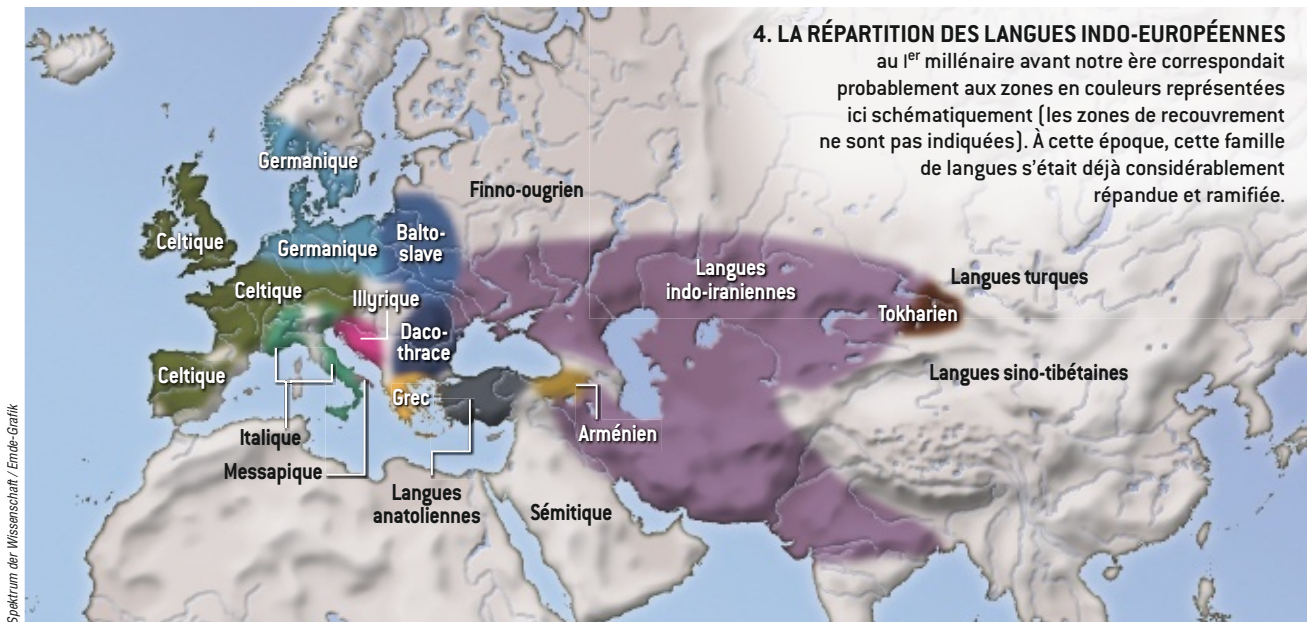




Hittites commencèrent à y écrire, ils ont immortalisé, en même temps que leur propre langue indo-européenne, celle de l'État de leurs prédécesseurs Hatti, dont ils ont adopté la culture et la capitale. Cette langue n'était certainement pas indo-européenne. Il n'est donc nullement établi que les premiers agriculteurs d'Anatolie ou de Grèce aient été des Indo-Européens.

Un arbre très ramifié il y a près de 6 000 ans

Ainsi, l'arbre auquel sont parvenus R. Gray et Q. Atkinson, avec ses dates, est certes compatible avec la thèse selon laquelle l'indo-européen est arrivé en Europe avec l'agriculture, mais il ne peut la prouver.

L'arbre contient en revanche une autre date qui captive les chercheurs. Outre les langues disparues ou isolées comme le hittite ou le grec, il fixe aussi l'origine des grandes familles de langues indo-européennes : l'indo-iranien, le balte, le slave, le celtique, le romano-italique et le germanique. Toutes ces familles ont une origine commune, qui se situe environ 2 000 ans après la divergence de l'hittite. La ramification en grandes familles existant aujourd'hui s'est alors produite dans une fenêtre temporelle de 1 400 ans seulement. Cela indique des migrations postérieures à la plus ancienne diffusion de l'agriculture. La première des grandes familles actuelles à diverger, il y a 6 900 ans, fut l'indo-iranien. Ont ensuite suivi les familles des langues du Nord-Est de l'Eu-

rope, le balte et le slave. Il y a 6 100 ans, le celtique s'est séparé du tronc. Enfin, il y a 5 500 ans, le reste s'est ramifié en germanique et en italique.

Selon C. Renfrew, cette énorme vague de migration, sur laquelle repose le succès des langues indo-européennes sur un vaste périmètre, est partie des Balkans. Il ne s'agit bien sûr que d'une option. Un coup d'œil sur la carte suggère une autre possibilité : la vague de ramifications et de migrations est peut-être partie des steppes du Nord de la mer Noire, c'est-à-dire de la région habitée par les peuples des steppes qui ont la faveur de Gimbutas. De là-bas, on arrivait facilement en Iran, et à la ramification de l'indo-iranien, aussi bien qu'en Europe de l'Est avec la ramification des langues baltes et slaves. On dispose même d'un élément qui étaye la présence très ancienne d'Indo-Européens dans la région de la mer Noire : les noms que portent les fleuves qui y coulent. Don, Dniepr, Dniestr, Danube, tous ces noms ont une racine indo-européenne, qui est le terme du vieux persan et du vieux celtique désignant le fleuve (*danu*).

Pour ce qui est de l'origine des Indo-Européens, les peuples des steppes sont donc toujours en lice. Il est possible qu'ils aient contribué à la répartition actuelle des langues indo-européennes. La vérité se situe sans doute quelque part entre les thèses de C. Renfrew et de Gimbutas. Une chose est sûre : dans ce domaine, les hypothèses les plus simples ne sont pas forcément les meilleures. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

B. Bramanti *et al.*, Genetic discontinuity between local hunter-gatherers and Central Europe's first farmers, *Science*, vol. 326, pp. 137-140, 2009.

H. Chandler *et al.*, Using ancient DNA to examine genetic continuity at the Mesolithic-Neolithic transition in Portugal, dans P. Arias *et al.* (éds.), *Actas del III Congreso del Neolítico en la Península Ibérica*, Santander, pp. 781-786, 2005.

R. D. Gray et Q. D. Atkinson, Language-tree divergence times support the Anatolian theory of Indo-European origin, *Nature*, vol. 426, pp. 435-438, 2003.

E. Hamel et Th. Vennemann, Le vascon, première langue d'Europe, *Pour la Science*, n° 299, septembre 2002.

Collectif, *Les langues du monde*, Bibliothèque Pour la Science, 1999.

M. Ruhlen, *L'origine des langues*, Belin, 1997.

Aperçus

de la science de demain

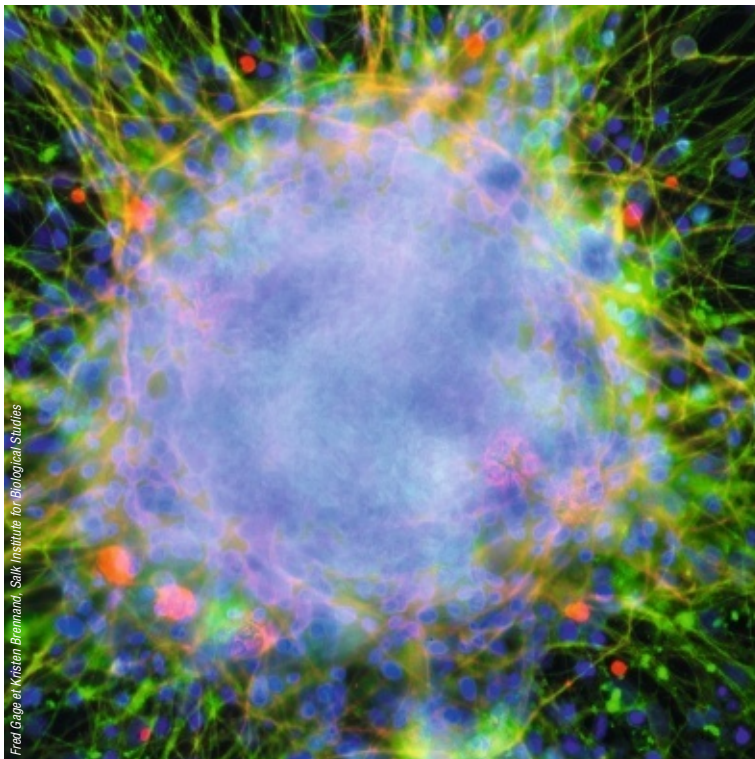
POUR LA SCIENCE N° 400

Évidemment, personne ne peut prévoir les grandes avancées scientifiques des prochaines années. Mais les découvertes ne jaillissent pas de nulle part, elles viennent aux esprits préparés qui savent, en outre, comprendre l'importance de l'inattendu. Aussi, pour son 400^e numéro, *Pour la Science* ne se tourne pas vers le passé mais vers l'avenir, et vous propose un florilège de champs de recherche propices aux découvertes. En quelques pages alliant des illustrations surprenantes et un résumé de l'état de l'art, nous vous convions à un voyage vers le futur.

Sans prétendre être exhaustifs, nous avons choisi, pour illustrer ces terrains fertiles, les cellules souches, le graphène, l'imagerie cérébrale, les exoplanètes, la chimie macromoléculaire, les particules élémentaires, le rayonnement du fond diffus cosmologique, la biologie synthétique, la science des réseaux, la biodiversité, les nanosciences, la modélisation informatique, l'épigénétique et les métamatériaux.

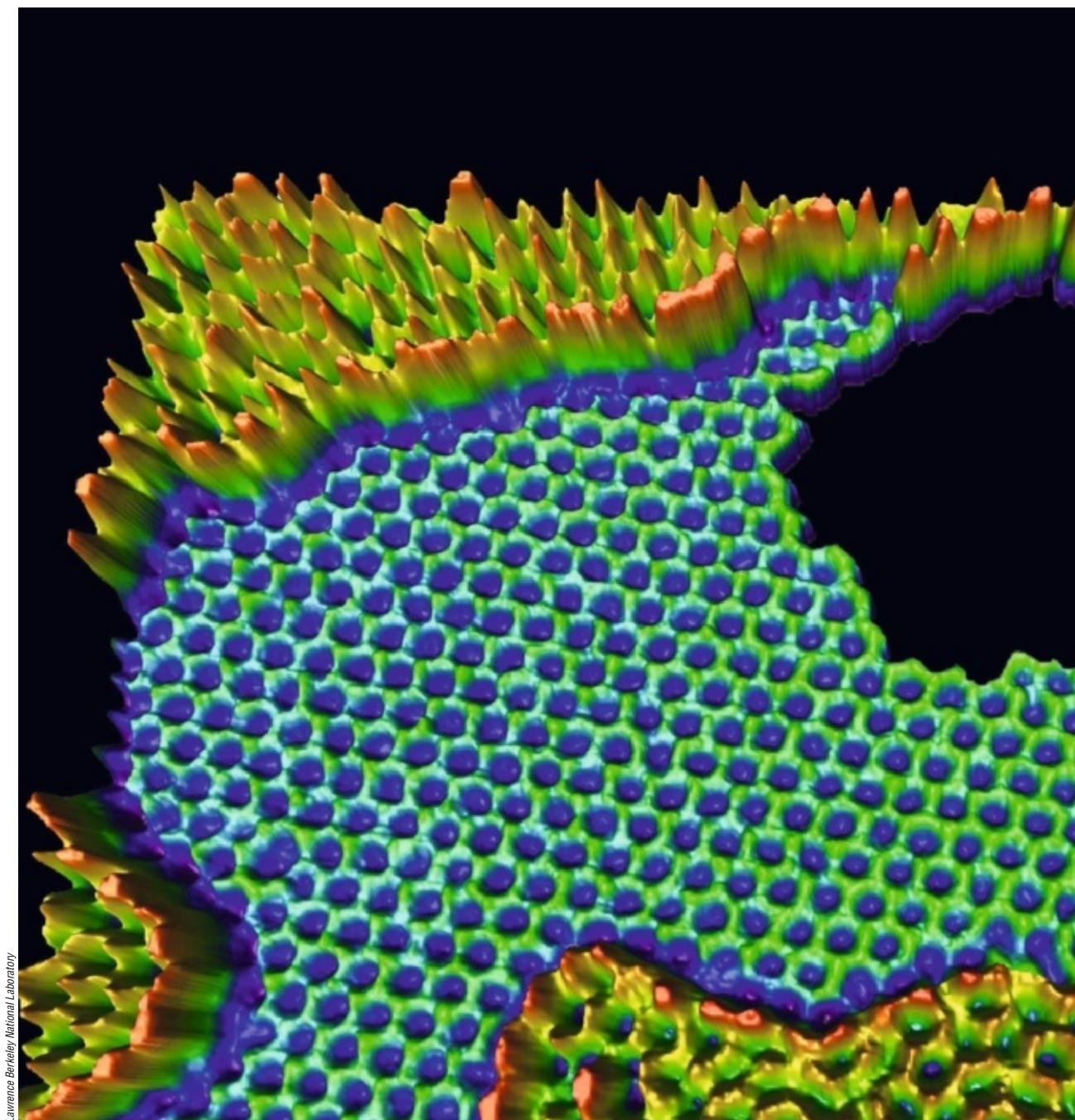
La rédaction

LES CELLULES SOUCHES. Ces neurones, dont on voit les prolongements, ou axones (*en vert et jaune*), par centaines, se sont formés *in vitro* à partir de cellules souches dites pluripotentes induites. En s'amoncelant, leurs noyaux, colorés en bleu, forment une masse bleutée (*en rouge, un marquage de certaines ramifications des neurones, les dendrites*). Les cellules souches pluripotentes seront vraisemblablement à l'origine de progrès thérapeutiques. Elles se reproduisent à l'identique presque indéfiniment, et peuvent se transformer – se différencier – en toutes sortes de cellules spécialisées (nerveuses ou musculaires, par exemple) qui pourraient remplacer des tissus lésés. Il existe deux types de cellules pluripotentes : les cellules souches embryonnaires, issues des tout premiers stades de développement d'embryons et, depuis 2006, les cellules souches pluripotentes induites (CSPi), obtenues par reprogrammation de cellules déjà différenciées. Pour former des tissus de remplacement, il faut produire un grand nombre de cellules d'une lignée tissulaire à partir de cellules souches, puis les implanter. Dans l'organisme, ces cellules doivent être fonctionnelles et dénuées de risques. Une application plus immédiate consiste à utiliser les cellules souches induites pour modéliser des maladies. Prélevées sur des patients et différenciées en cellules « malades », elles permettent d'étudier les mécanismes cellulaires et moléculaires de diverses pathologies, et de tester à grande échelle des médicaments potentiels. □



Fred Gage et Kristen Brennand, Salk Institute for Biological Studies

Biomédecine



Lawrence Berkeley National Laboratory

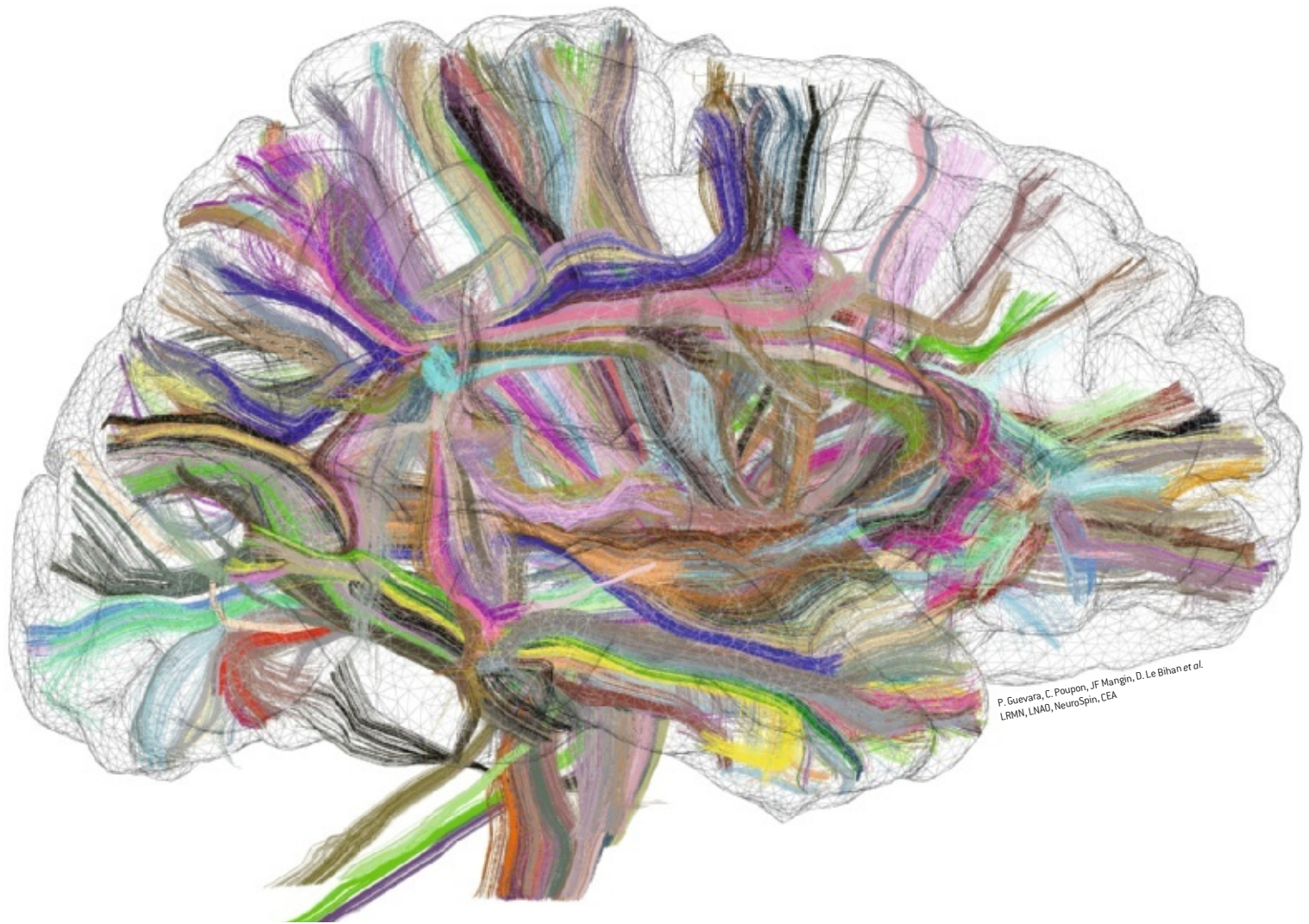
LE GRAPHÈNE. Cette image en fausses couleurs, obtenue par microscopie électronique à transmission, montre un réseau d'atomes de carbone liés entre eux de façon hexagonale (*en vert sur fond bleu*). Une telle couche de carbone d'épaisseur monoatomique est nommée graphène. Le graphite, forme bien connue du carbone, n'est autre qu'un empilement de nombreux feuillets de graphène.

Qu'y a-t-il alors de nouveau ? En fait, des feuillets de graphène n'ont été isolés que très récemment, en 2004. C'est notamment ce qui a valu à Andre Geim et Konstantin Novoselov, de l'Université de Manchester en Grande-Bretagne, le prix Nobel de physique de 2010. Et surtout, l'étude

du graphène a vite révélé que ce cristal bidimensionnel, le seul connu à ce jour, a de nombreuses propriétés intéressantes, tant du point de vue fondamental que de celui des applications.

Par exemple, les électrons dans le graphène se comportent comme s'ils étaient de masse nulle, avec une mobilité très élevée à température ambiante. C'est un matériau très transparent, mécaniquement très résistant (200 fois plus que l'acier) et cependant souple. Ses propriétés, activement explorées et encore imparfaitement comprises, laissent envisager de nombreuses applications [détection de molécules uniques, transistors et autres composants électroniques ou optoélectroniques, cellules photovoltaïques, etc.].

Le graphène est la troisième des grandes surprises que nous a réservées le carbone au cours des dernières décennies. La première a été la découverte de la molécule C_{60} en forme de cage sphérique, en 1985, suivie de plusieurs autres molécules du même type (C_{70} , C_{76} , etc.). La deuxième surprise a été l'identification, en 1991, de feuillets de carbone recourbés en tubes de diamètre nanométrique. Les molécules de type C_{60} et les nanotubes de carbone constituent la famille dite des fullerènes. Ces structures ont de remarquables propriétés physiques et chimiques, toujours très étudiées. Comme le graphène, elles intéressent beaucoup les ingénieurs, en particulier les spécialistes des nanotechnologies. ◻



P. Guevara, C. Poupon, JF Mangin, D. Le Bihan et al.
LRMN, LNAO, NeuroSpin, CEA

L'IMAGERIE CÉRÉBRALE. Cette représentation du cerveau humain, obtenue par imagerie par résonance magnétique de diffusion (IRM de diffusion), révèle les faisceaux de substance blanche (représentés par les différentes couleurs), chacun de ces faisceaux étant un ensemble de fibres nerveuses. Cette technique permet de sonder et de visualiser la structure des tissus biologiques, notamment cérébraux, à une échelle microscopique : elle illustre les progrès considérables de l'imagerie cérébrale depuis une vingtaine d'années.

Les premières techniques datent du début des années 1980. Il s'agissait surtout de l'imagerie par résonance magnétique et du scanner aux rayons X. Ces méthodes permettaient de voir les structures du cerveau (vivant), mais la résolution spatiale était médiocre, de l'ordre du centimètre. Elles ne révélaient pas forcément les plus petites tumeurs ou les lésions susceptibles de perturber le fonctionnement cérébral. Progressivement, la résolution de ces deux techniques d'imagerie anatomique a été améliorée et atteint aujourd'hui le millimètre, voire quelques dixièmes de millimètre pour les IRM à très haut champ magnétique. Mais le grand bouleversement vient des méthodes d'imagerie dites fonctionnelles, qui

mesurent en temps réel l'activité des régions cérébrales durant certaines tâches. Par exemple, l'IRM fonctionnelle ou la tomographie par émission de positrons ont aujourd'hui une résolution temporelle de l'ordre de la seconde, c'est-à-dire que l'on peut « filmer » le cerveau en action à raison d'une image par seconde.

Ces différentes techniques ont des applications médicales et permettent d'étudier le fonctionnement du cerveau. On peut par exemple localiser des foyers épileptiques, repérer des tumeurs, même millimétriques, et des hémorragies cérébrales. Or des diagnostics précis et rapides facilitent une prise en charge précoce, ce qui augmente les chances de guérison et limite les séquelles. Quant à l'étude du cerveau, on observe aujourd'hui comment il s'active lors d'une tâche cognitive ou motrice. Mais le chemin est encore long entre la mise en évidence de l'activité associée à une tâche et la mise en évidence de l'activité cérébrale qui sous-tend la conscience.

Que nous réservent les années à venir ? Les techniques devraient améliorer les résolutions spatiales et temporelles et l'on espère combiner ces deux sortes de résolution, avec de bonnes

valeurs pour chacune. Quant à l'IRM de diffusion, elle offre une approche unique pour étudier *in vivo* l'architecture fine du tissu cérébral et de ses changements physiologiques ou pathologiques ; elle est en train de se transformer en un véritable microscope capable de voir à distance, sans prélèvement tissulaire.

Cette méthode reste un outil de choix pour le diagnostic des ischémies cérébrales (privations d'oxygène d'une région du cerveau) : avec une sensibilité sans égale, l'IRM de diffusion permet à certains patients de recevoir un traitement adapté en urgence, avant que la zone lésée soit importante. En outre, elle permet d'observer le câblage intracérébral et reste aujourd'hui le seul outil utilisable *in vivo*. Cette « tractographie » cérébrale, jointe à l'IRM fonctionnelle, ouvre une voie nouvelle pour l'étude de la connectivité cérébrale et de ses pathologies, par exemple psychiatriques, qui représentent un enjeu de santé publique majeur. La dernière avancée concerne la détection rapide de l'activation neuronale : les cellules cérébrales activées changent de structure, ce qui entraîne des modifications du signal d'IRM de diffusion. Cela devrait bouleverser l'imagerie neurofonctionnelle. ■

LES EXOPLANÈTES. Non, ce n'est pas l'œil du Seigneur des anneaux, mais un disque de poussière autour de l'étoile Fomalhaut (*masquée, au centre*), qui abrite une planète trois fois plus massive que Jupiter (*voir le cartouche*). Quinze ans après la découverte de la première exoplanète, autour d'une étoile de type solaire, on en connaît aujourd'hui plus de 500. Avec une variété bien plus grande qu'on ne l'aurait imaginé : des planètes géantes très proches de leur étoile, d'autres autour d'étoiles ratées ou de cadavres stellaires... Comment ces systèmes se sont-ils formés ? Le Système solaire est-il une exception ? Et, surtout, existe-t-il des planètes semblables à la Terre ? Ces questions restent ouvertes. Des « super-Terres » à peine plus massives que la nôtre ont été détectées récemment, et les télescopes CoRoT et *Kepler* devraient en découvrir des dizaines dans les années à venir. Quelles sont les conditions qui y règnent ? Si l'on parvient depuis peu à analyser l'atmosphère des planètes géantes gazeuses en transit devant leur étoile, pour les planètes de type terrestre, il faudra attendre des instruments plus puissants. Avec l'espoir de découvrir, bientôt, une jumelle de la Terre. Et peut-être la vie ? 

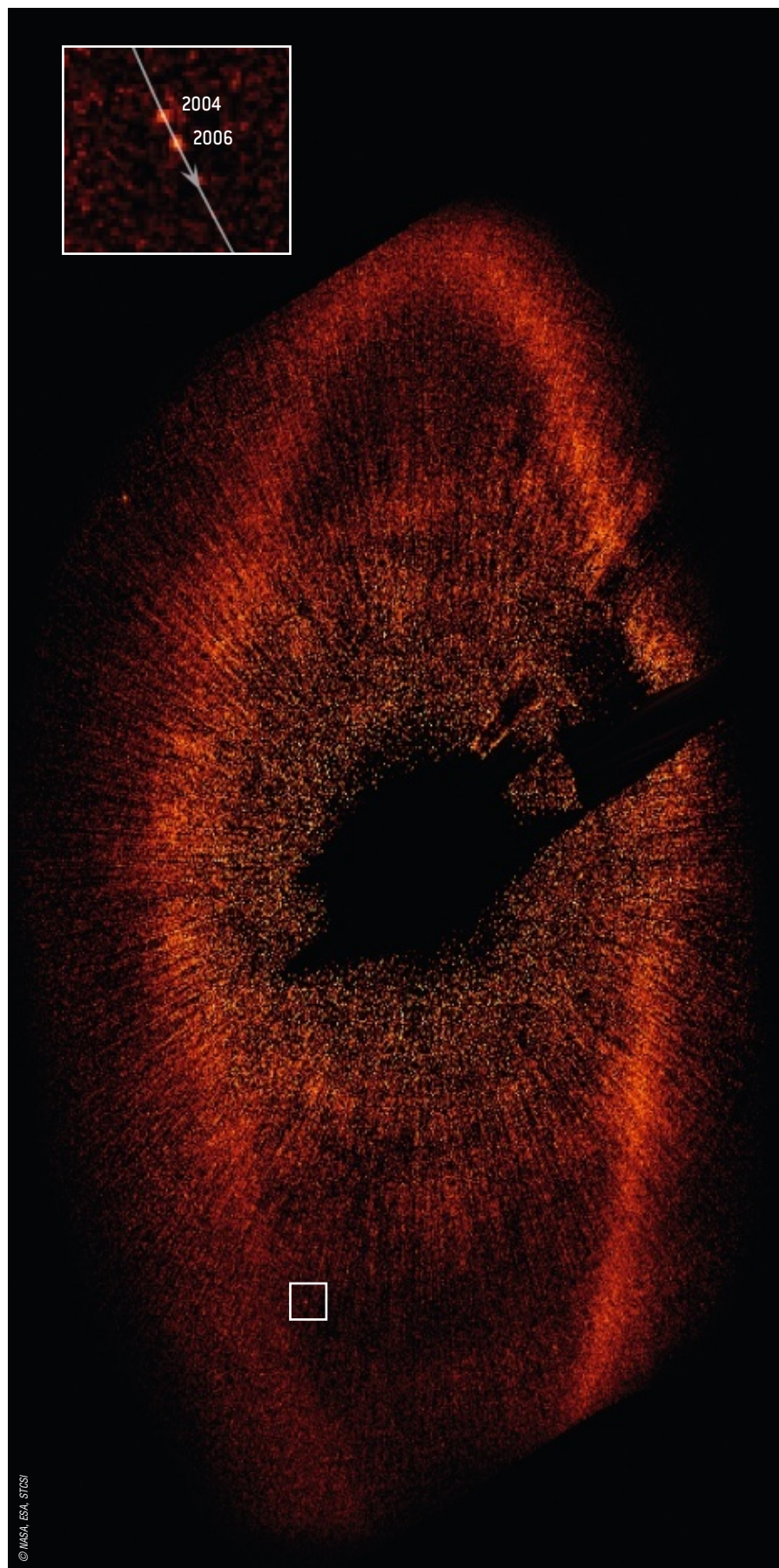
LA CHIMIE MACROMOLÉCULAIRE. Ces microcapsules de polymères criblées de minuscules trous contiennent une substance active (par exemple un parfum) et font moins de 0,1 millimètre de diamètre. On les obtient en agitant une solution de polymère et le parfum, dans une solution aqueuse qui comporte un stabilisant ; lorsqu'on élimine le solvant par évaporation contrôlée, les gouttelettes piègent la substance active dans une gangue solide de polymère. De telles capsules ont été insérées notamment dans des peintures, qui restent ainsi odorantes pendant deux ans (pour des sanitaires par exemple).

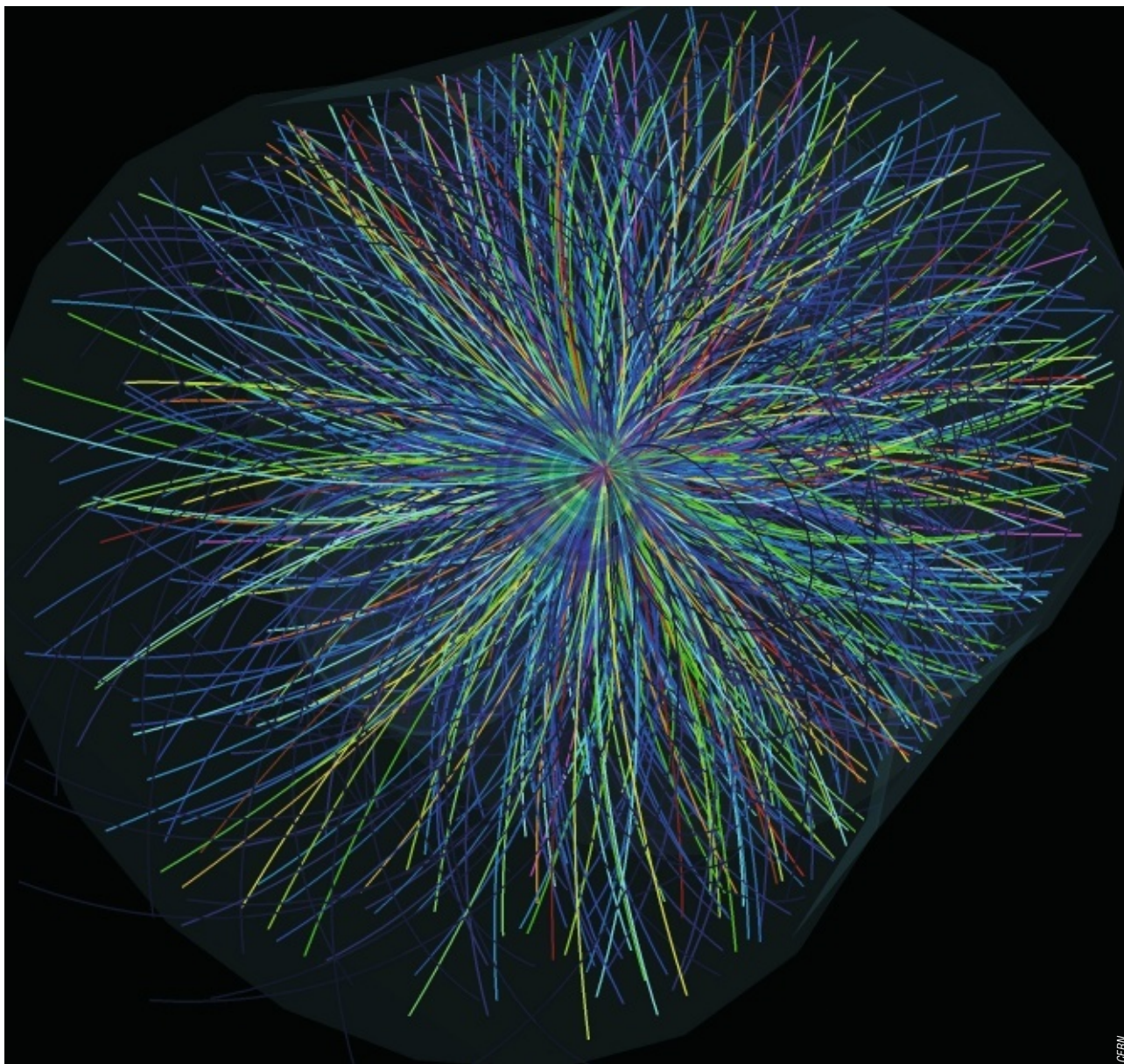
À l'avenir, des capsules nanométriques pourraient transporter dans l'organisme, voire dans les cellules, des médicaments, par exemple des substances anticancéreuses, des cellules souches, des gènes. On traiterait ainsi de façon ciblée des tissus malades ou l'on détruirait spécifiquement des tumeurs. Reste toutefois à trouver un marqueur spécifique du tissu biologique visé, capable de guider la capsule vers son site d'action, et à le greffer à la surface des nanoparticules. 



© CNRS Photothèque - UMR5635. Inth. Europ. des membranes (I. E. M.)

© NASA, ESA, STS





CERN

LES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES. ALICE s'est mise en marche pour remonter le temps. Ces multiples filets colorés issus d'un même point représentent la reconstitution par ordinateur des trajectoires des diverses particules produites lors d'une violente collision entre deux ions de plomb. C'est l'un des innombrables événements enregistrés en novembre 2010 par le détecteur ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*), au CERN à Genève.

ALICE est l'une des grandes « expériences » menées au LHC (*Large Hadron Collider*), le grand collisionneur de hadrons récemment mis en service, où les énergies de collision sont inédites. Le LHC accélère soit des protons, soit des ions de plomb. Six détecteurs, dont ALICE et trois autres de très grande taille, ATLAS, CMS et LHCb, ont été construits pour y mener diverses expériences. ATLAS et CMS traquent le boson de Higgs. Cette particule, qui n'a pas encore été mise en évidence,

est prédite par le modèle standard, la théorie actuelle des interactions électromagnétique, faible et forte.

En cette ère où la construction d'un accélérateur géant tel que le LHC dure autant que la carrière d'un physicien, la découverte de cette particule est un enjeu essentiel, car le boson de Higgs est l'un des ingrédients clés de la logique du modèle standard. S'il n'est pas découvert, la construction du collisionneur LHC aura-t-elle été inutile ? Sans doute pas : les physiciens seraient très étonnés que le LHC n'apporte pas de trouvailles conséquentes.

En effet, depuis plus de 25 ans, les théoriciens du monde subatomique attendent des résultats expérimentaux importants pour guider leurs spéculations. ATLAS et CMS révéleront peut-être des particules inattendues, que les théoriciens s'empresseront d'exploiter, soit pour départager les idées concurrentes, soit pour ouvrir des pistes originales.

Il est aussi possible que les autres expériences du LHC fournissent des découvertes inattendues. L'expérience LHCb sur la violation de la symétrie CP, liée à l'asymétrie matière-antimatière, en est une première source potentielle. ALICE en est une autre. Ce détecteur de 10 000 tonnes mesure les produits de collisions frontales entre ions de plomb. Ces expériences visent à étudier le changement d'état de la matière qui se produit lorsqu'on détruit les liaisons créées par l'interaction forte. Dans le plasma quarks-gluons ainsi créé, les constituants (quarks et gluons) des protons et des neutrons sont à peu près libres. Cet état n'existe que dans des conditions extrêmes, analogues à celles qui régnaient aux premiers instants de l'Univers. C'est pourquoi ALICE constitue une sorte de machine à remonter le temps. ALICE est-elle sur le point de nous ouvrir un nouveau pays de merveilles... scientifiques ?

LE RAYONNEMENT DE FOND COSMOLOGIQUE.

Sur cette image du ciel en micro-ondes, on distingue, en arrière-plan du disque de la Voie lactée et du milieu interstellaire, le motif granulaire du fond diffus cosmologique. C'est pour cartographier avec précision ce fossile de la première lumière émise dans l'Univers qu'a été lancé en 2009 le satellite *Planck*.

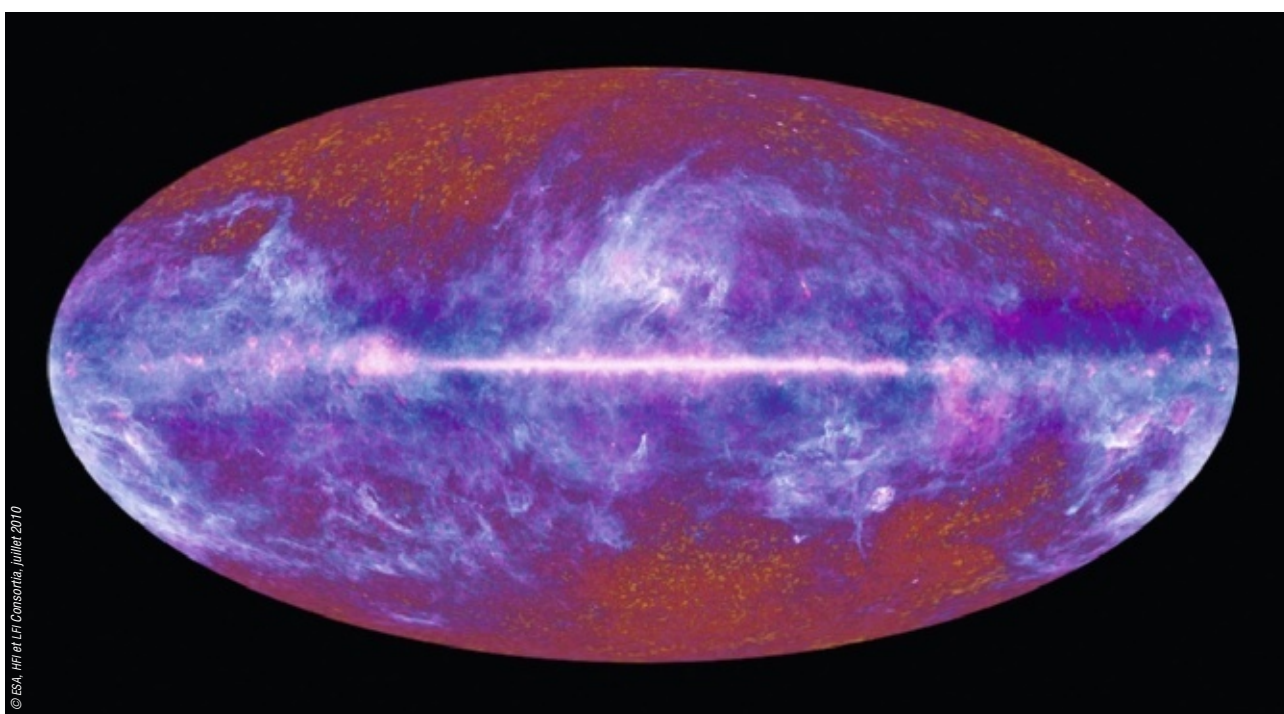
Le rayonnement du fond diffus a été émis 380 000 ans après le Big Bang, lorsque les électrons se sont recombinaux aux noyaux pour former les atomes. C'est un élément clef du modèle standard de la cosmologie, qui décrit comment l'Univers a évolué en se dilatant et en se refroidissant à partir d'une phase chaude et dense.

Le tableau est aujourd'hui le suivant : la matière usuelle, ou baryonique, ne représente que quatre

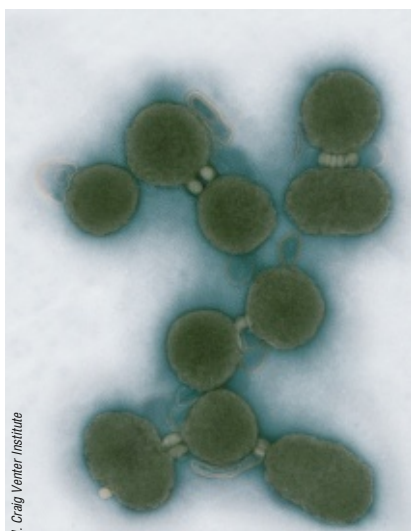
pour cent du contenu en énergie du cosmos. Le reste se partage entre la matière noire (24 pour cent), composée de particules massives sans interactions avec la matière ordinaire, et l'énergie sombre (72 pour cent), qui crée une répulsion gravitationnelle et provoquerait l'accélération de l'expansion cosmique. Dans les premières fractions de seconde, une brève phase d'expansion accélérée, l'inflation, a homogénéisé le contenu de l'Univers et engendré les infimes fluctuations de densité détectées dans l'image du fond diffus. Ces fluctuations de densité ont par la suite donné naissance, par l'action de la gravité, aux galaxies et amas de galaxies. Mais de nombreuses questions demeurent. Que sont la matière noire et l'énergie sombre ? Existe-t-il des modèles alternatifs qui s'en passent ? Quel est le moteur

de l'inflation ? Quelle est la bonne théorie physique pour décrire l'Univers primordial ?

En améliorant la résolution et la sensibilité de la carte des fluctuations du fond diffus, le satellite *Planck* apportera des éléments de réponse. Préciser les proportions de matière baryonique, de matière noire et d'énergie sombre permettra de mieux contraindre les hypothèses sur leur nature, de mieux tester les prédictions sur la nucléosynthèse ou de vérifier que la courbure de l'Univers est nulle. Par ailleurs, *Planck* livrera la première carte précise de la polarisation du fond diffus, qui pourrait révéler la trace d'ondes gravitationnelles primordiales. Tous ces résultats, et d'autres, telle la cartographie des grandes structures, permettront d'affiner les modèles d'évolution de l'Univers. □



© ESA, IRI et LPI Consortia, juillet 2010



J. Craig Venter Institute

LA BIOLOGIE SYNTHÉTIQUE. Ces cellules, vues ici en microscopie électronique à transmission, ont fait parler d'elles en mai 2010. Elles ont été reprogrammées au moyen d'un génome synthétique : des chercheurs de l'Institut J. Craig Venter, aux États-Unis, ont synthétisé un génome presque identique à celui d'une bactérie connue et l'ont introduit dans une espèce bactérienne proche. Après la division cellulaire, les cellules filles qui en avaient hérité ont changé d'identité, se mettant à produire les protéines codées par le génome synthétique. Ces travaux ont inauguré l'ère de la biologie synthétique. La méthode, nouvelle étape du génie génétique, est simple en théorie : identifier des séquences génétiques qui remplissent des fonctions souhaitées, les combiner pour obtenir des fonctions plus complexes, et les insérer dans des cellules, qui exécuteront alors ces fonctions.

Les applications potentielles sont multiples : spécialiser des cellules dans la production de molécules utiles ou dans la capture du dioxyde de carbone, les rendre résistantes à des virus, voire, à plus long terme, faire revivre des bactéries anciennes ou créer de nouveaux organismes... Mais les obstacles sont nombreux. On est loin de connaître tous les gènes nécessaires à une tâche, le rôle des autres constituants cellulaires, l'impact de la réduction du génome sur l'adaptabilité d'une cellule, etc. Et il faut que les travaux s'accompagnent de toutes les précautions éthiques et expérimentales nécessaires. □



LA SCIENCE DES RÉSEAUX. Il ne s'agit pas d'un feu d'artifice, mais d'une représentation graphique du réseau des interactions entre les trois quarts des quelque 6 000 gènes de la levure de bière, *Saccharomyces cerevisiae*.

Sur cette cartographie d'environ cinq millions d'interactions génétiques, publiée début 2010 par une équipe majoritairement canadienne, les nœuds du réseau correspondent à des gènes, et deux nœuds sont reliés entre eux si les deux gènes qu'ils représentent interagissent. Les groupes de nœuds d'une couleur donnée figurent des gènes intervenant dans un type de fonctions de la cellule. Par exemple, les nœuds en jaune représentent des gènes impliqués dans la sécrétion de

vésicules intracellulaires et leur transport, tandis que les nœuds en vert clair sont liés aux fonctions de réplication et de réparation de l'ADN.

L'analyse détaillée d'un tel réseau aide à comprendre le fonctionnement du système représenté. D'autant que, depuis plusieurs années, sous l'impulsion notamment d'Albert-Lászlo Barabási, aux États-Unis, se développe l'étude générale des réseaux, indépendamment des objets concrets qu'ils représentent. Qu'il s'agisse du réseau Internet, des relations entre individus au sein d'une communauté, des connexions entre neurones dans le cerveau, du réseau de distribution de l'électricité, des réseaux de contacts humains par lesquels se propage une épidémie, des chaînes

alimentaires dans le monde vivant, etc., des propriétés universelles se révèlent parfois.

Ainsi, malgré l'apparence désordonnée des réseaux complexes, l'approximation consistant à les considérer comme des assemblages aléatoires de nœuds et de liens n'est, le plus souvent, pas valable. Les chercheurs ont par exemple découvert que beaucoup de réseaux très différents sont « invariants d'échelle », c'est-à-dire que la probabilité qu'un nœud soit connecté à n autres nœuds est proportionnelle à une certaine puissance de n .

La recherche de telles propriétés universelles caractérisant l'architecture et le fonctionnement des réseaux, qu'ils soient fixes ou changeants, est un domaine en plein essor. ■

LA BIODIVERSITÉ. Ce crustacé copépode long d'un demi-millimètre, *Ceratonotus steiningeri*, a été découvert en 2006 dans le cadre du Recensement de la vie sous-marine (*Census of Life*) par 5 400 mètres de fond, au large de l'Angola, puis dans le Pacifique.

C'est l'une des 5 000 espèces nouvelles pour la science collectées depuis 2000 par ce recensement. Les océans sont tout un monde qui reste à explorer, notamment à plus de 1 000 mètres de profondeur. Alors que les scientifiques ont décrit 250 000 espèces marines environ, il en existerait plus d'un million, micro-organismes mis à part – lesquels représenteraient 90 pour cent de la masse de tous les organismes marins. Ainsi, il resterait environ 5 000 poissons marins inconnus (près de 17 000 ont été décrits). Et 75 pour cent des espèces vivant en profondeur en Méditerranée resteraient à collecter et à décrire. Dans les forêts tropicales, qui abritent 50 à 75 pour cent de la biodiversité terrestre, des dizaines de milliers d'espèces sont aussi à découvrir, si leur rythme d'extinction, 100 à 1 000 fois plus rapide qu'avant l'ère industrielle, en laisse le temps.

Ce sont surtout des arthropodes et des végétaux, mais aussi des oiseaux et des mammifères. De quoi justifier nombre de missions naturalistes sur le terrain et des mesures concrètes de protection. La Terre reste à explorer... et à préserver. 



Jean-Michel

LE NANOMONDE. Ces flocons sont en or et ne mesurent que deux micromètres de diamètre et 40 nanomètres d'épaisseur. Déposés sur une plaque de verre par lithographie électronique, c'est-à-dire à l'aide d'un faisceau d'électrons, ils illustrent les possibilités des nanosciences et des nanotechnologies.

Les termes de nanosciences et de nanotechnologies se sont peu à peu imposés pour décrire les recherches et la construction de systèmes de tailles comprises entre le micromètre et le nanomètre, c'est-à-dire le milliardième de mètre. Il ne s'agit donc ni d'une nouvelle science ni d'une nouvelle branche technique, mais d'un ensemble d'études et de réalisations mettant en jeu des phénomènes physiques, chimiques ou biologiques portant sur de petits groupes d'atomes et de molécules. C'est

souvent le caractère quantique des phénomènes en question qui les rend utiles pour créer « nanomachines », « nanomatériaux » et autres « nanomédicaments », autrement dit des dispositifs nanométriques dotés des fonctions (mécaniques, optiques, chimiques, électroniques, biologiques ou médicales) souhaitées.

L'idée de constructions à l'échelle moléculaire fut évoquée dès les années 1950 par Richard Feynman, puis popularisée par certains ingénieurs et auteurs de science-fiction, qui la présentèrent comme le moyen de transformer la Terre en un paradis technique, ou au contraire en un enfer où les humains ne pourront se défendre contre des objets plus petits que leurs cellules...

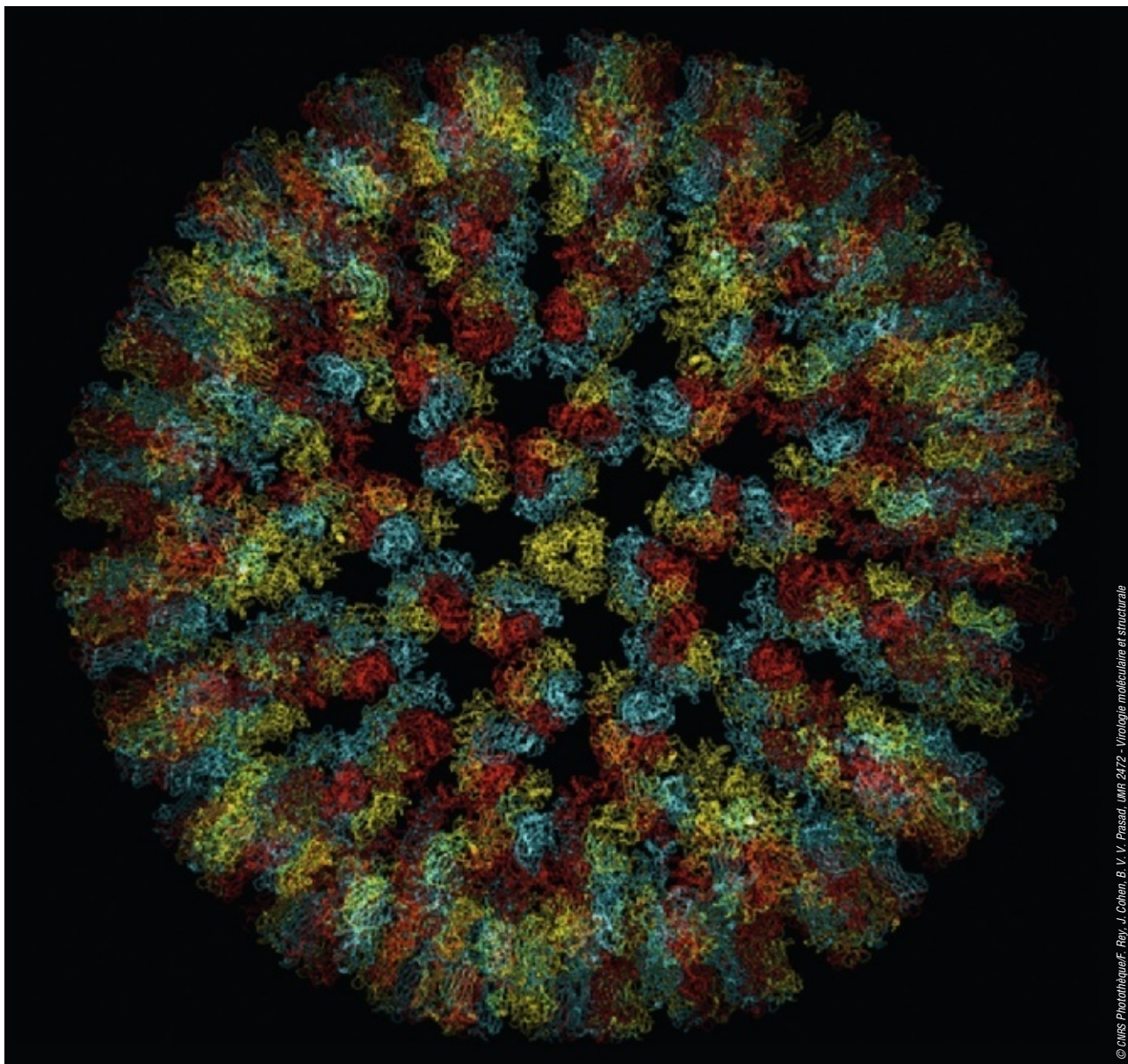
Les nanosciences et les nanotechnologies se développent grâce à un éventail toujours plus grand de techniques permettant d'étudier et d'agir

à l'échelle nanométrique : microscopie optique, électronique ou à sonde locale, microstructuration des surfaces (par photolithographie, lithographie électronique, etc.), manipulations à l'échelle moléculaire (mécanosynthèse, auto-assemblage moléculaire, etc.).

Ce domaine est riche de travaux variés : la « neige » d'or montrée ici sert par exemple à l'étude fondamentale des ondes électroniques de surface nommées plasmons. Du côté des applications, de plus en plus de laboratoires sur puce, de micromoteurs électriques, de lasers miniaturisés, de composants nanoélectroniques et d'autres microsystèmes apparaissent. Et les perspectives étonnantes ne manquent pas : on parle de nanorobots mobiles à l'intérieur du corps, d'essaims de microrobots domestiques, de robots de combat imparables parce qu'invisibles... 



© CNRS Photobiologie/SM/Université de Bordeaux 1 / P. Labrune, N. Marquèsant, D. Talaga, UMR5250 - Institut des sciences moléculaires



© CNRS Photothèque F. Rey, J. Cohen, B. V. V. Prasad, UMR 2472 - Virologie moléculaire et structurale

LA MODÉLISATION INFORMATIQUE. La rosace de quelque cathédrale moderne ? Non... Réalisée en 2004 à partir de données cristallographiques et d'observations en microscopie électronique, cette structure modélise le rotavirus responsable des gastro-entérites infantiles. Depuis 30 ans, la modélisation informatique, qui simule des phénomènes décrits par des théories, connaît un grand essor pour deux raisons : d'une part, l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs et de leur capacité de stockage et, d'autre part, l'accroissement des données lié aux progrès techniques.

De plus en plus précises, les méthodes de résolution numérique des équations aux dérivées partielles, qui régissent notamment la mécanique des fluides, éclairent des champs aussi variés que la physique des plasmas, l'étude du climat ou celle du comportement des colonies bactériennes. En astrophysique, grâce aux données collectées par les radiotélescopes et les sondes, on commence

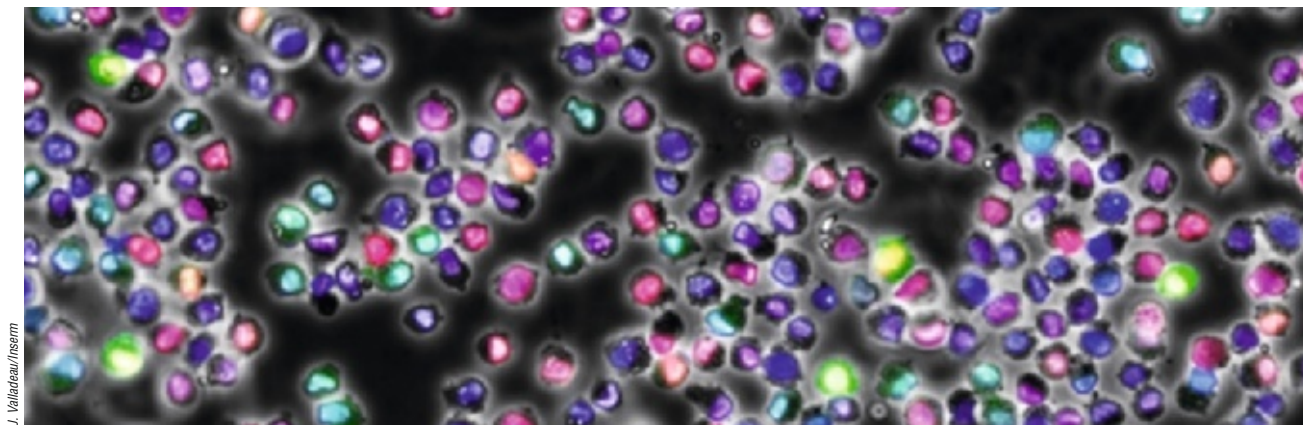
à produire des simulations plausibles de l'apparition et de l'évolution des galaxies. En climatologie, la puissance des calculateurs permet d'améliorer l'échantillonnage de la surface terrestre et, par conséquent, la fiabilité des prévisions.

En biologie, les données disponibles pour la modélisation sont impressionnantes. Les techniques de séquençage sont un million de fois plus performantes qu'il y a 20 ans : aujourd'hui, on séquence le génome de cellules saines et cancéreuses chez un même patient, ou de bactéries de diverses provenances. Avec ces millions de données et des modèles appropriés, on espère prévoir l'évolution d'un cancer ou mieux comprendre le fonctionnement d'une bactérie.

La transcriptomique et la protéomique, qui étudient l'expression des gènes en recensant leurs ARN messagers et leurs produits, fournissent aussi quantité de données moléculaires que l'on peut intégrer dans des modèles ; grâce à la puissance actuelle des calculateurs, on simule par exemple

l'évolution de réseaux d'interactions moléculaires comportant jusqu'à 20 ou 30 composants.

Toutefois, les concepts progressent moins vite que la technologie. Accumuler d'innombrables données ne servira à rien si l'on ne conduit pas une réflexion approfondie sur la façon de les exploiter. Un modèle ne reproduit pas exactement la réalité : on fait des hypothèses, des choix pour la simplifier. Dans la montagne de données amassées, quels choix seront pertinents pour aborder tel problème ? Par exemple, d'ici trois ou quatre ans, on sera sans doute en mesure de donner la carte d'identité des tumeurs de centaines d'individus et d'y repérer les mutations par rapport aux cellules saines. Mais parmi elles, quelles mutations conserver dans un modèle destiné à prévoir l'évolution d'un cancer ou à élaborer des tests de prédisposition ? Un modèle n'est pas une fin en soi. Il répond à une question, et tout l'enjeu des prochaines années sera de formuler les bonnes questions. 



J. Valladau/Inserm

L'ÉPIGÉNÉTIQUE. L'une des nombreuses découvertes faites en biologie depuis les années 1990 est celle des mécanismes héréditaires par lesquels l'environnement des gènes agit sur leur expression. Ces mécanismes, dits épigénétiques, peuvent être étudiés en comparant les variations de l'expression des gènes dans des cellules normales et malades, par exemple. Ici, des chercheurs de l'INSERM ont marqué deux gènes, *pp65* (en rouge) et *GFP* (en vert), pour observer leur expression dans les cellules d'un cancer du sein [dont le noyau apparaît en bleu lorsque ces gènes ne s'expriment pas].

Cette expression dépend de l'organisation de la molécule d'ADN et des conditions physico-chimiques qui règnent dans la cellule, mais aussi de facteurs plus indirects, présents dans l'environnement de l'individu. Ainsi, les modifications épigénétiques produites sous l'influence de l'alimentation seraient responsables d'une expression anormale de certains gènes, et seraient la

cause de diverses maladies. Qui plus est, certaines modifications épigénétiques acquises sont transmissibles à la descendance.

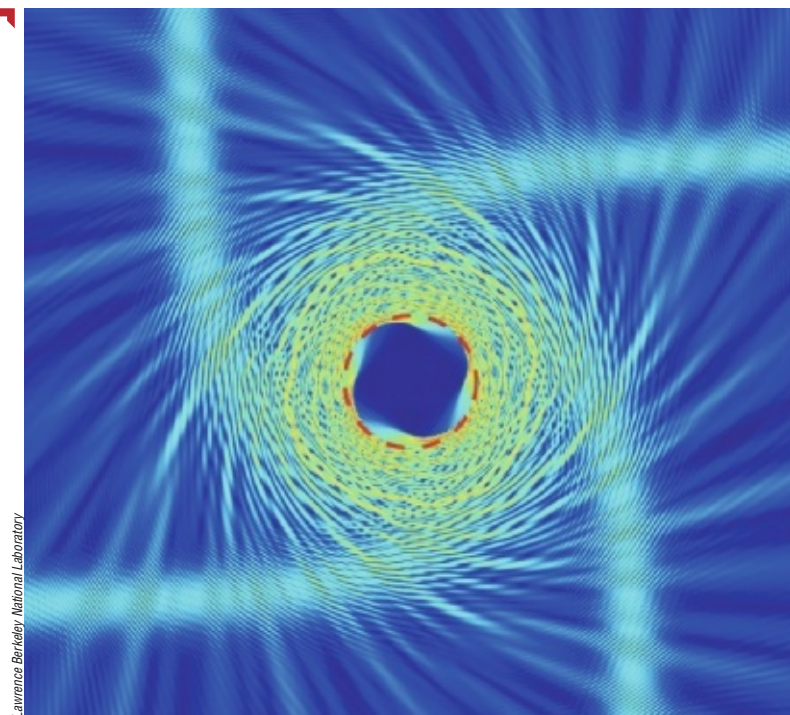
En quoi consistent ces mécanismes ? Tous influent sur l'expression des gènes sans changer leur séquence [la succession de leurs bases d'ADN]. Ils sont de plusieurs types, entre autres : l'ajout de groupes méthyle sur l'ADN ; l'addition de groupes acétyle et méthyle sur les histones, protéines associées à l'ADN ; et l'interférence avec les ARN messagers, les molécules codées par les gènes, par le biais de micro-ARN et de grands ARN non codants.

Pourquoi ces modifications épigénétiques sont-elles importantes ? Les cellules se divisent, et les cellules filles doivent disposer d'informations indiquant quels gènes doivent s'exprimer ou rester silencieux [une cellule de foie n'exprimant pas les mêmes gènes qu'une cellule de muscle]. Ces informations leur sont livrées par la cellule mère sous forme d'un profil épigénétique particu-

lier, c'est-à-dire d'un ensemble de modifications chimiques qui stabilisent l'activité de certains gènes et l'inactivité d'autres : selon les groupes chimiques qui se greffent sur l'ADN et les histones, certains gènes restent inaccessibles aux protéines qui déclenchent leur lecture, ou transcription, tandis que d'autres peuvent, au contraire, être atteints et transcrits en ARN messagers.

Les combinaisons spécifiques de modifications chimiques survenant sur les histones constitueraient un « code histone » qui permettrait à la cellule d'« interpréter » le génome. Bien que l'on ignore comment le code histone serait décodé, des scientifiques tentent de cataloguer, chez diverses espèces à différents stades de développement, toutes les modifications épigénétiques identifiables dans un type donné de cellules.

Ce catalogue devrait permettre de mieux comprendre les dérèglements de l'expression des gènes propres à une maladie ou encore la régulation du développement de l'embryon. □



Lawrence Berkeley National Laboratory

LES MÉTAMATÉRIAUX. Ces quatre faisceaux lumineux (en bleu clair) dévient en s'approchant d'une structure centrale, comme attirés par elle ; une partie de l'énergie incidente s'échappe, mais une autre reste piégée, comme par un trou noir. Dans cette simulation réalisée en 2009 par Xiang Zhang et ses collègues, à Berkeley, la structure centrale est censée être une boule d'arséniure de gallium [GaAs] de quelques micromètres, où de minuscules poches d'air sont agencées de telle façon que l'indice de réfraction optique varie spatialement selon une loi précise. Des métamatériaux – matériaux structurés artificiellement à une échelle assez petite par rapport aux longueurs d'onde que l'on souhaite contrôler – peuvent ainsi reproduire la capture de la lumière par les trous noirs ou d'autres trajectoires célestes relevant de la théorie de la relativité générale.

Depuis cinq ou six ans, les métamatériaux constituent un domaine de recherche très actif, notamment grâce aux idées du théoricien britannique John Pendry. Ce physicien a ouvert la voie aux travaux sur les « capes d'invisibilité », qui dévient les ondes de façon à camoufler un objet grand par rapport à la longueur d'onde, ou sur des dispositifs optiques tels que des lentilles planes et parfaites. Autres exemples d'applications visées : des antennes unidirectionnelles, des composants pour l'optoélectronique ou, à une échelle bien différente, des brise-lames. □

L'évolution par fusion

Marc-André Selosse

NASA/USGS EROS Data Center Satellite Systems Branch