapeutiques sont aussi à l'étude. *« Les MIP seraient couplés à des nanoparticules magnétiques. Administrés au patient, ils se lieraient à leurs cibles sur les cellules cancéreuses. L'application d'un champ magnétique externe permettrait ensuite de détruire sélectivement les tumeurs. »*

Reste une question : ces « plastiques » ne vont-ils pas renforcer la pollution, déjà dramatique dans les océans ? *« Les billes de polymère issues de ces futurs déodorants seront éliminées par le traitement des eaux usées,* répond Karsten Haupt. *En plus, nous travaillons actuellement sur des MIP biosourcés et biodégradables, ce qui devrait résoudre le problème. »* ■

FLORENCE ROSIER

Ne plus renverser son café en marchant

PHYSIQUE - Deux chercheurs de l'université de Cambridge ont modélisé le problème

Qui n'a jamais renversé son café en marchant trop vite, pour peu que la tasse soit bien remplie et la boisson brûlante ? Cette situation a déjà suscité plusieurs études, dont deux récompensées par les Ig Nobels, qui honorent chaque année les recherches les plus improbables. En 2017, Jiwon Han, de la Korean Minjok Leadership Academy (un établissement préparant aux écoles d'ingénieurs), a été distingué pour sa description des mouvements de café dans une tasse… en marchant en arrière.

L'article s'inspire lui-même de l'autre étude primée, publiée dans la *Physical Review E* en avril 2012, et dans laquelle les cobayes marchaient à des vitesses différentes avec des contenants plus ou moins remplis. Le sujet a également vu naître sur le marché un surprenant gadget dénommé Spill Not, reposant sur le principe d'une anse pivotante et d'un support où positionner son mug, pour le transporter sans risque.

Hillary et John R. Ockendon, de l'université d'Oxford, au Royaume-Uni, viennent d'apporter un nouvel éclairage dans un article publié par le *Journal de la société pour l'industrie et les mathématiques appliquées* (*SIAM Review*), le 6 novembre 2017 : *« Les études précédentes ne donnaient pas d'explications rationnelles assez précises sur le phénomène ; a contrario, celle-ci modélise le problème pour qu'il soit plus largement compréhensible et en apportant une solution pratique originale afin d'éviter de renverser sa boisson ! »*

Il s'agit d'abord de comprendre pourquoi tenir sa tasse remplie en marchant est si périlleux. Un liquide se met à osciller fortement pour une ou plusieurs fréquences, on parle alors de résonance. Pour le café, celle-ci se produit entre deux et trois oscillations par seconde, et correspond peu ou prou à l'allure moyenne de marche qui est de deux à trois pas par seconde. En clair, notre rythme de marche est très proche de la fréquence de résonance du café, expliquant le risque important de débordement.

Petites oscillations

En utilisant des concepts physiques classiques, les auteurs modélisent notre façon de marcher et de tenir le café par un pendule simple avec un ressort. Ils établissent ainsi un lien entre la longueur du pendule – donc des bras – et la hauteur maximale du café dans la tasse, dans le cas de petites oscillations. *« Le modèle du ballottement du fluide est classique, mais cette extension reste un joli développement mathématique,* note Alban Sauret, chercheur au CNRS dans un laboratoire mixte entre l'organisme et Saint-Gobain. *L'étude est un prolongement de celle publiée en 2012 et, depuis, étendue pour d'autres applications, comme le verre de cognac ou la mousse de la bière. »*

L'article donne cependant une solution originale : *« Le ballottement du liquide peut être singulièrement réduit en tenant son thé ou son café le plus à la verticale possible, le bras tendu, et non pas à l'horizontale devant soi comme on a souvent tendance à le faire »,* selon John Ockendon. Une théorie facile à vérifier en France, où il se consomme 5,2 kg de café par an et par habitant, soit l'équivalent de 1 500 tasses bues chaque minute. ■

GUILLAUME RIZZA

TÉLESCOPE

EXOPLANÈTES

Le nanosatellite français PicSat mis en orbite

Le satellite PicSat a été lancé par une fusée indienne et mis en orbite avec succès vendredi 12 janvier. Long de quelques dizaines de centimètres pour une masse de 3,5 kg, il a été conçu et développé par le Laboratoire d'études spatiales et d'instrumentation en astrophysique (Lesia) français. L'objectif est d'étudier le passage d'une exoplanète gazeuse géante devant une étoile jeune et très brillante, Beta Pictoris, située à quelque 63,14 années-lumière de la Terre. PicSat pourrait donner l'alerte afin que d'autres télescopes plus puissants, très sollicités, observent un phénomène de transit qui devrait n'avoir lieu que tous les dix-huit ans.

PALÉONTOLOGIE

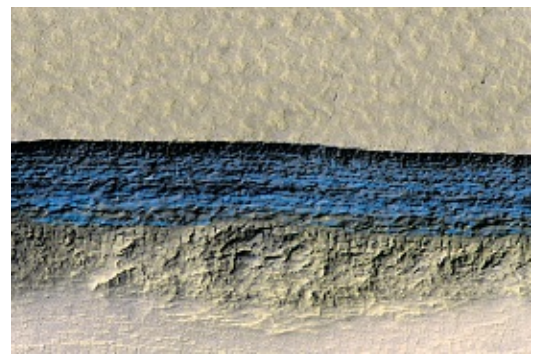
Des papillons plus anciens que les plantes à fleurs

On pensait jusqu'alors que l'apparition des lépidoptères et celle des plantes à fleurs, dont ils prisent le nectar, avaient été concomitantes. La découverte en Allemagne de traces fossiles d'écailles d'ailes de lépidoptères vieilles de 200 millions d'années suggère que les papillons, de jour ou de nuit, seraient apparus sur Terre quelque 50 à 70 millions d'années avant leurs plantes actuelles de prédilection. Pour Paul Strother (Boston College), ces fossiles, qui ressemblent aux glossata, un sous-ordre de lépidoptères dotés de trompes, utilisaient cet appendice non pour aspirer le nectar – encore indisponible –, mais pour s'abreuver de gouttelettes d'eau mélangées au pollen des plantes à graines (gymnosperme). *« Ces insectes ont ensuite transféré ces préférences alimentaires aux angiospermes* [plantes à fleurs]*, et ont fini par coévoluer avec les fleurs dont elles transportent le pollen tout en se nourrissant de leur nectar »,* note Paul Strother.

› *Van Eldijk et al., « Science Advances », du 10 janvier.*

ASTRONOMIE

De la glace bleue observée sur Mars



Il y a quelques années, le géologue américain Colin Dundas (USGS, Flagstaff, Arizona) a eu la surprise d'observer des structures bleutées sur les clichés renvoyés quotidiennement par la sonde Mars Reconnaissance Orbiter. Une étude plus poussée lui a permis de découvrir sept autres sites où des falaises abruptes d'une centaine de mètres de haut laissaient deviner sur leur flanc de la glace d'eau. On savait déjà que Mars était riche en eau glacée, mais on ignorait si celle-ci était facilement accessible. Les couches de neige comprimée, observées à des latitudes de 50 à 55° nord et sud, suggèrent qu'elles seraient exploitables par des colons humains, pour leur consommation ou pour en tirer de l'oxygène et du méthane. Reste à savoir si de tels réservoirs de glace, qui a tendance à se sublimer au contact de l'atmosphère, sont aussi présents dans les régions plus proches des tropiques martiens, où l'ensoleillement est plus favorable à l'installation de bases humaines.

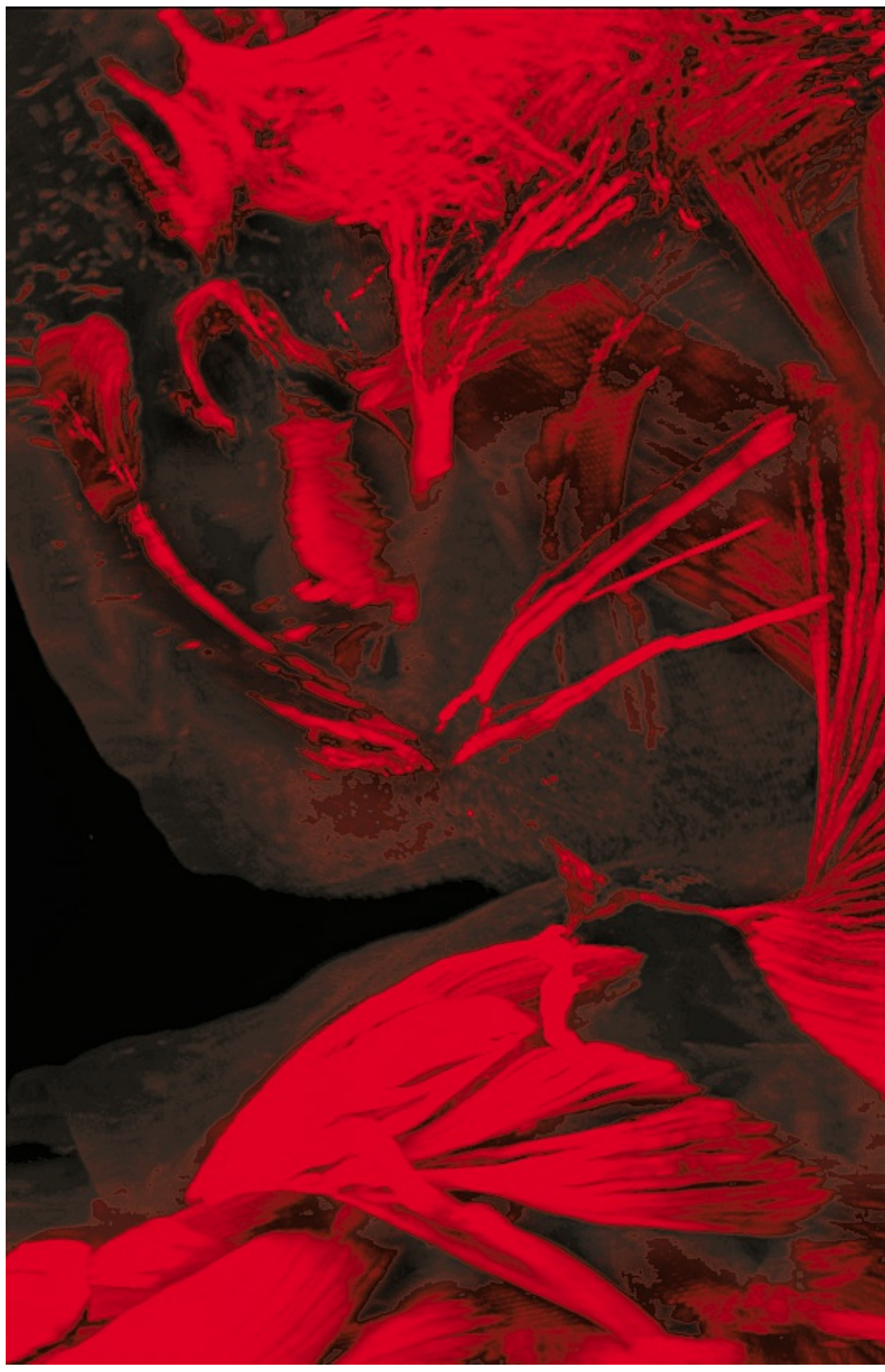
(PHOTO : NASA/JPL-CALTECH/UA/USGS)

› *Dundas et al., « Science », du 12 janvier.*

10 %

C'est l'augmentation du risque de maladies cardiovasculaires chez les femmes qui ont eu leurs premières règles avant 12 ans, selon des données issues des 267 000 femmes de la cohorte britannique Biobank, publiées en ligne le 15 janvier dans la revue *Heart*. Les chercheurs ont retrouvé d'autres facteurs de risque d'infarctus du myocarde ou d'accident vasculaire cérébral en lien avec la vie génitale et reproductive : ménopause précoce (avant 47 ans) ; fausse couche ; hystérectomie ; parentalité à un âge précoce. Un suivi cardiaque plus fréquent pourrait s'avérer utile chez des femmes avec un tel profil.

Un atlas renouvelé de **l'embryon humain**



▶ SUITE DE LA PREMIÈRE PAGE

« C'est toujours un peu frustrant, confie Alain Chédotal, *de ne présenter que des photos de notre travail, alors même qu'il offre une vision 3D du développement, filmé sous tous les angles et sous tous les plans. »* On peut le rassurer : à elles seules, ces images sont époustouflantes. Elles ont d'ailleurs fait la « une » de la revue *Cell*, une des plus prestigieuses qui soient, où elles ont été publiées le 23 mars 2017. Un succès récompensé par le prix Recherche 2017 de l'Inserm, qu'Alain Chédotal a reçu le 30 novembre. Il a aussi été élu à l'Académie des sciences ce même mois.

Les chercheurs ont voulu rendre accessibles à tous l'ensemble des données de cet atlas moderne de l'embryon humain, interactif. Les scientifiques, mais aussi le grand public, peuvent les consulter sur un site hébergé à l'Institut de la vision (www.transparent-human-embryo.com). *« Les étudiants en médecine, les embryologistes, les chirurgiens pédiatriques et fœtaux pourront s'emparer de ces vidéos pour parfaire leur formation »*, se réjouit-il. Mais aussi les chercheurs qui s'intéressent à un aspect précis du développement.

« Aujourd'hui encore, les données de l'embryologie humaine, telles qu'elles sont enseignées et telles qu'elles figurent toujours dans les atlas médicaux, proviennent d'études menées au cours de la première moitié du XXe siècle, observe Alain Chédotal. *Le développement du système lymphatique, par exemple, est connu par des travaux datant de 1910-1911. Depuis, il n'y a pas eu de progrès significatifs. »*

Toutes ces études se sont fondées sur l'analyse de fines coupes de tissus embryonnaires, observées au microscope puis redessinées à la main. Un procédé très chronophage, mais aussi soumis à une subjectivité dans l'interprétation des données. Une large part de ce corpus provient des travaux de l'Institut Carnegie, à Baltimore (Etats-Unis). Cet institut a d'ailleurs inspiré la nomenclature qui définit les stades du développement de l'embryon : les fameux « stades Carnegie » (de 1 à 23, jusqu'à la huitième semaine), toujours utilisés.

Mais ces procédés sont devenus obsolètes avec l'arrivée des nouvelles méthodes d'imagerie en 3D. Les chercheurs parisiens sont parvenus à réaliser cet atlas en combinant trois techniques : le marquage des tissus entiers, leur « clarification » puis leur observation microscopique.

Première étape, l'immunomarquage. Les chercheurs ont marqué les tissus embryonnaires, intacts, à l'aide d'anticorps fluorescents qui se fixent spécifiquement sur des protéines exprimées par certaines cellules, ce qui permet de les localiser. *« Comme ce sont de gros échantillons, au début ça ne marchait pas. Il a fallu laisser les anticorps imprégner les tissus plusieurs jours ou semaines pour qu'ils les marquent en profondeur »*, raconte Alain Chédotal.

La deuxième étape consiste à *« rendre les tissus transparents comme du cristal »*, afin de visualiser le signal fluorescent. Si les tissus biologiques sont opaques, c'est qu'ils sont formés de molécules hétérogènes, avec des indices de réfaction très différents. Ils diffractent donc la lumière en tous sens. Mais depuis le début du XXe siècle, on sait rendre les tissus transparents : il suffit, pour l'essentiel, d'en extraire les lipides. *« Ne restent à peu près que les protéines, présentes dans les membranes biologiques. Elles dessinent la frontière entre les cellules, leur squelette, révélant ainsi l'architecture des tissus »*, explique Alain Chédotal. Et les tissus, formés de molécules aux pigments optiques plus homogènes, deviennent en quelques minutes transparents.

Mais les solvants utilisés vers 1905 pour extraire les lipides étaient très toxiques. Autre défi : *« Il fallait rendre les techniques de marquage fluorescents compatibles avec les méthodes visant à rendre les tissus transparents. Ce goulot d'étranglement a été levé récemment »*, raconte Emmanuel Beaurepaire, du laboratoire d'optique et biosciences Inserm-CNRS de l'Ecole polytechnique, à Palaiseau. Pour cela, Morgane Belle, ingénieure dans l'équipe d'Alain Chédotal, a adapté une technique mise au point chez la souris en 2011. Les tissus ont été plongés dans des bains successifs de plusieurs solvants qui les ont débarrassés de leurs lipides.

Rendre les tissus transparents

« Aujourd'hui, tout le monde veut rendre les tissus transparents », note le chercheur. Il existe 30 à 40 protocoles différents conçus à cette fin. Mais sur ce terrain, les labos se livrent une « guerre technologique » assez rude – comme sur le front des techniques d'optogénétique ou d'édition du génome. Certains protagonistes mènent d'ailleurs en parallèle ces différents combats : Karl Deisseroth, à Stanford (Californie), un des pionniers de l'optogénétique, a aussi développé une technique alternative de clarification et de marquage des tissus, qu'il a « vendue » à grand renfort de publicité… *« L'analyse d'un échantillon coûte plusieurs milliers de dollars avec sa méthode, qui fait appel à des équipements coûteux. Avec notre méthode, elle coûte 50 centimes d'euros. Sa procédure est aussi bien plus longue »*, pointe Alain Chédotal.

La dernière étape est celle de l'observation au microscope optique. Pour cela, les chercheurs utilisent un microscope spécial dit « à feuillet de lumière ». *« Le premier microscope commercial de ce type a été acheté par nous-mêmes en 2012 »*, confie Alain Chédotal. Cet appareil permet de voir d'un coup tout un plan des échantillons – au lieu de devoir les scanner point par point. Un laser épais de deux micromètres scanne les échantillons transparents plan par plan, tandis qu'une caméra en surplomb filme chaque plan. Ensuite, une image 3D de l'organe ou de l'embryon entier est reconstituée à l'aide de logiciels spécialisés.

« Nous avons généré plus de 20 téraoctets (To) de données, ce qui nécessite une puissance d'analyse énorme. Nous ne pourrons pas poursuivre seuls ce travail », estime Alain Chédotal. D'où son ambition : rejoindre le projet international de cartographie des cellules humaines, le « Human Cell Atlas » récemment lancé, pour y coordonner un volet consacré à l'embryon.

Ces travaux, bien évidemment, soulèvent des questions éthiques. En France, depuis les lois de bioéthique de 1994, l'embryon humain est une *« personne humaine potentielle »*, rappelle Hervé Chneiweiss, président du Comité d'éthique de l'Inserm, *« ce qui lui donne droit au respect dû à la dignité humaine. »* Mais auparavant, le fœtus humain était quantité négligeable. Et très négligée, comme l'illustrent tristement les travaux du photographe suédois Lennart Nilsson. En 1965, il a publié dans le magazine *Life* une spectaculaire série de photos d'embryons et de fœtus humains, flottant dans leur bulle amniotique. Des images prétendument obtenues par endoscopie, laissant croire que ces fœtus étaient encore vivants. Le succès fut planétaire. Jusqu'à ce que la vérité émerge : sur ces clichés célébrant la vie, les fœtus nageaient en réalité dans leur linceul.

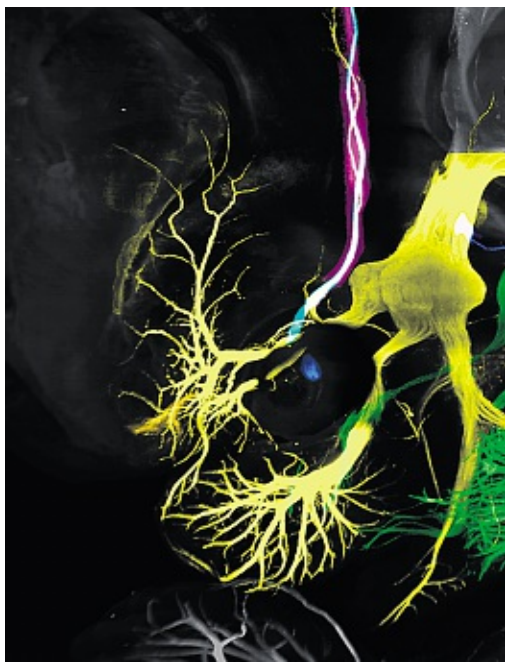
Aucune ambiguïté de ce type, bien sûr, avec ce nouvel atlas de l'embryon humain. Au total, les chercheurs ont utilisé une quarantaine d'embryons ou de fœtus humains. Ils ont demandé à l'Agence de la biomédecine les autorisations nécessaires pour obtenir ces tissus provenant d'interruptions volontaires de grossesse, les parents ayant consenti à leur utilisation à des fins de recherche.

« Trois mois avant sa publication dans Cell, *Alain Chédotal a aussi sollicité notre avis sur l'impact de la mise en ligne de ces images*, témoigne Hervé Chneiweiss. *Le Comité d'éthique de l'Inserm n'a trouvé aucun risque d'atteinte à l'autonomie des personnes, de malfaisance, d'atteinte à la justice ou à la dignité humaine, ni aucune mise en cause des données personnelles. »* Il a même recommandé la poursuite de ces travaux.

« A l'échelle cellulaire, le développement du fœtus humain est très mal connu », dit Hervé Chneiweiss. L'échographie fœtale, dans le ventre maternel, offre une résolution millimétrique. Avec ces nouvelles images, elle devient micrométrique et cellulaire. *« Cet atlas, c'est le début d'une aventure. A ce jour, les chercheurs n'ont utilisé qu'une centaine d'anticorps : ils ne couvrent que 1 % du spectre de l'ensemble des protéines du corps humain. »* Beaucoup reste à faire, donc.

Des découvertes surprenantes

Mais d'ores et déjà, cet atlas a livré quelques découvertes surprenantes. Par exemple, sur le développement du système nerveux périphérique. Les techniques classiques de l'embryologie ne permettaient de voir que le tronc et les grosses branches des nerfs périphériques, chez le fœtus précoce. *« Avec notre technique, nous pouvons désormais voir les fines branches qui vont innerver les doigts, par exemple, tout en distinguant les nerfs moteurs des nerfs sensitifs. »* Et ce travail d'orfèvre a révélé une bizarrerie de notre déve-



Le marquage des douze paires de nerfs crâniens d'un embryon de 7 semaines permet de distinguer les ébauches des nerfs oculomoteur (en rose) ou facial (en vert). La petite tache bleue correspond à l'emplacement de l'œil.
FONDATION VOIR ET ENTENDRE/INSTITUT DE LA VISION

Repères

Fin du XIXe siècle L'embryologie moderne naît grâce au développement de microtomes performants. Ces instruments permettent de découper de fines tranches de tissus biologiques, étudiés après fixation.

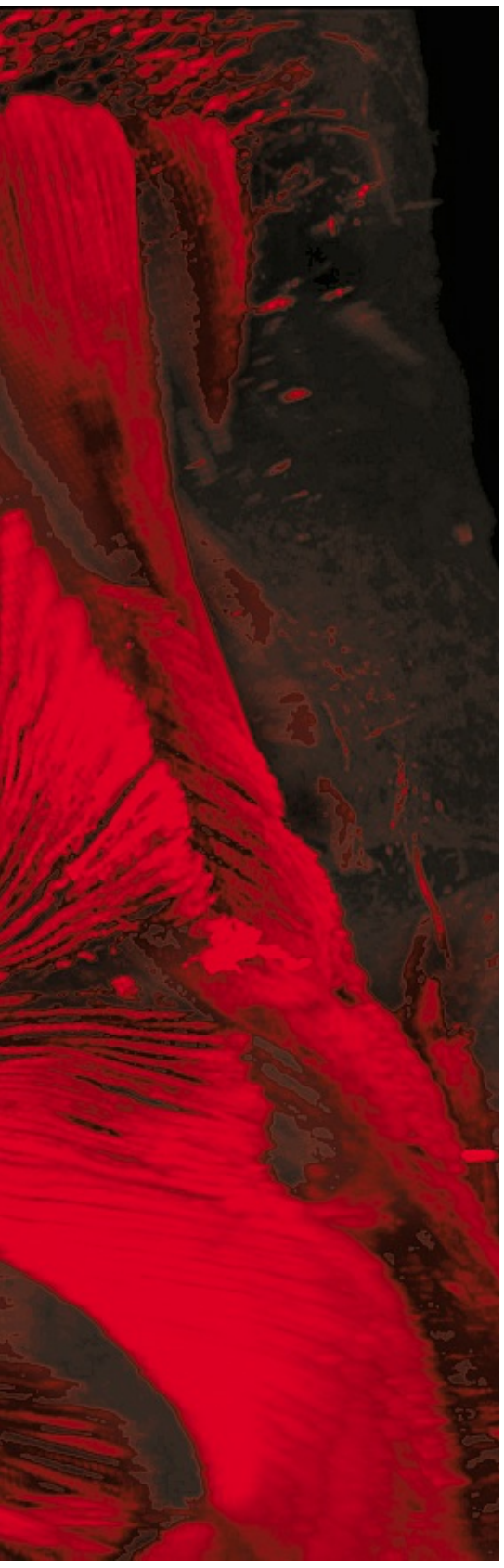
1860-1880 Une série de modèles en cire d'embryons humains à différents stades est développée en Allemagne. La collection Ziegler sera exposée à Paris en 1867 et à Vienne en 1873.

1900-1950 L'Institut Carnegie, à Baltimore (Massachusetts), analyse un nombre considérable de coupes d'embryons et de fœtus humains, qui sont ensuite redessinées à la main. Ces travaux restent à la base des connaissances actuelles en embryologie humaine.

Années 1960 La collection Blechschmidt est réalisée à partir de l'analyse de 200 000 coupes de 64 embryons.

1975 Apparition de l'échographie fœtale en deux dimensions. En 1994, l'échographie 3D permet de visualiser un fœtus en volume, une technique qui se développe dans les années 2000.

2017 Grâce à la possibilité de créer des tissus transparents, un premier atlas moléculaire 3D de l'embryon et du fœtus humain est publié dans la revue *Cell*, le 23 mars, par des équipes françaises (Institut de la vision, Inserm, CNRS, UPMC, université de Lille).



Le marquage des protéines musculaires (en rouge) révèle le système moteur au niveau de l'épaule et du cou (vus de dos) d'un embryon de 8 semaines.

Nerfs sensori-moteurs d'une main droite à trois stades de son développement, entre les 7e et 11e semaines : nerf radial (en bleu), médian (en rose) et ulnaire (en vert).

Fœtus de 8 semaines, où les nerfs périphériques ont été marqués en vert. La tête mesure environ 9 millimètres de large.

loppement : *« Notre main droite n'est pas le miroir de notre main gauche, quand on regarde attentivement les territoires innervés par les trois nerfs sensitifs de cette région corporelle. Il y a donc une part d'aléatoire dans cette innervation sensitive, qu'on ne retrouve pas avec les nerfs moteurs. »*

L'innervation sensitive est aussi apparue plus précoce qu'on ne le croyait. *« Aux Etats-Unis, des opposants à l'avortement ont mis en avant ce fait pour laisser entendre qu'un fœtus de moins de 12 semaines pourrait ressentir de la douleur. Mais le cortex cérébral ne se développe qu'à partir de la semaine 17 ou 18. Et les neurones de la moelle épinière ne se connectent au cerveau qu'à partir de la 20e semaine. Avant cet âge, la transmission des messages douloureux est impossible »*, répond Alain Chédotal.

Autre découverte : le développement de la vascularisation. Les vaisseaux capillaires connaissent une étonnante succession de phases de croissance et de résorption. *« A 5 semaines, l'embryon humain apparaît d'abord couvert de petits capillaires. Puis ceux-ci se rétractent avant de repousser au moment où se forment les différents organes »*, résume le chercheur.

L'ÉCHOGRAPHIE FŒTALE, DANS LE VENTRE MATERNEL, OFFRE UNE RÉSOLUTION MILLIMÉTRIQUE. AVEC CES NOUVELLES IMAGES, ELLE DEVIENT MICROMÉTRIQUE ET CELLULAIRE

Autre champ très exploré durant l'embryogenèse : la formation du système nerveux central. *« Comment, en particulier, un neurone va-t-il trouver sa cible, souvent située à plusieurs millimètres voire centimètres de distance ? Cette imagerie plus précise du fœtus va apporter beaucoup d'informations »*, juge Emmanuel Beaurepaire.

Au-delà de ces *« fantastiques images du fœtus humain »*, et de ces découvertes sur les processus du développement, l'atlas *« ouvre des perspectives de retombées médicales dans trois domaines »*, estime le professeur Stanislas Lyonnet, directeur de l'Institut des maladies génétiques Imagine, à l'hôpital Necker (AP-HP). Pour la médecine fœtale et prénatale, d'abord, *« il offre une grille de lecture plus fine des anomalies dépistées, prévenues, voire traitées. »* Dans le champ de la pédiatrie médicale et chirurgicale, ensuite, *« il aidera à comprendre certaines malformations congénitales, pour lesquelles il faut connaître le développement normal des organes atteints »*. Un troisième secteur pourrait bénéficier de ces connaissances plus précises sur le fœtus : c'est celui du cancer. *« Beaucoup de cancers sont le reflet d'un dysfonctionnement de gènes intervenant aussi dans le développement précoce. »*

Revenons, pour finir, à ces troublantes images de ce que furent nos premières semaines de vie. Il vous arrive de lui trouver, à ce petit embryon d'homme, un drôle de museau, un mufle un peu étrange, une mine d'extraterrestre ? C'est que cette esquisse est le fruit de la rencontre d'un ovule et d'un spermatozoïde, certes. Mais si petite soit-elle, elle est aussi le résultat de centaines de millions d'années d'évolution.

« Durant les phases très précoces du développement, c'est vrai qu'on observe des similitudes entre les embryons de différents mammifères. L'embryon humain, par exemple, est initialement doté d'une queue qui régresse ensuite, pour disparaître à la fin de la 8e semaine. Et la face d'un embryon précoce connaît des changements de forme impressionnants », reconnaît Alain Chédotal. Par exemple, les « arcs branchiaux » sont des structures présentes dans tous les embryons des vertébrés : ce sont des précurseurs reconnaissables de nombreuses structures. Chez l'homme, ils constitueront plus tard le squelette de la face, notamment. Eh bien, certains arcs branchiaux, chez l'embryon humain, fusionnent vers l'avant, autour de la 6e semaine, pour donner naissance à la mâchoire.

Mais Alain Chédotal tord aussi le cou à une idée fausse répandue. Non, l'embryogenèse ne récapitule pas la phylogenèse. C'est même, dit-il, une des premières grandes fraudes scientifiques de l'époque moderne. Le biologiste allemand Ernst Haeckel (1834-1919) avait trafiqué ses dessins pour faire croire qu'un embryon humain retraçait, au fil de son développement, l'arbre évolutif des espèces. Le scandale fut énorme. Un bel exemple de « fake news » avant l'heure... ■

FLORENCE ROSIER

LE LIVRE

Une mythique machine démontée

Une relecture surprenante de ce qu'on croyait être le premier et unique exemple d'une horloge astronomique

C'est l'une des plus intrigantes découvertes archéologiques de ces dernières années : les restes d'une machine comportant une trentaine de roues dentées remontant à deux siècles avant notre ère. Ce puzzle de métal corrodé pourrait bien être le premier, et unique, exemple d'une horloge astronomique, puisque ce mécanisme affiche les phases de la Lune en fonction du jour dans le mois et permet de dire s'il y aura ou non une éclipse de Lune ou de Soleil.

Ce mécanisme très perfectionné, dit d'Anticythère, du nom de l'île grecque au large de laquelle il a été trouvé au début du XX^{e} siècle, a été redécouvert dans le Musée d'Athènes dans les années 1950. A partir de 2006, des études recourant à des rayons X ont permis de percer les secrets de son fonctionnement.

Frédéric Lequèvre utilise, lui, une autre technique : le rationalisme critique, ou zététique. S'il ne remet pas en question les capacités astronomiques de la machine, il doute vraiment de ses plus de deux mille ans d'âge.

Dans une première partie, il revient sur ce que fait ce mécanisme : la correspondance jour et constellation du zodiaque, les phases de la Lune au cours du mois, les prévisions d'éclipses... Il explique ainsi l'ingénieuse idée qui permet au système de modifier la vitesse de la Lune sur son orbite et de se rapprocher de son mouvement réel dans le ciel. Il écorne cependant la légendaire précision du mécanisme dans le calcul des éclipses, et évacue la possibilité de mesurer la latitude et la longitude avec cet instrument. Lequel est d'ailleurs pour lui plus un mécanisme d'horloge astronomique qu'un calculateur, voire qu'un ordinateur, comme certains l'ont qualifié.

Le deuxième tome détaille les arguments permettant de dater la machine, non pas du II^{e} siècle avant J.-C., mais plus vraisemblablement de la période 1500-1700. On découvre alors qu'aucune technique de datation n'a été appliquée sur ces pièces, dont la composition exacte en zinc, cuivre ou étain est en fait inconnue ! On n'est même pas sûr de la date à laquelle des pêcheurs l'auraient trouvée... Une fouille en octobre 2017 dans le navire qui aurait abrité la machine a remonté un nouveau disque de bronze, mais il serait au mieux décoratif, et il n'est pas certain que ce soit un morceau manquant.

Une des manières de dater l'instrument consiste à faire coïncider les dates d'éclipses inscrites sur la machine avec celles qui ont vraiment eu lieu en Grèce. Des auteurs ont ainsi trouvé que cela collerait entre 400 et 0 avant J.-C. Mais Frédéric Lequèvre trouve la même coïncidence vers 1425... Il constate aussi, en analysant le savoir-faire horloger, que cette machine, nécessitant parfois une précision d'un dixième de millimètre, n'a pu être fabriquée à l'époque revendiquée. Ce qui ne l'empêche pas d'admirer ce mécanisme.

Au passage, comme souvent dans ces exercices critiques, le lecteur apprendra bien plus que des conclusions sur l'objet d'étude. C'est aussi l'occasion de se plonger ou de replonger dans des notions technico-scientifiques. Ici, l'astronomie et la passionnante histoire de l'horlogerie européenne. ■

DAVID LAROUSSERIE

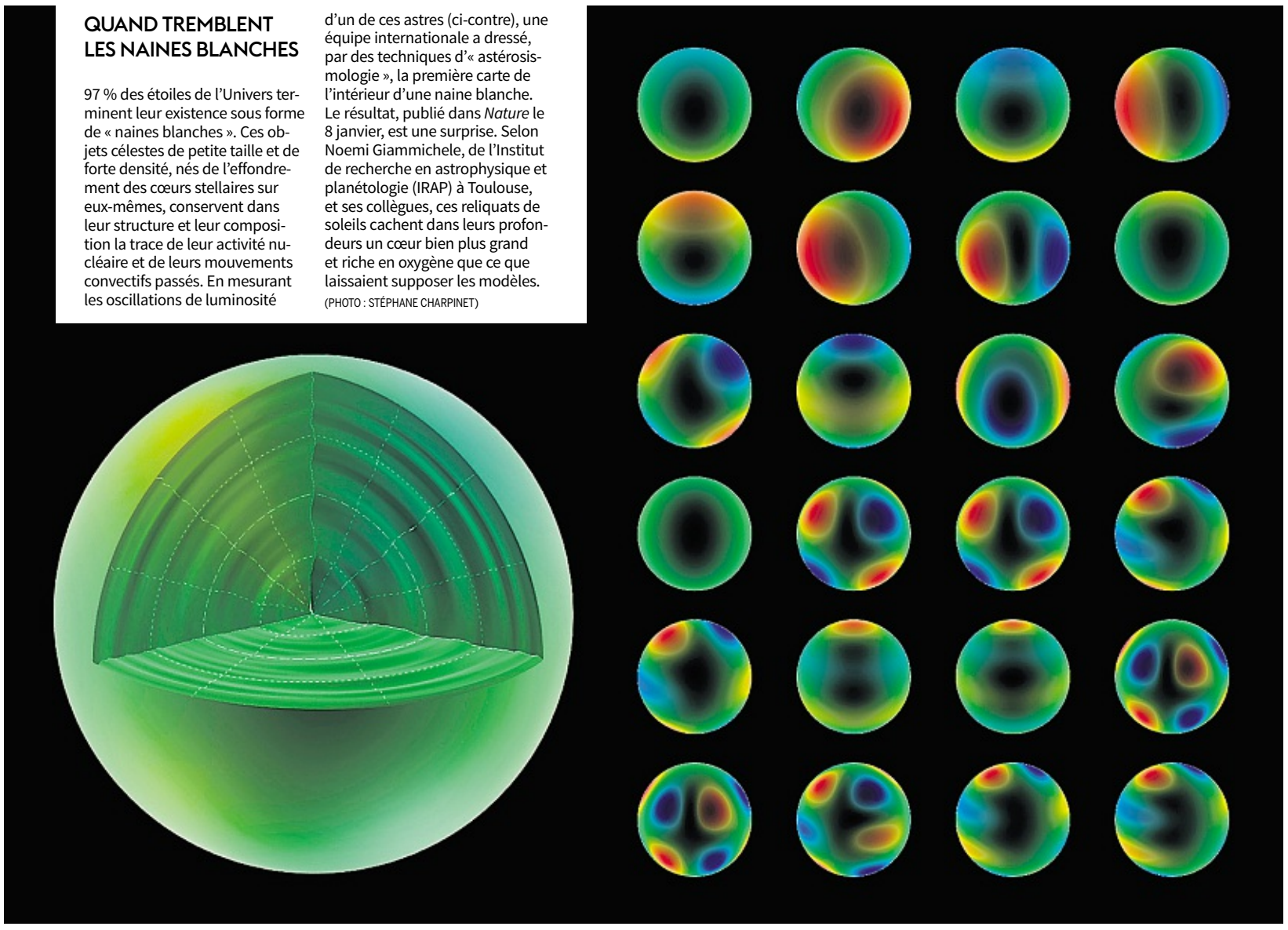
L'Ordinateur d'Archimède 1 et 2, de Frédéric Lequèvre (Book-e-book, 2 livres de 75 pages, 11 euros chacun)

L'AGENDA

JOURNÉES NATIONALES
Innovation en santé
Les Journées nationales de l'innovation en santé se tiendront du 26 au 28 janvier à la Cité des sciences et de l'industrie (Paris). Au programme, deux conférences, quatre villages thématiques (génome, cerveaux, corps réparé, santé et environnement) et une journée destinée aux scolaires et aux étudiants. Entrée libre et gratuite.
› *Renseignements : www.cite-sciences.fr*

QUAND TREMBLENT LES NAINES BLANCHES

97 % des étoiles de l'Univers terminent leur existence sous forme de « naines blanches ». Ces objets célestes de petite taille et de forte densité, nés de l'effondrement des cœurs stellaires sur eux-mêmes, conservent dans leur structure et leur composition la trace de leur activité nucléaire et de leurs mouvements convectifs passés. En mesurant les oscillations de luminosité d'un de ces astres (ci-contre), une équipe internationale a dressé, par des techniques d'« astérosismologie », la première carte de l'intérieur d'une naine blanche. Le résultat, publié dans *Nature* le 8 janvier, est une surprise. Selon Noemi Giammichele, de l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie (IRAP) à Toulouse, et ses collègues, ces reliquats de soleils cachent dans leurs profondeurs un cœur bien plus grand et riche en oxygène que ce que laissaient supposer les modèles.
(PHOTO : STÉPHANE CHARPINET)



DIX MILLE PAS ET PLUS

LE BONHEUR EST DANS LE PARC

Par SANDRINE CABUT

Petit sondage à l'usage des lecteurs citadins : à quelle distance est le parc le plus proche de votre domicile (ou de votre lieu de travail), et qu'y avez-vous fait la dernière fois que vos pas vous y ont porté ? Pour les employés du *Monde*, Montsouris est à 1,1 km, soit 1500 à 1800 pas. L'équipe des « runners » du journal y trottine au moins une fois par semaine. Ce poumon de 15,5 hectares du 14^{e} arrondissement de la capitale est aussi un lieu privilégié pour marcher, organiser des pique-niques, bouquiner au bord du lac pendant que les enfants profitent des aires de jeux. Ou pratiquer d'autres activités plus ou moins avouables. *« Le parc Montsouris c'est le domaine/où je promène mes anomalies/où j'me décrasse les antennes/des mesquineries de la vie »,* chanta Jacques Higelin. Mais qu'on s'y décrasse les antennes, les poumons ou les gambettes, les parcs et autres espaces verts urbains sont indiscutablement des vecteurs de santé mentale et physique, dont les effets sont de mieux en mieux établis par la science.

Même sans y mettre les pieds, un îlot de nature peut être bénéfique pour notre organisme, comme en témoignage une étude américaine publiée en 1984 dans la revue *Science*. Roger Ulrich a suivi la convalescence de 46 patients opérés de la vésicule biliaire, une moitié bénéficiant d'une chambre donnant sur des arbres, l'autre ayant vue sur un mur de brique. Devinez quel groupe a consommé moins d'antalgiques, et a quitté l'hôpital en moyenne un jour plus tôt ! Depuis, des centaines d'études ont exploré d'une façon ou d'une autre les liens entre espaces verts urbains – dont la définition est éminemment variable – et santé. Cette abondante littérature a été décortiquée dans un passionnant rapport du bureau européen de l'Organisation mondiale de la santé de novembre 2016, intitulé « Urban Green Spaces and Health ». On y découvre par exemple que des études menées en Australie, au Royaume-Uni ou encore en Suède ont retrouvé – avec un niveau de preuves variable – un impact positif des espaces verts sur la santé mentale : diminution des symptômes anxieux ou dépressifs, meilleur développement cognitif et amélioration des signes de trouble de déficit de l'attention et d'hyperactivité (TDAH) chez l'enfant.

Aller régulièrement dans un parc réduit par ailleurs les risques de diabète, de maladies cardiovasculaires, d'accouchement prématuré, la mortalité de différentes causes... Bref, les bénéfices sont potentiellement importants pour la santé publique, et pour les caisses d'assurance-maladie. En France, une hausse de 10 % des espaces verts autour des habitations pourrait permettre d'économiser chaque année 56 millions d'euros sur les traitements de l'asthme, et 38 millions sur ceux de l'hypertension artérielle, ont calculé des économistes du cabinet Asteres, en s'appuyant sur les données d'une étude néerlandaise. Ces estimations sont issues du rapport « Les espaces verts urbains : lieux de santé publique, vecteurs d'attractivité économique », rendu public en mai 2016.

Quoique encore imparfaitement compris, les bénéfices sanitaires des espaces verts relèvent d'au moins quatre mécanismes. Ces environnements permettent une moindre exposition à la pollution de l'air, aux bruits et à la chaleur des villes ; ils diminuent le stress ; ils facilitent la cohésion sociale et favorisent l'activité physique, thème obsessionnel de cette chronique. De plus, le *green exercise* serait encore plus profitable pour la santé qu'un exercice équivalent en pleine ville. Ainsi, les effets sur le cœur et les poumons d'une promenade de deux heures dans Hyde Park sont bien meilleurs que ceux d'une balade dans la très fréquentée Oxford Street, selon une étude chez des Britanniques de plus de 60 ans, en bonne santé ou atteints de bronchite chronique ou d'insuffisance coronarienne (*Lancet*, décembre 2017). Alors, pour vos 10 000 pas quotidiens, ou simplement pour faire une pause, poussez jusqu'au parc. ■

AFFAIRE DE LOGIQUE - N°1038

2018 façons de jouer avec 2018

Vous connaissez peut-être le défi de Takeshi Kitano : trouver une « *n*-solution » égale à un nombre (aujourd'hui 2018), avec *n* le plus petit possible. Il s'agit d'une expression de 2018 où interviennent des parenthèses et, successivement, dans l'ordre, les entiers de 1 à *n* séparés par un au moins des symboles opératoires +, –, ×, /, ^, ! (^ = puissance, ! = factorielle).
Pour 2018, il semble qu'on ne puisse pas faire mieux que *n* = 6 (voir des solutions, parfois émises par certains d'entre vous, sur www.tangente-mag.com en cliquant sur les vœux de bonne année 2018 de la page d'accueil).
Alors, nous avons cherché des variantes. Retrouvez des *n*-solutions égales à 2018 avec *n* le plus bas dans les cas suivants :

1. **En s'autorisant à changer l'ordre des nombres de 1 à *n*.**
2. **En s'autorisant à répéter le même nombre.**
3. **En s'autorisant d'autres symboles : √ (racine carrée), [(partie entière).**
4. **En s'autorisant la concaténation de certains des chiffres.**
5. **En remplaçant les entiers de 1 à *n* par les *n* premiers nombres premiers, avec ou sans les variantes ci-dessus.**

LE PLUS COURT CHEMIN LE 25 JANVIER À MONT-SAINT-AIGNAN (76)
Dans le cadre de l'Université de toutes les cultures, Thierry de La Rue donnera jeudi 25 à 18h une conférence grand public à la Maison de l'université de Mont-Saint-Aignan sur le thème « La recherche du plus court chemin ». Il partira de l'adage « le plus court chemin d'un point à un autre est la ligne droite ». L'interprétation de cette affirmation lorsque la ligne droite n'existe pas, comme sur une sphère, le conduira à envisager d'autres géométries, dans lesquelles les propriétés habituelles ne sont plus vraies. Il étendra l'étude à la circulation automobile : des surprises en perspective !
Informations sur www.culture.uni-rouen.fr

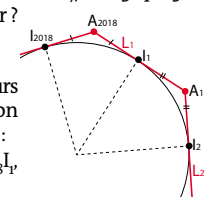
SYMÉTRIE ET ASYMÉTRIE DANS LES DEUX SAVOIES LES 30 JANVIER ET 1ER FÉVRIER
La conférence « Symétrie et asymétrie : les mathématiques des pavages et des kaléidoscopes » sera présentée, d'une part le mardi, 30 janvier à 18 h 30 à Archamps Technopole (bâtiment Salève), d'autre part, le 1er février à 18 h 30 à Albertville (le Dôme Cinéma). Pierre Hyvernat y fera découvrir à son auditoire l'élégance cachée qui se retrouve aussi bien dans la nature que dans les constructions humaines comme celles de l'artiste Escher : rosaces, frises, pavages réguliers ou apériodiques. Une belle leçon de géométrie, mais aussi de diverses théories : groupes, nombres, informatique, analyse de Fourier.
Info sur www.univ-smb.fr/agenda/page/2/

HISTOIRE DES MATHS À LYON LES 18 ET 29 JANVIER ET 8 FÉVRIER
Plusieurs conférences feront découvrir diverses approches des mathématiques et de leur histoire en ce début d'année à Lyon.
• Jeudi 18 janvier (18h, MMI), François Lê présentera les enjeux de la recherche actuelle en histoire des mathématiques.
• Lundi 29 janvier (19h, bibliothèque Marie Curie, INSA Lyon à Villeurbanne), Nathalie Vidal et Dominique Vogt parleront de l'invention géniale de Blaise Pascal, la première machine arithmétique, la « pascaline ».
• Jeudi 8 février (18h, MMI), « Peser pour intégrer ? Archimède et la parabole », une série d'*instantanés* d'Olivier Druet.
Informations sur www.mmi-lyon.fr

E. BUSSER, G. COHEN ET J.L. LEGRAND © POLE 2018 affairedelogique@poleditions.com
N'hésitez pas à nous envoyer vos solutions sur affairedelogique@poleditions.com. Bonne année 2018 !

Solution du problème 1037

• **1. Il existe un cercle circonscrit à la plaque. Une valeur approchée (par défaut) de son rayon est 3 242,25 m.**
Si un côté de longueur *i* a ses extrémités sur le cercle de rayon R, $i = 2R \sin(\alpha_i)$, où α_i est le demi-angle au centre relatif à ce côté. Ainsi, la plaque à 2018 côtés s'inscrira dans le cercle si et seulement si la somme des α_i, exprimés en radians, est égale à π. Le sinus étant croissant, chaque α_i est une fonction décroissante de R. On définit alors la fonction (décroissante) f de R par : $f(R) = \alpha_1 + \alpha_2 + \ldots + \alpha_{2018} - \pi$.
Cette fonction, continue, décroît d'une très grande valeur (quand R est proche de 0) à $-\pi$ quand R grandit. Elle s'annule donc pour une unique valeur de R. Une façon approchée de l'évaluer est d'assimiler $\sin(x)$ à x, ce qui est acceptable pour x très petit. La valeur cherchée de R sera alors, par défaut, proche de $(1 + 2 + 3 + \ldots + 2018)/2\pi \approx 324\,225$.
Qui peut faire mieux sans ordinateur ?



• **2. Il ne peut exister de cercle inscrit dans cette plaque.**
Si c'était le cas, en appelant les longueurs des côtés consécutifs $L_1, L_2, \ldots, L_{2018}$, on aurait, avec les notations de la figure :
$A_1I_1 = A_1I_2$, $A_2I_2 = A_2I_3 \ldots$, $A_{2018}I_{2018} = A_{2018}I_1$,
mais aussi :
$A_1I_1 + A_{2018}I_1 = L_1$, $A_1I_2 + A_2I_2 = L_2 \ldots$, $A_{2018}I_{2018} + A_{2017}I_{2018} = L_{2018}$.
En regroupant, il vient : $L_1 + L_3 + \ldots + L_{2017} = L_2 + L_4 + \ldots + L_{2018}$.
Or, la somme des nombres de 1 à 2018 est un nombre impair (1009×2019), et ne peut donc être séparée en deux sommes égales correspondant aux indices pairs et impairs.
L'an prochain ou dans deux ans, le polygone pourra avoir un cercle inscrit.

CARTE BLANCHE

La loi de Moore est-elle morte ?

Par LAURENT ALEXANDRE

Gordon Moore explique, le 19 avril 1965, dans la confidentielle revue *Electronics Magazine,* que la puissance informatique croît exponentiellement. Il énonce la loi qui va faire sa gloire : la puissance des circuits intégrés double, à coût constant, tous les dix-huit mois. La loi de Moore n'est pas une loi « physique », elle témoigne seulement que, à certaines périodes, la mobilisation des chercheurs et des industriels permet une croissance exponentielle du rendement industriel.

Il s'agit, en outre, d'une prophétie autoréalisatrice : l'association américaine des fabricants de circuits intégrés a convaincu ses adhérents que le fait de décrocher par rapport à la loi de Moore leur serait fatal. Moore explique : *« C'est avant tout une loi économique. La concurrence acharnée entre les acteurs du secteur a été un facteur décisif. C'est une caractéristique étrange de l'informatique : plus c'est compact, plus c'est efficace. Mais le plus étonnant, c'est que le coût des puces baisse au même rythme que leur puissance augmente. »*

En 1951, un transistor faisait 10 millimètres de large ; en 1971, 10 microns, soit le centième d'un millimètre. Fin 2017, les fabricants sortaient les premiers microprocesseurs gravés avec des transistors de 10 nanomètres ; dix mille fois plus fins qu'un cheveu. On dénombre désormais 10 milliards de transistors sur un seul microprocesseur et la puissance informatique a été multipliée par cent millions de milliards. Début janvier, les industriels ont présenté les nouvelles puces gravées en 7 nanomètres et annoncent, pour 2021, les premiers processeurs gravés en 2 et 3 nanomètres, soit 10 à 15 atomes de large : chaque usine coûterait 20 milliards de dollars. Un transistor expérimental gravé en 1 nanomètre a même été réalisé.

Fascination des transhumanistes

Début 2017, les nombreux spécialistes qui avaient annoncé la mort imminente de la loi de Moore se sont encore trompés. Cela fait sourire le président d'Intel qui a vécu quatre fois l'annonce de la mort de la loi de Moore. Cette dernière fait fantasmer les transhumanistes qui pensent qu'elle nous permettra de devenir un homme-dieu doté de pouvoirs quasi infinis grâce à l'incroyable progression de la puissance de calcul. Cette fascination des transhumanistes est quasi religieuse et la Silicon Valley souhaite empêcher la mort de la loi de Moore pour accélérer la mort de la mort : c'est particulièrement vrai pour les dirigeants de Google, comme Yuval Noah Harari le raconte dans *Homo Deus* (Albin Michel, 2016).

La loi de Moore se heurte désormais à des limites physiques – certaines caractéristiques des transistors comme la fréquence d'horloge stagnent. Leurs contournements mobilisent des dizaines de milliers de scientifiques. Mais les chercheurs optimistes tablent sur de nouvelles techniques de gravure des transistors et des nanotechnologies : nanotubes, ordinateurs à ADN et, à partir de 2050, ordinateurs quantiques… nous apporteraient une puissance de calcul toujours plus grande pour développer l'intelligence artificielle.

Gordon Moore s'étonne que ses prédictions soient encore valides : *« Il y a chez l'homme une inventivité incroyable qui permet d'éliminer des problèmes qu'on imagine insolubles pour toujours. J'ai vu tomber des dizaines de ces murs infranchissables. Alors je crois que tout est possible. Les puces actuelles utilisent des transistors qui sont déjà minuscules, de l'ordre des nanoparticules. La loi de Moore s'arrêtera peut-être quand les transistors atteindront la taille de l'atome. Ou peut-être pas… »* En 1965, Gordon Moore avait prédit la mort de sa loi pour 1975. Aujourd'hui il envisage qu'elle puisse être éternelle ! ■

Laurent Alexandre
Chirurgien urologue,
président de DNAVision
l.alexandre@dnavision.be
PHOTO : JEAN CHISCANO

Douleur chronique : le piège des opiacés

TRIBUNE - Le psychiatre et spécialiste de la douleur Daniel Annequin explique comment médecins et patients se sont retrouvés dans la spirale infernale des opiacés

Les Etats-Unis font face à une épidémie de décès par overdose aux opiacés d'une ampleur inégalée. La grande majorité est liée aux médicaments contre la douleur (opiacés, morphiniques naturels ou synthétiques…). Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette situation dramatique.

Il y a d'abord le marketing agressif des laboratoires pharmaceutiques qui en ont banalisé, minoré, caché les effets indésirables ; et leur lobbying massif vis-à-vis des professionnels de santé. Les politiques de lutte contre la douleur – « le droit de ne plus souffrir » – ont également favorisé l'escalade médicamenteuse vers les produits les plus puissants. La politique du « tout-médicament », particulièrement développée aux Etats-Unis, médicalise et privilégie les réponses médicamenteuses à des problématiques complexes : prescription d'antidépresseurs pour la tristesse ou la dépression, usage massif des amphétamines pour les enfants agités ou hyperactifs, large utilisation des produits antalgiques pour toute plainte douloureuse… La nature des produits, leur profil pharmacologique, leur rapidité d'action vont également faciliter les risques d'appétence et d'addiction.

Un facteur important qui permet de comprendre cette spirale infernale nous paraît avoir été jusqu'à présent négligé : la prescription d'opiacés pour la douleur chronique non cancéreuse. Dans les années 1950, les anesthésistes américains vont être les premiers à faire du soulagement de la douleur l'objectif principal de leur démarche. Grâce à leurs succès, en raison de l'utilisation décomplexée de la morphine pour des douleurs sévères, jusque-là très mal soulagées (cancer, fin de vie, traumatologie, chirurgie), des structures spécialisées dans la douleur vont apparaître. Mais cette efficacité sur la douleur aiguë va vite se heurter à d'autres douleurs particulièrement invalidantes et pour lesquelles tous les bilans s'avèrent négatifs : les lombalgies, les céphalées, la fibromyalgie…

Les appellations de ces douleurs chroniques non cancéreuses sont variées, elles reflètent essentiellement le très faible consensus médical : douleur sans support organique, douleur fonctionnelle, psychosomatique, trouble somatoforme, somatisation… Elles nécessitent une approche beaucoup plus large que la démarche biomédicale classique, qui se concentre essentiellement sur une approche somatique (recherche d'une anomalie biologique, d'une lésion tissulaire…) et médicamenteuse.

L'accès aux données psychosociales du patient est alors essentiel pour démêler, mobiliser et libérer ces nœuds où s'intriquent les composantes psychiques et corporelles. La place des psychothérapies, notamment les approches psychocorporelles (relaxation, méditation pleine conscience, hypnose…), y est majeure. Mais beaucoup de ces patients sont choqués par ces propositions et pensent : *« On ne me croit pas », « C'est moi le coupable »*. Leur demande est simple : *« Quand vous aurez traité efficacement ma douleur, mes problèmes de sommeil, de fatigue, de déprime seront résolus… »*

Les praticiens, démunis face à ces personnes porteuses d'une souffrance majeure personnelle, familiale

LA CONSOMMATION DES ANTALGIQUES PUISSANTS A AUGMENTÉ DE 74 % ENTRE 2004 ET 2015

ou professionnelle, vont alors prescrire des opiacés puissants. Alors que ces produits, dans ce type d'indication, sont le plus souvent inefficaces et mal tolérés, certains patients vont en ressentir un bénéfice.

En effet, les opiacés sont aussi des psychotropes puissants ; leur effet euphorisant, apaisant, peut ainsi parfaitement soulager certains douloureux chroniques en plein marasme psychosocial. La prescription d'opiacés possède une valeur sociale majeure pour beaucoup de ces patients confrontés à l'incrédulité de leur entourage et des professionnels (*« tous les bilans sont normaux »*) ; c'est une reconnaissance de la gravité de leur état.

Revers de la médaille, l'exposition continue aux opiacés occasionne des phénomènes de dépendance car, avec la diminution de la posologie, surviennent des signes de sevrage accompagnés de douleurs intenses. Le soulagement obtenu par l'augmentation de la dose signe pour le médecin et son patient le besoin et la nécessité de continuer ce type de produits ; la spirale infernale se met ainsi en place.

En France, les données sont encore imprécises. L'appétence des Français pour les opiacés faibles s'exprimait il y a sept ans par la consommation massive de Di-Antalvic (30 formes de génériques). L'arrêt récent de la vente de la codéine sans ordonnance, en juillet 2017, a mis au jour une consommation occulte et massive. La consommation des antalgiques puissants a augmenté de 74 % entre 2004 et 2015. L'estimation du nombre de patients avec une consommation problématique d'opiacés antalgiques est encore inconnue. Les collaborations entre professionnels de l'addiction et de la douleur n'ont débuté que très récemment. Pour beaucoup de ces professionnels, la prise de conscience de la réalité de ces phénomènes n'a pas toujours été simple et facile.

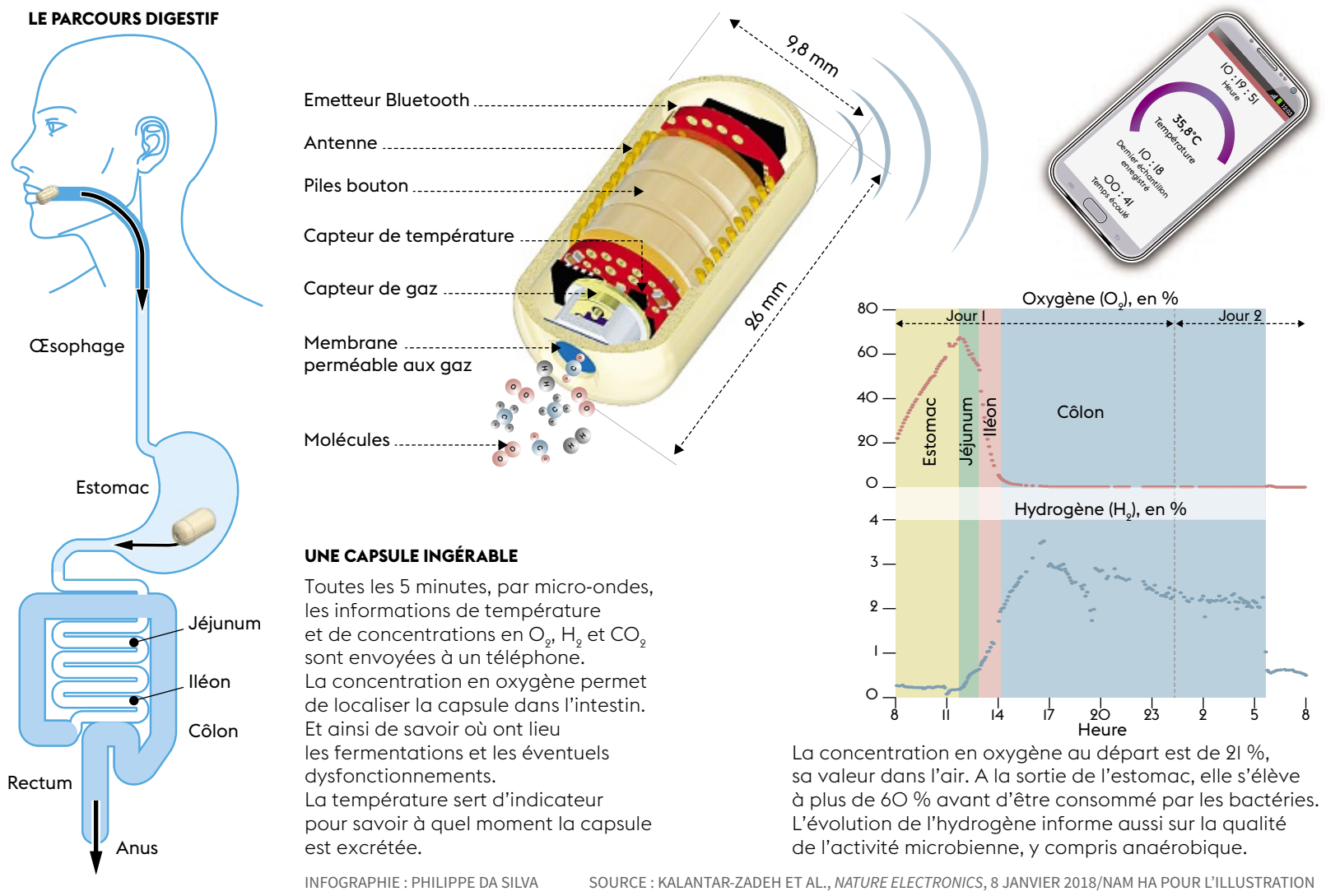
Aux Etats-Unis, la tendance actuelle à l'exclusion de ces produits (opiophobie) quel que soit le contexte d'utilisation risque de nous ramener trente ans en arrière, époque où les patients, et plus particulièrement les enfants, étaient exposés aux douleurs les plus sévères.

Deux types de messages doivent cohabiter. La morphine et les opiacés demeurent les produits de référence pour traiter les douleurs aiguës et intenses et le risque de mésusage y est exceptionnel. En revanche, un risque réel existe lors de l'utilisation prolongée de ces médicaments dans la douleur chronique non cancéreuse ; elle nécessite une prise en charge pluridisciplinaire, notamment psychologique. ■

¶
Professeur Daniel Annequin,
responsable du second Programme national de lutte contre la douleur 2002-2005, psychiatre, médecin de la douleur, anesthésiste, hôpital Trousseau (AP-HP, Paris).

Le supplément « Science & médecine » publie chaque semaine une tribune libre. Si vous souhaitez soumettre un texte, prière de l'adresser à sciences@lemonde.fr

UNE CAPSULE ÉLECTRONIQUE POUR SUIVRE LA DIGESTION



UNE CAPSULE INGÉRABLE

Toutes les 5 minutes, par micro-ondes, les informations de température et de concentrations en O_2, H_2 et CO_2 sont envoyées à un téléphone.
La concentration en oxygène permet de localiser la capsule dans l'intestin. Et ainsi de savoir où ont lieu les fermentations et les éventuels dysfonctionnements.
La température sert d'indicateur pour savoir à quel moment la capsule est excrétée.

La concentration en oxygène au départ est de 21 %, sa valeur dans l'air. A la sortie de l'estomac, elle s'élève à plus de 60 % avant d'être consommé par les bactéries. L'évolution de l'hydrogène informe aussi sur la qualité de l'activité microbienne, y compris anaérobique.

INFOGRAPHIE : PHILIPPE DA SILVA SOURCE : KALANTAR-ZADEH ET AL., *NATURE ELECTRONICS*, 8 JANVIER 2018/NAM HA POUR L'ILLUSTRATION

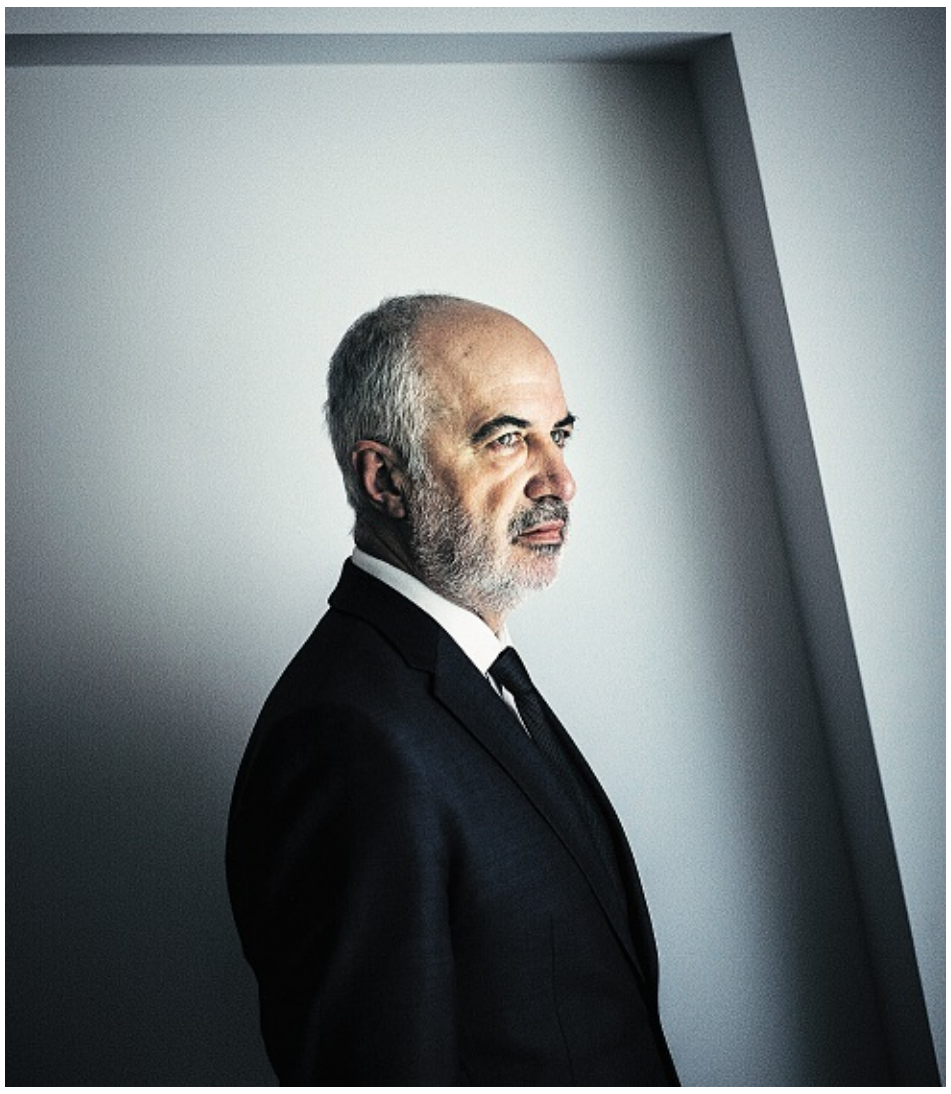
Pour diagnostiquer ou suivre l'évolution de maladies intestinales, des chercheurs australiens ont mis au point une pilule électronique ingérable, comme ils l'expliquent dans *Nature Electronics* du 8 janvier. Leur appareil mesure, au cours de la digestion, la concentration en différents gaz (O_2, H_2 et CO_2). Ces concentrations varient essentiellement à cause de l'activité bactériologique entre l'estomac et l'anus, permettant ainsi de suivre l'évolution d'une pathologie ou l'effet d'un régime plus ou moins riche en fibres. Plus de fibres augmente par exemple la production d'hydrogène. De même, un pic d'hydrogène est le signe d'une intolérance au lactose. Au bout de 24 à 48 heures, selon les personnes et les régimes suivis, la capsule ressort par les voies naturelles. Après des essais sur des cochons et quatre premiers volontaires, l'équipe cherche à recruter des patients. ■

DAVID AMIEL

« L'Inrap a transformé la France en grand site archéologique »

ENTRETIEN - Spécialiste de protohistoire, professeur d'archéologie, Dominique Garcia vient d'être reconduit à la tête de l'Institut national de recherches archéologiques préventives

Spécialiste de protohistoire, professeur d'archéologie, Dominique Garcia vient d'être reconduit, par un décret présidentiel du 27 décembre 2017, à la tête de l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap).



MARTIN COLOMBET/ HANSLUCAS POUR « LE MONDE »

L'Inrap est un institut de recherches encore jeune et pas toujours bien connu du public. Quelle est sa mission ?

L'Inrap est effectivement jeune puisqu'il a été créé en 2002, sous la double tutelle des ministère de la culture et de l'enseignement supérieur et de la recherche. Il a vu le jour à la suite de la loi de 2001 sur l'archéologie préventive, c'est-à-dire l'étude du patrimoine archéologique réalisée en préalable aux chantiers d'aménagement du territoire. Pour donner une idée, 700 km² sont aménagés chaque année en France. 8 % de cette superficie sont soumis à un diagnostic – une opération où l'on sonde le terrain pour voir si des sites archéologiques sont conservés, quel est leur intérêt pour la réflexion historique et scientifique. Au bout du compte, seulement 2 % des 700 km² font l'objet d'une fouille. Ces chiffres montrent que l'archéologie préventive n'est pas quelque chose de systématique, mais que nous intervenons, de manière raisonnée, uniquement sur les zones qui ont un potentiel scientifique.

La loi de 2001 est un changement de paradigme : auparavant, le patrimoine enfoui était sanctuarisé par une loi de 1941. Mais quand la France de l'après-guerre a agrandi ses villes, s'est équipée d'autoroutes et de TGV, a construit des grands parkings, etc., on s'est aperçu qu'on ne pouvait pas conserver dans le sous-sol tout le patrimoine qui s'y trouvait, qu'on ne pouvait pas fossiliser les sites archéologiques et qu'on détruisait en réalité beaucoup de sites si des opérations dites « de sauvetage » n'étaient pas organisées par des citoyens, des élus et des archéologues attentifs. On a donc préféré préserver le patrimoine en l'étudiant, en envoyant les archéologues avant les bulldozers.

Tous ces travaux ont un coût. Qui le finance ?

La partie « diagnostic » est une mission de service public puisqu'il existe une taxe, la redevance d'archéologie préventive, qui lui est consacrée, payée par l'aménageur, de 0,54 euro par mètre carré. Si l'Etat impose ensuite une fouille à l'aménageur, celui-ci lance un appel d'offres auquel peuvent répondre l'Inrap, les collectivités territoriales dotées de services archéologiques, ou des opérateurs privés agréés par le ministère de la culture. C'est l'aménageur qui choisit celui qui effectuera l'étude du site, sur des critères scientifiques ou de prix. Les tarifs de l'archéologie ont eu tendance à baisser ces dernières années sous l'effet de la concurrence et nous avons pour mission de faire remonter ces prix, même si cela m'agace de le dire ainsi : nous voulons simplement proposer aux aménageurs des budgets correspondant à un travail de qualité sur les sites.

Pendant ses première années, l'Inrap a dû beaucoup batailler, notamment contre certains responsables politiques locaux, pour montrer que l'archéologie préventive n'était pas un frein à l'aménagement du territoire. Où en est la situation aujourd'hui ?

Très sincèrement, je crois qu'aujourd'hui notre activité est acceptée. Par les citoyens d'abord : nous sommes frappés par l'intérêt pour l'archéologie dont les Français font preuve. Récemment, cela s'est manifesté par l'émotion qu'a suscitée la destruction de sites au Proche-Orient, par le succès de l'exposition « Quoi de neuf au Moyen Age ? » que nous avons coproduite avec la Cité des sciences, ou par la très bonne audience du documentaire sur le Mont-Saint-Michel que nous avons également coproduit et qui a été diffusé sur Arte le 23 décembre 2017. Cela se voit aussi sur le terrain. Nous avons fouillé récemment à Vitry-sur-Seine sur le futur emplacement d'une gare de métro, dans le cadre du Grand Paris, et les enfants, les écoles, sont venus voir la fouille.

Quid des aménageurs, qui ne vous ont pas toujours portés dans leur cœur ?

C'est vrai qu'avant 2001, à l'époque des opérations de sauvetage, ils voyaient l'archéologie comme une contrainte extrêmement forte, parce que cela bloquait des travaux déjà commencés, que ce blocage leur coûtait cher et que cela pouvait même, avec la loi de 1941, remettre en cause les projets. Aujourd'hui, comme la fouille est anticipée, prescrite dès que l'aménageur dépose un permis de construire ou de démolir, ces inconvénients n'existent plus. Il nous arrive même souvent de terminer nos opérations alors que l'aménageur n'a pas encore donné la date de début de ses travaux !

Un autre élément a joué en notre faveur. Les industriels des carrières nous ont par exemple longtemps eus dans le collimateur, mais, aujourd'hui, l'archéologie leur permet d'être mieux acceptés. Quand on découvre des traces de Neandertal sur le site d'une carrière en Normandie, le carrier ne passe plus pour quelqu'un qui détruit l'environnement et le paysage, mais pour quelqu'un qui participe à la connaissance… Les aménageurs se servent de nos travaux pour communiquer de manière positive sur leurs projets. Certains d'entre eux deviennent même mécènes des opérations de valorisation des découvertes archéologiques, tellement ils ont compris que c'était pour eux un atout.

Un des très grands aménagements des prochaines années sera le Grand Paris. Quels en sont les enjeux pour vous ?

Ce sera intéressant car les endroits qui vont être aménagés étaient inconnus sur le plan archéologique. Dans l'histoire de la région, Lutèce, c'est au fond très récent (Ier siècle av. J.-C.). Or, le phénomène qui conduit à la ville est lié à des questions économiques, environnementales et sociales, qui, à un moment donné, amènent les gens à se regrouper et à créer une agglomération. Or, si on connaît l'histoire de la ville depuis deux mille ans, on ne sait pas ce qui a provoqué sa création, l'impact qu'elle a eu sur le milieu.

L'aménagement du Grand Paris nous permet de documenter ce phénomène-là, du néolithique jusqu'à l'Antiquité. On peut donc profiter de ce moment où on reconstruit l'espace régional pour reconstituer son histoire antérieure. Pour reprendre l'exemple de Vitry-sur-Seine, on a retrouvé la voie antique, on a retrouvé le cimetière païen, on a vu les premières tombes chrétiennes : en fin de compte, on a un ensemble de données qui permettent de lire une histoire qu'on ne connaissait pas.

Comment, en quinze ans, l'archéologie préventive a-t-elle modifié la vision du passé de la France ?

Le grand changement, c'est que l'image que l'on se faisait de l'histoire ancienne de notre pays était liée à des sites abandonnés et « fossilisés ». Quand on travaillait dans le midi de la France, on allait traditionnellement fouiller sur le site de Glanum, à Saint-Rémy-de-Provence. Mais, par définition, c'était une ville qui avait mal fini, qui n'avait pas franchi le cap de la période antique. Il s'agissait donc en quelque sorte d'un mauvais exemple ! C'est comme si un chercheur n'analysait que des « manips » qui avaient raté. Bien entendu, ceux qui travaillaient à Glanum savaient que, dans les environs, Arles ou Aix étaient des villes qui avaient réussi, mais ils ne pouvaient pas les fouiller. Etudier ces sites fossilisés empêchait toute analyse diachronique. Quand on fait de l'archéologie préventive en centre-ville, on n'a pas ce problème, on a toute la chronologie.

Actuellement, il y a de belles fouilles en Bretagne, à Rennes, et on arrive à avoir une histoire de la ville de la période gauloise jusqu'à la période contemporaine. Cette profondeur historique nous permet de retrouver les vrais rythmes. Autre point intéressant : en intervenant un peu partout, l'Inrap a transformé la France en grand site archéologique. Certes, nos fouilles sont toujours ponctuelles, mais la lecture que nous faisons derrière est nationale. Notre chantier, c'est tout le territoire français, y compris les outremer. L'archéologie préventive a aussi permis de sortir des villes, de trouver les routes, les champs, les nécropoles, de bâtir une histoire économique, sociale et culturelle qui n'existait pas avant en tant que telle.

Vous avez codirigé, avec le démographe Hervé Le Bras, le livre « Archéologie des migrations » [La Découverte, 392 p., 24 euros]. Comment l'archéologie, qui est un regard sur le passé, peut-elle aider nos sociétés à traiter les questions d'aujourd'hui ?

L'archéologue voit certes les choses du passé. Néanmoins, il peut construire des modèles qui permettent aux citoyens de réfléchir à des situations actuelles, que ce soit l'impact de l'homme sur son milieu, le devenir de la ville, l'évolution des religions dans les sociétés ou les migrations. Dans ce dernier cas, les gens ont un peu oublié que, dans sa nature, l'homme est un migrant. L'archéologie permet de montrer que le peuplement de la France est ancien – sans être non plus le plus ancien de l'humanité –, mais qu'on a ensuite connu des vagues migratoires successives à partir desquelles se sont construites les cultures. Les peuples ne sont pas figés, ce ne sont pas des entités naturelles mais des constructions culturelles. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR PIERRE BARTHÉLÉMY

LA VIE DES LABOS

Au laboratoire, une femme n'est pas un homme

En 2014, une étude conduite à l'université McGill de Montréal et publiée dans *Nature Methods* avait fait sensation. Le psychologue Jeffrey Mogil y révélait l'importance du sexe de l'expérimentateur sur le comportement des rongeurs. Mesures à l'appui, il démontrait l'influence néfaste des hommes sur le comportement de rats de laboratoire. Leur seule présence provoquait sur les animaux un surcroît de stress équivalent à trois minutes de nage forcée. Des résultats qui n'ont pourtant pas bouleversé la vie des équipes de recherche. Sauf exception, elles ne se préoccupent guère de savoir si le manipulateur ne serait pas une manipulatrice.

L'article que la revue *Science Advances* a publié le 10 janvier aura-t-il d'avantage d'influence ? Une équipe de l'université d'Uppsala, en Suède, a voulu voir si le genre de l'expérimentateur ne pèserait pas de la même façon sur le comportement des cobayes humains. Tout est parti d'un souci de reproductibilité des expériences. *« J'avais conduit une étude sur le rôle de l'ocytocine dans l'obésité*, se souvient le neuroscientifique Colin Chapman, *et je ne retrouvais pas les résultats que plusieurs équipes avaient mis en évidence. J'ai soupçonné un biais lié au genre de l'expérimentateur. J'ai parcouru la littérature et, là, ce fut la surprise. Des scientifiques avaient déjà montré que le cerveau, le corps, aussi bien que le comportement s'en trouvaient affectés. Activation cérébrale, performances physiques, douleur, apprentissage, intelligence, créativité… La liste semble sans fin. »*

Prenons les deux derniers exemples. Une équipe américaine a montré que des enfants observés par une examinatrice réussissaient mieux aux tests de QI que lorsque ceux-ci étaient conduits par un homme. A l'inverse, une autre étude a établi que les jeunes obtenaient de meilleurs résultats à des épreuves de créativité proposées par un homme, un résultat particulièrement net chez les jeunes filles.

Effet booster

Ces deux études apportent de nombreux enseignements. D'abord, elles datent respectivement de 1977 et 1967. Autant dire que ces informations étaient disponibles depuis de nombreuses années. Elles témoignent ensuite de la complexité des phénomènes en jeu : un sexe ne réussit pas mieux que l'autre. Elles orientent enfin vers une quasi-constante : l'effet booster provoqué par le sexe opposé. *« Encore qu'aucune étude n'ait regardé si les sujets étaient homosexuels ou hétéro, ce qui raffinerait sans doute ce résultat »,* souligne Colin Chapman.

La présence du sexe opposé dope, en tout cas, de la même manière les résultats aux tests d'apprentissage, aux épreuves physiques ou encore aux évaluations de la douleur ressentie. Ainsi, les hommes relèvent systématiquement leur seuil de douleur devant une femme. Réalité de la souffrance ressentie ou souci de coller aux standards de la virilité qui, dès l'école, invitent les petits garçons à serrer les dents – « même pas mal ! » ? *« On n'en sait rien,* admet Colin Chapman. *Peut-être les deux. »* Ce que plusieurs études ont pu en revanche mesurer, c'est l'effet du genre sur la production de testostérone, qui pousse, par exemple, les jeunes skateboarders à prendre plus de risques devant des femmes. Pis : ces hormones seraient à leur tour absorbées par les examinatrices, ce qui pourrait modifier leur jugement.

« Psychologique ou véritablement biologique, cet effet devrait être pris en compte, notamment dans le développement de nouveaux médicaments », insiste Colin Chapman. Qu'il s'agisse de remèdes contre la douleur ou de traitements de l'inattention de l'enfant, on imagine les biais potentiels. *« Ça peut conduire à prescrire des médicaments inefficaces ou à abandonner des pistes prometteuses »,* insiste le neuroscientifique.

Avec ses collègues, il recommande donc une prise en compte du phénomène à tous les niveaux de la chaîne scientifique, du laboratoire à la revue, en passant par les agences de financement. Un vaste chantier : à l'Inserm, par exemple, on admet *« ne s'être jamais préoccupé de la question »*. ■

NATHANIEL HERZBERG