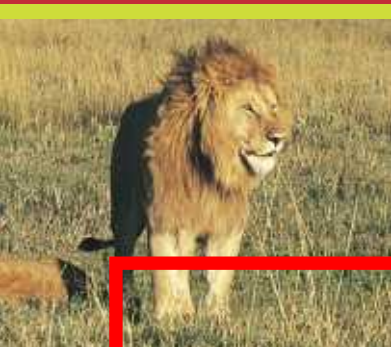


pourlascience.com

POUR LA SCIENCE

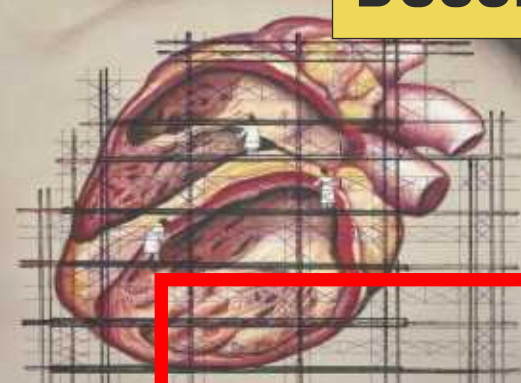
Juillet 2005

Édition française de Scientific American



La crière des lions.
un signe extérieur
de qualité

DOSSIER



La reconstruction
des tissus humains

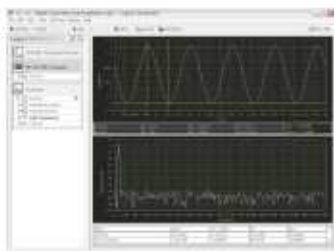
Mars les empreintes de l'eau

M 02 17 200 F: 5.05 €

FRANCE METRO : 5,95 €, DOM : 7,15 €, BEL : 7,10 €, CH : 11,2 FS,
CAN : 8,95 \$, LUX : 7,10 €, ESP : 7,90 €, PORT. CONT. : 6,90 €,
AND : 5,95 €, MAY : 8,95 €, REU : 8,95 €

NI LabVIEW : de la mesure interactive jusqu'à la conception graphique de systèmes complets

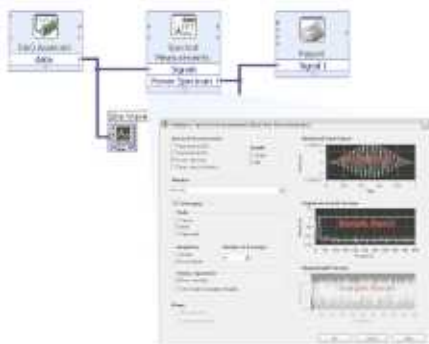
Disponible en version française



Explorez

La technologie Express mise en œuvre dans SignalExpress vous offre une interface d'exploration interactive, avec :

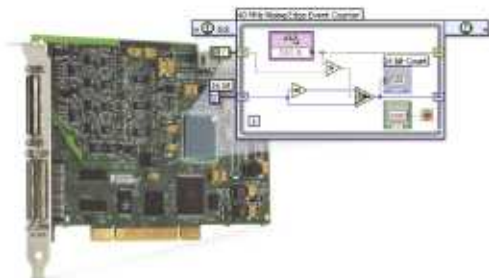
- Un développement de type "configuratif"
- Une intégration étroite entre les données d'E/S réelles et celles issues de la simulation
- La conversion automatique en code LabVIEW



Configurez

Les assistants de LabVIEW vous aident à automatiser rapidement, sans programmation, les tâches de mesure et d'analyse courantes, avec :

- Des matériels de mesure modulaires, du continu jusqu'à 2,7 GHz
- Des drivers plug-and-play pour plus de 4000 instruments
- Le support des matériels PXI, PCI, PCMCIA, USB, LAN, série, GPIB et CAN
- Plus de 450 fonctions mathématiques et de traitement du signal
- La création rapide, par glisser-déposer, d'interfaces utilisateurs personnalisées



Concevez

Véritable révolution, la programmation graphique de LabVIEW vous permet de répondre rapidement aux besoins les plus spécifiques de votre application, avec :

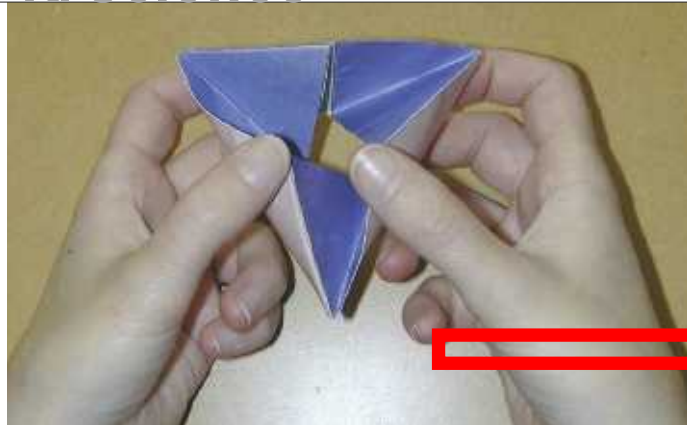
- Un langage complet et une exécution compilée
- Un développement intuitif basé sur le flux de données
- Plus de 500 exemples de programmes inclus, et des milliers sur le Web
- Un programme de certification et des cours de formation avancés
- Une connectivité ouverte avec .NET, ActiveX, XML, TCP/IP, Wireless, etc.
- La capacité à déployer votre code sur cibles temps réel, distribuées, embarquées et PDA.



Que vous ayez à effectuer rapidement des mesures interactives sur une paillasse de laboratoire ou à concevoir des systèmes sophistiqués de test automatique, l'environnement de développement graphique NI LabVIEW intègre tous les outils dont vous avez besoin. Avec plus de 18 ans d'innovation technologique et des milliers d'utilisateurs dans le monde, LabVIEW représente aujourd'hui une solution polyvalente et évolutive, capable de répondre à tous vos besoins de mesure et de contrôle, suivant la méthode de votre choix : exploration, configuration ou programmation.

Pour accéder à la visite guidée et à la version d'évaluation en ligne de LabVIEW, visitez ni.com/france/labview.

Tél. : 01 48 14 24 24



La manipulation magique des flexagones.

La boîte à outils...

... de Feynman

Dans une vision désincarnée du monde de la physique, les idées flotteraient d'un théoricien à l'autre, dépouillées des contingences matérielles qui pesent sur les expérimentateurs (aux yeux rivés à l'appareillage). La description est fautive : elle occulte le travail du théoricien qui est de calculer les conséquences de ses modèles, reliant l'univers des équations mathématiques à celui de l'univers de la physique (voir *Le monde de la physique*, page 44). Cette contrainte distingue les théories scientifiques, même les plus contraignantes, du sens commun, des spéculations.

Aussi, pour Feynman, la compréhension ne progresse-t-elle pas plus vite que l'aptitude à mener à bien des calculs et les diagrammes qu'il a inventés ont ouvert un nouvel horizon calculatoire englobant

bien d'autres domaines. Il a fallu un travail considérable et la lucidité de la pensée de Feynman pour extraire, du marasme où s'engloutissait la physique, l'extrême simplicité de l'évidence. Une notion n'est comprise que lorsque nous avons l'impression qu'elle nous a toujours été familière. La description des interactions sous forme de diagrammes apparaît aujourd'hui banale : c'est la marque éclatante de son succès. Cette vision géométrique de Feynman s'est exprimée, alors qu'il était encore étudiant, par l'étude d'une nouvelle catégorie d'objets, les flexagones (voir *Les flexagones*, page 88). Cette empathie pour des sujets qui paraissent si éloignés de la physique théorique rend Feynman éminemment sympathique. Certains prétendent aussi que son intérêt pour les flexagones a inspiré ses diagrammes quantiques...

Philippe BOULANGER

juillet 2005

POUR LA SCIENCE N° 333

Science à l'actualité

4 Science & gastronomie

La cuisine épaula la chimie

Hervé This

5 Biologie

Didier Notton

6 Science & économie

Métayage et fermage

Ivar Ekeland

Astronomie

28

Histoires d'eau sur Mars

Philip Christensen

Le premier des deux robots envoyés sur Mars en 2004 a trouvé un ancien désert, le second s'est posé sur une région jadis aquatique. L'eau liquide a été rare sur Mars, mais sa présence passée est aujourd'hui une certitude.



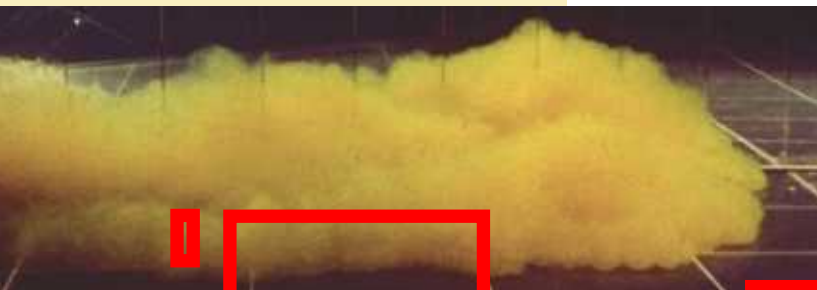
Océanographie

36

Des avalanches sous la mer

Bruno Savoye

Les avalanches sous-marines transportent plus de matière à la surface de la Terre que tout autre phénomène. Après des dizaines d'années d'observation, les géologues comprennent aujourd'hui leurs causes, leurs natures et leur pouvoir dévastateur.



7 Transitions de vie

Jean-Louis Hartenberger

8 Point de vue

Humble : sursis pour une star ?

Roger-Maurice Bonnet

10 Présence de l'histoire

Les intégrateurs mécaniques

Dominique Tournès

16 Perspectives scientifiques

L'Asie, berceau des anthropoïdes • Prélever de l'ADN sans nuire • La lèpre dans le monde au XXI^e siècle • Se défouler pour mieux se résigner • Leishmaniose : un espoir de vaccin • Marée verte dans le golfe • Du vent dans les éoliennes • Chiffres au vent • Quand l'Univers sursaute • Les nombres premiers se rapprochent • Les maîtres de la route du sel • Une salamandre géante • Inquiétants calculs pour Sumatra • Des planètes dans un jeu de quilles • Dans 0,0000000000000001 seconde, il sera midi • Le franchissement de la mer Rouge • Le palimpseste d'Archimède sous X •

27 Tribune des lecteurs

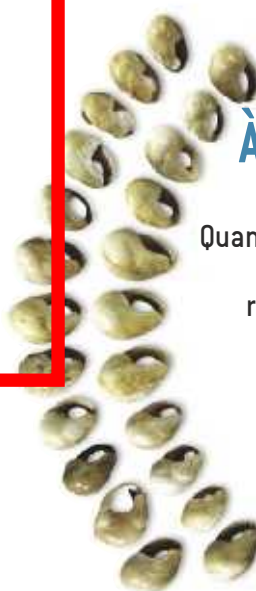
Physique

44

Un outil universel de la physique

David Kaiser

Les diagrammes inventés par Richard Feynman ont sorti l'électrodynamique quantique d'une impasse calculatoire. Ils ont bouleversé la pratique de la physique des particules et de bien d'autres domaines.



Paléontologie

50

À l'aube de la pensée symbolique

Kate Wong

Quand *Homo sapiens* est-il devenu moderne ? Au moment où il a acquis la capacité de penser symboliquement, répondent les préhistoriens. La découverte de petites coquilles percées suggère que cela remonterait à au moins 75 000 ans.

À quoi sert la crinière du lion

Peyton West

Le nœst ni une marque de royauté ni un bouclier pour le combat. De patientes observations et expériences de terrain montrent que la crinière du lion est plutôt un signal de qualité adressé aux femelles et aux rivaux.



Visions scientifiques

88 Logique et mathématiques
Flexagones
Jean-Paul Delahaye

94 Art & science
Escher et la double quête de l'infini
Alain Nicolas

96 Idées de physique
Fluvial ou torrentiel ?
Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik

100 Analyses de livres
Les matériaux sages (et leurs détracteurs), J. Dubessy,
G. Lecointre et M. Silberstein • *Sciences pour tous ?*,
Daniel Raichvarg • *À la rencontre des animaux disparus*,
Georges Dauvion • *Les eaux souterraines*, Jean-Jacques
Collin • *Histoire des sciences de l'Antiquité à nos jours*,
Philippe de La Cotardière • *Le grand roman des bactéries*,
Martine Casello et Vahé Zartarian •

www.pourlascience.com

Des compléments d'informations

Un moteur de recherche intégré

Un annuaire des sites web scientifiques

DOSSIER

La reconstruction des tissus humains

64 **Des cellules souches aux tissus de remplacement**

Lukas Sommer

Les enjeux de l'ingénierie tissulaire sont l'obtention du type de cellules souches souhaité ainsi que le contrôle du lieu d'implantation et de leur vitesse de multiplication.

70 **La peau reconstruite**

Corinne Ferraris

Les principes généraux de la peau sont aujourd'hui explorés sur des modèles élaborés qui contiennent les principaux types de cellules de la peau normale.

76 **La reconstruction des cœurs endommagés**

Smadar Cohen et Jonathan Leor

Aujourd'hui, les spécialistes de l'ingénierie tissulaire cardiaque parviennent à éviter la dégradation du cœur après un infarctus, chez le rat.

82 **La réparation de l'os et du cartilage**

Hervé Petite

Pour réparer les lésions osseuses qui ne se consolident pas spontanément, les biologistes recherchent comment stimuler la prolifération et la différenciation des cellules souches du patient.

La cuisine épaula la chimie

La mesure de l'acidité peut se faire à l'aide de produits alimentaires. Pourquoi ne pas en tirer parti dans les laboratoires ? La chimie sera vraiment de la cuisine.



Les lentilles cuites dans une eau dite « calcaire » ne s'amollissent que très difficilement, voire pas : les ions calcium présents dans ce type d'eau pontent les molécules de pectines qui sont dans les parois végétales, ce qui bloque l'amollissement. L'effet est facile à vérifier : prenons deux casseroles, l'une d'eau distillée, l'autre d'eau additionnée d'ions calcium, et chauffons : après une demi-heure de cuisson, les lentilles dans l'eau distillée sont en purée, tandis que l'autre casserole ne contient que de petites graines dures.

D'où l'intérêt du bicarbonate de sodium en cuisine : il fait précipiter du carbonate de calcium, ce qui permet aux lentilles de cuire en l'absence des délétères ions calcium, et, d'autre part, il contribue à charger électriquement les molécules de pectines, qui, se repoussant, contribuent à l'amollissement. Hélas, le bicarbonate est difficile à doser, et, en excès, il donne aux lentilles un détestable goût de cendre. Comment éviter la catastrophe ? En neutralisant la solution à l'aide d'un acide, qui peut être du vinaigre, du jus de citron, etc. La question culinaire devient alors : combien faut-il ajouter de vinaigre ?

La dégustation est insuffisante, car notre bouche nous indique l'acidité en bouche, et non l'acidité réelle, comme le montre l'expérience qui consiste à goûter d'abord du vinaigre (pH égale à 2-3 environ, pouah !), puis le même vinaigre additionné d'une grande quantité de sucre : le pH ne change pas, mais la solution perd son acidité en bouche.

Pour répondre à la question de la neutralisation, les chimistes, dans leurs laboratoires, utiliseraient des indicateurs colorés : phénolphthaléine, bleu de bromothymol... Toutefois, un premier rapprochement avec la cuisine est possible : les chimistes pourraient jouer de produits naturels qui ont des vertus indicatrices : par exemple, le thé vire du brun au jaune quand on ajoute du citron (et il redeviendrait brun si l'on ajoutait ensuite du bicarbonate). Les composés phénoliques des fruits rouges virent du rouge au vert (avec des framboises, l'effet est saisissant) quand on les alcalinise avec de la soude... mais, alors, attention à ne pas les consommer.

Et si l'on est daltonien ? On verrait quand même des rondelles de fruits ou de légumes poivrer quand elles sont coupées, parce que des enzymes libérées lors de la découpe modifient les molécules de polyphénols des tissus végétaux qui étaient séparées d'elles dans les cellules intactes.

Autrement dit, des molécules nouvelles peuvent apparaître, et servir d'indicateurs non colorés, mais visuels dans la mesure où le daltonien voit les nuances de gris.

Et si l'on ne voit pas, ou n'a pas le temps d'observer ? Pensons à l'olfaction. À l'Université de Caroline du Nord, Kerry Nepal, Maria Oliver-Hoyo, Connie Queen et Nicole Reed ont élaboré des systèmes analogues aux systèmes des polyphénols, mais odorants : existe-t-il des molécules modifiées chimiquement en molécules odorantes, les odeurs n'apparaissant que lors d'une modification du pH ?

Ces chimistes s'étaient fixé des conditions nécessaires : les produits odorants libérés lors d'une « titration acide-base » ne devaient pas être toxiques, ils devaient être précis, puissants et, si possible, d'odeur agréable. Les végétaux contiennent une foule de tels composés : les plantes du genre *Allium* (oignon, ail, échalote...), notamment, sont réputées. L'odeur de ces plantes n'apparaît que quand les tissus végétaux sont endommagés, condition pour que des enzymes libérées par l'endommagement des cellules transforment des précurseurs inodores en molécules odorantes.

Par exemple, l'alliine, molécule inodore de l'ail, est transformée par une enzyme nommée alliinase en une petite molécule nommée acide 2-propène sulfénique ; cette dernière subit une autocondensation qui engendre l'alliicine, précurseur odorant. Ce dernier se dissocie alors en plusieurs molécules soufrées, dont un disulfure qui est responsable de l'odeur d'ail. La réaction se fait en milieu neutre ou acide... mais pas en milieu basique. C'est gagné.

L'odeur d'ail nous inspire. 2. Utilisons l'oignon : les réactions sont analogues, mais alors l'acide 1-propène sulfénique instable conduit au précurseur odorant et à un composé lacrymogène, le S-oxyde de thiopropanal.

La mise en œuvre pratique de ces connaissances est simple : découpons l'oignon ou l'ail dans la solution basique, qui fera apparaître l'odeur d'apparaître. Puis ajoutons l'acide neutralisant au moment où l'odeur apparaît (on peut utiliser un petit ventilateur placé derrière la casserole), le cuisinier sait que la solution est neutralisée. Et puis, si les alliées nous le permettent, la gamme des molécules d'odeur sensible à l'acidité est vaste, puisque la vanilline de la vanille et l'eugénol du clou de girofle ont également des transitions perçues à des pH dans la gamme 6-8... mais nous devrions alors manger des lentilles à la vanille ou au clou de girofle !

La bande des cinq

Les principales limitations de vitesse pour les voitures, en France, sont 30, 50, 90, 110, 130 km/h. Parfois, on trouve 15 ou 45 km/h. En Angleterre, les principales limitations sont 48,27 km/h, 104,585 km/h et 112,63 km/h. On dira que ces nombres bizarres sont bien dignes de l'esprit bisorné des Anglais, et qu'il n'y a rien à ajouter. Si ! En fait, les Anglais clament en miles. Dans cette unité, les limitations ci-dessus deviennent, respectivement, 30, 65 et 70 miles par heure. C'est là que

Pas d'exception pour les photons!



la bizarrerie atteint un comble : toutes leurs limitations partagent avec celles des Français la propriété qu'on aurait pu croire radicalement étrangère au problème, d'être multiples de 5.

Un phénomène commun à deux peuples aussi différents que les Français et les Anglais est, à coup sûr, général à l'humanité. Il existe donc un rapport, qui tient de la nécessité universelle, entre la théorie des nombres et la sécurité routière : le fait qu'un nombre ne soit pas divisible par 5 le rend impropre à limiter la vitesse d'un véhicule.

Le supplice de la (bonne) question

Voici quelques années, l'expression « Bonne question ! » était à la mode. Elle était surtout employée par des « gens bien » – genre énarques, énarques – lorsqu'un auditeur, naïf ou complaisant, posait, à la fin de leur discours, une question qui, loin de les déstabiliser, leur donnait une belle occasion de développer un point auquel ils avaient réfléchi. De leur part, lancer « Bonne question ! » était une façon de dire : « Je sais. »

Depuis quelques années, l'expression « Bonne question ! » est à la mode. Elle est surtout employée par les jeunes, dans un cadre familial, lorsqu'on les désarçonne. On leur pose une question pertinente. Ils auraient dû y songer, mais ils conviennent que tel n'a pas été le cas et ils ne savent pas répondre. Brochant : « Bonne question ! » est une façon de dire : « Je ne sais pas. »

Comment diable, en si peu de temps, cette expression a-t-elle pu à ce point changer de signification ? Bonne question !



Confondante logique

Quelle erreur, de financer de coûteuses expéditions pour dépister d'éventuelles traces de vie sur Mars, alors qu'un simple dictionnaire suffit à démontrer que cette planète est habitée. Cherchons en effet le mot « marsien » dans le dictionnaire. Il n'y figure pas. Cherchons le mot « martien ». Il y figure. Maintenant, interprétons cette expérience. Puisque le mot « marsien » n'existe pas, c'est qu'il ne réfère à aucune réalité. À l'inverse, puisque le mot « martien » existe, il fait bien qu'il y ait une réalité à laquelle il réfère – réalité qui évidemment, ne peut rien être d'autre que les habitants de la planète Mars.

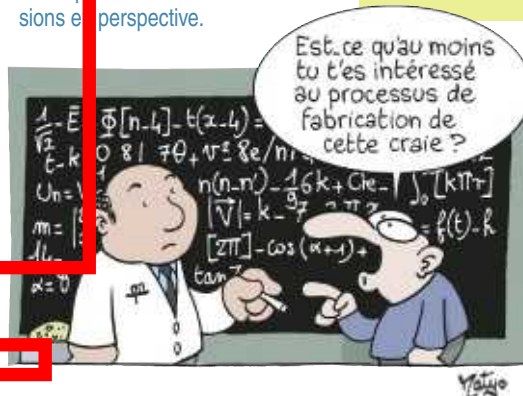
Hélas, comme il arrive souvent, répondre à une question en fait surgir une nouvelle, plus difficile. Nous savons désormais qu'il y a des gens sur Mars, mais nous ne savons pas d'où leur est venue la coutume bizarre de se faire appeler « martiens », alors que c'est l'orthographe « marsiens » qui serait naturelle.

Juste ingratitude

La société bénéficie des avancées dues aux sciences, mais n'a guère de curiosité à l'égard du travail des scientifiques. Ces derniers s'en plaignent. Qu'ils sont malvenus à le faire ! La société agit avec eux comme ils agissent entre eux. Ils voudraient qu'on les comprenne, et ils ne se donnent pas la peine de se comprendre les uns les autres ! En effet, ils sont spécialisés. Or une condition *sine qua non* pour que la spécialisation soit de bon rendement est que chacun ait confiance en ses collègues, ne perde pas de temps à aller vérifier comment ils procèdent.

La société, qui, comme les scientifiques, pratique la division du travail, adopte les objets que ceux-ci mettent au point et est indifférente à la façon dont ils s'y prennent. De

la part des scientifiques, le premier geste est pour inciter la société à manifester plus d'intérêt à ce qu'ils font, et de manifester eux-mêmes plus d'intérêt à ce que font les uns les autres. À cette fin, il leur faudrait renoncer à se spécialiser sans cesse plus. De délicates reconversions en perspective.

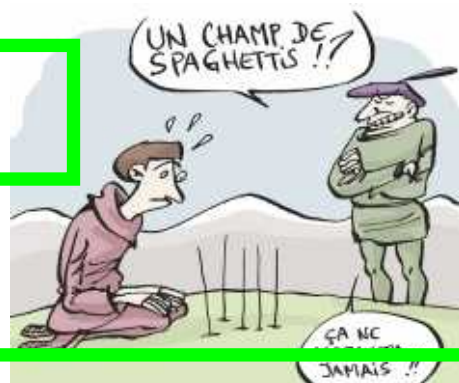


En toute rigueur

A priori, on pourrait croire que « ceci et cela » représente plus que « ceci ou cela ». Il n'en est rien. Exemple. Je fais mieux du vélo que Stephen Hawking et je connais plus de physique que Lance Armstrong. C'est beaucoup moins remarquable que si je faisais du vélo mieux qu'Armstrong ou de la physique mieux que Hawking !

Métayage et fermage

En Italie au XVI^e siècle, selon que vous étiez puissants ou misérables, vous aviez tendance à choisir le fermage de plantations céréalières ou le métayage des vignes.



Il était une fois une péninsule économiquement prospère, mais politiquement divisée. Pendant de nombreuses années, elle s'était déchirée en guerres intestines, mais un équilibre avait enfin été trouvé autour de quatre ou cinq nations de taille moyenne et d'une poussière d'états plus petits. Il s'en était suivi un demi-siècle de développement économique sans précédent, ses marchands, ses banquiers et ses artistes étaient présents aux quatre coins du monde, mais elle n'en avait pas profité pour construire une union politique. Le monde était alors dominé par deux superpuissances : elle devint le théâtre de leur conflit, et elle tomba entre les mains de l'une d'elles, perdit son indépendance et sa prospérité, et disparut de la scène internationale pour plusieurs siècles.

Non, il ne s'agit pas de l'Europe du XXI^e siècle, mais de l'Italie du XVI^e. À la mort de Laurent le Magnifique, en 1493, Florence est une république puissante, et le théâtre d'une renaissance politique, scientifique et culturelle dont Machiavel, Galilée et Michel-Ange sont les plus illustres représentants. Cinq ans après, Florence n'est plus qu'un duché d'opérette entre les mains des Médicis, dans une Italie dominée par Charles Quint. De sa grandeur passée, il reste le cadre artistique et les leçons de l'histoire, que les Européens d'aujourd'hui ne veulent visiblement pas tirer.

Heureusement, les économistes ont recherché les vieux parchemins pour mieux comprendre les comportements d'aujourd'hui. La théorie moderne des contrats repose sur deux concepts fondamentaux : le partage des risques, et l'asymétrie d'information. Prenons le cas des contrats agricoles, où un propriétaire citadin loue sa terre à un exploitant. Ils se rangent en deux catégories : le métayage et le fermage. Dans le cas du fermage, l'exploitant verse un loyer fixe au propriétaire, et garde toute la récolte. L'incitation au travail pour l'exploitant est alors maximale (il conserve tout le fruit de ses efforts), mais c'est lui qui porte tout le risque : en cas de mauvaise récolte, le revenu du propriétaire est assuré. Dans le cas du métayage, on partage la récolte. Ce faisant, on partage aussi le risque, mais on diminue d'autant l'incitation de l'exploitant à travailler. Il y a eu beaucoup de développements théoriques sur cette question, et on conçoit

que le contrat optimal pour le propriétaire dépende des caractéristiques de celui-ci, de l'exploitant, et finalement de la terre : le métayage est plus adapté aux cultures risquées.

Le cadastre florentin de 1427 répertorie 128 propriétaires, résidant à Florence, Pescia ou San Gimignano, et louant leurs terres à des exploitants habitant des villages voisins. Il y a 902 contrats, car un même propriétaire peut louer plusieurs terres et chaque contrat précise ce qui est cultivé (vignes, céréales, ou mixte), la fortune de l'exploitant, et s'il s'agit d'un fermage ou d'un métayage (dans ce cas, le partage usuel est moitié-moitié). Ces données ont été exploitées par D. Acemoglu et M. Botticini dans *Explorations in Economic History*. La distinction entre la vigne, qui est très sensible aux aléas climatiques, nécessitant des soins réguliers pour rester productive sur le long terme, et les céréales plus robustes, a des répercussions sur le type de contrat. En effet, sur 510 terres plantées en vigne ou mixtes, 28 seulement étaient affermées, alors qu'il y en avait 202 sur les 302 terres plantées en céréales. L'analyse statistique révèle une autre tendance : plus l'exploitant est riche, et donc en principe prêt à assumer le risque, plus il établit de contrats de fermage.

La théorie semble donc confirmée. Mais l'analyse statistique révèle une troisième corrélation : plus l'exploitant est riche, plus il a planté des céréales, la culture la moins risquée. On s'attendrait, au contraire, à ce que les pauvres, plus sensibles au risque, soient tentés par les exploitations céréalières. Que se passe-t-il ? Probablement un phénomène d'appariement : les exploitants ne choisissent pas leur exploitation au hasard, pas plus que les propriétaires ne la louent à n'importe qui. Les propriétaires de vignes préféreront les contrats de métayage qui garantissent mieux le long terme, et ce type de contrat attire davantage les pauvres, car il comporte une forme d'assurance. On a refait les calculs en tenant compte de ce biais, et cela modifie les résultats précédents. C'est bien le risque qui détermine la forme des contrats : la culture des céréales et la richesse de l'exploitant favorisent le fermage, mais le premier effet est moins important que le second.

Triste Toscane si proche et si lointaine. Les siècles passent et les hommes ne changent pas. Les paysans sont toujours aussi malins et les hommes politiques les toujours aussi limités.

Chronique de Jean-Louis Hartenberger

Plus les sociétés s'enrichissent, moins elles fabriquent d'enfants, et sans le flux migratoire des pays pauvres, nos riches démocraties se dépeupleraient. Ce constat interroque les anthropologues et démographes. Mais l'écologue darwinien explique tout : à mesure que les peuples s'enrichissent, leurs besoins en énergie extramétabolique s'accroissent au point qu'ils hésitent à investir dans une progéniture trop coûteuse. Revenons quelques centaines de milliers d'années en arrière, à l'état de singe ordinaire d'un poids moyen de 60 kilogrammes, vivant son aventure dans la forêt profonde. Les besoins métaboliques d'un tel animal, notre ancêtre, étaient alors assurés sur son territoire de quelques hectares par des fruits, racines et graines, à l'occasion un plat de viande dont un autre mammifère de son entourage, voire un congénère, faisait les frais. Au total, pour se sustenter et assurer la transmission de ses gènes dans de bonnes conditions, ses besoins quotidiens étaient de l'ordre de quelque 2500 calories pour développer une puissance de 120 watts. Avec l'apparition d'*Homo sapiens*, la Révolution néolithique, voici 10 000 ans, puis l'instauration des sociétés industrielles, les choses ont changé. Le même *Homo sapiens* dans le III^e millénaire use d'électricité, de pétrole, de bois, de charbon et autres ressources qu'il emprunte à la planète. Ainsi, à ses besoins métaboliques de base sont

venus s'ajouter ceux que l'on qualifie d'extramétaboliques, et qui lui permettent de produire et cuire sa nourriture, de se chauffer, de s'éclairer, de se déplacer, voire de guerroyer. Dans les pays les plus pauvres, les dépenses dans ce domaine ne dépassent pas quelques centaines de watts par individu, et jusqu'en 1850, il en était de même dans nos pays. Depuis cette époque, et en particulier dans les pays riches, elles n'ont cessé d'augmenter, en particulier au cours des 30 dernières années. En l'an 2000, les dépenses extramétaboliques de chaque citoyen américain sont d'environ 11 000 watts, plus de

Énergie et procréation

10 fois les besoins métaboliques. C'est au cours de la même période qu'est observée dans tous les pays dépensiers en énergie une forte diminution des naissances. Les parents, soucieux d'assurer à leur progéniture tout le confort possible, ont décidé de limiter le nombre de leurs enfants en fonction des difficultés d'acquisition des ressources énergétiques nécessaires. Il semble que ce soit aux dépens des pauvres que se maintiennent les économies occidentales, gourmandes d'énergie extramétabolique, et la courbe de croissance de la population mondiale n'est pas prête de s'arrêter de grimper. Les pauvres ne sont pas assez riches pour penser à la consommation de leur progéniture et se reproduisent : ils n'ont rien, donc n'ont pas peur de manquer.

Souris fais-moi peur

La découverte au Laos d'un rongeur jusqu'ici inconnu des zoologistes a fait la une du grand quotidien qu'est le *New York Times*. Cette intrusion en si bonne place et dans un des plus grands médias d'un représentant de l'ordre des mammifères que je préfère devrait me ravir : je lui ai consacré tant d'années ! Néanmoins la nouvelle gloire qu'il vient de gagner me laisse un goût amer. En première lecture, c'est pourtant une bien belle histoire : se promenant sur le marché d'un village laotien, une équipe de scientifiques anglais a repéré sur l'étal d'un marchand un petit mammifère proposé à la gourmandise locale qui leur a paru suffisamment étrange pour qu'ils en fassent l'acquisition et le regardent de près. Rapidement, ils ont acquis la conviction qu'il s'agissait d'un rongeur jusqu'ici passé inaperçu. Poursuivant l'enquête les années suivantes, ils ont réussi à piéger plusieurs spécimens afin d'étudier l'anatomie externe et interne de l'animal, et faire les prélèvements nécessaires pour des études de biologie moléculaire approfondie. L'étude a duré une dizaine d'années, et le quotidien new-yorkais fait écho de la parution aux Presses de l'université de Cambridge de l'article qui rend compte de ce travail, et signale la découverte du ci-devant *Laonastes aenigmamus*, littéralement énigmatique souris

habitant des rochers. Mais l'histoire ne s'arrête pas là : car au regard de l'étrangeté que lui reconnaissent les géniteurs de la nouvelle espèce, ils ont décidé qu'elle méritait que l'on écrive, pour l'abriter dans la systématique de l'ordre des Rongeurs, une nouvelle famille, qui vient s'ajouter à la cinquantaine de familles déjà reconnues. C'est là que le bât me blesse : cette famille n'est en rien nouvelle, car les paléontologues l'ont identifiée voici plus de 20 ans dans plusieurs genres de mammifères fossiles du Sud-Est asiatique. Et dans une bonne dizaine de travaux dans différentes revues, plusieurs auteurs ont longuement disserté à son sujet, y compris sur son étrangeté. Aussi, le fait même qu'aujourd'hui existe un représentant de cette famille dans la faune actuelle n'est qu'une demi-surprise : ce n'est pas la première fois que l'on signale qu'un groupe animal réputé disparu à jamais fait, après une longue absence, sa réapparition. Les paléontologues ont l'habitude de dénommer le phénomène « Effet Lazare » par une référence biblique d'un à-propos certain dont le coelacanth est le plus célèbre exemple.

Ce qui me choque dans l'article est que mes collègues, pour certains pensionnaires du célèbre *British Museum*, aient fait preuve d'autant de légèreté, au point de ne consulter ni la biblio-

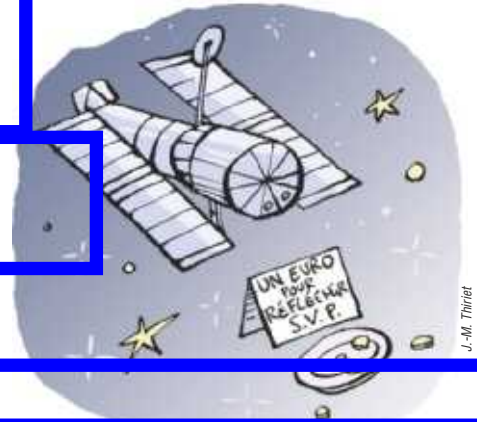


J.-M. Thinet

graphie sur le sujet, ni les collections existantes, ni des spécialistes des rongeurs. Ils donnent là un bel exemple des méfaits de l'insularité lorsqu'elle s'applique à la recherche scientifique. Alors, il ne reste plus à mes amis glirologistes, spécialistes de rats, souris et tant d'autres, qu'à tremper la plume dans le vinaigre pour commettre un rectificatif, qui ne pourra être qu'acérbe de ton, et le publier dans une revue de large diffusion. La tribune choisie est l'hebdomadaire *Nature*. Mais auront-ils gain de cause auprès des éditeurs et manoiront-ils les arcanes du comité de lecture de la célèbre revue londonienne ? J'attends avec impatience quelle réponse viendra des rives de la Tamise.

Hubble : sursis pour une star ?

En attendant la future génération d'instruments qui remplaceront le télescope spatial *Hubble*, espérons que la NASA reviendra sur sa décision de l'abandonner.



Le télescope spatial *Hubble* est le plus populaire de tous les instruments d'astronomie : plus d'un million d'internautes par mois admirent ses images. Il vit peut-être pourtant ses derniers mois. Lancée par la navette spatiale américaine le 24 avril 1990, cette mission américano-européenne vient de fêter ses 15 ans en orbite. Suite aux réorientations politiques et budgétaires survenues à la NASA, l'Agence américaine envisage de mettre un terme à la mission du télescope spatial. Si la maintenance n'est plus assurée, *Hubble* sera mis hors service en 2007, mais il peut être victime d'une panne à tout moment. La communauté scientifique internationale perdrait alors un instrument inestimable.

Au cours des années 1970, la NASA et l'Agence spatiale européenne (ESA) ont conclu une coopération pour construire un télescope spatial de 2,4 mètres de diamètre. L'ESA a été associée au développement du télescope (réalisation des panneaux solaires et du mécanisme de déploiement, développement de la caméra pour les objets peu lumineux), aux opérations de maintenance et à l'exploitation des données. Depuis le début des années 1980, une quinzaine de scientifiques européens participent ainsi à plein-temps aux activités scientifiques liées à *Hubble* à l'Institut du télescope spatial implanté à l'Université Johns Hopkins, à Baltimore.

Prévu pour rester 15 ans en orbite, *Hubble* a été maintenu en état et amélioré grâce aux visites régulières d'équipes d'astronautes américano-européennes. Au cours de quatre visites, les astronomes ont corrigé l'erreur de fabrication du miroir principal qui rendait le télescope quasi inutilisable, renouvelé certains équipements, notamment les panneaux solaires, et installé des instruments plus performants. Ces interventions spectaculaires ont non seulement presque décuplé les capacités du télescope spatial, mais lui ont assuré une jeunesse remarquable pour un objet de plus de 20 ans. Une cinquième mission, destinée à changer les gyroscopes et les batteries défectueuses et à ajouter de nouveaux instruments, était prévue en 2005.

L'accident de la navette *Columbia* a néanmoins stoppé ce programme et remis en question l'avenir du télescope spatial. Depuis ce drame, la NASA hésite à engager cette nouvelle mis-

sion. Le télescope risque donc de se trouver à l'abandon, ce qui suscite l'inquiétude de la communauté scientifique.

Ce n'est pourtant pas la première mission d'envergure à être mise hors service avant terme. Alors pourquoi tant d'émotion ? C'est que le succès scientifique de *Hubble* est considérable. De la naissance de l'Univers aux planètes du Système solaire, en passant par les galaxies primitives, les étoiles à différents stades d'évolution, les trous noirs et les supernovae, la moisson d'observations est impressionnante dans tous les domaines de l'astronomie. Le succès populaire n'est pas moindre : résultat d'une politique de communication efficace : pas moins d'une quarantaine de personnes distillent les clichés les plus spectaculaires de toute l'histoire de l'astronomie.

Pourquoi alors mettre un terme à l'un des plus grands succès de la recherche spatiale ? Même après 12 ans de bon fonctionnement, la capacité de découverte de *Hubble* n'est pas épuisée. Ne rien faire aujourd'hui revient à se priver à court terme d'une source d'observations unique et pour l'instant irremplaçable. Même si les grands télescopes terrestres ont été notablement améliorés, *Hubble* se trouve au-dessus de l'atmosphère, ce qui rend incomparables la qualité des images, les observations en lumière visible et ultraviolet et surtout les temps de pose (*Ultra Deep Field*, qui a révélé 10 000 nouvelles galaxies en 2004, en nécessitant cinq mois de pose). Qui plus est, le successeur d'*Hubble*, le *James Webb Space Telescope* (JWST), doté d'un miroir de 6,50 mètres de diamètre, ne sera lancé qu'en 2018.

La NASA a perdu le goût du risque

Il conviendrait donc de maintenir *Hubble* en service aussi longtemps que son successeur ne pourra prendre le relais, soit au minimum sept ans. Mais comment ?

Depuis l'accident de la navette *Columbia*, la NASA a perdu le goût du risque. L'ancien administrateur Sean O'Keefe avait même décidé de ne plus envoyer d'astronautes vers *Hubble*, et, suite à cette décision, les ingénieurs de l'Agence américaine se sont concentrés sur un système de réparation entièrement robotisé. Pourtant, Michael Griffin, qui a succédé à S. O'Keefe en avril 2005, semble ne pas faire siennes les conclusions de son prédécesseur et veut plus que jamais

solution pour maintenir *Hubble* en état de fonctionnement. Il est vrai que le développement d'un robot est au moins aussi onéreux qu'une mission humaine. De plus, un robot peut présenter de graves inconvénients, car contrairement à un astronaute, il ne peut engager une intervention imprévue. La communauté scientifique internationale s'inquiète, et l'Académie des sciences américaine vient de recommander l'arrêt de la mission robotisée, privilégiant une mission humaine.

La NASA ne se trouve-t-elle pas d'ailleurs en pleine contradiction, alors que le président américain lui impose de s'engager dans l'exploration humaine de la Lune et de Mars ? L'envoi d'astronautes à des mois de distance de la Terre semble bien plus dangereux qu'une mission vers *Hubble*, plus proche de nous que l'est Marseille de Paris. Et si l'on peut confier à des robots les réparations « chirurgicales » de *Hubble*, quelle logique sous-tend l'envoi d'hommes pour explorer l'espace ?

L'Europe, de son côté, a déjà largement profité de la mission. La contribution financière de l'ESA était fixée à 15 pour cent du coût initial de *Hubble*, en échange d'une proportion égale du temps d'observation attribuée à la communauté scientifique européenne. Le coût de *Hubble* a depuis largement dépassé les budgets initiaux, atteignant plus de six milliards de dollars. Pour autant, l'ESA n'a pas dépensé plus de 10 pour cent de cette somme tout en conservant ses 15 pour cent de temps d'observation, ce qui rend ses éventuelles revendications peu légitimes. Certes, maintenir *Hubble* en fonctionnement, que ce soit à l'aide de robots ou d'astronautes, a un prix. Malheureusement, afin de ne pas drainer les crédits qu'il veut attribuer à son initiative d'exploration, le président Bush n'a attribué à la NASA que 93 millions de dollars pour cette opération, qui coûterait au moins dix fois plus selon les estimations officielles. Il faudra donc faire des choix.

Pour le moment, la NASA privilégie la station spatiale internationale (ISS), un autre projet international d'envergure menacé par l'arrêt des vols de la navette spatiale, et *Hubble* est considéré comme moins prioritaire. Qui plus est, certains astronomes, qui ne bénéficient pas directement des résultats de *Hubble*, s'opposent à toute mission de réparation financée aux dépens d'autres missions. C'est en particulier le cas du projet d'observation en rayons X *Constellation-X*, alors que ce type d'observation est pourtant assuré par les satellites *XMM-Newton* de l'ESA, et *Chandra* de la NASA.

Maintenir *Hubble* en fonctionnement jusqu'à la mise en service du JWST me semble pourtant être une priorité. L'ESA possède des missions d'observations en rayons X (*XMM-Newton* et *XEUS*), gamma (*INTEGRAL*) et infrarouges (*Herschel*), qui peuvent combler les besoins des astronomes du monde entier dans ces domaines pour les cinq à six années à venir. Le sursis de *Hubble* devrait logiquement être décidé par l'ensemble de la communauté scientifique internationale et par les agences spatiales impliquées en fonction de ces possibilités d'observations. La NASA réorganisera-t-elle sa planification et trouvera-t-elle les économies nécessaires pour donner vie encore quelques années à la plus populaire de ses missions ? Procéder différemment laisserait une page sombre dans l'histoire plutôt brillante de l'agence américaine.

Roger-Maurice BONNET dirige l'Institut international des sciences spatiales, à Berne.

PRIX «GAGNA A. & Ch. VAN HECK» - 2006

PRIX «GAGNA A. & Ch. VAN HECK» - 2006

Domaine d'application :

Le Prix «Gagna A. & Ch. Van Heck» est destiné à récompenser un chercheur ou médecin dont les travaux auront contribué à la guérison d'un mal encore incurable à ce jour, ou d'une manière réelle et spectaculaire à la recherche d'une telle découverte.

Montant du Prix :
Le Prix s'élèvera à
75.000 euros

Candidatures :

Ce Prix triennal et international, décerné pour la deuxième fois en 2006, est réservé aux travaux présentés par un ou deux chercheurs.

Les candidatures doivent parvenir à la Secrétaire générale du Fonds National de la Recherche Scientifique, rue d'Egmont 5 à BE - 1000 Bruxelles (Belgique) **pour le 3 octobre 2005**. La personnalité qui introduit la candidature doit joindre à celle-ci un mémoire rédigé en anglais sur les mérites du (des) candidat(s).

Règlement :

Le règlement complet est à votre disposition au secrétariat du Fonds National de la Recherche Scientifique, rue d'Egmont 5 à BE - 1000 Bruxelles, Tél. : 32 (0)2.504.92.11, Tél. Prix : 32 (0)2.504.92.40, fax : 32 (0)2.504.92.92, e-mail : mairese@fnrs.be, site web : www.fnrs.be

Les intégrateurs mécaniques

Au XIX^e siècle, les ingénieurs effectuaient des calculs graphiquement à l'aide de remarquables instruments de précision – que les ordinateurs ont supplantés il y a 50 ans à peine.

En 1675, à Londres, le cartographe écossais John Ogilby publie un recueil de cartes routières d'une précision inédite. L'atlas d'une centaine de pages, intitulé *Britannia*, offre une représentation étonnamment

correcte des routes reliant les principales villes d'Angleterre et du pays de Galles. C'est le fruit de deux ans passés par le cartographe et ses nombreux assistants à arpenter les chemins anglais en mesurant les distances à l'aide d'une simple roue en bois cerclée de fer munie d'un compteur de tours. Ogilby n'était sans doute pas le premier à exploiter cette idée, sur laquelle reposent encore aujourd'hui les compteurs kilométriques des voitures. On raconte qu'en 1668, l'abbé Jean Picard avait évalué la distance entre Paris et Amiens en comptant les tours de roue d'une charrette.

Peu importe la paternité de la méthode : de la roue d'arpenteur est née une famille d'instruments de calcul des longueurs et des surfaces, puis de résolution d'équations différentielles. Ces instruments, nommés intégrateurs mécaniques, ont connu leur heure de gloire à la fin du XIX^e siècle, et leur usage en a perduré jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, avant que les ordinateurs ne les supplantent. Revenons-en l'histoire.

Mesurer la longueur d'une ligne droite est aisé : il suffit de reporter autant de fois que

nécessaire un mètre ou tout autre étalon de longueur sur la ligne. Un mètre ne peut cependant pas épouser parfaitement les sinuosités d'une ligne courbe. Pour mesurer la longueur de courbes sur le terrain, sur un plan ou sur une carte, les géomètres, les topographes ou les cartographes utilisaient dès le XVII^e siècle la roue d'arpenteur, ou curvimètre.

Ces système généralise l'observation évidente que lorsqu'on enroule un fil autour d'un cercle, sa longueur est égale à celle de l'arc de cercle correspondant. En suivant une courbe avec une roue constamment maintenue tangente à la courbe et sans glisser, on fait correspondre à tout instant les petits déplacements de la roue aux petits arcs de la courbe. L'angle de rotation total de la roue transcrit alors le cumul des longueurs des portions de la courbe. Le rayon de la roue n'intervenant que comme une constante multiplicative, le nombre de tours de roue effectués au terme du déplacement le long de la courbe donne sa longueur.

L'idée d'intégration se cache derrière cette méthode. Si l'on voit la courbe comme une suite d'arcs infiniment petits assimilables à de minuscules segments de droite, on obtient la longueur de la courbe en sommant les longueurs de ces segments infinitésimaux. Aux erreurs inhérentes à toute mesure physique près, la roue d'arpenteur est ainsi un instrument d'intégration exact, par comparaison avec une méthode approchée, telle celle qui

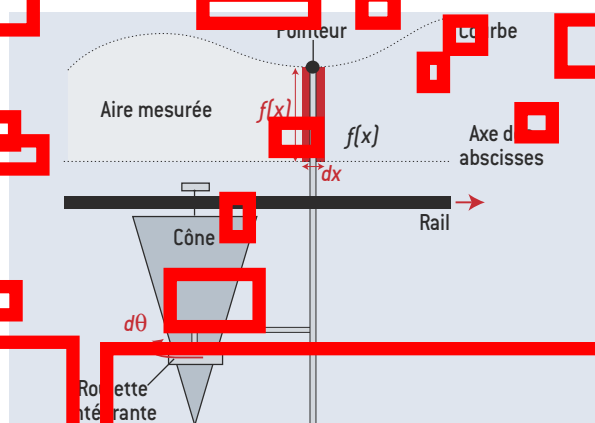
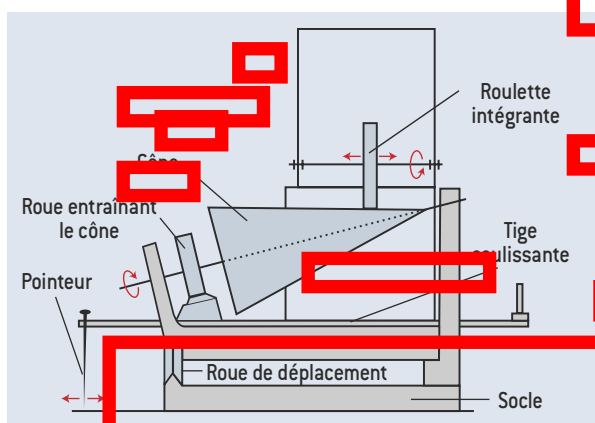
consiste à planter des clous le long d'une courbe et à mesurer la longueur d'un fil tendu entre eux.

Découper les talus en tranches

Les roues d'arpenteur ont fleuri au XVIII^e siècle en Angleterre, sous le nom de *waywiser*, puis aux États-Unis, mais elles ont tardé à se répandre sur le continent européen. La mesure des longueurs n'est cependant pas le seul problème qu'ont dû affronter les ingénieurs. Les partages entre héritiers ou les calculs de l'impôt foncier ont depuis toujours nécessité l'évaluation de la superficie de terrains de forme complexe.

C'est toutefois dans la première moitié du XIX^e siècle que le calcul des surfaces prend une importance cruciale. Les

1. La roue d'arpenteur (ci-dessus, un modèle londonien du XVIII^e siècle) a longtemps servi à mesurer des distances : le nombre de tours de roue était enregistré par le compteur.



2. Le planimètre à cône d'Hermann (en haut, un exemplaire construit par l'atelier Ernst à Paris vers 1840, de 60 centimètres de longueur) permet de déterminer graphiquement l'aire comprise sous une courbe. L'opérateur déplace le dispositif le long d'un rail selon l'axe des abscisses tout en suivant la courbe avec un pointeur. Ce pointeur est relié par une tige à une roulette qui appuie sur un cône. Le cône, entraîné par le déplacement du dispositif, tourne autour de son axe à vitesse constante (à gauche, vue en coupe). La roulette, solidaire du pointeur, se déplace le long du cône (flèches rouges) lorsque le pointeur monte ou descend

en suivant la courbe. Comme la vitesse de rotation à la surface du cône est plus rapide vers la base que vers le sommet, la vitesse de rotation de la roulette est ainsi d'autant plus grande que la hauteur $f(x)$ sous la courbe est grande (à droite, vue de dessus). La rotation instantanée de la roulette $d\theta$ est ainsi à tout instant proportionnelle à l'aire d'une bande infiniment mince sous la courbe $f(x) dx$. Son angle de rotation total θ au terme du déplacement du planimètre est ainsi proportionnel à l'aire A comprise sous la courbe entre l'abscisse de départ et celle d'arrivée ($\theta = k(A - A_0) = k \int_{x_0}^x f(x) dx$), la constante k étant fixée par les dimensions de l'appareil.

ingénieurs du génie civil rencontrent quotidiennement ce problème en raison du développement rapide des voies de communication en Europe – routes, voies ferrées, canaux. La construction d'une voie de circulation nécessite en particulier de déblayer la terre dans les zones où le niveau du sol est trop élevé et de la transporter là où le niveau est trop bas. Il convient d'évaluer au mieux ces déblais et remblais afin de minimiser les transports de matériaux, onéreux en termes de main-d'œuvre. Avant le commencement des travaux, à partir des relevés topographiques du terrain, les ingénieurs découpent sur le plan qu'ils ont dressé le sol en tranches verticales perpendiculaires au tracé de la voie, et évaluent graphiquement les surfaces concernées, et, de là, les volumes à déplacer.

Ce procédé entraîne le calcul fastidieux d'un grand nombre de surfaces, de sorte que les ingénieurs du XIX^e siècle sont très motivés pour améliorer et mécaniser les anciennes méthodes de calcul des aires. C'est à cette époque qu'apparaissent progressivement les planimètres, des instruments

qui permettent de mesurer de manière exacte l'aire d'une surface délimitée par une courbe fermée dessinée sur un plan ou un relevé topographique. Comme pour la roue d'arpenteur, le principe repose sur l'intégration. Pour mesurer l'aire comprise sous une courbe, on la découpe en minces bandes parallèles, que l'on assimile à des rectangles. L'aire cherchée est alors approchée par la somme des aires de ces rectangles élémentaires. En prenant, en théorie, des bandes de largeur infiniment petite et en faisant une sommation infinie, on obtient l'aire exacte.

En 1844, l'ingénieur bavarois Johann Martin Hermann, employé au Bureau du cadastre et des impôts de Munich, trouve le moyen de traduire mécaniquement cette sommation en adaptant le principe de la roue d'arpenteur. L'idée est de rendre la vitesse de rotation de la roulette proportionnelle à l'ordonnée de la courbe à chaque instant, de sorte qu'un déplacement infinitésimal du dispositif entraîne une rotation de la roue proportionnelle à l'aire de la bande

infinitésimale située sous la courbe. Au terme du déplacement de l'appareil, l'angle de rotation total de la roue est ainsi égal à la somme des aires des bandes infinitésimales, c'est-à-dire à l'aire sous la courbe. Pour ce faire, Hermann introduit une pièce conique intermédiaire entre la feuille et la roulette : un cône qui tourne à vitesse angulaire constante au contact du plan (voir la figure 2).

Les supérieurs d'Hermann ont accueilli d'un œil bienveillant l'idée de fabriquer un tel instrument, mais le projet n'a jamais abouti en raison des problèmes de santé de son concepteur. Après l'oubli de la trouvaille d'Hermann, le principe de la roulette intégrante tournant sur un cône a été redécouvert deux fois indépendamment, vers 1824 par le mathématicien italien Tito Gonella, professeur à Florence, puis en 1849, par l'ingénieur suisse Kaspar Wetli.

Au passage, Gonella et Wetli remarquent que l'angle au sommet du cône ne joue aucun rôle dans le processus de sommation continue, hormis celui d'une constante multiplicative, et que l'on peut en fixer arbitrairement la valeur. En prenant un angle limite de 180 degrés, Gonella et Wetli remplacent le cône par un disque, ce qui facilite notablement la réalisation de l'appareil (voir la figure 3). Le déplacement de la roulette d'une moitié du disque à l'autre, où le sens de rotation est inversé, permet en outre de comptabiliser les aires négativement, et ainsi de mesurer l'aire d'une figure fermée même si celle-ci coupe l'axe des abscisses.

Les planimètres à cône ou à disque sont des instruments onéreux et de fabrication complexe, aussi n'ont-ils rencontré qu'un succès relatif. Le nombre d'exemplaires produits depuis l'invention d'Hermann est estimé à environ 500 pièces. Vers le milieu du XIX^e siècle, quelques rares ateliers de mécanique de précision s'en portaient le marché, parmi lesquels Copikofer à Zurich, Ernst à Paris, Stark à Vienne et Ausfeld à Gotha, en Allemagne. Seuls quelques exemplaires de cette époque ont été conservés.

Les planimètres seraient sans doute restés des instruments coûteux, rares et méconnus sans la réflexion du mathématicien Jacob Amsler. Né en Suisse en 1823, ce fils de fermier étudie d'abord la théologie avant de s'orienter

vers les mathématiques et la physique, puis vers la fabrication d'instruments mathématiques de précision. L'année 1854 est particulièrement faste dans sa vie. Il conçoit les premiers plans et invente le planimètre polaire, qui connaît aussitôt un succès foudroyant.

Amsler, en cherchant à simplifier le planimètre à disque, va réaliser une série de transformations progressives. Il s'aperçoit qu'il est équivalent de permettre à la roulette d'être inclinée tout en restant tangente au bord du disque, plutôt que parallèle à l'axe des abscisses. Dans cette configuration, seul compte que la distance de la roulette au centre soit fixe, ce qu'une simple tige assure, et le disque devient inutile. Enfin, le déplacement du disque le long de l'axe des abscisses (un cercle de rayon infini) est équivalent, d'un point de vue théorique, à déplacer l'extrémité de cette tige sur un cercle de rayon fini. Pour réaliser ce mouvement circulaire, mécaniquement beaucoup plus simple que le mouvement rectiligne, Amsler articule le bras portant la roulette à un premier bras.

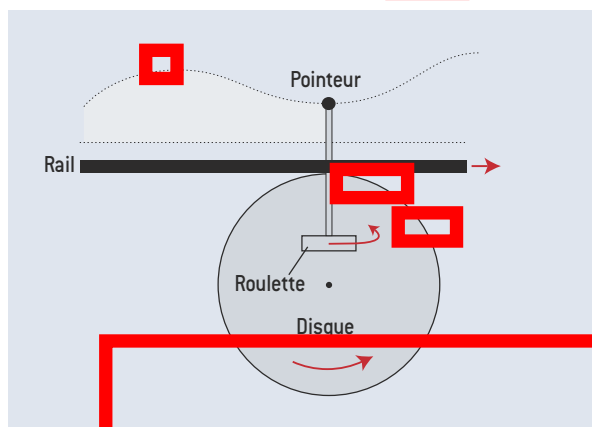
Une simplification progressive

Par ces modifications successives, Amsler réussit à s'affranchir du disque. La roulette intégrante, fixée perpendiculairement au second bras, tourne sur la feuille de papier. Ce bras se termine par un pointeur avec lequel on suit le bord de la surface que l'on veut mesurer (voir la figure 4). Pendant l'opération, seule la composante du mouvement perpendiculaire au second bras entraîne la roulette. L'angle de rotation total, lorsque le pointeur a parcouru tout le bord de la surface, donne l'aire cherchée.

Cet résultat s'explique en termes modernes par une application du théorème de Green, qui ramène le calcul d'une intégrale surfacique (sommation sur des éléments de surface infinitésimaux) au calcul d'une intégrale curviligne (sommation sur des arcs de courbe infinitésimaux). Cette justification – qui vaut aussi pour tous les planimètres reposant sur l'emploi d'une roulette intégrante – a été découverte *a posteriori* au début du XX^e siècle. Auparavant, les inventeurs expliquaient le fonctionnement de leurs instruments par des raisonnements longs et tortueux.

En supprimant la partie la plus complexe des planimètres antérieurs, Amsler aboutit à un instrument plus précis, léger et transportable sur le chantier (les instruments précédents étaient confinés aux bureaux d'études) et, surtout, dix fois moins cher que ses prédécesseurs. Très vite, les ingénieurs remarquent que le planimètre polaire, qui permet un calcul graphique rapide et pratique des déblais et des remblais, est aussi adapté à celui de nombreuses quantités cruciales en mécanique et s'expriment par des intégrales. Le planimètre d'Amsler reçoit de fait immédiatement la faveur de nombreux ingénieurs, notamment ceux des chemins de fer et de la construction navale.

Dès 1854, Amsler crée un atelier en Suisse pour produire en série son nouvel instrument. Jusqu'à sa mort, en 1912, en ont été fabriqués plus de 50 000 planimètres. Au cours de la seconde moitié du XIX^e siècle, deux autres maisons se lancent à leur tour dans la fabrication à grande échelle de planimètres : Ott à Kempen, des 1870



3. Remplacer le cône par un disque facilite la réalisation du planimètre. Le disque tourne à plat le long de l'axe des abscisses, tandis que la roulette, perpendiculaire à sa surface, est décalée le long du diamètre en fonction de la hauteur de la courbe. Selon que la roulette est au-dessus ou en dessous du centre, l'aire est comptabilisée positivement ou négativement.



4. Le planimètre polaire d'Amsler (ci-dessus, un exemplaire construit vers 1860) se compose d'un bras qui tourne autour d'un pôle fixe, articulé avec un second bras qui se termine par un pointeur et où une roulette intégrante est fixée perpendiculairement. Débarassé du cône ou du disque, il est plus précis, plus léger et moins coûteux que ses prédécesseurs. Près d'un million de planimètres polaires sont construits.

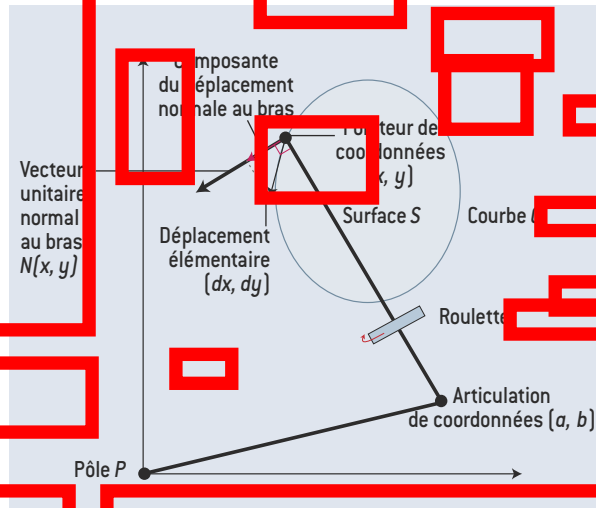
Son fonctionnement, à l'époque expliqué par des arguments empiriques, se justifie aujourd'hui de façon abstraite par le théorème de Green, qui relie l'intégrale sur une courbe fermée C à l'intégrale sur la surface S enclose par cette courbe. En supposant les deux bras de longueur égale à l'unité, notons (x, y) les coordonnées du pointeur, qui suit la courbe, et (a, b) celles de l'articulation (ci-contre). La roulette étant perpendiculaire au second bras, seule compte la composante du déplacement perpendiculaire à ce bras, égale à la projection du vecteur de déplacement infinitésimal du pointeur $[dx, dy]$ sur le vecteur unitaire normal au bras $N(x, y)$. Un calcul rapide donne $N(x, y) = (b - y, x - a)$. La projection s'exprime alors par le produit scalaire :

$$N(x, y) \cdot [dx, dy] = (b - y) dx + (x - a) dy$$

La formule de Green permet alors d'écrire l'égalité :

$$\int_C (b - y) dx + (x - a) dy = \iint_S \left(\frac{\partial}{\partial x} (x - a) - \frac{\partial}{\partial y} (b - y) \right) dx dy$$

Cette dernière intégrale, égale à $\iint_S dx dy$, exprime l'aire de la surface S .



et Coradi à Zurich, à partir de 1880. Le nombre total de planimètres polaires fabriqués depuis 1854 se situe entre 500 000 et 1 000 000, ce qui souligne l'importance technique et économique de cet instrument.

Son déclin n'a commencé qu'avec le développement des ordinateurs. Les ateliers de mécanique de précision d'Allemagne et de Suisse, qui avaient détenu pendant plus d'un siècle un quasi-monopole de la fabrication des intégrateurs mécaniques, se sont effondrés. Aujourd'hui, la production est principalement assurée par quatre fabricants japonais qui réalisent encore quelques planimètres à destination de l'industrie textile ou de l'imagerie médicale, où l'on peut se contenter d'évaluer rapidement la surface approximative d'une pièce de tissu ou d'une tumeur sur une radiographie.

Prédire les horaires de marées

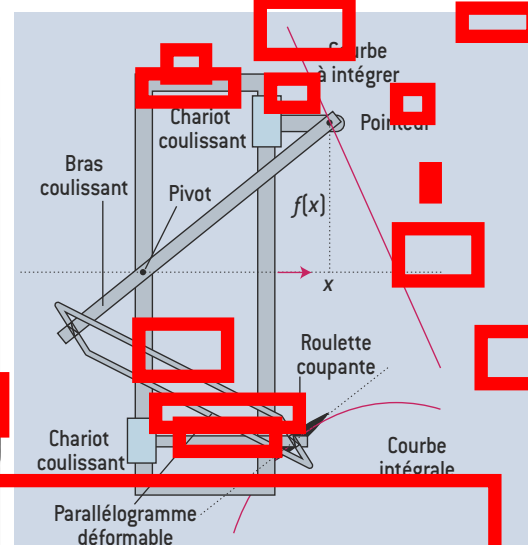
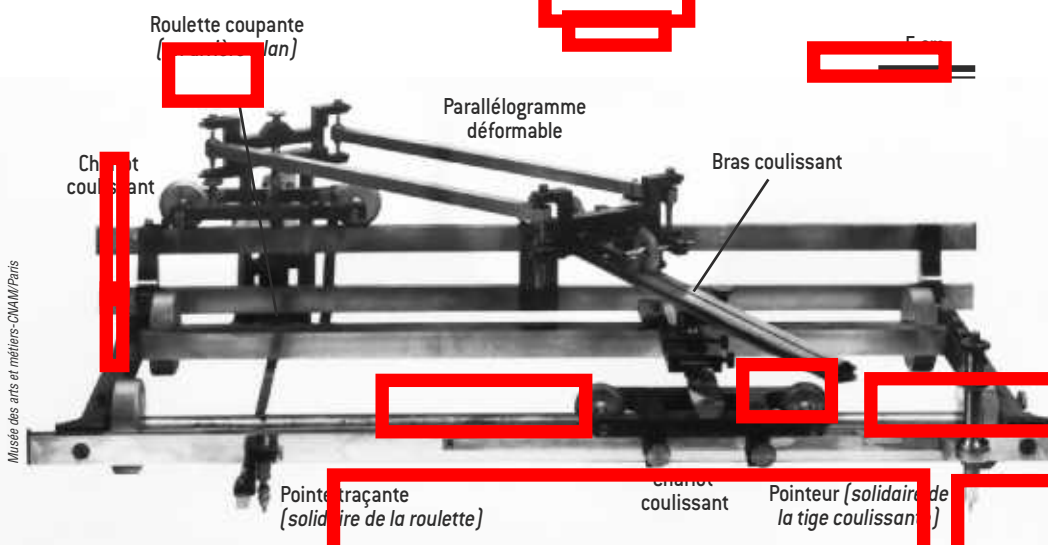
Parallèlement à l'essor des planimètres, se sont développés leurs proches cousins, les intégraphes. Alors qu'un planimètre fournit une valeur numérique, l'aire sous une courbe entre deux bornes, ou, de façon équivalente, l'intégrale d'une fonction f entre deux abscisses a et b , un intégraphes sert à déterminer graphiquement une primitive F d'une fonction f donnée, c'est-à-dire la fonction dont la valeur $F(x)$ en chaque point x est égale à l'intégrale de la fonction f entre deux bornes a et x (en d'autres termes, $F(x) = \int_a^x f(t) dt$).

Un intégraphes peut jouer le rôle d'un planimètre, car il donne simultanément les aires sous une courbe pour toutes les bornes, mais en déterminant les valeurs de l'intégrale pour chaque point, il ouvre surtout la voie à des intégrations successives.

De nombreux problèmes de génie civil se traduisent en effet par des intégrations répétées. Lorsqu'on étudie la résistance d'une poutre soumise à des charges, par exemple, intégrer la courbe de répartition des charges donne le fléchissement en chaque point, dont l'intégration donne à son tour le cisaillement. Un intégraphes permet de déduire sur le plan ces courbes l'une de l'autre de façon exacte, d'un mouvement simple et continu.

Branko Abdank-Abakanowicz réussit dans les années 1920 à mettre au point un tel intégraphes. Né en Pologne en 1852, ce mathématicien fait ses études aux Écoles polytechniques de Lvov, actuellement en Ukraine, et de Vienne, où il est élève du mathématicien Morawski Zmuzka, qui s'est lui aussi intéressé à l'intégration mécanique. Il s'exile à Paris à la suite de la partition de son pays entre la Russie, la Prusse et l'Autriche.

Le problème du calcul d'une primitive, inverse de celui de la dérivation, consiste à retrouver une courbe à partir de la seule connaissance de ses tangentes. Après plusieurs tentatives, Abdank-Abakanowicz abandonne le principe de la roulette intégrante, et réussit à traduire mécaniquement le calcul des primitives en réalisant un dispositif qui



5. L'intégraphe d'Abdank-Abakanowicz (à gauche un exemple issu de la Maison Coradi vers 1900) permet de tracer la primitive d'une fonction f représentée par une courbe (dans le schéma de droite, certains éléments ont été déplacés par rapport à l'objet réel par commodité). On déplace le cadre le long de l'axe des abscisses tout en suivant la courbe à intégrer. Le pointeur, qui est libre selon les ordonnées. Par construction, le bras portant le pointeur couisse de façon telle que sa pente est constamment égale

à l'ordonnée $f(x)$ de la fonction à intégrer. Il est assujéti à un parallélogramme déformable, dont le côté opposé porte une roulette de sorte que celle-ci et le bras restent parallèles. La roulette, taillée en biseau, pour mordre sur le papier et éviter tout dérapage, dessine une courbe dont la pente en chaque point est égale à l'ordonnée de la fonction initiale f . La courbe obtenue est la primitive F de f (c'est-à-dire que la dérivée de F est égale à f). La primitive est ensuite matérialisée par un dispositif d'engrè.

transforme de façon continue les ordonnées de la courbe initiale en pentes de tangentes à la courbe recherchée.

La pièce essentielle est un parallélogramme déformable. Sur l'un des côtés est fixée une tige reliée au pointeur avec lequel l'opérateur suit la courbe à intégrer et le côté opposé porte une roulette coupante, destinée à tracer la primitive recherchée (voir la figure 5). La roulette reste toujours parallèle au bras du pointeur lorsque le parallélogramme se déforme. Par construction, lorsque le pointeur monte ou descend en suivant la courbe, la pente de la tige et, par conséquent, la direction de la roulette, sont constamment égales à l'ordonnée de la courbe initiale. Les tangentes en tout point à la courbe tracée par la roulette sont ainsi égales aux valeurs de la fonction de départ ; il s'agit donc de la primitive recherchée.

Les intégraphes, assez coûteux et destinés à des applications spécialisées, n'ont jamais été produits en grande série. Dans le catalogue 1900 de la Maison Coradi de Zurich, un intégraphe coûtait 350 francs, soit six fois plus qu'un planimètre polaire. Seuls des laboratoires ou des bureaux de calcul importants pouvaient s'offrir un tel instrument.

L'histoire des intégrateurs mécaniques ne se limite pas aux appareils décrits précédemment. Sans parler des instruments spécifiquement fabriqués pour répondre à un besoin particulier, des appareils plus complexes ont été conçus en associant plusieurs planimètres ou intégraphes. Vers la fin du XIX^e siècle, en connectant plusieurs planimètres, William Thomson, alias Lord Kelvin, invente un « analyseur harmonique ». Cet instrument calcule simultanément les premières harmoniques d'une fonction périodique, c'est-à-dire les termes prépondérants dans la décomposition de la fonction en une série de fonctions périodiques élémentaires. Grâce à cet appareil, Kelvin analyse graphiquement les mouvements des marées à partir des mesures effectuées dans les ports. En recombinaison ensuite, grâce à un autre dispositif mécanique, les harmoniques trouvées, il détermine une fonction modélisant la marée et permettant d'en prédire les horaires.

De même, en généralisant le principe de l'intégraphe, on peut passer d'un calcul graphique de primitive à l'intégration d'équations différentielles plus complexes. En connectant mécaniquement plusieurs intégraphes entre eux, on parvient par exemple à intégrer des équations différentielles du second ordre ou d'ordre plus élevé, qui, par nature, nécessitent plusieurs intégrations simultanées. L'idée fut lancée pour la première fois par William Thomson en 1876 ; faute de moyens techniques nécessaires, il ne put la concrétiser. Il a fallu attendre 1901 pour qu'Aleksei Krylov, de l'École navale de Saint-Petersbourg, construise le premier « analyseur différentiel » fondé sur ce principe. Cet instrument n'a cependant pas été conservé et, de ce fait, est mal connu. C'est surtout à partir des années 1930 que de grands analyseurs différentiels ont été fabriqués, par exemple par Vannevar Bush, à l'Institut de technologie du Massachusetts, ou par Douglas Hartree, à l'Université de Manchester, pour résoudre les problèmes apparus avec le développement des réseaux d'électricité et de téléphone. Pendant la Seconde Guerre mondiale, les principaux pays belligérants ont utilisé de tels appareils pour établir des tables d'artillerie.

De tous les instruments d'intégration, seul le planimètre polaire a été véritablement répandu : c'était un outil dont les ingénieurs se servaient chaque jour, au même titre que la règle de calcul. Après la guerre, cependant, tous les intégrateurs mécaniques ont connu un déclin rapide et ont été éclipsés par les calculateurs et les calculatrices électroniques.

Dominique Tournès est maître de conférences à l'Institut universitaire de formation des maîtres (IUFM) de la Réunion et chercheur au Laboratoire de recherches épistémologiques et historiques sur les sciences exactes et les institutions scientifiques (UMR 7556 CNRS/Université Paris 7).

J. MARGUIN, *Histoire des instruments et machines à calculer*, Hermann, Paris, 1994.

Soyez les premiers à profiter de notre offre exceptionnelle d'abonnement

Pour la Science (12 n^{os}) + les Dossiers (4 n^{os})

1 an • 76 € seulement
au lieu de 102,50 €



POUR LA
SCIENCE

Retrouvez en plus l'intégralité de votre magazine
en ligne et téléchargez les articles de votre choix compris
dans votre abonnement sur www.pourlascience.fr

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner accompagné de votre règlement à :
Service abonnements • Pour la Science
8 rue Perdu - 75270 Paris Cedex 08

☐ Oui, je m'abonne à **Pour la Science** seul (12 n^{os}) pour un an.

56 € au lieu de 74,70 € (prix de vente au numéro). Participation aux frais de port : 12 €/an pour l'Europe (hors France) et 25 €/an pour les autres pays.

☐ Oui, je m'abonne à **Pour la Science** (12 n^{os}) + les **Dossiers** (4 n^{os}) pour un an.

76 € au lieu de 102,50 € (prix de vente au numéro). Participation aux frais de port : 12 €/an pour l'Europe (hors France) et 25 €/an pour les autres pays.

☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations de *Pour la Science*.

☐ J'accepte de recevoir par e-mail des informations des partenaires commerciaux de *Pour la Science*.

Mes coordonnées :

Nom, prénom : _____

Adresse : _____

Ville : _____

Code postal : _____ Pays : _____

Téléphone : _____

E-mail : _____

Date de naissance : _____

Je règle par :

☐ Chèque à l'ordre de *Pour la Science*

☐ Carte bancaire

Numéro de carte _____

Date d'expiration _____

Code de sécurité* _____

Signature _____



L'Asie, berceau des anthropoïdes

Un cortège d'espèces de singes anthropoïdes primitifs a été mis au jour récemment au Pakistan, dans des sites vieux de 30 millions d'années. Cette nouvelle découverte apporte les arguments décisifs en faveur de l'origine asiatique du groupe de primates dont nous sommes issus.

Les gisements de l'Oligocène (entre 38 et 23 millions d'années) du Fayoum en Égypte, puis ceux d'Oman, ont longtemps été les seules sources d'information qui documentaient les premiers temps de l'histoire de cette famille de singes promise à un si bel avenir. C'est pourquoi on considérait cette partie de l'Afrique comme le berceau du groupe.

Au cours de la dernière décennie, une succession de découvertes en Chine du Sud, en Birmanie et en Thaïlande a montré que le Sud-Est asiatique était déjà peuplé de singes primitifs à l'Éocène (entre 55 et 38 millions d'années), des faunes de primates primitifs très diversifiées qui, par conséquent, avaient vécu sous ces latitudes.

Cependant, il était jusqu'ici difficile de faire le lien entre ces formes très primitives de l'Éocène, la plupart de très petite taille, et celles plus récentes des gisements égyptiens. Or, jusqu'à présent, en Asie du Sud aucun gisement de l'Oligocène susceptible de révéler quelle avait été l'évolution locale de ces primates primitifs.

Les gisements oligocènes découverts au Pakistan dans la région des Bugti, lors des missions pakistano-françaises conduites en 2001 et 2002 par le Dr. Christophe Welcomme, de la mission paléontologique française au Pakistan, confirment cette localisation. Les genres et espèces mis au jour sont des groupes frères des singes supérieurs trouvés au Fayoum, en Égypte.

Les reconstitutions paléogéographiques indiquent que toutes ces régions, allant de l'extrême Sud-Est asiatique jusqu'à l'Afrique du Nord, se situaient sur les marges méridionales de la Téthys, une ancienne mer dont la dernière relique est la mer Méditerranée. Lors de la transition de l'Éocène à l'Oligocène, il s'est produit à l'échelle du globe une détérioration climatique qui a entraîné des modifications profondes des paysages végétaux partout dans le monde.

On constate que c'est lors de cette crise que s'est effectuée la diversification des anthropoïdes dans la région Sud de la Téthys, située sous les tropiques. Cette région a joué un rôle de zone refuge.

Jean-Louis Hartenberger

Sur la carte ont été localisés les sites où l'on a retrouvé des restes de primates de l'Éocène (*silhouettes en noir*) et de l'Oligocène (*en rouge*) sur les rives de la Téthys. On a également représenté quelques gisements récemment découverts au Pak-

Prélever de l'ADN sans nuire

Extraire de l'ADN d'exuvies, c'est-à-dire des dépouilles laissées par les larves d'insectes lorsqu'elles se métamorphosent en insectes adultes : c'est ce qu'ont fait Phill Watts, de l'Université de Liverpool, et ses collègues. Ils ont décrit trois techniques d'extraction qu'ils ont appliquées à des exuvies d'une petite libellule protégée en Grande-Bretagne, *Coenagrion mercuriale*.

Il ne s'agit pas tout à fait d'une première, puisque l'année dernière, des zoologistes américains avaient réussi à obtenir de l'ADN issu de débris d'un papillon et d'une abeille. Quel est l'intérêt de ce résultat ? L'analyse génétique fait partie des outils modernes utilisés par les taxonomistes ou par les écologues. En analysant l'ADN, on peut, par exemple, préciser la répartition géographique d'un organisme, caractériser des sous-populations et étudier leur répartition ou leur dissémination, etc. Or pour des espèces dont

les organismes sont de petite taille, comme les insectes, l'extraction d'ADN n'est pas anodine : elle exige, sinon de tuer, du moins de capturer l'animal pour y prélever assez de tissu (une patte par exemple) pour l'analyse avant de le relâcher. En dehors de l'aspect éthique et du dommage causé à l'animal, cette opération est problématique dans le cas des espèces protégées – les autorisations de capture étant difficiles, parfois impossibles, à obtenir –, d'espèces rares ou très menacées et difficiles à capturer. L'extraction d'ADN à partir d'exuvies – à condition qu'elles soient assez fraîches – offre une solution intéressante, puisque les dépouilles larvaires sont beaucoup plus faciles à trouver que leurs anciens propriétaires. Elles sont aussi plus nombreuses, plus faciles à trouver, ni obstacles législatifs.

Maurice Mashaal

Odonatologica, vol. 34(2), pp. 183-187, 2005



Cette libellule (*Anax imperator*) est passée de l'état de larve aquatique à celui d'insecte ailé adulte, et n'a pas encore ses couleurs définitives. L'enveloppe de la larve, ou exuvie, reste accrochée au support jusqu'à ce que les intempéries l'emportent et la détruisent.

La lèpre dans le monde au XXI^e siècle

La lèpre a fauché des vies humaines par milliers durant des siècles et sa seule évocation fait frissonner. D'où venait-elle ? On a longtemps cru qu'elle avait pour origine le sous-continent indien et qu'elle avait été introduite en Europe par les marchands de l'Inde. Une étude coordonnée par une équipe de l'Institut Pasteur et portant sur l'ADN de malades du monde entier révèle que la maladie serait en fait venue d'Afrique de l'Est.

Les textes anciens indiquent la présence de la lèpre en Chine, en Inde et en Égypte. Les descriptions de la maladie, comme celle de l'Égyptien Hérodote, décrivent la perte de sensibilité des doigts et des orteils, un des premiers signes des dommages causés par la bactérie. Au Moyen Âge, les lésions déformantes et les chairs rongées furent souvent rapportées.

En France, on dénombre encore 250 personnes traitées contre la lèpre et 25 nouveaux cas par an. C'est une maladie de la pauvreté et de la promiscuité : dès que le niveau de vie augmente, le nombre de malades diminue. Elle persiste dans les pays pauvres où l'on dénombre 500 000 nouveaux cas par an. La lèpre est une maladie chronique, non contagieuse, notamment parce qu'on ne sait pas la cultiver en laboratoire et qu'on ne dispose que d'un seul modèle animal (le tatou à neuf bandes). On ignore même comment elle se transmet d'une personne à l'autre.

La bactérie coupable attaque les nerfs. Le premier signe clinique est l'apparition sur la peau, de taches dépigmentées. Les extrémités (doigts, nez) sont touchées progressivement. De plus, elles sont insensibles, de sorte que les malades se blessent sans s'en rendre compte, et que les blessures secondaires qui sont responsables d'infections ou de gangrène.

L'agent de la lèpre a une caractéristique quasi unique : contrairement aux autres bactéries, son génome est extrêmement stable. C'est ce qu'ont

constaté les chercheurs de l'Institut Pasteur. Ils ont analysé le génome des bactéries collectées un peu partout dans le monde. Elle serait la plus stable des bactéries connues. L'équipe a en outre conclu qu'une seule souche a infecté le monde entier.

L'analyse génomique comparative a révélé trois mutations ponctuelles, permettant de définir quatre types de souches. Le type 1 domine en Asie, le type 2 en Éthiopie, le type 3 en Europe, en Afrique du Nord et en Amérique, et le type 4 en Afrique de l'Ouest et aux Caraïbes. Les Pasteurs ont constaté que la souche d'Afrique de l'Est est la plus répandue dans le monde. Elle est séparée par une mutation du type de l'Afrique de l'Ouest. Une autre mutation sépare le type d'Afrique de l'Est du type d'Asie.

Les biologistes proposent que la maladie serait issue de l'Afrique de l'Est, qu'elle aurait gagné l'Europe, puis, de là, serait revenue en Afrique de l'Ouest. Simultanément, la souche d'Afrique de l'Est aurait migré vers l'Asie. Les soldats d'Alexandre le Grand n'auraient pas rapporté la lèpre en Europe, mais les esclaves d'Afrique de l'Ouest auraient eu une importance notable sur la propagation de la maladie, qui s'est répandue au gré des migrations humaines.

La découverte de la stabilité du génome de cette bactérie suscite l'espoir d'un vaccin qui serait efficace sur l'ensemble des souches identifiées. Cependant, les tests de l'efficacité de ce vaccin sont difficiles à réaliser, car les malades de la lèpre sont souvent rejetés par la société, même s'ils sont guéris.

Françoise Pétry

Science, vol. 308, pp. 1040-1042, 13 mai 2005

Se défouler pour mieux se résigner



Jean-Michel Thiriet

Jouons au jeu de l'ultimatum. On m'accorde 100 euros que je dois vous proposer de partager. Par exemple, je vous donne 40 euros et j'en garde 60. Si cela vous convient, nous nous partageons la somme de cette façon. Si vous jugez ma proposition inacceptable, les 100 euros ne sont pas distribués et personne n'empoche le moindre euro. L'expérience montre que je n'ai pas intérêt à vous proposer moins de 20 euros, si je ne veux pas risquer de tout perdre.

Toutefois, une expérience réalisée par Erte Xiao et Daniel Houser, de l'Université de Fairfax, en Virginie, m'indique comment augmenter les chances de vous faire accepter une proposition inique. Il suffit de vous donner la possibilité, si vous le souhaitez, de manifester votre mécontentement avant d'accepter ou non la proposition. Comment les deux psychologues sont-ils parvenus à cette conclusion ? Ils ont recruté 296 étudiants pour jouer au jeu de l'ultimatum. Chaque étudiant d'un premier groupe faisait parvenir une proposition de partage par écrit à un étudiant d'un autre groupe. Ce dernier avait à sa disposition un bout de papier pour écrire la réponse à la proposition, soit deux, le second servant à envoyer un message à la personne ayant fait la proposition.

Les psychologues ont constaté que dans le cas où la proportion de partage est très inéquitable (moins de 20 euros sur 100), 60 pour cent des étudiants qui ne peuvent pas communiquer avec celui qui fait la proposition refusent le marché. En revanche, parmi le groupe des étudiants qui peuvent communiquer leurs états d'âme à leur partenaire, 88 pour cent acceptent la proposition inique. Dans le message transmis à celui qui a fait l'offre, ils manifestent leur mécontentement et leur désapprobation.

Dans la première version du jeu, l'attitude des joueurs qui refusent un partage trop injuste (même s'ils perdent tout) illustrerait un mécanisme évolutif qui permet la régulation sociale et un partage équitable des richesses : une proposition inacceptable pouvant se retourner contre celui qui la formule (il perd tout), il vaut mieux, dans l'intérêt de tous, jouer la carte de la coopération. Quant à la version modifiée du jeu introduite par Erte Xiao et Daniel Houser, elle permet la possibilité d'exprimer ses ressentiments allègrement, ce qui déclenche par une situation défavorable et aide à l'accepter.

Mathieu Grousseau

PNAS, vol. 102, pp. 6473-6477, 17 mai 2005

Leishmaniose : un espoir de vaccin

Une équipe française vient de tester avec succès un vaccin contre la leishmaniose viscérale chez le chien, maladie qui frappe aussi l'homme et qui est la plus grave des leishmanioses.

Chaque année, 500 000 personnes dans le monde, et une centaine en France, en sont atteintes ; elle se traduit par des poussées de fièvre, une anémie et un amaigrissement, et est fatale en l'absence de traitement. Les leishmanioses en général sont des maladies plutôt tropicales, difficiles à traiter et dues aux protozoaires du genre *Leishmania*, transmis par piqûres de petits moucheron, les phlébotomes.

La leishmaniose viscérale, due à *Leishmania infantum*, atteint l'homme et les canidés (chiens, renards, loups, etc.). Dans le Sud de la France, 1 à 30 pour cent des chiens sont contaminés. Au-delà de l'aspect vétérinaire, la population canine constitue un réservoir important de la maladie : le phlébotome ayant piqué un chien contaminé peut, par une piqûre ultérieure, transmettre le parasite à l'homme.

D'où l'intérêt du vaccin testé par Jean-Loup Lemesre et ses collègues de l'Institut de recherche pour le développement (IRD), à Montpellier, en collaboration avec l'entreprise pharmaceutique Bio Veto (France) et la clinique vétérinaire du

par Gérard Papierok, et la clinique vétérinaire du Rocher, à La Garde. L'élimination des *Leishmania infantum* chez les chiens réduirait l'incidence

de la leishmaniose viscérale chez l'homme. Le vaccin expérimental a été élaboré à base de protéines excrétées par le parasite. Dans un premier essai portant sur 18 chiens, 12 ont été vaccinés avec des doses différentes de vaccin, puis tous les chiens ont été inoculés avec le parasite et suivis pendant deux ans. Une protection totale et durable a été obtenue chez les neuf chiens vaccinés avec une dose supérieure à 100 microgrammes de protéines parasitaires. Selon Jean-Loup Lemesre, un essai à plus grande échelle en cours de publication, a porté sur 414 chiens du Sud de la France, en conditions naturelles de l'étude, qui s'est déroulée sur trois ans, dont deux saisons de transmission, montre que le vaccin est efficace à 90 pour cent. Celui-ci est non seulement préventif, mais aussi curatif : dans un essai portant sur 20 chiens atteints de leishmaniose viscérale à un stade très avancé, 90 pour cent d'entre eux ont été guéris après deux injections.

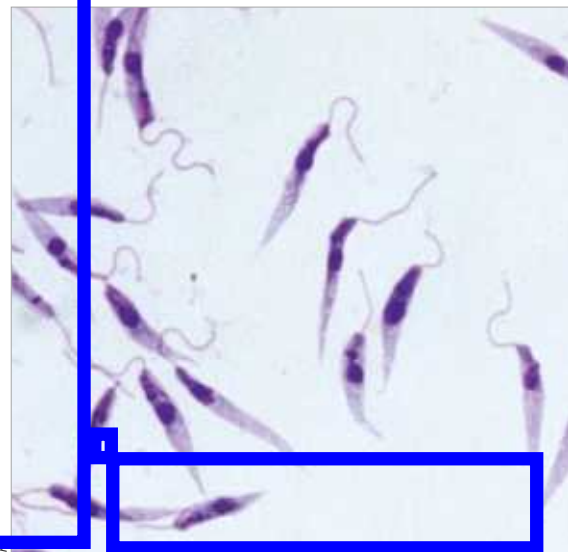
Tous ces résultats sont encourageants, sans compter que l'étude a permis de mieux comprendre le système immunitaire du chien, peu connu, et de montrer que, pour se débarrasser du parasite qui les infecte, les macrophages

(NO). Ils ouvrent non seulement des perspectives de prévention et de traitement de la leishmaniose viscérale chez le chien, mais aussi des

pistes pour lutter contre cette maladie chez l'homme. Un projet de recherche en ce sens, impliquant des chercheurs de l'IRD, de Bio Veto, et d'être mis sur pied en Inde, où la leishmaniose viscérale fait 50 000 victimes chaque année.

M. M.

Vaccine, vol. 23, pp. 2825-2840, 2005



Parasites *Leishmania infantum*, en culture, sous forme de promastigotes, tels qu'ils se présentent chez l'insecte vecteur.

La première autoroute ?

Le Nord de la Basse-Saxe de l'Allemagne actuelle était à l'origine couvert de tourbières franchissables. Pourtant, quelque 3 000 ans avant notre ère, des hommes ont commencé à les rendre inhospitalières. Ils se déplaçaient sur des chaussées de bois : les *Moorwege*. Dans la région du Grosses Moor (grand marais), un tronçon de voie en bon état a été retrouvé : sur un soubassement de trois à cinq troncs de pins ou d'aulnes repose un lit de planches posées sur la surface extérieure de la chaussée. La forme des extrémités de ces pieux montre qu'ils ont été coupés avec des haches de pierre. Environ 50 hectares de bois ont été nécessaires. Deux essieux cassés ont été retrouvés sur la chaussée. Ainsi, quelque 3 000 ans avant notre ère, on traversait déjà la Basse-Saxe en « voiture »...

F. S.



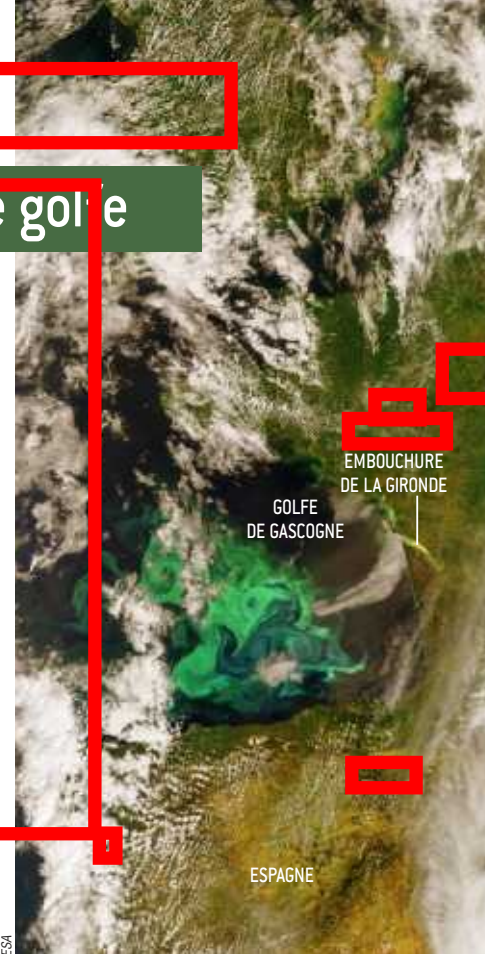
Marée verte dans le golfe

Donc, il ne s'agit pas d'un nuage toxique se dirigeant sur l'Europe. Cette marée verte qui a envahi le golfe de Gascogne est une prolifération printanière de phytoplancton – des micro-organismes végétaux qui dérivent à la surface de l'océan. Le cliché a été pris le 2 mai par le satellite *Envisat*, de l'Agence spatiale européenne, optimisé pour l'occasion afin de détecter les différences de couleurs dans l'océan. La couleur verte de la « nappe » est liée à la chlorophylle du phytoplancton.

Si les microalgues sont photosensibles, leur croissance dépend aussi de la concentration en nutriments dans l'océan, de la température ou encore de l'intensité des courants. Ainsi, une telle concentration de phytoplancton, habituelle à cette époque de l'année, résulte de l'exposition d'eaux froides riches en nutriments à la lumière du Soleil.

Le phytoplancton étant à la base de la chaîne alimentaire océanique, la marée verte est le signe annonciateur d'un renouveau biologique. Une bonne nouvelle pour la pêche, importante activité économique dans cette région.

M. G.



Du vent dans les éoliennes

Le vent est une source d'énergie renouvelable prometteuse. Encore faut-il savoir où placer les éoliennes pour tirer parti des vents les plus puissants et les plus constants.

Cristina Archer et Mark Jacobson, de l'Université de Stanford en Californie, ont établi une carte mondiale qui indique la vitesse du vent à 80 mètres d'altitude – la hauteur à laquelle tournent les pales des éoliennes modernes.

La quasi-totalité des données disponibles concernaient jusqu'à présent la vitesse du vent à 10 mètres au-dessus du sol, et les mesures à 80 mètres sont peu nombreuses.

À partir des sites où les deux données étaient connues, les chercheurs ont établi un modèle décrivant localement comment la vitesse du vent augmente avec l'altitude. Ils l'ont ensuite extrapolé aux milliers de points de mesures à basse altitude répartis sur le globe.

Ils en ont déduit que la vitesse moyenne (sur un an) du vent à 80 mètres d'altitude est supérieure à la vitesse minimale requise pour la production d'électricité – 25 kilomètres par heure – dans 13 pour cent des sites. Les régions les plus exposées au vent sont la mer du Nord, la Terre de Feu, la côte Est des États-Unis, ainsi que la Tasmanie.

D'après C. Archer et M. Jacobson, la puissance éolienne potentielle totale de l'ensemble des sites serait d'environ 72 térawatts, soit 35 fois la puissance mondiale actuelle.

Aujourd'hui, 0,54 pour cent seulement de ces besoins est assuré par l'énergie éolienne.

Philippe Ribeau-Gésippe.

Evaluation of global wind power, à paraître dans Geophysical research letters, vol. 110.



- Vitesse inférieure à 5,9 m/s
- Entre 5,9 et 6,8 m/s
- Entre 6,8 et 7,4 m/s
- Entre 7,4 et 8 m/s
- Entre 8 et 8,7 m/s
- Entre 8,7 et 9,3 m/s
- Vitesse supérieure à 9,4 m/s

La vitesse annuelle moyenne des vents à une altitude de 80 mètres au-dessus de la surface du globe a été représentée sur ces cartes. La mer du Nord est une des zones les plus ventées. À partir du bleu foncé, la vitesse est suffisante pour produire de l'électricité.



Chiffres au vent

Admirez les deux sculptures couplées de Jessica Stockholder en hommage aux travaux du mathématicien norvégien Thoralf Skolem (1887-1963). Quand il inventa les suites numériques portant son nom, il n'a pas imaginé qu'elles seraient un sujet de sculptures. Nos actes se détachent de nous pour mener une existence propre, prophétisa l'Antigone.

J. Stockholder a endossé l'habit du géomètre pour expliciter l'abstraction de la suite de nombres. Il n'y a pas d'ange de la géométrie.

Une complémentarité exprimée par les élèves qui ont contribué, lors des « Mathématiques dans la ville » en 2000, à faire naître

la sculpture. En cette année mondiale des mathématiques, Jean-Pierre Bourguignon, directeur de l'Institut des hautes études scientifiques (IHES, près de Paris), et Jean Brette, alors responsable des mathématiques au Collège de France, ont animé des salles de classe avec l'étude des suites de Skolem. Ces suites passionnèrent des collégiens et il semblerait intéressant de donner à ce riche sujet mathématique une dimension artistique. Toutefois, il a fallu de multiples bonnes volontés pour faire naître l'œuvre d'art, notamment de la Fondation de France.

Le sujet de la sculpture est une suite comportant toutes les paires d'entiers de 1 à n , tels que deux nombres soient dis-

tants d'un « nombre de nombres » égal à leur valeur moins une unité. Ainsi, dans la suite 352327864117468, les deux 3 sont distants de deux unités, les deux 1 sont côte à côte, les deux 8 sont séparés par les sept chiffres 6411746, etc. Il n'existe pas de suite ayant cette propriété pour n égal à 2 ou 3 : la première suite possible correspond aux quatre paires de 1 à 4. Ces impossibilités, déstabilisantes pour les mathématiciens, ont suscité un

intérêt pédagogique : nous avons trop l'habitude de tout problème posé (par le fait que l'enseignant a posé) ait une solution.

De taille monumentale (9 mètres sur 11) et installée à l'IHES, l'œuvre – *Skolem - Chocs de blocs et chiffres au vent* – est composée de huit volumes cylindriques de hauteur 0,3 mètre à 0,5 mètre placés sur un quadrillage, les largeurs des objets correspondant, selon l'angle de vue, à une suite de Skolem.

Skolem est plus connu comme logicien que comme théoricien des nombres. Comme il a publié ses théorèmes importants en norvégien, ses travaux ont été redécouverts par d'autres, en toute bonne foi. Il est remarquable que la Norvège ait donné naissance à autant de mathématiciens de talent, en commençant par Abel et en continuant par Sophus Lie et bien d'autres. Petit pays par la taille, la Norvège est grande par les mathématiques. Elle a créé, il y a trois ans, un prix de mathématiques, le prix Abel, équivalent aux prix Nobel des autres disciplines scientifiques et

décerné cette année 2005 au mathématicien américain Peter Lax, spécialiste des équations aux dérivées partielles. Ph. B.



Laurent Lecat

Chiffres au vent est un hommage au mathématicien Thoralf Skolem. Sur la partie au premier plan les largeurs des enjambements varient de 1 à 8. Au fond, selon deux points de vue, les largeurs des structures constituent chacune une suite de Skolem pour les paires de nombres de 1 à 8.

Quand l'Univers sursaute

Les sursauts gamma sont les explosions les plus puissantes de l'Univers. Ils peuvent briller comme 10 milliards de milliards de Soleil et annoncent généralement la mort d'étoiles et la naissance de trous noirs. Jusqu'à présent, seuls des sursauts de quelques secondes avaient été étudiés. Pour la première fois, la source d'un sursaut gamma extrêmement bref de 50 millisecondes a été localisée. Les astronomes interprètent ce sursaut comme la fusion de deux objets massifs, tels des trous noirs ou des étoiles à neutrons. Comment pourrait-il se produire ?

Il existe deux types de sursauts gamma, longs et brefs. Les sursauts gamma qui durent plus de deux secondes seraient la conséquence d'explosions d'étoiles massives :

lorsqu'un astre n'a plus assez de gaz pour entretenir les réactions nucléaires qui le font briller, il s'effondre sous son propre poids. Des ondes de choc et des neutrinos traversent alors le gaz de l'étoile, ce qui produit des rayons gamma pendant une fraction de seconde. Ce rayonnement peut durer plusieurs dizaines de secondes avant que l'astre ne se transforme en un trou noir.

Quant aux sursauts gamma durant moins de deux secondes, ils proviendraient de fusions de deux objets massifs, une étoile à neutrons et un trou noir, ou deux étoiles à neutrons. Une telle fusion aboutit à la formation d'un trou noir entouré d'un disque d'accrétion, c'est-à-dire de matière qui tombe en spirale vers le trou noir. L'énergie

Une zone de la métaphore ?

« Il a encore mis la charrue avant les bœufs. Il aurait mieux fait de donner sa langue au chat. Ça lui apprendra peut-être à mettre de l'eau dans son vin. » Si vous avez pris ces phrases au pied de la lettre, vous ignorez certaines expressions de la langue française... ou vous avez subi une lésion du gyrus angulaire gauche.

À l'Université de Californie à San Diego, Vilayanur Ramachandran a interrogé quatre patients, chez qui cette zone du cerveau avait été endommagée, sur le sens d'une vingtaine de phrases contenant des tournures imagées et des métaphores. Ces personnes avaient toutes leurs facultés intellectuelles et parlaient un anglais courant, mais elles n'ont pas été capables d'aller au-delà d'une compréhension littérale.

Bien plus développé chez l'homme que chez les autres primates, le gyrus angulaire gauche serait une zone du cerveau indispensable à la compréhension des images, et plus généralement au sens de l'abstraction. Bien qu'il faille se garder de considérer cette aire cérébrale comme la zone des métaphores, son développement semble la source de l'émergence de nombreuses capacités cognitives liées à la pensée symbolique.

M. G.

Congrès annuel de la Société américaine de psychologie, 26 mai 2005

36 heures...

C'est la durée de vie moyenne d'un article d'actualité publié en ligne sur un site web. Pour parvenir à cette estimation, Zoltan Desz et ses collègues de l'Université Notre Dame, dans l'Indiana, ont analysé la fréquentation du principal portail d'actualités hongrois. Ils ont regardé quels articles les visiteurs du site lisaient, et quand. En une journée, le site comptabilise en moyenne plus de 3 000 nouvelles informations et plus de 6,5 millions d'entrées. Le nombre d'entrées par article atteint un maximum d'une dizaine d'heures après sa publication. Après 36 heures, l'article n'est quasiment plus consulté. Selon Z. Desz, un internaute ne voit ainsi que la moitié des nouvelles publiées sur ce portail web.

Philippe G.

dégagée par la fusion crée un jet de matière, qui cause le sursaut gamma. Mais comme il y avait peu de matière dans les deux astres ayant fusionné, le sursaut est bref.

Pourquoi, jusqu'à présent, seules les sources de sursauts gamma de plusieurs secondes avaient-elles été localisées ? Après un sursaut, un rayonnement contenant toutes les longueurs d'onde est émis, parfois pendant des semaines pour les longs sursauts – on peut alors les localiser précisément. En revanche, les sursauts brefs durent que quelques centaines de secondes pour les sursauts brefs : c'est pourquoi on n'avait encore jamais pu les étudier ni repérer leur source.

C'est désormais chose faite avec le télescope spatial anglo-américain *Swift*, lancé en 2004. Ce satellite localise rapidement et précisément les sursauts gamma, ce qui permet aux instruments au sol de prendre le relais pour les étudier. Mission accomplie avec, pour la première

fois, l'observation d'une émission de rayons X de 400 secondes après un sursaut gamma, à 58 millions d'années-lumière. Les astronomes ont déterminé que la source se trouve dans une région proche d'une galaxie peuplée de vieilles étoiles, à trois milliards d'années-lumière de nous.

Cette position est compatible avec le scénario d'un sursaut bref dû à une fusion d'objets compacts plutôt qu'à l'effondrement d'une étoile massive. En effet, comme les étoiles massives épuisent très vite leurs réserves de gaz, leur vie est courte, il est peu vraisemblable d'en trouver dans une région riche en étoiles vieilles. En revanche, un tel endroit doit receler beaucoup de trous noirs et d'étoiles à neutrons, aboutissements de la vie d'étoiles massives.

Le télescope *Keck*, à Hawaï, scrutent-ils la région où s'est produite l'explosion détectée par *Swift* à la recherche d'indices sur sa source.

Stéphane Fay

Vue d'artiste de la fusion d'un trou noir et d'une étoile à neutrons ou de deux étoiles à neutrons. Un disque de matière spirale vers le trou noir se formant à la suite de cette rencontre. Il dégagera suffisamment d'énergie pour créer un jet de matière responsable d'un bref sursaut gamma.



Les nombres premiers (entiers supérieurs à 1 qui n'ont que 1 et eux-mêmes pour diviseurs) sont répartis de façon irrégulière. En effet, plus il est grand, plus un entier a de chances d'avoir des diviseurs.

Les mathématiciens savent qu'en moyenne, l'écart entre un nombre entier premier p et le suivant croît comme le logarithme de p . En revanche, ils ne savaient pas comment se comporte la plus petite distance possible entre deux nombres premiers consécutifs lorsque p augmente. D. Goldston et J. P. Lagarias, à l'Université de Californie, vient de montrer que par rapport à $\log(p)$, la plus petite distance possible entre deux nombres premiers consécutifs, $d(p)$, tend vers 0 quand p augmente. Autrement dit,

l'écart tend vers l'infini, $d(p)/\log(p)$ prend des valeurs aussi petites que l'on veut. Selon Jean-Paul Delahaye, à l'Université de Lille, la démonstration de ce théorème rapproche un peu plus les mathématiciens d'une éventuelle démonstration de la conjecture de Goldbach affirmant qu'il existe une infinité de couples de nombres premiers jumeaux. Deux nombres premiers sont jumeaux si leur différence est égale à 2, par exemple (5,7) ou (29,31). Si de tels couples ont été identifiés jusqu'à des valeurs astronomiques, les mathématiciens ne savent aujourd'hui s'ils ne finissent pas par disparaître au-delà d'un certain entier. Une chose est sûre, de l'avis de tous, le résultat de D. Goldston est d'importance.

M. G.

<http://fr.arxiv.org/abs/math.NT/0506067?front>

LES NOMBRES PREMIERS S'APPROCHENT

Les maîtres de la route du sel

Deux enfants de haut rang ont été enterrés sous le nom d'une princesse celtique et à la même époque. Appartenaient-ils à la même famille ?

Dans la partie allemande du Parc archéologique européen de Reinheim-Bliesbruck, Walter Reinhard, du Service archéologique de la Sarre, vient de découvrir deux enfants celtes enterrés sous le nom d'une princesse celtique. Cela pourrait nous éclairer sur le système de pouvoir dans la région au cours de La Tène.

À cette époque, qui va de -450 au tout début du 1^{er} millénaire, les Celtes formaient une société de castes dominée par une élite politique et religieuse. La Sarre est un haut lieu de la civilisation de La Tène. On y a trouvé 22 tombes princières. Les aristocrates vivaient au sein de grands domaines, où les maisons du maître et de ses paysans étaient entourées d'enclos. On cultivait alors avoine, blé amidonnier, millet, etc., et élevait veaux, vaches, cochons, couvées... À Reinheim plusieurs domaines jouxtaient le siège d'une résidence princière sise sur une colline. Lieu d'échanges et refuge en cas de guerre, cette place forte contrôlait aussi la route du sel, par laquelle l'« or blanc » des Celtes, exploité en Lorraine sur les bords de la Seille, remontait vers le Nord. L'importance du site a été révélée par les découvertes, en 1954, de la tombe de la « princesse de Reinheim », parée de bijoux d'or et équipée d'un riche mobilier pour son dernier voyage.

Un des bijoux qui ornaient la tombe de la princesse de Reinheim (*en haut*) et une fibule de bronze retrouvée dans la tombe récemment mise au jour dans la Sarre (*en bas*).

Dans ce contexte, les jeunes défunts intriguent car ils ont été enterrés à la même époque que la princesse dans une nécropole domaniale située à 1400 mètres du tumulus princier. Il s'agit d'une fille de 14-15 ans et d'un garçon de 11-13 ans manifestement de haut rang, car eux aussi ont été enterrés sous un tumulus. Comme la princesse, ils ont été couchés sur le dos, tête orientée vers le Nord dans une chambre funéraire en bois. La jeune morte portait deux torques de bronze (un coiffe ouvert rigide aux extrémités évassées) au cou et des bracelets du même alliage aux bras et aux chevilles. Le bras de son jeune compagnon était enserré par l'anneau de bronze typique des membres masculins de la caste dirigeante celtique. Sortes de broches servant à fixer les vêtements, deux fibules de bronze ont été retrouvées, dont une ornée d'une représentation d'animal mythique. Les enfants mesuraient respectivement 1,50 et 1,55 mètre, ce qui est relativement grand. Ce trait et l'excellent état de leurs dents témoignent du régime riche en protéines de la classe aisée.

Apparemment, les enfants n'ont pas été blessés avant leur décès. Tandis que les archéologues recherchent toujours les causes de leur mort, les généticiens vont comparer l'ADN de leur collagène à celui de la princesse. Si les enfants s'avéraient apparentés à la princesse, cela suggérerait qu'au début de l'époque de La Tène, la famille aristocratique qui contrôlait la portion de la route du sel passant par Reinheim était constituée d'une seule famille.

François Sauter



Staalliches Konservatorium de la Sarre



Alain Bénétou

Une salamandre géante

À la surface du marécage, rien ne bouge. De loin en loin, les méandres d'un cours d'eau ont inondé la plaine. Attendant leur heure, deux yeux patients dépassent de l'eau boueuse. D'un coup, une masse de 800 kilogrammes surgit de la vase, et fond sur un petit dinosaure qui ne l'a pas vu venir. Happé vers le fond, il sera dévoré par cet amphibien géant, un brachyopode appartenant au groupe des Temnospondyles, qui vécut sur Terre il y a environ 200 millions d'années.

Récemment, Jean-Sébastien Steyer, du Muséum d'histoire naturelle, a découvert un crâne et un morceau de la mâchoire de ce monstre, retrouvé en 1970, au Lesotho,

par une équipe de paléontologues français. À partir d'un fossile d'un brachyopode australien dont le squelette est complet mais plus petit, J.-S. Steyer a déduit la taille de l'animal. Comprise entre six et huit mètres, elle en ferait le premier ou le deuxième plus grand amphibien qui ait jamais vécu sur la Terre. Quoique son allure ait été celle d'une salamandre, le mode de vie de ce prédateur opportuniste devait évoquer celui des crocodiles actuels. C'est probablement parce qu'ils étaient en compétition avec les ancêtres des crocodiles que ces énormes brachyopodes ont disparu.

Bulletin de la société géologique de France, tome 176 n°3, pp 243-248, mai-juin 2005

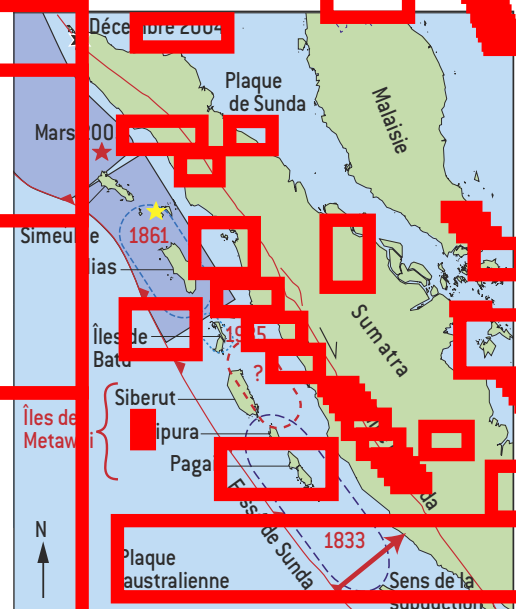
Inquiétants calculs pour Sumatra

La modélisation de la tectonique de la région de Sumatra indienne une rupture sismique probable.

En décembre 2004 et mars 2005, deux séismes majeurs se sont succédé sur la faille de Sunda en Indonésie. Les zones de rupture étaient contiguës, de sorte qu'il est probable que le séisme de mars a été provoqué par celui de décembre. Pour apprécier si cette cascade de séismes va se poursuivre, Suleyman Nalbant et ses collègues de l'Université d'Illinois ont analysé les tensions supplémentaires induites par le séisme de mars dans les segments de la tranchée de Sunda qui lui sont voisines.

Les géologues ont modélisé les forces tectoniques dans la région, qui sont dues à la subduction de la plaque indienne et de la plaque australienne sous la plaque de Sunda (Sumatra). Selon leur modèle, le séisme de Sumatra-Andaman (de décembre) a provoqué une augmentation des tensions au foyer du séisme de Simeulue-Nias (de mars) de l'ordre de 0,17 bar. Cette faible valeur confirme qu'une contrainte externe relativement modeste peut déclencher un séisme dans une portion de faille « mature », c'est-à-dire parvenue au bout de son cycle sismique pendant lequel elle accumule des tensions jusqu'à atteindre le seuil de rupture.

Après cette constatation, S. Nalbant et ses collègues ont examiné l'augmentation des tensions engendrée par le séisme dans les autres sections de la faille. Si celle de Banda Aceh a été peu touchée, les segments qui se trouvent plus au Sud, le long de la faille de Sunda, l'ont été notablement : l'augmentation du « stress » culmine à huit bars sous le segment portant les îles de Batu, et atteint une valeur presque aussi grande sous le segment portant les îles de Metawai. Selon les sismologues, c'est dans le segment de Metawai que le risque de rupture est maximal (le dernier séisme dans le segment de Batu remonte à 1935).



D'après une modélisation des nouvelles contraintes engendrées par les séismes de décembre 2004 et de mars 2005, la région de Metawai serait la plus exposée.

Par ailleurs, dans les segments situés plus au Sud que celui de Metawai, les tensions ont été relâchées à la faveur d'un séisme de magnitude 8 en 1833. En revanche, aucun séisme majeur n'a secoué le segment de Metawai depuis 1797. Or les données historiques suggèrent que dans la région de la faille de Sunda, le cycle sismique dure environ 600 ans, c'est-à-dire qu'au terme d'une telle période, les tensions accumulées dans un segment de faille atteignent le seuil de rupture.

Toutes ces observations suggèrent que le risque est maximal dans le segment de Metawai. Si un séisme majeur comparable à celui de 1833 se produisait là, la faille, qui s'étend sur 200 km, pourrait provoquer un tsunami destructeur pour les côtes et les îles de la région.

F. S.

Nature, vol. 435, pp. 756-757, 9 juin 2005

Des planètes dans un jeu de quilles

Pourquoi le Système solaire est-il comme il est ? Pourquoi les planètes géantes – Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune – ont-elles des orbites si inclinées ? Pourquoi la Lune a-t-elle l'origine d'un bombardement intense qui a grêlé d'impacts la surface de la Lune ? D'où viennent les astéroïdes qui cohabitent avec Jupiter sur son orbite ?

Alessandro Morbidelli, de l'Observatoire de la Côte d'Azur, et ses collègues proposent une réponse unique à ces questions disparates. Ils ont modélisé et simulé une migration des planètes géantes, qui aurait entraîné une vaste reorganisation du Système solaire. Aiguillés au départ par la structure énigmatique de la ceinture de Kuiper, ces milliers de petits corps glacés, les astronomes ont imaginé que cette population s'est formée sur des orbites proches avant d'être repoussée et dispersée. Mais par quel mécanisme ?

La migration planétaire est un candidat idéal. Planètes et petits corps s'influencent par le biais de la gravitation, et leurs orbites s'en trouvent modifiées. Lorsqu'une planète éjecte un planétoïde vers l'extérieur du Système solaire, par réaction, elle se rapproche légèrement du Soleil. À l'inverse, si elle envoie le corps vers l'intérieur, elle s'éloigne. Les astronomes ont donc simulé l'évolution d'un système comprenant des planètes géantes sur des orbites quasi-circulaires, planes et resserrées – en accord avec les théories de formation des systèmes – entourées d'un disque de débris peuplé d'une multitude de petits corps. Sous l'influence des quatre planètes,

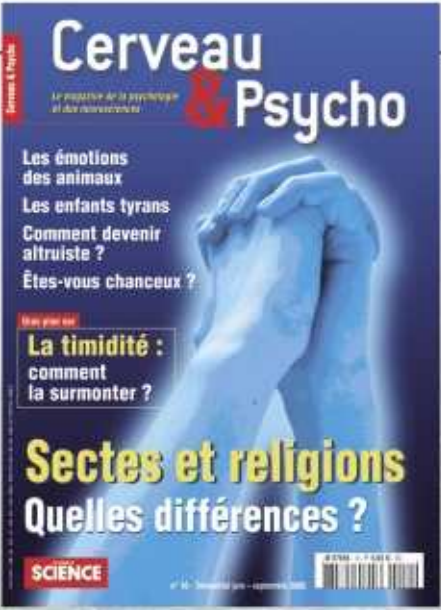
notamment Neptune, le bord interne du disque commence à être perturbé. Les corps glacés sont éjectés vers l'extérieur du Système solaire. En retour, les orbites des planètes géantes se modifient lentement. Tandis que Jupiter se rapproche du Soleil, les autres planètes glissent vers l'extérieur.

Tout s'accélère lorsque, entre 400 et 1 200 millions d'années, Saturne parvient dans une configuration particulière dite résonance, où elle fait une révolution pendant que Jupiter en fait deux. Comme cette résonance renforce l'interaction gravitationnelle, l'action de Jupiter augmente vite l'excentricité et l'inclinaison de Saturne. Une cascade de réactions brusques s'ensuit. Uranus est repoussée, tandis que l'orbite de Neptune s'allonge et devient très allongée. La géante bleue fonce

dans le disque de débris. Elle y disperse des milliers d'entre eux. Une masse de corps rocheux équivalant à 35 fois celle de la Terre est projetée sur le Système solaire interne.

Cela expliquerait l'étrange bombardement intense qu'ont subi la Lune et les planètes telluriques il y a 3,8 milliards d'années. La fréquence des impacts est compatible avec l'âge des bassins d'impacts de la Lune, et la masse de projectiles prédite concorde avec les estimations fondées sur l'analyse des cratères.

Après la désagrégation, les planètes se sont retrouvées sur des trajectoires proches des orbites réelles, avec des excentricités et des inclinaisons correctes. Après la désagrégation, les corps circulant entre les planètes géantes ont entretenu la



Dans ce numéro, **Cerveau & Psycho** s'intéresse à diverses questions :

- Quelles différences y a-t-il entre une secte et une religion ?
- Pourquoi certains enfants tyrannisent-ils leurs parents ?
- Peut-on surmonter sa timidité ?
- Les animaux ont-ils des émotions ?
- Un ordinateur peut-il remplacer un inspecteur de police ?
- Avez-vous déjà vécu un "déjà-vu" ?
- Peut-on s'entraîner mentalement ?

Cerveau & Psycho
En vente chez votre marchand de journaux

Un épisode tardif de migration planétaire expliquerait de nombreuses caractéristiques du Système solaire

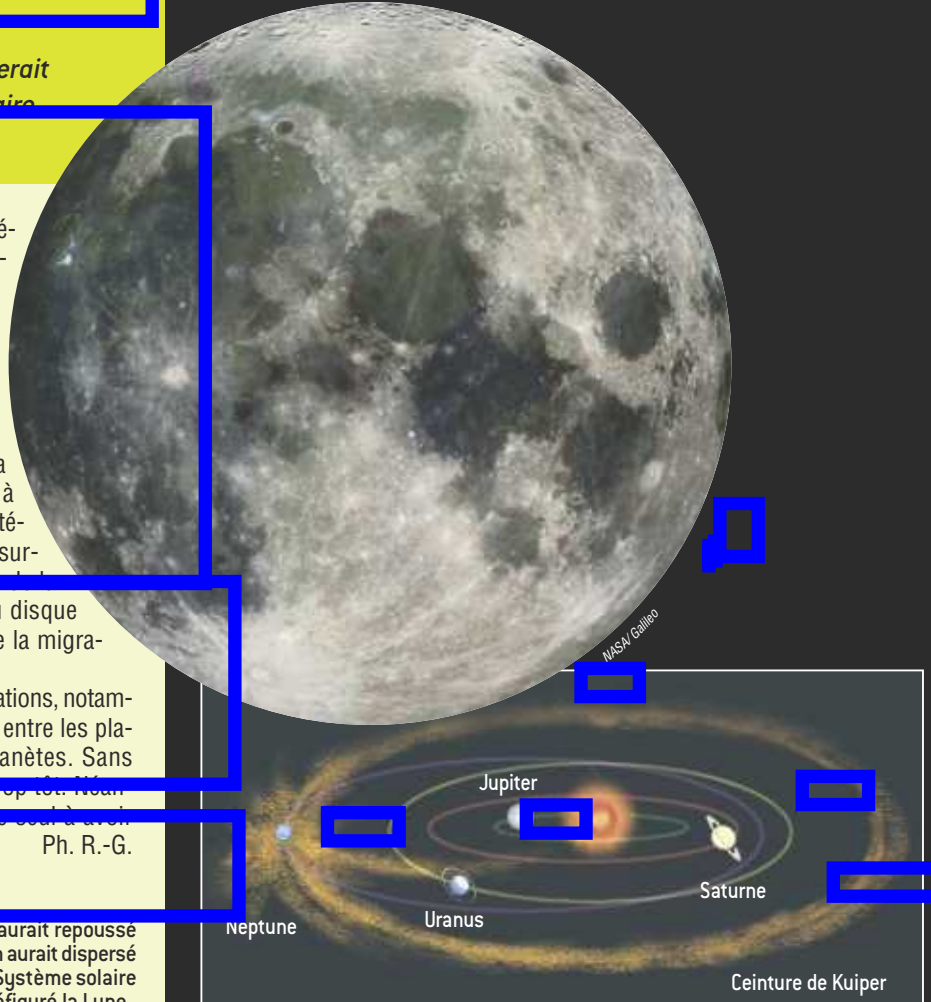
migration jusqu'à leurs orbites actuelles. Le scénario est aussi cohérent avec l'existence des satellites troyens, deux groupes d'astéroïdes qui précèdent Jupiter de 60 degrés sur son orbite. Ces corps auraient dû s'échapper lorsque Jupiter et Saturne sont entrées en résonance, mais les astronomes se sont aperçus qu'ils ont pu être en partie remplacés par la capture de planétésimaux lors de la désagrégation. La masse de corps capturés prédite correspond à celle observée, des Troyens. De surcroît, ces astéroïdes fournissent un test : leur composition de surface doit correspondre à celle du disque protoplanétaire. Cette dernière, reliquat du disque de débris, conserve par ailleurs une preuve de la migration dans sa structure même.

Ce scénario soulève de nombreuses interrogations, notamment au sujet du mécanisme qui vide l'espace entre les planètes des débris lors de la formation des planètes. Sans cela, en effet, la migration se déclencherait bien trop tôt. Néanmoins, ce modèle global a pour atout d'être le seul à avoir fait l'objet de simulations d'envergure.

Ph. R.-G.

Nature, vol. 435, pp. 459-465, 26 mai 2005

Durant l'époque de la migration planétaire, Saturne aurait repoussé Neptune loin dans la ceinture de Kuiper. Cette intrusion aurait dispersé l'essentiel de cette population, en particulier vers le Système solaire interne, provoquant le grand bombardement qui a défiguré la Lune.



Une expérience réalisée par des physiciens japonais laisse entrevoir des horloges atomiques d'une précision jamais égalée.

Mettant à profit un rayonnement optique émis par des atomes de strontium piégés dans un réseau de faisceaux laser, l'équipe de Hidetoshi Katori, à l'Université de Tokyo, a mis au point un dispositif permettant d'atteindre, sur le plan de la précision, des

avec 10 chiffres après la virgule – soit une horloge retardant d'un second sur 45 milliards d'années !

La première en fréquence pose quelques difficultés. Par exemple, plus la différence d'énergie entre deux niveaux atomiques augmente, et plus elle la fréquence de la radiation associée, plus le temps de vie de l'état excité est court. Cette propriété qui rend difficile la mesure

de la fréquence d'une radiation d'énergie élevée (souvent des rayons X) pour contourner la difficulté, on doit choisir une transition atomique

particulière, telle qu'en présentent le mercure, le calcium ou le strontium utilisé par les Japonais. La finesse d'une mesure dépend aussi du temps durant lequel on peut ausculter l'atome : plus ce temps est court, plus les mesures de fréquences sont entachées d'erreurs. Pour y remédier, on peut piéger les atomes dans un piège optique.

l'interaction d'un atome avec un champ électromagnétique déplace ses niveaux d'énergie, donc la fréquence des rayonnements qu'il émet. Deux protocoles expérimentaux ont déjà été mis au point pour tirer parti de transitions hyperfines. Dans le premier, on utilise un grand nombre d'atomes, d'où une bonne statistique, mais les collisions entre atomes décalent les fréquences. Pour supprimer ce biais, l'autre

méthode consiste à n'utiliser qu'un seul atome. Mais on est alors confronté à un signal très faible. L'équipe de Hidetoshi Katori a combiné les avantages des deux méthodes. Elle a utilisé plusieurs atomes de strontium, chacun piégé dans un puits de potentiel différent d'un intense piège lumineux. De plus, en ajustant la fréquence des lasers pièges, les physiciens se sont affranchis du problème des décalages en fréquence liés à l'interaction du piège optique avec les atomes. En effet, pour certaines valeurs de la fréquence du piège, les énergies de deux niveaux atomiques utilisés pour l'expérience sont décalées de la même manière. La différence d'énergie entre les deux niveaux qui détermine la fréquence du rayonnement étudié, le problème disparaît.

Pour Gilles Nogues, au laboratoire Kastler-Brossel à l'École normale supérieure, l'expérience japonaise est très élégante et constitue une étape importante pour le développement des horloges du futur. Néanmoins, les 18 chiffres après la virgule prévus en théorie ne sont aujourd'hui que 14 dans l'expérience japonaise. Et, comme le rappelle Sébastien Bize, du Bureau national de métrologie, les meilleures horloges au césium

donnent la seconde avec 28 décimales. Reste, de l'avis de tous, un résultat prometteur.

M. G.

Nature, vol. 435, pp. 321-324, 19 mai 2005

Dans 0,00000000000000001 seconde, il sera minuit

Toutes les horloges fonctionnent sur le même principe : un oscillateur et un compteur rendant compte de la succession des oscillations. Plus l'oscillateur est rapide, et à condition de disposer d'un compteur capable de suivre le mouvement de celui-là, plus la précision d'une horloge est grande. Ainsi, le cristal d'une montre à quartz vibre 10 000 fois par seconde. Et dans une horloge atomique au césium, la fréquence de la radiation entre deux niveaux atomiques, qui sert de référence universelle pour la mesure du temps, est de 9 192 631 770 Hz.

Pour aller plus loin, on étudie la possibilité de travailler avec des rayonnements optiques dont la fréquence est de l'ordre de 10^{15} hertz.

Lémuriens : un ancêtre commun

Les quelques 50 espèces de lémuriens de Madagascar descendent-elles toutes d'un ancêtre commun qui a colonisé la grande île au début de l'ère tertiaire ? Bien que cette hypothèse soit largement admise, elle négligeait l'existence de plus d'une quinzaine d'espèces de lémuriens (certains de très grande taille) qui vivaient sur l'île au cours des deux derniers millions d'années et s'y étaient éteintes. Une équipe internationale dirigée par Anne Yoder, de l'Université Yale, vient d'analyser des échantillons d'ADN ancien prélevés sur des restes de lémuriens éteints appartenant à cinq genres. L'étude a permis de préciser les relations de parenté entre les lémuriens éteints et les lémuriens actuels. Surtout, elle apporte une confirmation de l'hypothèse selon laquelle les primates non humains ont colonisé Madagascar une seule fois.

M. M.

PNAS, vol. 102, n°14, pp. 5090-5095, 2005

Le franchissement de la mer Rouge

Après une étude de Vincent Macauley, à l'Université de Glasgow, et une autre de Lalji Singh, du Centre de biologie cellulaire et moléculaire à Hyderabad en Inde, les premiers hommes modernes qui ont quitté l'Afrique ont longé la mer Oman puis l'Océan Indien, et ont ainsi colonisé l'Eurasie et l'Asie. Les scientifiques ont étudié, d'une part, l'ADN mitochondrial d'un peuple indigène de Malaisie, les Orang Asli, et, d'autre part, l'ADN mitochondrial des peuples des îles Andaman et Nicobar, dans l'Océan Indien. Si les habitants de Nicobar ont appartenu à des populations plus tardives de l'Asie du Sud-Est, il apparaît que le peuplement d'Andaman et de la Malaisie est ancien. Il serait lié à une unique source d'Afrique survenue il y a 65 000 ans. Après Vincent Macauley, les premiers « pionniers » de notre espèce ne se seraient pas rendus en Europe, mais en Asie. Ce chemin migratoire explique également le peuplement précoce de l'Australie, survenu bien avant qu'*Homo sapiens* n'atteigne l'Europe.

M. G.

Science, vol. 308, pp 1034-1036 et 996, 13 mai 2005

LE PALIMPSESTE D'ARCHIMÈDE SOUS X

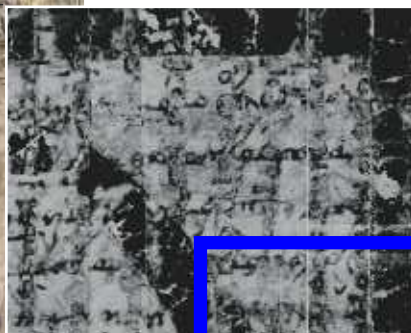
L'accélérateur de Stanford a révélé les résidus d'encre des passages illisibles du palimpseste d'Archimède.

Le palimpseste d'Archimède a été gratté et recouvert par un nouveau manuscrit. Ce palimpseste d'Archimède resta plus de sept siècles dans les bibliothèques de l'église orthodoxe, où le philologue danois John Heiberg le découvrit en 1907. Après avoir demandé en vain aux autorités ottomanes de le sortir du pays, Heiberg se résigna à le copier à l'aide d'une simple loupe... La communauté scientifique découvrit alors la majeure partie du traité inédit d'Archimède. Le palimpseste d'Archimède disparut ensuite ou fut volé, et un faussaire, inconscient de l'incalculable valeur de son texte sous-jacent, le surchargea de fausses images religieuses pour mieux le vendre.

Le palimpseste d'Archimède fut acheté en 1888 par des descendants d'un Français qui l'avait acheté à un bouquiniste d'Istanbul vers 1930, le proposèrent au commissaire-priseur Christie's, qui le reconnut.

Aujourd'hui propriété d'un anonyme milliardaire, le palimpseste d'Archimède a été prêté au musée d'art Walters de Baltimore. Une équipe de restaurateurs et de philologues travaille depuis six ans à le restaurer. Pour cela, ces spécialistes accroissent la lisibilité du texte sous-jacent en rendant luminescente, à l'aide de lumière ultraviolette, la peau de chèvre qui constitue le parchemin. Malheureusement, les passages recouverts par les images ajoutées par le faussaire restaient illisibles. Du moins, jusqu'à ce qu'Uwe Bergman, un physicien de l'accélérateur linéaire de Stanford (SLAC) s'aperçoive qu'ils pouvaient être révélés par le fer contenu dans certaines protéines constitutives de l'encre utilisée au X^e siècle. À une énergie bien choisie, le rayonnement synchrotron rend fluorescente une partie de l'encre résiduelle. Cette fluorescence activée, un détecteur capte les rayons X réémis et un traitement informatique permet de créer une « carte du fer » sur laquelle l'ancienne écriture réapparaît. La résolution obtenue est excellente, de sorte que les lettres illisibles sont révélées. Pour le moment, ce sont des passages de *Des corps flottants* et de *Sur l'équilibre des plans* qui ont été retrouvés.

F. S.



Cette page a été recouverte au X^e siècle par une fausse image religieuse à la peinture d'or. Les rayons X du synchrotron ont révélé le fer contenu dans l'encre sous-jacente, révélant le texte caché.

Grâce au rayonnement du synchrotron de l'Université de Stanford, en Californie, même les passages illisibles d'une copie inédite des œuvres d'Archimède vont nous être redonnés. Outre divers traités déjà connus, tels *Des corps flottants* ou *Sur l'équilibre des plans*, cette copie contient notre unique source sur *La méthode des théorèmes mécaniques*. Ce témoignage unique de l'œuvre du « grand penseur » (Archimède) nous est parvenu par le plus grand des hasards. Au XII^e siècle, à Constantinople, un scribe créa une copie des œuvres d'Archimède réalisée au X^e siècle pour fabriquer un livre religieux. En d'autres termes, il créa un palimpseste, c'est-à-dire un parchemin dont le texte pri-

Droit de réponse

par Jules Leveugle

Dans son article Einstein ou Poincaré (voir Pour la Science n° 330, avril 2005), où il n'est pas avare de propos blessants, Jean Eisenstaedt tente de disqualifier mon Histoire véridique de la théorie de la relativité, où sont discutées les contributions respectives d'Henri Poincaré et d'Albert Einstein dans la découverte de cette théorie. La critique est légitime, bien entendu, à condition qu'elle porte sur le fond. Mais le procès d'intention qui m'est fait n'est pas admissible, car mon but n'a été que la recherche de la vérité. J. Eisenstaedt a visiblement trouvé blasphématoires les résultats exposés dans mon ouvrage. Cela ne l'autorisait pas à déformer mes positions. Ne pouvant accepter la présentation qu'il en a faite, je suis obligé de lui répondre, pour rétablir la vérité.

1) Première thèse de mon livre, que J. Eisenstaedt s'attache à réfuter : Poincaré a l'antériorité sur Einstein, dans la découverte de la théorie de la relativité, en 1905. Je n'ai fait, sur ce point, que confirmer les conclusions de Whittaker. En effet, Poincaré a, le premier, énoncé le principe de relativité et il a découvert le groupe de transformations appelé par lui « de Lorentz », qui laisse invariantes les équations de l'électromagnétisme et conduit à une « mécanique nouvelle ». Comment attribuer à Einstein la paternité d'une théorie dont le principe et les équations ont été trouvés avant lui ? Les arguments de J. Eisenstaedt sont les suivants :

a) Poincaré « continue de tenir à l'éther », dont Einstein serait le premier à avoir compris l'inutilité. En réalité, Poincaré avait écrit, dès 1902 : « Il n'y a pas d'espace absolu. Peu nous importe que l'éther existe réellement. C'est l'affaire des métaphysiciens. » Du reste, cette objection est hors sujet, puisque l'hypothèse de l'éther n'intervient nullement dans la théorie de la relativité exposée par Poincaré.

b) Poincaré ne propose pas « une théorie physique », « il passe d'une bonne idée à l'autre sans mettre tout cela en ordre, sans structurer l'ensemble » ; il « a bien jalonné le terrain, il n'en a pas vu le plan ». On a du mal à prendre au sérieux cette critique, s'agissant de l'immense théoricien qu'était Poincaré. Celui-ci a si bien vu « le plan », qu'il a énoncé, le premier, le principe de relativité, et il a si bien « structuré l'ensemble » qu'il a démontré que les transformations « de Lorentz » avaient la structure d'un groupe...

c) Poincaré n'aurait jamais « reconnu le bien-fondé de la relativité einsteinienne » ! Il est vrai que le grand savant français n'a jamais eu la tentation de qualifier d'« einsteinienne » la théorie qu'il avait découverte. Mais il ne pouvait avoir de difficulté à en « reconnaître le bien-fondé », puisque c'était la sienne...

d) Selon J. Eisenstaedt, Poincaré, à la différence d'Einstein, ne démontre pas que « les deux principes, de relativité et d'indépendance de la vitesse de la lumière par rapport à sa source, impliquent les transformations de Lorentz ». En effet, car la constance de la vitesse de la lumière, qu'Einstein prend comme postulat, est, à l'inverse, un résultat évident qui se déduit immédiatement de la structure de groupe des transformations de Lorentz établie par Poincaré.

e) « L'article de Poincaré de 1905 », c'est-à-dire sa note à l'Académie des sciences du 5 juin 1905, « ne contient pas tous les points nécessaires à motiver la théorie ». Il est vrai que Poincaré ne répète pas, dans cette note, tout ce qu'il a dit sur le sujet dans ses travaux précédents, mais celle-ci contient clairement l'essentiel : le principe de relativité et le groupe de transformations. La théorie de la relativité présentée par Einstein dans son article du 26 septembre 1905 n'ajoute rien d'important aux résultats déjà publiés par Poincaré à cette date.

2) Deuxième thèse de mon livre, que J. Eisenstaedt ne juge pas moins insupportable que la précédente : l'article d'Einstein n'est pas seulement postérieur aux travaux de Poincaré et Lorentz, il en est une compilation. Whittaker l'avait suggéré, mais j'ai été le premier à le démontrer, dans l'article que j'ai publié en 1994 dans La Jaune et la Rouge et que j'ai reproduit dans mon livre, en effectuant une comparaison terme à

terme de l'article d'Einstein et des écrits de Poincaré. Comme le concède J. Eisenstaedt, il est troublant que l'article d'Einstein ne comprenne aucune référence. Mais cela s'explique aisément si l'auteur a voulu occulter ses sources.

3) Une fois admis qu'Einstein avait emprunté l'essentiel de son article aux textes de Poincaré, il restait à expliquer dans quelles conditions celui-ci avait été élaboré. J'ai donc été conduit, après une longue enquête dans les documents de l'époque, à énoncer une troisième thèse : l'article d'Einstein est le résultat de la volonté délibérée de Planck et de Hilbert d'occulter les découvertes de Poincaré, dans le contexte de la rivalité franco-allemande qui a conduit à la Première Guerre mondiale. Cela nécessite nullement d'une « lecture paranoïaque de la physique », comme écrit aimablement J. Eisenstaedt, car j'ai notamment mis au jour deux faits nouveaux considérables, dont il ne fait pas mention :

– d'abord, Hilbert a écarté des travaux du séminaire qu'il dirigeait sur la théorie des électrons en juin et juillet 1905 la note du 5 juin 1905 de Poincaré à l'Académie des sciences ;

– ensuite, Planck a écarté la publication dans sa revue d'un compte rendu de la note de Poincaré.

Or, le même Planck a organisé, dès la fin de 1905, un colloque retentissant sur l'article signé Einstein et publié dans sa revue, ne faisant, à cette occasion, aucune référence au travail de Poincaré. Ce silence n'aurait pas été possible si celui-ci n'avait pas été préalablement occulté, et dans le séminaire de Hilbert, et dans la revue de Planck, ce qui révèle une entente entre Hilbert, Planck et Einstein.

Ainsi, l'explication la plus simple est que l'article dit « fondateur » a été compilé en quelques jours, en juin 1905, à Göttingen, à l'initiative de Hilbert, en accord avec Planck, et qu'Einstein a volontiers consenti à signer cette compilation.

Einstein est devenu un tel mythe, aujourd'hui, qu'il est difficile de discuter de la paternité de la théorie de la relativité sans déclencher des passions. Nous avons, cependant, pris ce risque, pour rester fidèle à cette belle pensée de Poincaré : « la recherche de la vérité doit être le but de notre activité : c'est la seule fin qui soit digne d'elle. »

Simuler quoi ?

Les simulations que nous présentent Chris Barret, Stephen Eubank et James Smith dans *Et si la variole frappait Paris* (voir Pour la Science n° 330, avril 2005) tiennent-elles compte de la sociologie d'une population ? Les auteurs considèrent qu'en cas de contamination, la population resterait cloîtrée chez elle. Or dans un pays tel que les États-Unis, une proportion élevée de la population n'a pas de protection sociale. Les gens iraient probablement au travail malgré une très forte fièvre et sèmeraient leurs germes pathogènes parmi la population encore saine – d'où un risque important de surmortalité.

David Daniel, par courriel

Réponse d'Éric Bonabeau,
directeur scientifique chez Icosystem

Au-delà du niveau de vie, ce sont les habitudes et activités de la population, ainsi que sa réponse à des mesures de santé publique, qui influent sur la diffusion des épidémies. Le degré d'applicabilité d'une mesure de santé publique doit être pris en compte dès sa conception et doit faire partie des hypothèses de la simulation pour que celle-ci produise des résultats à caractère prédictif. Quels que soient les motifs et motivations des individus, le comportement est une composante importante des simulations. Soulignons que la simulation n'est qu'un outil qui produit des projections dont la qualité dépend de celle des hypothèses sous-jacentes et des données disponibles. En d'autres termes, elle est à utiliser avec précaution.

Histoires d'eau sur

Le premier des deux robots envoyés sur Mars en 2004 a trouvé un ancien désert. Le second s'est posé sur une région jadis aquatique. L'eau liquide a été rare sur Mars, mais sa présence passée est aujourd'hui une certitude.

Philip Christensen

Nombreux sont ceux que le désert attire par son aspect désolé et sa sobriété dépouillée. Pour ma part, je le trouve fascinant par sa complexité. Les pierres de l'Arizona témoignent d'une histoire des plus embrouillées. Des couches de calcaire, de limon, de sable de quartz et de lave solidifiée attestent que durant les derniers 600 millions d'années, cette région a été successivement une mer chaude et peu profonde, un marécage boueux, un désert de dunes brûlantes, une étendue glacée, avant de redevenir une mer peu profonde. Des volcans en éruption ont alors formé de grandes îles, avant que le soulèvement et l'érosion ne sculptent finalement le paysage désertique actuel.

Ce type de reconstitution historique a longtemps été impossible pour Mars. Au fil des ans, j'ai vu le statut de la planète rouge passer de celui de simple point dans le ciel à celui d'un monde familier aux hommes, une contrée dominée par des volcans, des lits de rivières et des lacs asséchés, et des plaines de laves balayées par le vent. Mars a sans doute une des histoires les plus passionnantes du Système solaire. Cependant, les scientifiques n'ont pu s'en faire jusqu'ici qu'une vague idée. Pendant des années, on s'est demandé si Mars avait été par le passé chaude et humide comme la Terre ou froide et sèche comme la Lune.

La question a depuis pris de l'ampleur. Durant la dernière décennie, nous avons entamé la troisième phase de l'exploration martienne, après les observations au télescope du XIX^e siècle et les reconnaissances spatiales des années 1960 et 1970. Les récentes missions orbitales et les modules d'exploration au sol ont cartographié le relief de la planète, déterminé sa minéralogie et livré des images suffisamment détaillées de la surface pour que l'on puisse interpréter les processus géologiques et confronter les résultats des vols orbitaux avec les données de terrain. Les planétologues peuvent enfin étudier Mars à la façon des géologues, en utilisant les roches, les minéraux et les motifs du relief pour reconstruire une histoire.

Nous avons découvert que Mars a connu une grande diversité de processus et de conditions au cours de son histoire. Le sol de la planète rouge a été à la fois complètement desséché, gorgé d'eau, recouvert de glace ou de neige. Les descriptions sommaires ne suffisent plus. Les questions portent aujourd'hui sur les niveaux de chaleur et d'humidité et sur leur répartition dans l'espace et dans le temps. La réponse nous en dit en germe ce qui motive beaucoup d'entre nous à étudier la planète rouge : sa capacité, passée ou actuelle, à héberger la vie.

Deux sites, deux planètes ?

En janvier 2004, la NASA a fait se poser deux engins sur des sites très distincts de Mars. Les deux modules d'exploration *Spirit* et *Opportunity*, truffés de caméras et de spectromètres destinés à déterminer la composition du sol et des roches, sont partis en exploration pour répondre à la question centrale de la géologie martienne : quel rôle a joué l'eau ?

Spirit s'est posé dans le cratère de Gusev, choisi car les images prises en orbite avaient montré qu'une vallée, Meridiani, débouche dans le cratère comme si celui-ci avait été un lac par le passé. Dans un premier temps, ce site s'est révélé décevant. *Spirit* n'a détecté aucun signe d'une présence ancienne d'eau. Il a trouvé au contraire des roches volcaniques, qui, s'est-il avéré, sont de l'olivine et du pyroxène, des minéraux qui sont altérés par la moindre trace d'eau liquide. Le cratère de Gusev n'a donc pas été exposé de façon notable à l'eau durant les quelque trois milliards d'années qui ont suivi l'éruption volcanique. La situation est devenue plus intéressante lorsque *Spirit* s'est aventuré dans les collines de Columbia, qui surplombent le site d'atterrissage. Le robot y a découvert des sels de soufre en abondance. Les roches volcaniques semblent avoir été broyées en grains fins et avoir ensuite été cimentées par le sol – un processus qui a pu faire intervenir de l'eau percolant à travers les roches ou de l'acide sulfurique réagissant avec les minéraux présents dans ces roches. Malgré ces indices de la présence d'eau,

Mars

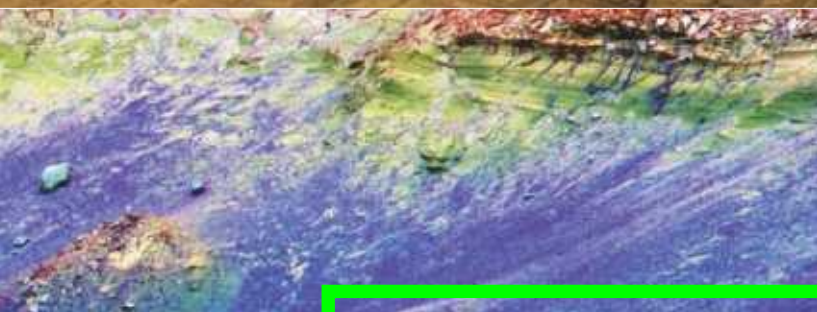
Vasistas Borealis

Utopia Planitia

Cratère Lyot

Arabia Terra

1. Lever du Soleil sur *Arabia Terra* : vue de l'Ouest vers *Utopia Planitia*. Cette vue d'artiste est une reconstruction d'images de Mars prises en orbite. Elle montre les bords de *Vasistas Borealis*, une vaste plaine qui a pu être inondée par les eaux d'anciens canaux. Au centre, le Soleil projette ses premiers rayons sur la lèvre Ouest du cratère Lyot.



ces roches contiennent néanmoins une quantité significative d'olivine et de pyroxène. De fait, même pour ce qui a pu être un jour le fond d'un lac, l'eau semble avoir joué un rôle mineur au cours des derniers milliards d'années.

Le robot *Opportunity* s'est posé, lui, dans la plaine de *Meridiani*. C'est la première fois que les planétologues choisissent une zone d'exploration en fonction de sa minéralogie. Les premières missions spatiales vers Mars avaient étudié la composition de sa surface en termes d'éléments chimiques, mais pour identifier les minéraux par leur composition et leur structure cristalline, il a fallu attendre que *Mars Global Surveyor*, l'orbiteur de la NASA équipé du spectromètre à émission thermique TES (pour *thermal emission spectrometer*), atteigne la planète en 1997. Dans les cartes minéralogiques ainsi établies, *Meridiani* se distinguait par son abondance en hématite cristalline, une signature possible de la présence d'eau.

Cet oxyde de fer, commun sur Terre, se forme en effet par différents processus faisant en général intervenir l'eau. L'un d'entre eux est la précipitation de fluides circulant à travers des sédiments ; un autre correspond au dépôt et à la déshydratation de minéraux ferreux riches en eau comme la goëthite, une roche ocre présente dans de nombreux sols désertiques. De surcroît, les roches riches en hématite de la plaine de *Meridiani* semblent s'être finement stratifiées et facilement érodées ; elles reposent sur la couche superficielle plus ancienne et constellée de cratères, ce qui suggère un dépôt sédimentaire et elles ont rempli les canaux préexistants ainsi que les régions de basse altitude, ce qui suggère qu'elles ont été déposées par un écoulement d'eau (des cendres volcaniques ou des poussières portées par les vents auraient recouvert l'ensemble du paysage).

Quelques jours après s'être posé, *Opportunity* a confirmé que *Meridiani* s'était trouvée sous l'eau par le passé. Le robot a repéré des affleurements de roches sédimentaires en couches, les premières trouvées sur Mars. Les roches contien-

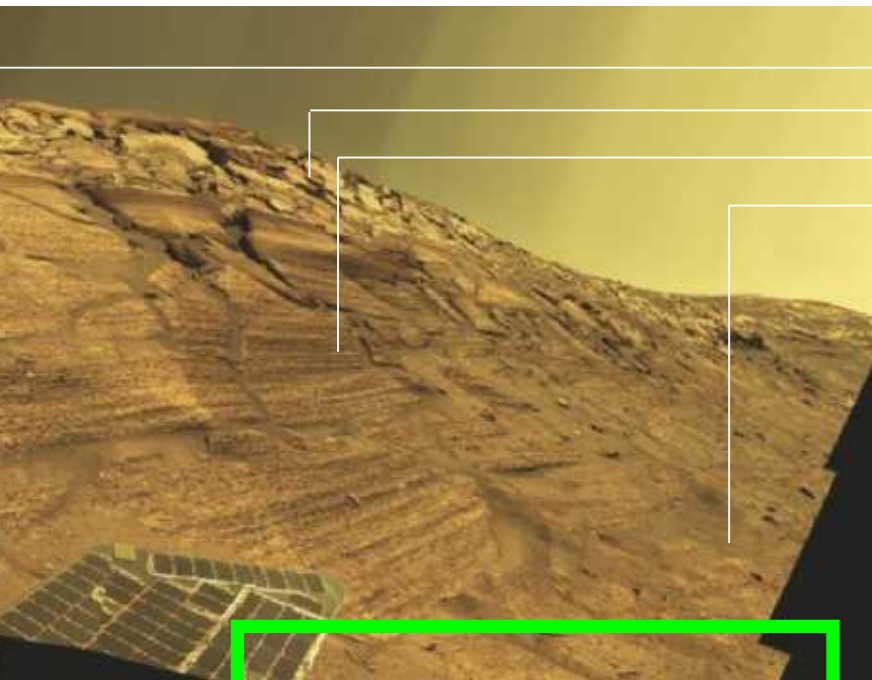
nent tant le sulfate, de 30 à 40 pour cent de leur masse, que seule l'évaporation d'une eau riche en soufre peut en rendre compte. L'hématite est présente sous forme de boulettes de quelques millimètres de diamètre surnommées myrtilles, ancrées dans la roche ou dispersées sur le sol.

Opportunity a exploré pendant six mois un des affleurements, nommé *Burns Cliff*, pour la première fois sous différents angles, à la façon des géologues sur Terre. Les 11 couches visibles se présentent sous la forme d'une série de dunes de sable mouillées par des eaux de surface et de sous-sol. Elles comportent de nombreux grains de sulfates formés par l'évaporation d'eau stagnante, peut-être dans les dépressions (nommées *playas*) entre les dunes. En comparant cela à des phénomènes terrestres similaires, on conclut que les roches de *Burns Cliff* ont dû se former en plusieurs centaines de milliers d'années. Les boulettes d'hématite se sont sans doute formées plus tardivement à partir des fluides riches en fer qui circulaient dans les sédiments.

L'hématite, un marqueur d'eau

Même la morphologie des plaines de *Meridiani*, un des paysages les plus plats de tout le Système solaire, évoque le fond d'un lac. L'étendue de l'hématite suggère que c'était un grand lac salé ou une petite mer plutôt qu'une partie d'un grand océan. Plusieurs cratères au Sud et à l'Ouest du dépôt principal d'hématite contiennent aussi des roches stratifiées riches en hématite ; peut-être constituaient-ils des lacs séparés. L'eau était, en tout cas, omniprésente dans cette région.

En somme, les deux sondes semblent s'être posées sur deux planètes totalement différentes, l'une plus sèche que tous les déserts de la Terre, l'autre parsemée de lacs. Mars présente-t-elle deux visages très contrastés, ou ses paysages se déclinent-ils à l'infini ? Ces deux sites, séparés par des milliers de kilomètres, représentent-ils l'ensemble du spectre de la composition rocheuse et de l'activité géologique sur Mars ?



Sédiments riches en sulfates déposés par l'eau

Sable laminé d'origine éolienne

Sable fin et lisse, probablement éolien

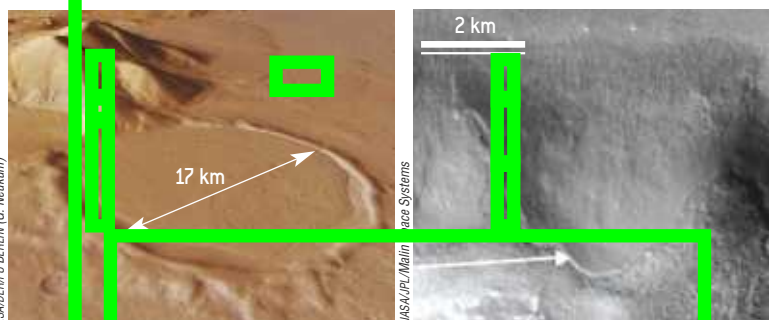
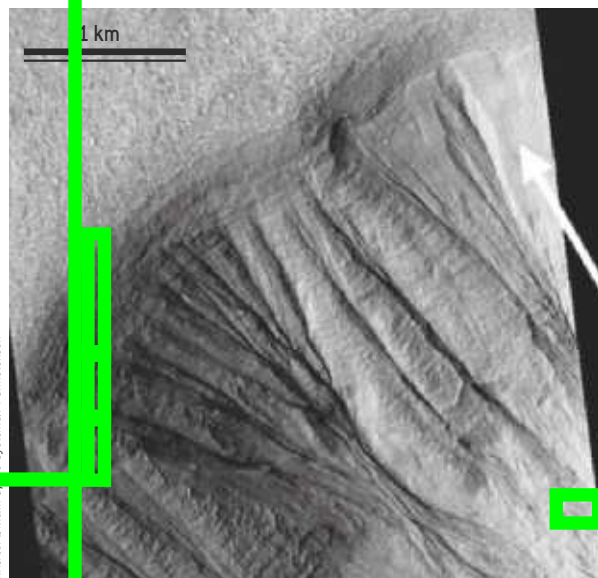
Sable en vrac

2. Burns Cliff est un affleurement rocheux intensivement exploré par le robot *Opportunity*. Cette falaise, haute comme trois étages, forme une partie du bord du cratère *Eandurance*, situé à 700 mètres du lieu où s'est posé le robot. Les couches supérieures, comme celles du site d'atterrissage, sont riches en sels de sulfate (en rouge et jaune sur le cartouche en fausses couleurs) et ont probablement été déposées lors des inondations et assèchements successifs de la région. En dessous se trouvent de fines couches rugueuses, composées d'un mélange d'hématite, un minéral lié à l'eau, et de basaltes incompatibles avec l'eau. Il s'agit sans doute d'anciennes dunes de sable restées sèches la plupart du temps, mais situées près d'un grand bassin aqueux. Le fond du cratère est couvert de sable basaltique (en bleu).

Pour répondre à ces questions, les scientifiques se sont replongés dans les données orbitales de *Mars Global Surveyor*.

Depuis huit ans, le spectromètre TES de cet orbiteur scrute les roches et les sables martiens. Il a révélé qu'ils sont constitués presque exclusivement de minéraux volcaniques tels le feldspath, le pyroxène et l'olivine, à savoir les composants du basalte. Au printemps de 2004, l'orbiteur *Mars Express* de l'Agence spatiale européenne, avec son spectromètre OMEGA fonctionnant dans l'infrarouge proche, s'est joint aux efforts et a confirmé la présence massive de ces minéraux. On trouve de l'olivine jusqu'à 4,5 kilomètres sous la surface dans les parois des canyons de *Valles Marineris*, et elle est présente dans toutes les plaines équatoriales, y compris au fond des canaux. La découverte de basalte, roche qui recouvre en grande partie la surface de la Terre et de la Lune, n'a pas été une grande surprise (sur Terre, la lave basaltique, primitive, s'est formée lors de la première fusion du manteau de la planète et continue de jaillir des failles océaniques, créant les fonds marins).

Plus surprenant : alors que les roches des terrains anciens et couverts de cratères sont basaltiques, les roches plus jeunes des plaines du Nord ressemblent à un type de lave plus évolué, l'andésite : elles contiennent davantage de verre et de minéraux riches en silice, mais moins de minéraux ferreux. Sur Terre, l'andésite se forme lorsque les plaques tectoniques mélangent, en plongeant, de l'eau à des roches souterraines fondues. La présence possible d'andésite sur Mars est intrigante. Elle indique peut-être que le manteau martien est plus riche en eau que le manteau terrestre, ou que la lave plus jeune a fondu à des températures, ou pressions, différentes de celles du vieux basalte. Certains scientifiques avancent que les supposées andésites sont en fait du basalte déguisé : un brouillard d'eau ou d'acide aurait réagi avec le minéral pour donner à sa surface une apparence d'andésite. Les planétologues devront attendre des études au sol détaillées de ces roches pour répondre à cette question.



3. L'orbiteur Mars Odyssey a détecté des dépôts de neige sur les versants froids des montagnes (flèche blanche en haut et en bas à droite). Cette neige est peut-être à l'origine de l'eau qui a récemment creusé des ravins (en haut). Si des micro-organismes vivent sur Mars, ces névés sont le lieu idéal pour les chercher. La sonde *Mars Express* a pour sa part observé les traces de glaciers récents qui se sont écoulés dans un cratère (à gauche).

Portrait *Express* de Mars

En 2005 étaient lancées trois missions vers Mars : la mission européenne *Mars-Express* et les deux robots de la NASA *Spirit* et *Opportunity*. Philip Christensen replace les résultats des deux robots américains dans le contexte géologique global dévoilé grâce aux instruments de télédétection placés sur trois satellites en orbite autour de Mars, dont la caméra hyperspectrale infrarouge OMEGA embarquée sur *Mars-Express*. Les données de télédétection et les mesures effectuées de l'espace et les mesures *in situ* est démontrée dans cet article, mais ne rend que partiellement compte des résultats obtenus par la sonde européenne.

La caméra OMEGA a révolutionné notre connaissance de la minéralogie de surface de la planète Mars, en cartographiant les minéraux silicatés caractéristiques de roches volcaniques (pyroxènes et olivine), en caractérisant les sulfates, témoins d'un environnement aqueux révolu, mais aussi en révélant l'absence de carbonates à la surface de la planète rouge et celle de minéraux hydratés dans les plaines de l'hémisphère Nord. C'est encore grâce à OMEGA que l'on a caractérisé l'étendue des glaces d'eau et de dioxyde de carbone aux pôles et posé des contraintes sur leur cycle de variation en fonction des saisons. La caméra HRSC (*High Resolution Stereo Camera*) toujours à bord de *Mars-Express* a permis d'affiner l'échelle de temps géologique par comptage de cratères, outil indispensable pour dater les événements géologiques et par exemple noter l'extrême jeunesse (au sens géologique du terme) de coulées volcaniques décrites dans l'article. Cette caméra, grâce à sa vision stéréoscopique, étudie le relief et la morphologie des terrains avec une résolution de deux mètres, ce qui a conduit en particulier à mettre en évidence des coulées de glaciers récentes. Enfin, la deuxième antenne du radar MARSIS devait être déployée durant la troisième semaine du mois de juin 2005. Les mesures devraient révéler le contenu en glace et en eau du sous-sol martien jusqu'à des profondeurs de plusieurs kilomètres, complétant ainsi les mesures de neutrons obtenues par la sonde *Mars-Odyssey*, qui ne concernent la présence d'hydrogène (supposé contenu dans l'eau) que dans le premier mètre du sol martien. Le spectromètre SPICAM de *Mars-Express*, enfin, vient de détecter pour la première fois sur Mars l'équivalent d'une aurore polaire, ce qui est surprenant car Mars est dépourvue de champ magnétique global. Cette aurore est localisée à une altitude de 130 kilomètres au-dessus du pôle sud. Ces données ont déjà été mises en évidence par la sonde américaine *Mars Global Surveyor*. MARSIS étudiera plus en détail ces phénomènes d'ionisation de l'atmosphère martienne.

Philip Christensen insiste avec raison sur la nécessité de comprendre la planète Mars comme un système global où les différentes enveloppes interagissent. On ne peut comprendre le climat martien et le cycle de l'eau sans préciser son évolution orbitale, son activité volcanique et son histoire magnétique. Les récentes découvertes de la mission *Mars-Express* et des robots *Spirit* et *Opportunity* montrent l'importance d'une meilleure connaissance de la structure interne de cette planète, qui reste encore mystérieuse. Les techniques qui permettront de répondre à ces questions sont développées en Europe, où existe un véritable savoir-faire qui n'attend qu'une opportunité de programmation pour se concrétiser.

Christophe SOTIN,

professeur de géophysique à l'Université de Nantes.

Le spectromètre TES a une assez faible résolution : un pixel correspond à une étendue de plusieurs kilomètres. De fait, l'immense variété de la minéralogie martienne n'est devenue apparente qu'en 2001, lorsque THEMIS, une caméra infrarouge portée par une autre sonde de la NASA, *Mars Odyssey*, a commencé à cartographier la planète avec une résolution de 100 mètres. THEMIS et OMEGA ont dévoilé une diversité des roches ignées – provenant du manteau – qui se rapproche avec celle de la Terre.

Une faible activité tectonique

Nord de l'équateur martien se dresse un volcan de 1100 kilomètres de diamètre nommé *Syrtis Major*. Son sommet présente une série de cratères effondrés, ou *caldeiras*. La majeure partie du volcan est basaltique, mais ses flancs sont constitués de cônes et d'écoulements de laves vitreuses riches en silice, nommées dacites. Ce type de roche provient des chambres magmatiques des volcans. Quand le magma refroidit, l'olivine et le pyroxène, riches en fer et en magnésium, cristallisent les premiers et se déposent au fond de la chambre. Le reste du magma, enrichi en silice et en aluminium, fournit les dacites. Les pics centraux de plusieurs cratères situés sur les flancs de *Syrtis Major* sont constitués de roches encore plus riches en silicates, les granites, qui se sont peut-être formés par une refonte à grande échelle de basaltes.

Les planétologues en concluent que ce volcan est passé par de nombreux stades de développement. La lave basaltique a d'abord été éjectée à partir du centre pour former le volcan. À mesure de son évolution chimique, le magma s'est retiré du haut de la chambre, ce qui a entraîné un effondrement du sommet et alimenté des éruptions sur les flancs. Les volcans martiens sont non seulement gigantesques, ils sont aussi étonnamment complexes.

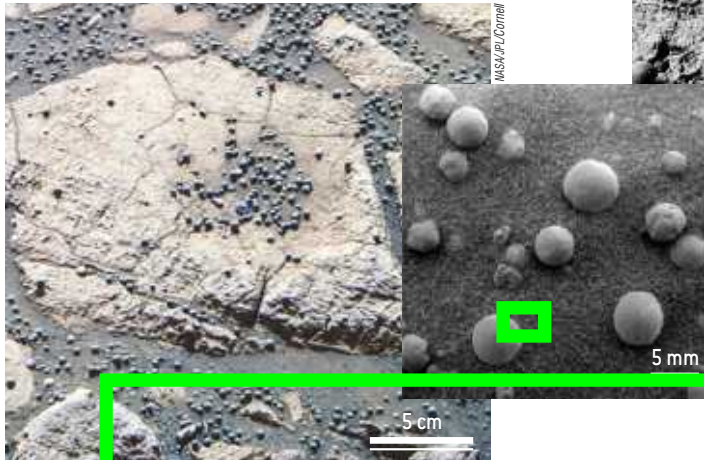
Ce qu'il n'y a pas sur Mars est aussi intéressant que ce qu'on y trouve. Le quartz, commun sur Terre, est extrêmement rare sur Mars. Cela suggère que le granite, dont il provient, y est rare. Il n'y a pas non plus de traces de minéraux métamorphiques tels l'ardoise ou le marbre, produits quand des roches volcaniques ou sédimentaires subissent des pressions ou des températures élevées. Cela implique que l'activité tectonique martienne est trop faible pour entraîner les roches en profondeur dans le manteau, où elles seraient chauffées et comprimées, puis pour les faire remonter.

La Terre regorge de vastes dépôts de roches carbonées tel le calcaire, qui s'est formé à partir des océans chauds et riches en dioxyde de carbone. Si Mars a été jadis plus chaude et plus humide, elle devrait posséder d'épaisses couches de carbonates. Aucune n'a cependant été découverte. Cela signifie que tout océan passé était froid, éphémère, couvert de glace ou encore hostile aux carbonates. La poussière martienne, omniprésente, contient certes de petites quantités de carbonates, mais ceux-ci se sont sans doute formés par interaction directe avec la vapeur d'eau atmosphérique plutôt qu'au contact de l'eau liquide à la surface. Les argiles, une autre classe de minéraux liés à la présence d'eau, sont également rares sur Mars. Tous ces indices s'accordent avec la présence généralisée de minéraux qui sont dégradés par l'eau, tels l'olivine ou le pyroxène, pour dresser le portrait d'une planète majoritairement sèche.

Souvenirs d'eau

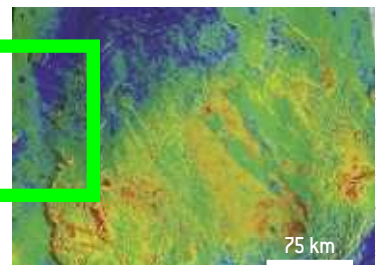
Le site où s'est posé *Opportunity*, le cratère de l'Aigle, présente des concentrations de minéraux d'hématite (en rouge). Les marques blanches au premier plan correspondent aux rebonds des coussins d'air protégeant le module à l'atterrissage. Les zones blanches à l'arrière-plan sont des affleurements rocheux, tel *Le Capitaine* (à droite), qui, après examen, se sont révélés être des dépôts de sulfate et d'hématite.

Les « myrtilles » sont des sphérules de la taille d'une baie qui jonchent le sol du cratère de l'Aigle. Elles ont été trouvées dans ce « bol de myrtilles » (en fausses couleurs) a montré qu'il s'agit d'hématite. Ce minéral s'est probablement déposé par précipitation de l'eau dans les pores des sédiments.



Ces clichés pris par *Opportunity* montrent des globules d'hématite dans le sol (ci-contre) et enchâssés dans une roche (ci-dessus). Les spherules d'un millimètre d'épaisseur (ci-dessus). La structure en couches atteste probablement de la présence passée d'un écoulement.

Aram Chaos est un cratère d'impact également rougi par l'hématite. Les températures nocturnes, du sable et de la poussière plus froids (en bleu), des roches plates au centre du cratère (en orange) seraient des sédiments lacustres. Le terrain fracturé au Sud trahit un effondrement soudain du sol, peut-être quand l'eau souterraine s'en est échappée.



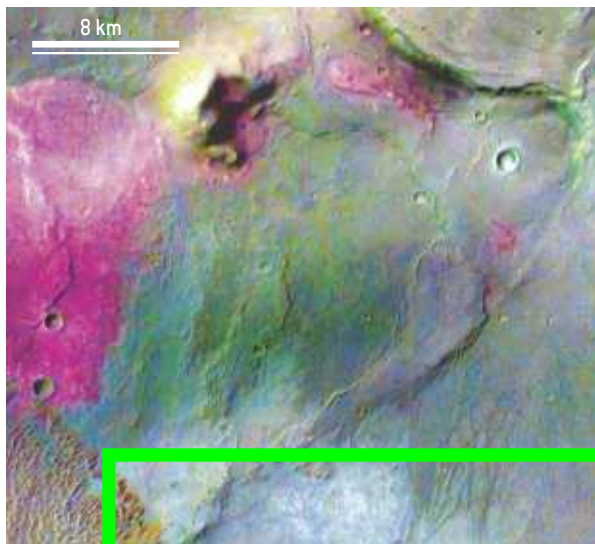
En ce sens, ce que *Spirit* a observé à Gusev est plus représentatif de Mars que ce qu'*Opportunity* a trouvé sur *Meridiani*. Les plaines de *Meridiani* ne sont cependant pas les seuls endroits où l'on aperçoit des « lacs » sur les clichés pris en orbite. *Aram Chaos*, un cratère de 280 kilomètres de diamètre, présente un canal d'écoulement rempli de roches stratifiées qui contiennent de l'hématite, tandis que de gigantesques blocs de roche jonchent le sol du cratère. Il semble qu'un torrent d'eau souterraine ait été libéré de façon brutale et ait entraîné l'effondrement du terrain sous-jacent. Une partie de l'eau a stagné, ce qui a conduit à la formation de sédiments contenant de l'hématite.

De façon similaire, des dépressions situées dans *Valles Marineris* abritent de fines couches de roches tendres où l'hématite est présente, une configuration compatible avec la présence d'eau stagnante. Ces roches, et d'autres de la région équatoriale, sont riches en sulfates, un indice révé-

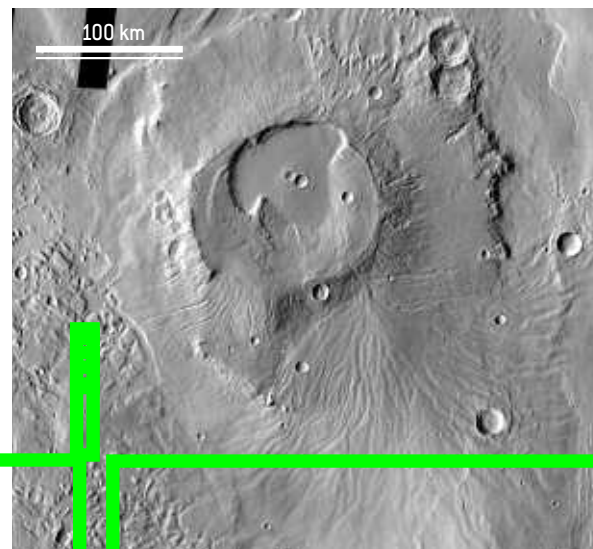
lateur de sédiments recouverts d'eau. Ces anciens lacs ont peut-être subi de nombreux épisodes d'inondation, d'évaporation, voire de congélation, et d'assèchement. Outre les anciens lacs, les géologues ont découvert des réseaux denses de canaux, apparemment créés par des précipitations ou des écoulements de surface.

L'eau a coulé, mais... brièvement et par endroits

Sur la base d'images et de données topographiques qui évoquent des lignes de côte et des fonds océaniques lisses, certains spécialistes affirment même que Mars avait de vastes océans. Mises bout à bout, ces découvertes semblent indiquer que, pendant de brèves périodes, l'eau a été présente de façon stable dans des régions isolées. Pourquoi l'eau



4. Nili Patera, au sommet du volcan géant Surtis Major, est couverte à la fois de laves basaltiques anciennes (en bleu) et de cônes d'éjection de dacite plus récents (en violet). Les dunes de sable (en orange) sont un mélange des deux. La présence de dacite, une lave plus évoluée que le basalte, montre que le volcanisme martien est plus complexe que prévu.



5. Ascraeus Patera, un volcan étendu mais peu actif a déversé des laves de compositions diverses. Il est peut-être la source des poussières trouvées par le module d'exploration Spirit 550 kilomètres plus au sud. Les dépôts volcaniques ont été fortement modelés par l'eau. Les sondes spatiales ont repéré plusieurs glissements de terrain dans la région.

s'est-elle accumulée de façon stable dans ces sites? L'hypothèse la plus répandue fait intervenir une combinaison de chalets géothermiques, de concentrations élevées en sels (qui abaissent le point de congélation) et d'une couche de glace protectrice. Des impacts de grosses météorites ont peut-être sporadiquement réchauffé l'atmosphère.

L'idée d'une planète jadis semblable à la Terre semble néanmoins être derrière nous. L'impression dominante est celle d'une surface ancienne dont les minéraux volcaniques originels ont été préservés de l'eau. Même à Meridiani, les sables basaltiques recouvrent les sédiments lacustres, ce qui indique que le site est asséché depuis deux ou trois milliards d'années. Il existe des lacs et des réseaux d'aspect hydrographique, mais il est possible que l'eau n'y ait circulé que brièvement. Elle était peut-être gelée la majeure partie du temps, et occasionnellement libérée avant de regeler rapidement. Cependant, les planétologues restent perplexes à l'idée d'un monde qui puisse être aussi aride en général, mais aussi aqueux à certains endroits et par moments.

Le passé de Mars mobilise l'essentiel de l'attention, mais des avancées récentes ont relancé l'étude de son activité actuelle. Tout d'abord, un consensus émerge sur le fait que Mars a été géologiquement active dans un passé récent. La plupart des grands volcans trônant au milieu des plaines de lave datent des premiers âges de la planète, mais l'absence de cratères d'impact ou d'écoulements de lave dans des régions telles que Athabasca Vallis suggère qu'elles sont jeunes et résultent d'éruptions datant de quelques millions d'années. Mais aucun volcan actif ou point chaud géothermique n'a été détecté jusqu'à présent, et Mars semble s'être refroidi au point que le volcanisme y est très rare.

La seconde découverte est qu'un colossal réservoir d'eau gelée migrait autour de la planète au gré des changements climatiques. Les deux pôles sont actuellement recouverts de dépôts de glace ou de sédiments riches en glace qui atteignent par endroits plusieurs kilomètres d'épaisseur, sur une sur-

face totale équivalente à celle de la France. Des mesures de température datant des années 1970 avaient montré que la calotte du pôle Nord est constituée de glace d'eau, mais la composition de la calotte Sud restait mystérieuse. Sa température de surface est compatible avec l'hypothèse d'une glace de dioxyde de carbone, mais des mesures de température récentes par THEMIS ont mis en évidence des affleurements de glace d'eau, et il est possible qu'il y en ait aussi sous la glace de dioxyde de carbone.

Il convient d'ajouter à cet inventaire la glace souterraine détectée par les instruments de Mars Odyssey qui captent les rayons gamma et les neutrons produits lorsque des rayons cosmiques frappent le sol. La répartition en énergie des rayons gamma et de ces neutrons nous renseigne sur les éléments chimiques du sol jusqu'à plusieurs mètres de profondeur. Par exemple, l'hydrogène absorbe beaucoup de neutrons, donc un déficit de neutrons indique la présence d'hydrogène sous la surface, le plus vraisemblablement sous forme d'eau (H₂O).

Dans les hautes latitudes, au-delà du 60° parallèle, l'eau semble peut-être constituer plus de 50 pour cent du sol. Une telle abondance de glace ne peut s'expliquer par la simple diffusion de la vapeur d'eau atmosphérique dans le sol poreux. La glace doit avoir été déposée sous forme de neige ou de givre.

Aux latitudes intermédiaires, certaines formations trahissent aussi la présence probable de glace. Des sols zébrés sont visibles entre 30 et 50 degrés de latitude dans les deux hémisphères. Cette texture pourrait résulter du réchauffement du sol et de l'évaporation de la glace, processus qui entraînerait un effritement. Dans les dépressions des pentes froides orientées vers les pôles, on trouve un autre type de dépôts : des couches de matériaux atteignant jusqu'à dix mètres d'épaisseur et correspondant peut-être aux résidus de neige d'eau presque pure. Une des découvertes les plus remarquables a été celle de petits ravins fraîchement creusés à des latitudes intermédiaires, restant peut-être

d'eau de source, de la fonte de la glace de surface, ou de la fonte de blocs de neige par leur base.

Tous ces éléments suggèrent que Mars, comme la Terre, connaît des cycles de glaciation. L'inclinaison de l'axe de rotation de la planète oscille en effet avec une amplitude de 20 degrés, suivant une période de 125 000 ans. Lorsque l'inclinaison est faible, les pôles sont les régions les plus froides de la planète, et il y tombe plus de neige l'hiver qu'il ne s'en évapore l'été, ce qui conduit à une accumulation de glace au fil des ans. Quand l'inclinaison augmente, les pôles reçoivent plus de lumière et se réchauffent au détriment des latitudes intermédiaires. L'eau se déplace alors des pôles vers l'équateur. Pendant que la neige s'accumule à la surface, l'eau liquide peut s'écouler par-dessous. Actuellement les latitudes intermédiaires se réchauffent et la couverture de neige a presque disparu. Si ce modèle de glaciation, conçu par Benjamin Levard et Jacques Laskar, de l'Observatoire de Paris, est correct elle reviendra dans 25 000 à 50 000 ans.

Les spécialistes de Mars sont comme des aveugles qui voulant décrire un éléphant l'explorent à tâtons, mais peinent à s'en faire une image globale. La géologie martienne varie d'un endroit à l'autre. La planète présente une grande variété de textures, un passé complexe, voire paradoxal, et un présent dynamique. Les roches volcaniques sont aussi variées que sur Terre, et les manifestations de la présence d'eau sont fort diverses. La planète a subi autrefois d'énormes inondations et peut-être même des pluies, même si ses roches anciennes contiennent encore des minéraux qui se dégradent rapidement dans un environnement humide. Le cli-

mat est sec et froid, mais le module d'exploration *Opportunity* a découvert sur le fond d'une ancienne mer, témoin d'un climat autrefois très différent. L'eau liquide est instable dans les conditions actuelles, mais des ravins se sont formés récemment et continuent peut-être à se former.

La diversité des environnements d'un lieu à l'autre et d'une époque à l'autre est un élément favorable si l'on envisage l'existence d'une vie sur Mars. Même si c'était de façon intermittente, des lacs ont existé pendant de longues périodes, peut-être suffisamment pour que la vie apparaisse. Des organismes pourraient encore aujourd'hui s'accrocher à la vie hivernant pendant les épisodes froids, et se réveiller quand les conditions s'améliorent. Lors des missions à venir, c'est dans les plaques de glace qui subsistent et les ravins que les robots devront chercher des traces de vie.

Philippe Christensen est professeur à l'Université de l'Arizona à Tempe, et a participé au développement des missions *Mars Global Surveyor*, *Mars Odyssey* et *Mars Exploration Rover*.

Mars Express, mapping with Omega, in *Science*, vol. 307, numéro spécial, pp. 1574-1597, 11 mars 2005.

Spirit at Gusev Crater, in *Science*, vol. 305, numéro spécial, pp. 793-845, août 2004.

Opportunity at Meridiani Planum, in *Science*, vol. 305, numéro spécial, pp. 1697-1756, 3 décembre 2004.

P. Christensen et al., *Morphology and composition of the surface of Mars: Mars Odyssey THEMIS results*, in *Science*, vol. 300, pp. 2056-2061, 27 juin 2003.

Auteur & Bibliographie

UN VOYAGE DANS L'ESPACE ET DANS LE TEMPS QUE VOUS NE REGRETTerez PAS !



« Ne boudons pas notre plaisir de découvrir ce très bon ouvrage qui nous propose un tour d'horizon complet des caractéristiques de la planète rouge, dans un langage simple et visiblement destiné pour une grande part aux béotiens. [...] Bref, une réussite. »

Astronomie Magazine

« Il s'agit là d'un document de référence sur nos connaissances de la planète rouge au moment où elle passe au plus près de la Terre. »

Bulletin de l'Union des physiciens



Chez le même éditeur :

À la recherche de l'eau dans l'Univers
de Thérèse Encrenaz

D'où vient cette eau extraterrestre ? Quel rôle y joue-t-elle ?
A-t-elle permis l'éclosion de la vie ailleurs ?
L'eau liquide existe-t-elle ?

Format 18,5 x 24,5 • 176 pages ISBN 2-7011-3707-1

23,50 euros

En vente chez votre libraire ou sur www.pourlascience.com



Des avalanches sous la mer

Les avalanches sous-marines transportent plus de matière à la surface de la Terre que tout autre phénomène. Après des dizaines d'années d'observation, les géologues comprennent aujourd'hui leurs causes, leurs natures et leur pouvoir dévastateur.

Bruno Savoué

Décembre 2000 à bord du navire océanographique *L'Atalante*, nous nous apprêtons à plonger à bord du robot sous-marin *Victor*. Après avoir cartographié un vaste réseau d'anciennes vallées (ou paléovallées) sous-marines au large du fleuve Congo, nous réalisons une série de plongées jusqu'à 5 000 mètres de profondeur le long de la vallée actuelle. La dernière plongée de *Victor* a lieu dans le canyon sous-marin qui prolonge l'estuaire du Congo. La structure géologique de cette gorge sous-marine nous intrigue, notamment parce que, par endroits, elle entaille le fond sur près de 1 400 mètres. À 2 580 mètres de profondeur, *Victor* achève sa descente, et nous nous attendons à découvrir le fond du canyon, mais... les écrans vidéo se rouillent. Plus d'images, aucun parasite, rien. Aussitôt c'est le branle-bas chez les ingénieurs, qui, croyant à une panne, relancent plusieurs fois le système. En vain. Inquiet, car *Victor* « vit » l'une de ses premières campagnes, je donne l'ordre de remonter trente mètres au-dessus du fond, les écrans tournent brusquement au rouge sang, puis à mesure que nous montons, nous voyons sur les écrans une image se reconstituer sur laquelle une sorte de neige semble tomber à nos pieds. Nous ne retrouvons une visibilité correcte qu'à 200 mètres au-

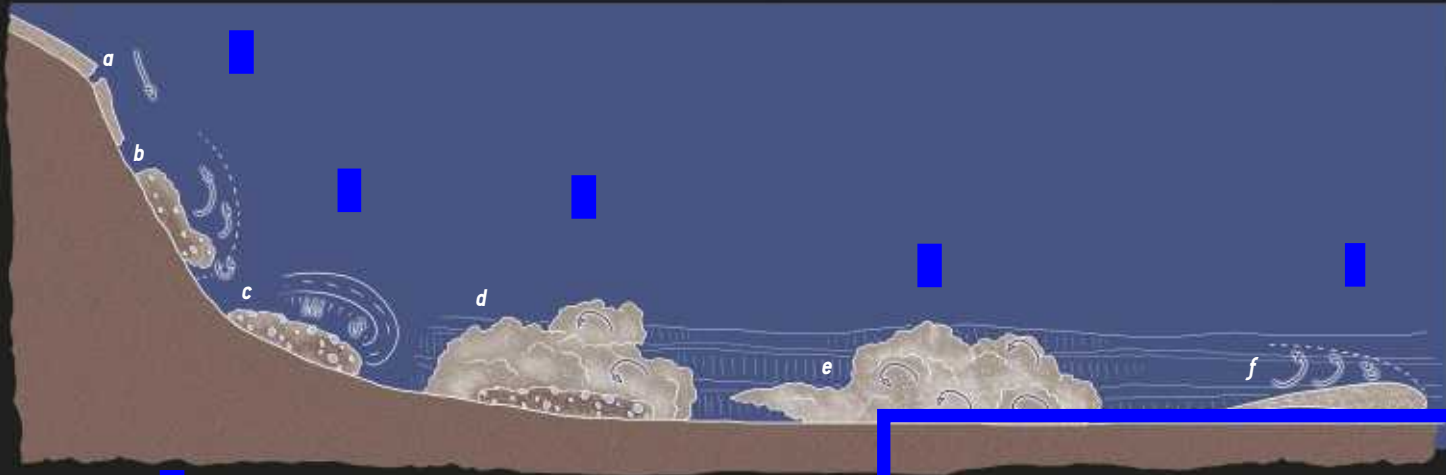
dessus du fond. *Victor* n'est pas en panne, mais est au cœur d'une avalanche sous-marine. Par la suite, le système de localisation acoustique fonctionnant bien, nous reprenons dans l'avalanche pour estimer sa vitesse : quatre kilomètres par heure. Nous venons d'assister au travail de l'une des plus grandes forces à l'œuvre au fond des océans !

Il y a seulement 50 ans, le fond des océans était plus mystérieux que la Lune. On décrivait les abysses comme des endroits tranquilles où rien ne semblait se passer. Tout a changé depuis que l'évolution des techniques d'exploration – particulièrement la cartographie acoustique – a rendu accessible la géologie de vastes régions sous-marines jusqu'à nos inconnues. Les cartes dressées ont révélé de nombreux canyons creusés par le passage régulier des avalanches sous-marines, les écoulements qui démarrent près des continents et atteignent souvent les plaines abyssales. Ce système de transport de matière vers les grands fonds a un impact notable sur la sédimentation et la vie dans les grands fonds. À l'IFREMER, nous avons acquis de nombreuses connaissances sur ce phénomène dans le cadre de projets européens et de collaborations avec l'industrie. Nous allons en exposer l'essentiel ici.

Les avalanches sous-marines représentent la plus importante forme de transport de matière à la surface de la Terre. Un petit calcul simple et... faux l'illustre.

1. Cette avalanche sous-marine turbulente a été déclenchée par un glissement de terrain sur la pente continentale (à l'arrière-plan), qu'elle a dévalée jusqu'à la plaine abyssale (premier plan). Nommées courants de turbidité, les avalanches turbulentes

empruntent les chenaux creusés par les avalanches précédentes ; elles transportent d'énormes quantités de sédiments vers les plaines abyssales, « cannibalisent » les sédiments présents sur leur passage et peuvent rompre les câbles téléphoniques.

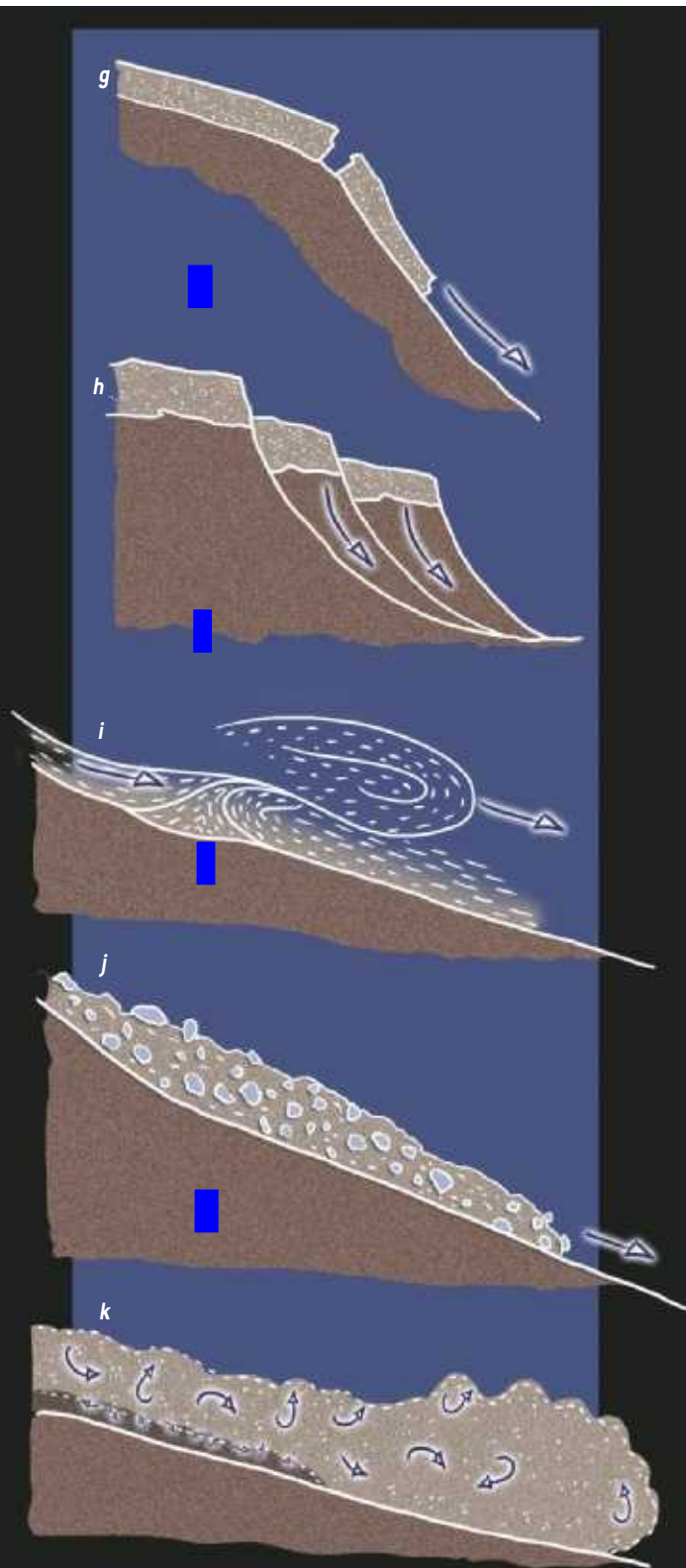


2. Une avalanche sous-marine met en jeu les mêmes types de processus gravitaires que les mouvements de matière à terre. Dans les glissements de terrain (*g* et *h*) et les slumps (*affaissement en i*), les distances parcourues et la déstructuration des sédiments d'origine sont limitées. Au contraire, dans les coulées de débris (écoulement laminaire en *j*) et les courants de turbidité (écoulements turbulents en *k*), la déstructuration des sédiments d'origine est totale et les distances parcourues sont très grandes. On observe fréquemment qu'une avalanche commencée par un glissement de terrain (*a*), se transforme en un slump (*b*), puis en un écoulement laminaire (*c*) où la turbulence apparaît (*d*) puis se développe tout à fait (*e*) longtemps avant que l'avalanche, perdant son énergie et déposant sa matière, ne finisse par se déposer dans la plaine abyssale (*f*).

Supposons que dans une région donnée, une avalanche se déclenche tous les 100 ans, et corresponde, en moyenne, à un dépôt de sédiments de trois centimètres d'épaisseur. Notons que si ces chiffres sont plausibles, les taux de sédimentations varient d'un endroit à l'autre et selon les époques : au large de l'Amazone, par exemple, jusqu'à 26 mètres de sédiments se sont déposés tous les 1 000 ans pendant la dernière glaciation (il y a environ 20 000 ans) contre moins d'un mètre pour 1 000 ans aujourd'hui. Au large du fleuve Congo, trois centimètres de sédiments par siècle représentent 300 mètres d'épaisseur en un million d'années et jusqu'à 30 kilomètres en 100 millions d'années... Si ce rythme, les océans ne sont toujours pas comblés, c'est que notre calcul est simpliste : d'une part, les sédiments se tassent avec le temps ; d'autre part, le socle océanique s'élève par subsidence. Néanmoins, cette estimation illustre l'ampleur de ce type de sédimentation à l'échelle géologique.

Géographie sous-marine

Du reste, l'œuvre accomplie prouve assez cette ampleur. Au cours des âges, la sédimentation océanique a comblé d'immenses bassins, qui, plissés par la tectonique, ont fourni les roches sédimentaires des montagnes ou des bassins sédimentaires. Au large du Nigeria, se trouve une pile sédimentaire de 12 kilomètres d'épaisseur... La sédimentation océanique est également à l'origine de vastes réseaux de vallées sous-marines, que les avalanches empruntent et creusent à chaque passage. De tels réseaux de vallées sous-marines sont présents face à l'embouchure de la plupart des grands fleuves. Celui du Gange, le plus vaste du monde, couvre 2,2 millions de kilomètres carrés, soit quatre fois la France. La largeur des vallées – de plusieurs centaines de mètres à deux kilomètres de largeur – reflète celle des courants qui les sillonnent. Leurs longueurs



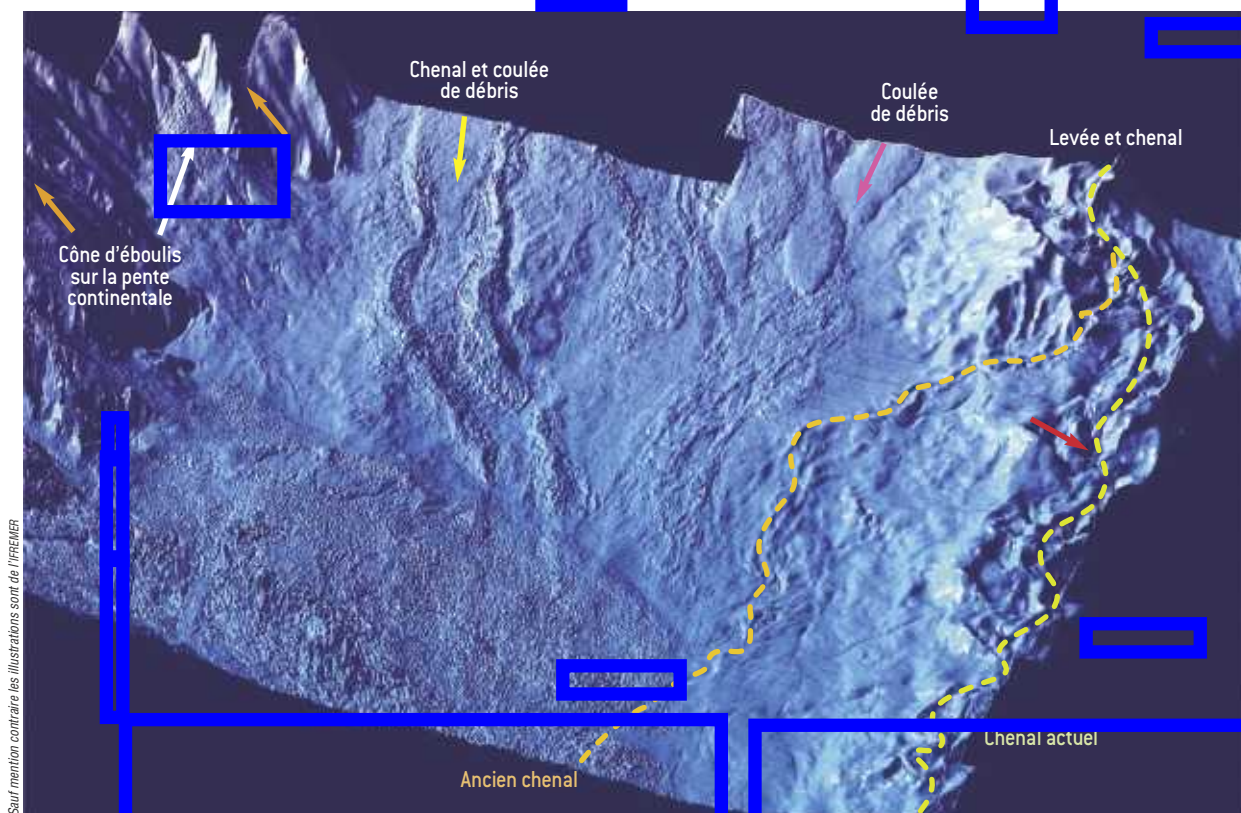
– jusqu’à 2.500 kilomètres – donnent une idée de la distance parcourue par ces avalanches. En outre, étant donné la profondeur de ces vallées et la hauteur de leurs flancs (constitués de sédiments déposés par les courants qui débordent), on estime que les courants sont épais de plusieurs centaines de mètres. Ainsi, les masses transportées par les avalanches dans ces vallées sont gigantesques : elles se mesurent parfois en millions de mètres cubes. Celle de 1929 à Terre-Neuve couvrit ainsi 50000 kilomètres carrés (quatre fois la Bretagne) d’une couche de près d’un mètre d’épaisseur...

Quel mécanisme explique un phénomène d’une telle ampleur ? Rappelons qu’en général, la zone côtière se prolonge sous la mer par un plateau plus ou moins avancé, caractérisé par une profondeur d’eau inférieure à 100-200 mètres. Ce plateau est dominé par l’action des marées, de la houle et des tempêtes. Au large, il est bordé par un talus escarpé entaillé par des canyons, dont les pentes surplombent les grands fonds océaniques (la profondeur moyenne des océans est d’environ 4000 mètres).

Ce décor posé, imaginons une particule de terre arrachée à une montagne par la pluie. En quelques semaines ou en quelques siècles, *via* rivières et fleuves, cette particule atteint la mer. Son voyage ne s’arrête pas là, car, petit à petit, marées et courants marins évacuent les sédiments fluviaux, mais aussi éoliens vers le sommet du talus continental. Progressivement, les sédiments s’accumulent au bord de l’abîme, forment des amas de plus en plus instables, qui finissent par dévaler la pente. Ces mouvements sont dits

laïers ou glissements de terrain qui se produisent à terre ou encore aux processus pyroclastiques des éruptions volcaniques explosives (des nuées ardentes dévalant les pentes). Toutefois, c’est surtout avec les avalanches de neige que l’analogie est frappante : l’accumulation rapide de sédiments (l’équivalent de fortes chutes de neige) forme un manteau mal consolidé en haut d’une pente, qui finit par s’écrouler, soit parce que le seuil de stabilité est dépassé, soit sous l’influence d’une stimulation extérieure (un séisme). Cette similitude explique que les études de risques en mer reprennent souvent les méthodes utilisées pour les avalanches de neige (recherche des pentes fortes, estimation des épaisseurs de sédiments non consolidés, etc.). Toutefois, à la différence des avalanches de neige, les avalanches sous-marines se produisent aussi sur des pentes très faibles (moins de un degré) et prennent facilement des proportions gigantesques.

De fait, les mouvements d’eau qu’elles déclenchent sont souvent si importants qu’ils engendrent des tsunamis en surface. Ce fut par exemple le cas en 1929 à Terre-Neuve (voir l’encadré page 42) ou en 1979 à Nice. Il est très vraisemblable que le séisme du 26 décembre 2004 à Sumatra (magnitude 9) a déclenché de grandes avalanches. Nous ignorons quelle fut leur contribution au tsunami, mais nous observons que les séismes pratiquement aussi puissants (magnitudes 8,6 et 8,7) qui secouèrent à nouveau la région le 28 mars 2005 n’ont pas créé de raz-de-marée. D’après certains sismologues, cela s’explique par des mouvements de l’écorce terrestre plus horizontaux que verticaux.



3. Ce paysage sous-marin a été cartographié en Asie par sonar. Il révèle les traces de différents types d'avalanches sous-marines. À gauche, deux canyons entaillent la pente continentale (flèches orange). Une zone d'écroulement est visible entre les deux canyons (flèche blanche). Dans la plaine (au centre), un large couloir emprunté par des coulées de débris se

sine sur le fond (flèche jaune). Des coulées de débris sont visibles sur la pente à droite (flèche rose). De ce même côté, où se trouve une île, une longue vallée sous-marine est visible cheminant jusqu'au centre de la plaine (flèche rouge). Régulièrement empruntée par des avalanches turbulentes, cette vallée alimente la plaine abyssale en sédiments.

Cependant, il est tout aussi possible qu'aucun tsunami n'ait été formé parce que, par manque de matière, aucune avalanche ne pouvait plus se déclencher. Pour le savoir, il faut aller voir...

Les géologues distinguent aujourd'hui trois grandes sortes d'avalanches : les glissements en masse, les écoulements laminaires et les écoulements turbulents. Équivalents sous-marins des glissements de terrain observés sur terre, les glissements en masse se produisent quand un pan du talus continental en équilibre instable se décroche brusquement et dévale la pente. Selon la pente, un glissement en masse se transforme plus ou moins vite en écoulement, c'est-à-dire en un mouvement global de nombreuses particules en suspension.

Écoulements laminaires

Les écoulements laminaires (non turbulents) se produisent quand un matériau cohésif, par exemple une suspension dense d'argile, se met en mouvement (le matériau n'a pas incorporé assez d'eau pour rompre la cohésion). Ils sont donc caractérisés par des concentrations et des viscosités (la résistance à

l'écoulement) élevées. Un écoulement laminaire s'arrête quand son « moteur », c'est-à-dire la gravité, devient moins fort que les frottements des sédiments sur le fond. La coulée se dépose alors instantanément sur place : on dit qu'elle « gèle ».

Les coulées de débris représentent un cas particulier d'écoulement laminaire. Elles transportent une grande variété d'éléments hétérogènes au sein d'une matrice sableuse ou argileuse. Il peut s'agir de graviers, de « galets mous » d'argiles de tailles millimétriques à centimétriques (des blocs d'argiles arrachés au fond et polis par les frottements), de galets ou même de blocs rocheux. En raison de cette multitude de constituants, les propriétés et les comportements des coulées de débris varient. D'un point de vue physique, elles se comportent comme des fluides de Bingham (qui ne s'écoulent qu'après qu'une force minimale leur a été appliquée). Plusieurs mécanismes ont été proposés pour expliquer la façon dont les particules, voire les blocs, sont portées dans l'écoulement – pression de dispersion, rigidité de la matrice, flottabilité –, mais un seul point est avéré : les expériences effectuées par Hampton en 1972 ont montré que les particules qui participent à un tel écoulement se répartissent selon leur taille dans le sens de la longueur. Tandis que les blocs et les fragments les plus grossiers se concentrent dans la tête de l'écoulement, les éléments les plus petits sont dans la queue. Par ailleurs, quand la coulée gèle, les débris les plus gros migrent vers les bords de la coulée et vers le haut. Tous ces phénomènes de tri produisent des sédiments caractéristiques.

Quant aux écoulements turbulents, ils forment des avalanches, qui sont aussi capables de transporter d'énormes masses, et sont constituées d'une « tête » turbulente (le front d'écoulement) et d'un « corps » prolongé par une « queue » très diluée. L'incorporation d'eau est maximale au sein de la tête, là où l'épaisseur du courant est aussi la plus grande. L'épaisseur d'un écoulement turbulent varie de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres selon la vitesse, la pente, la largeur de la vallée empruntée, etc.

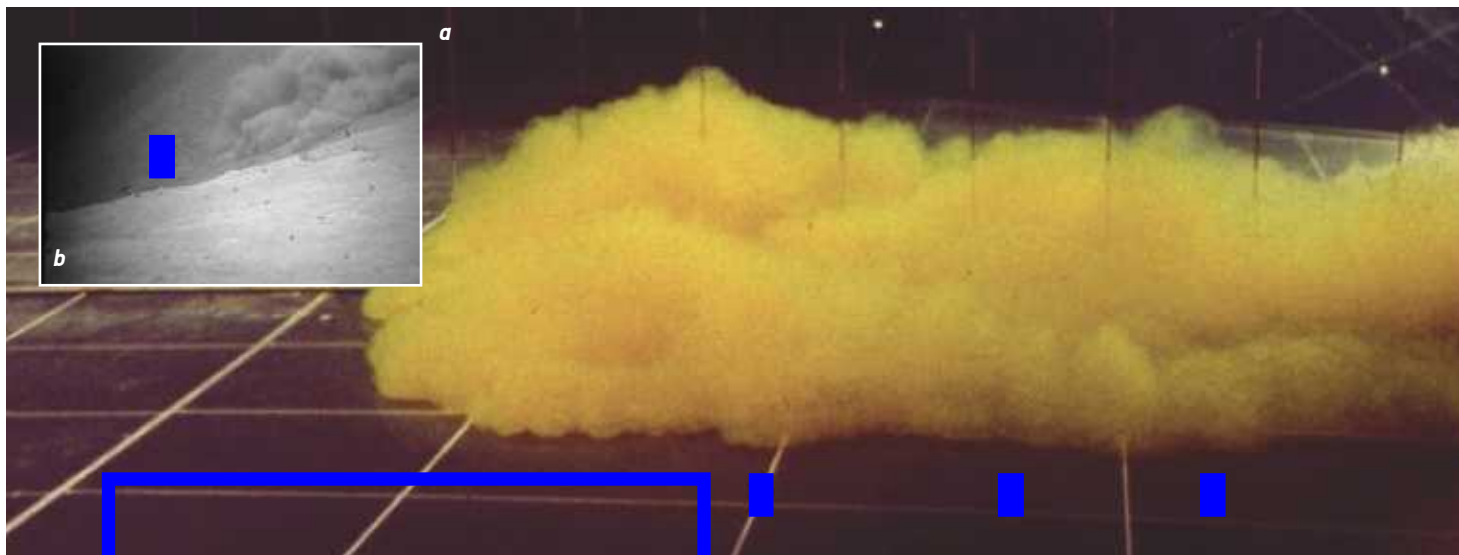
Pour décrire les écoulements turbulents, on utilise des modèles qui les assimilent à un fluide newtonien, c'est-à-dire à un fluide de viscosité constante, qui, comme l'eau, coule dès que le support est en pente. Leur turbulence se traduit par de nombreux mouvements désordonnés, dont l'effet global est de maintenir en suspension les particules transportées. D'un point de vue physique, l'analogie avec les avalanches de neige poudreuse est manifeste, puisque le processus est aussi turbulent et énergétique (voir la figure 4). Dans les écoulements turbulents sous-marins, ce sont les particules mises en mouvement par la pesanteur qui entraînent l'eau. Cette dernière n'est qu'un partenaire passif du mélange, même si elle peut faciliter le déclenchement de l'avalanche et en amplifier les effets.

Après son déclenchement, une avalanche sous-marine se développe en trois phases. Pendant la première, elle s'amplifie en érodant et en entraînant les sédiments meubles rencontrés sur son chemin, ce qui la densifie et l'accélère. Ensuite se déroule la phase de transport, pendant laquelle des quantités égales de sédiments sont en permanence arrachés et déposés tout au long du chemin. Au cours de cette phase de transport, qui peut se prolonger sur des centaines de kilomètres, le bilan des masses arrachées et déposées est

Un nouveau type d'avalanches

En 1993, T. Mulder, de l'Université de Bordeaux I, et J. Savitski, de l'Université du Colorado, ont mis en évidence une nouvelle sorte de courant de turbidité sous-marin : les courants hyperpycnaux. Habituellement, l'eau douce étant moins dense que l'eau de mer, les sédiments véhiculés par les fleuves forment de grands panaches en surface. Toutefois, la charge sédimentaire en suspension transportée par certains fleuves peut, par exemple lors de crues exceptionnelles, être assez importante pour que la densité de la suspension sédimentaire devienne supérieure à celle de l'eau de mer. Dans ce cas, l'écoulement turbulent du fleuve plonge au fond de la mer et emprunte les réseaux de canyons : c'est un courant hyperpycnal.

Un tel courant diffère d'un courant de turbidité classique parce qu'il est sans cesse alimenté en sédiments par le fleuve. Des tels courants ont d'abord été découverts dans les lacs, l'eau des rivières étant souvent plus dense que l'eau des lacs. En mer, il a fallu attendre plus longtemps pour les mettre en évidence. Ainsi, avec T. Mulder, nous avons récemment étudié les courants hyperpycnaux du Var, un fleuve méditerranéen typique, caractérisé par des crues soudaines et violentes au printemps et à l'automne. Nous avons constaté que pendant les crues du Var, tandis que les débits sont décuplés, la charge en suspension mesurée à l'embouchure du fleuve dépasse plusieurs dizaines de kilogrammes par mètre cube. Environ une fois tous les quatre ans, cette charge devient si importante qu'un courant hyperpycnal s'amorce. Des carottes prélevées par l'IFREMER en 1986 et en 1996 face au fleuve et au large ont révélé la structure particulière des dépôts hyperpycnaux. Comme un courant hyperpycnal accélère progressivement au cours de la montée en charge de la crue, il dépose des particules de plus en plus grossières, ce qui se traduit par une évolution granulométrique caractéristique. Ce travail sert depuis de référence aux géologues qui veulent caractériser un dépôt hyperpycnal.



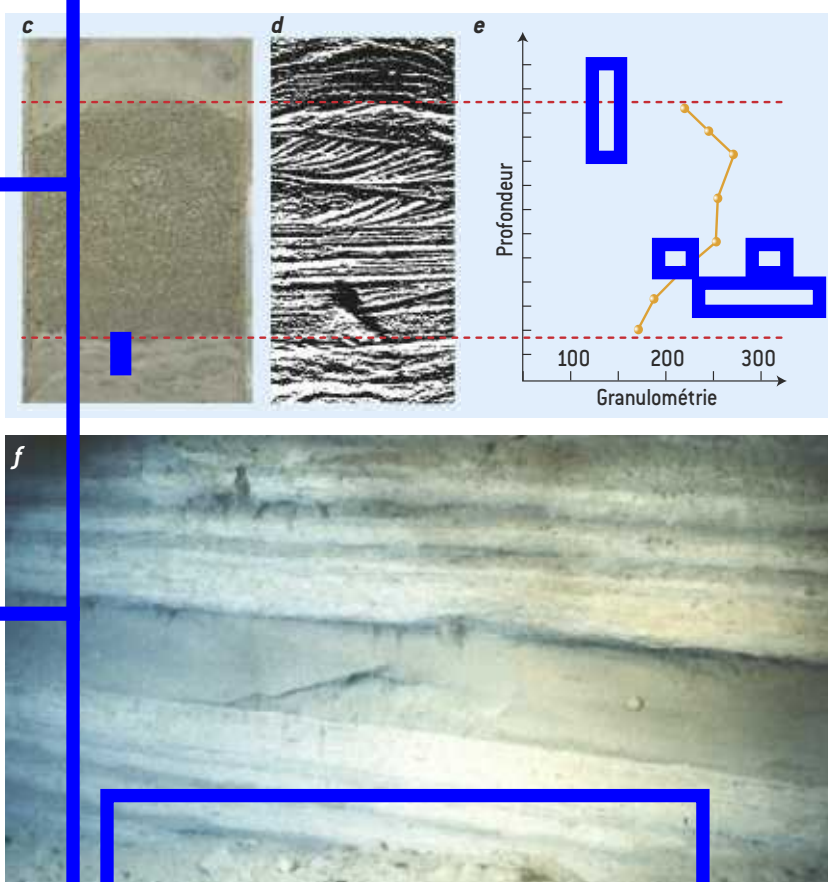
équilibré. Enfin, la troisième phase est celle de la décélération de l'écoulement, puis de sa mort. Celle-ci est en général due à la disparition de la turbulence, qui se produira par exemple parce que l'écoulement s'étale dans la plaine abyssale. Toutefois, un écoulement turbulent peut aussi s'arrêter parce que la pente devient faible (voire s'inverse) ou encore parce que trop de particules qu'il transporte se déposent sur le fond. Les processus de sédimentation dominent généralement pendant la troisième phase.

Les géologues distinguent deux types d'écoulements turbulents : les courants de turbidité et les bouffées turbides. Les premiers, caractérisés par une alimentation continue par l'arrière, peuvent durer plusieurs dizaines d'heures, voire des jours. En revanche, les bouffées turbides sont des écoulements de quantités limitées de matériaux, brefs – ils durent de quelques minutes à quelques heures – et de longueur réduite.

Nombré d'avalanches commencent par un glissement de terrain, qui donne un écoulement laminaire (voir la figure 2), lequel se transforme souvent en un écoulement turbulent. L'eau est incorporée au sein de la matière en mouvement, de sorte que les particules, dont la concentration dans l'écoulement diminue, sont de plus en plus libres de se mouvoir et que des tourbillons se forment.

Un tel enchaînement – glissement de terrain, écoulement laminaire, courant de turbidité – s'est déroulé à Nice en 1979 lors de l'agrandissement de l'aéroport. Les travaux de remblayage avaient créé un amas instable au bord d'une pente sous-marine très forte située à quelques centaines de mètres du rivage. Ce remblai a brusquement glissé, entraînant une partie de la plate-forme aéroportuaire en construction. Ce glissement évolua vite en une avalanche sous-marine, qui coupa deux câbles téléphoniques situés à 80 et à 110 kilomètres de l'aéroport plusieurs heures après le glissement initial. Dans le même temps, un tsunami submergea le port d'Antibes.

Puisque glissements de terrain et écoulements laminaires peuvent évoluer vers la turbulence, il serait intéressant de savoir qui, des avalanches laminaires ou turbulentes, contribue le plus aux transferts de matière vers le fond. Nous pensons pour notre part que les courants de turbidité sont en volume les plus gros contributeurs, même



4. Les courants de turbidité sont des écoulements turbulents comparables aux avalanches de neige, comme l'illustrent les volutes photographiées en bassin d'essai ci-dessus (a) ou depuis un sous-marin (b). Pour identifier la nature et la structure des dépôts laissés par une avalanche, les spécialistes prélèvent des carottes dans le fond de la mer (c). Si l'on soumet des échantillons aux rayons X, des différences de densité invisibles à l'œil nu apparaissent (d). L'image ainsi obtenue guide le prélèvement d'échantillons à différents niveaux du dépôt, dont la granulométrie est ensuite mesurée à l'aide d'un granulomètre laser. La courbe donnant la granulométrie en fonction de la hauteur (e) montre ici que la taille des particules croît en début de sédimentation, ce qui est inhabituel dans les dépôts laissés par les courants de turbidité [turbidites]. En bas, la vallée sous-marine du Var dans les Alpes-Maritimes a été creusée sur une quinzaine de mètres de profondeur par l'avalanche de 1979, ce qui a créé une paroi, où est visible un empilement de turbidites.



5. Le canyon sous-marin du Var, très souvent parcouru par des courants de turbidité, est tapissé de dunes de galets. La longueur d'onde de ces courants, donnée par la distance entre les stries sur cette image sonar du canyon, est un indicateur de la vitesse des avalanches. Ainsi, on note que sur les côtés (*flèche rouge*), cette vitesse est moindre qu'au centre (*flèche bleue*) puisque les dunes sont plus rapprochées.

si le sujet suscite encore un débat chez les géologues. Cette conviction est renforcée par l'observation, tant sur les pentes sous-marines actuelles et sur les glacis continentaux (au pied de ces pentes) que sur terre (sur le fond émergé d'anciennes mers), de la présence très fréquente de turbidites, des dépôts sédimentaires produits par les courants de turbidité. Avalanche après avalanche, d'épaisses séquences sédimentaires se sont accumulées sur parfois des kilomètres d'épaisseur.

Après s'être longtemps limitée aux plateaux continentaux, l'exploration pétrolière s'est récemment tournée vers des zones plus profondes de l'océan, de sorte que la connaissance des avalanches et des turbidites est devenue un enjeu industriel. En effet, les avalanches transportent vers les profondeurs beaucoup de matériel détritique dont du sable, qui, une fois consolidé, forme du grès. Cette roche poreuse constitue un excellent piège pour les hydrocarbures.

La découverte des courants de turbidité

Curieusement, c'est en Suisse, qu'à la fin du XIX^e siècle, des géologues proposèrent le concept d'avalanches sous-marines. Ils avaient observé que dans le prolongement du delta du Rhône, des chenaux de sédiments saisonniers chargés de sédiments en suspension avaient creusé des ravins. Cependant, la découverte du phénomène remonte à la catastrophe des Grands Bancs de Terre-Neuve en 1929.

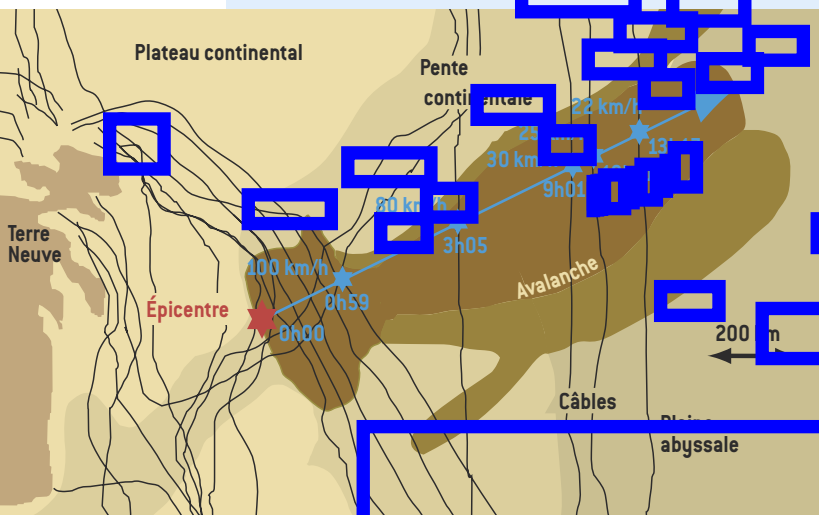
Le 18 novembre de cette année-là, un tremblement de terre de magnitude 7,2 sur l'échelle de Richter se produit au large du Canada. Son épipcentre est situé en mer sur le talus du cône du Saint-Laurent, là où passent la plupart des câbles sous-marins télégraphiques. Des câbles sont instantanément brisés. D'autres, situés en aval de l'épicentre, sont coupés une heure, trois heures et jusqu'à 13 heures après le séisme.

De nombreux indices révèlent la puissance du phénomène sous-marin qui vient de se produire. L'onde de choc est ressentie dans toutes les provinces maritimes autour de 17 heures. À la suite, vers 19 heures 30, un raz-de-marée atteignant parfois 7,5 mètres de hauteur frappe les côtes de Terre-Neuve. Quarante villes et villages de pêche, abritant une population de 10 000 personnes, sont dévastés et 27 personnes périssent.

On pense alors que le tsunami et la rupture des câbles résultent de l'effondrement du plancher océanique. L'affaire est vite classée, mais deux ingénieurs, A. Hodgson et W. W. Dox, effectuent une étude très complète de la catastrophe. Malheureusement, ils ne publieront leur rapport qu'au moment de prendre leur retraite en 1948. Peu après, P. H. Kuenen, de l'Université Columbia, découvre ce rapport et fait le rapprochement avec des expériences qu'il a menées en 1950 avec d'autres géologues. Ils constatent que les turbidites sont des courants de haute densité, capables de transporter des sédiments grossiers et dotés d'un très fort pouvoir érosif : exactement ce qu'il faut pour expliquer les ruptures de câbles observées en 1929.

Une thèse s'impose alors : le séisme a causé un gigantesque glissement de terrain (la zone touchée fait plus de 20 000 kilomètres carrés, soit environ la superficie de la Bretagne). Le courant de turbidité qui en a résulté a atteint une vitesse de 70 kilomètres par heure, entraînant la rupture de 12 câbles en 28 endroits. On a reconstitué la progression du courant d'après les heures de rupture des différents câbles. Les nombreuses études réalisées depuis et, en particulier, celle que l'IFREMER a récemment menée avec des chercheurs de la Commission géologique du Canada, ont montré que l'avalanche est née de la fusion de très nombreux glissements de terrain dans la zone de l'épicentre du séisme et impliquant à chaque fois entre 10 et 40 mètres d'épaisseur de sédiments. Le courant de turbidité a été très puissant, puisqu'on retrouve des galets à plus de 300 kilomètres du glissement. Il a déposé plus de 200 kilomètres cubes de matières solides en une couche de quelques centimètres.

Les turbidites se sont déposées dans la zone de l'épicentre du séisme et impliquant à chaque fois entre 10 et 40 mètres d'épaisseur de sédiments. Le courant de turbidité a été très puissant, puisqu'on retrouve des galets à plus de 300 kilomètres du glissement. Il a déposé plus de 200 kilomètres cubes de matières solides en une couche de quelques centimètres. Les turbidites se sont déposées dans la zone de l'épicentre du séisme et impliquant à chaque fois entre 10 et 40 mètres d'épaisseur de sédiments. Le courant de turbidité a été très puissant, puisqu'on retrouve des galets à plus de 300 kilomètres du glissement. Il a déposé plus de 200 kilomètres cubes de matières solides en une couche de quelques centimètres. Les turbidites se sont déposées dans la zone de l'épicentre du séisme et impliquant à chaque fois entre 10 et 40 mètres d'épaisseur de sédiments. Le courant de turbidité a été très puissant, puisqu'on retrouve des galets à plus de 300 kilomètres du glissement. Il a déposé plus de 200 kilomètres cubes de matières solides en une couche de quelques centimètres.



L'heure indiquée 0h00 correspond au déclenchement du courant sur le site de l'épicentre du tremblement de terre du 18 novembre 1929 (*étoile rouge*). Sur la carte, ont été repérés les sites de rupture des câbles télégraphiques sous-marins (*étoiles bleues*), ainsi que les heures de ces ruptures. Les géologues en ont déduit la vitesse de propagation de l'avalanche.

lors de la naissance de l'océan, alors que celui-ci était encore peu profond. Ce mécanisme explique la présence de gisements pétroliers importants au pied des talus continentaux, voire plus au large. Les techniques d'aujourd'hui rendent possibles les forages en haute mer, mais les coûts associés sont énormes. C'est pourquoi la croissance fine de la structure des réservoirs pétroliers d'origine turbidique est un gros enjeu. Par ailleurs, les installations pétrolières posées au fond sont parfois directement menacées par les glissements et les avalanches. L'IFREMER collabore avec les pétroliers tant pour les aider à apprécier le risque associé aux avalanches que pour les aider à établir la structure sédimentaire des pièges à pétrole.

Quels enjeux ?

C'est ainsi qu'IFREMER et la Société Elf-Aquitaine Production (qui fait aujourd'hui partie de Total) ont lancé en 1998 le projet de recherche ZaïAngo visant à explorer, décrire et comprendre la marge continentale face au Gabon, au Congo et à l'Angola et plus particulièrement le réseau de vallées sous-marines du Zaïre. Ce projet faisait suite à la découverte par 350 mètres de fond du champ pétrolier Girasol à l'intérieur de certaines paléovallées sous-marines du Zaïre. Situées au large de l'Angola, ces vallées vieilles de 15 millions d'années sont recouvertes aujourd'hui par près de 2000 mètres de sédiments. L'objectif principal du projet était de mieux connaître leur structure interne.

Outre ces applications industrielles, vers où se dirige la recherche sur les avalanches sous-marines ? Pour le

moment, notre connaissance de ce phénomène est surtout empirique. Pour progresser, il va nous falloir associer la collecte de données d'observation *in situ* et la modélisation. Depuis quelques années, on tente de placer des instruments de mesure dans le passage des avalanches afin de préciser leurs caractéristiques. Pour le moment, les problèmes de capteurs et d'ancrage restent difficiles à résoudre, mais il est d'ores et déjà clair que les géologues disposeront de stations d'observations utilisables d'ici à quelques années. Quant à la modélisation, elle devra combiner le développement de codes numériques et la réalisation d'expériences de calibration en bassin afin de simuler les différents types d'avalanche. On espère ainsi apprécier plus précisément ce qui déclenche les avalanches, ainsi que leur impact tant sur le fond que sur les structures industrielles qu'elles rencontrent sur leur chemin : tels les câbles sous-marins, les pipelines ou gazoducs, les têtes de puits de forage... Plus généralement, on voudrait aussi connaître leur influence sur les écosystèmes des profondeurs marines.

Bruno SAVOYE, géologue, est responsable du Laboratoire de sédimentologie marine du Centre IFREMER de Brest.

B. SAVOYE, *Océans, marge et pétrole profond*, in *Accès*, pp. 262-263, 2002.

N. BONNEAU et al., *Morphology and architecture of the present canyon and channel system of the Zaire deep-sea fan*, in *Marine and Petroleum Geology*, vol. 19, pp. 443-461, 2002.

A. HUGOT et al., *Nouvelle modélisation des écoulements gravitaires sous-marins : application à l'effondrement de Nice de 1979*, in *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 333, série II, 133-139, 2001.

Auteur & Bibliographie

Abonnement Spécial Été

Offrez-vous Pour La Science 13 n°s au prix de 12 !



54 € seulement
au lieu de ~~77,80 €*~~

30% de réduction

BON D'ABONNEMENT

À retourner, accompagné de votre règlement à
Abonnements Pour La Science - 8 rue Férou - 75278 Paris cedex 06

☐ **OUI**, je m'abonne à **Pour La Science**
avec l'offre spéciale été : 13 n°s dont 1 spécial
pour **54 €** seulement au lieu de **77,80 €***

☐ **Je règle par :**

☐ Chèque ci-joint

☐ Carte bancaire

Numéro de la carte :

** Date d'expiration

Signature : _____

**Inscrire les 3 derniers chiffres de la série de 7 figurant au dos de votre carte.

Mes coordonnées :

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Ville : _____

Code Postal : _____

Les avantages de l'abonnement

- ☒ Je profite d'un tarif avantageux
- ☒ Je bénéficie de tous les services de www.pourlascience.com
- ☒ Je reçois **Pour La Science** directement chez moi, avant sa parution en kiosque
- ☒ Je lis un n° de plus de **Pour La Science**

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont collectées pour le traitement de votre commande. Elles peuvent donner lieu à l'émission de documents d'actes et de notification auprès de Pour La Science. Pour votre information, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. En cas de refus de votre part, il vous suffira de nous en informer par simple courrier. *Par rapport au prix hors taxes

Un outil universel de la physique

Les diagrammes inventés par Richard Feynman ont sorti l'électrodynamique quantique d'une impasse calculatoire. Ils ont bouleversé la pratique de la physique des particules et de bien d'autres domaines.

David Kaiser

Le légendaire physicien George Gamow expliquait un des avantages de son métier : il pouvait s'allonger sur un divan et fermer les yeux, personne ne savait s'il travaillait ou dormait. La facétie faite ouïe, mais c'est une mauvaise représentation du travail des théoriciens dont la recherche n'est pas constituée de pensées abstraites déconnectées de la pratique calculatoire.

Depuis le milieu du XX^e siècle, les physiciens théoriciens utilisent ces « hiéroglyphes », dénommés diagrammes de Feynman, qui les aident à effectuer des calculs difficiles. Toutefois, les physiciens ont dû apprendre à s'en servir.

Le physicien théoricien américain Richard Feynman inventa ces diagrammes à la fin des années 1940 afin de simplifier les calculs quantiques des interactions électromagnétiques (électrodynamique quantique ou QED pour *Quantum electrodynamics*). Ces diagrammes intéressèrent vite les spécialistes du noyau atomique et de la physique des particules, puis les spécialistes du problème à n corps en théorie de la matière condensée. À la fin des années 1960, des physiciens commencèrent à les utiliser pour mener des calculs en théorie de la gravitation. Les diagrammes de Feynman ont amélioré la pratique calculatoire des physiciens, tout comme les calculs par ordinateur ont permis le décryptage du génome.

Les physiciens englués

Feynman présenta ses diagrammes novateurs lors d'un colloque organisé dans un hôtel des Pocono Mountains en Pennsylvanie au printemps 1948. Vingt-huit théoriciens s'y étaient réunis pendant plusieurs jours pour d'intenses discussions et la plupart travaillaient à des problèmes d'électrodynamique quantique « non triviaux », selon l'euphémisme de l'époque.

En électrodynamique quantique, les électrons et les autres particules fondamentales échangent des photons virtuels (des particules « fantômes » de lumière) qui véhiculent l'interaction électromagnétique. Une particule virtuelle emprunte son énergie au vide pour commencer une existence éphémère à

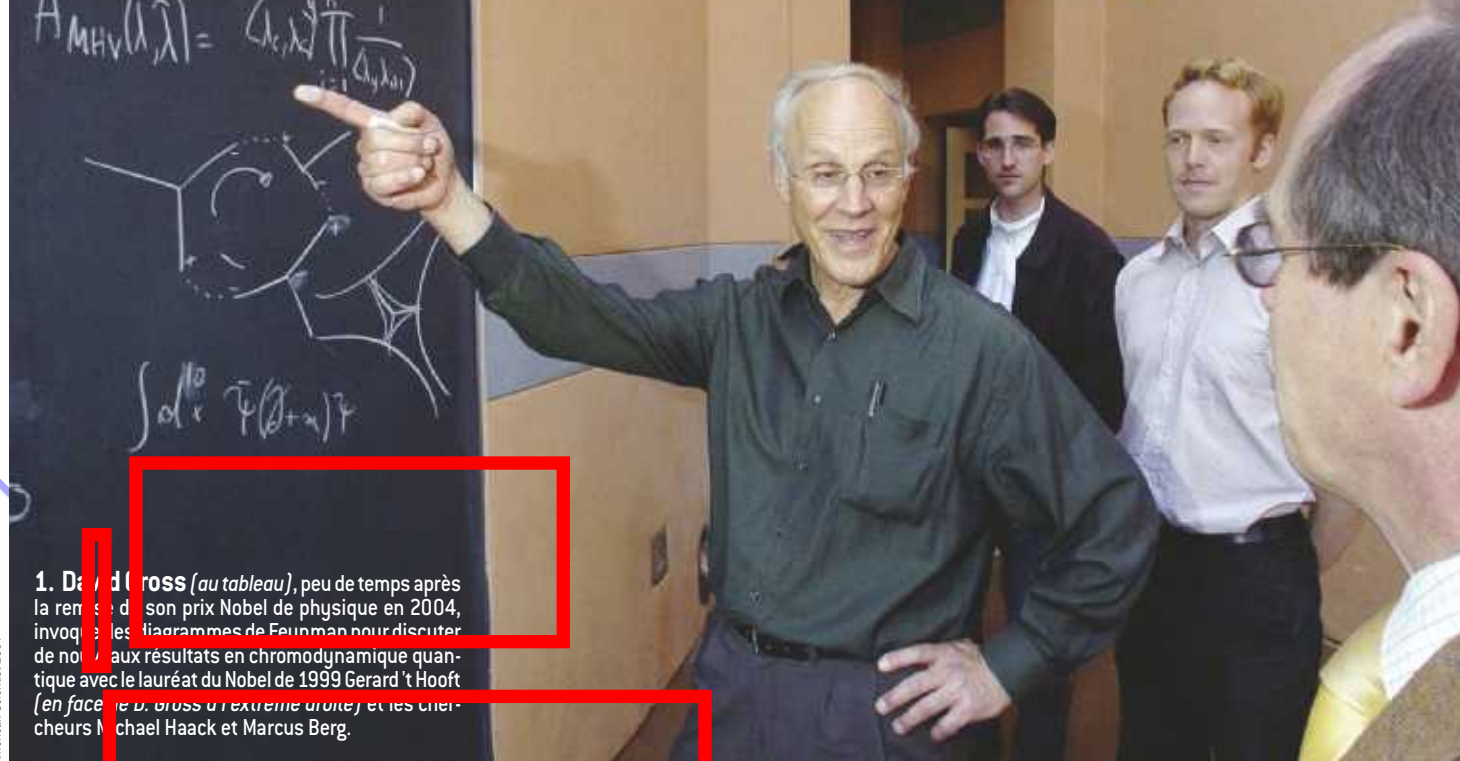
partir d'un lieu. Ces particules virtuelles restituent l'énergie empruntée et disparaissent en un temps très court déterminé par le principe d'incertitude de Heisenberg.

Deux difficultés principales sabordaient les efforts des physiciens. D'abord, ils savaient, depuis le début des années 1930, que l'électrodynamique quantique conduisait à des quantités infinies. Les physiciens répondaient à des questions élémentaires (par exemple : quelle est la probabilité pour que deux électrons se rencontrent ?) par des approximations acceptables du premier ordre ; hélas, dès qu'ils tentaient de pousser leurs calculs à une précision supérieure, la validité des calculs s'effondrait. La source de la difficulté était le photon virtuel susceptible d'emprunter une quantité quelconque d'énergie, voire une quantité infinie, tant qu'il la restituait vite : des quantités infinies surgissaient.

Le second problème était le formalisme, d'une insupportable lourdeur, un cauchemar algébrique où il fallait combiner les contributions des différents termes. Les électrons pouvaient interagir en échangeant un nombre arbitraire de photons : plus ils échangeaient de photons, plus les expressions, qu'il fallait sommer, devenaient inextricables.

Tous les espoirs n'étaient cependant pas perdus : Heisenberg, Pauli, Dirac et les autres architectes de l'électrodynamique quantique pensaient qu'ils pouvaient simplifier ce calcul compliqué, en raison de la faible valeur de la charge e de l'électron (e^2 est approximativement égal à $1/137$ dans des unités adéquates). À chaque fois que l'on introduit un nouveau photon échangé par une paire d'électrons, on introduit un facteur e^2 . Un scénario où les électrons n'échangent qu'un photon comporte donc un facteur e^2 , celui où les électrons échangent deux photons ne pèse que d'un facteur e^4 , beaucoup plus petit. Ce dernier événement ne contribuerait au calcul total qu'un centième de l'échange d'un seul photon. Le terme correspondant à l'échange de trois photons serait un dixième de fois plus petit ; aussi les calculs pourraient-ils être tronqués après quelques termes.

Ce calcul est une méthode dite perturbative : on ne conserve que les premiers termes, car les contributions des suivants sont supposées insignifiantes. Le calcul est



1. David Gross (au tableau), peu de temps après la remise de son prix Nobel de physique en 2004, invoque les diagrammes de Feynman pour discuter de nouveaux résultats en chromodynamique quantique avec le lauréat du Nobel de 1999 Gerard 't Hooft (en face de D. Gross à l'extrême droite) et les chercheurs Michael Haack et Marcus Berg.

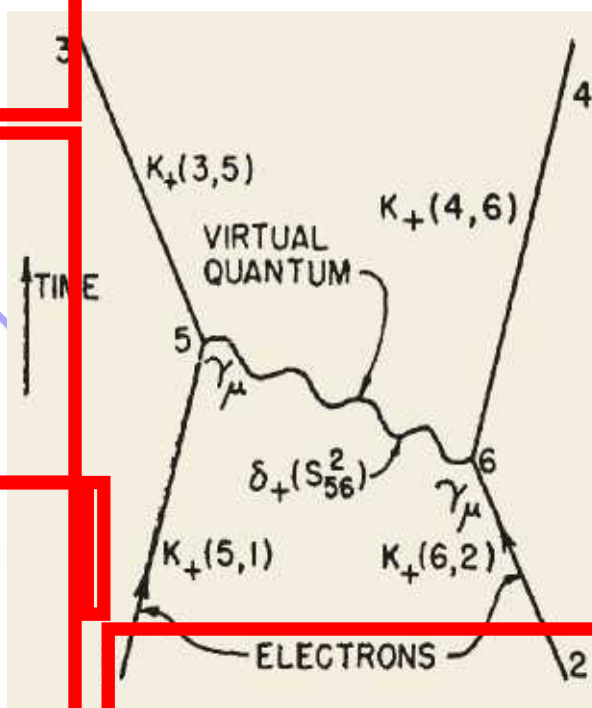
toutefois bien difficile... Un étudiant de Heisenberg avait tenté le calcul de l'interaction de deux électrons en e^4 dans les années 1930 et s'était noyé dans des centaines de termes. Chacun s'étendait sur quatre ou cinq lignes d'algèbre. En raison de difficultés liées aux infinis et à la lourdeur des calculs, l'électrodynamique quantique était devenue, dans les années 1940, un casse-tête inextricable.

Le remède de Feynman

Lors du séminaire de Pocono, Feynman annonça à ses collègues théoriciens que ses diagrammes permettaient de se frayer un chemin dans les méandres des calculs. Dans l'un de ses premiers exemples, il examina la diffusion d'un électron par un autre électron. Il dessina un diagramme similaire à celui qui fut reproduit dans son premier article sur le sujet (voir la figure 2 ci-contre). Ce diagramme représentait des événements en deux dimensions : une dimension spatiale sur l'axe horizontal, le temps sur l'axe vertical.

Le graphe dessiné correspond à l'une des expressions mathématiques – il y en a une infinité – que l'on additionne pour calculer la probabilité de diffusion des deux particules l'une sur l'autre en fonction de leurs caractéristiques (quantités de mouvement, spins, etc.). Il s'agit ici de l'expression mathématique la plus simple et on l'interprète physiquement comme la propagation de deux électrons qui échangent un seul photon. Ses deux lignes droites brisées sont associées aux deux électrons, tandis que la ligne ondulée est associée au photon virtuel. Chaque élément du diagramme (chaque demi-droite, le segment de ligne ondulée, les deux points de croisement ou « vertex ») représente un facteur mathématique, et le diagramme lui-même représente une expression compliquée – une intégrale (ici huit dimensions) où la fonction à intégrer est le produit des facteurs associés aux éléments du diagramme.

Dans un tel diagramme, chaque vertex fait intervenir la valeur e de la charge de l'électron. Le diagramme dessiné par Feynman est donc d'ordre e^2 ; c'est l'ordre le plus bas, car l'échange de plus d'un photon introduit des facteurs e



American Scientist 2004

2. Diffusion électron-électron décrite par l'un des plus simples des diagrammes inventés par Richard Feynman. Ce diagramme transpose la vision quantique de la répulsion de deux particules de même signe, ici de deux électrons. En physique classique, l'interaction se fait à travers le champ électromagnétique du premier électron qui agit sur le second et réciproquement ; en physique quantique, le champ est véhiculé par des photons. Un électron 1 (segment en bas à droite) émet un photon virtuel (ligne ondulée) qui frappe alors un second électron 2 (ligne continue en bas à gauche). La trajectoire rectiligne du premier électron est d'ailleurs déviée à cause du recul lors de l'émission du photon : la trajectoire du second électron est modifiée par l'impact du photon. Comme le suggère le titre *Approche spatio-temporelle* de l'article qui accompagne les diagrammes, Feynman dessina à l'origine des diagrammes où les dimensions étaient l'espace et le temps. Ici, l'axe horizontal représente l'espace. Explicitons les notations : $K(5,1)$ est la probabilité que l'électron 1 se déplace des points 1 à 5, $K(6,2)$ la probabilité que l'électron 2 se déplace de 2 à 6. $K(3,5)$ et $K(4,6)$ s'interprètent similairement. $\delta_+(s_{56}^2)$ est la probabilité qu'un photon virtuel se déplace de 5 à 6. γ_μ est un facteur lié au spin de l'électron.

additionnels. La valeur de ce graphe était une bonne approximation de la probabilité de diffusion des deux électrons. Cependant, Feynman et son auditoire savaient que les deux électrons peuvent échanger un nombre arbitraire de photons.

Feynman utilisa ses diagrammes pour décrire ces différentes possibilités. Par exemple, les électrons avaient neuf façons différentes d'échanger deux photons, chaque échange faisant intervenir quatre vertex (pour lequel le terme mathématique correspondant était multiplié par un facteur e^4 et non e^2).

La différence avec le couplage à un seul photon était que la plupart des intégrales correspondant aux diagrammes à deux photons divergeaient (devenaient infinies), comme l'avaient vu les physiciens pendant deux décennies. Feynman montra comment certains infinis problématiques étaient supprimés par des astuces de calcul, qu'il avait pour certaines trouvées, et pour d'autres empruntées (une procédure que les physiciens baptisèrent *renormalisation*). L'ordre des opérations avait son importance : Feynman partait des diagrammes pour écrire les intégrales pertinentes, et ensuite seulement modifiait les intégrales pour éliminer les infinis.

Avec ses diagrammes, Feynman, qui avait résolu un vieux défi, espérait un triomphe ou au moins un bon accueil. Or le sort s'acharna contre Feynman durant le colloque. D'abord, sa présentation succédait à une présentation marathon du prodige aculé de Harvard, Julian Schwinger. Schwinger avait élaboré différentes techniques (sans diagrammes) pour supprimer les infinis des calculs de l'électrodynamique quantique, et les auditeurs étaient rivés à leur siège, ne s'arrêtant que brièvement pour le repas, pendant que Schwinger calli-

graphait la démonstration. Au contraire, la présentation de Feynman fut rapide et brouillonne : personne ne suivait ce que Feynman faisait. Il dut subir de nombreuses interruptions de Niels Bohr, Paul Dirac ou Edward Teller, pour qui les diagrammes contredisaient les principes de la mécanique quantique selon lesquels on ne peut localiser exactement une particule. D'autres physiciens exaspérés exigeaient des règles claires gouvernant l'utilisation des diagrammes. Feynman quitta le colloque déçu, voire déprimé.

La frustration de Feynman à Pocono a souvent été commentée ; ce qui reste étonnant est que l'incompréhension a perduré. Même des amis proches et des collègues de Feynman avaient du mal à comprendre et à utiliser ces diagrammes. Des exposés et collègues de Feynman, tels que Hans Bethe, ne parvenaient pas à saisir ce que Feynman faisait et lui demandaient constamment de les guider.

D'autres théoriciens qui avaient assisté au colloque de Pocono, dont Robert Marshak de Rochester, ne savaient utiliser ces nouvelles techniques et demandaient à Feynman de mener les calculs à leur place. En 1953, cinq bonnes années après que Feynman a inventé sa nouvelle technique, un des grands théoriciens de Stanford, Leonard Schiff, écrivait dans une lettre de recommandation, qu'un étudiant avait l'extraordinaire talent de bien manier les diagrammes !

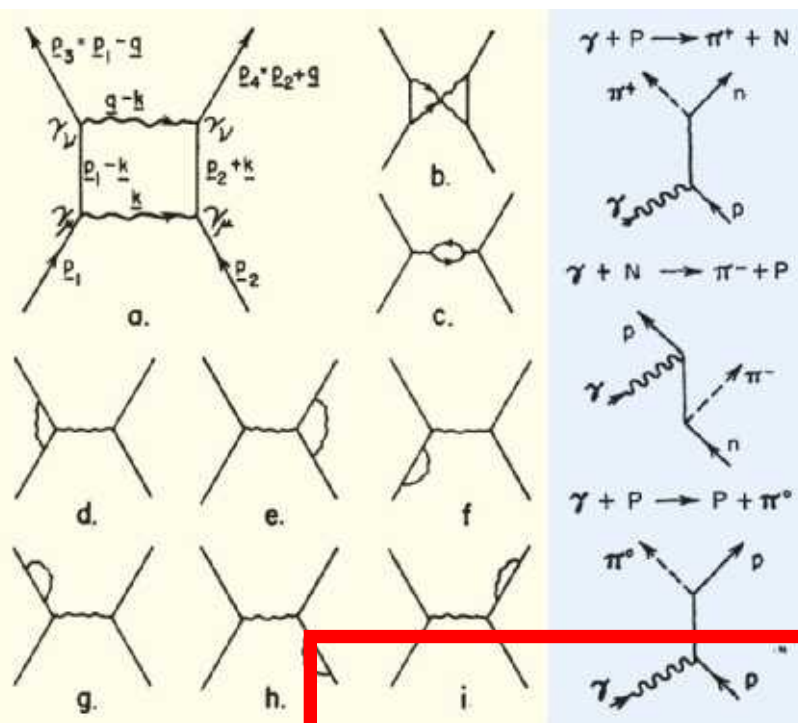
Feynman est grand, et Dyson est son prophète

À force de persévérance, les diagrammes se sont frayé un chemin, en particulier grâce à Freeman Dyson, qui avait étudié les mathématiques à Cambridge avant de partir pour les États-Unis. Il arriva à Cornell à l'automne 1947 pour étudier avec Hans Bethe. Il y rencontra Feynman, juste au moment où celui-ci élaborait sa nouvelle approche de l'électrodynamique quantique et ils discutèrent longuement des diagrammes. Ce dialogue se poursuivit lorsqu'ils traversèrent le pays en voiture l'été suivant, quelques mois après la présentation de Pocono.

Plus tard, Dyson assista à une école d'été en physique théorique à l'Université du Michigan et il eut l'occasion de parler à Schwinger comme il avait parlé à Feynman. À la fin de l'été, Dyson prit un poste à l'Institut des études avancées de Princeton, dans le New Jersey.

Peu de temps après son arrivée à Princeton, F. Dyson soumit un article à la *Physical Review* qui comparait les méthodes de Feynman et de Schwinger. (Il analysait aussi les méthodes d'un théoricien japonais, Tomonaga Sin-iti, qui avait travaillé sur ce problème pendant et après la guerre ; Schwinger était arrivé indépendamment à une approche très similaire à celle de Tomonaga.) F. Dyson démontrait que les trois démarches étaient mathématiquement équivalentes. Cet article de F. Dyson, ainsi qu'un autre plus conséquent l'hiver suivant, furent tous deux publiés quelques mois avant les propres articles de Feynman. Aussi, des années après la publication des articles de Feynman, la paire d'articles de F. Dyson était citée plus souvent que ceux de Feynman.

F. Dyson y justifiait les règles d'utilisation des diagrammes, et comblait les lacunes de l'exposé de Feynman au séminaire de Pocono ; il proposait un mode d'emploi qui



3. Cet ensemble des diagrammes (à gauche) où sont répertoriées les différentes façons dont deux électrons échangent deux photons virtuels fut ajouté par Feynman à son article princeps sur l'utilisation des diagrammes. Pour comptabiliser les interactions des particules élémentaires, les physiciens utilisèrent des diagrammes de Feynman (à droite) même lorsqu'ils calculaient des perturbations n'étaient pas légitimes.



Archives Emilio Segrè, Institut américain de physique



4. Richard Feynman et d'autres physiciens s'étaient réunis en juin 1947 sur l'île de Shelter, dans l'Etat de New York, quelques mois avant la réunion de la Conférence de Shelter. À gauche, Victor Weisskopf, John Wheeler et Hermann Feshbach. Assis, de gauche à droite, Abraham Pais, Richard Feynman, Hermann Feshbach et Julian Schwinger. Sur la photographie de droite,

Victor Weisskopf (à gauche) et Freeman Dyson sont en route pour Copenhague en 1952. Les démonstrations et les explications de F. Dyson ont alors que les postdoctorants formés pendant cette période à l'*Institute for Advanced Studies* de Princeton en ont démocratisé l'utilisation.

incluait une liste d'instructions pour le tracé des diagrammes et expliquait comment il fallait écrire l'expression mathématique associée. F. Dyson établit aussi comment les infinis pouvaient être éliminés de n'importe quel calcul, quelle que soit sa complexité (Tomonaga, Schwinger et Feynman n'avaient abordé que le premier terme de correction perturbative et ce dans des cas particuliers).

Dyson convertit l'*Institute for Advanced Studies* de Princeton en usine à diagrammes de Feynman. Pour comprendre comment il faut considérer les changements dans la formation postdoctorale pendant cette période. Avant la Seconde Guerre mondiale, seule une petite fraction des physiciens qui finissaient leur thèse aux États-Unis poursuivait une formation postdoctorale ; il était encore courant à l'époque de prendre un poste soit dans l'industrie, soit à l'Université juste après la thèse. En physique théorique, ceux qui poursuivaient les études après la thèse s'expatriaient généralement vers les centres européens. Ce n'était qu'à Cambridge, Copenhague, Göttingen ou Zurich que les théoriciens pouvaient « apprendre la musique », pour reprendre l'expression célèbre de I. Rabi, au lieu d'annoncer le « livret » de la recherche. À leur retour, un bon nombre de ces mêmes physiciens américains, parmi lesquels Robert Oppenheimer, et Rabi, se consacrèrent à la formation des jeunes théoriciens.

L'*Institute for Advanced Studies*, sous la houlette d'Oppenheimer, devint l'un des centres clés pour la formation des jeunes théoriciens. Après avoir dirigé le laboratoire de Los Alamos pendant la guerre, Oppenheimer quitta son poste de directeur en 1947 pour prendre la tête de l'Institut, en partie afin de se rapprocher de Washington où il était consultant, et transforma l'Institut en un « hôtel intellectuel » des physiciens théoriciens.

F. Dyson arriva à l'automne 1948 et se joignit à une cohorte de 11 autres jeunes théoriciens. Un des nouveaux bâtiments n'avait pas été achevé dans les temps et le petit groupe de postdoctorants passa l'essentiel du semestre entassé dans une même pièce. Ces conditions de vie débouchèrent sur des collaborations intenses sous la houlette de F. Dyson, qui forma ses pairs au calculs à l'aide de dia-

grammes. Un des calculs les plus célèbres fut publié par deux collègues de F. Dyson à l'Institut, Robert Karplus et Norman Kroll. Ils menèrent jusqu'à l'ordre e^4 le calcul du moment magnétique de l'électron, qui caractérise l'interaction d'un électron avec un champ magnétique externe. C'était un calcul monumental faisant intervenir une longue liste de diagrammes de Feynman compliqués, et les postdoctorants calculèrent qu'un électron devait avoir un moment magnétique de 1,001147 au lieu de 1 (dans les unités appropriées), résultat dont la précision à six chiffres confirmait les dernières mesures expérimentales. Karplus et N. Kroll ont montré ainsi que les diagrammes de Feynman permettaient des calculs longtemps jugés impossibles.

Plus ces quatre cinquièmes des articles qui utilisent des diagrammes de Feynman dans la *Physical Review*, entre 1949 et 1954, ont été soumis directement par les postdoctorants de Princeton, ou par des étudiants qu'ils avaient formés dans leur nouveau poste. La vaste majorité des 114 auteurs qui utilisèrent les diagrammes pendant cette période le firent parce qu'ils y avaient été initiés soit par F. Dyson, soit par un de ses nouveaux apprentis. Des années plus tard, Schwinger se plaignit que les diagrammes de Feynman avaient « amené le calcul aux masses » ; les diagrammes lui semblaient un instrument « de pédagogie, certainement pas de la physique ».

Les diagrammes ne firent pas leur nid partout. Il fallait bien plus que les résultats de recherche publiés ou des ouvrages pédagogiques pour bien utiliser les diagrammes. Les clés de la réussite furent le travail des mentors et la mobilité des postdoctorants. La technique des diagrammes se répandit aussi au Japon et en Grande-Bretagne, alors que le surcroît de la Guerre froide étouffa, jusque dans les années 1950 (et les rencontres « Atomes pour la paix »), leur diffusion en Union soviétique.

En dépit des commentaires désobligeants de Schwinger, l'efficacité des diagrammes pour les calculs perturbatifs en électrodynamique quantique était indéniable. Au vu des progrès qu'ils autorisaient, on aurait pu penser que leur utilisation se généraliserait vite : ce ne fut pas le cas. Seule

une poignée d'auteurs publièrent des calculs perturbatifs d'ordre élevé dans l'esprit de celui de Karplus et N. Kroll. Curieusement, les physiciens utilisèrent plus les diagrammes pour étudier les interactions nucléaires que pour les interactions électromagnétiques des électrons et des photons.

Les diagrammes mal utilisés

Des dizaines de nouvelles particules, tous les mésons (dont on sait maintenant qu'ils sont des particules composites, constituées des quarks et de leurs contreparties en antimatière), apparaissent dans les accélérateurs de particules. Or les diagrammes n'étaient pas facilement transposables aux particules nucléaires, qui interagissent fortement. Alors que les théoriciens exploitaient la petitesse de la charge de l'électron pour ordonner leurs développements perturbatifs en électrodynamique quantique, la force du couplage entre particules nucléaires (g^2) était beaucoup plus grande, comprise

entre 2 et 7 et non $1/137$. Les théoriciens traitaient la diffusion des particules nucléaires comme ils traitaient la diffusion photo-électron, par une série de diagrammes de Feynman de plus en plus compliqués, chacun faisant intervenir un nombre plus important de vertex. Chaque diagramme d'ordre supérieur faisait intervenir des facteurs g^2 supplémentaires et ces diagrammes dominaient alors les termes d'ordre plus bas. Feynman mit en garde Enrico Fermi en 1951 : « Ne crois à aucun calcul en théorie des mésons qui fasse intervenir des diagrammes de Feynman ! »

En dépit de la mise en garde de Feynman, des dizaines de jeunes théoriciens utilisèrent (et continuent aujourd'hui) des diagrammes pour les forces nucléaires. Plus de la moitié de tous les articles incorporant des diagrammes dans la *Physical Review* entre 1949 et 1954 traitaient de physique nucléaire.

Certains physiciens se servirent des diagrammes pour décrire les collisions dans les nouveaux accélérateurs. Tout au long de la décennie 1950, les diagrammes de Feynman

Faire de la physique avec les diagrammes de Feynman

Les diagrammes de Feynman sont un outil puissant pour calculer en théorie quantique. Dans ce type de calculs, la quantité pertinente est un nombre complexe, ou une « amplitude », dont le carré du module correspond à une probabilité. Par exemple, si $A(t, x)$ représente l'amplitude qu'une particule soit au point x à l'instant t , la probabilité correspondante est alors $|A(x, t)|^2$.

En électrodynamique quantique, les amplitudes sont construites à partir d'un certain nombre d'ingrédients. Pour illustrer le propos, nous pouvons par exemple noter :

- l'amplitude associée au trajet d'un électron de x à y : $B(x, y)$;
- l'amplitude associée au trajet d'un photon de x à y : $C(x, y)$;
- l'amplitude associée à la diffusion d'un électron sur un photon : D .

Feynman a introduit des diagrammes pour représenter toutes ces possibilités. Ici e représente la charge de l'électron, le paramètre caractérisant l'intensité de l'interaction des photons et des électrons. Les règles pour utiliser ces diagrammes sont simples :

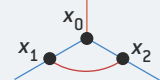
- à chaque vertex, deux lignes électroniques rencontrent une ligne de photon ;
- on dessine tous les diagrammes topologiquement distincts correspondant au processus d'interaction envisagé ;
- on construit ensuite l'expression mathématique correspondant à chaque diagramme : on substitue un facteur $B(x, y)$ pour chaque ligne d'électrons virtuels, $C(x, y)$ pour chaque ligne de photons virtuels, eD pour chaque vertex, et on intègre sur tous les points faisant intervenir des particules virtuelles. Comme le facteur e est petit, ($e^2 \sim 1/137$) les diagrammes faisant intervenir peu de vertex contribuent plus à l'amplitude globale que les diagrammes plus complexes. Les physiciens calculent ainsi une approximation de l'amplitude A , avec une série de termes de plus en plus compliqués. Par exemple, considérons la façon dont un électron interagit avec un champ électromagnétique. D'un point de vue quantique, un tel champ est décrit comme un assemblage de photons. Dans le cas le plus simple, l'électron (la *particule en jeu*) diffusera sur un seul photon (ligne rouge) en un seul vertex (l'interaction au point x_0) :

$$A_{(1)} = eD$$

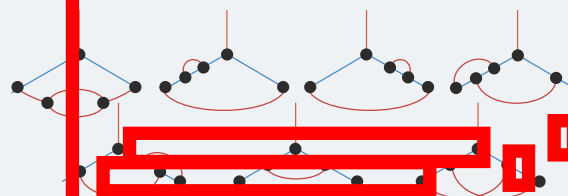
Seules des particules réelles apparaissent dans ce diagramme, donc la seule contribution à l'amplitude de probabilité provient du vertex. Mais de nombreux

autres événements peuvent perturber le malheureux électron. Au niveau suivant de complexité, l'électron incident peut envoyer un photon virtuel, avant d'interagir avec le photon réel puis de réabsorber le photon virtuel :

$$A_{(2)} = e^3 D B(1,0) D B(0,2) D C(1,2)$$



Dans ce diagramme, les lignes d'électrons et de photons se rencontrent en trois points, et par conséquent l'amplitude pour cette contribution est proportionnelle à e^3 (trois fois le paramètre d'interaction). On donne les points x_1 et x_2 . Des choses encore plus compliquées peuvent arriver. Au niveau suivant de complexité, sept diagrammes de Feynman distincts entrent en ligne de compte :



On traduit le diagramme en haut à gauche en termes de son amplitude associée :

$$A_{(3)}^a = e^5 [D B(1,0) D B(0,2) D C(1,2) + D B(0,1) D B(1,2) D C(1,0) + D B(1,1) D B(0,2) D C(1,0) + D B(1,0) D B(1,1) D C(1,2) + D B(0,1) D B(1,1) D C(1,2) + D B(1,0) D B(0,1) D C(1,2) + D B(1,1) D B(0,2) D C(1,0)]$$

L'amplitude électrodynamique s'écrit :

$$A = A_{(1)} + A_{(2)} + A_{(3)}^a + A_{(3)}^b + \dots, \text{ la probabilité d'interaction étant égale à } |A|^2.$$

Robert Karplus et Norman Kroll ont mené pour la première fois ce type de calcul en utilisant les diagrammes de Feynman en 1949. Huit ans plus tard, plusieurs autres physiciens ont trouvé des solutions algébriques dans leurs calculs, dont la correction n'affectait que le cinquième chiffre après la virgule du résultat original. Pour le calcul définitif dans les années 1950, Tom Kinoshita (à l'Université Cornell) est allé jusqu'aux diagrammes contenant huit vertex et a pris en compte 891 diagrammes de Feynman distincts. Le calcul est précis jusqu'à la treizième décimale.

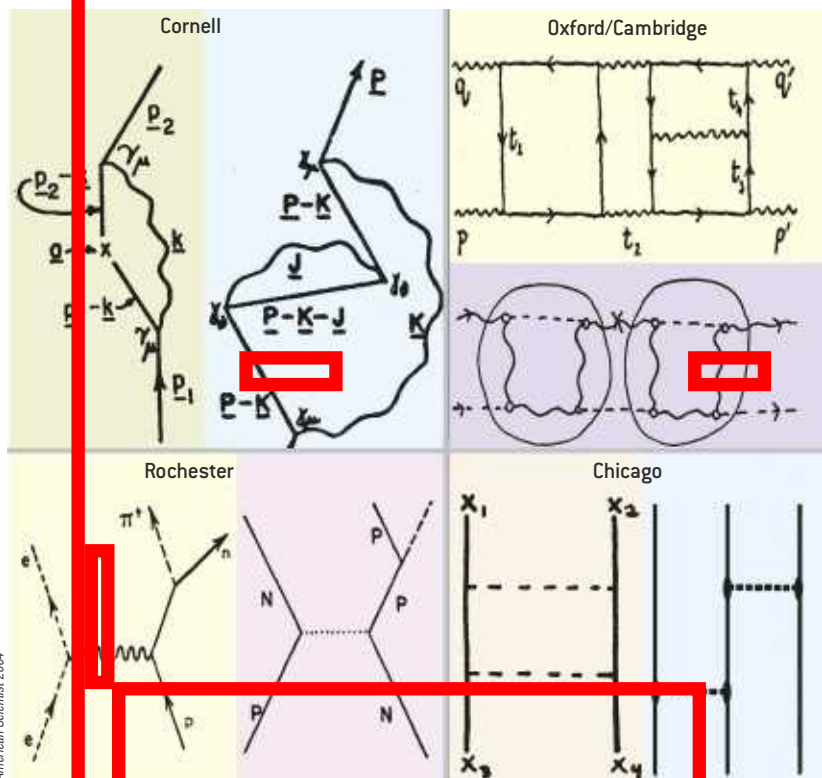
inattendues qui surgissaient des grands accélérateurs, les théoriciens faisaient appel aux diagrammes pour suivre quelle particule participait à quelle interaction, un système de gestion plus proche de la classification botanique que du calcul perturbatif. D'autres théoriciens les utilisaient pour distinguer les effets physiques en compétition : si un diagramme faisait intervenir deux vertex de force nucléaire (g^2), mais seulement un vertex de force électromagnétique (e), alors la contribution de ce processus physique serait plus importante qu'un diagramme avec deux facteurs e et un seul facteur g même si aucun des deux diagrammes ne pouvait être formellement évalué. Au début des années 1960, un groupe gravitant autour de Geoffrey Chew à Berkeley poussa les diagrammes un cran plus loin. Ils tirèrent les diagrammes du cadre que F. Dyson avait défini, pour les utiliser comme base d'une nouvelle théorie des particules nucléaires.

Chacun son style de diagramme

Pendant les années 1950 et 1960, les physiciens ont malmené le cordon ombilical reliant les diagrammes aux règles d'utilisation de F. Dyson. Les physiciens ont bricolé les diagrammes, en ajoutant un nouveau type de ligne par-ci, en abandonnant une convention par-là, en adoptant d'autres conventions d'étiquetage, pour faire ressortir des propriétés qui leur semblaient pertinentes. Ces « pastiches » n'apparaissaient cependant pas aléatoirement, mais selon les besoins de tel ou tel groupe de physiciens. Des écoles se créaient lorsque des mentors et leurs étudiants aménageaient les diagrammes afin de mieux coller à leurs besoins en calcul. Les diagrammes dessinés par les étudiants en thèse à Cornell commencèrent à se ressembler, tout en ayant de moins en moins de similarité avec ceux des étudiants de Colombia à Rochester ou de Chicago.

Les théoriciens adaptaient les diagrammes de Feynman à l'étude des particules en interaction forte, alors que les calculs perturbatifs y étaient impossibles. Un physicien compara cet empressement à utiliser les diagrammes de Feynman en physique nucléaire à « l'engouement pour la crâniométrie de Franz Gall à la mode au XIX^e siècle ». Pendant le quart de siècle qui suivit l'introduction des diagrammes par Feynman, les physiciens ont griffonné avec frénésie des diagrammes, ce qui conduisit un autre prix Nobel, Philip Anderson, à se demander si lui et ses collègues n'avaient pas subi un lavage de cerveau de la part de Feynman. Pour des générations de théoriciens, formés depuis le début à aborder tout calcul à l'aide de cet outil de choix, les diagrammes de Feynman venaient avant toute chose.

L'histoire de la diffusion des diagrammes de Feynman témoigne de la pédagogie nécessaire pour élaborer les outils de la recherche et enseigner aux utilisateurs leur mise en œuvre. Des contacts personnels et un mentor individuel sont restés le mode de diffusion prédominant des années après la publication des règles d'utilisation des diagrammes. Les travaux personnels que les postdoctorants donnaient à leurs étudiants n'exigeaient souvent pas beaucoup plus que le dessin des diagrammes de Feynman appropriés, sans même devoir traduire le diagramme en son expression mathématique. Ces étudiants appre-



American Scientist 2004

5. Les mentors et les étudiants ont utilisé de nouvelles manières de dessiner les diagrammes. Des « airs de famille » apparaissent sur ces pages. Dans chaque cas, le premier diagramme (à gauche ou en haut) provient d'un mentor, mais que le second est souvent par un élève.

naient que tout calcul devait être précédé par le tracé d'un diagramme de Feynman.

Entre-temps, des traditions locales émergèrent et firent apparaître des diagrammes ayant de moins en moins de points en commun avec les instructions originales de Dyson. Ses dévotions *ab initio* et ses règles strictes avaient guidé les étudiants de N. Kroll à Colombia, par exemple, mais étaient considérées comme superflues par les étudiants à Rochester et complètement ignorées par les élèves de G. Chew à Berkeley.

Il demeure donc impossible de séparer la pratique de la recherche de la façon dont les scientifiques ont été formés. Les diagrammes de Feynman ne se trouvent pas dans la nature ; de plus, les physiciens théoriciens ne naissent pas tels, ils sont le produit de leur formation. Pendant la décennie des années 1950, diagrammes et utilisateurs furent formés par un même procédé pédagogique, de postdoctorant à postdoctorant, de mentor à disciple.

David Kaiser enseigne à l'Institut de technologie du Massachusetts (MIT). Cet article est tiré d'un livre sur la diffusion des diagrammes de Feynman dans la physique d'après-guerre, à paraître chez Chicago University Press. Nous remercions la revue *American Scientist* de nous en avoir autorisé la publication.

F. DYSON, *The radiation theories of Tomonaga, Schwinger and Feynman*, in *Physical Review*, vol. 75, pp. 486-502, 1949.

R. FEYNMAN, *The theory of positrons*, in *Physical Review*, vol. 76, pp. 749-753, 1949.

R. FEYNMAN, *Space-time approach to quantum electrodynamics*, in *Physical Review*, 76 : 769-789, 1949.

Auteur & Bibliographie

À l'aube de la pensée

Quand Homo sapiens est-il devenu moderne ?

Au moment où il a acquis la capacité de penser symboliquement, répondent les préhistoriens. La découverte de petites coquilles percées suggère que cela remonterait à au moins 75 000 ans.

Kate Wong

Le Cap, Afrique du Sud. Christopher Henshilwood, de l'Université de Bergen, en Norvège, pose dans ma main un petit morceau de carton bleu qu'il vient de sortir d'un sac en plastique. Dessus, 19 coquillages pas plus grands qu'un grain de blé forment trois lignes horizontales. À première vue, il s'agit des restes d'une poignée de mollusques sans intérêt. Mais pour l'œil expert, c'est peut-être l'un des plus grands trésors de l'humanité. Les petits coquillages ont été découverts dans la grotte de Blombos, dans la partie Est du littoral Sud-africain. Tous de la même taille, ils sont percés d'un trou sur le côté opposé à leur orifice. D'après Ch. Henshilwood, il s'agirait de perles ouvragées il y a 75 000 ans par des représentants de notre espèce. Autrement dit, les coquillages de Blombos seraient les plus anciens bijoux jamais fabriqués par l'homme, et une preuve que nos ancêtres ont commencé à se comporter semblablement à nous à une époque bien plus reculée qu'on ne le pensait auparavant.

Un Big Bang comportemental

Comme l'attestent des fossiles découverts en Éthiopie, près du village de Herto, en 2003, l'homme anatomiquement moderne, *Homo sapiens*, est apparu en Afrique il y a au moins 160 000 ans. Tout dernièrement, une nouvelle datation de restes humains découverts il y a plusieurs décennies sur un autre site éthiopien, à Omo Kibish, indique que l'homme moderne, toujours sur le plan anatomique, pourrait même être apparu il y a 195 000 ans.

La question de savoir à quelle époque l'homme est devenu moderne sur le plan cognitif est bien plus difficile. Durant les 20 dernières années, l'idée prédominante était que l'humanité avait connu une révolution comportementale il y a environ 40 000 ans – une hypothèse fondée sur l'étude des vestiges culturels laissés par *Homo sapiens* en Europe au cours de la dernière période glaciaire. De fait, avant 40 000 ans (Paléolithique moyen), il semble que les *Homo sapiens* européens fabriquaient des outils de pierre relativement archaïques, selon des techniques déjà utilisées des dizaines de milliers

d'années auparavant. Mais au Paléolithique supérieur (entre 40 000 et 10 000 ans), en un clin d'œil à l'échelle géologique, de la vallée du Rhône à la Russie, nos ancêtres se sont mis à fabriquer des armes perfectionnées, à échanger des biens sur de longues distances et ils nous ont laissé des vestiges d'une riche production artistique; autrement dit, ils avaient acquis des comportements qualifiés de modernes par les préhistoriens. Le Paléolithique supérieur, semble-t-il, coïncide avec l'ultime grand saut en avant accompli par notre espèce.

Nous ignorons s'il s'agit d'une coïncidence, mais c'est aussi durant cette transition entre le Paléolithique moyen et le Paléolithique supérieur que l'homme moderne a fini de coloniser l'Europe, un territoire jusqu'alors peuplé de Néandertaliens. La plupart des sites de fouilles n'ayant pas laissé de fossiles humains, l'identité des premiers hommes qui ont réalisé des industries caractéristiques du Paléolithique supérieur n'est pas établie avec certitude. Il est néanmoins communément admis qu'il s'agissait d'*Homo sapiens*. Certains chercheurs ont avancé que c'est la confrontation entre les deux espèces cousines qui aurait conduit l'« envahisseur » à exprimer une habileté créative jusqu'alors latente.

D'autres spécialistes pensent que l'explosion culturelle, flagrante en Europe il y a 40 000 ans, serait la conséquence d'une transition plus ancienne qui se serait opérée en Afrique. L'un d'eux, Richard Klein, de l'Université de Stanford, estime que cette transition africaine, qui délimite ce que les spécialistes nomment *Middle Stone Age* (l'âge de pierre moyen), et *Later Stone Age* (l'âge de pierre tardif), aurait eu lieu 50 000 à 10 000 ans auparavant. Ces deux périodes sont les équivalents, sur le grand continent, du Paléolithique moyen et du Paléolithique supérieur en Europe. D'après le préhistorien américain, la transition africaine ne résulterait pas de la rencontre entre deux humanités (à cette époque, *Homo sapiens* est seul en Afrique), mais serait la conséquence d'une mutation génétique survenue il y a environ 50 000 ans, qui aurait bouleversé notre fonctionnement cérébral et libéré nos capacités d'innovation.

Comme preuve de ce scénario, R. Klein invoque un site du centre du Kenya : Enkapune Ya Muto, la « grotte du crépuscule ». Des lames en obsidienne, les petits racloirs et,

symbolique

surtout, des petites perles en forme de disque, taillées dans des coquilles d'œufs d'autruches, y ont été retrouvés par l'équipe de Stanley Ambrose, de l'Université de l'Illinois, dans des niveaux datés de 43 000 ans. Des chasseurs cueilleurs du Botswana, les Khoi-San, s'offrent encore aujourd'hui des perles semblables en cadeau. Selon S. Ambrose, les petites perles de Enkapune Ya Muto avaient la même fonction : entretenir des relations de bon voisinage entre différents groupes en prévision des temps difficiles. Pour R. Klein, une capacité inscrite génétiquement à communiquer *via* des symboles, ajoutée à des facultés cognitives aidant à concevoir de meilleures armes et à utiliser efficacement les ressources, sont les traits qui ont permis à notre espèce, quelque 150 000 ans après son apparition, de quitter son continent d'origine pour partir à la conquête

Des vestiges éloquents

Ces dernières années, toutefois, quelques préhistoriens ont troqué la théorie du Big Bang culturel contre un scénario fondamentalement différent. Pour eux, il n'y a pas de décalage entre l'évolution de l'anatomie des *Homo sapiens* et celle de leurs capacités cognitives. Ainsi, les comportements humains modernes auraient émergé progressivement et lentement. Et pour certains préhistoriens, tel Francesco d'Errico, de l'Université de Bordeaux, la modernité cognitive ne serait pas l'apanage de l'homme moderne : elle a pu se développer en parallèle chez d'autres espèces humaines, chez les Néandertaliens notamment.

L'idée que la créativité sans pareil de l'espèce humaine à des racines anciennes n'est pas nouvelle. Ainsi, trois lances

1. Ces petites coquilles percées, considérées par leurs découvreurs comme des objets de pure invention, prouveraient qu'*Homo sapiens*, il y a 25 000 ans, était doué d'une pensée symbolique. Cette dernière ne serait donc pas apparue il y a 40 000 ans, en Europe, au cours d'une prétendue « révolution symbolique ». Certains anthropologues avancent que la capacité de penser symboliquement aurait plutôt évolué graduellement, en différents endroits et à des époques différentes, et pas uniquement chez l'homme anatomiquement moderne.

F. d'Errico et M. Vanhaeren

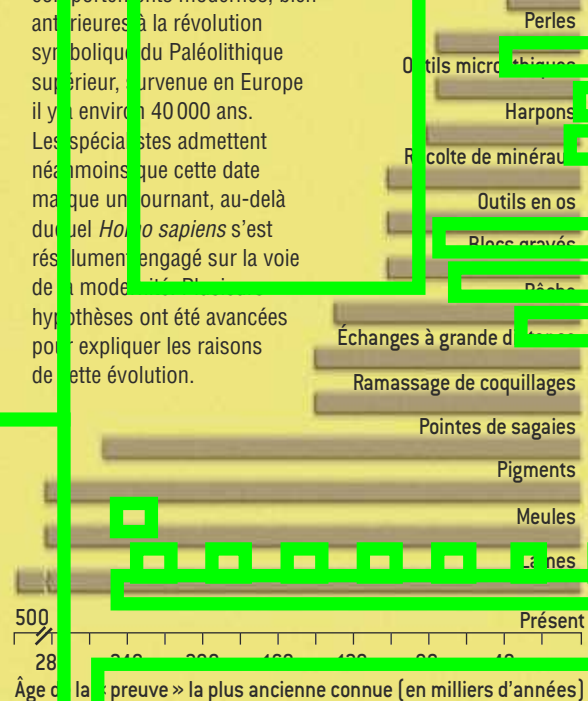
en bois vieilles de 400 000 ans, trouvées à Schöningen, en Allemagne, montrent que nos ancêtres étaient engagés sur les voies de la modernité bien avant qu'*Homo sapiens* peigne les murs de la grotte Chauvet. D'autres découvertes vont dans ce sens : par exemple, une supposée statuette de 233 000 ans, retrouvée dans le Golan en Israël sur le site de Brekhit Ram, ou bien un éclat de silex de 65 000 ans, présentant des incisions en forme d'arcs concentriques, retrouvé à Quneitra, également dans le Golan. Autant de découvertes qui indiqueraient que la métamorphose cognitive de nos ancêtres a commencé bien avant le *Later Stone Age*. C'est en tout cas l'idée présentée en 2000 par Sally McBrearty, de l'Université du Connecticut, et Alison Brooks, de l'Université George Washington. En substance, ces deux chercheurs avancent que nombre de comportements modernes, dont on pensait qu'ils étaient apparus entre 40 000 et 50 000 ans, sont en réalité déjà visibles dans des sites du *Middle Stone Age*, des dizaines de milliers d'années auparavant. De plus, ces comportements ne seraient pas apparus d'un seul coup, mais de façon morcelée et sur des sites éloignés dans l'espace et dans le temps.

Par exemple, à Katanda, en République démocratique du Congo, A. Brooks et John Yellen, de l'Institut Smithsonian, ont découvert des harpons façonnés en os datant de 80 000 ans, c'est-à-dire du *Middle Stone Age*. Or ces vestiges présentent un niveau de sophistication comparable à des harpons européens vieux de 15 000 ans. On pensait jusqu'alors que l'os et l'ivoire, pour la fabrication d'outils, n'avaient pas été utilisés avant le *Later Stone Age*, en Afrique, et le Paléolithique supérieur, en Europe. De plus, des restes de poissons-chats géants du Nil, retrouvés au côté de certains harpons, laissent penser que les hommes de Katanda ont choisi la période de frai pour pêcher. Ils étaient donc en mesure d'anticiper les ressources saisonnières, capacité qui n'était attribuée qu'à des hommes plus récents.

Contrairement à une autre idée reçue, un site d'équarrissage d'animaux datant de 77 000 ans, dans le désert du Kalahari au Botswana, a révélé que des hommes du *Middle Stone Age* étaient d'aussi bons chasseurs que ceux du *Later Stone Age*. Ceux-là semblent en effet avoir régulièrement abattu des proies dangereuses et imposantes, tels

L'industrie du Middle Stone Age

Les préhistoriens ont découvert en Afrique des traces de comportements modernes, bien antérieures à la révolution symbolique du Paléolithique supérieur, survenue en Europe il y a environ 40 000 ans. Les spécialistes admettent néanmoins que cette date marque un tournant, au-delà duquel *Homo sapiens* s'est résolument engagé sur la voie de la modernité. Plusieurs hypothèses ont été avancées pour expliquer les raisons de cette évolution.



des zèbres et des phacochères. D'autres sites, en Afrique du Sud, ont aussi apporté des indices qu'il y a 60 000 ans, des humains ont délibérément brûlé des prairies, pour favoriser la pousse de tubercules.

Avant même *Homo sapiens* ?

D'autres découvertes suggèrent même que certains traits de la modernité datent d'avant l'apparition de l'*Homo sapiens*. Par exemple, l'été dernier, sur un site kényan des environs du lac Baringo, S. McBrearty et ses collègues ont découvert des lames en pierre vieilles de 510 000 ans, mais dont la facture évoque plutôt le Paléolithique supérieur. Dans une localité voisine, cette équipe a aussi retrouvé des morceaux d'ocre rouge et des pierres pour les travailler, datés d'au moins 285 000 ans. Pour les découvreurs, c'est la preuve que les anciens habitants de cette région utilisaient des pigments à des fins symboliques, pour se décorer le corps par exemple, dès le *Middle Stone Age*. Citons encore des éclats d'obsidienne façonnés, d'environ 200 000 ans, trouvés en Tanzanie, à proximité du lac Victoria, et dont S. McBrearty a montré qu'ils provenaient d'une coulée de lave distante de 190 kilomètres. Pour la préhistorienne, c'est un signe que les hommes ayant utilisé ces objets avaient des échanges avec d'autres groupes, se fournissant ainsi en matériaux « exotiques ». Plusieurs critiques se sont néanmoins élevées concernant la datation ou les interprétations de ces trouvailles. Les sceptiques affirment par exemple que l'ocre a pu être utilisé comme mastic pour attacher des lames sur des manches en bois, ou bien comme agent antimicrobien contre les morsures d'animaux.



2. Ce morceau d'ocre de 75 000 ans a été mis au jour dans la grotte de Blombos, en Afrique du Sud.

Il se trouve dans le même niveau que les petites perles en coquillages. Une face a été abrasée manuellement sur le sol, puis gravée. Certains préhistoriens pensent que cet objet avait une signification symbolique.

Symbolisme. L'invention d'un stockage externe de l'information (que ce soit par le langage, ou l'art et ses différentes expressions – bijoux, outils, etc.) est l'événement le plus important de l'évolution du comportement de l'homme moderne. Il est possible qu'*Homo sapiens* ait eu, dès son apparition il y a environ 195 000 ans, les capacités cognitives de développer une pensée symbolique, même si les traces sur le terrain sont rares. Autre hypothèse, la pensée symbolique est devenue la base de toute organisation humaine, permettant d'échanger ou de créer des réseaux, par exemple, que tout le potentiel de l'humanité s'est exprimé.

Armes de jet. L'invention des armes de jet, il y a 50 000 à 30 000 ans, a permis aux hommes de tuer à distance des animaux de toutes sortes – ainsi que d'autres hommes. Pour John Shea, à l'Université de Stony Brook, cette invention a facilité la diffusion de l'information, ce qui aurait aidé à la formation de réseaux sociaux, grâce auxquels de l'information pouvait facilement être échangée.

Désastre géologique. Des données génétiques indiquent que la diversité génétique d'*Homo sapiens* s'est très fortement réduite il y a environ 60 000 ans. Stanley Ambrose, à l'Université d'Illinois, suggère qu'une éruption volcanique majeure du mont Toba, à Sumatra, en aurait été la cause. Celle-ci aurait engendré un hiver volcanique ayant duré six ans. En ces temps difficiles, seule

les individus les plus coopératifs auraient été à même de survivre, et auraient été les seuls à transmettre la pensée symbolique aux générations suivantes. Ces conditions auraient favorisé une transition d'une organisation sociale construite autour d'un petit groupe à une organisation en tribus.

Croissance démographique. Il est possible que des prémices de la pensée symbolique soient apparues, puis aient disparu, en différents points du globe et à différentes époques, jusqu'à ce que soit atteinte une certaine densité de population. Des comportements associés à une pensée symbolique émergent alors et favorisent des innovations techniques. Cette hypothèse est en particulier défendue par Alison Brooks, de l'Université George Washington, et par Matt Buzza, de l'Université de Connecticut. Elle suggère que la densité de population augmente les chances qu'une idée soit transmise, plutôt qu'elle ne disparaisse avec l'extinction d'un groupe.

Mutation cérébrale. D'après Richard Klein, de l'Université de Stanford, il est possible qu'une mutation génétique survenue il y a 50 000 ans ait eu pour effet de remodeler l'organisation cérébrale d'*Homo sapiens*, de favoriser l'émergence d'une pensée symbolique, incluant le langage. Ces humains « génétiquement modifiés » ont ainsi acquis un avantage évolutif évident sur les autres, et ont très vite pris leur place.

C'est dans ce contexte de controverse que les coquillages de Blombos ont été découverts. Ch. Henshilwood les a exhumés de la grotte où ils reposaient en 1991. Très vite, il est apparu que le site est riche en vestiges du *Middle Stone Age*, mais les fouilles systématiques n'ont commencé qu'en 1997. Depuis, le chercheur et son équipe ont mis au jour de nombreux outils élaborés, ainsi que des objets à vocation symbolique, ce qui a permis de dresser un portrait des habitants de Blombos. Il apparaît que leur façon de penser devait être assez proche de la nôtre.

Les réseaux datés de 75 000 ans ont révélé 40 outils en os, notamment des aiguilles finement ouvragées, et des centaines de pointes bifaces réalisées à partir de roches difficiles à travailler. Certaines ne mesurent pas plus de trois centimètres, ce qui suggère qu'elles ont été utilisées comme pointes de sagaies. Par ailleurs, des fossiles de plusieurs espèces de poissons, les plus vieux ayant 130 000 ans, montrent que les habitants de Blombos arrivaient à pêcher des pièces de plus de 45 kilogrammes. La présence de foyers indique que la grotte était un lieu de résidence, et des dents d'adultes comme d'enfants révèlent qu'elle a servi d'abri à un groupe familial. Mais étant donné les très nombreuses pointes trouvées sur le site, la grotte a peut-être aussi servi d'atelier, où des artisans enseignaient à des apprentis l'art de tailler des pointes de sagaies.

Les objets les plus spectaculaires de la grotte de Blombos sont ceux qui prouvent qu'il y a 75 000 ans, nos ancêtres disposaient déjà d'une pensée symbolique. Ainsi, les chercheurs ont mis au jour un morceau d'os gravé, neuf blocs d'ocre rouge peut-être également gravés et des dizaines de petites perles. De plus, les sédiments datés

de 130 000 ans contenaient de nombreux morceaux d'ocre travaillés, certains en forme de crayons.

Nous ne connaissons sans doute jamais la signification de tous ces objets. Il est néanmoins possible de comprendre, dans une certaine mesure, la façon dont ils ont été fabriqués et utilisés. Une étude méticuleuse réalisée par F. d'Errico a, par exemple, révélé que les morceaux d'ocre avaient été frottés sur le sol, afin de lisser une face qui a ensuite été gravée avec une pointe. Ainsi, sur le plus grand morceau retrouvé, une série de stries épaisses forment un motif géométrique (voir la figure 2). Quant aux petits coquillages, des *Nassarius kraussianus*, ils ont été collectés à une vingtaine de kilomètres de la grotte, dans deux estuaires qui existent encore aujourd'hui. Ch. Henshilwood, F. d'Errico et Marian Vanhaeren ont établi que les coquilles avaient été percées à l'aide d'une pointe en os, de l'intérieur vers l'extérieur – une technique où l'on casse beaucoup les objets si l'on n'est pas entraîné, comme les chercheurs l'ont démontré. Les petites coquilles semblent avoir été « filées », comme en témoignent les traces d'usure autour de la perforation. Des traces d'ocre, dues peut-être au frottement des coquilles sur de la peau peinte, suggèrent que les « bijoux » ont été portés.

Selon Ch. Henshilwood, les vestiges de Blombos montrent de façon frappante qu'au moins un groupe humain était doté d'une pensée symbolique il y a plus de 50 000 ans. Reste néanmoins que la plupart des sites caractéristiques du *Middle Stone Age* offrent peu de preuves d'un haut niveau de développement cognitif à cette époque, du moins comparable à celui des humains actuels.

En Afrique du Sud, beaucoup d'autres sites ont révélé des bifaces très élaborés, mais aucune preuve de comportement

associé à une pensée symbolique. Bien sûr, l'absence de preuves n'est pas la preuve de l'absence. Il se peut que les individus ayant vécu sur ces sites aient eu une production artistique ou qu'ils aient dessiné sur leur peau, mais que seules des pointes soient parvenues jusqu'à nous. Ainsi, la quasi-absence de signes liés à la modernité dans les données du *Middle Stone Age*, puis leur profusion dans celles du *Later Stone Age*, ne seraient qu'un artefact lié à une mauvaise préservation, ou au nombre relativement faible de sites africains fouillés.

Les données archéologiques seraient aussi compatibles avec le scénario selon lequel *Homo sapiens* se serait comporté de façon moderne dès que son anatomie est devenue moderne, mais qu'il n'aurait mis à profit ses capacités

qu'à condition qu'elles lui aient procuré un avantage évolutif. C'est ce que pensent nombre de gradualistes.

L'émergence de comportements culturels évolués s'explique peut-être par une augmentation de la population. Une augmentation du nombre d'individus rend l'accès aux ressources plus difficile, ce qui aurait obligé nos ancêtres à faire preuve d'une plus grande habileté pour subvenir à leurs besoins. Une population plus importante augmente aussi la probabilité que deux groupes se rencontrent. Les perles, les peintures corporelles et même des outils stylisés ont pu servir de signes d'appartenance à un groupe. Et au sein d'un groupe, ils auraient indiqué un statut social. À l'inverse, les objets symboliques ont pu servir d'intégrateurs

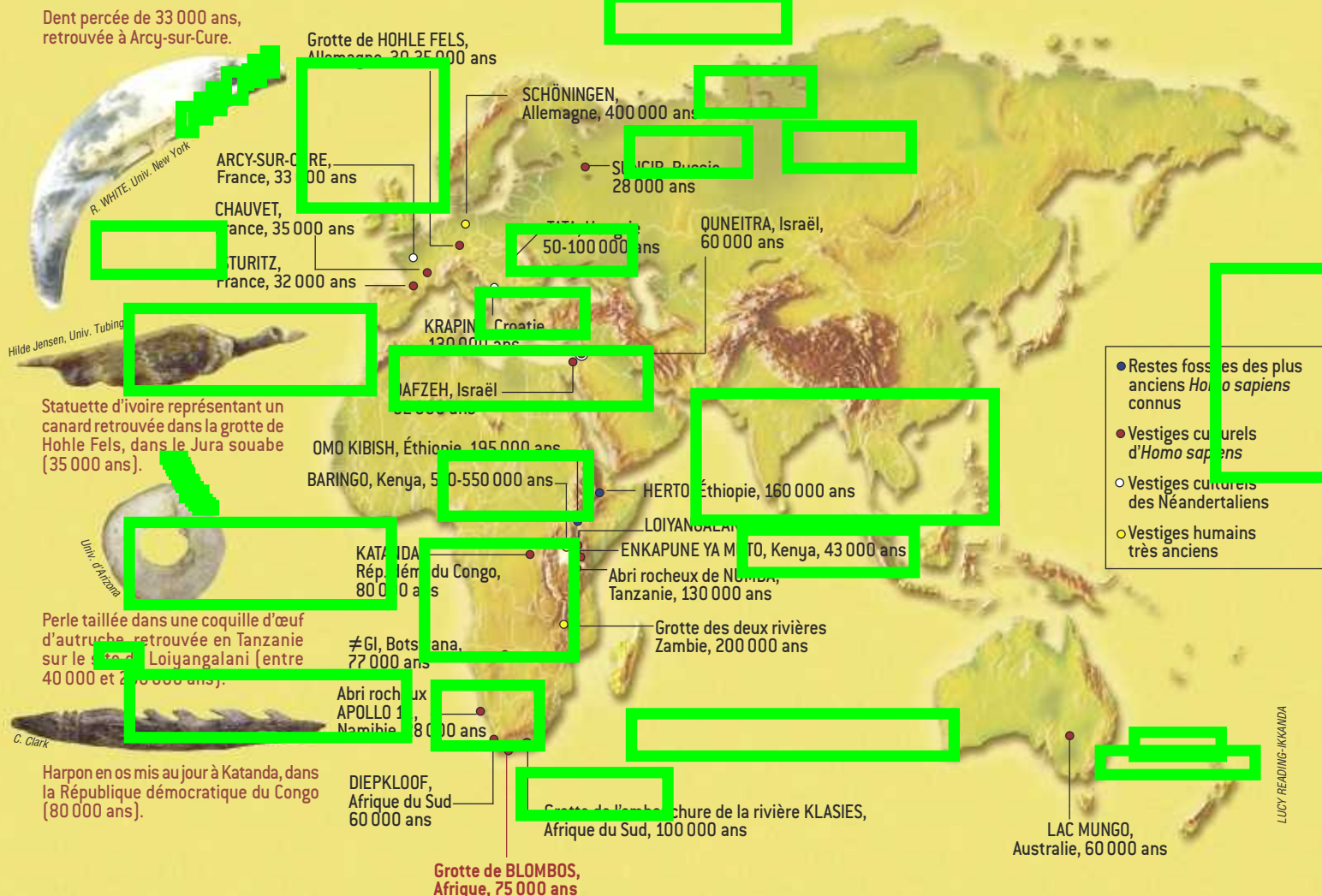
La came de la modernité

Les humains anatomiquement modernes sont apparus il y a au moins 195 000 ans, comme en témoignent des fossiles trouvés sur le site d'Omo Kibish, en Éthiopie. Pour autant, les traces matérielles indiquent qu'une réelle identité comportementale entre nous et nos ancêtres ne s'est mise en place que 150 000 ans plus tard.

En Afrique, les traces de productions artistiques, de

techniques élaborées sont devenues légion. Néanmoins, de récentes découvertes, notamment à Blombos, en Afrique du Sud, ont révélé des objets associés à une pensée symbolique bien avant le début du Paléolithique supérieur, et très loin de l'Europe. Ainsi, les capacités cognitives de l'*Homo sapiens* préhistorique, dont

Par ailleurs, il semble que les hommes de Neandertal aient eu aussi une pensée symbolique, ce qui suggère que cette faculté nous vient d'un ancêtre commun encore plus ancien.



sociaux en des temps difficiles, comme cela a été avancé pour les perles d'Enkapune Ya Muto.

En revanche, si la population était en déclin, on peut supposer que les individus dépositaires d'une tradition symbolique ne parvenaient plus à la transmettre. Les aborigènes de Tasmanie offrent une illustration de ce scénario. Quand les Européens sont arrivés sur cette île du Sud de l'Australie, au XV^e siècle, ils ont découvert un peuple dont la culture matérielle était encore plus archaïque que celle du Paléolithique moyen. Pourtant, des données archéologiques montrent que, des milliers d'années auparavant, ces Tasmaniens disposaient d'outils bien plus complexes, comprenant des filets de pêche, des arcs et des flèches. Or, jusqu'à il y a 10 000 ans, le niveau de la mer était plus bas qu'aujourd'hui, et la Tasmanie était reliée à l'Australie. On peut donc imaginer que l'isolement géographique des Tasmaniens les a coupés de la population continentale, ce qui a entraîné la perte de certains savoir-faire. Un tel scénario expliquerait la rareté des traces de modernité sur les sites africains datant de 60 000 à 30 000 ans, d'autant que la population africaine semble s'être effondrée il y a environ 60 000 ans, en raison d'une baisse brutale de la température.

Notons qu'il est très difficile de déduire les capacités cognitives d'un individu à partir de ce qu'il produit. Qui plus est, les préhistoriens ne sont pas d'accord sur la définition de la modernité comportementale. Au sens strict, ce terme englobe tous les comportements culturels humains observés aujourd'hui, de l'agriculture jusqu'à l'iPod. Pour rendre cette définition plus opérationnelle, certains qualifient de modernes les comportements qui ont conduit à la culture du Paléolithique supérieur. En somme, le fait de savoir si tel ou tel vestige est ou non moderne dépend de la définition de la modernité. D'aucuns pensent que l'origine de la modernité est à rechercher dans ce qui est sans doute la plus importante caractéristique des sociétés humaines : un comportement symbolique organisé, dont fait partie le langage. La capacité de transmettre des symboles serait la clé de tout ce que nous faisons aujourd'hui, et la plupart des chercheurs admettent que la capacité à communiquer des symboles est un trait caractéristique de notre espèce.

Reste à déterminer à quelle période une culture symbolique est apparue dans l'histoire de l'humanité. Des éléments controversés provenant d'abris rocheux du Nord de l'Australie, les sites de Malakunanja II et Nauwalabila I, semblent indiquer que des hommes habitaient l'île-continental il y a 60 000 ans, peut-être avant. Or, pour atteindre l'Australie à partir du Sud-Est asiatique, les *Homo sapiens* ont dû construire de solides radeaux et naviguer au moins 80 kilomètres, selon l'époque à laquelle ils ont traversé. Aux yeux de tous les spécialistes, une telle entreprise nécessite une capacité très développée de communiquer.

Une autre découverte repousse encore plus loin dans le passé l'émergence d'une pensée symbolique. En Israël, dans la grotte de Qafzeh, Erella Hovers et ses collègues, de l'Université hébraïque de Jérusalem, ont découvert des dizaines de morceaux d'ocre rouge à proximité de tombes d'*Homo sapiens* vieilles de 92 000 ans. D'après ces préhistoriens, les morceaux de pigments ont été chauffés pour leur donner leur couleur rouge écarlate, une pratique peut-être liée à une rite funéraire.



2. L'émergence de la pensée symbolique, et notamment le développement des activités symboliques au Paléolithique supérieur (entre 30 000 et 10 000 ans). La musique était déjà pratiquée ; en témoigne cette flûte datant de 32 000 ans mise au jour en France, à Isturitz.

D'autres découvertes indiquent que la maîtrise d'une pensée symbolique n'était pas le seul apanage de l'homme anatomiquement moderne. Ainsi, des sites néandertaliens ont livré de nombreux vestiges d'ocre traité. Et à la fin de leur règne, en Europe, au début du Paléolithique supérieur, les hommes de Neandertal avaient développé leur propre tradition culturelle, comme l'atteste notamment la découverte de dents percées, en France, à Quinçay et dans la grotte du renne à Arcy-sur-Cure. On a aussi montré que les Néandertaliens enterraient leurs morts. Néanmoins, l'absence d'objets spécifiques des sépultures pose la question de la dimension symbolique de ces enfouissements. Toutefois, Jill Cook, au *British Museum*, a montré sur des os provenant de l'abri de Krapina, en Croatie, que les Néandertaliens nettoyaient les restes des défunts.

La capacité de penser symboliquement a peut-être évolué indépendamment chez l'homme de Neandertal et chez l'homme moderne. À moins qu'elle ne soit apparue chez un ancêtre commun, avant que les deux lignées humaines ne se séparent et n'empruntent des chemins évolutifs différents. Nos comportements ont certainement beaucoup changé depuis que des *Homo sapiens* ont percé les petites coquilles de Blombos, il y a 75 000 ans. Pourtant, ces perles véhiculaient peut-être les mêmes messages que les bijoux modernes.

Kate WONG est journaliste à la revue *Scientific American*.

F. d'ARRIGO et al., *Nassarius kraussianus* shell beads from Blombos cave evidence from symbolic behaviour in the Middle Stone Age, in *Journal of human evolution*, vol. 48, pp. 3-24, 2005.

F. d'ARRIGO, *The invisible frontier : a multiple species model for the origin of behavioral modernity*, in *Evolutionary Anthropology*, vol. 12, n° 4, pp. 188-202, août 2003.

Ch. FENSHILWOOD et al., *Emergence of modern human behavior : Middle Stone Age engravings from South Africa*, in *Science*, vol. 295, pp. 1278-1281, février 2002.

S. MCBREARTY et A. BROOKS, *The revolution that wasn't : a new interpretation of the origin of modern human behavior*, in *Journal of human evolution*, vol. 39, n° 5, pp. 453-563, novembre 2000.

Auteur & Bibliographie

À quoi sert la crinière du lion

Ce n'est ni une maraude de rouauté ni un bouclier pour le combat.

De patientes observations et expériences de terrain montrent que la crinière du lion est plutôt un signal de qualité adressé aux femelles et aux rivaux.

Peyton West



Sauf mention contraire, les illustrations sont fournies par l'auteur

1. Le lion est le seul félin ayant une crinière. Cet élément du pelage véhicule une information sur l'état général du mâle, tant auprès de ses rivaux qu'auprès des femelles qu'il convoite. Le lion de la photographie, prise dans les plaines du Serengeti, en Tanzanie, monte la garde après sa remonte.

Pourquoi les lions ont-ils une crinière ? Charles Darwin, pratiquement ignare en matière de lions, fut l'un des premiers à suggérer une réponse : « La crinière du lion constitue une bonne défense contre le

seul danger auquel il est exposé, à savoir l'attaque de lions rivaux. » Cette hypothèse

non fondée a prévalu jusqu'à ce que George Schaller, en 1972, suggère que la somptueuse crinière des mâles servait à signaler leur qualité à une éventuelle lionne, à l'instar des signes extérieurs présents chez la plupart des espèces polygames. Bien que ces deux hypothèses ne s'excluent pas, les scientifiques ont privilégié l'une ou l'autre. Mais jusqu'en 1991, année où j'ai entamé mes recherches sur le sujet, aucune des idées n'avait été testée systématiquement.

Trois faits fondamentaux sont à prendre en compte. Premièrement, la crinière est un signe de dimorphisme sexuel (seuls les mâles ont une crinière). Deuxièmement, la crinière se développe à la puberté. Troisièmement, l'aspect de la crinière varie considérablement, aussi bien d'un individu à l'autre qu'entre populations. Les crinières vont d'une couleur presque blanche jusqu'au noir profond, et en taille elles vont de la version la plus légère, avec des favoris, jusqu'au long et épais revêtement qui couvre les épaules et la poitrine. De plus, une crinière n'est pas de taille ou de couleur uniformes.

Ces caractéristiques sont compatibles avec l'hypothèse selon laquelle la crinière résulte de la sélection sexuelle. La plupart des caractères attachés au sexe sont en effet des signes de dimorphisme sexuel, leur développement commence à la puberté et ils présentent une grande variabilité. Selon la théorie de la sélection sexuelle, ces caractères évoluent sous l'effet de la compétition pour séduire le sexe opposé.

Les traits sexuellement sélectionnés peuvent accroître le succès reproducteur de deux façons. Ils peuvent fournir un avantage dans la compétition entre mâles pour conquérir des femelles. On peut penser à des armures, qui protègent les mâles de leurs adversaires, à des armes, qui neutralisent les opposants, ou à des signes de vaillance au combat, que les mâles utilisent pour évaluer leurs adversaires. En général, les mâles dont ces caractéristiques sont les plus développées sont de meilleurs concurrents. Parfois, les traits sexuellement sélectionnés – par exemple des coloris vifs, de longues plumes ou des vocalisations élaborées – portent sur l'attractivité du mâle aux yeux des femelles. Les femelles qui préfèrent des mâles mieux parés peuvent en tirer bénéfice, soit en ayant une descendance plus nombreuse, soit en transmettant de meilleurs gènes.

La crinière joue-t-elle un rôle dans la compétition entre mâles ou dans la séduction d'une femelle ? C'est ce que j'ai cherché à savoir. Pour ce faire, je me suis appuyée sur les recherches antérieures de Craig Packer, de l'Université du

Minnesota. Lui et d'autres ont étudié les lions du parc national du Serengeti, en Tanzanie, pendant près de 30 ans. Ces travaux ont abouti à la création d'une vaste base de données sur le comportement, la démographie ou la physiologie de ces animaux.

La connaissance de l'organisation sociale des lions nous a d'abord permis d'affiner nos hypothèses sur la sélection sexuelle. Les lionnes vivent en groupes formés de femelles apparentées et de leurs jeunes. Lorsque les lionceaux grandissent, les jeunes femelles restent généralement dans la troupe de leur mère, tandis que les jeunes mâles forment des « coalitions », puis se dispersent pour constituer leur propre troupe. Dans ce système, un petit groupe de mâles peut s'opposer à un grand nombre de femelles, ce qui conduit à une forte concurrence pour la reproduction. Les mâles luttent entre eux pour conquérir des femelles. Au niveau du groupe, les coalitions de mâles sont de taille variable, et des coalitions plus importantes ont des descendances plus nombreuses que de petites coalitions. Mais les individus sont aussi en concurrence à l'intérieur d'une coalition : si un mâle découvre une femelle en chaleur, il va jalousement veiller sur elle et l'empêcher de s'accoupler avec les autres mâles. Comme Craig Packer et ses collègues l'ont découvert, ce comportement modifie le taux de paternité d'un animal à l'autre dans les coalitions de mâles importantes.

Moteur : la sélection sexuelle

À contrario, les femelles ont un comportement égalitaire. À la différence d'autres carnivores sociaux, tels les loups et les hyènes, toutes les femelles adultes d'un groupe contribuent à la reproduction. En outre, les femelles procréent de façon synchronisée, ce qui signifie qu'à certains moments, il y a souvent plus de femelles en chaleur qu'il n'y a de mâles. Les mâles ne peuvent en général défendre plus d'une femelle à la fois, mais ils s'accouplent volontiers avec d'autres femelles. Ainsi, lorsque les femelles en chaleur sont plus nombreuses que les mâles, les femelles surnuméraires – qui ne sont pas surveillées – choisissent librement parmi les mâles de la coalition. Ce système social permet ainsi à la sélection sexuelle de s'exercer sur la base à la fois d'une compétition entre mâles et d'un choix des femelles.

Quelles sont les caractéristiques les plus utiles aux lions ? Avec leurs griffes et leurs dents meurtrières, la lutte est coûteuse, même pour le vainqueur. Pour cette raison, comme le suggérerait Darwin, les mâles pourraient tirer profit d'une crinière protectrice, fuir complètement le combat serait néanmoins la solution la plus avantageuse. Les mâles tirent donc parti d'un signallement dissuasif de leur aptitude au combat.

Pour les femelles, les choses sont plus compliquées. Contrairement à beaucoup d'autres mammifères, les lions

mâles jouent un rôle important dans l'élevage de la progéniture, mais ils sont également très attentifs à leur propre aptitude reproductrice. Quand une nouvelle coalition de mâles se joint à une troupe, ils tuent ou évincent immédiatement la progéniture des mâles précédents. Ce comportement est responsable de plus de 25 pour cent des décès de lionceaux et est une variable majeure dans le succès reproductif des femelles. À court terme, un groupe de femelles peut se défendre contre de nouveaux venus infanticides, mais ce sont plutôt les mâles de la troupe qui protègent les jeunes lions. Le départ ou la perte d'une coalition de mâles entraîne généralement la mort de tous les lionceaux non sevrés. Pour les femelles, un signalement de l'aptitude d'un mâle à résister à des usurpateurs serait ainsi utile.

Les lions mâles aident aussi la troupe à se nourrir. On les décrit souvent comme des parasites qui se prélassent pendant que les femelles font tout le travail, mais ils sont de très bons chasseurs d'une proie clef : le buffle d'Afrique. La chasse de ces buffles grands et lents repose moins sur la vitesse et l'agilité propres aux femelles que sur la masse et la force, avantage des mâles. Un buffle rassasiera un grand groupe et, dans toute la gamme des proies du lion, cette espèce est la plus importante. Pour les femelles, une telle contribution est essentielle, car le manque de nourriture est une autre cause courante de décès chez les lionceaux. Toute caractéristique signalant l'aptitude d'un mâle à la chasse est ainsi précieuse aux yeux des lionnes.

Nous avons donc supposé que la crinière joue un rôle dans l'un ou l'autre de ces trois voies : comme bouclier contre les blessures, comme signe de l'aptitude d'un mâle à combattre et à protéger ses lionceaux, ou comme signe d'aptitude à se procurer de la nourriture. La physiologie des poils laisse penser que la crinière peut véhiculer une telle information. La croissance du poil dépend d'un ensemble de facteurs, notamment les hormones, la santé et l'alimentation. En termes de sélection sexuelle, l'aspect du poil dépend de l'état général de l'animal. Sa croissance et sa pigmentation dépendent de la testostérone, hormone liée à l'agressivité. Par ailleurs, les mammifères sous-alimentés ou souffrants développent souvent un poil dur et d'aspect maladif, tandis qu'une alimentation pauvre, par exemple déficiente en cuivre et en zinc, perturbe la croissance du poil et sa pigmentation.

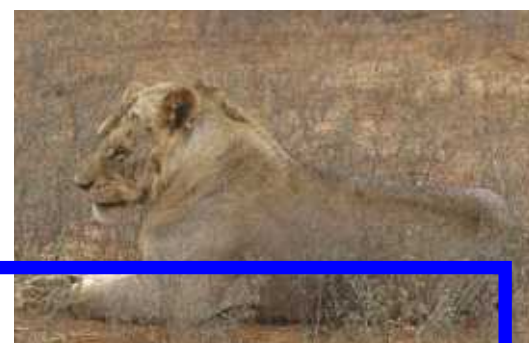
La crinière constitue-t-elle un bouclier ? Cela impliquerait qu'elle soit une protection efficace contre les dents des lions rivaux et que les mâles à la crinière plus longue ou plus foncée soient blessés moins fréquemment ou moins gravement. Malheureusement, il est impossible de valider ces deux hypothèses. Les combats entre lions se déroulent rarement devant témoins, et les individus ne sont pas observés avec une régularité suffisante pour qu'on puisse évaluer la fréquence de leurs blessures. Nous avons donc émis deux hypothèses que l'on peut tester. Si la fonction première de la crinière était la protection, la zone couverte par la crinière devrait constituer une cible particulière pendant les combats, et la plupart des blessures infligées par des lions se situeraient dans cette zone. Par ailleurs, ces blessures devraient être plus graves et plus souvent mortelles.

Le rôle de bouclier est écarté

Les données issues des observations n'ont pas confirmé l'hypothèse que la crinière joue un rôle de bouclier. Les blessures dans la zone de la crinière ne sont ni plus fréquentes ni plus meurtrières que celles sur d'autres parties du corps, et cela non seulement chez les mâles adultes, mais aussi chez les femelles et les lions non adultes, dépourvus de crinière.

Nous nous sommes alors tournés vers l'idée que la crinière a pour fonction première d'être un signal. Nous nous sommes demandé quelles sont les variables écologiques qui déterminent la longueur et la teinte de la crinière. Une première étape consiste à quantifier ces traits. Pour cela, nous avons examiné les archives photographiques qui contenaient des vues de presque chaque lion mâle apparu dans la région depuis 1966. Sur le terrain, nous avons photographié les mâles tous les six mois pour enregistrer les nouveaux animaux et toute modification de leurs crinières. Des étudiants, qui ne connaissaient pas les animaux, ont individuellement classé les photographies selon la longueur et la teinte de la crinière. Ces mesures ont constitué l'ossature de notre étude.

Nous avons établi que les crinières commencent à se développer peu avant un an et continuent de croître jusqu'à quatre ans et demi. La crinière acquiert rapidement sa pigmentation pendant cette époque. La couleur se stabilise environ un an après l'arrêt de la croissance, mais continue à s'assombrir lentement tout au long de la vie. Nous avons



2. Les crinières peuvent être courtes ou longues, pratiquement noires ou presque blanches. Leur longueur et leur couleur varient beaucoup à l'intérieur d'un groupe, et plus encore entre populations vivant sous différents climats. La crinière peut présenter plusieurs teintes à

la fois (à gauche) ou être au contraire uniforme (au centre). Sa longueur est également variable : les mâles adultes du Parc national de Tsavo, au Kenya, ont une crinière très courte, dont il ne subsiste souvent que des favoris et une touffe au sommet de la tête (à droite).

aussi montré que les augmentations de longueur et de coloration liées à l'âge reflètent une augmentation de la concentration sanguine en testostérone pendant l'adolescence.

Malgré le caractère systématique de cette évolution, la crinière de certains mâles s'est révélée variable dans le temps : elle peut par exemple redevenir plus claire ou plus courte. Ces résultats étaient encourageants, car ils confortaient l'idée que la crinière est liée à la condition générale de l'animal.

Plus généralement, notre analyse a montré que la longueur et la teinte de la crinière sont en corrélation avec plusieurs facteurs écologiques. Chez les mâles de plus de cinq ans, la longueur de la crinière est étroitement corrélée aux blessures. Nous savions déjà que la crinière des mâles blessés est souvent plus petite et qu'elle peut même tomber complètement, mais nous avons découvert que, chez les mâles blessés, la longueur de la crinière subit des réductions plus subtiles. La longueur de la crinière pourrait ainsi indiquer l'aptitude du mâle à se battre, les mâles blessés étant des combattants moins habiles ou moins agressifs. La couleur de la crinière s'est révélée encore plus intéressante : outre l'effet de l'âge, nous avons trouvé que les mâles ayant une crinière plus foncée ont plus de testostérone – ils seraient alors plus agressifs – et se nourrissent en moyenne mieux tout au long de l'année, ce qui suggère une domination générale ou une aptitude supérieure à la chasse. À la fois la longueur et la couleur de la crinière fournissent donc une information potentiellement utile à d'autres lions, mâles ou femelles.

Des leurres à la rescousse

L'hypothèse du signallement prédit que si la crinière véhicule une information, les lions en tirent parti. Le démontrer est cependant problématique, particulièrement pour les mâles. Nous savons que des relations de domination existent dans les coalitions de mâles – en général, dans les coalitions de trois mâles ou plus, la paternité de la progéniture revient à deux mâles seulement – mais, par manque de données photographiques suffisantes, nous ne pouvions pas associer ces relations aux caractéristiques de la crinière.

C'est pourquoi nous avons recouru à des enregistrements de bruits naturels d'animaux, pour reproduire des situations dont, autrement, nous serions rarement témoins. Nous avons diffusé les rugissements de femelles, non connues des mâles de la coalition, afin de provoquer chez eux une rivalité. Comme le premier mâle à atteindre une femelle en chaleur finit généralement par en assurer la garde et par s'accoupler avec elle, c'est vraisemblablement lui le mâle dominant. Si la couleur ou la longueur de la crinière sont des indicateurs de dominance, le premier mâle à arriver au haut-parleur doit être celui dont la crinière est la plus foncée ou la plus longue. Des expériences réalisées avec 13 coalitions de mâles ont abouti à un résultat surprenant : la longueur de la crinière a peu de rapport avec la dominance mesurée par nos tests, mais les mâles ayant une crinière plus foncée sont plus enclins à l'emporter dans la course à la femelle. Ainsi, une crinière foncée semble indiquer la dominance d'un mâle.

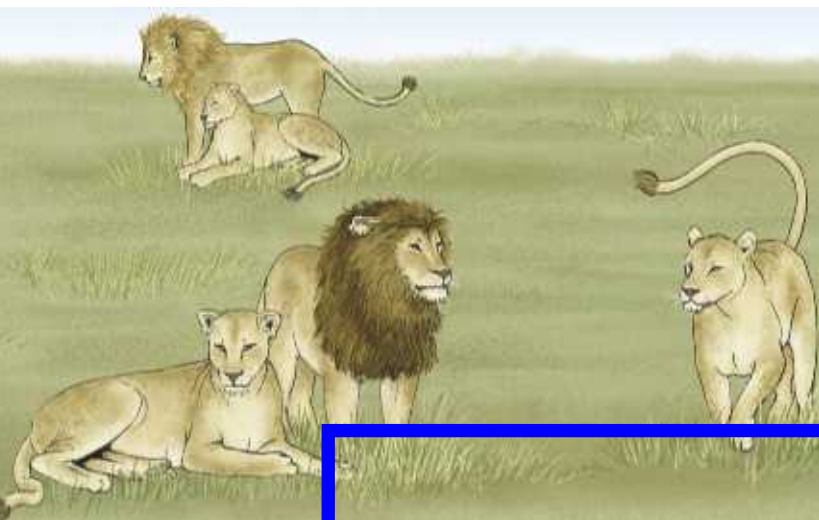
Concernant les femelles, les données existantes se sont révélées plus utiles. Puisque les femelles en chaleur surnuméraires croissent leur part de nourriture, nous avons recherché



3. La crinière raccourcit considérablement et peut même disparaître quand un animal est blessé. Ces deux photographies montrent le même lion à moins de six mois d'intervalle, avant (en haut) et après (en bas) avoir été blessé lors d'un combat avec un autre lion.



4. Charles Darwin a suggéré que la crinière des lions mâles sert à protéger leur tête et leur cou des dents et des griffes des autres lions. Si la crinière avait évolué pour protéger ces zones du corps, cela signifierait que les attaques devraient y être plus fréquentes pendant les combats. Les observations ont cependant montré que les blessures dans la zone de la crinière ne sont ni plus fréquentes ni plus meurtrières que celles touchant d'autres parties du corps.



5. L'unité sociale de base chez les lions est constituée d'un groupe de femelles apparentées, dominé et protégé par un petit nombre de mâles alliés. Les femelles d'un même groupe entrent en chaleur en même temps, mais, pendant cette période, chaque mâle ne peut s'approprier qu'une seule femelle. Les femelles « en surnombre » peuvent alors choisir le mâle qu'elles veulent approcher. Dans 13 des 14 cas étudiés, les femelles se sont accouplées avec le mâle qui avait la crinière la plus foncée de la coalition.

les situations où un mâle s'était accouplé avec plus d'une femelle en une heure, en supposant qu'au moins l'une des femelles était là par choix et manifestait donc une préférence. Nous avons trouvé 14 cas de ce type pour lesquels nous disposions de données satisfaisantes sur les crinières des mâles de la coalition. Les résultats ont été de nouveau surprenants. À l'instar des mâles, les femelles semblent attacher peu d'importance à la longueur de la crinière; dans seulement la moitié des exemples, le mâle concerné avait la plus longue crinière de la coalition. En revanche, la couleur est de nouveau un critère essentiel. Dans 13 des 14 cas, les femelles s'accouplaient avec le mâle dont la crinière était la plus foncée.

La teinte sombre de la crinière semble ainsi jouer un rôle dans la sélection sexuelle, mais certaines questions restent sans réponse. Pourquoi les lions ne tiennent-ils pas compte de la longueur de la crinière lorsqu'elle peut révéler une blessure récente? Comment réagissent-ils à l'arrivée de lions étrangers qui peut avoir des conséquences désastreuses? De telles rencontres étant rares, souvent nocturnes et imprévisibles, nous avons de nouveau réalisé des expériences actives, en présentant aux lions de faux congénères – deux lions en peluche de grandeur nature, qui ne différaient que par leur crinière – pour voir si les caractéristiques de la crinière influent sur leur comportement.

Des leurreurs sont couramment utilisés pour étudier la sélection sexuelle chez d'autres espèces, et un faux lion réalisé par un taxidermiste avait déjà été utilisé avec succès dans une expérience antérieure. Nous ne trouvions pas de fournisseur de grands lions naturalisés réalistes, et des peluches réalisées sur commande auraient été d'un prix prohibitif. C. Packer a heureusement été contacté par un réalisateur de films documentaires, Brian Leith. Il était captivé par les expériences que nous projetions, et a démarré une société néerlandaise qui a consenti à nous prêter des lions en peluche réalisés pour nos besoins. Quelques

mois plus tard, quatre beaux lions mâles en peluche, grandeur nature, arrivaient dans le Serengeti. Nous les avons baptisés Oméo (crinière courte et foncée), Lothario (crinière courte et claire), Julio (crinière longue et foncée) et Fabio (crinière longue et claire).

Dans chaque expérience, nous avons offert le choix entre deux faux lions à des groupes de lions adultes d'un même sexe. Lothario et Fabio servaient à tester l'importance de la longueur de la crinière, Julio et Fabio celui de sa teinte. Les crinières étaient amovibles, ce qui a permis d'éliminer le biais lié aux autres différences entre les peluches. Après avoir démarché un groupe de lions, nous attendions le crépuscule – leur pic d'activité –, nous installions les leurreurs sous le vent pour éliminer l'influence des odeurs, et nous amorçions des enregistrements de hyènes achevant un animal. Les lions arrivaient alors rapidement pour profiter du repas imaginaire, mais, lorsqu'ils approchaient, remarquaient très vite les deux «étrangers». À ce moment, nous étions près de l'enregistrement sonore et observations.

Le stratagème fonctionnait. Les lions devenaient très prudents lorsqu'ils découvraient leurs congénères factices, s'arrêtant tous les quelques mètres pour les examiner attentivement. Lorsqu'ils atteignaient un leurreur, leur premier geste était souvent de renifler sous sa queue. Pour éliminer l'effet de l'odeur des peluches sur le comportement, nous notions de quel côté – celui de l'un ou l'autre lion factice – les lions s'approchaient, ce qu'ils décidaient au moins 100 mètres en amont. Ainsi, l'approche d'une femelle du côté de la peluche à crinière foncée était comptée comme une préférence pour la crinière plus foncée.

Un handicap sur le plan thermique

Il a fallu trois ans pour recueillir suffisamment de données. Les lions s'habituèrent vite aux animaux factices. Ceux qui les avaient déjà vus, même des années auparavant, n'étaient plus dupés. Ils manifestaient moins de prudence et, souvent, ne s'approchaient même pas. Or les groupes de lions sont fluctuants, et même si trois lionnes parmi un groupe de quatre étaient néophytes vis-à-vis des peluches, nous ne pouvions pas tester le groupe: il fallait qu'aucune d'elles n'ait vu les peluches. Par ailleurs, comme le test des mâles implique des coalitions fixées sur un territoire (des mâles nomades fuient plutôt que de s'approcher des mâles résidents), nous avons dû étendre notre zone d'étude pour recueillir assez de données.

Ces leçons montrent, comme précédemment, que les femelles préfèrent nettement les crinières foncées, puisqu'elles s'approchent du côté de la peluche à crinière noire neuf fois sur dix. Une légère préférence, peu significative, a été notée envers les crinières longues. De façon similaire, les mâles étaient sensibles à la teinte foncée de la crinière: ils ont évité la peluche à crinière foncée cinq fois sur cinq. Cependant, à la différence de l'étude à l'aide d'enregistrements, les tests effectués avec Lothario (crinière courte et claire) et Fabio (crinière longue et claire) ont montré que les mâles sont très sensibles à la longueur de la crinière: dans neuf tests sur dix, ils ont préféré la peluche à poil court. Ce désaccord tient au fait que l'étude précédente testait la domination à l'intérieur d'une coalition, alors que les

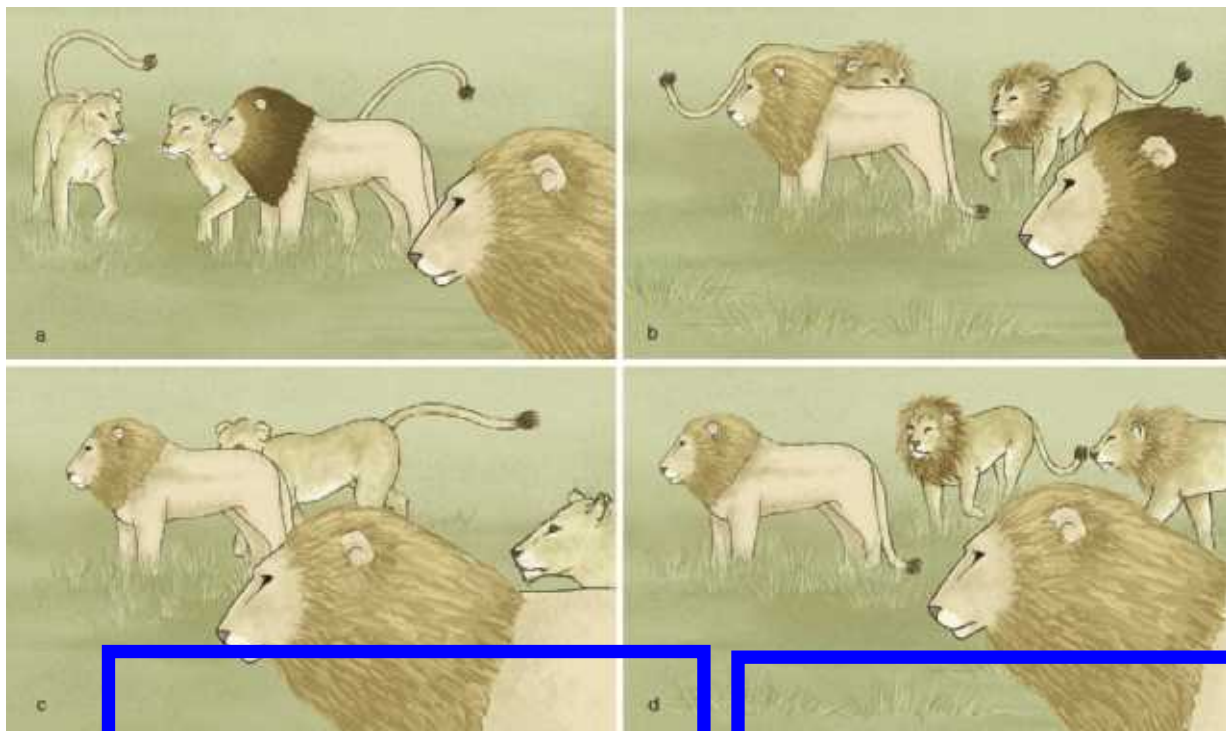
expériences avec les peluches simulent des interactions entre mâles ne se connaissant pas. La longueur de la crinière pouvant être un signe de succès récents au combat, cet indicateur peut être plus pertinent lorsqu'il faut décider d'affronter ou non un adversaire inconnu.

Nous avons établi que la crinière constitue un signal pour les congénères, mais quels sont les avantages réels d'avoir ou de préférer une crinière foncée ou longue? Un nouvel examen des données disponibles a permis de le préciser. Alors que la longueur de la crinière n'a pas de lien apparent avec la condition physique générale, la teinte sombre est un facteur significatif. Les mâles dotés d'une crinière plus foncée passent une part plus importante de leur vie dans une troupe et ont de meilleures chances de survie en cas de blessures. De surcroît, leur progéniture a plus de chances d'atteindre son deuxième anniversaire et moins de propension à être blessée, ce qui suggère que les mâles à crinière foncée offrent une meilleure protection contre les autres lions, principaux responsables des blessures.

Ces analyses ont mis en évidence plusieurs avantages à être doté d'une crinière foncée. Alors pourquoi tous les mâles n'en ont-ils pas? En d'autres termes, qu'est-ce qui empêche la triche chez les mâles en quête d'une femelle? Il s'agit d'une question classique en écologie. On répond en général que la production ou le maintien d'un tel caractère visible doit être si coûteux que seuls des mâles supérieurs peuvent se le permettre. Or quel serait le coût associé à une crinière foncée? Réponse: la chaleur.

On sait depuis longtemps que les crinières des lions diffèrent selon la région considérée et, en particulier, la température qui y règne. Les mâles des habitats froids et d'altitude élevée ont des crinières plus fournie et plus foncées que ceux des zones chaudes et humides. Or tous les lions sont très sensibles à la chaleur. Les grands animaux ont plus de difficulté à supporter des températures élevées, car leur rapport surface/volume est plus faible, et le comportement des lions est souvent destiné à minimiser le stress thermique. Par exemple, ils dorment le jour et ne sont actifs qu'à la nuit, se couchent sur le dos pour exposer le ventre — dont la peau, plus mince, évacue plus aisément la chaleur — se reposent sur des rochers surélevés pour capter la brise, ou halètent après le moindre effort. Contrairement aux chiens, les lions n'ont pas de museau froid et humide, et, contrairement aux hommes, ils ne transpirent pas. Leurs seuls moyens de régulation thermique sont la respiration (en haletant) et le rayonnement de la chaleur par la peau. Dans ce contexte, la crinière est un handicap puisqu'elle empêche une dissipation efficace de la chaleur. Qui plus est, les poils foncés sont plus épais que les poils clairs, ce qui améliore l'isolation, et les surfaces foncées absorbent davantage l'énergie solaire que les surfaces claires.

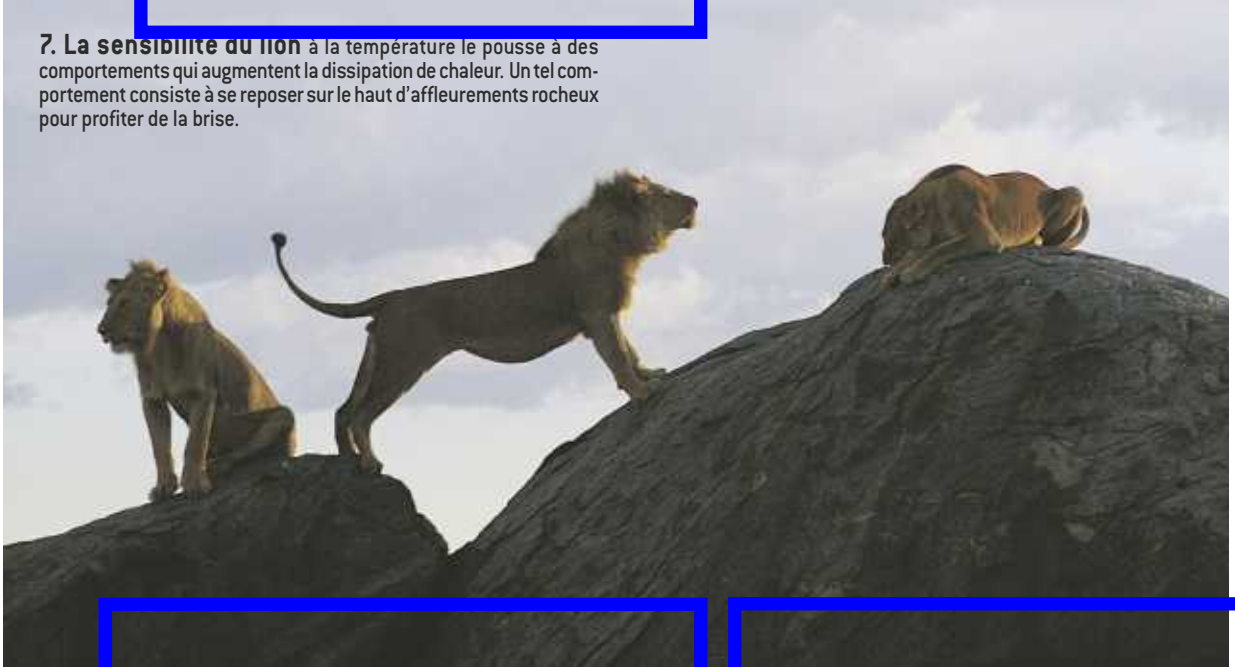
Le stress lié à la chaleur constituerait ainsi le coût le plus notable d'une crinière, et les lions dotés d'une crinière longue et foncée seraient les plus désavantagés. Pour tester cette hypothèse, nous avons utilisé des caméras thermographiques portables, qui permettent de mesurer à distance la



6. Des lions en peluche aussi grands que nature, utilisés par paires, ont permis d'observer la réaction de chaque sexe face à des mâles inconnus en fonction de la longueur ou de la couleur de leur crinière. Les femelles se sont approchées dans 90 pour cent des cas des leurres à crinière foncée (a). Au contraire, les lions mâles ont évité l'étranger à crinière foncée dans 80 pour cent des essais (b). Les femelles ont manifesté une préférence moins marquée pour les cri-

nières longues (c) (70 pour cent des cas seulement, ce qui n'est pas significatif). Les mâles, en revanche, étaient méfiants vis-à-vis du leurre à long poil, approchant prudemment du côté du lion factice à courte crinière dans 90 pour cent des essais (d). Cette expérience montre que les mâles d'une coalition prêtent bien attention à la longueur de la crinière lorsqu'ils évaluent la vaillance au combat d'un rival inconnu, même s'ils ne le font pas entre eux.

7. La sensibilité du lion à la température le pousse à des comportements qui augmentent la dissipation de chaleur. Un tel comportement consiste à se reposer sur le haut d'affleurements rocheux pour profiter de la brise.



température de surface d'un objet. Nous avons pris pendant trois mois des clichés infrarouges de tous les mâles adultes de la région, ainsi que de nombreuses femelles et de jeunes, et avons d'abord testé l'hypothèse suivante : si la crinière est coûteuse sur le plan de la thermorégulation, les mâles devraient être plus chauds que les femelles.

La comparaison de la température chez les deux sexes semble confirmer cette supposition, à ceci près que les mâles seraient plus chauds simplement parce qu'ils sont 50 pour cent plus gros, d'où un rapport surface/volume plus petit. Nous nous sommes rendus dans le Parc national de Tsavo, au Kenya, où les lions mâles ont très peu de crinière. Nous avons recherché des mâles sans crinière ou en ayant très peu, mais plus gros que les femelles. Si les mâles et les femelles de Tsavo montraient des températures différentes, la température serait liée à la taille de l'animal. Dans le cas contraire, les différences de température observées chez les lions du Serengeti seraient dues aux crinières.

À l'appui de notre hypothèse du stress lié à la chaleur, Tsavo est notablement plus chaud et plus humide que le Serengeti, et les lions semblent y être plus éprouvés par le climat. Nous avons par exemple observé un nouveau comportement qui consiste à gratter le sol avant de s'y allonger, probablement pour mettre à nu la terre plus fraîche située sous la surface. Cependant, hormis les crinières et cette adaptation à la chaleur, les lions de Tsavo sont presque identiques à ceux du Serengeti par leur apparence, leur comportement, et la taille des groupes et des coalitions. Nous avons effectué plusieurs tests avec des peluches et avons constaté que les mâles semblent intimidés par les crinières longues et foncées, exactement comme ceux du Serengeti. Et les images thermiques ont révélé que les mâles de Tsavo n'étaient pas plus chauds que les femelles. Conclusion : la différence de température entre les mâles et les femelles du Serengeti est liée à la crinière plutôt qu'à la différence de taille.

De retour au Serengeti, nous avons comparé les températures corporelles des mâles aux caractéristiques de leur crinière pour déterminer les facteurs influents. La longueur de la crinière importe peu. En revanche, les mâles à crinière foncée sont plus chauds que ceux à crinière claire, ce qui confirme que les mâles à crinière plus foncée paient un prix plus élevé sur le plan thermique. En outre, nous avons vérifié

que les mâles à crinière foncée ont proportionnellement davantage de sperme anormal, un effet bien connu de la surchauffe des testicules. Par ailleurs, les mâles à crinière foncée réduisent leur absorption de nourriture par temps plus chaud, contrairement aux mâles à crinière claire. Or les lions ayant fait un repas copieux halètent davantage et ont des températures de surface supérieures, ce qui suggère qu'être rassasié est en soi une cause de stress thermique. Les mâles à crinière foncée sont donc désavantagés par la chaleur, doivent donc en plus modérer leurs repas lorsque la température est élevée.

Existe-t-il des effets similaires au niveau de la population ? La réponse est affirmative. Les mâles nés dans les régions boisées du Serengeti, l'habitat le plus chaud de notre zone d'étude, ont une crinière plus courte tout au long de leur vie, indépendamment du climat où ils vivent à l'âge adulte. De même, les mâles qui entrent dans l'adolescence au cours d'années plus chaudes que la moyenne conservent toute leur vie une crinière plus courte. Enfin, les mâles du cratère de Ngorongoro, la zone la plus froide de notre région d'étude, ont une crinière notablement plus foncée. Ces résultats soulignent l'importance de la chaleur dans la détermination des caractéristiques de la crinière, et pour l'espèce en général.

Une telle sensibilité des lions suggère qu'ils vivent à la limite de leur tolérance à la chaleur, ce qui soulève un problème de conservation intéressant. Dans un contexte de réchauffement global, l'augmentation des températures moyennes dans l'Afrique de l'Est conduira probablement à la raréfaction des lions à crinière longue et foncée. Cela pourrait même entraîner des adaptations physiologiques ou comportementales des lions, avec d'éventuelles conséquences sur des écosystèmes entiers.

Nous remercions la revue *American Scientist* de nous avoir autorisés à publier cet article.

Peyton WEST est biologiste au Département des mammifères du zoo du Bronx.

P. M. WEST et C. PACKER, *Sexual selection, temperature and the lion's mane*, in *Science*, n° 297, pp. 1139-1343, 2002.

C. PACKER et A. PUSEY, *La coopération chez les lions*, in *Pour la Science*, n° 237, juillet 1997.

Auteur & Bibliographie

L'ingénierie tissulaire



Yorgos Ntass Welcome Photo Library

DOSSIER

Soigner, traiter, soulager sont les objectifs des médecins et des biologistes. Lorsqu'un organe est endommagé – la peau par une brûlure grave, le cœur par un infarctus, l'os par une fracture qui ne se consolide pas –, il faut pratiquer une greffe, ou disposer d'un tissu qui répare la lésion. Parce que les organes disponibles pour une greffe sont trop rares, les biologistes se sont engagés dans la voie de l'ingénierie tissulaire : ils tentent de reconstruire des tissus qui remplaceraient le tissu lésé et qui en stimuleraient la réparation. Ils sont confrontés à deux difficultés majeures : l'identification des cellules ayant le pouvoir réparateur recherché et la mise au point du support idéal pour que ces cellules acquièrent la bonne fonction au bon endroit quand elles seront réimplantées chez le patient. Pour ce faire, les biologistes explorent l'immense potentiel des cellules souches qui persistent chez l'adulte (voir Des cellules souches aux tissus de remplacement, page 64). Aujourd'hui, on sait reconstruire la peau (voir La peau reconstruite, page 70), obtenir des cellules cardiaques qui battent (voir La reconstruction des cœurs endommagés, page 76) et accélérer le comblement d'une lésion osseuse (voir La réparation de l'os et du cartilage, page 82). Il faudra des années pour « fabriquer » des tissus de réparation, mais ce n'est plus, aujourd'hui, une utopie.

Des cellules souches aux

Les principaux enjeux de l'ingénierie tissulaire sont l'obtention du type de cellules souches souhaité, le contrôle du lieu de leur multiplication quand elles sont réimplantées et la maîtrise de leur vitesse de multiplication, car on doit éviter tout risque de prolifération incontrôlée.

Lukas Sommer

À nouveau, les cellules souches et leurs applications potentielles font la une des journaux : l'équipe coréenne de Woo-Suk Hwang, de l'Université de Séoul, et l'équipe britannique d'Alicia Murdoch, de l'Université de Newcastle, ont récemment annoncé qu'elles avaient réussi à cloner un embryon humain, clone obtenu à partir d'une cellule adulte non fécondée. La Corée et la Grande-Bretagne sont parmi les rares pays autorisés à produire des embryons humains à des fins scientifiques et à pratiquer le clonage thérapeutique. Les débats éthiques soulevés par cette manipulation du vivant restent armés : a-t-on le « droit » de créer des clones ? Pour créer des embryons destinés à fournir des cellules souches utilisées à des fins thérapeutiques, afin de réparer un tissu malade chez un adulte ? Ces questions n'auront pas de réponse rapide ni définitive. Comme les cellules souches portent en elles l'espoir de devenir une source intarissable de cellules qui répareraient ou guériraient les tissus malades, les recherches se poursuivent aussi sur les cellules souches embryonnaires issues d'embryons qui ne font plus l'objet d'un projet parental et sur les cellules souches adultes. Pour que la réparation tissulaire devienne un jour réalité, nous devons d'abord décrypter tous les mécanismes qui commandent le devenir des cellules souches et déterminer le type de cellules souches le mieux adapté selon l'application souhaitée.

Pour obtenir des tissus de remplacement, on utilise des cellules souches, les cellules fondatrices de tout organe, tissu et cellule de l'organisme. Ce sont des cellules indifférenciées, qui peuvent donner à peu près n'importe quel type de lignées cellulaires. Qui plus est, elles sont capables de s'autorenouveler, c'est-à-dire de continuer à produire des cellules filles indifférenciées, qui conservent toutes les potentialités des cellules souches. Ainsi les cellules souches ont de multiples fonctions : elles fournissent tous les types

de cellules nécessaires à la formation des organes, elles contrôlent le fonctionnement de ces organes (leur homéostasie) et elles assurent la régénération et la réparation de divers tissus. Toutes ces caractéristiques font des cellules souches un enjeu majeur de la recherche actuelle en biologie, notamment pour le traitement des maladies neurodégénératives par des cellules de remplacement. Toutes les maladies dues à des lésions tissulaires ou à des mécanismes de dégénérescence sont susceptibles d'être traitées par des cellules souches ; c'est, par exemple, le cas de la maladie de Parkinson, de la maladie d'Alzheimer, des accidents vasculaires cérébraux, des lésions de la moelle épinière, des maladies cardio-vasculaires.

Après avoir décrit le potentiel des cellules souches, les difficultés que pose l'utilisation des cellules souches embryonnaires et l'intérêt des cellules souches adultes, nous examinerons les facteurs qui commandent la différenciation de ces cellules ; ces facteurs interviennent dans des chaînes moléculaires complexes et les molécules délivrées par l'environnement sont tout aussi déterminantes que les molécules synthétisées par la cellule elle-même lors de sa différenciation.

Les cellules souches ayant le plus grand potentiel de différenciation sont celles de la masse interne du blastocyste, un stade embryonnaire précoce, constitué d'une sphère microscopique creuse de cellules. Les cellules souches embryonnaires issues du blastocyste sont totipotentes,

1. Les cellules souches sont à l'abri dans des « niches ».

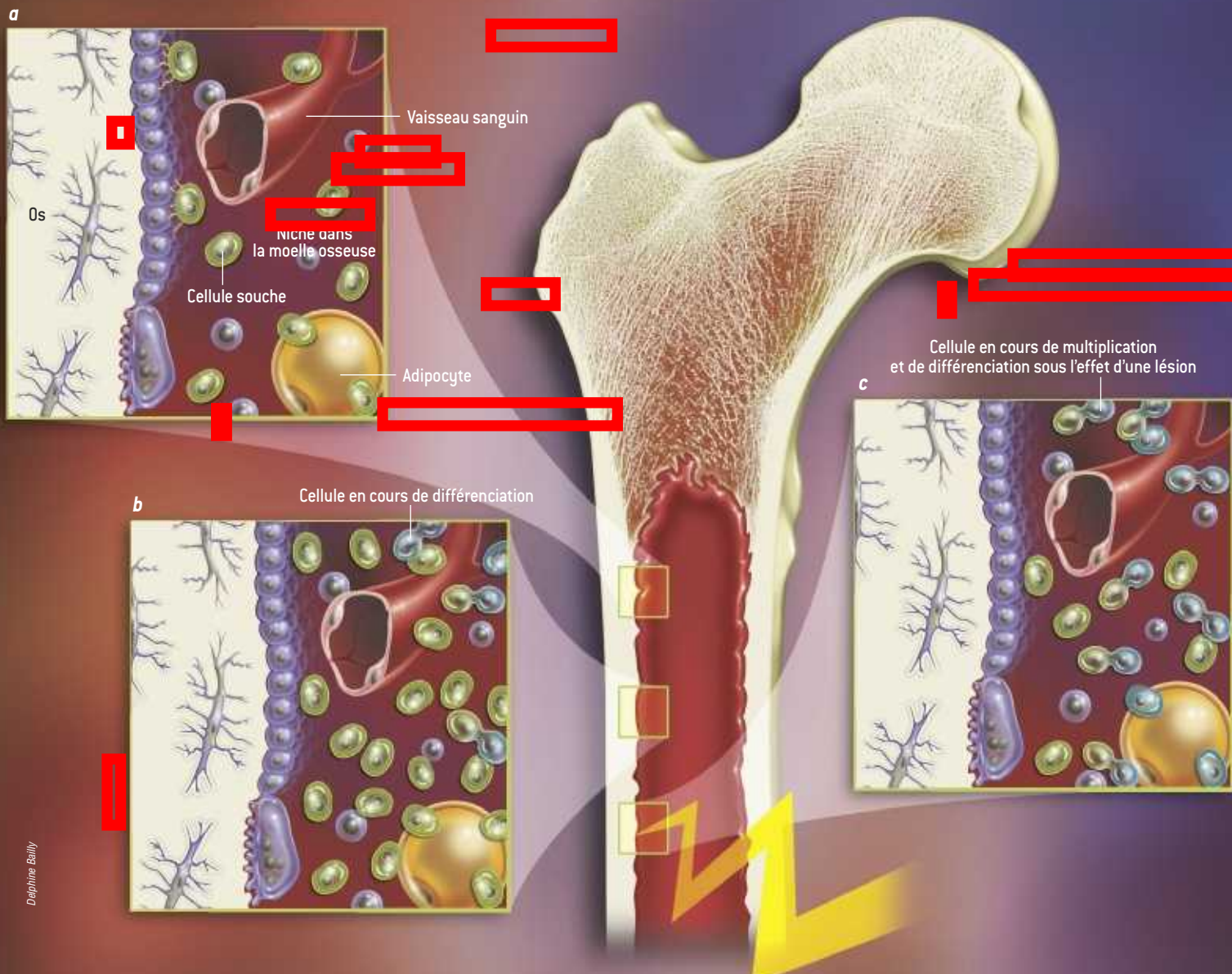
Normalement, les cellules souches se divisent peu, se reproduisant identiques à elles-mêmes juste ce qu'il faut pour que le stock reste constant. L'équilibre est assuré par des signaux émis par les cellules souches elles-mêmes, mais aussi par les cellules environnantes avec lesquelles elles sont en contact, ici les cellules de la couche de cellules qui répare l'os de la moelle osseuse (a). Parfois, elles seraient trop nombreuses dans une niche et certaines en sortiraient, migreraient plus loin dans la moelle et commenceraient à se différencier (b). En cas de stress ou de lésion du tissu environnant, la division, la différenciation et la migration des cellules souches réparatrices seraient rapidement enclenchées (c).

tissus de remplacement

c'est-à-dire qu'elles réagissent aux divers signaux de la morphogénèse pour donner tous les types de cellules qui constitueront le futur embryon. En culture, les cellules souches peuvent se reproduire quasi indéfiniment: elles ont un potentiel de multiplication et de différenciation illimité. À mesure que les organes se forment durant le développement embryonnaire, les cellules entrent dans des voies de différenciation plus étroites, mais des cellules souches pluripotentes restent disponibles pour la formation des différents types cellulaires de chaque tissu (contrairement aux cellules souches totipotentes qui peuvent donner tous les types de cellules de l'organisme, les cellules pluripotentes ne donnent que les types de cellules d'un tissu ou d'un organe). De telles cellules souches persistent même chez l'adulte. C'est le cas

des tissus capables de se régénérer et de se renouveler rapidement: la peau, les cheveux, le sang et les intestins, par exemple. Récemment, on a même découvert des populations de cellules ayant les propriétés des cellules souches dans des tissus que l'on pensait dépourvus de capacité de régénération, tels les muscles squelettiques ou le cerveau. Des cellules souches présentes dans le pancréas seraient également capables de produire les cellules des îlots de Langerhans qui synthétisent l'insuline.

Toutefois ce dernier résultat reste controversé et illustre une difficulté majeure: comment peut-on identifier et caractériser de façon fiable des cellules souches? Différentes méthodes ont été proposées tant pour des organismes vivants que pour des cultures de cellules. L'identification





2. Les cellules souches embryonnaires sont prélevées sur des embryons issus d'une fécondation *in vitro*, ne faisant plus l'objet d'un projet parental et ayant atteint le stade de blastocyste. Au cours des quelques jours nécessaires pour atteindre ce stade, les divisions cellulaires se succèdent rapidement, de sorte que les cellules filles sont de plus en plus petites : le blastocyste n'est à peine plus gros que les deux cellules initiales. Il est constitué d'une sphère externe de cellules dites trophoblastiques et d'un amas excentré de cellules souches, que l'on récupère à l'aide d'une pipette.

Le prélevement de cellules souches est une difficulté majeure, car ces cellules ne semblent porter aucun marqueur spécifique. Comment reconnaître ces cellules particulièrement discrètes ? Pour s'assurer que l'on a bien isolé des cellules souches, on les place en culture et l'on teste l'influence de différents facteurs de croissance sur la différenciation des cellules souches ; quand on suppose qu'un type de cellules souches présumées a un tel potentiel de différenciation, on l'implante chez un animal et l'on observe son devenir. Ainsi, une des principales difficultés liées à ces cellules est l'identification des vraies cellules souches, celles qui n'ont pas encore commencé à s'engager dans une voie de différenciation.

Quelles sont les applications thérapeutiques potentielles des cellules souches ? On les teste en utilisant deux stratégies : on teste de stimuler les propres cellules souches du patient pour qu'elles se divisent et remplacent les cellules endommagées ou les tissus malades, ou l'on transplante au patient des cellules souches qui ont commencé à se différencier en culture. La première stratégie suppose que les cellules endogènes soient capables de réparer un tissu. Les neurobiologistes ont été surpris de constater que le cerveau lui-même, du moins chez le rat et la souris, a une capacité – certes limitée – d'autorégénération. Ils ont détruit spécifiquement des neurones

corticaux et ont constaté que quelques semaines plus tard, certains neurones avaient été remplacés par des cellules endogènes. Qu'en plus est, dans un modèle de la maladie de Parkinson, on a suivi les animaux dont le cerveau avait été lésé et à qui l'on avait administré un cocktail de facteurs de croissance : on a observé une prolifération rapide des cellules du cerveau antérieur, une migration vers la zone lésée des progéniteurs (les cellules précurseurs) des neurones et des cellules gliales (les cellules nourricières des neurones qui leur servent aussi de support), puis une différenciation des neurones. Ainsi la régénération du cerveau serait déclenchée par des signaux libérés lors d'une lésion et la présence au même moment et au même endroit de facteurs de croissance.

La deuxième stratégie thérapeutique consiste à transplanter des cellules souches en cours de différenciation issues de cultures. Quelle est la source de cellules souches la mieux adaptée à une application particulière ? En principe, des cellules transplantées doivent répondre à plusieurs critères : premièrement, elles doivent survivre après la transplantation, et les biologistes cherchent à augmenter la durée de vie des cellules transplantées, facteur encore limitant pour les tissus de remplacement. Deuxièmement, les cellules transplantées doivent migrer vers la lésion, c'est-à-dire qu'elles doivent « sentir » où elles doivent se rendre. Troisièmement, les cellules transplantées doivent donner le type cellulaire qu'il faut remplacer et ce type seulement. C'est essentiel pour que ces cellules ne forment pas de tumeurs. Quatrièmement, les cellules qui se différencient à partir des cellules transplantées doivent s'intégrer au tissu endommagé pour que l'organe lésé retrouve son fonctionnement normal. Quand il s'agit du cerveau ou du cœur, on imagine aisément que la tâche n'est pas aisée pour les cellules souches.

Jusqu'à présent, les biologistes ont utilisé des cellules embryonnaires, fœtales et adultes pour obtenir les différents types de cellules spécialisées souhaités. Les cellules souches embryonnaires utilisées sont issues d'embryons engendrés par fécondation *in vitro*. Les premières lignées de cellules souches embryonnaires ont été obtenues en 1998. Pour obtenir de telles lignées de cellules souches embryonnaires visant à obtenir des tissus de remplacement, on a détruit les embryons, ce qui, à l'évidence, soulève des questions éthiques. Dans plusieurs pays, le débat reste ouvert, et des lois plus ou moins restrictives sur la recherche sur les cellules souches ont été promulguées. Dans certains pays, par exemple en France et en Suisse, la production de cellules souches embryonnaires à partir des blastocystes humains est autorisée (avec l'autorisation éclairée des parents), mais seulement avec des embryons obtenus par fécondation *in vitro* et qui ne sont plus l'objet d'un projet parental.

Les cellules embryonnaires

Outre la question éthique, cette méthode soulève celle d'un possible rejet du tissu transplanté, obtenu avec des cellules ne portant pas les mêmes marqueurs génétiques que le receveur et qui serait reconnu comme étranger par l'organisme du cerveau (en fait, la question reste ouverte, certains biologistes pensant que les cellules souches embryonnaires ne sont pas susceptibles de déclencher de réactions de rejet). Enfin, la transplantation de cellules souches entraîne des

conduit presque inmanquablement à la formation de tumeurs, car seules les cellules du tissu cible sont fonctionnelles et les autres ne font que se multiplier. C'est pourquoi on amorce en culture la différenciation vers le type de cellule souhaité, avant la transplantation. On a montré qu'en évitant de transplanter des cellules indifférenciées, on réduit notablement les risques d'apparition de tumeurs.

Les cellules souches embryonnaires présentent un immense avantage par rapport aux autres types de cellules souches : elles se multiplient quasi indéfiniment en culture. De plus, elles ont un vaste potentiel de développement, et l'on maîtrise aujourd'hui la différenciation de cellules souches embryonnaires de souris en plusieurs types cellulaires. Ainsi les cellules souches embryonnaires peuvent se différencier en motoneurones ou en neurones dopaminergiques (produisant le neurotransmetteur dopamine), en cellules sanguines, en cellules cardiaques ou encore en cellules d'îlots de Langerhans produisant l'insuline. Dans les modèles animaux, des cellules issues de cellules souches embryonnaires ont été greffées et ont réparé des anomalies cardiaques ou de la moelle épinière, et amélioré l'état d'animaux parkinsoniens. Les résultats chez l'homme sont encourageants : on a obtenu différents types de cellules à partir de cellules souches embryonnaires ; cependant, toutes les difficultés sont loin d'être résolues. Par exemple, les cellules souches embryonnaires humaines semblent proliférer et se multiplier beaucoup plus lentement que les cellules souches embryonnaires de souris.

Des cellules souches isolées d'embryons issus d'interruptions volontaires de grossesse ont aussi été utilisées pour remplacer des cellules anormales. Ainsi, des neurones dopaminergiques fœtaux ont été utilisés dans des essais cliniques pour traiter des patients atteints de la maladie de Parkinson, mais les résultats ont été variables. Les cellules transplantées ont survécu pendant plusieurs années, mais seuls quelques patients ont vu leur état s'améliorer et certains ont subi des effets secondaires délétères. Ces études ont aussi montré la nécessité de caractériser et de purifier les populations de cellules souches les mieux adaptées aux transplantations. Globalement, il est peu vraisemblable que les cellules souches fœtales soient utilisées dans les traitements standards en raison de leur faible disponibilité.

En revanche, les cellules souches adultes représentent une bonne alternative aux cellules souches embryonnaires, du moins pour certaines applications. De façon idéale, les cellules souches seraient isolées sur le patient lui-même, placées en culture où elles se multiplieraient et s'engageraient dans la voie de différenciation souhaitée pour remplacer les cellules endommagées du patient, puis seraient greffées.

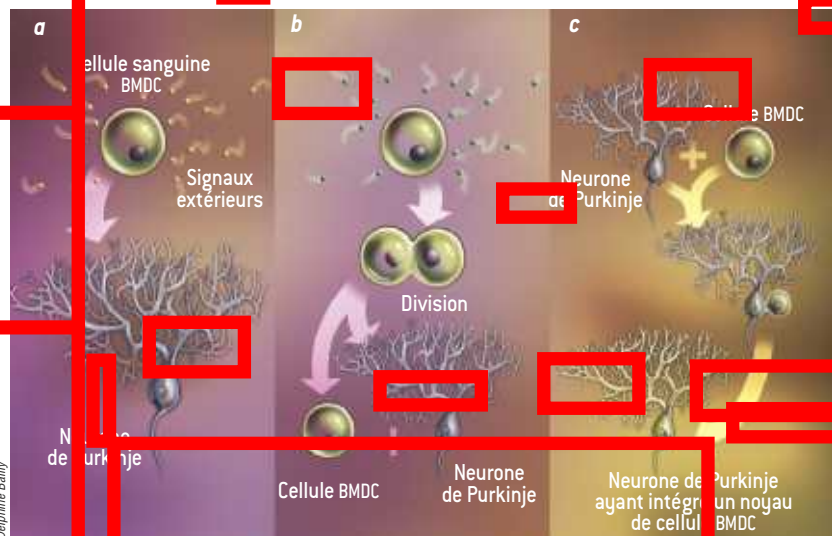
Cette approche soulève peu de difficultés éthiques et éviterait les risques de rejet de greffe. Qui plus est, plusieurs sources potentielles de cellules souches adultes sont aisément accessibles, telles les cellules souches de la peau et, dans une certaine mesure, de la moelle épinière. Toutefois, les cellules souches adultes présentent un inconvénient : elles ont un potentiel de multiplication inférieur à celui des cellules souches embryonnaires. Mais cela n'interdit pas leur usage pour l'obtention de tissus de remplacement. La transplantation de cellules souches de la moelle osseuse se différenciant en cellules sanguines a été pratiquée depuis des années pour traiter des patients souff-

rant de maladies sanguines (leucémies ou maladies immunitaires). De même, des cellules souches épithéliales de la peau ont été utilisées en clinique : de telles cellules peuvent être prélevées sur le patient, multipliées en culture pour former un épithélium et appliquées sur une blessure ou sur une brûlure.

Les nombreux avantages des cellules souches adultes

Dans des modèles animaux, des cellules souches cardiaques ont ré-généré le myocarde après un infarctus et amélioré la fonction cardiaque. De même, des cellules souches adultes du cerveau semblent améliorer les symptômes de la sclérose en plaques (où les cellules cérébrales nécessaires à la conduction de l'influx nerveux sont endommagées). L'effet bénéfique pourrait venir des cellules transplantées, mais aussi de la stimulation des cellules endogènes. Ce résultat indique que les traitements du futur reposent sans doute sur la combinaison d'une transplantation de cellules souches et de l'activation des cellules endogènes par des facteurs libérés par les cellules souches.

Les cellules souches ont-elles des propriétés potentielles supérieures à ce que l'on pensait, c'est-à-dire sont-elles capables de donner des types cellulaires qu'elles ne sont pas censées produire ? Pourraient-elles être utilisées pour traiter des lésions du tissu dont elles sont issues, mais aussi d'autres tissus ? Ainsi, la moelle osseuse contient des cellules souches pluripotentes dites mésenchymateuses qui peuvent donner différentes lignées mésenchymateuses, mais aussi la plupart des autres lignées de l'organisme y compris celles du cerveau. Les transferts de cellules de la



3. Une cellule souche du sang dite BMDC (*bone marrow derived cell*, cellule dérivée de la moelle osseuse) peut évoluer selon différents mécanismes. Elle pourrait subir une transdifférenciation (a), c'est-à-dire se différencier en un autre type cellulaire, ici une cellule nerveuse, dite neurone de Purkinje. Elle pourrait subir un mécanisme de neurogenèse (b), c'est-à-dire d'abord une division où l'une des deux cellules filles reste identique à la cellule mère et où la seconde subirait une différenciation devenant un neurone de Purkinje. Enfin, elle pourrait s'engager dans une fusion cellulaire, le corps cellulaire d'une cellule de Purkinje existante absorbant le noyau de la cellule sanguine BMDC, de sorte que la cellule aurait deux noyaux (c).

moelle osseuse semblent donner des résultats positifs dans les essais cliniques évaluant le traitement de patients ayant eu un infarctus. Quoi qu'il en soit, les biologistes devront mieux comprendre comment fonctionnent les cellules souches avant de les utiliser en clinique.

Outre les cellules souches dérivées de la moelle osseuse, des cellules souches adultes pluripotentes issues du derme, du muscle et du cerveau engendrent de nombreux types cellulaires car elles subiraient un mécanisme de transdifférenciation. La transdifférenciation est la capacité d'un type cellulaire d'une lignée tissulaire particulière de se convertir en une autre lignée, par exemple, en l'absence de stimulation de l'expression des gènes due à des modifications du microenvironnement.

Transdifférenciation et fusion cellulaire

On a émis l'hypothèse qu'une lésion tissulaire augmente la vitesse de transdifférenciation des cellules souches dérivées de la moelle. Ces résultats restent à démontrer, mais on pense que la transdifférenciation, si elle existe, est rare (voir la figure 3). En revanche, les cellules transplantées peuvent fusionner avec les cellules endogènes différenciées. En fait, la capacité de fusionner caractérise plusieurs types cellulaires, tels que les myoblastes (les cellules du muscle) ou les hépatocytes (les cellules du foie). Parfois, les cellules d'une lignée particulière peuvent se redifférencier en un état antérieur qui permet aux cellules de se redifférencier selon une nouvelle voie de différenciation. Enfin, une des rares cellules souches totipotentes persisterait parfois jusqu'à l'âge adulte et, en cas de transplantation, serait capable d'engendrer, selon l'environnement, une grande variété de cellules.

Ainsi, lorsque l'on cherche à évaluer le potentiel de cellules souches en culture ou *in vivo*, il ne suffit pas d'analyser l'expression de marqueurs spécifiques de certaines lignées, encore faut-il s'assurer de la pureté de ces cellules pour éviter toute contamination par des cellules qui auraient des potentiels de différenciation différents. Quoi qu'il en soit, on a la preuve que des cellules souches se différencient comme on le souhaite lorsqu'elles s'intègrent au tissu ciblé et y fonctionnent comme les cellules de ce tissu.

Ainsi, il existe deux possibilités d'utilisation thérapeutique des cellules souches: la stimulation des cellules endogènes qui améliorerait la capacité de régénération du tissu lésé et la transplantation de cellules souches (embryonnaires ou adultes) qui remplaceraient le tissu lésé. Les deux stratégies nécessitent de trouver les bons facteurs de croissance, les hormones et toutes les molécules de signalisation qui aident les cellules à survivre, à conserver leurs caractéristiques de cellules souches, à proliférer et à donner les types de cellules souhaités. Nous n'en sommes qu'aux toutes premières étapes et commençons tout juste à découvrir les signaux impliqués dans la régulation du comportement des cellules souches.

Les biologistes pensent que le destin des cellules souches et leur différenciation dépendent d'une combinaison de signaux contrôlés par des facteurs de croissance extracellulaires, la matrice extracellulaire et les cellules avec lesquelles interagit la cellule en cours de différenciation. En

outre, les signaux délivrés par l'environnement influent sur les mécanismes de la cellule en cours de différenciation. L'étude des cellules souches en culture est indispensable pour décrypter tous ces signaux: en modifiant les conditions expérimentales et en suivant le devenir des cellules souches, on identifie les différents maillons moléculaires de la chaîne de différenciation. Seule une connaissance précise des mécanismes fondamentaux qui régulent l'équilibre entre les cellules souches qui restent à l'état de cellules souches et celles qui se différencient, au cours du développement et chez l'adulte, autorisera une meilleure maîtrise des tissus de remplacement obtenus à partir de cellules souches.

Dans l'organisme, beaucoup de cellules souches sont rassemblées dans des «niches». Dans une niche, l'environnement est favorable à la survie des cellules souches pluripotentes, lesquelles ne s'engagent pas dans la voie de la différenciation. Les cellules voisines, différenciées, libèrent des facteurs garantissant aux cellules souches un milieu extracellulaire favorable: il assure leur renouvellement et maintient leur capacité de s'engager, si besoin est, dans une voie de différenciation. Le contact physique entre les cellules souches et leurs voisines différenciées dans la niche est indispensable au maintien des cellules souches dans leur compartiment et du «caractère souche» de ces cellules. Dans leur niche, les cellules souches sont souvent quiescentes ou se divisent très lentement, mais une lésion peut déclencher leur prolifération.

À l'abri dans des niches

De telles niches sont localisées dans le bulbe d'un follicule pileux, dans la moelle osseuse, dans le fond d'une villosité intestinale, par exemple. On ignore encore les facteurs qui contrôlent le «caractère souche», c'est-à-dire qui garantissent le maintien des propriétés des cellules souches. Plusieurs voies de signalisation sont vraisemblablement impliquées. Certaines sont induites par la stimulation de récepteurs situés à la surface des cellules, notamment Notch. D'autres font intervenir des facteurs de croissance, tels que BMP (de l'anglais *bone morphogenetic proteins*, c'est-à-dire protéines morphogénétiques de l'os), TGF β (*transforming growth factor β* , le facteur de croissance bêta transformant) et Wnt. L'expression de tous les gènes d'une cellule souche a été étudiée avec l'espoir d'identifier ceux qui commandent le caractère souche. Les profils d'expression des gènes de cellules souches embryonnaires, de cellules souches hématopoïétiques ou encore de cellules souches neurales ont été comparés. Jusqu'à présent, on n'a pu éliminer l'empreinte génétique spécifique du caractère souche de ces cellules. Ces résultats reflètent-ils des difficultés techniques encore mal maîtrisées ou des différences intrinsèques entre les types de cellules souches?

À chaque division, une cellule a le choix entre se reproduire identique ou se différencier. On ignore encore comment une cellule entretient sa quiescence ou sa réplication à bas bruit, ou commence à proliférer et à se différencier. Une des possibilités serait que les cellules souches à force de se multiplier, même très lentement, finissent par manquer de place dans la niche. Quelques cellules pourraient alors quitter la niche. Dès qu'elles ont quitté la niche, ces cellules sont exposées à un environnement qui déclencherait la différenciation. Selon une autre hypothèse, un stress ou

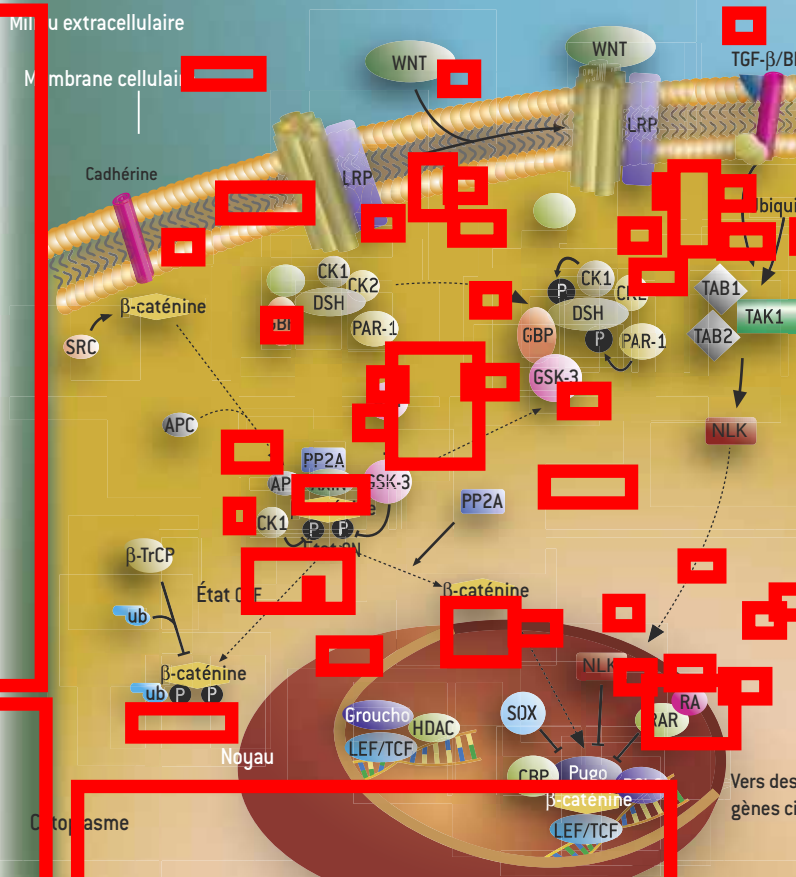
une lésion modifieraient les signaux de façon telle que la différenciation serait déclenchée. Les cellules souches peuvent subir une division symétrique engendrant deux cellules identiques à la cellule initiale ou se différencier, donnant deux cellules différenciées identiques; elles peuvent aussi subir une division asymétrique, donnant une cellule souche identique à la cellule mère et une cellule différenciée. Ainsi, le nombre total de cellules souches reflète un équilibre entre le nombre de divisions symétriques et asymétriques dans une niche. Par ailleurs, le nombre de cellules souches est également sous le contrôle de l'apoptose, la mort cellulaire programmée. Étant donné qu'une cellule progénitrice se multiplie à un rythme exponentiel, l'apoptose des cellules souches et des progéniteurs à des stades précoces a un effet notable sur le nombre final des cellules différenciées. À nouveau, l'environnement extracellulaire a un rôle essentiel dans le contrôle des populations de cellules souches, dont certaines se reproduisent et certaines sont détruites. Des facteurs extrinsèques pourraient déclencher l'apoptose de certaines cellules, de même, l'élimination de facteurs de croissance, qui seraient aussi des facteurs de survie, favoriserait la mort cellulaire.

La voie de signalisation Wnt

Ainsi, le développement des cellules souches est contrôlé par l'activité conjuguée de nombreux facteurs, dessinant un réseau de signalisation. La composition d'un tel réseau change avec le temps et avec le lieu, et les signaux qui constituent ces réseaux peuvent avoir des effets différents sur des types différents de cellules souches. Ainsi, la voie de signalisation Wnt joue un rôle crucial dans le contrôle de l'expansion de nombreux types de cellules souches. Toutefois, des résultats récents ont montré que Wnt n'est pas seulement un facteur de croissance général pour les cellules souches, mais qu'il peut aussi influencer sur le devenir des cellules souches en favorisant une voie de différenciation plutôt qu'une autre: Wnt a plus d'une corde à son arc moléculaire.

Son activité semble dépendre des propriétés intrinsèques des cellules qui peuvent changer avec le temps. Qui plus est, le contexte joue un rôle notable et détermine comment une cellule interprète les signaux Wnt, lesquels sont contrôlés par d'autres voies de signalisation qui agissent en synergie ou en opposition. On ignore encore comment une cellule souche intègre tous ces signaux et comment l'ensemble des réseaux de signalisation contrôle le fonctionnement moléculaire des cellules souches. Quoi qu'il en soit, le fait que différents types de cellules souches réagissent différemment à un signal donné sera fondamental lorsqu'il s'agira de passer à des applications thérapeutiques, dans la mesure où la différenciation doit être parfaitement contrôlée. En d'autres termes, le comportement d'une cellule souche dans le microenvironnement où elle a été transplantée peut dépendre de l'origine de la cellule. Par conséquent, il est indispensable d'étudier le comportement des différents types de cellules souches, y compris les cellules souches embryonnaires et de diverses sortes de cellules souches adultes, si l'on veut maîtriser le traitement de diverses maladies ou la réparation des lésions.

En résumé, si l'on veut mettre au point des méthodes d'ingénierie tissulaire à partir des cellules souches, on devra



4. La voie de signalisation Wnt est constituée de nombreux acteurs moléculaires. Certains sont identifiés, mais il en existe vraisemblablement encore bien davantage. Les protéines Wnt jouent un rôle essentiel dans l'expression de nombreux gènes. On a représenté ici différents acteurs de ces cascades complexes de signalisation.

préciser les mécanismes de régulation qui commandent le devenir des cellules souches et identifier les cellules souches les mieux adaptées. On devrait alors être capable d'établir des protocoles standardisés de manipulation des cellules souches. Les cellules souches, auxquelles on imposerait une voie de différenciation spécifique offriraient une source renouvelable de cellules de remplacement. Cette méthode permettrait de traiter, entre autres, la maladie de Parkinson, le diabète, les maladies cardiaques ou les lésions de la moelle épinière, mais aussi de régénérer certains tissus. Pour ce faire, nous devons pouvoir travailler sur les cellules souches (et travailler intensément), la perspective de traiter diverses maladies ou lésions par des cellules souches était à ce prix.

Lukas SOMMER, professeur de biologie cellulaire et du développement, dirige une unité de l'Institut de biologie cellulaire de l'Institut fédéral suisse de technologie, à Zurich.

M. KLUMBER et L. SOMMER, *Wnt signaling and the regulation of stem cell function*, in *Curr. Opin. Cell. Biol.*, vol. 16(6), pp. 681-687, 2004.

H. LEIBER et al., *Instructive role of Wnt/beta-catenin in sensory fate specification in neural crest stem cells*, in *Science*, vol. 303(5660), pp. 1020-1023, 2004.

D. ZILBER, *The nature of stem cells: state rather than entity*, in *Nat. Rev. Genet.*, vol. 5(11), pp. 675-676, nov. 2004.

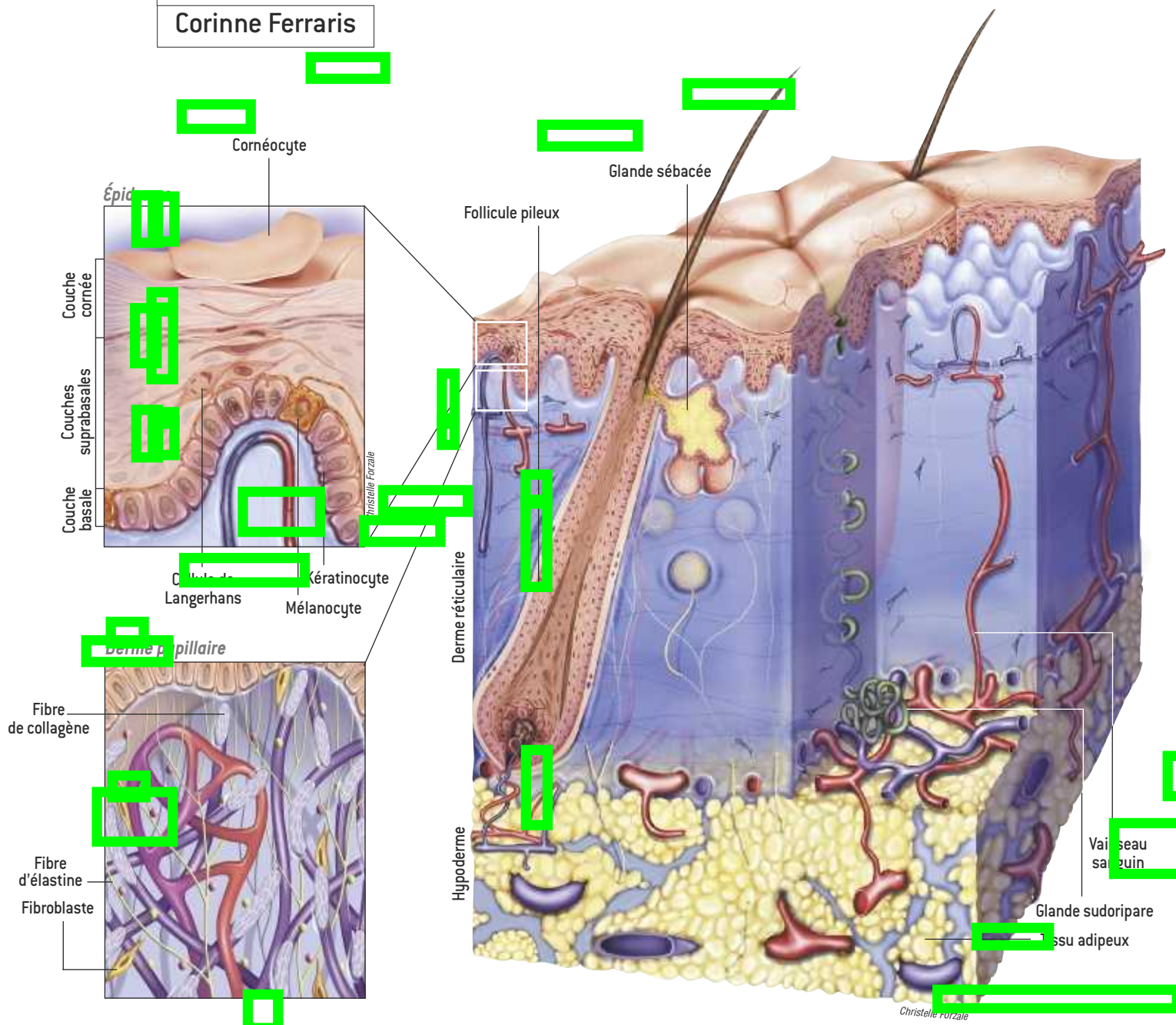
J. LINDBALL, Z. KOKAIA et A. MARTINEZ-SERRANO, *Stem cell therapy for human neurodegenerative disorders-how to make it work*, in *Nat. Med.*, Review, vol. 10, Suppl., pp. 42-50, juillet 2004.

Auteur & Bibliographie

La peau reconstruite

Les principales fonctions de la peau sont aujourd'hui reproduites et explorées sur des modèles de plus en plus élaborés qui contiennent les principaux types de cellules de la peau normale. Outils de tests et de recherche, les modèles de peau servent aussi à comprendre les qualités de la peau saine et à réparer la peau malade.

Corinne Ferraris



La peau est l'organe sensoriel le plus développé de notre organisme. Responsable du toucher, elle intervient dans la perception de l'environnement ; miroir de l'expression de nos émotions, elle participe à notre communication. Représentant près du sixième de notre poids corporel, elle joue, par ses multiples fonctions, un rôle essentiel dans le bon fonctionnement de l'organisme. Barrière face à l'environnement, elle protège des agressions extérieures, qu'elles soient d'origines bactériennes ou mécaniques. Elle participe à la régulation de la température du corps par la transpiration et évite la déshydratation. Lorsqu'elle est endommagée, elle se reconstruit naturellement sauf quand une trop grande surface est lésée. Reconstruire l'épiderme, voire les différentes couches de la peau, est un enjeu majeur, notamment pour le traitement des grands brûlés. En effet, chaque année en France, 10 000 personnes sont admises dans des centres spécialisés pour les brûlures et 3 000 patients sont susceptibles de nécessiter une greffe.

L'urgence est alors de redonner à l'organisme sa barrière protectrice afin d'éviter la perte en eau et les infections. Dans le cas où les zones brûlées ne sont pas trop étendues, des autogreffes sont pratiquées : de la peau est prélevée sur des parties saines pour couvrir les plaies. Si la surface brûlée profonde est supérieure à la moitié de la surface du corps, il ne reste plus suffisamment de zones saines pour couvrir la plaie, et il faut recourir à une culture d'épiderme, dit autologue, c'est-à-dire issu du patient. Comment réaliser-t-on des cultures de peau ? À partir de quelles cellules, sur quel substrat, dans quel milieu ? Les peaux reconstruites ont-elles les mêmes propriétés que la peau qu'elles remplacent ?

Toutes ces questions fondamentales qui touchent la peau de remplacement ou encore l'ingénierie tissulaire de la peau seront évoquées ici. Nous examinerons d'abord la peau normale et ses constituants, puis les étapes clés de l'histoire des peaux reconstruites, les résultats que ces modèles ont apportés sur le plan de l'étude des mécanismes biologiques impliqués dans le fonctionnement de la peau normale, sur le plan de l'étude des maladies de la peau et sur le plan clinique du traitement des grands brûlés. Nous terminerons par les espoirs que soulèvent les cellules souches de l'épiderme.

1. La peau est constituée de trois compartiments, l'épiderme, le derme et l'hypoderme, et des annexes cutanées, le poil (ou follicule pileux), la glande sébacée (qui produit le sébum) et la glande sudoripare (qui produit la sueur). Dans l'épiderme, les kératinocytes de la couche basale se divisent et se différencient en migrant vers la surface pour former la couche cornée qui protège la peau de l'environnement. En fin de parcours, les cellules de la surface (les cornéocytes) sont éliminées par le processus de desquamation. Les cellules de Langerhans sont des acteurs du système immunitaire tandis que les mélanocytes produisent les pigments qui protègent l'ADN cellulaire contre le rayonnement solaire. Le derme confère à la peau sa résistance et sa souplesse ; il contient des fibroblastes qui synthétisent les différents constituants de la matrice extracellulaire (les fibres de collagène et d'élastine, ainsi que les protéoglycanes).

La peau représente une surface de près de deux mètres carrés et pèse environ quatre kilogrammes (sans l'hypoderme) chez un adulte de 75 kilogrammes. Elle est formée de l'épiderme et du derme sous-jacent. Sous l'influence de facteurs dermiques se développent, à partir de l'épiderme, les annexes cutanées, telles que les follicules pileux, les glandes sébacées et les glandes sudoripares. L'ensemble repose sur du tissu adipeux. L'épiderme, la couche la plus externe, est un épithélium stratifié qui se renouvelle toutes les trois à quatre semaines, et dont l'épaisseur varie de 0,05 millimètre pour les paupières à 1,5 millimètre pour la plante des pieds. Il est surtout composé de kératinocytes qui se divisent au niveau de la couche basale de l'épiderme, puis, suivant un programme de différenciation, migrent vers la surface. Au cours de la différenciation, les kératinocytes produisent des protéines et des lipides spécifiques qui agissent en synergie afin que se forme la couche cornée qui confère à la peau sa fonction de barrière.

Les constituants de la peau et leur fonction

Les autres types cellulaires de l'épiderme sont les mélanocytes responsables de la couleur de la peau, les cellules de Langerhans, impliquées dans les réactions immunitaires, et les cellules de Merkel qui jouent un rôle de récepteurs mécaniques, sensibles à la pression. Les mélanocytes sont situés dans l'assise basale de l'épiderme. Ces cellules dendritiques (les dendrites sont des prolongements cellulaires) synthétisent un pigment, la mélanine, produite dans des structures spécialisées, nommées mélanosomes. Ces derniers sont transférés aux kératinocytes voisins *via* les dendrites des mélanocytes. Ils se rassemblent ensuite au-dessus du noyau des kératinocytes en formant une sorte de « casque » qui protège l'ADN contre l'action des ultraviolets. Un mélanocyte fabrique de la mélanine pour une quarantaine de kératinocytes. La protection contre les ultraviolets est fonction du type de mélanine formée : l'eumélanine présente dans les peaux de phototype foncé protège mieux que la phéomélanine majoritaire dans les peaux de phototype clair.

Les cellules de Langerhans appartiennent à la famille des cellules dendritiques. Elles assurent la surveillance immunitaire de la peau. Localisées dans les couches supérieures de l'épiderme, ces cellules présentatrices d'antigène capturent les substances étrangères qui pénètrent dans la peau et les transportent jusqu'aux lymphocytes T présents dans les ganglions. Ces cellules sont notamment impliquées dans les réactions d'allergie de contact ou de sensibilisation, ainsi que dans les réactions allergiques en cas de surexposition au soleil.

Beaucoup plus épais que l'épiderme, le derme sous-jacent (un à quatre millimètres) est le tissu de soutien de la peau. Ses propriétés d'élasticité et de résistance à la pression sont dues à une matrice extracellulaire produite par les fibroblastes. Cette matrice contient surtout des fibres

de collagène et des fibres d'élastine: elle est parcourue par de nombreux vaisseaux qui apportent le sang et les facteurs de croissance et des nutriments jusqu'aux kératinocytes de l'épiderme.

L'aventure des peaux reconstruites

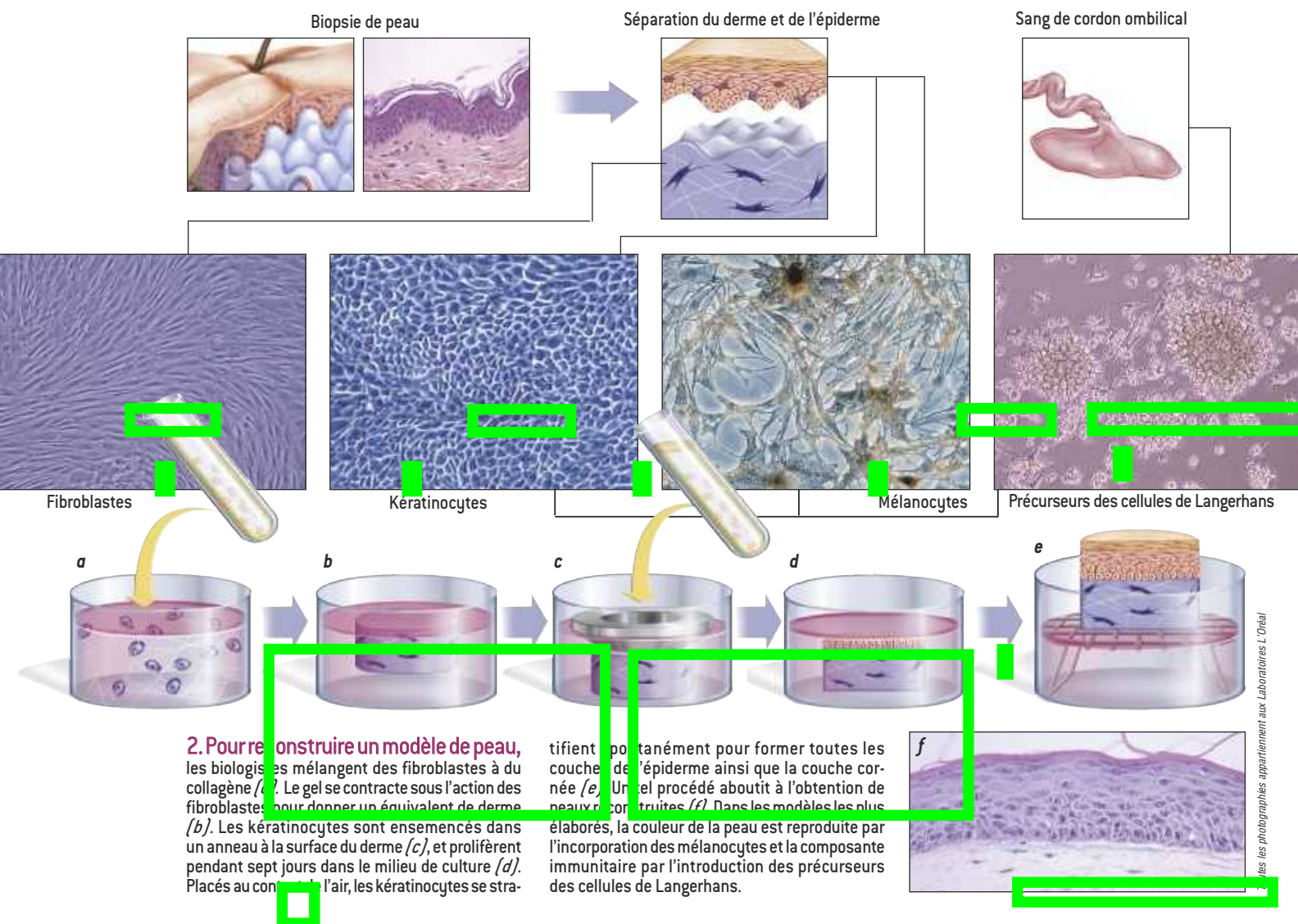
L'aventure des peaux reconstruites a commencé en 1975 avec les travaux de James Rheinwald et Howard Green, à la Faculté de médecine de Harvard, qui réussirent à obtenir un substitut d'épiderme constitué de plusieurs couches de kératinocytes. Le premier modèle d'épiderme reconstruit a été obtenu en 1979 par Michel Prunieras et Marcelle Régner. Depuis, les modèles ont été perfectionnés par l'ajout des différents types cellulaires permettant de simuler diverses fonctions de la peau.

La peau reconstruite est synonyme de vie pour les grands brûlés, mais c'est aussi un précieux outil de recherche pour étudier la physiologie de la peau normale et les différentes maladies de peau, comme le psoriasis, ou des maladies génétiques rares, telles que *Xeroderma pigmentosum*. Ainsi recons-

truite, la peau imite suffisamment la peau « naturelle » pour permettre de tester des molécules et de réaliser des tests toxicologiques, autorisant ainsi le développement de méthodes alternatives aux tests sur animaux.

Quelle que soit le modèle de peau reconstruite, la reconstruction suit le même schéma global: les kératinocytes sont isolés de l'épiderme ou de la gaine externe d'un follicule pileux puis cultivés. Ils sont « ensemencés » à la surface d'un support qui est soit un derme, soit un biomatériau souvent à base de collagène. La première phase de la culture consiste à obtenir une monocouche de kératinocytes en plaçant les cellules en immersion dans le milieu de culture. Aux kératinocytes peuvent être ajoutés les autres types cellulaires de l'épiderme selon le modèle que l'on souhaite obtenir. Ensuite, les kératinocytes sont placés au contact de l'air: ils se différencient et se stratifient spontanément pour former l'ensemble des couches de l'épiderme, ainsi qu'une couche cornée qui confère à l'épiderme reconstruit sa fonction barrière (voir la figure 2).

Une étape importante a été franchie quand on a adjoint à l'épiderme le compartiment dermique contenant des fibroblastes. L'obtention d'un équivalent de peau comprenant les deux types cellulaires majoritaires de la peau



–les kératinocytes et les fibroblastes– a ouvert des nouveaux champs d'investigation visant à mieux comprendre les interactions entre les deux compartiments de la peau. Du côté épiderme, des mélanocytes et des cellules de Langerhans ont ensuite été ajoutés aux kératinocytes. Côté derme, les biologistes ont recherché des substrats synthétiques, tels des éponges, leur permettant d'introduire non seulement des fibroblastes, mais également des cellules endothéliales qui ont la capacité de former des structures tubulaires imitant la paroi des capillaires sanguins (le derme est abondamment vascularisé).

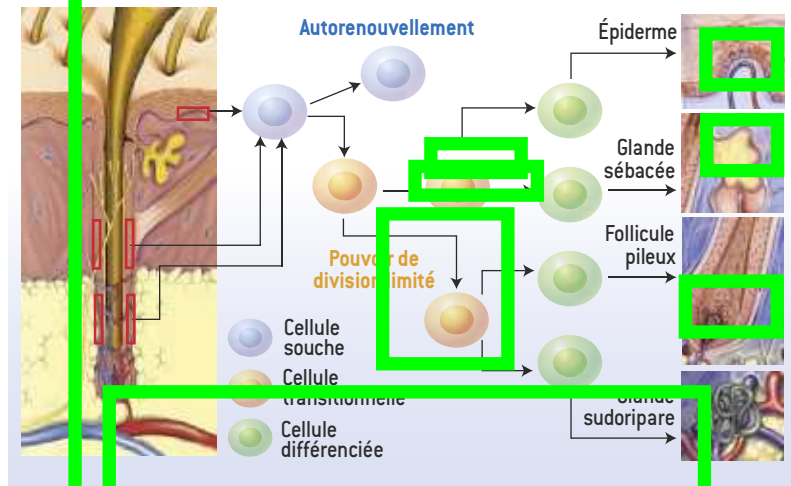
Des outils de test et de recherche

Aujourd'hui, il est possible de reproduire les différents phototypes de peau *in vitro* en sélectionnant les mélanocytes issus de biopsies cutanées d'origines ethniques différentes. Ces modèles sont utilisés pour étudier des modulateurs de la mélanogenèse (c'est-à-dire la production de mélanine par les mélanocytes), tels que l'effet d'agents éclaircissants ou pigmentants comme les ultraviolets, pour évaluer l'efficacité des filtres solaires, et pour comprendre les interactions cellulaires entre les kératinocytes et les mélanocytes.

L'introduction des cellules de Langerhans permet d'obtenir des épidermes reconstruits immunosensibles. Les cellules de Langerhans de l'épiderme ne se multiplient pas *in vitro*, de sorte qu'il est indispensable d'utiliser des précurseurs, des cellules CD34⁺ issues du sang. Une première phase de culture favorise la prolifération et la différenciation de ces précurseurs notamment en cellules dendritiques. Ensemencées avec les kératinocytes sur le substrat dermique, ces cellules dendritiques poursuivent leur différenciation en cellules de Langerhans pendant la phase de reconstruction de l'épiderme. Ces cellules sont fonctionnelles, car elles réagissent à l'application d'allergènes à la surface de l'épiderme reconstruit. Comme dans la peau normale, l'activation des cellules de Langerhans se traduit par un raccourcissement des dendrites, voire, dans certains cas, par la diminution du nombre de ces cellules au sein de l'épiderme. Un tel modèle ouvre des perspectives pour étudier les premières étapes des réactions de l'allergie de contact.

Les modèles tridimensionnels d'épiderme reconstruit ont une fonction de barrière qui permet d'imiter *in vitro* le comportement de la peau humaine en réponse à un traitement ou à un stress. Des protocoles utilisant un test simple de cytotoxicité permettent aujourd'hui de prédire le potentiel corrosif de telle ou telle molécule chimique, et le champ d'application des modèles d'épiderme reconstruit dans le domaine de la sécurité s'élargit progressivement à l'étude de la biodisponibilité des produits et du potentiel toxique des molécules pour le génome des cellules.

L'apport d'un équivalent de derme a ouvert la voie à d'autres applications, telles que l'étude de la cicatrisation, du vieillissement dû au temps et à l'exposition aux ultraviolets, ainsi que de certains cancers cutanés, tel le mélanome. Lors du vieillissement cutané dû au temps, les modifications les plus visibles interviennent dans le derme superficiel. La jonction entre le derme et l'épiderme s'aplatit, les fibroblastes se raréfient et leur capacité de synthèse du collagène (les fibres de collagène) confèrent sa



3. Les cellules souches de l'épiderme sont localisées au niveau du follicule pileux. À l'issue de leur différenciation, ces cellules donnent de l'épiderme, des glandes sudoripares, des glandes sébacées ou encore des follicules pileux.

résistance à la peau), de l'élastine (les fibres d'élastine sont responsables des propriétés élastiques) et des protéoglycanes (des protéines qui servent à l'hydratation du derme) diminue. Des réactions de glycation se produisent, c'est-à-dire que le sucre circulant dans le sang réagit avec les acides aminés des protéines et, en particulier, avec les fibres de collagène établissant des ponts entre les fibres qui rigidifient la trame de collagène. L'équipe de Daniel Asselineau, des laboratoires L'Oréal, a mis au point un équivalent dermique fabriqué avec des fibres de collagène préglyqué par du ribose (ce sucre réticule le réseau de collagène). Ce modèle permet de comprendre le rôle joué par les produits terminaux de glycation (les molécules qui ont subi une réticulation par le sucre).

L'étude du vieillissement cutané

Dans le derme, différentes sous-populations de fibroblastes coexistent : les fibroblastes papillaires localisés dans le derme superficiel, les fibroblastes réticulaires du derme profond et enfin des fibroblastes spécialisés associés aux follicules pileux. L'intégration des fibroblastes du derme superficiel et du derme profond dans les peaux reconstruites révèle qu'*in vitro* ces deux sous-populations diffèrent : elles n'ont pas les mêmes capacités de prolifération et ne synthétisent pas les mêmes molécules de la matrice extracellulaire. L'ensemble de ces travaux démontre l'intérêt de ces modèles pour la compréhension des mécanismes biologiques impliqués dans le vieillissement dû au temps.

Le vieillissement dû à l'exposition aux ultraviolets A et B est également étudié. Pendant longtemps, les ultraviolets B ont été tenus comme les seuls dangereux pour la peau. Les ultraviolets B sont responsables des coups de soleil : au sein de l'épiderme, les cellules dont l'ADN a été endommagé entrent en apoptose (déclenchent leur propre mort). Puis les biologistes ont constaté que les ultraviolets A, qui pénètrent davantage dans la peau sont également nocifs, parce qu'ils altèrent directement le compartiment dermique. Par un processus de stress oxydatif (créant des radicaux

libres très réactifs), ils endommagent les fibroblastes et favorisent la synthèse de protéines responsables de la dégradation du collagène. Grâce aux modèles de peaux reconstruites contenant l'épiderme et le derme, on a montré que les kératinocytes de l'épiderme participent indirectement aux phénomènes de photovieillissement : ils sécrètent, sous l'action des ultraviolets B, des facteurs solubles qui entraînent la synthèse d'enzymes de dégradation du collagène par les fibroblastes du derme.

L'étude des maladies de la peau

Les peaux reconstruites sont aussi des modèles d'étude pour des maladies de peau, telles que *Xeroderma pigmentosum* (XP). C'est une maladie génétique rare due à une déficience de réparation des lésions induites dans l'ADN par les ultraviolets. Alors que les cellules normales réparent les lésions (mutation) induites par les ultraviolets grâce à des enzymes de réparation spécifiques, les cellules XP en sont incapables. Les patients ont une sensibilité exacerbée vis-à-vis du soleil et développent très tôt dans l'enfance des cancers cutanés sur les zones exposées. L'équipe d'Alain Sarasin, du CNRS-UPR 2169, à l'Institut Gustave Roussy, en collaboration avec l'équipe de Françoise Bernerd et D. Asselineau, des Laboratoires L'Oréal, ont mis au point un modèle de peau reconstruite à partir de kératinocytes et de fibroblastes de patients atteints de la maladie. Les résultats montrent des altérations spontanées de la prolifération et de la différenciation des kératinocytes. De plus, les fibroblastes de ces patients semblent interagir de façon particulière avec les kératinocytes : l'épiderme s'invagine anormalement dans l'équivalent de derme en formant des kystes qui évoquent les toutes premières étapes de la formation d'une tumeur.

Quand la peau reconstruite à partir de cellules XP est exposée aux ultraviolets, les mutations de l'ADN perdurent alors que, dans des peaux normales, elles sont réparées au bout de quatre jours. Les biologistes mènent des essais de corrections génétiques en introduisant le gène de réparation normal dans les kératinocytes XP. Ils cherchent à savoir si les peaux reconstruites avec les cellules génétiquement corrigées se comportent comme des peaux normales vis-à-vis de la réparation des lésions de l'ADN induites par les ultraviolets.

Le mélanome, dû à la prolifération des mélanocytes, est une autre pathologie de la peau dont la compréhension a

progressé grâce à l'utilisation de modèles de peau reconstruite. Le bon fonctionnement de l'épiderme, comme celui de tous les tissus, est régi par l'équilibre qui règne entre la prolifération, la différenciation et l'apoptose des cellules. Cet équilibre permet de conserver l'architecture tissulaire et en particulier de maintenir la bonne localisation des différents types cellulaires dans les tissus.

Dans la peau normale, la division des mélanocytes est sous le contrôle des kératinocytes, lesquels favorisent l'expression de protéines impliquées dans la communication intercellulaire : l'une d'elles est l'E-cadhérine. Grâce aux peaux reconstruites, il a été montré que les mélanocytes échappent au contrôle des kératinocytes en exprimant non plus l'E-cadhérine, mais la N-cadhérine, et qu'ils se mettent à communiquer avec les fibroblastes. En conséquence, les mélanocytes migrent dans le derme au lieu de rester dans l'épiderme. Cette modification du dialogue entre cellules participe au développement du processus de cancérisation.

Les applications cliniques

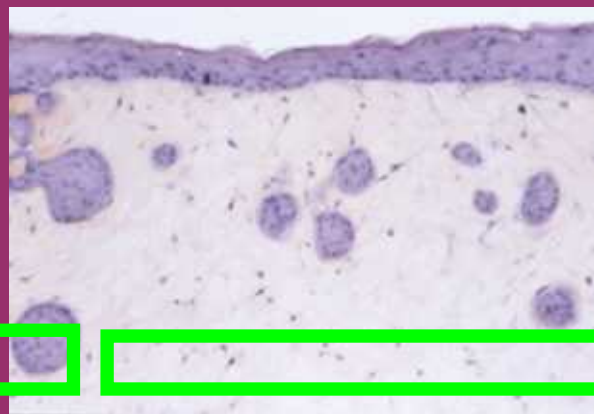
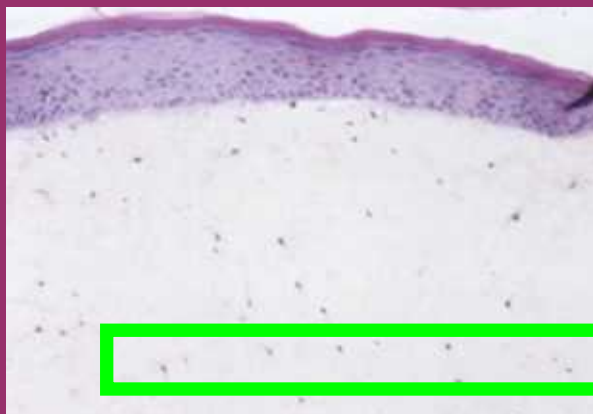
L'utilisation des épidermes reconstruits la plus remarquable est celle des épidermes utilisés pour le traitement des grands brûlés. Les premiers essais cliniques de greffes d'épithéliums autologues obtenus en culture remontent à 1979. Depuis, des sociétés de biotechnologie, telles que *Genzyme Biosurgery*, ont vu le jour et produisent des épithéliums de culture pour les greffes. L'hôpital envoie au laboratoire quelques centimètres carrés d'échantillon de peau du patient, et après deux à trois semaines de culture, plus de un mètre carré d'épiderme est produit et peut être appliqué sur le patient. Cela indique que les kératinocytes se sont multipliés par 10 000. La qualité du système de culture des cellules et, en particulier, le maintien des kératinocytes souches, ceux qui conservent la capacité de régénérer l'épiderme tout au long de la vie, est primordiale pour assurer la prise des greffes et la pérennité de l'épiderme.

Le domaine d'application des peaux reconstruites en clinique concerne essentiellement le traitement des plaies chroniques, par exemple les ulcères de la jambe chez les sujets diabétiques ou les ulcères variqueux. Deux types de produits peuvent être utilisés : des cellules du patient (autologues) ou des cellules d'une autre personne (allogéniques). La Société *Organogenesis* produit de façon industrielle des peaux équivalentes allogéniques pour traiter les ulcères de jambe. Cette peau artificielle est composée d'un compartiment dermique et d'un compartiment épidermique. Appliquée sur la plaie, elle agit comme un pansement biologique. Elle libère des facteurs de croissance et stimule les propres cellules du patient : ces dernières se mettent à sécréter aussi des facteurs de croissance qui favorisent la cicatrisation et stimulent la multiplication des cellules du bord de la plaie et leur migration pour refermer l'ulcère.

La fabrication d'épiderme de culture à partir de cheveux humains est un autre moyen intéressant d'obtention des peaux reconstruites. Les kératinocytes situés le long de la gaine externe du cheveu ont une grande capacité de multiplication, quel que soit l'âge du patient. Après plusieurs semaines de culture, il est possible d'obtenir des peaux



4. Les modèles de peau contenant des mélanocytes « bronzent » quand ils sont exposés aux ultraviolets, la coloration étant d'autant plus intense que l'exposition est prolongée (à droite).



5. Comparée à une peau reconstruite normale (à gauche), la peau reconstruite avec des cellules d'un sujet atteint de la maladie génétique Xeroderma pigmentosum (à droite) présente des invaginations de l'épiderme dans le derme. C'est le signe des phénomènes de cancérisation précoces.

épiderme de culture qui sont greffés sur les plaies et participent à la cicatrisation de l'ulcère. Ces modèles de peaux reconstruites sont aussi utilisés pour traiter les plaies aiguës qui apparaissent parfois après une intervention chirurgicale visant à retirer une zone de peau cancéreuse ou un tatouage.

À ce jour, la thérapie tissulaire à partir des peaux reconstruites a permis de sauver des milliers de vies humaines dans le cas des grands brûlés et a apporté de nouvelles façons de traiter les ulcères. Toutefois, la reconstruction n'est généralement ni parfaite ni complète. C'est pourquoi les biologistes étudient de nouveaux substrats qui facilitent la culture et la transplantation de cellules souches, par exemple les films de fibrine, et qui favorisent la réorganisation et la revascularisation du derme.

Les cellules souches, matériau de reconstruction de demain ?

Dans les tissus adultes, des cellules souches pluripotentes persistent. Elles assurent la survie et le renouvellement du tissu tout au long de la vie de l'individu. Capables d'autorenouvellement, elles donnent naissance à des cellules dont la capacité de prolifération est limitée et qui sont à la source de cellules différenciées. Les cellules souches épidermiques sont localisées au niveau du follicule pileux et dans l'épiderme interfolliculaire. Elles ont un important potentiel de prolifération *in vitro*. Aujourd'hui, les cellules souches sont difficiles à isoler parce qu'elles ne sont que partiellement caractérisées : elles n'expriment quasiment pas de marqueurs de surface à l'exception de certaines protéines d'adhérence qui les maintiennent à leur place. Disposer d'une carte d'identité plus précise des cellules souches épidermiques nous permettra de les sélectionner plus aisément. Bien qu'elles soient déjà engagées dans une voie de différenciation (celle des cellules de l'épiderme), elles conservent une plasticité notable. Ainsi, sous l'influence de signaux dermiques appropriés, il est possible d'orienter leur différenciation en follicules pileux, en glandes sébacées et en glandes sudoripares.

Toutefois, la multiplication de ces cellules est régulée par un mécanisme naturel, une « horloge mitotique » qui limite le nombre possible des divisions cellulaires. Cette horloge est contrôlée par la perte progressive des séquences d'ADN situées à l'extrémité des chromosomes, les télomères. L'étude de cette horloge montre que le potentiel de division

des cellules est réduit lorsque les cellules sont multipliées en culture, et l'un des principaux enjeux du futur sera de décrypter et de maîtriser l'horloge mitotique de ces cellules.

Malgré les nombreuses similitudes entre la peau humaine normale et les modèles de peaux reconstruites, certaines limites existent, et, selon l'application, les paramètres à améliorer diffèrent. Dans le cas de l'utilisation de ces modèles pour des applications *in vitro*, il est nécessaire de renforcer la fonction barrière, et d'activer les enzymes responsables de la desquamation. Dans le cas des applications cliniques, les biologistes cherchent à optimiser le support de greffe en préparant le lit de greffe avec des pansements biologiques, et à développer un substrat dermique qui aura les propriétés élastiques du derme. Bien que des améliorations aient déjà été apportées au niveau du substrat dermique, la prise de greffe est toujours délicate, et l'aspect esthétique est limité. Disposer des annexes cutanées, notamment des glandes sudoripares essentielles pour la régulation thermique et des follicules pileux, est un défi à relever.

L'ingénierie tissulaire de la peau progressera quand on maîtrisera mieux l'identification, l'isolement et la multiplication des cellules souches adultes, et le rôle de leur microenvironnement. Une meilleure compréhension des mécanismes impliqués dans le vieillissement de la peau et une amélioration du traitement des grands brûlés en sont deux enjeux majeurs.

Corinne FERRARIS dirige l'équipe Nouveaux modèles du Département des peaux reconstruites des Laboratoires L'Oréal.

V. FARRER et al., *Langerhans cells integrated into human reconstructed epidermis respond to known sensitizers and ultraviolet exposure*, in *J. Invest. Dermatol.*, vol. 122, pp. 552-553, 2004.

N. FORTUNELLE et al., *Long-term expansion of human functional epidermal precursor cells: promotion of extensive amplification by low TGF- β 1 concentrations*, in *J. Cell Sciences*, vol. 116, pp. 4043-4052, 2003.

F. BERNERD et al., *Clues to epidermal cancer proneness revealed by reconstruction of DNA repair-deficient xeroderma pigmentosum skin in vivo*, in *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 98 (14), pp. 7817-22, 2001.

V. ROFFARD et al., *Long-term regeneration of human epidermis on third degree burn transplanted with autologous cultured epithelium grown on fibrin matrix*, in *Transplantation*, vol. 70, pp. 1588-1598, 2000.

C. FERRARIS et al., *Adult epidermal keratinocytes are endowed with plurisecretory forming abilities*, in *Int. J. Dev. Biol.*, vol. 41, pp. 491-498, 1997.

M. RÉGNIER et al., *Integration of Langerhans cells into a pigmented reconstructed human epidermis*, in *J. Invest. Dermatol.*, vol. 109, pp. 510-512, 1997.

La reconstruction des cœurs endommagés

La réparation d'une lésion due à un infarctus du myocarde est un enjeu majeur de la médecine. Aujourd'hui, les spécialistes de l'ingénierie tissulaire cardiaque parviennent à éviter la dégradation du cœur après un infarctus, chez le rat.

Smadar Cohen • Jonathan Leor

Si une peine de cœur finit en général par guérir, une lésion du muscle cardiaque due à un infarctus s'aggrave avec le temps. Contrairement au foie ou à la peau, le tissu cardiaque ne se régénère pas, de sorte que la cicatrice qui subsiste après une crise cardiaque reste une zone morte qui ne se contracte plus. En perturbant les contractions synchrones normales du muscle cardiaque, la cicatrice renforce les contractions qui s'exercent sur les parties saines du muscle, ce qui déforme encore davantage la paroi cardiaque et entraîne la mort de nombreuses cellules. La taille de la cicatrice (d'infarctus) peut doubler en quelques mois.

Grâce aux progrès de la médecine, un nombre croissant de personnes survivent à une crise cardiaque, mais un tiers d'entre elles finissent par souffrir d'une insuffisance cardiaque, qui, à terme, nécessite une transplantation, solution complexe, coûteuse, et limitée par le manque de donneurs. L'espérance de vie des personnes qui ne bénéficient pas d'une transplantation diminue progressivement, et moins de 40 pour cent d'entre eux sont encore en vie cinq ans après leur première attaque.

Si les médecins pouvaient réparer un infarctus, ou simplement l'empêcher de s'étendre, des millions de vies en seraient transformées. C'est pourquoi la fabrication de fragments de tissu cardiaque humain vivant est devenue l'un des principaux objectifs de l'ingénierie tissulaire. C'est aussi l'un des plus ambitieux. Les fibres d'un muscle cardiaque s'organisent pour former des connexions

physiques et nerveuses qui acheminent les signaux électriques et permettent aux fibres de synchroniser les contractions. La peau et le cartilage sont moins complexes à faire croître en laboratoire, car ils ne sont pas vascularisés. Pour le muscle cardiaque, la principale difficulté est de vasculariser un morceau de tissu tridimensionnel.

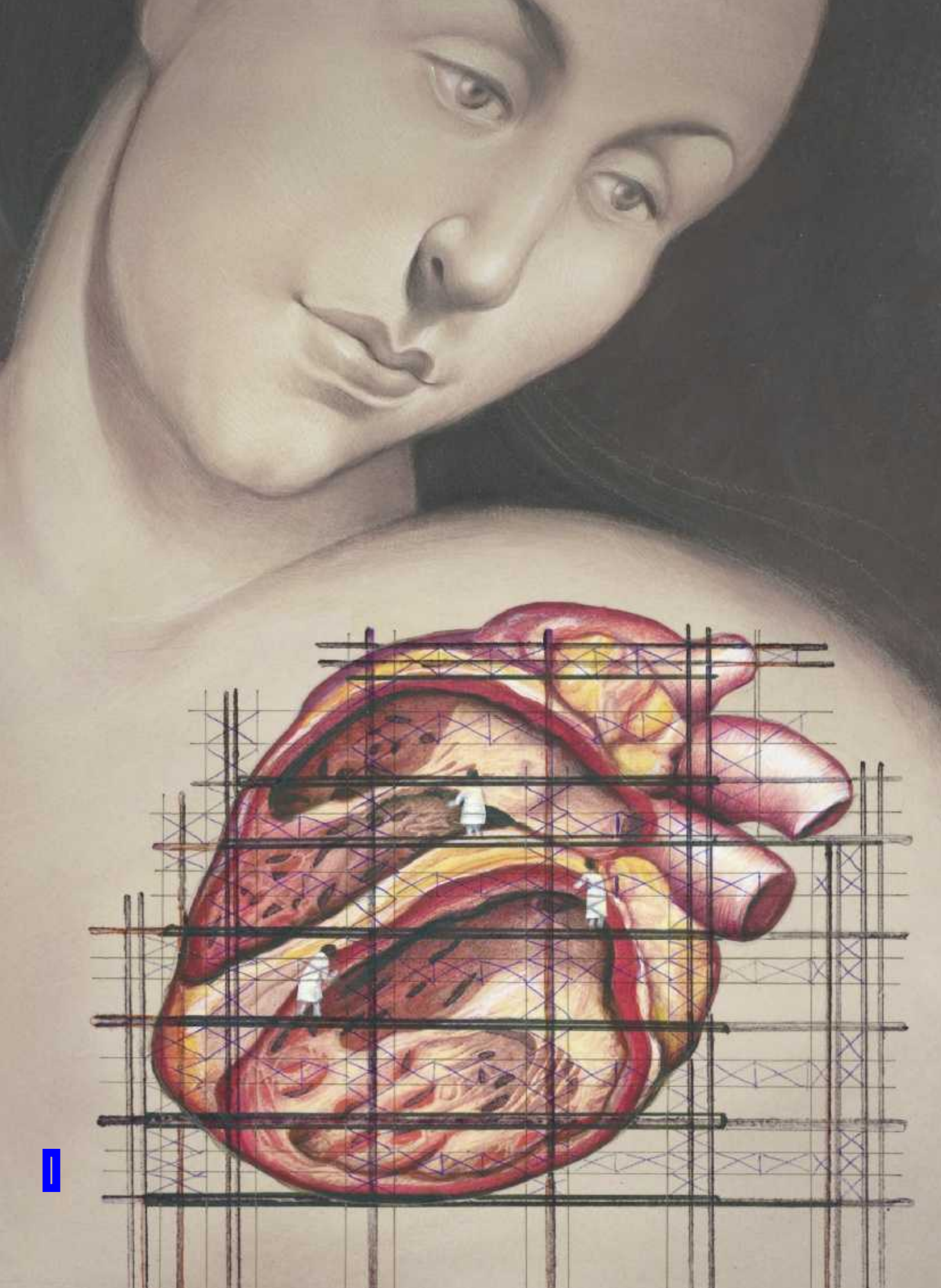
Bien sûr, il y a une quinzaine d'années, la perspective de « fabriquer » un tissu vivant en dehors de l'organisme tenait de la science-fiction. Pourtant, les biologistes et les ingénieurs des matériaux ont fait des progrès notables :

par exemple, nous avons mis au point un support qui favorise la croissance des cellules cardiaques et des vaisseaux sanguins dans la zone morte d'un infarctus.

À la recherche du support idéal

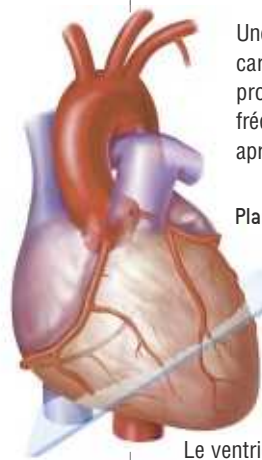
Un infarctus du myocarde – une crise cardiaque – survient généralement lorsqu'un important vaisseau sanguin d'alimentation du ventricule gauche du cœur est obstrué par un caillot. Une partie du muscle cardiaque, le myocarde, est privée de sang et donc d'oxygène, ce qui détruit les cellules (les cardiomyocytes) de cette zone. La dimension de l'infarctus dépend de la taille de la zone alimentée par le vaisseau sanguin avant son obstruction.

Comme les myocytes se divisent peu, les cellules survivantes ne peuvent pas repeupler la zone endommagée. Les cellules souches locales, qui agissent comme progéniteurs de nouvelles cellules dans d'autres tissus, sont inefficaces dans le cœur et incapables de réparer la lésion. Par conséquent,

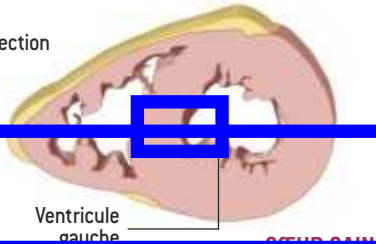


Insuffisance cardiaque

Une insuffisance cardiaque qui suit un infarctus du myocarde résulte d'un remodelage progressif, qui se produit pendant la crise cardiaque, ou, ce qui est plus fréquent, d'un remodelage progressif de la forme du cœur, après l'accident.

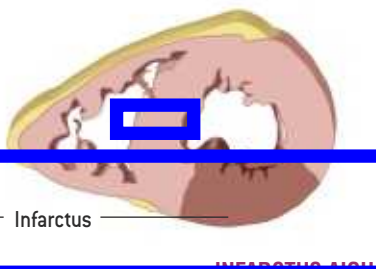
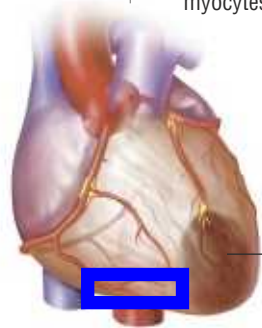


Plan de la section



Ventricule gauche

Le ventricule gauche envoie le sang oxygéné à tout l'organisme ; ses parois, contenant des fibres musculaires (les myocytes), ont une épaisseur normale.



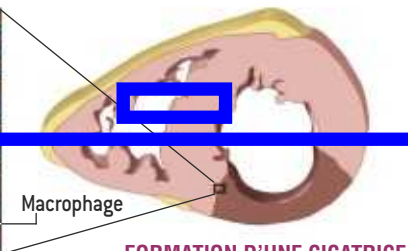
Infarctus

Quand un vaisseau sanguin alimentant le muscle cardiaque est obstrué, les myocytes meurent par manque d'oxygène. La bande de tissu musculaire mort est nommée infarctus.

Fibroblaste



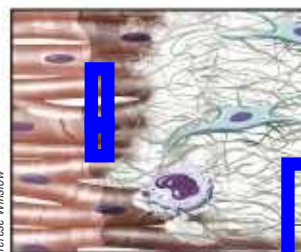
Myocyte sain



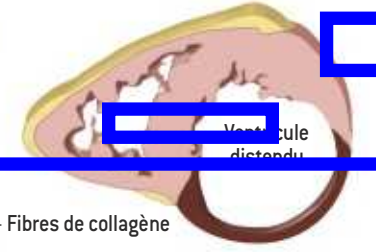
Macrophage

FORMATION D'UNE CICATRICE

En quelques heures, des enzymes situées dans la zone de l'infarctus commencent à dégrader la matrice extracellulaire, tandis que les macrophages arrivent pour éliminer les myocytes morts. Les fibroblastes prennent leur place. La paroi du ventricule musculaire s'amincit et se rigidifie. Les myocytes situés sur le bord de la cicatrice meurent aussi, de sorte que l'infarctus s'étend.



Teresa Winslow



Fibres de collagène

Un grand nombre de cellules meurent et toute la paroi du ventricule gauche s'amincit à mesure que le ventricule se dilate. Le pompage du cœur défaillant est de moins en moins efficace.

des cellules fibreuses non contractiles remplacent peu à peu les myocytes morts. Les myocytes sains qui bordent l'infarctus peuvent mourir eux aussi, ce qui accroît l'étendue de l'infarctus. Au cours de ce processus, connu sous le nom de remodelage, la paroi du ventricule dans la zone de l'infarctus s'amincit et parfois même se rompt.

Au cours des dernières années, des biologistes ont tenté de réamorcer la croissance du tissu cardiaque dans une zone d'infarctus en transplantant des cellules souches provenant d'autres tissus, par exemple la moelle osseuse ou un muscle,

l'espérant que ces cellules s'adaptent à leur environnement et produiraient de nouveaux cardiomyocytes, ou stimuleraient la capacité naturelle de régénération du cœur. Malheureusement, les résultats ont été décevants : très peu de cellules souches ont survécu après la transplantation, et celles qui ont survécu se sont généralement rassemblées sur les bords de l'infarctus, mais sans établir de contact avec le tissu sain adjacent ou sans conduire les signaux électriques qui permettent aux cellules cardiaques de synchroniser leurs contractions.

Ces cellules implantées ne sont pas fonctionnelles dans la zone lésée, car la structure naturelle qui soutient les cellules vivantes a disparu. Dans un tissu sain, la matrice extracellulaire, composée de protéines de structure, telles que le collagène, et de molécules de sucre complexes, les polysaccharides, produit des facteurs de croissance et fournit un support physique aux cellules.

À la recherche du support idéal

Les biologistes ont alors cherché un support idéal pour la croissance de tissus vivants, permettant aux cellules de se diviser et de s'organiser en un tissu tridimensionnel. Ces cellules auraient ensuite commencé à sécréter leur propre matrice extracellulaire, l'armature se serait dissoute, ne laissant derrière elle que du tissu sain. Qui plus est, l'armature stimulerait la vascularisation du nouveau tissu, les vaisseaux sanguins apportant de l'oxygène aux cellules et évacuant leurs déchets.

À la fin des années 1980, l'un de nous (Smadar Cohen) a travaillé avec Robert Langer, un pionnier de l'ingénierie tissulaire à l'Institut de technologie du Massachusetts. À cette époque, l'idée de fabriquer des tissus vivants était encore du domaine du rêve. En 20 ans, de nombreux matériaux (synthétiques et naturels) ont été étudiés pour favoriser la croissance de cellules en un tissu fonctionnel.

Les polyesters dégradables sont parmi les matériaux synthétiques les plus utilisés, mais ils présentent plusieurs inconvénients. Ils sont hydrophobes, de sorte que les cellules vivantes y adhèrent mal, et des armatures réalisées avec ces polymères tendent à se désagréger plutôt qu'à se dégrader à un rythme régulier. Les sous-produits acides de leur dégradation déclenchent des inflammations locales des tissus et menacent la survie des cellules transplantées. De nouveaux hydrogels synthétiques ne présentent pas ces inconvénients, et leur texture ressemble à celle d'une matrice extracellulaire naturelle, mais ils sont dépourvus des protéines d'une matrice extracellulaire naturelle, par exemple le collagène, indispensables au bon fonctionnement des cellules.

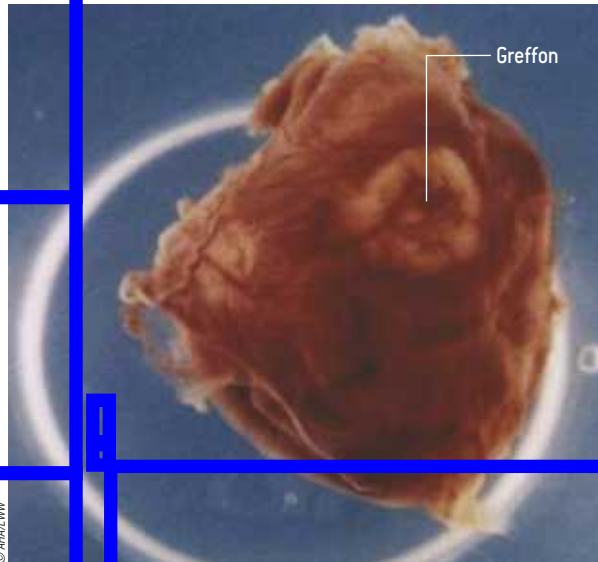
Le collagène lui-même, ainsi que d'autres protéines de la matrice extracellulaire, telle la fibronectine, ont également été testés en tant que support. Bien que ces protéines contiennent des acides aminés auxquels des cellules vivantes adhèrent, elles n'ont pas une résistance mécanique suffisante pour supporter un grand nombre de cellules, et, qui plus est, le collagène est rapidement consommé par les enzymes de l'organisme. En outre, certaines protéines peuvent être rejetées par le système immunitaire, ce qui ne ferait qu'accroître les risques encourus par le patient.

Nous avons donc décidé de fabriquer une armature faite avec un alginat, un polysaccharide dérivé d'algues. Il est biocompatible, c'est-à-dire qu'il n'est pas rejeté par le système immunitaire. Et, quand certains alginates sont dissous dans l'eau, puis exposés à des ions calcium chargés positivement, ils se comportent comme un hydrogel contenant 98 pour cent d'eau : leur consistance est gélatineuse et ils ont des propriétés élastiques semblables à celles d'une matrice extracellulaire naturelle.

Cependant, pour utiliser cet hydrogel d'alginate comme support, nous fallait lui donner une forme et une structure interne, tout en renforçant sa résistance mécanique pour qu'il puisse conserver sa forme malgré le poids des cellules qui le coloniseraient. Pour ce faire, nous avons versé la solution d'alginate dans une série de moules, puis nous les avons refroidis selon trois méthodes produisant des gradients de température distincts durant la congélation. Des cristaux de glace séparés par de minces parois d'alginate se sont formés dans tous les échantillons. Après avoir éliminé ces cristaux par sublimation, il nous restait une armature ressemblant à une éponge dont les minuscules pores reflétaient la forme des cristaux. En agissant sur les paramètres de la congélation, nous changions la densité des pores, leur taille et leur direction, ainsi que la densité des connexions (voir l'encadré pages 80 et 81).

Les pores doivent être interconnectés, car cela permet aux cellules ensemencées de pénétrer dans l'armature. Il faut aussi que les nutriments puissent atteindre les cellules et que leurs déchets soient éliminés. Le degré d'interconnexion des pores influe aussi sur la revascularisation du tissu transplanté. Enfin, l'architecture d'une telle armature, qui ressemble à une mousse ou à une ruche, contribue à sa résistance mécanique. Bien qu'elles soient surtout constituées de vide (elles contiennent 95 pour cent de pores), ces structures sont très résistantes. Ainsi, nous disposons d'une armature ayant la structure souhaitée, n'activant pas le système immunitaire, non toxique, ayant une bonne stabilité mécanique à long terme, et se désagrégeant dans l'organisme en un temps raisonnable. Encore fallait-il vérifier que des cellules vivantes colonisaient ce support.

Avant d'implanter ces armatures dans des animaux de laboratoire, nous avons observé le comportement des cellules cardiaques sur de l'alginate *in vitro*. Nous avons prélevé des cellules de cœurs d'embryons de rats – qui, contrairement à des cardiomyocytes matures, se divisent – et nous les avons mises en suspension dans un milieu liquide contenant des nutriments. Nous avons ensuite placé dans ce milieu de culture des armatures rondes de six millimètres de diamètre et de un millimètre d'épaisseur. L'ensemble a été soumis à une force centrifuge modérée ; nous avons



Deux mois après son implantation sur un cœur de rat, un support ensemencé avec des cellules s'est intégré dans une zone d'infarctus. Des vaisseaux sanguins locaux ont pénétré dans le greffon, alimentant les cellules cardiaques matures à l'intérieur de l'implant et empêchant ainsi l'extension de l'infarctus.

constaté que les cellules se répartissent dans les pores des armatures en moins de 30 minutes. La rapidité est un avantage précieux pour préserver la viabilité de ces cellules sensibles au manque d'oxygène. Par conséquent, nous avons pu placer une densité élevée de cellules sur nos supports (10^8 cellules par centimètre cube, densité comparable à celle du muscle cardiaque mature).

Reconstruire un fragment de cœur

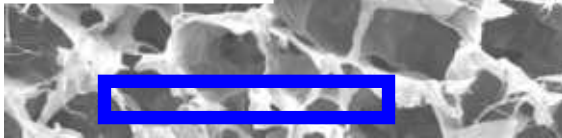
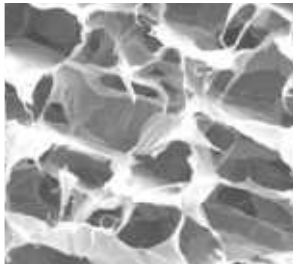
Nous avons transféré nos supports ensemencés dans un bioréacteur, qui maintient des conditions de culture idéales tout en assurant une circulation continue du milieu contenant les nutriments. Au bout de 24 heures, nous avons détecté des myocytes en train de battre. Au bout de sept jours, nous avons transplanté ces édifices dans des cœurs vivants. Nous avons anesthésié des rats adultes qui avaient eu un infarctus du myocarde sept jours auparavant. La cicatrice était bien visible, et nous avons placé les supports ensemencés sur l'infarctus, refermé l'incision, et attendu. Deux mois plus tard, nous avons ouvert pour observer le cœur, et nous avons constaté que de nombreux vaisseaux sanguins issus du tissu cardiaque sain irriguaient le greffon (voir la figure ci-dessus). Les implants s'étaient bien intégrés à la cicatrice, et les supports d'alginate avaient commencé à se dissoudre, une matrice extracellulaire naturelle prenant leur place. Les cellules cardiaques embryonnaires s'étaient développées en fibres musculaires matures, et quelques-unes étaient même organisées en structures parallèles comme dans un tissu cardiaque en développement. Les connexions mécaniques et les synapses électriques indispensables pour que les cellules cardiaques se contractent et conduisent les signaux nerveux étaient également présentes entre les fibres.

La conception du support

Support en alginate



Structure en éponge



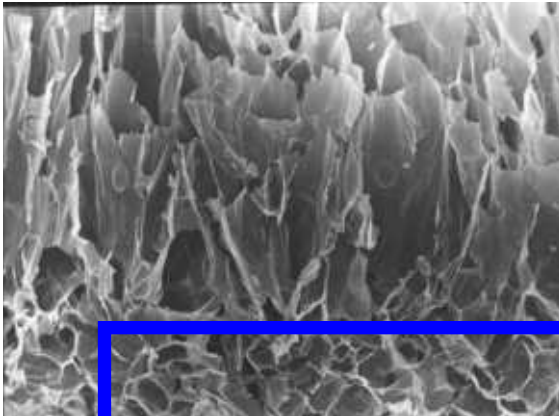
R. Bashir et S. Cohen; Ben-Gurion Univ.

Les cellules ont besoin d'un support qui les guide pour s'organiser en un tissu. La structure idéale contient des pores interconnectés, dont le diamètre est supérieur à 200 micromètres (la taille moyenne d'un capillaire), ce qui permet à des vaisseaux sanguins de s'infiltrer.

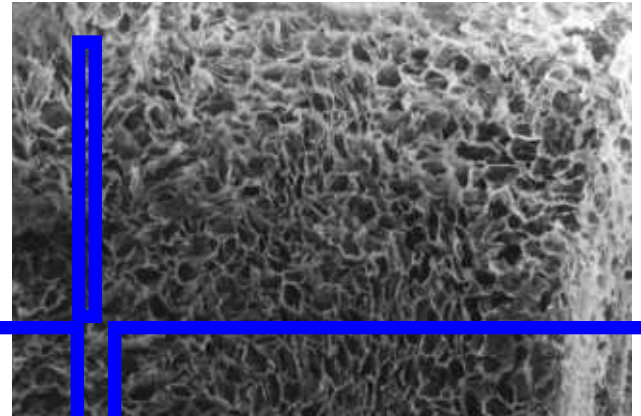
Nous avons choisi l'alginate, un dérivé d'algues, en raison de sa ressemblance avec la matrice extracellulaire naturelle. Il nous fallait cependant trouver un moyen de transformer une solution visqueuse d'alginate et d'eau en une armature solide dont la forme (*ci-contre à gauche*) et l'architecture interne (*ci-contre à droite*) seraient contrôlables avec précision.

La congélation de l'hydrogel a permis d'obtenir une architecture en éponge, les pores du gel étant créés par le retrait des cristaux de glace d'alginate. La sublimation des cristaux libère des pores de formes, de taille et d'orientation variées reflétant la vitesse et la direction de la croissance des cristaux lors du refroidissement.

RÉGIMES DE CONGÉLATION



Elsavier et S. Z...



Dans un b... (11) 105-109, la structure est formée... rapidement, produisant de minuscules pores interconnectés et denses sur le fond. Des pores allongés et plus grands, au-dessus, suivent la direction du front de refroidissement.

Dans l'a... (11) 105-109, la structure est formée... complexe des pores dans la partie supérieure de l'échantillon résulterait de la grande volatilité de l'azote, qui produit des fronts de refroidissement multidirectionnels là où le gaz rencontre la solution d'alginate.

Avant d'effectuer les transplantations, nous avons mesuré par échographie la fonction cardiaque des rats, en faisant de même pour un groupe de rats de contrôle ayant eu un infarctus, et ayant subi une ouverture du thorax, mais pas de transplantation. Deux mois plus tard, nous avons à nouveau examiné tous les rats par échographie cardiaque. Dans le groupe contrôle, nous avons observé le scénario habituel de dégradation du cœur: dilatation du ventricule gauche et diminution notable de la fonction cardiaque. Au contraire, chez les rats transplantés, la taille du ventricule gauche, l'épaisseur de sa paroi et la fonction cardiaque étaient stables.

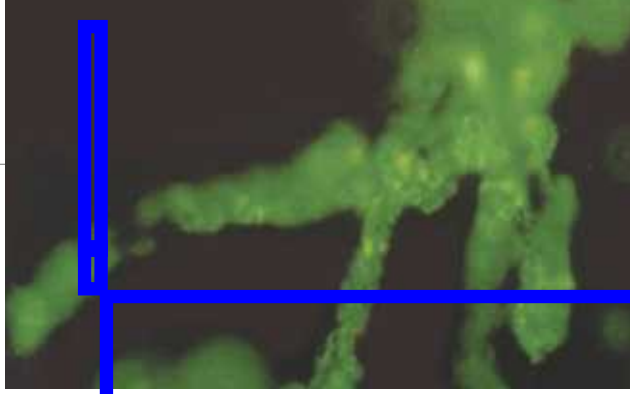
Ainsi nous avons prévenu toute nouvelle détérioration pouvant aboutir à une insuffisance cardiaque. Pour autant, on ignore encore le mécanisme grâce auquel ce traitement a protégé le muscle cardiaque, car le tissu greffé ne contribuant pas encore aux contractions du cœur. Il semble qu'en empêchant la croissance de l'infarctus et en épaississant artificiellement la paroi du cœur dans la zone de l'infarctus, le greffon ait évité le remodelage habituel du ventricule.

Nous pensons que la croissance de nouveaux vaisseaux sanguins dans la zone de l'infarctus a également contri-

bué à réduire la détérioration du tissu. Le nombre et la taille des nouveaux vaisseaux sanguins ont augmenté quand nous avons implanté des supports peuplés de cellules, mais nous avons constaté que même des supports dépourvus de cellules stimulent la croissance de nouveaux vaisseaux sanguins dans un infarctus.

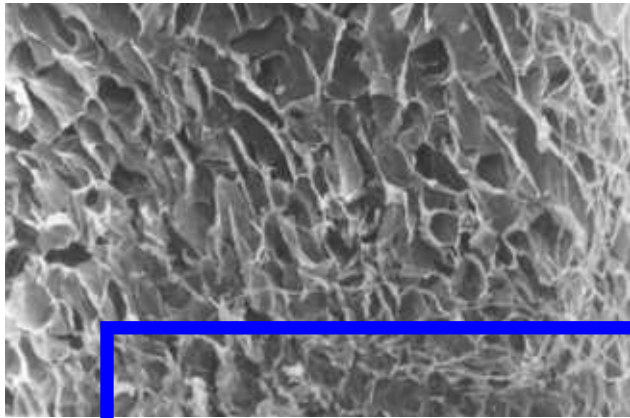
L'armature d'alginate stimule peut-être la croissance des vaisseaux sanguins simplement parce qu'elle leur fournit un support lorsqu'ils pénètrent dans la zone endommagée. Le matériau lui-même doit attirer des cellules souches qui stimulent la régénération, car la structure moléculaire de l'alginate ressemble à celle d'un des principaux polysaccharides de la matrice extracellulaire naturelle. Pour tester cette hypothèse, nous avons récemment injecté un hydrogel d'alginate directement dans des infarctus de rats. Même sous cette forme, l'alginate a préservé la structure et la fonction du ventricule en agissant, semble-t-il, comme un substitut de la matrice extracellulaire et en stimulant l'angiogenèse.

Nous nous efforçons d'identifier les sources potentielles de cellules cardiaques qui seraient utilisables dans des transplantations humaines. Les cellules cardiaques matures et an-



ARCHITECTURE DES PORES

Notre aptitude à contrôler l'architecture des supports avec les techniques de congélation est précieuse parce que la structure des pores a une influence notable sur la fonction du tissu en formation. Des pores allongés, par exemple, favorisent la formation de vaisseaux sanguins. Nous avons utilisé de l'azote liquide pour congeler des supports poreux, puis nous les avons ensemencés avec des cellules endothéliales marquées par une substance fluorescente : nous avons constaté que les cellules se sont arrangées en structures qui ressemblaient à des capillaires.



Dans un cryogel, nous avons congelé le support poreux à -80°C , puis nous l'avons chauffé jusqu'à -10°C , réchauffée jusqu'à -2°C , et refroidie lentement jusqu'à -20°C . L'eau cristallise au même moment dans tout l'échantillon, de sorte que les pores sont répartis uniformément et interconnectés.

patient ne se répliquent pas, et ne peuvent servir pour la réparation des infarctus. Les cellules de donneurs éventuels qui pourraient devenir des cardiomyocytes comprennent les cellules souches embryonnaires et les cellules souches adultes issues de la moelle osseuse ou du sang du cordon ombilical. Toutes ces cellules de donneur seraient reconnues comme étrangères par le système immunitaire du patient, ce qui nécessiterait l'utilisation de médicaments immunosuppresseurs. Des cellules autologues – provenant du patient lui-même – seraient préférables pour éviter cette difficulté. Ce pourrait être des cellules souches et des cellules précurseurs dérivées de la moelle osseuse, des muscles ou de la graisse, ou bien des cellules souches embryonnaires produites à partir des cellules du patient par clonage thérapeutique. Ou encore des cellules souches cardiaques, mais on ne les a pas encore identifiées.

Nos résultats suggèrent plusieurs approches possibles pour l'application des supports d'alginate à la protection et à la régénération de cœurs humains endommagés par un infarctus du myocarde. Nous sommes persuadés, par exemple, que dans trois ans nous serons prêts à tester des

supports d'alginate non ensemencés chez des patients ayant eu un infarctus du myocarde. Nos récentes expériences sur des porcs ont confirmé ce que nous avions observé chez des rats : même sans cellules, un support d'alginate semble prévenir l'expansion d'un infarctus et empêcher le remodelage de la paroi du ventricule.

Cette aptitude de l'alginate à favoriser l'angiogenèse suggère que nous pourrions améliorer la survie de cellules transplantées en implantant d'abord une armature, en attendant la vascularisation, puis en ensemencant l'armature avec des cellules. Nous avons testé la méthode chez des rats, avec des résultats prometteurs. La vascularisation s'est également trouvée notablement renforcée lorsque nous avons incorporé dans l'armature des microsphères qui libéraient des facteurs de croissance de façon contrôlée. Malheureusement, la prévascularisation de l'armature réduit l'espace disponible pour les cellules transplantées, et nous cherchons comment ajuster l'angiogenèse en utilisant différents types de facteurs de croissance.

Aujourd'hui, on sait contrôler *in vitro* la forme, la composition et la fonction du tissu cardiaque. Pour les patients qui ont eu un infarctus du myocarde, il faudrait remplacer un morceau du cœur, et l'implantation d'un support poreux vide ne suffirait pas. Nous sommes par conséquent confrontés au problème de maintenir vivant un tissu transplanté jusqu'à ce que la vascularisation locale soit restaurée. Nous cherchons aujourd'hui à fabriquer un greffon prévascularisé.

Nous avons créé un lit capillaire *in vitro* en ensemencant un support en alginate avec des cellules endothéliales, qui tapissent normalement les parois des vaisseaux sanguins, puis nous avons mis cette structure en culture dans un bioréacteur. Dans l'étape suivante, nous cultivons ensemble, sur une armature, des cellules endothéliales et des cardiomyocytes, pour essayer de faire pousser des capillaires à l'intérieur même d'un fragment de myocarde. Même si nous réussissons, nous devons vérifier que ce lit capillaire devient fonctionnel après transplantation et à quel rythme. Si les connexions avec les vaisseaux locaux s'établissent rapidement, alors les chances de survie du tissu transplanté seraient excellentes.

De nombreux chercheurs tentent de créer un tissu prévascularisé en utilisant des stratégies variées. La mise en commun des résultats obtenus fera forcément progresser ce domaine en pleine effervescence qu'est l'ingénierie du tissu cardiaque. Cela prendra une décennie, voire deux, mais la fabrication d'un morceau de cœur humain vivant n'est plus aujourd'hui une utopie.

Smadar COHEN est professeur de biotechnologie à l'Université Ben-Gurion de Beer-Sheva, en Israël. **Jonathan LEOR** dirige l'Institut Neufeld de recherches cardiaques de l'Université de Tel-Aviv.

E. L. LEOR et R. LANGER, *Tissue Engineering: Current State and Perspectives in Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 65, n° 1, pp. 1-9, juillet 2004.

J. LEOR et S. COHEN, *Myocardial Tissue Engineering: Creating a Muscle Patch for a Wounded Heart*, in *Annals of New York Academy of Sciences*, vol. 1015, pp. 312-319, mai 2004.

Le cœur, Dossier Pour la Science, n° 40, juillet/septembre 2003.

La réparation de l'os et du cartilage

Pour réparer les lésions osseuses et cartilagineuses qui ne se consolident pas spontanément, on pose des implants ensemencés avec des cellules multipliées en laboratoire. Les biologistes recherchent comment stimuler la prolifération et la différenciation des cellules souches du patient.

Hervé Petite

A la suite d'une fracture, une cascade d'événements reproduit, dans un contexte adulte, l'ostéogenèse embryonnaire, qui aboutit à la consolidation de la fracture. Le processus biologique de réparation osseuse est très efficace et le chirurgien se contente généralement de réaligner les os brisés et d'immobiliser le membre fracturé. On estime à près d'un million le nombre de fractures observées chaque année en France, et plus de 90 pour cent de ces fractures se consolident parfaitement. Seuls cinq à dix pour cent présentent des complications entraînant un retard, voire une absence de consolidation, à la suite de défaillances de nature mécanique ou biologique. L'absence de consolidation est souvent due à la formation d'un mélange de tissus fibreux et osseux ne permettant pas la restauration de l'os. Quant aux pertes de substance cartilagineuse, elles posent une difficulté thérapeutique : ces lésions du cartilage sont la plupart du temps irréversibles du fait de la faible capacité de réparation spontanée du cartilage, et risquent d'évoluer vers une arthrose.

Par ailleurs, le traitement de tumeurs, de kystes ou encore de infections résistant aux traitements nécessitent souvent d'extraire des fragments osseux de taille trop importante pour que le processus naturel d'autoréparation soit efficace. Le comblement de ces défauts est alors généralement assuré par une autogreffe (on prélève un fragment d'os du patient que l'on réintroduit dans la zone à combler). Toutefois, la quantité d'autogreffe étant limitée, le chirurgien doit souvent utiliser soit une allogreffe (de l'os prélevé sur un donneur), soit des matériaux de substitution osseuse. Ces matériaux servent uniquement de support passif à la repousse osseuse.

Des recherches sont menées pour trouver comment favoriser cette repousse en implantant, en même temps que le support, des cellules souches dont on orienterait, au moyen de facteurs bien choisis, la différenciation vers la formation d'os ou de cartilage. On cherche aussi à fabriquer des matrices guidant la régénération des tissus squelettiques. Ces travaux ont donné naissance à un nouveau secteur d'activité en orthopédie, la bio-orthopédie, dont le but est la reconstruction de tissus squelettiques fonctionnels. Ce secteur en plein essor implique médecins, biologistes et ingénieurs spécialistes des sciences des matériaux. Après avoir rappelé les propriétés essentielles de l'os et du cartilage, nous examinerons les techniques de restauration disponibles pour l'os et le cartilage, puis nous évoquerons les cellules souches, notamment pour la reconstruction de l'os.

Un cartilage quiescent et un os en perpétuel remaniement

L'os et le cartilage sont des tissus conjonctifs de soutien dont les cellules sont incluses dans une matrice extracellulaire (voir la figure 2). Ces tissus tirent leur qualité mécanique exceptionnelle d'un arrangement précis de leur matrice extracellulaire qui devra être restitué au mieux après transplantation afin que les tissus transplantés soient mécaniquement fonctionnels.

Le cartilage revêt une grande diversité de formes : cartilage hyalin (nez, articulations, par exemple), fibreux (ménisque, disque intervertébral, insertion du tendon d'Achille) ou encore élastique (oreille externe, trompe d'Eustache,

épiglotte et quelques cartilages du larynx). D'un point de vue médical, la réparation du cartilage hyalin présente un intérêt prépondérant, car les lésions du cartilage articulaire sont responsables des ostéoarthroses, notamment de la hanche (coxarthrose) ou du genou (gonarthrose). Les chondrocytes, les cellules assurant la formation du cartilage, synthétisent une matrice extracellulaire constituée d'un réseau de fibres de collagène et de protéoglycanes, des protéines qui retiennent l'eau et assurent l'hydratation du tissu. Cette matrice extracellulaire résiste à des contraintes en tension (*via* les fibres de collagène) et en compression (*via* le réseau macromoléculaire hydraté) notables. Les cellules cartilagineuses sont nourries par diffusion des éléments nutritifs à partir de la surface articulaire, puisque le cartilage est le seul tissu de l'organisme qui n'est ni vascularisé ni innervé.

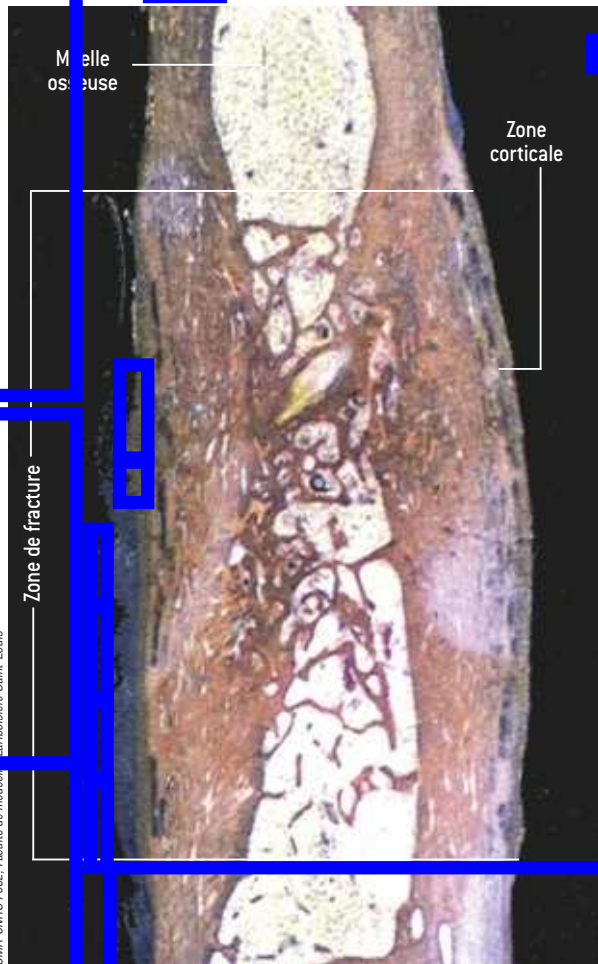
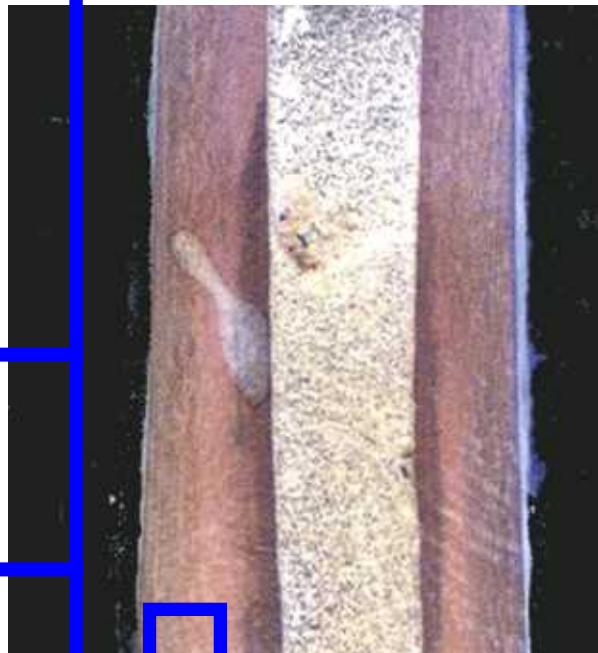
Le cartilage a un potentiel de régénération inférieur à celui de l'os, car il n'est pas vascularisé et contient peu de cellules, lesquelles migrent difficilement au sein de la matrice extracellulaire. Si des lésions de petite taille (inférieures à deux centimètres carrés) se réparent spontanément, celles de grande taille sont comblées par du fibrocartilage dont les propriétés mécaniques et la durabilité sont médiocres.

Le tissu osseux se présente sous deux architectures différentes (épongeuse ou compacte) en fonction de la localisation anatomique ; il est vascularisé et innervé. Il contient des ostéoblastes, des ostéoclastes et des ostéocytes. Les ostéoblastes, les cellules responsables de la formation du tissu osseux, sécrètent une matrice à base de collagène qui s'imprègne progressivement d'hydroxyapatite (un phosphate de calcium) conférant sa rigidité au matériau. Les ostéoclastes sont les cellules qui éliminent l'os ancien. Les ostéocytes sont des cellules osseuses matures qui emplissent les petits espaces vides de la matrice extracellulaire nommés lacunes. Ce tissu n'est pas figé : il est en perpétuel remaniement et s'adapte sans cesse aux sollicitations mécaniques. Par un processus de remodelage osseux, l'os ancien est éliminé (phase de résorption osseuse) et remplacé par de l'os nouveau (phase de formation osseuse).

Les stratégies de réparation

Une lésion osseuse se répare spontanément sauf quand elle est de grande taille. Pour accélérer la réparation du tissu osseux quand elle ne se fait pas spontanément, on dispose de plusieurs stratégies. Dans sa version la plus simple, la régénération des lésions squelettiques est guidée par des matériaux poreux créant un environnement favorable à la repousse tissulaire. En pratique, les cellules présentes sur le pourtour de la lésion migrent au cœur du matériau, se multiplient et comblent le défaut.

Cette stratégie thérapeutique a un intérêt en clinique lorsque la lésion est de petite taille et que le tissu squelettique environnant est sain. On comble, par exemple, des pertes de substance osseuse à l'aide de céramiques poreuses à base de phosphate de calcium. Le revêtement de ces matériaux par des molécules bioactives favorise la colonisation par les cellules souches présentes dans l'environnement. Enfin, une autre solution consiste à préparer les substituts d'os ou de cartilage en laboratoire : des cellules souches sont multipliées en culture, puis mises en place sur le matériau



1. Lors d'une fracture, l'os se reconstruit d'abord de façon désorganisée en remplissant tout le canal médullaire (*en haut, os normal, en bas os en reconstruction*). Pour favoriser la consolidation de cet os de brebis, un support poreux constitué d'un bloc de corail et portant des cellules souches mésenchymateuses a été introduit dans la lésion. Lorsque la perte de substance osseuse a été consolidée, l'os s'est réarrangé, les zones corticales (périphériques) se sont homogénéisées, le canal médullaire s'est progressivement creusé et a été recolonisé par la moelle osseuse.

poreux et l'ensemble est transplanté. Cette approche aura un intérêt particulier chez les patients âgés dont le nombre de cellules souches est limité, mais encore faudra-t-il que le transplant s'intègre dans le tissu environnant.

La source des cellules souches

Pour régénérer les tissus squelettiques, on pourrait théoriquement utiliser toute cellule souche ayant un fort potentiel de prolifération et capable de se différencier en cellules squelettiques. Cependant, alors que la vie du patient n'est pas menacée, il paraît difficile d'envisager l'utilisation de cellules souches issues d'un donneur nécessitant l'administration à vie d'immunosuppresseurs pour éviter le rejet des cellules greffées.

C'est pourquoi, dans ce cas, les cellules souches embryonnaires ne semblent pas une solution réaliste à court terme. Néanmoins, le développement de banques de cellules souches embryonnaires, compatibles avec les antigènes du soi existant dans la population, pallierait cette difficulté. Cette approche éviterait les risques d'incompatibilité immunologique et garantirait un approvisionnement suffisant en cellules souches dans les cas d'urgence. Toutefois, jusqu'à présent, la majorité des études ont été effectuées avec des cellules souches adultes autologues (issues du patient lui-même), car elles évitent les problèmes de compatibilité immunologique.

Où peut-on prélever ces cellules chez le patient ? Le tissu source idéal serait riche en cellules souches capables de proliférer et de se différencier en cellules squelettiques, et leur prélèvement serait peu invasif. Bien que l'on ait démontré la présence de cellules souches squelettiques dans de nombreux tissus, dont le tissu adipeux ou le muscle, la moelle osseuse reste la principale source de cellules souches pour la médecine régénératrice du squelette.

La moelle osseuse est une source majeure de cellules souches pluripotentes hématopoïétiques (cellules primitives ayant un haut pouvoir de prolifération et de différenciation vers toutes les lignées de cellules sanguines), mais c'est aussi un réservoir de cellules souches non hématopoïétiques, les cellules souches mésenchymateuses. Ces cellules contribuent à la régénération des tissus d'origine mésenchymateuse (os, cartilage, tendon, tissu adipeux, etc.). On les isole assez facilement à partir d'un prélèvement de moelle osseuse, et on sait les amplifier : après quelques semaines de culture on obtient une centaine de millions de cellules à partir d'un prélèvement de moelle osseuse. Cependant, elles ne prolifèrent pas de façon infinie et après 30 à 40 divisions, elles meurent. Lorsqu'elles sont utilisées sous forme d'allo-greffes, elles ne semblent pas engendrer de réactions de rejet, car elles auraient des propriétés immunosuppressives. De ce fait on pourrait envisager la constitution de banques de cellules souches mésenchymateuses.

Des cellules souches au cartilage

Après avoir obtenu une quantité suffisante de cellules souches, il faut encore les assembler en une structure tridimensionnelle capable, après transplantation, de se transformer en un tissu fonctionnel. Toutefois, l'enjeu semble davantage d'orienter les cellules vers le phénotype désiré (os ou cartilage) que d'organiser ces cellules en un tissu dont

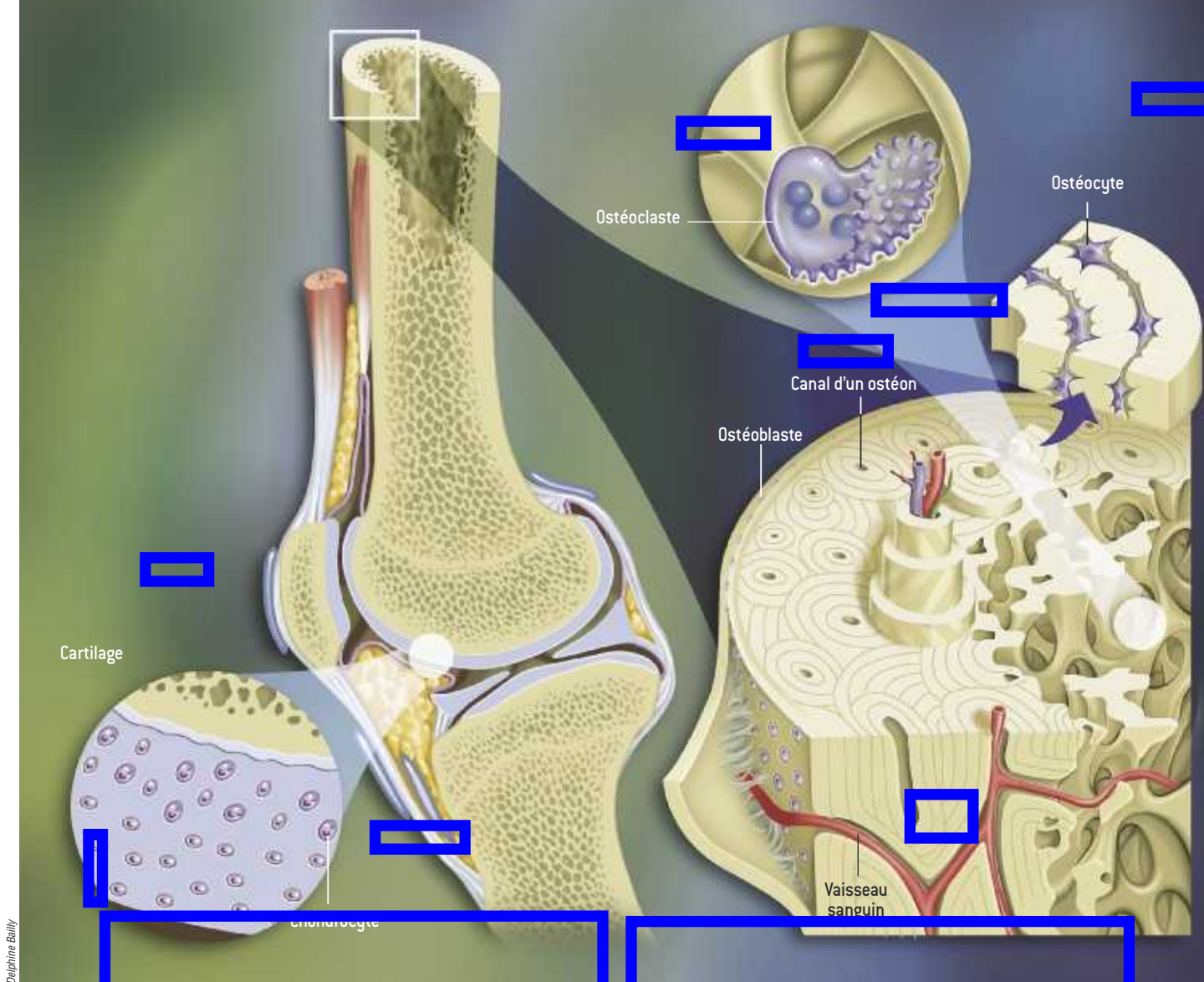
la micro-architecture serait identique à celle du tissu à réparer : l'étape d'organisation des cellules s'effectuera après transplantation chez le patient et dépendra surtout du biomatériau où les cellules auront été ensemencées et de l'environnement biomécanique du transplant.

La cascade biologique conduisant, lors du développement embryonnaire, à la formation de cartilage chez l'embryon à partir de cellules souches est complexe. Elle est régulée par des molécules bioactives (de nombreux facteurs de croissance) et par l'environnement biophysique (concentration en oxygène, sollicitations mécaniques). Les protocoles expérimentaux utilisés pour déclencher la différenciation des cellules souches en chondrocytes recréent *in vitro* une version simplifiée de leur environnement naturel. L'engagement vers la voie chondrocytaire est amorcé par le facteur de croissance TGF β 1 ajouté au milieu de culture. Certains protocoles de culture stimulent la différenciation en chondrocytes par le biais de différents facteurs en imposant des sollicitations mécaniques proches de celles subies par le cartilage ou une faible concentration en oxygène (le cartilage n'étant pas vascularisé, les cellules sont exposées à une concentration en oxygène très inférieure à celle du reste de l'organisme).

Toute cellule mésenchymateuse produit spontanément en culture des macromolécules s'auto-assemblant en une matrice extracellulaire, laquelle interagit directement avec la cellule et module ses propriétés d'adhérence, de migration, de prolifération, d'apoptose (la mort cellulaire programmée) et de différenciation. Hélas, l'essentiel de cette matrice se dissout rapidement dans le milieu de culture et la cellule doit sans cesse recommencer son travail de Sisyphe et reconstruire son environnement. Afin de pallier cette difficulté, les cellules sont, de plus en plus souvent, cultivées sur des hydrogels qui retiennent les macromolécules synthétisées permettant aux cellules d'élaborer progressivement un environnement macromoléculaire de type cartilage et de renforcer leur identité. Ces hydrogels d'origine naturelle ou synthétique ont aussi pour rôle de faciliter l'intégration à la lésion du cartilage préparé en laboratoire. Plusieurs équipes recherchent actuellement des supports idéaux offrant des niches propices à la différenciation des cellules souches en chondrocytes, par exemple des matrices qui polymérisent *in situ* sous l'action d'ultraviolets.

Aujourd'hui, on sait obtenir à partir de cellules souches mésenchymateuses des cellules exprimant les marqueurs spécifiques des chondrocytes. Il faudra vérifier que les cellules cartilagineuses obtenues expriment uniquement les marqueurs chondrocytaires et n'ont pas une « double identité » (par exemple os-cartilage) et que les cellules gardent leurs caractéristiques de chondrocytes après transplantation. Malgré ces difficultés techniques, et même s'il n'existe pas encore d'études cliniques publiées prouvant l'efficacité de cette stratégie thérapeutique, l'obtention de chondrocytes à partir de cellules souches adultes est la voie d'avenir, car, à terme, elle permettrait l'obtention aisée d'un nombre important de cellules fonctionnelles à partir d'un prélèvement limité.

La transplantation de chondrocytes autologues est aujourd'hui la seule stratégie thérapeutique utilisée pour régénérer le cartilage en clinique. Le chirurgien prélève sous arthroscopie des petits copeaux de cartilage articulaire au niveau de zones non portantes (généralement en périphérie)



2. Structure de l'os et du cartilage. Le cartilage est un tissu homogène, une sorte de gel dense non vascularisé et contenant des chondrocytes. L'os est traversé de nombreux canaux où passent les vaisseaux sanguins et les nerfs. L'unité structurale de l'os compact est nommée ostéon. Chaque ostéon est constitué d'un ensemble de cylindres de deux emboîtés, l'ensemble formant un cylindre orienté

selon l'axe de l'os. Chacun des cylindres est une lamelle constituée de fibres de collagène parallèles, et les fibres de deux lamelles adjacentes sont toujours orientées dans des directions différentes, ce qui confère une résistance au matériau. Les ostéoblastes fabriquent la matrice osseuse, les ostéocytes assurent l'entretien de la matrice osseuse que les ostéoclastes résorbent.

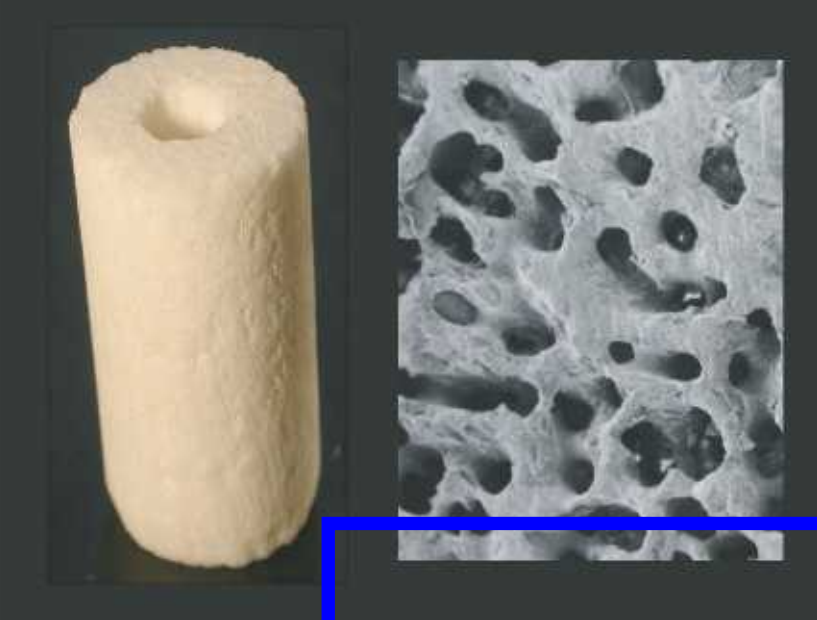
et il les envoie à un centre de thérapie cellulaire. Là, les chondrocytes sont isolés de leur matrice, puis cultivés et multipliés (pour obtenir entre 3 et 30 millions de cellules). Ces cellules sont alors réinjectées dans la lésion sans support. Le faible potentiel de prolifération des chondrocytes et l'absence de matériau support limitent les indications cliniques de cette technique au comblement de perte de substance cartilagineuse d'origine traumatique chez le patient jeune. La méthode ne s'adresse pas pour l'instant aux lésions arthrosiques ou aux lésions d'origine inflammatoire même si, à moyen terme, le but sera de traiter des débuts d'arthrose par thérapie cellulaire afin de retarder la mise en place d'une prothèse.

Le cas de l'os

Les cellules souches mésenchymateuses sont aussi utilisées pour préparer du tissu osseux au laboratoire. Dans ce cas, elles sont mises en culture pour qu'elles se multiplient et se différencient en un phénotype osseux. La veille de la chirurgie, les cellules sont placées sur un biomatériau poreux

et résorbable. Les résultats précliniques de ces études sont très encourageants puisque, chez l'animal, on répare de grandes pertes de substance osseuse. Les cellules peuvent être cultivées sur un biomatériau poreux ; l'ensemble est placé dans un bioréacteur, où les fluides en mouvement stimulent la production de tissu par les cellules. On a observé que la production de tissu minéralisé par des cellules osseuses est multipliée par six quand on met en mouvement le fluide où elles se développent.

La transplantation de ces cellules exige un support physique sur lequel les cellules adhèrent, migrent, prolifèrent et se différencient. Il doit être poreux, pour permettre à de nombreuses cellules de s'y développer et pour autoriser une vascularisation rapide de l'implant. La lésion est progressivement recolonisée par de l'os, et le matériau support se « dissout ». Les matrices préparées à partir de polymères naturels sont généralement bien tolérées par l'organisme. En ingénierie tissulaire osseuse, les céramiques à base de phosphate ou carbonate de calcium ont donné jusqu'à présent les meilleurs résultats.



UMR-CNRS 7052, Faculté de médecine Lariboisière-Saint-Louis

3. Les matrices utilisées pour les implants favorisant la recolonisation osseuse d'une lésion de grande taille sont de natures variées. Ici, il s'agit d'un bloc de corail [il mesure 2,5 centimètres de hauteur]. La structure de cet implant [observée à droite en microscopie électronique à balayage] est poreuse, ce qui facilite la colonisation par les cellules réimplantées attirées par les vaisseaux sanguins qui repoussent et irriguent l'os en formation. L'implant est biodégradable et finit par disparaître, remplacé par l'os néoformé.

Transplanter des pièces osseuses de grande taille pose des difficultés. Les cellules éloignées des vaisseaux souffrent d'un manque d'oxygène et de nutriments, et n'éliminent pas aisément les déchets accumulés. On espère généralement qu'après transplantation, le biomatériau jouera un rôle « d'éponge » et absorbera les fluides biologiques permettant un apport en oxygène et en nutriments suffisant pour la survie des cellules souches. Les cellules en hypoxie (manque d'oxygène) émettent des signaux qui alertent le système vasculaire, lequel déclenche la croissance de nouveaux vaisseaux. Ces signaux de détresse sont des facteurs de croissance, tels VEGF ou bFGF. Ajoutés au biomatériau, ces facteurs accélèrent la vascularisation de l'implant. Même si les résultats expérimentaux sont encourageants, de nouvelles études contrôlées seront nécessaires pour évaluer l'intérêt clinique réel de ce type de thérapie.

Stimuler les cellules souches à l'aide de facteurs de croissance

Les tissus capables de régénération (dont l'os) contiennent naturellement des cellules souches, d'où l'idée de développer des « engrais à cellules souches » qui déclencheraient la prolifération et la différenciation en cellules squelettiques de ces cellules. Ces substances sont produites par génie génétique et administrées au patient en association à un biomatériau. Elles posent deux difficultés : elles sont très facilement dégradées et doivent être libérées progressivement à des doses physiologiques.

Au cours du développement, les cellules souches prolifèrent, puis se spécialisent progressivement : un être humain constitué d'environ 100 000 milliards de cellules réparties en 200 types cellulaires est issu d'une unique cellule. La nature a élaboré au cours de l'évolution (François Jacob aurait dit bricolé) un système de communication permettant la différenciation et le contrôle de ces cellules dans le respect rigou-

reux du plan d'organisation de l'embryon. Le décodage, encore partiel, de cette forme de « langage » a notamment permis l'identification des facteurs de croissance qui commandent la migration, l'adhésion, la prolifération, l'apoptose ou la différenciation des cellules.

Depuis une trentaine d'années, différents facteurs de croissance pouvant présenter un intérêt thérapeutique ont été identifiés. C'est le cas de l'érythropoïétine, dont l'administration provoque un accroissement rapide et notable du nombre des globules rouges. On a isolé à partir de la matrice osseuse des facteurs de croissance qui accélèrent la réparation d'os : on les nomme protéines de la morphogénèse osseuse. Leur adjonction à un biomatériau déclenche la colonisation par des cellules mésenchymateuses voisines qui prolifèrent, se différencient en chondrocytes et sécrètent une matrice extracellulaire qui se minéralise. À ce stade, un réseau vasculaire envahit l'implant et de l'os commence à se former, tandis que le cartilage calcifié est résorbé. Les applications thérapeutiques de ces molécules concernent essentiellement le traitement des pseudarthroses (absence de consolidation d'une fracture) et les arthrodèses du rachis (on déclenche la fusion de deux vertèbres, car le disque qui les sépare n'est plus fonctionnel).

Nous l'avons souligné, ces facteurs de croissance doivent être libérés de façon contrôlée, ce qui représente une des difficultés de la méthode. Divers types de matrice contrôlant cette diffusion sont à l'étude. Les unes sont synthétiques, les autres naturelles, d'autres encore hybrides. Ces matrices doivent créer un environnement autorisant la colonisation par les cellules souches et par les vaisseaux sanguins (dans le cas de l'os), et la production de tissu squelettique. La matrice doit aussi protéger le facteur de croissance des attaques enzymatiques lancées par l'organisme contre tous les corps étrangers, et le libérer progressivement à des doses physiologiques.

Ces avancées de la biologie permettent d'entrevoir de nouvelles stratégies thérapeutiques en orthopédie. Les premiers résultats sont encourageants et suggèrent que ces techniques ont un réel intérêt. Toutefois, la production des cellules à réimplanter reste fastidieuse et les matrices permettant la transplantation des cellules et la libération contrôlée des facteurs de croissance devront être améliorées. Enfin, ces stratégies thérapeutiques sont en concurrence avec d'autres méthodes, dont l'utilisation d'autogreffes. Chacune de ces techniques a probablement sa place dans l'arsenal du chirurgien, et des études cliniques rigoureuses devront déterminer leurs indications thérapeutiques respectives.

Hervé PETTE est responsable du Groupe ingénierie tissulaire du Laboratoire de recherches orthopédiques UMR-CNRS 7052, de la Faculté de médecine Lariboisière-Saint-Louis, à Paris.

X. CHAVALLIER et Marie-Thérèse CORVOL, *la greffe autologue de chondrocytes. Limites et perspectives*, in *Le courrier de la transplantation*, à paraître.

H. PETTE et al., *tissue engineered bone regeneration*, in *Nature Biotechnology*, vol. 18, sept. 2000.

Principles of tissue engineering, sous la direction de R. Lanza, R. Langer et W. Chick, éditions R.G. Landes, Georgetown, Texas, 1997.

Le nouveau site de Pour la Science est en ligne !

www.pourlascience.fr

Avec son nouveau site Internet, Pour la Science vous offre plus de contenu, plus de services, plus d'interactivité.

➤ Vous êtes abonné à Pour la Science ?

Retrouvez l'intégralité de votre magazine en ligne et téléchargez les articles de votre choix. Réagissez aux articles et posez vos questions à des experts. Découvrez chaque jour des contenus inédits.

➤ Vous n'êtes pas encore abonné à Pour la Science ?

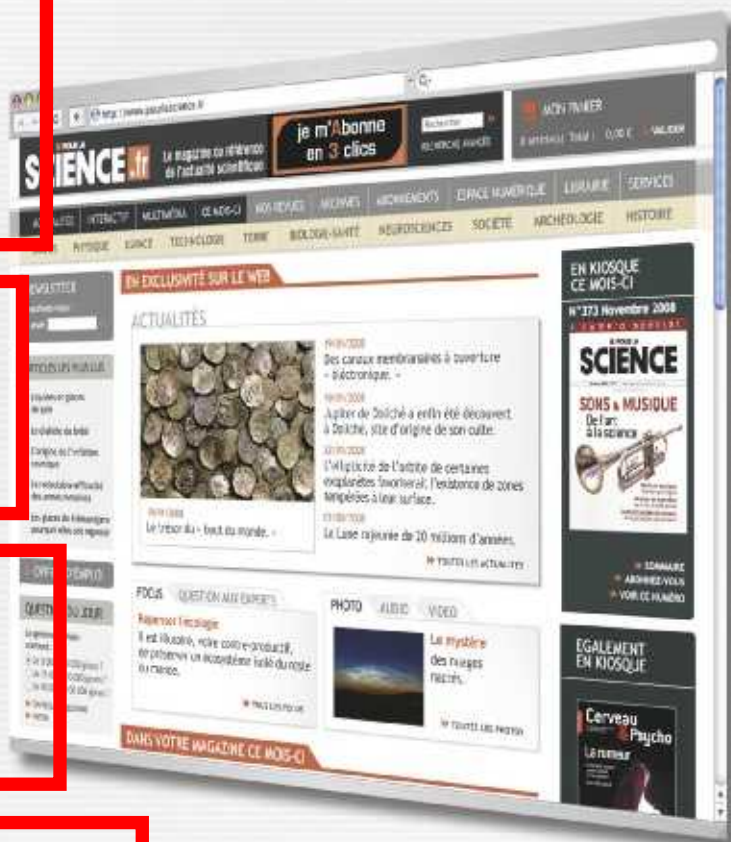
Découvrez chaque jour des actualités scientifiques, des articles originaux, des photos, des vidéos... Achetez les articles de votre choix.

➤ Abonnez-vous en ligne en trois clics !

L'abonnement « papier » vous donne accès au magazine imprimé et à tous les contenus web.

L'abonnement « web » vous donne accès à votre magazine au format numérique.

➤ Et bientôt l'accès en intégralité aux archives !



À bientôt sur **POUR LA SCIENCE.fr**

Flexagones

Pour vous distraire en vacances, oubliez votre ordinateur et munissez-vous de petites bandes de papier. Puis, modernes magiciens, «flexez» vos pliages (avec vos photographies ?).

Le premier article de Martin Gardner, en décembre 1956, dans la revue *Scientific American*, et le premier chapitre de son premier livre de créations mathématiques traitent d'un jeu qu'on se fabrique en quelques minutes avec des bandes de papier pliés : les flexagones. Le succès de ce jeu – partout dans Manhattan les promeneurs manipulaient des flexagones – conduisit les éditeurs de *Scientific American* à demander à Martin Gardner de tenir une chronique de jeux mathématiques ; elle se prolongea pendant un quart de siècle.

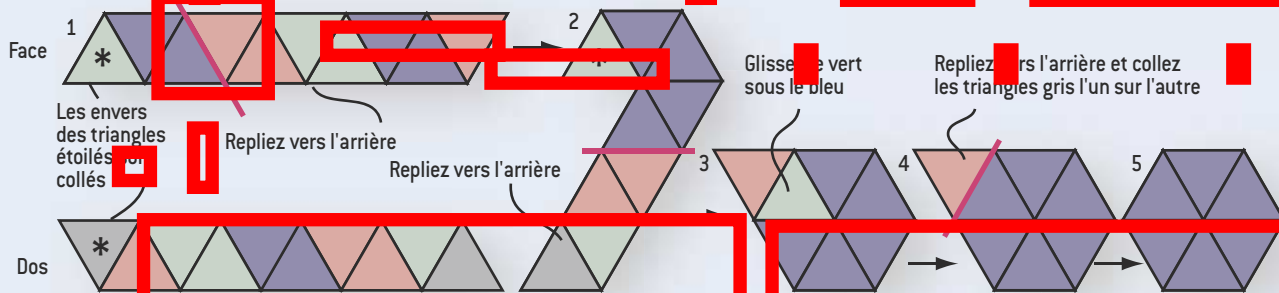
Les flexagones sont des pliages étranges et fascinants dont aucune théorie complète n'a été formulée. Malgré des dizaines d'articles et plusieurs ouvrages sur le sujet, les aficionados découvrent encore de nouveaux modèles de flexagones et les mathématiciens amateurs réfléchissent encore aux graphes qu'ils engendrent et à leurs diverses généralisations. Le livre récent de Les Pook, *Flexagons Inside Out* (Cambridge University Press, Cambridge, 2003), présente quelques-uns des plus beaux spécimens de flexagones et en énumère toutes sortes de propriétés : il contient une mine d'idées pour se distraire. Les enseignants qui veulent faire aimer les mathématiques y trouveront de nombreuses activités pour intéresser et amuser leurs élèves.

La déchirure inspiratrice

La légende veut que l'histoire des flexagones commence en 1939 quand Arthur Stone, étudiant britannique de 23 ans en séjour à l'Université de Princeton, découpant les feuilles de papier au format américain pour les ramener au format européen – plus étroit –, se retrouva en possession d'une série de fines bandes. Il commença à les replier obtenant des formes géométriques dont certaines se révélèrent flexibles.

Le premier flexagone qu'il découvrit s'obtient en considérant 9 triangles équilatéraux liés et pliés pour former un hexagone selon le schéma de la figure 1. Pour faciliter la jonction des deux triangles extrêmes qui doivent être reliés, on part de dix triangles et on colle l'un sur l'autre les deux triangles situés aux bouts de la bande.

En recroisant les triangles comme la figure 1 le suggère et en suivant soigneusement la procédure de pliage, on obtient un hexagone plat dont la face vers soi montre six triangles d'une même couleur. Il en va de même de la face en dessous (le dos) ! Ce pliage qui semble rigide, en réalité peut changer de forme si vous savez le «flexer». Le schéma de la figure 2 décrit cette opération qui procure, à tous ceux qui s'y essaient, le plaisir étrange d'apprivoiser un pliage qui a sa volonté propre.



1. Le trihexaflexagone. Pour construire le trihexaflexagone découpez une bande de papier après y avoir dessiné 10 triangles colorés selon le schéma. Pliez ensuite la bande en suivant très attentivement le dessin : le trait rouge indique la place du pli à opérer dans l'étape suivante

de pliage. À la fin du pliage, collez l'une contre l'autre les deux triangles gris. La bande de papier obtenue est un ruban de Möbius (une seule face, un seul bord) trop étroite pour se déployer dans l'espace. Malgré sa rigidité apparente, la bande peut changer de forme.

Le flexagone « flexé », vous avez entre les mains un nouvel hexagone dont les deux faces visibles ont changé de couleur. Vous pouvez à nouveau le flexer, ce qui vous conduit à une troisième configuration du flexagone. Une dernière manipulation vous ramène à l'état initial. Une telle promenade dans l'espace des configurations du flexagone se représente par un petit graphe :

bleu/rose
/ \
vert/bleu — rose/vert

Ce premier flexagone possède trois faces (trois couleurs qui apparaissent successivement par flexage) correspondant à trois configurations. D'où son nom de trihexaflexagone : trois faces hexagones.

Les études d'un futur prix Nobel

Stone forma autour de lui un groupe de travail sur les flexagones qui réunissait Bryant Tuckerman, John Tukey, tous deux mathématiciens, et Richard Feynman alors étudiant en physique et qui en 1965 se verra décerner le prix Nobel... pour des travaux en électrodynamique quantique.

Malgré de nombreuses découvertes concernant les pliages flexibles, assez étrangement, aucune publication ne résulta des travaux du groupe réuni autour de Stone (peut-être parce que la Seconde Guerre mondiale les dispersa trop rapidement). C'est l'intérêt suscité par l'article de Martin Gardner qui relança la recherche sur cet étrange domaine des mathématiques récréatives. En partant d'un nombre un peu plus grand de triangles, on obtient d'autres flexagones de forme hexagonale possédant un nombre de faces supérieur à trois. La figure 3 indique comment construire le tétrahexaflexagone, le pentahexaflexagone et le hexahexaflexagone possédant respectivement 4, 5 et 6 faces.

Quelques remarques concernant l'hexahexaflexagone illustreront l'étrange richesse combinatoire de ces assemblages de triangles repliés.

L'hexahexaflexagone possède 6 faces, ce qui signifie qu'en le manipulant vous ferez apparaître les six couleurs différentes utilisées dans le coloriage de la bande initiale. Jamais aucun mélange de couleur ne se produit. Chaque configuration est caractérisée par deux couleurs : celle visible au-dessus et celle visible en dessous. L'opération de « flexage » fait passer d'une configuration à une autre, ce qui définit un graphe (voir la figure 3). Son examen montre que :

- Il y a 9 configurations différentes, qu'on parcourt en flexant de toutes les façons possibles. Jamais aucune autre manipulation n'est possible (sans déchirer l'assemblage) et on garde donc toujours en main un hexagone bicolore ;

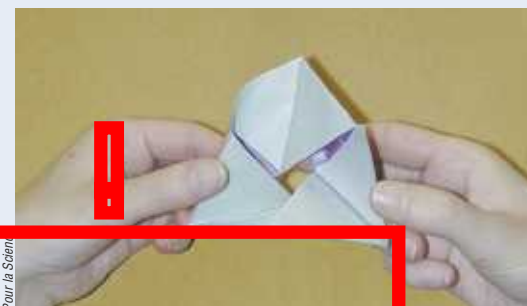
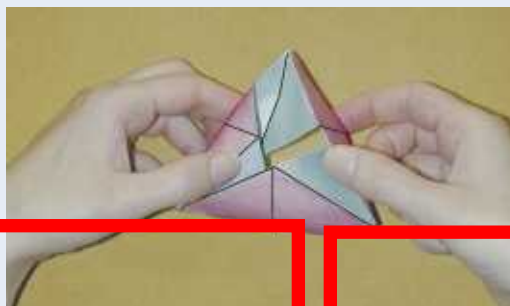
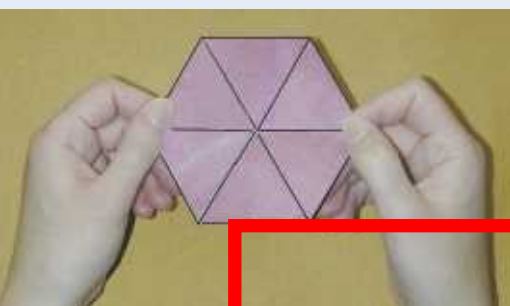
- Les 3 configurations, 3 configurations, dites « centrales », donnent accès chacune à quatre autres (dont à chaque fois les deux autres configurations centrales) ;

- Les 6 autres configurations, dites « périphériques », donnent chacune accès à une configuration périphérique et une configuration centrale.

On distingue sans mal (et sans regarder le diagramme) une configuration périphérique d'une configuration centrale en observant combien de triangles sont empilés pour chaque élément de l'hexagone. Dans le cas des configurations centrales, la répartition des épaisseurs est 2-4-2-4-2-4 ; pour les configurations périphériques, elle est 1-5-1-5-1-5.

Si vous réalisez des dessins sur les triangles, vous remarquerez que d'une configuration à l'autre les éléments d'une face donnée tournent ; autrement dit, les six triangles qui composent la face – violette par exemple – ne se disposent pas de la même façon selon la configuration que vous observez et qui exhibe une face violette. Parmi toutes les faces possibles en tenant compte à la fois de la couleur et de la position relative des triangles), seules 15 faces différentes sont possibles avec un hexahexaflexagone.

Nous vous laissons le soin de découvrir le graphe des configurations des tétra- et penta-hexaflexagones. Continuez votre exploration en construisant d'autres flexagones. Les plus



2. Je flexe, tu flexes, il ou elle flexe... L'opération de flexage permet de passer d'une configuration d'un flexagone à une autre. Pour l'effectuer, il n'est pas nécessaire de forcer quoi que ce soit : il suffit de plier le flexagone en faisant un zigzag de son pourtour, ce

qui ouvre alors le centre, lequel se déploie et constitue alors le pourtour de la nouvelle configuration. Un certain soin est indispensable dans la réalisation du flexagone et surtout dans son maniement. Ici le passage d'une face à l'autre d'un tétrahexaflexagone.

simples portent, comme pour les hexahexaflexagones, d'une simple bande de papier composée de triangles équilatéraux côte à côte : il y en a de ce type à 9 faces, 12 faces, 18 faces etc., avec à chaque fois, des graphes de configurations de plus en plus complexes et intéressants à identifier.

Pour un nombre donné de faces, plusieurs hexaflexagones différents sont possibles. Leur dénombrement est indiqué dans la suite A000207 de l'encyclopédie des suites de Sloane (<http://www.research.att.com/~njas/sequences/>). Cette suite est aussi celle que l'on obtient en comptant le nombre de façons différentes de découper un polygone régulier à $N+2$ côtés en N triangles par des diagonales ne se coupant pas.

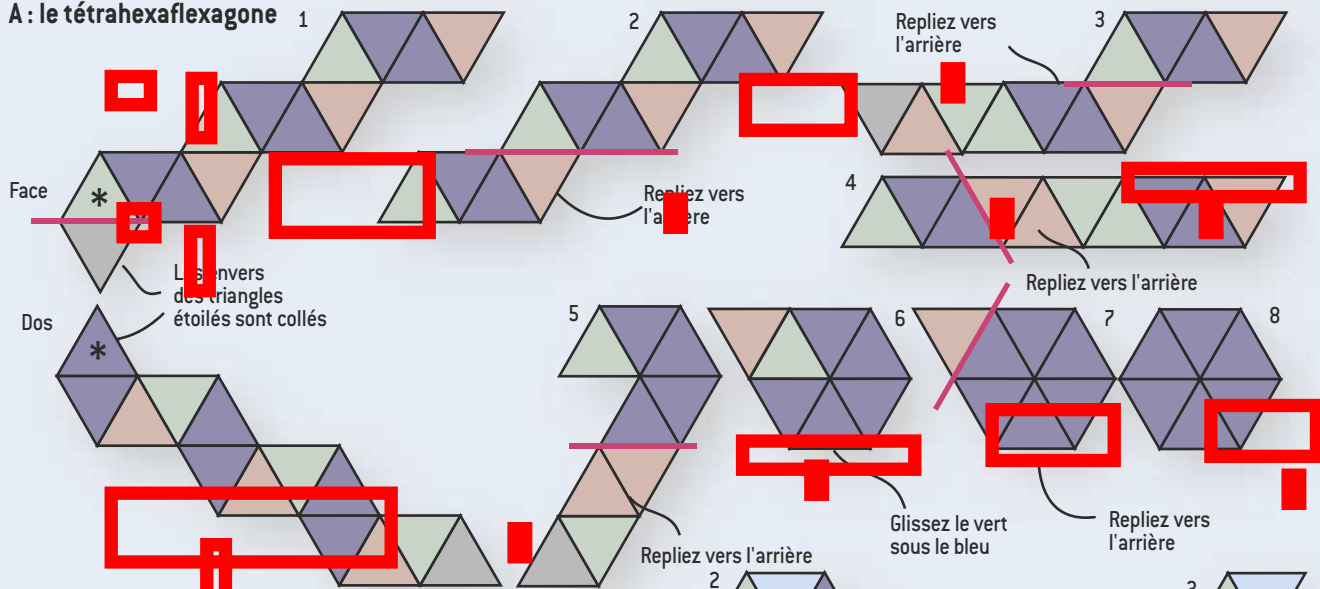
En collant des dessins sur les faces, vous créerez des casse-tête du type « faites apparaître tel

dessin », leur difficulté étant liée à la structure du graphe des configurations.

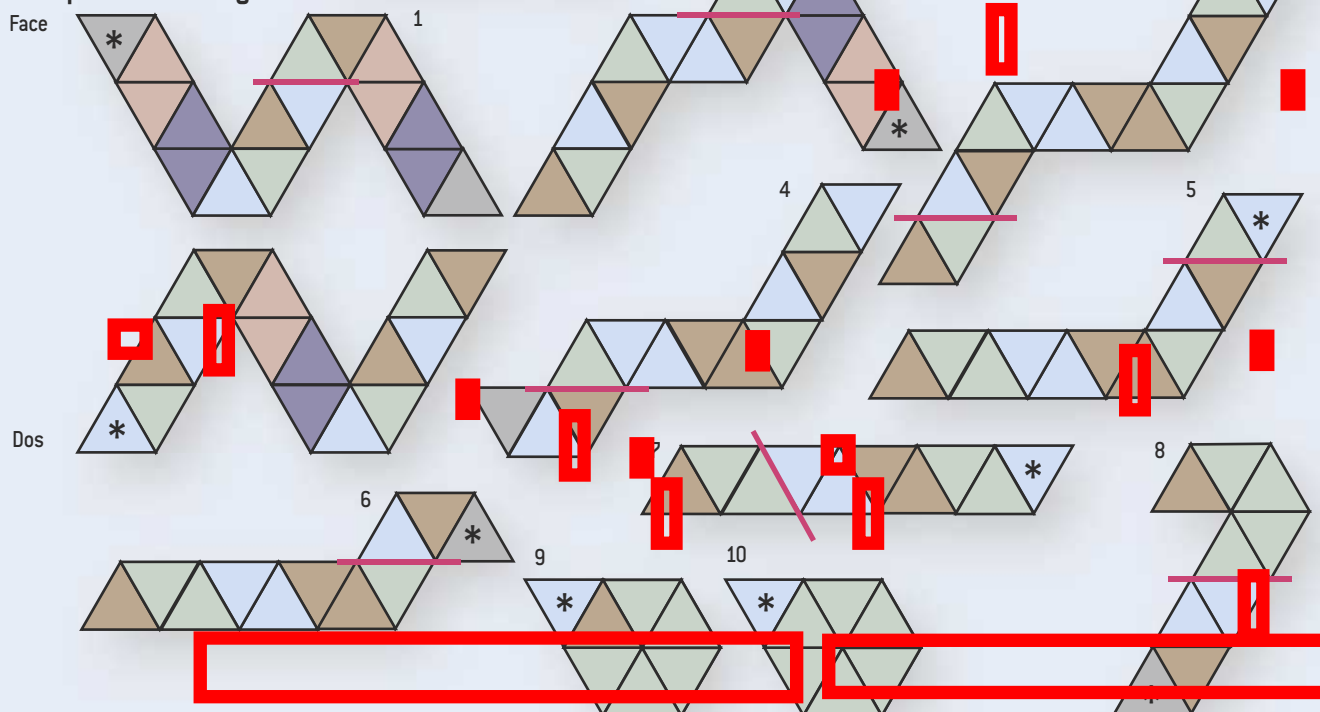
Un flexagone étant choisi, un autre casse-tête consiste à trouver la suite de manipulations la plus simple faisant passer par toutes les faces du flexagone, ou – plus long – par toutes les configurations possibles du flexagone. Vous pouvez aussi vous fabriquer un petit album photos original en collant des photos sur les faces d'un flexagone dont vous tournerez les pages en flexant le pliage.

Vous obtiendrez de beaux flexagones en découpant des cartons triangulaires (ou des plaques de bois) que vous relierez par des bandes de papier ou mieux des bandes de tissu. Si le bricolage ne vous amuse pas, vous pouvez acheter quelques flexagones chez un artisan britannique qui propose

A : le tétrahexaflexagone



B : le pentahexaflexagone



3. Trois flexagones : le tétrahexaflexagone (A), le pentahexaflexagone (B) et l'hexahexaflexagone (C). Fabriquez-les et explorez l'es-

pace de leurs configurations. Le haut de la figure C donne le détail de l'espace des configurations dans le cas de l'hexahexaflexagone. En flexant un

l'hexahexaflexagone sous le nom de *Kaleidoscope* (voir : <http://www.halfpast.demon.co.uk/html/tt.html>).

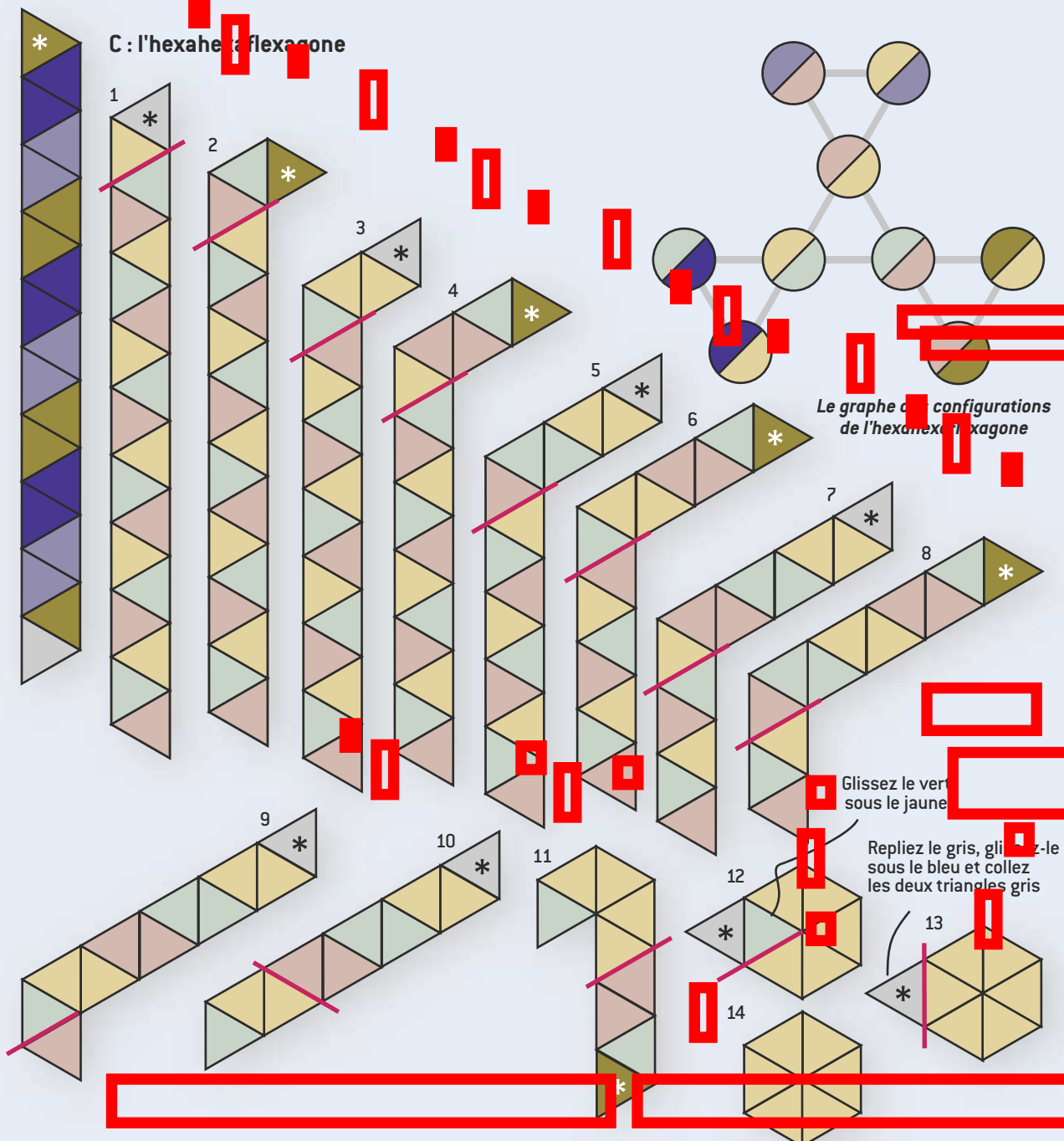
La construction des flexagones ayant un très grand nombre de faces est délicate ; toutefois, à condition de prendre des feuilles assez grandes et de mener les découpages et assemblages avec soin, des flexagones à 30 ou même 50 faces ne semblent pas impossibles. Qui ira le plus loin ? Envoyez-moi vos constructions (avec le graphe des configurations), je donnerai dans cette rubrique le nom des gagnants ainsi que les caractéristiques de leurs flexagones.

Si à la place de triangles vous utilisez des carrés, une nouvelle sorte de flexagones peut être obtenue qui, elle aussi, a été largement étudiée. On les dénomme des tétraflexagones. En fait des flexagones utilisant des carrés, des pentagones et

toutes sortes de figures de bases ont été imaginés, créés et analysés. Pour approfondir cet art géométrique et combinatoire visuel, en plus du livre de Les Pook déjà cité vous devez consulter l'adresse internet : <http://delta.cc.cinvestaomx/~moirish/olweb/pflexagon.html>. Vous y trouverez des articles sur le sujet et même le texte inédit d'un projet de livre de 1962 consacré aux flexagones.

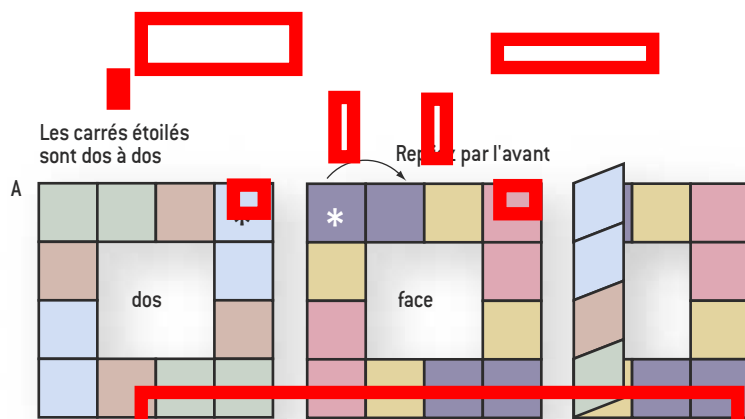
Sans utiliser la colle !

Malgré l'ancienneté du sujet et les nombreux travaux menés, une nouvelle famille de flexagones a récemment été découverte. L'élégance de ces nouveaux pliages montre que, même après des dizaines d'années d'étude, certaines



l'hexahexaflexagone vous en changez la configuration, ce que vous voyez, car les couleurs des faces se modifient. À chaque flexage, la face qui

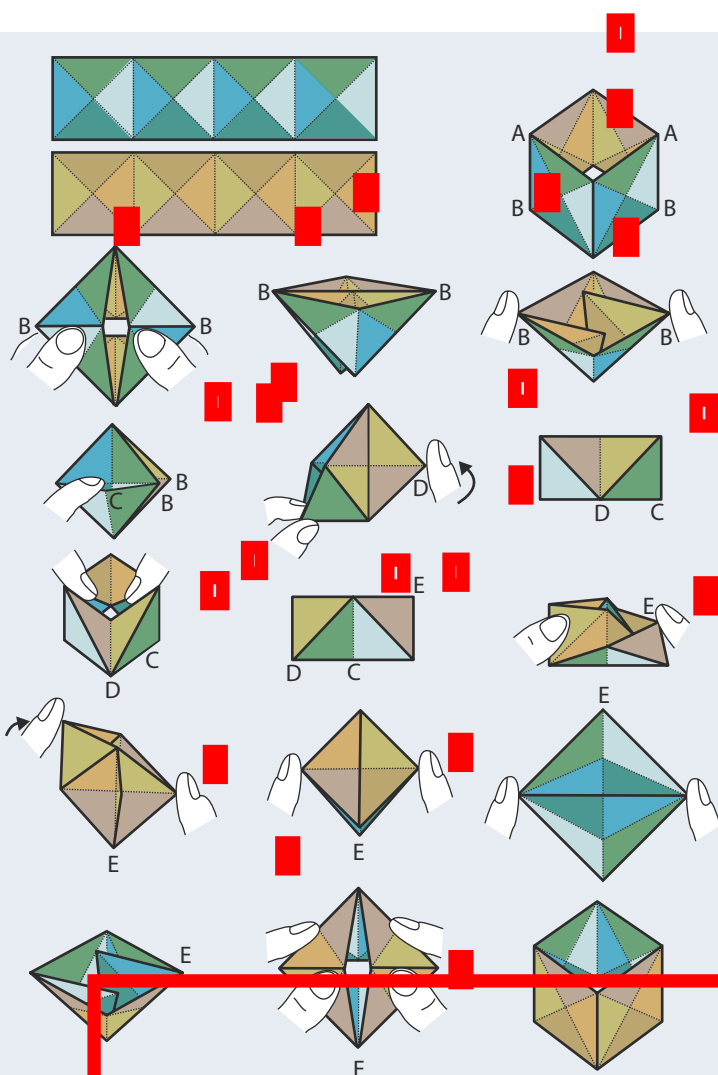
disparaît est remplacée par une nouvelle face : les triangles qui la composent changent d'orientation.



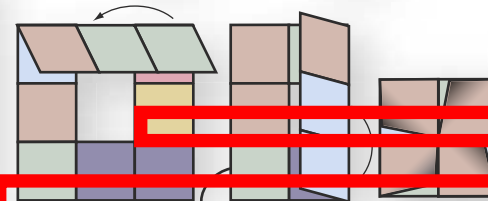
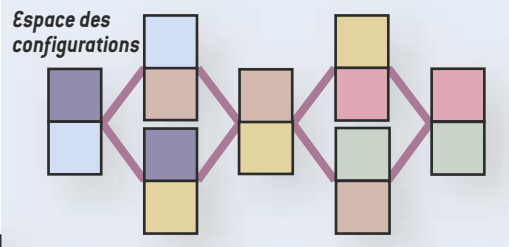
4. Vous pouvez aussi faire des flexagones sans colle !

En voici un premier exemple : (A) le pliage symétrique de la feuille trouée. La dernière des quatre opérations de pliage nécessite une très délicate manipulation pour que la face en bas à gauche, qui se place natu-

rellement sur le dessous (lorsqu'on replie les quatre derniers carrés), se retrouve à dessus. Le résultat final est une forme rigide (elle ne se déplie pas d'elle-même) qui reste identique quand vous faites tourner le pliage d'un quart de tour (elle est invariante par rotation de 90 degrés).



5. Le flexatube. Bien que découvert en 1939 par Arthur Stone l'inventeur des flexagones, le flexatube n'est pas très connu. C'est pourtant un magnifique casse-tête facile à fabriquer soi-même. On marque des plis comme le dessin l'indique dans une bande rectangulaire 4×1 . On referme la bande, ce qui donne un anneau. Le problème est de retourner l'anneau : l'intérieur doit devenir l'extérieur et réciproquement. En utilisant uniquement les plis marqués, c'est-à-dire en faisant comme si chaque triangle rectangle dessiné était en carton rigide. L'étonnant est que c'est possible comme le montre la suite de dessins. Avec un tube plus long (quelle que soit sa longueur), le retournement reste possible, mais bien sûr nécessite une mosaïque plus fine de triangles.



questions simples et leurs solutions échappent à toute une communauté de passionnés. Robert Neale s'est demandé si on ne pouvait pas créer des flexagones sans collages. Il a trouvé plusieurs objets répondant à cette condition.

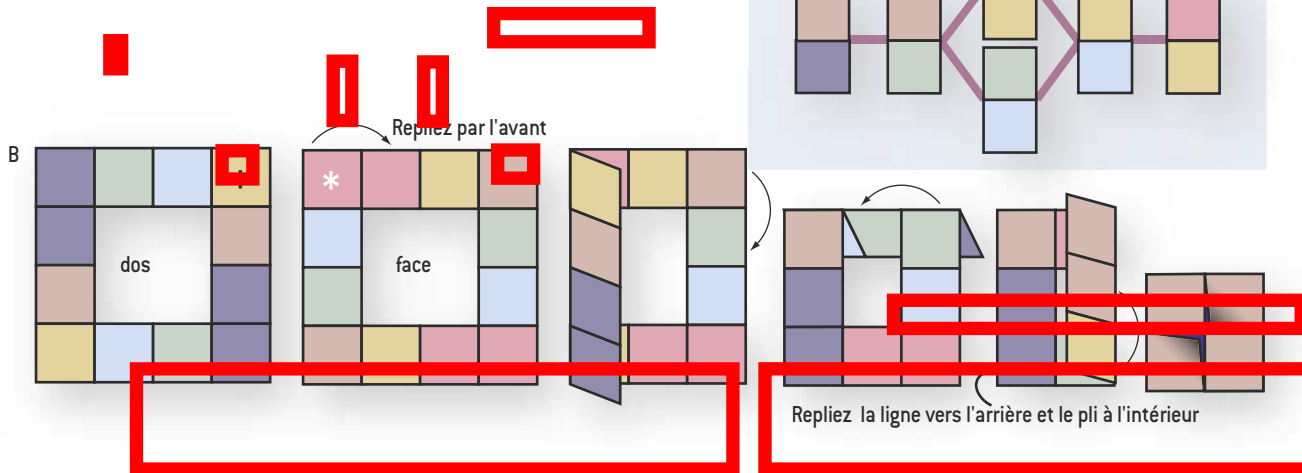
Partant d'une feuille de papier carrée (ou rectangulaire) à la surface de laquelle on a fait apparaître un quadrillage régulier de 16 carrés (ou rectangles), on découpe les 4 carrés (ou rectangles) centraux. Avec cette feuille trouée en main, deux pliages astucieux produisent deux flexagones très commodes pour faire de micro-albums photos (il faut coller les photos après avoir plié le support à cause de la manipulation spéciale décrite plus bas).

Le premier pliage que nous dénommerons « pliage symétrique » consiste à replier les quatre carrés situés à gauche – vers l'avant –, puis les quatre carrés du haut – vers l'avant –, puis les quatre carrés de droite – vers l'avant –, puis enfin les quatre carrés du bas – toujours vers l'avant (voir la figure 5a). Attention cependant, le dernier pliage doit être accompagné d'une manipulation un peu délicate permettant au résultat final d'être invariant par rotation d'un quart de tour : il faut lors du dernier pliage faire passer le carré de papier, qui sans manipulation particulière se serait trouvé tout en dessous en bas à gauche, par-dessus les deux autres de la même pile.

Cette opération serait impossible si les 12 carrés étaient rigides, mais grâce à la souplesse du papier on peut y arriver... sans rien déchirer. Le résultat est une configuration stable : si vous jetez votre flexagone sans colle correctement plié, il ne se défait pas et pour revenir à la feuille trouée dépliée, il faut nécessairement à un moment ou un autre forcer le pliage.

Si vous avez réussi le pliage, le flexagone peut s'ouvrir de quatre façons différentes – c'est l'opération de flexage pour ce type de flexagones – vous amenant dans quatre configurations nouvelles. Une sixième et une septième configurations existent aussi. La forme du graphe des sept configurations est une double boucle (voir la figure 4A).

Le second pliage du carré troué, que nous dénommerons « pliage asymétrique », consiste à replier alternativement les quatre carrés de la colonne de gauche – vers l'avant –, puis les quatre carrés du haut – vers l'arrière –, puis les quatre carrés de droite – vers l'avant –, puis enfin les quatre carrés du bas – vers l'avant. Attention, comme

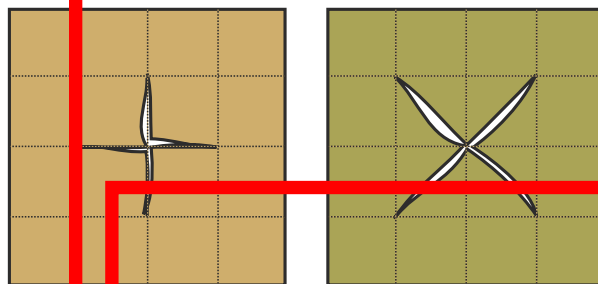


Cette forme est un des tétraflexagones sans colle de R. Neale : il possède six faces et peut se trouver dans sept configurations différentes. Autre exemple, [B] : le pliage asymétrique de la feuille trouée. Comme précédemment, il faut, lors de la dernière étape, permuter les carrés

en bas à gauche pour que celui qui se place naturellement au-dessus se retrouve en dessous. Si vous utilisez le coloriage destiné au pliage asymétrique et que vous faites le pliage symétrique, vous observerez une disposition intéressante...

précédemment, le dernier pliage doit être accompagné d'une manipulation (assez délicate à faire, mais il faut se laisser guider par le résultat à obtenir) faisant passer sur le dessus, le carré de papier qui sans manipulation particulière se serait trouvé en dessous dans le coin en bas à gauche. Le graphe des configurations cette fois ne comporte que 6 nœuds et c'est un carré muni de tiges conduisant à des configurations isolées (un peu plus difficiles à découvrir que les autres).

Les deux pliages particuliers que vous venez d'apprendre vous seront utiles pour quatre autres flexagones sans colle inventés par R. Neale. Partant cette fois d'une feuille de papier carrée avec quadrillage à 16 carrés (ou rectangles) mais sans trou, faites une entaille en forme de + et faites le pliage symétrique ou le pliage asymétrique (voir la figure 6). Nous vous laissons le plaisir de trouver vous-même les graphes des configurations de ces deux flexagones. En partant d'une entaille en forme de x, vous obtiendrez encore deux flexagones nouveaux. L'un avec le pliage symétrique, l'autre avec le pliage asymétrique. Amusez-vous bien. Y a-t-il d'autres flexagones sans colle à découvrir ?



6. Feuilles à entailles En utilisant des feuilles entaillées par un + ou un x comme l'indique le dessin et en opérant des pliages symétriques ou asymétriques (Néanmoins, $6 \times 6 = 36$ et $5 \times 5 = 25$), obtenez quatre nouveaux flexagones « sans colle » dont nous vous laissons le plaisir de découvrir l'espace des configurations.

Le flexatube

Pour ceux qui aiment les casse-tête et les pliages, une des découvertes, qu'Arthur Stone fit en manipulant ses flexagones, mérite d'être plus connue, car elle est à la fois troublante et très belle. Il s'agit de ce qu'on appelle le flexatube. Partant d'une feuille de papier de taille 4×1 (4 carrés côte à côte) colorée en noir d'un côté et en blanc de l'autre, vous marquez quatre plis sur chaque carré, d'abord en suivant les deux diagonales, puis en suivant la verticale et l'horizontale passant par le centre. Vous joignez ensuite les deux extrémités de la bande que vous fixez avec du papier adhésif (voir la figure 5). Cela vous conduit à une sorte de cylindre à section carrée, autrement dit à une boîte cubique sans fond ni couvercle.

Le but du casse-tête est d'inverser l'intérieur et l'extérieur, en utilisant que les plis marqués avant le collage. L'opération est possible, mais n'est pas évidente. En fait, il y a deux solutions très différentes, mais aucune n'est facile (la figure 5 en propose une). Ce retournement d'un tube aussi large que haut en n'utilisant qu'un nombre fini de plis

rectilignes se généralise à des tubes aussi longs que l'on veut à condition bien sûr de faire un plus grand nombre de plis initiaux. À ma connaissance, le même problème avec non plus un tube, mais un sac (l'une des extrémités de la boîte est fermée) n'est pas résolu : peut-on retourner une surface est faite de polygones rigides reliés ? Si c'est possible, quels polygones faut-il choisir pour réussir le retournement de la boîte et quel est le détail des manipulations ? Toujours si c'est possible, quel est le nombre minimum de polygones que délimiteront les plis permettant le retournement d'une boîte à faces carrées ? La corne d'abondance des flexagones est encore pleine.

Jean-Paul DELAHAYE est professeur d'informatique à l'Univ. de Lille.

Martin GARDNER, *Flexagons*, in *Scientific American*, pp. 162-166, déc. 1956.

Les POOK, *Flexagons Inside Out*, Cambridge University Press, 2003.

Robert NEALE, *Self-Designing Tetraflexagons*, in *The Mathematician and Pie Puzzler*, Collection in Tribute to Martin Gardner, sous la direction de Iwlyn Beekamps et Tom Rodgers, A. K. Peter, Ltd, Natick, MA, 1999.

Harold MCINTOSH, *A Quick Flexagon Survey*, 2003 : <http://delta.cs.cinves.mx/~fmcintosh/oldweb/pflexagon.html>

Highland Game : <http://www.halfpast.demon.co.uk/html/tt.html>. Boutique en ligne proposant des hexagones dont (a) le hexatube nommé *Teaser* ; (b) le trihexaflexagone nommé *Crafty coaster* ; (c) le hexahexaflexagone nommé *Kaleidoscope*.

David MITCHELL, *The Magic of Flexagons*, Norfolk, England, 1998.

Escher et la double quête de l'infini

Escher parvient, par un génial tâtonnement graphique, à ses pavages infinis du plan. Il en révèle les lois aux mathématiciens et les physiciens.

Comment est-ce possible ? Comment les lézards de la gravure *De plus en plus petit* convergent-ils vers le centre, si étroitement imbriqués qu'ils recouvrent tout le plan en un tourbillon central (page ci-contre) ? C'est le grand art de M.C. Escher (1898-1972) qui combine deux caractéristiques rares, les idées géométriques incongrues et la qualité de la réalisation.

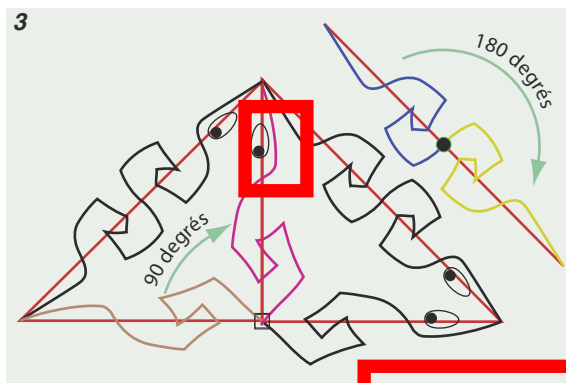
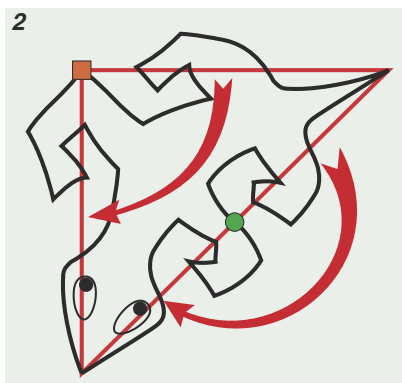
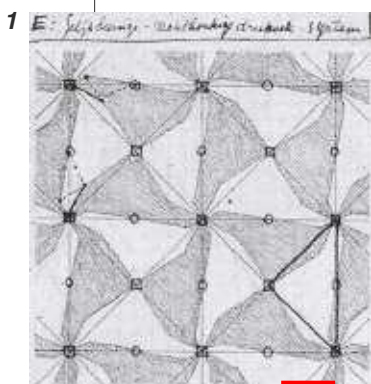
La gravure *De plus en plus petit* a une histoire qui commence en juillet 1941, à Baarn aux Pays-Bas. Escher travaille alors à l'élaboration d'un cahier résumant par l'image ce qu'il a acquis concernant les pavages, notamment par des voyages à l'Alhambra de Grenade où il a admiré les mosaïques et leurs symétries. Il représente dans son cahier le « système XE » (figure 1) composé de figures construites à partir de triangles rectangles isocèles et ayant les mêmes symétries que ces triangles : un centre de rotation de 180 degrés au milieu de l'hypoténuse et un centre de rotation de 90 degrés au sommet du triangle (pour les puristes, c'est le type isoédrique IH79 défini par B. Grünbaum et G. C. Shepard dans le livre *Tilings and Patterns*). Sur son esquisse XE sont dessinées les déformations compensées des côtés qui confèrent à la nouvelle figure en grisé la même aire que celle du triangle de base. La symétrie de 180 degrés sur l'hypoténuse fait que ce qui est en creux dans une moitié est, par rapport au côté, en relief sur l'autre moitié. Et, par la rotation de 90 degrés, le relief d'un petit côté devient un creux dans le côté tourné.

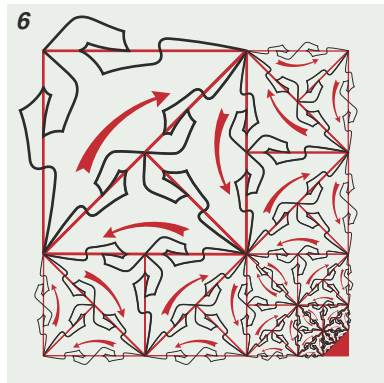
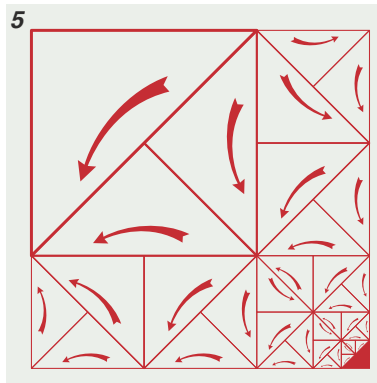
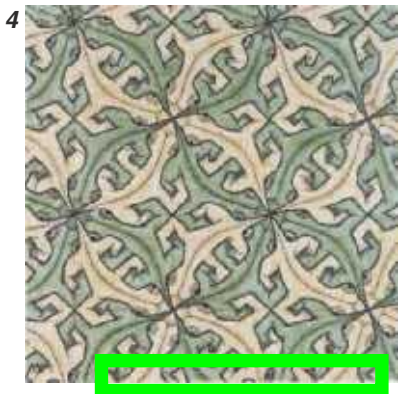
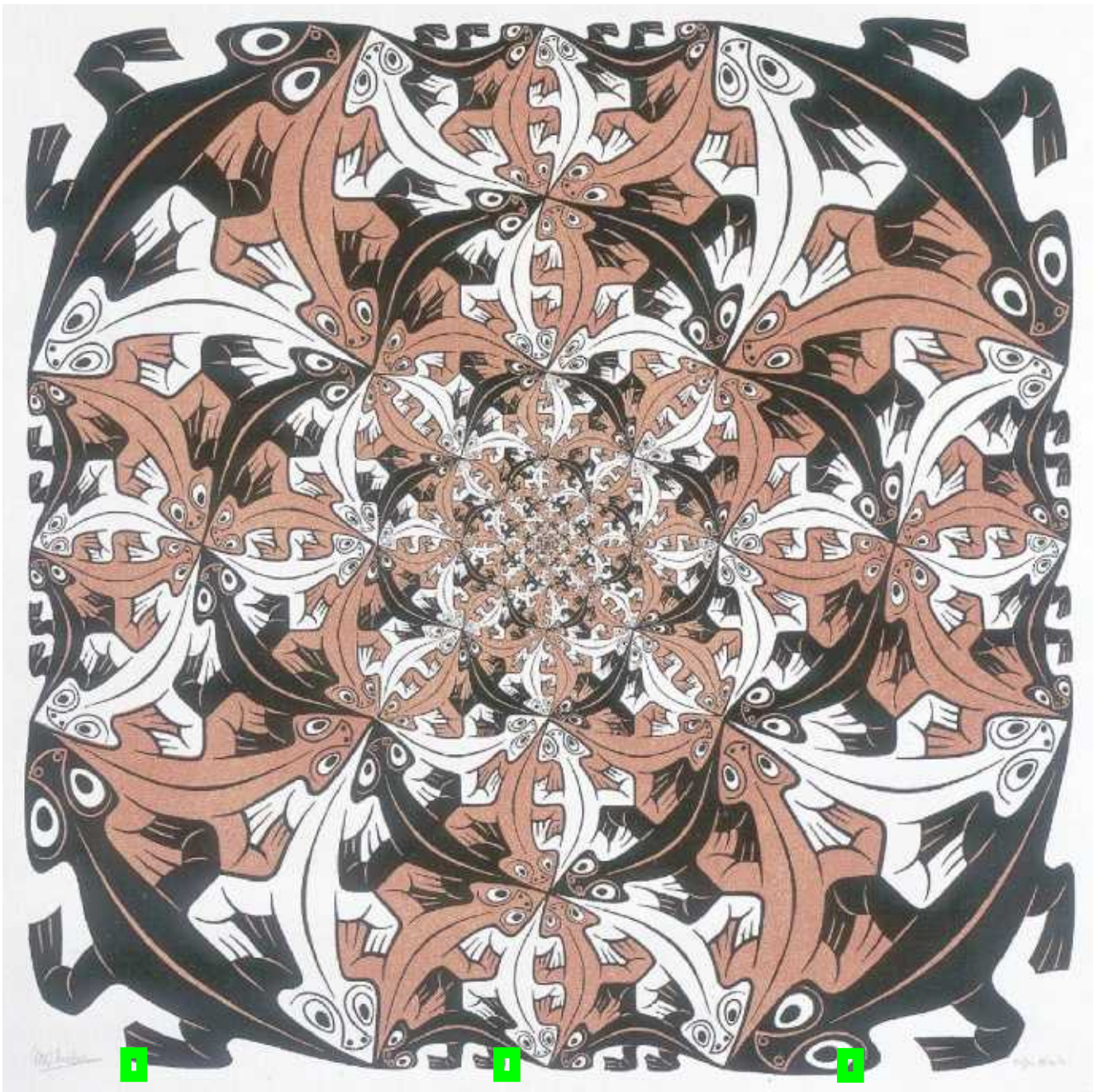
Car Escher cherche à transformer les déformations des triangles en un contour plus figuratif : il change un sévère triangle rectangle isocèle en un lézard (figure 2) et les rotations sont mieux explicitées sur la figure 3. Il dessine alors son pavage du plan par des lézards dans un autre cahier

réservé aux pavages réussis (figure 4). Sur la base de ce pavage du plan, il va réaliser un pavage « fractal », bien avant que le mot ne soit inventé. En 1956, dans sa quête de représentation de l'infini, il a l'idée d'un schéma dont l'algorithme est le suivant : un triangle rectangle isocèle engendre deux triangles adjacents plus petits (rapport 1/2) ayant chacun subi une rotation, et ainsi de suite (figure 5). Mais le triangle de base doit satisfaire de nouvelles caractéristiques, très contraignantes pour la réalisation d'un motif figuratif et Escher ne trouve pas de motif satisfaisant.

Il ne renonce pas et inverse le sens des triangles. C'est alors qu'il repense à son lézard dessiné 15 ans auparavant. Et alors, divine surprise, celui-ci peut être adapté ! Comme son contour est obligatoirement imparfait, la base de la tête, par exemple, ne peut pas être à la même hauteur de chaque côté (figure 6), et le magicien Escher va user de trucs pour rétablir la qualité du dessin. Les lézards semblent identiques, mais il n'en est rien et il dessine neuf modèles de lézards différents afin de donner à l'ensemble une forme parfaite. Ainsi a été conçue l'estampe *De plus en plus petit*. Conçue, pas créée, car Escher ne s'est jamais pris pour un créateur, mais plutôt pour un révélateur de l'ordre naturel et des lois de l'espace. Ainsi il dit dans *Openbaar kunstbezit*, en 1957 : « C'est une conception que je ressens chaque fois que j'exécute un projet de remplissage périodique d'un plan. Il me semble que ce n'est pas "moi" qui décide des formes, mais que ces simples taches sur lesquelles je me penche ont leur propre volonté, que ce sont elles qui guident le mouvement de ma main. »

Alain NICOLAS est spécialiste de la géométrie d'Escher. Son livre, *Parcelles d'infini, l'itinéraire au jardin d'Escher*, est en cours d'édition.





Fluvial ou torrentiel ?

Selon que le débit d'un cours d'eau est fort ou faible, les irrégularités du lit modèlent différemment la profondeur de l'eau et sa vitesse.

O rage d'été. En quelques heures, la paisible rivière qui serpente au fond de la gorge s'est transformée en un torrent impétueux. Le kayak qui s'y est aventuré est ballotté en tous sens. Ses deux occupants, sportifs et néanmoins curieux, s'interrogent tout en payant : pourquoi cette transition d'un écoulement de type fluvial à un écoulement torrentiel ? Simple question de débit d'eau qui augmente ? Le phénomène est plus subtil qu'il n'y paraît, et nos deux kayakistes devront éviter de se noyer dans les lois de l'hydraulique.

Tout d'abord, pourquoi une rivière coule-t-elle ? À cause de la gravité. L'eau glisse sur le lit incliné du cours d'eau. Autrement dit, la force motrice est la projection du poids de l'eau le long de la pente. Pour un fleuve tel que la Seine, la pente est très faible. La Seine descend de 471 mètres sur une longueur de 776 kilomètres, d'où une pente (tangente de l'angle) moyenne de 0,6 millièmes : ici, la force motrice agissant sur une tonne d'eau correspond à un poids de 600 grammes. L'eau n'accé-

lère cependant pas continûment. Elle garde une vitesse constante car la force motrice est contrebalancée par les frottements sur les parois du cours d'eau – surtout le fond du lit lorsque le cours d'eau est bien plus large que profond, ce que l'on supposera dans la suite. Pour des parois réelles, hétérogènes et rugueuses, l'écoulement est turbulent à leur proximité, et la force de frottement est alors proportionnelle au carré de la vitesse.

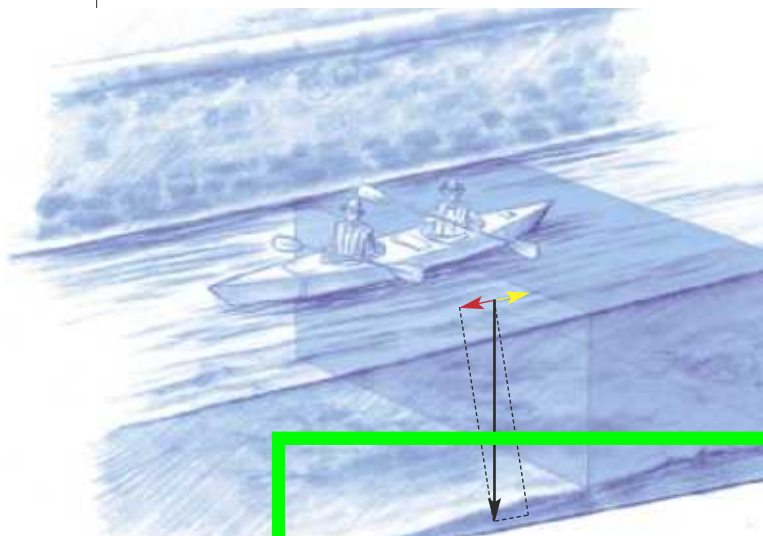
Débit, vitesse et tirant d'eau

Comment varie la vitesse avec la profondeur d'eau ? Pour le savoir, on considère une tranche du fleuve et l'on impose que son poids moteur (proportionnel à l'aire de la section (largeur $\times$ profondeur) du fleuve et à la pente) soit égal, en régime permanent, à la force de frottement (proportionnelle au carré de la vitesse et à la largeur du cours d'eau). On trouve ainsi que la vitesse est proportionnelle à la racine carrée du produit de la pente et du tirant d'eau (la profondeur d'eau). Cette formule, énoncée par l'ingénieur français Antoine Chézy en 1775, a été améliorée en 1922 pour prendre en compte le fait que la force de frottement dépend de la profondeur ; la puissance à laquelle la profondeur intervient dans l'expression de la vitesse est alors $2/3$ et non $1/2$.

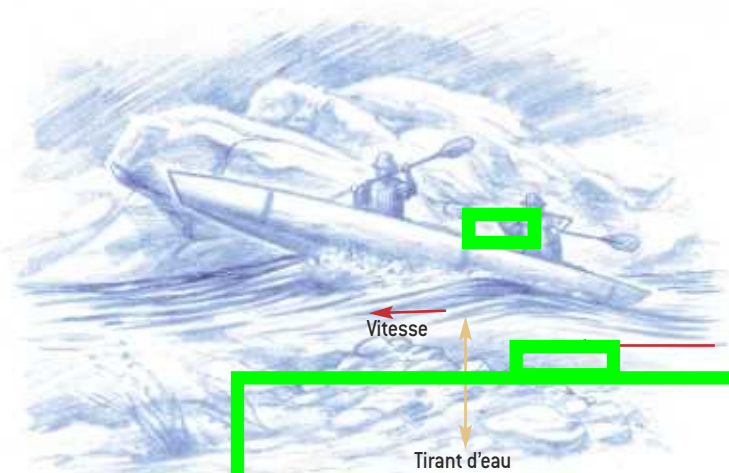
Le débit étant égal au produit de la vitesse par la section, on en déduit que le tirant d'eau croît comme la puissance $3/5$ du débit, et que la vitesse croît comme la puissance $2/5$ du débit. Autrement dit, quand le débit augmente, le tirant d'eau et la vitesse augmentent tous deux.

En pratique, le débit est fixé par le volume des précipitations et par l'étendue du bassin fluvial. Le tirant d'eau et la vitesse du fleuve s'ajustent en conséquence. Si le débit imposé par les précipitations excède le débit correspondant à un tirant d'eau égal à la profondeur du lit, c'est l'inondation. Dans le cas de la Seine, le débit peut varier d'environ 80 mètres cubes par seconde en période de fort étiage à 2600 mètres cubes par seconde en cas de crue exceptionnelle ; le tirant d'eau varie donc d'un facteur huit.

Qu'adviendrait-il du tirant d'eau et de la vitesse d'écoulement lorsque le cours d'eau est perturbé, par exemple par la présence d'une bosse au fond du lit du fleuve ? Suivons une tranche d'eau dans sa progression lors d'une telle perturbation.



1. Chaque tranche d'eau s'écoule sous l'effet de son propre poids (en noir), en raison de l'inclinaison du lit du cours d'eau. À la force motrice (en rouge) due à la gravité s'oppose une force de frottement (en jaune) due aux aspérités du fond et des parois latérales du lit. En régime permanent, ces deux forces sont égales et impliquent que quand le débit augmente, la vitesse d'écoulement et le tirant d'eau augmentent tous deux.



2. Lorsque l'écoulement est rapide, la présence d'une bosse dans le fond du lit a pour effet de diminuer la vitesse du courant à cet endroit, de la même façon qu'un cycliste en roue libre ralentit en montant une pente. Le débit étant conservé, le tirant d'eau augmente.

Si l'obstacle est petit, la dissipation d'énergie est négligeable et l'énergie de la tranche d'eau peut être considérée comme constante. C'est aussi le cas du débit, car la quantité de matière se conserve de l'amont à l'aval.

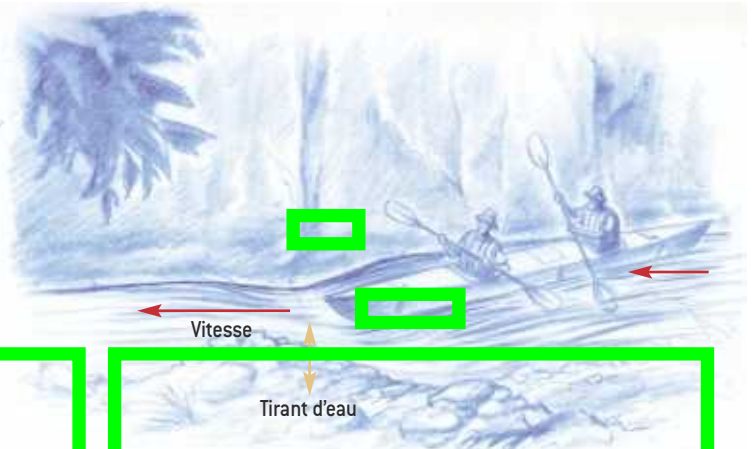
Deux cas extrêmes éclairent les comportements possibles de l'eau confrontée à un obstacle. Considérons d'abord un torrent où l'écoulement est rapide. Tout comme un cycliste franchissant une bosse en roue libre, la vitesse de l'eau va diminuer : l'énergie cinétique est convertie en énergie potentielle de gravité afin de surmonter l'obstacle. La conservation du débit entraîne une augmentation de la profondeur (en fait, l'é

Un équivalent du nombre de Mach

Pour une même bosse, plus la vitesse d'écoulement est faible, plus le ralentissement est important : il en est donc de même de la variation du tirant d'eau et, par suite, de l'énergie nécessaire au franchissement de l'obstacle. Il faut en effet « payer » l'élévation du centre de gravité de la tranche d'eau, et cette élévation s'accroît quand la vitesse diminue.

Il arrive un moment où la vitesse en amont est trop faible pour que l'énergie cinétique de la tranche d'eau compense le coût en énergie potentielle. Le comportement de l'eau change alors du tout au tout. Puisqu'il n'est pas possible de transformer assez d'énergie cinétique en énergie potentielle, c'est le contraire qui se passe. Au niveau de la bosse, le tirant d'eau diminue : le centre de gravité de la tranche d'eau s'abaisse et la diminution d'énergie potentielle est récupérée sous forme d'énergie cinétique, laquelle augmente. En conséquence, la vitesse de l'écoulement s'accroît.

On retrouve ces comportements lorsque le cours d'eau est rétréci, soit naturellement, soit par la présence des arches d'un pont : si l'écoulement est rapide, en amont, le tirant



3. Lorsque l'écoulement est lent, l'énergie cinétique n'est pas suffisante pour que l'eau s'élève complètement au-dessus de l'obstacle. Au lieu de cela, le tirant d'eau diminue à l'endroit de la bosse, ce qui crée un creux à la surface de l'eau. En revanche, l'écoulement y est accéléré.

d'eau va augmenter et la vitesse diminuer – c'est le régime torrentiel. Dans le cas contraire, le tirant d'eau diminue et la vitesse de l'écoulement s'accroît – c'est le régime fluvial.

Comment déterminer si un cours d'eau a le comportement d'un fleuve ou celui d'un torrent ? En faisant le rapport de l'énergie cinétique à l'énergie potentielle de pesanteur moyenne associée au tirant d'eau. La racine carrée de ce rapport d'énergies, nommée nombre de Froude, est égale à la vitesse de l'écoulement divisée par la racine carrée du produit du tirant d'eau par l'accélération de la pesanteur. Ce diviseur est aussi la vitesse de propagation des vagues dans l'eau. Le nombre de Froude est donc l'équivalent hydraulique du nombre de Mach pour les écoulements de gaz. Si la vitesse de l'écoulement est plus faible que la vitesse des vagues, le nombre de Froude est inférieur à un et le régime de l'écoulement est fluvial. Pour une pente plus forte, ou un débit plus important, le nombre de Froude peut dépasser l'unité : c'est l'analogue exact de la transition entre un régime subsonique et un régime supersonique dans les gaz.

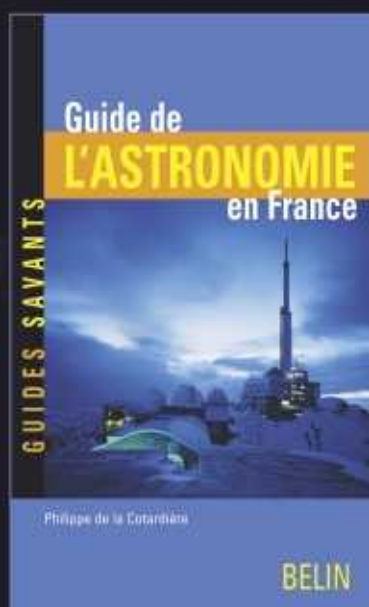
L'écoulement dans un caniveau au fond irrégulier illustre cela. En régime fluvial, la surface est à peine ridée. En régime torrentiel, en revanche, il apparaît un sillage – de même nature que le sillage sonore des avions supersoniques. Les vagues lettes créées par l'obstacle se propagent et sont emportées par le courant, ce qui dessine des lignes diagonales dans l'écoulement ; ces structures sont analogues au cône de Mach créé dans l'air par les avions qui dépassent le mur du son.

W. H. GRAF et M. S. ALTINAKAR, *Hydraulique fluviale*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2000.

Blog des auteurs : <http://faustroll.free.fr/blog/>

La collection **GUIDES SAVANTS** est et vise à découvrir les **trésors de la France** et de ses

Les index en fin d'ouvrage permettent de retrouver rapidement un personnage, un lieu, un musée, etc.



Quel est le plus ancien **observatoire astronomique**? Où peut-on observer le **ciel** avec

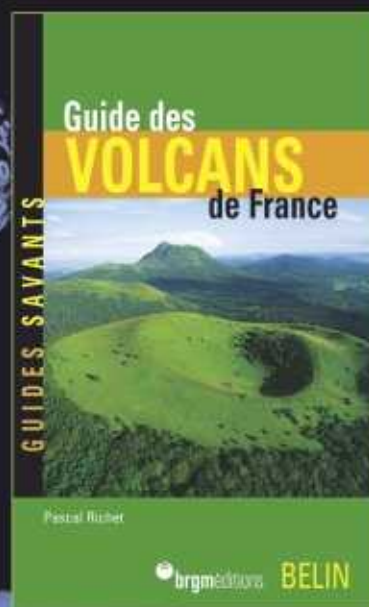
les meilleurs spécialistes? Comment lire l'heure sur un **cadran solaire**? Où acheter du **matériel d'observation**? Comment participer aux nombreuses manifestations et **festivals d'astronomie** organisés chaque année?

Découvrez dans ce guide les «trésors» de l'astronomie en France: instruments anciens, cadrans solaires, horloges astronomiques, mais aussi grands savants, associations d'amateurs, musées, etc. Une façon originale de voyager à travers l'astronomie d'hier et d'aujourd'hui.

Philippe de la Cotardière

496 pages

Prix: 29,90 €



Des **laves** vieilles de plus de **deux milliards d'années**, des volcans qui dépassèrent

3 000 m de hauteur, des **dômes** et des **cônes** peut-être prêts à reprendre du service... De la **Bretagne** au **Cantal**, les volcans animent l'actuel territoire français depuis des **temps immémoriaux**.

Par une description de 200 sites connus ou méconnus, ce guide illustre la richesse d'un patrimoine dont l'intérêt n'est pas que géologique: volcans et vestiges volcaniques y voisinent avec des sites curieux, des vieux villages et des églises romanes polychromes.

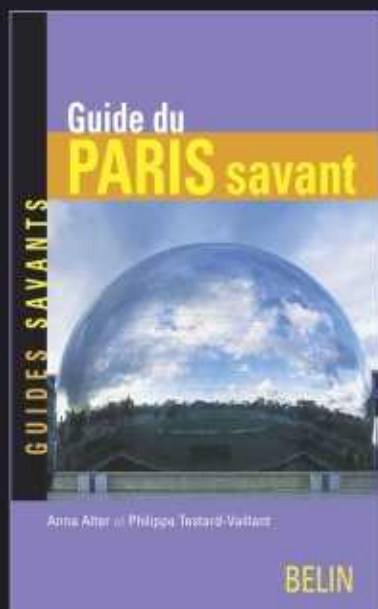
Pascal Richet

428 pages

Prix: 25,90 €



abondamment illustrée,
régions.



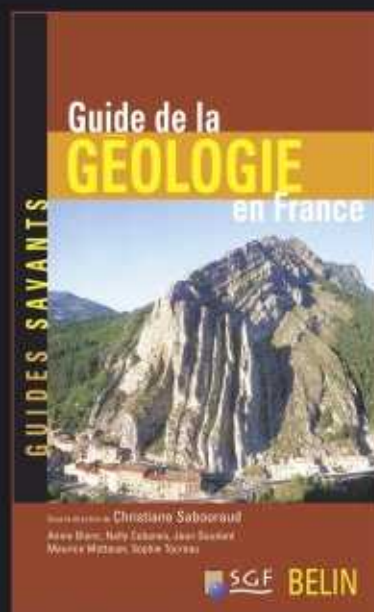
Combien de **savants** ont une **rue** dans Paris? D'où observer le **ciel**? Sur quels monuments nichent des **faucons**? Quels **musées** de sciences ou de médecine visiter? D'où s'est envolée la première **mont-golfière**?

Ce livre propose une balade dans l'espace et dans le temps du Paris savant. Hommes et femmes émaillant de leur nom les plaques de rues, richesses cachées des musées, curiosités naturelles, hauts lieux de la science, statues et monuments célèbres... sont décrits dans ce guide avec anecdotes et humour.

Anna Alter et Philippe Testard-Vaillant

648 pages

Prix : 25,90 €



Où observer des **fonds océaniques** au sommet d'une montagne? Quel est le point commun entre

l'**Himalaya** et la **côte bretonne**? Pourquoi les **sculptures** d'un cloître roman évoquent-elles une plage?

Ce livre répond à toutes ces questions et à bien d'autres. Sites naturels, musées, sentiers à thèmes, réserves géologiques... Quelque 2000 lieux à découvrir sont présentés. Avec ce Guide, découvrez une image vivante de la géologie et portez un regard nouveau sur les paysages qui nous entourent.

Sous la direction de Christiane Sabouraud

816 pages

Prix : 29,90 €

BELIN

Bon de commande Livres

À retourner à: **Pour la science – livres**
BP2 – 28410 Saint-Lubin de la Haye

	Code	Prix à l'unité	Quantité	Prix total
Guide de l'astronomie en France	002323	29,90 €		
Guide des volcans de France	003382	25,90 €		
Guide du Paris savant	003582	25,90 €		
Guide de la géologie en France	002680	29,90 €		
Participation aux frais de port :				
France: 4,90 € - Offerts à partir de 30 € de commande				
Étranger: 12 € - Offerts à partir de 50 € de commande				
TOTAL COMMANDE				

Mes coordonnées:

Nom: _____

Prénom: _____

Adresse: _____

Code postal: _____ Ville: _____

Pays: _____

Je règle par:

☐ Chèque ci-joint à l'ordre de **Pour la science**

☐ Carte bancaire

Numéro de la carte: _____

_____*

Signature obligatoire

Date d'expiration

_____*

** Inscrire les 3 derniers chiffres de la série de 7 figurant au dos de votre carte dans la barde où figure votre signature.

En application de l'article 27 de la loi du 6 janvier 1978, les informations ci-dessus sont destinées au traitement de votre commande. Elles peuvent être communiquées à l'éditeur du droit d'accès et de rectification auprès de Pour la science. Pour votre information, vous pouvez être amené à recevoir des propositions d'autres organismes. En cas de refus de votre part, il vous suffit de nous prévenir par simple courrier.

20007674

Analyses de livres

Philosophie des sciences

Les matérialismes (et leurs détracteurs)

Jean Dubessy, Guillaume Lecomte et Marc Silberstein
(728 pages, 33 euros), Synergie, 2014.

La science est l'une des œuvres les plus enthousiasmantes de l'humanité. Or les connaissances qu'elle accumule sont toutes le résultat d'une unique option philosophique : le matérialisme. Qu'est-ce exactement ? Tout simplement l'acceptation du fait que l'univers est fait de matière, et qu'il suffit pour expliquer tout phénomène de se reporter à cette matière.

Aujourd'hui, peu de scientifiques s'intéressent aux querelles philosophiques. Tel Monsieur Jourdain faisant de la prose sans le savoir, ils agissent en matérialistes sans s'en rendre compte. Pour tant, en dernière analyse, c'est bien la matière et toujours la matière qui sanctionne leurs hypothèses.

Les auteurs de cet ouvrage sont des matérialistes militants. Plusieurs d'entre eux sont connus pour s'être attelés à la tâche ingrate de combattre les idées antimatérialistes lorsqu'elles tentent de s'introduire dans les sciences. Ce livre se place dans la continuité de cette démarche et tous ceux pour qui la rigueur scientifique n'est pas une vaine expression se sentiront solidaires de l'effort qu'il traduit. Il faut par exemple rendre hommage à la détermination du sociologue Bernard Lahire, qui a lu les 900 pages de la thèse de l'astrologue Éliane Tessier pour faire clairement apparaître pourquoi ce texte ne saurait être une contribution à la science sociologique.

Au-delà de cette dénonciation critique des antimatérialistes qui tentent d'occuper le terrain scientifique, ce livre est essentiel parce qu'il met à jour les idées matérialistes à la lumière des connaissances scientifiques actuelles. Enfin !

Voyons comment : le matérialisme actuel est un matérialisme émergentiste. Il suppose que l'on peut observer la matière à différents niveaux d'intégration et expliquer ses caractéristiques à un niveau d'intégration donné par l'émergence de propriétés nouvelles, dues à l'activité qui règne aux niveaux

inférieurs à celui considéré. Ce phénomène dit d'émergence rend la matière capable de produire du « nouveau » sans être « programmée » pour cela.

En biologie, cette vision se nomme non-spécificité. Les cellules d'un organe ne vivent que pour elles-mêmes, et cela leur suffit pour former, ensemble, l'organe. De même, l'organe vit pour lui-même, mais permet au corps d'y trouver son compte. La non-spécificité ne se satisfait pas du déterminisme absolu de la biologie moléculaire qui fait correspondre mécaniquement un brin d'ADN à une protéine et une fonction, et qui semble ainsi affirmer que la vie est inscrite dans un programme. Le matérialisme de la non-spécificité échappe à cette impasse, car il considère qu'à partir du niveau cellulaire, chaque objet du vivant est soumis à la sélection darwinienne. Dès lors, le patrimoine génétique est une contrainte parmi d'autres : tandis que

le hasard fournit l'espace des possibles, la sélection favorise la descendance des plus adaptés.

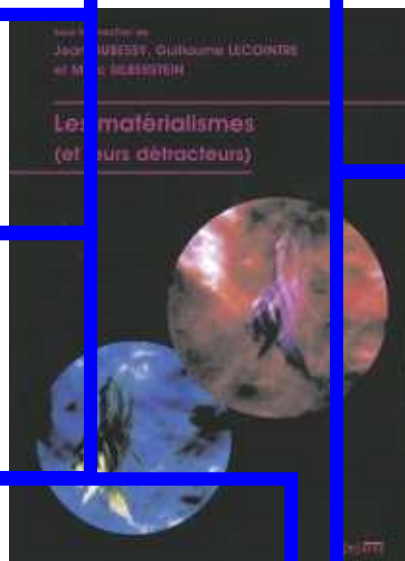
Le matérialisme de la non-spécificité remet en cause le déterminisme de la biologie moléculaire. Avec lui, le hasard est devenu l'un des facteurs de l'évolution. Démontrant que rien n'est inscrit, il fait fi de la téléologie (doctrine suivant laquelle le monde obéit à une finalité) comme de la téléonomie (propriété qu'a la matière vivante de matérialiser une finalité) et confère même à

la matière une possibilité chère aux êtres humains : la liberté.

Pour autant, cette remise en cause du déterminisme de la biologie moléculaire ou d'ailleurs de celui de la physique classique n'implique pas le rejet de tout déterminisme par les matérialistes. Les physiciens, par exemple, défendent un déterminisme distinct du concept de prévisibilité : les lois de la physique restent déterministes, mais cela ne signifie pas que tout événement est prévisible.

Telle est la philosophie actuelle et bien vivante, le matérialisme a une longue histoire. Il y a 25 siècles, il permit déjà à Démocrite d'imaginer une matière constituée d'éléments insécables, dont l'étude devait suffire pour comprendre le monde. Aujourd'hui, certains antimatérialistes peignent délibérément la théorie matérialiste sous des couleurs vulgaires afin de la faire confondre avec la simple avidité matérialiste. Pourtant, le matérialisme contient une vision grandiose de la matière, de par sa propre activité, s'est rendue capable de se penser elle-même ! C'est à ce point de vue vertigineux que l'on nous convie ici avec bonheur.

Bernard Deffarges, IRIST,
Université Louis Pasteur, Strasbourg



Histoire des sciences

Sciences pour tous :

Daniel Halévy (128 pages, 11,66 euros)
Gallimard, 2005.

Le principe de la collection « Découvertes » de Gallimard est de faire le point sur un sujet en l'illustrant abondamment. C'est ce que réussit parfaitement cet ouvrage : l'iconographie est superbe. Il faut dire que le sujet s'y prête bien : l'auteur retrace l'histoire de la diffusion de la culture scientifique et de la science.

Avant le XVIII^e siècle, la science reste confinée à un cénacle, même si les cabinets de curiosités permettent aux nobles de s'amuser au contact des savants. Seule une très petite minorité a alors accès aux études scientifiques, ce que la Révolution va profondément changer ; on prend alors conscience que la science n'est pas seulement un amusement et qu'elle peut durablement modifier la vie des hommes en la rendant meilleure. Le XIX^e siècle est celui de la vulgarisation : la science devient populaire, témoin Camille Flammarion et son *Astronomie populaire*. Les revues scientifiques prolifèrent et dès l'école primaire, on enseigne la science

désormais considérée comme faisant partie du bagage culturel indispensable. Les expositions universelles, les jeux scientifiques, les romans – tels ceux de Jules Verne –, puis la presse, la radio, etc., contribuent à rendre les sciences accessibles à tous et plus seulement à une élite. La fondation en 1937 du Palais de la découverte, puis du CNRS, illustre l'importance accordée alors par les dirigeants politiques à l'idée que la France devait se doter d'une recherche scientifique moderne et le citoyen y participer. L'auteur rappelle utilement le rôle dans le partage et la popularisation des connaissances qu'ont joué par la suite la télévision, la Fête de la science, etc. ; mais il fait aussi état des mensonges des scientifiques, sans oublier la désaffection des jeunes pour les sciences.

Pour autant, il ne faut pas croire un catalogue ! L'auteur brosses sans fioritures l'évolution de la diffusion du savoir scientifique. C'est après l'avoir lu que l'on comprend le point d'interrogation du titre...

Pour terminer, sachez que j'ai failli mourir de rire en relisant ce texte que Pierre Desproges écrivait à l'occasion du prix Nobel que Sakharov obtint en 1975. La vulgarisation, c'est cela aussi !

Denis Savoie, Palais de la découverte, Paris

Zoologie

À la rencontre des animaux disparus

Georges Claibon, dessins de Jean-Marc L'Anselme
(143 pages, 25 euros), Flammarion, 2004.

Voici un livre qui interpelle : à l'heure où l'homme s'interroge sur la durabilité et le caractère renouvelable des ressources naturelles qu'il exploite, l'érosion de la biodiversité est indéniablement un brûlant sujet d'actualité. Le rôle direct ou indirect, avéré, inféré ou supputé, de l'homme dans la raréfaction, voire trop souvent la disparition des espèces animales et végétales, suscite encore bien des discussions. Certes l'évolution biologique naturelle inclut des spéciations et des extinctions, mais force est de reconnaître que si l'homme n'agit pas sur le rythme des naissances d'espèces, en revanche il accélère celui des disparitions. Sans verser dans un catastrophisme pessimiste, nous devons tout de même reconnaître que l'homme contribue à minimiser cet état de fait. Il est donc utile et nécessaire que des voix s'élèvent pour tirer la sonnette d'alarme pendant qu'il en est encore temps.

C'est pourquoi cet ouvrage, qui n'est certes ni exhaustif, est utile et bienvenu pour dénoncer l'anthropisation de la nature et ses effets délétères sur les populations, les espèces et les communautés animales et végétales. Si une minorité des

espèces dont il traite (tels le dodo, le pigeon migrateur, les moas, le grand pingouin, la rythine de steller, le couagga, l'hippopotame bleu ou le tapacou) ont effectivement disparu, les autres sont en cours d'extinction en quasi-totalité réellement menacées d'extinction à plus ou moins court terme si des volontés politiques ne sont pas clairement affichées et surtout mises en application. Agréables à lire, les textes décrivent une centaine d'animaux (mammifères, oiseaux et reptiles) et apportent des informations sur l'historique de leur découverte et de l'évolution de leurs populations, sur leur mode de vie et surtout sur les raisons qui ont conduit à leur déclin, notamment les exactions commises par l'homme dans son exploitation de la nature ou simplement la satisfaction de plaisirs contestables. Les illustrations sont excellentes. Voilà un court plaidoyer que bien des lecteurs non spécialistes consulteront avec intérêt, qui en incitera beaucoup à chercher à en savoir plus (une petite bibliographie eût été ici utile) et qui n'aurait pas dû s'arrêter à s'engager avec plus de conviction dans la réflexion sur la biodiversité et l'usage des espaces et des espèces.

Christian Énard, Muséum national d'histoire naturelle, Paris



Le dico miction

Sciences de la vie et de la terre

Gilles Macagno (240 pages, 9,50 euros)
Ellipses, 2005.

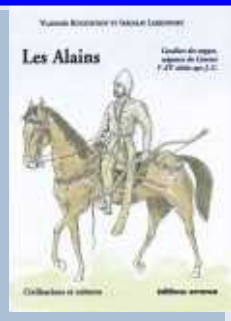
La miction, c'est-à-dire l'expulsion de l'urine accumulée dans la vessie, devient avec ce dictionnaire « la façon correcte de dire que l'on fait pipi ». Rédigées dans un français simple, voire parlé, les autres définitions sont à l'avenant. Et pourquoi pas ? Le professeur qui a besoin de se rafraîchir la mémoire

Et tous seront amusés par les définitions humoristiques mais informatives et par des pointes d'humour, qui sont autant d'incitations à pratiquer les sciences de façon concrète et vivante. Bref, un dico sans prétention. Comme nous !

Les Alains

Vladimir Kouznetzov et Iaroslav Lebedinsky
(280 pages, 28 euros), Errance, 2005.

Peuple nomade de langue iranienne, les Alains furent des acteurs majeurs des grandes invasions, tout particulièrement dans les Gaules. Dans notre pays, un phénomène, nombre de toponymes et d'épisodes rappellent la présence et le rôle méconnus de ces envahisseurs vite devenus les « Alains de Gaule ». Toutefois, d'autres Alains se sont aussi fixés en grand nombre dans le Caucase du Nord, où ils ont fondé un puissant royaume qui ne disparut que sous la pression mongole au XIV^e siècle. Un petit noyau de leurs descendants subsiste aujourd'hui en Russie. C'est l'histoire de ce peuple et des diverses cultures qui viennent nous raconter ici Iaroslav Lebedinsky, un fin connaisseur de l'histoire et de l'archéologie ossètes.



Roches et fossiles - Guide visuel

Robert Coenraads (304 pages, 35 euros)
Sélection du Reader's Digest, 2005.

Ceci n'est pas un livre de science : c'est un « beau livre », mais un « beau livre » vraiment beau ! D'image en image, il témoigne de l'histoire de la Terre en replaçant chaque image dans son contexte géologique ou géographique. Après une brève histoire géologique de la Terre,

il fait la liaison entre les roches, les fossiles et les minéraux des époques géologiques. Sur ces bases, les roches, les fossiles et les minéraux sont évoqués en 1 000 images qui fascineront tant le connaisseur que l'enfant encore peu féru de science.



Histoire de la Rome antique

Les armes et les mots

Lucien Jerphagnon, (620 pages, 10,80 euros)
Hachette, 2005.

Cette somme ne se lit pas comme un roman, mais elle est aussi passionnante qu'un bon roman. Quel talent chez l'auteur pour évoquer les nombreux personnages hauts en couleur et forts de caractère qui ont tissé la longue histoire de Rome ! Avec précision, Lucien Jerphagnon décrit règnes et actions militaires et nous avertit avec patience des anachronismes et des préjugés chrétiens ou modernes qui déforment l'histoire. S'il ne décrit pas la vie quotidienne, sa présentation de la vie intellectuelle de chaque époque est précieuse, car on y reconnaît tous les fondements de notre culture.



Hydrologie

Les eaux souterraines

Jean-Jacques Collin

(168 pages, 38 euros), Hermann, 2004.

Les eaux souterraines suscitaient bien des interrogations et croyances. Des savants, comme Descartes, ont ainsi échafaudé à leur sujet des théories qui nous font sourire aujourd'hui. Parce que l'eau est désormais l'affaire de chacun de nous, et parce que l'ignorance est mère de tous les maux, Jean-Jacques Collin prend le parti de nous faire connaître la vraie nature des chemins cachés de l'eau.

Le ton est vite donné : « À l'heure où l'on débat sur l'allocation des programmes scolaires, tout en voulant restaurer certaines valeurs de l'ancienne instruction civique, le thème de l'eau est extrêmement fédérateur ; il favorise l'acquisition des bases d'une morale collective fondée sur une compréhension personnelle des déterminismes qui relient nos actions et leurs conséquences sur l'environnement » (sic). J.-J. Collin se veut donc pédagogue. Il nous fait partager les connaissances acquises au cours de sa vie d'hydrologue et souhaite qu'elles nous fassent adopter un comportement citoyen en matière d'usage et de protection d'une ressource, dont la fraction souterraine est vitale pour les activités humaines et la biodiversité.

Ce souci pédagogique se confirme dans le premier chapitre qui décrit de façon claire les caractéristiques des eaux souterraines, leurs gisements et leurs mécanismes d'alimentation et d'écoulement. Le propos est illustré de croquis à l'ancienne, aux couleurs vives, rappelant les « leçons de choses » d'autrefois. Le second chapitre, « Connaissances et informations nécessaires pour l'exploitation et la gestion » est certes plus technique, mais il évite le jargon des spécialistes. J.-J. Collin y expose, *in fine*, son opinion quant à la nature socio-économique de l'eau : « L'eau n'est pas une marchandise... l'eau, en tant que matière première, ne saurait faire l'objet d'un marché concurrentiel. » Il aborde ensuite avec mesure, et un certain optimisme, des thèmes qui font aujourd'hui l'objet de vifs débats : gravières, déchets, eaux minérales, aménagement du territoire, pollutions, autant de sujets polémiques que J.-J. Collin expose à la lumière d'une longue expérience.

L'ouvrage n'est ni exhaustif ni encyclopédique. Il vise à susciter de l'intérêt pour l'hydrologie dans le public. Il est éducatif au sens d'Aristophane qui indiquait qu'« enseigner ce n'est pas remplir une boîte, mais allumer une bougie ». Enseignants, étudiants, responsables politiques et techniques, y trouveront informations et envie d'en savoir plus.

Michel Desbordes, École polytechnique université de Montpellier



Histoire des sciences

Histoire des sciences de l'Antiquité à nos jours

Philippe de La Cotardière

(sous la direction de)
(660 pages, 32 euros)

Tallandier, 2004.

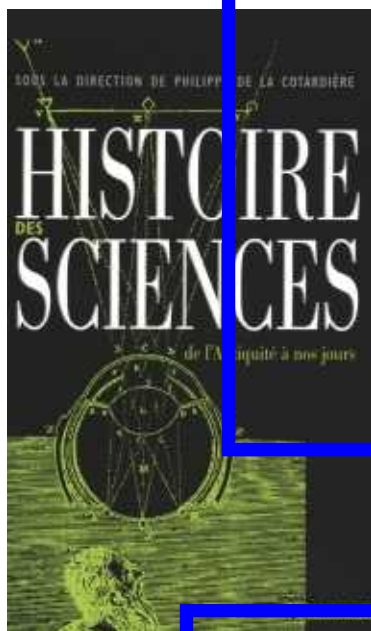
Pour une histoire générale des sciences de l'Antiquité à nos jours nécessite de faire des choix. Ceux qui ont été faits ici sont heureux, ce qui produit un ouvrage clair et synthétique. Les auteurs, tous de formation scientifique, exposent la succession des faits et des théories qui ont fait la science au cours des âges, en respectant la classification traditionnelle des disciplines : mathématiques, physique, astronomie, chimie, sciences de la Terre et sciences de la vie. À l'intérieur de chaque chapitre, ils ont privilégié l'information utile pour comprendre la succession des découvertes. Des schémas simples élaient les notions évoquées, ce qui permet une économie de texte. Enrichissement notable, chaque chapitre se termine par une conclusion qui met en relief en quelques lignes l'essentiel de l'évolution de la discipline, ou des perspectives en forme d'actualité. Le découpage chronologique qui structure chaque chapitre guide vers l'essentiel. Le chapitre *Sciences de la Terre* fait exception, car pour des raisons évidentes de clarté, on préfère y procéder par thèmes et proposer une histoire du globe.

À l'heure où les choix scientifiques font débat dans la société civile, ce livre permet à un esprit curieux de s'informer rapidement sur le devenir de chaque science, et de comprendre les interactions disciplinaires partout présentes aujourd'hui.

C'est un livre à poser sur la table du salon, à feuilleter à la demande, au cours d'une conversation, ou bien à lire dans le silence pour une première approche de l'histoire des sciences, avant un approfondissement possible grâce à la bibliographie indicative jointe. C'est aussi un livre que l'on peut recommander aux lycéens et aux étudiants, et qui leur permettra à la fois de mieux comprendre l'enseignement scientifique qu'ils reçoivent et d'acquiescer une culture scientifique véritable, c'est-à-dire non ignorante de l'histoire des sciences.

ter à la demande, au cours d'une conversation, ou bien à lire dans le silence pour une première approche de l'histoire des sciences, avant un approfondissement possible grâce à la bibliographie indicative jointe. C'est aussi un livre que l'on peut recommander aux lycéens et aux étudiants, et qui leur permettra à la fois de mieux comprendre l'enseignement scientifique qu'ils reçoivent et d'acquiescer une culture scientifique véritable, c'est-à-dire non ignorante de l'histoire des sciences.

Danielle Fauque,
Lycée Stanislas et GHDSO,
Université d'Orsay



Et aussi...

Guides et traces des indices d'oiseaux

Roy Brown, John Ferguson, Michael Lawrence et David Lees
(333 pages, 29 euros), Delachaux et Niestlé, 2005.



Tous les indices laissés par la gent à plumes sont dans ce livre. Mille photographies et dessins les montrent et les commentent. L'index facilite l'exploitation de cette mine d'informations. Des illustrations originales et des cartes complètent les titres et les pages. Un compagnon de promenade bienvenu pour tous les amateurs d'oiseaux.

Manuel pratique de nutrition

Jacques Médart (288 pages, 55 euros), De Boeck, 2005.

Les « oméga-3 » sont mis à toutes les sauces, mais supportent-ils la cuisson ? Plus généralement, comment les matières grasses résistent-elles à la chaleur de la flamme ? Qu'est-ce qu'un antioxydant et convient-il d'en absorber des doses supplémentaires ? Si vous voulez vous y retrouver dans ce dédale, pourquoi ne pas poser la nutrition sur ses bases scientifiques ? C'est ce que fait ce livre. À la fois facile à lire et très précis, il propose des conseils pratiques et des données scientifiques. À la fin, une série de cas cliniques bien choisis illustre ce que peut accomplir la médecine nutritionnelle bien conduite.



La contrepèterie

Joël Martin (126 pages, 7,60 euros), PUF, 2005.

Dans l'art de la contrepèterie, le recordman français, Joël Martin, est champion du monde. Le monde anglo-saxon prétend que la contrepèterie commence avec le révérend William Archibald Spooner au XIX^e siècle : A lack of pies ! Comme vous le lirez dans le livre de J. Martin, la contrepèterie est née au XVI^e siècle avec la femme folle à la messe de Rabelais. Le tour de force de l'auteur est remarquable : il retrace l'histoire de la contrepèterie avec un texte fait de contrepèteries. Lisez cet enchantement. Le terme magicien du verbe étant galvaudé, nous préférons multiplier Joël Martin d'équivalents.

salace (ne cherchez pas là de contrepèterie, il n'y

en pas : c'est un canard gras). Quels rapports avec la science ? Nombreux : J. Martin est physicien... et acousticien dans l'art de décaler les sons.

The story of Space Station Mir

David Harland (424 pages en anglais, 31,60 euros)
Springer Verlag, 2005.

En comparaison avec la *Station spatiale internationale*, *Mir* a eu un mini-prix, mais a fait le maximum ! Sans la station spatiale soviétique, l'expérience nécessaire pour monter, maintenir et occuper la *Station spatiale internationale* (ISS) n'aurait pas été possible. Pour mettre la chose en évidence, l'auteur raconte l'ensemble des missions *Mir*, décrivant en détail les situations les plus périlleuses et par là les plus riches d'enseignements pour la *Station spatiale internationale*. Il explique aussi la construction de la station soviétique, puis sa progressive transformation en un laboratoire de recherche international.



Biologie

Le grand livre de la bactérie

Martine Castello et Vahé Zartarian
[218 pages, 16 euros], Albin Michel, 2005.

Le monde bactérien est communicatif. L'objectif poursuivi est de nous convaincre que les bactéries, longtemps ignorées et toujours méconnues, méritent notre intérêt pour de multiples raisons. En effet, elles contribuent de façon majeure au fonctionnement de la biosphère. Grâce à leur incroyable diversité et à leurs capacités métaboliques très variées, elles peuvent coloniser les milieux les plus divers, y compris ceux qui sont hostiles à la vie. Les bactéries jouent ainsi un rôle déterminant dans les cycles biogéochimiques (cycle du carbone, de l'azote, du soufre, etc.), sans lesquels il n'y aurait pas de vie terrestre. Leur activité au cours des temps géologiques a largement contribué à façonner la Terre telle que nous la connaissons actuellement, en particulier la composition de son atmosphère et celle de ses sols.

Plus anciennes formes de vie identifiées sur Terre, les bactéries ont aussi participé de façon essentielle à l'évolution de la vie. Sans elles, l'apparition d'êtres vivants multicellulaires de plus en plus complexes, tels les plantes, les animaux et l'homme, ne se serait pas produite. Leur rôle dans cette apparition a notamment impliqué le développement d'associations à bénéfice mutuel. Ces symbioses entre les bactéries

et les organismes dont les cellules possèdent un noyau – les eucaryotes – ont permis à ces derniers d'acquérir de nouvelles capacités métaboliques (respiration, photosynthèse, fixation de l'azote, etc.). Enfin, les bactéries nous concernent aussi par leurs nombreux effets bénéfiques ou nocifs sur notre santé.

Tous ces aspects sont développés de façon vivante à partir d'exemples très intéressants. Le texte est parfaitement informé, sauf dans le chapitre sur l'origine de la vie, qui contient quelques erreurs : l'ADN, au contraire des protéines, n'est pas constitué d'acides aminés ; l'adénine s'associe à la thymine et pas à la guanine ; le séquençage d'un génome n'est pas limité aux fragments d'ADN codant pour des protéines. Les auteurs évoquent avec bonheur nombre de débats entre chercheurs, notamment sur des sujets aux frontières de la connaissance tels que les nanobactéries ou la vie extraterrestre. Au sein de paragraphes placés en fin de chapitre et intitulés « à quoi cela nous fait réfléchir », ils traitent également des conséquences sociales et philosophiques des découvertes scientifiques. Ces réflexions nous laissent tantôt approbateurs (les mises en garde sur les effets climatiques des activités humaines), parfois dubitatifs (la théorie des champs morphogénétiques de R. Sheldrake) ou même un peu irrités (« l'énormité des dépenses dans le secteur médical prouve que nos sociétés ne sont pas en bonne santé... »), mais toujours désireux d'approfondir les intéressants thèmes soulevés. Malgré ses quelques imperfections, ce livre est une stimulante introduction au monde bactérien.

Frédéric Debellé, Laboratoire des interactions
plantes micro-organismes, INRA-CNRS, Toulouse



SCIENCE

8, rue Férou 75278 PARIS CEDEX 06 • Tél : 01-55-42-84-00 • www.pourlascience.com
Commande de dossiers ou de magazines : 08-92-68-11-40

POUR LA SCIENCE

Directeur de la rédaction : Philippe Boulanger
Rédactrice en chef : Françoise Pétry
Rédacteurs en chef adjoints : Maurice Mashaal, Loïc Mangin
Rédacteurs : ...

Pour la Science : François Savatier, Philippe Ribeau-Gesippe, Mathieu Grisson.

Dossiers Pour la Science : Loïc Mangin

Génies de la Science : Marie-Neige Cordonnier

Cerveau & Psycho : Sébastien Bohler

Directrice artistique : Céline Lapert.
Secrétariat de rédaction/Maquette : Annie Tacquenot, Sylvie Sobelman, Pauline Bilbault, Raphaël Queruel.

Site Internet : David Martin. Marketing et Publicité : Emmanuel Fouquet, assisté de Stéphanie de Faucomberge.

Direction financière : Anne Gusdorf.

Direction du personnel : Jean-Benoît Boutry.

Fabrication : Jérôme Jalabert, assisté de Christine de La Rochère.

Presse et communication : Susan Mackie.

Directeur de la publication et Gérant : Marie-Claude Brossollet

Conseiller scientifique : ...

Ont également participé à ce numéro : Bruno Chaume, Jacques Cosnier, Francesco d'Errico, Marie-Thérèse Landousy, Mustapha Meghraoui, Philippe Menasché, Gilles Nogues, Christophe Pichon, Michel Tranter.

SCIENTIFIC AMERICAN Editor: John Rennie. Board of editors: Mariette DiChristina, Ricky Rusting, Philip Yam, Gary Stix, Michelle Press, Wayt Gibbs, Mark Alpert, Steven Ashley, Graham Collins, Steve Mirsky, George Musser, Christine Soares. Chairman Emeritus: John Hanley. Chairman: John Sargent. President and Chief Executive Officer: Gretchen T...

PUBLICITÉ France

Directeur de la Publicité : Jean-François Guillotin (jf.guillotin@pourlascience.fr), assisté de Catherine Teissier.
Tél. : 01 55 42 84 28 ou 01 55 42 84 97 • Télécopieur : 01 43 25 18 29

SERVICE ABONNEMENTS

Ginette Barrillon : Tél. : 01 55 42 84 04.

DIFFUSION DE POUR LA SCIENCE

Canada : Épipresse : 945, avenue Beaumont, Montréal, Québec H3T 1W3 Canada.

Suisse : Servilis : Chemin des châlets, 1979 Chavannes - 2 - Bogis Belgique : La Caravelle : 303, rue du Pré-aux-oies - 1130 Bruxelles.

Autres pays : Éditions Belin : 8, rue Férou - 75278 Paris Cedex 06.

Toutes commandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou étranger, de documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientif...

América », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressés par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 8, rue Férou, 75278 Paris Cedex 06.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific America » ont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à la Société d'édition...

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20, rue des...