

Variraptor mechinorum, le voleur du Var

Le premier cousin européen des «Raptors» carnivores américains.

Le baptême d'une nouvelle espèce de vertébré fossile est une affaire de longue haleine. Les squelettes entiers qui permettraient aux paléontologues d'identifier rapidement une forme nouvelle sont rares et, la plupart du temps, c'est à partir de quelques ossements récoltés dans différents gisements que l'on identifie une espèce encore inconnue. La découverte de quelques dents isolées dans des sites paléontologiques de la fin du Crétacé (80 à 65 millions d'années) avait conduit les paléontologues à soupçonner, dans les années 1980, l'existence de *Variraptor*. Puis des griffes, des vertèbres et des fémurs furent exhumés dans différents sites du Sud de la France, confirmant l'existence d'un petit dinosaure carnivore de la famille des Dromaeosauridae (les «Raptors» du film *Jurassic Park*). Enfin de nombreux ossements d'un même animal découverts dans le Haut-Var en 1994 et 1995 allaient compléter le puzzle.

Les découvreurs, Annie et Patrick Méchin, sont deux paléontologues amateurs de Provence. Depuis plus de 20 ans, travaillant dans le Var et dans les Bouches-du-Rhône, en collaboration avec le CNRS et le Musée des dinosaures d'Espéraza, ils ont notamment découvert le gros oiseau coureur *Gargantuavis*, la tortue *Foxemys* et le dinosaure *Variraptor*.

La description de *Variraptor mechinorum* a été publiée en 1998 dans la nouvelle revue européenne de paléontologie des vertébrés, *ORYCTOS* (qui signifie «fossile» en grec), éditée par le Musée des dinosaures d'Espéraza. Le nom de genre fait référence au lieu de la découverte (Var), la terminaison *raptor* (qui signifie «voleur» en latin) est courante pour les dinosaures de cette famille, et le nom d'espèce *mechinorum* honore les découvreurs.

Variraptor était un petit dinosaure carnivore de deux à trois mètres de longueur, pesant une cinquantaine de kilos. Ses bras puissants, armés de griffes acérées, devaient l'aider à dépecer



ses proies (lézards, oiseaux, petits mammifères, jeunes dinosaures). On retrouve fréquemment les petites dents crénelées de *Variraptor* associées à des squelettes d'autres espèces de dinosaures, ce qui indique probablement des activités de charognard. Certains ossements de dinosaures herbivores portent même des traces de petites dents, autre indication des habitudes alimentaires de *Variraptor*.

Les principaux représentants de la famille des Dromaeosauridae sont *Veliciraptor*, qui vivait en Asie, *Deinonychus* et *Utahraptor*, deux cousins Nord-américains. L'Europe a désormais son «Raptor». On en déduit qu'il y a 130 millions d'années, les ancêtres de *Variraptor* peuplaient à la fois l'Europe et l'Amérique du Nord. Lorsqu'il y a environ 120 millions d'années, l'Amérique du Nord et l'Europe ont été séparées par la mer, ce «stock ancestral» évolua différemment dans les deux régions, avec des formes comme *Saurornitholestes* et *Dromaeosaurus* en Amérique du Nord, et *Variraptor* en Europe.

Variraptor vécut entre 75 et 65 millions d'années, juste avant la limite Crétacé-Tertiaire, quand disparurent les dinosaures. *Variraptor* fait partie de ces derniers dinosaures, et certains représentants de l'espèce furent probablement parmi les victimes des événements qui marquèrent la fin de l'ère secondaire.

Variraptor mechinorum est la quatrième espèce de dinosaure découverte depuis dix ans dans le Sud de la France par notre équipe. Ainsi, peu à peu se dessinent les contours des écosystèmes de cette île de l'archipel européen que constituaient alors le Sud de la France et le Nord de l'Espagne. Ces travaux permettent de tester les scénarios d'extinction établis d'après les données Nord-américaines, et de reconstituer progressivement l'histoire biogéographique de la fin de l'ère secondaire, alors que l'Europe était un archipel, peuplé d'espèces endémiques.

Jean LE LUEFF et Eric BUFFETAUT
Musée d'Espéraza (Aude)

BRÈVES

Cacophonie marine

Contrairement à ce que pensait le commandant Cousteau, le fond des mers est loin d'être le «Monde du silence» : les cris d'une baleine avoisinent 200 décibels, l'équivalent du bruit d'une ambulance à un mètre de distance. L'océan est bruyant parce que les sons restent piégés entre la surface et le fond. Outre la faune marine – même les crevettes font du bruit – les bruits proviennent du trafic maritime et des séismes sous-marins. Les prospecteurs pétroliers sont également bruyants : des expériences de mesure de la température de l'océan, fondées sur la vitesse de propagation des bruits émanant d'explosions sous-marines artificielles, contribuent à la cacophonie ambiante.

Publicité et violence

Les publicitaires avisés éviteront désormais les annonces violentes, car la mémorisation du message est alors moins bonne. B. Busman, de l'Université de l'Iowa, a testé l'effet de publicités violentes ou non violentes sur des étudiants ; il a mesuré la mise en mémoire des noms de marque, des messages publicitaires ou de l'apparence des produits présentés. Les étudiants qui avaient vu les publicités violentes se souvenaient moins des messages publicitaires que ceux qui avaient vu les séquences non violentes : apparemment les personnes visualisant une séquence violente s'emploient à se calmer au lieu de mémoriser les messages.

Ancêtre portugais

La plus ancienne sépulture d'Europe de l'Ouest vient d'être fouillée par Joao Zilhao, de l'Institut portugais d'archéologie, près de la ville de Leiria, au Portugal. Datée par la stratigraphie de 26 000 à 28 000 ans, soit juste après le remplacement des Néandertaliens par les hommes modernes dans la péninsule ibérique, elle contient les restes d'un enfant *Homo sapiens* d'environ quatre ans, de notre espèce. La présence d'ocre sur le corps, comme dans d'autres sépultures du Paléolithique supérieur en Europe, dénote la similarité des pratiques funéraires sur tout le continent.



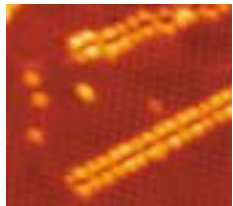
J. Zilhao

Claude Moreno, Musée d'Espéraza

Reconstitution de *Variraptor mechinorum*, un dinosaure carnivore qui vivait dans le Var.

Les lignes de diamants

Des équipes du CEA et du CNRS ont synthétisé des lignes d'atomes de carbone dont la structure est celle du diamant. En traitant la surface d'un cristal de carbure de silicium, qui comporte alternativement



des couches de carbone et des couches de silicium, les physiciens ont obtenu en surface des lignes d'atomes de carbone. Alors qu'ils s'attendaient à obtenir une structure cristalline identique à celle de l'acétylène,

les physiciens ont obtenu une structure analogue à celle du diamant. Ces lignes d'atomes constituent un substrat idéal pour la croissance des monocristaux de diamants.

Prévenir la paralysie

Un traitement médical éviterait-il la paralysie aux personnes blessées à la colonne vertébrale? La réponse est positive chez la souris. Une équipe de l'Université Vanderbilt a traité avec succès des souris, dont la moelle épinière avait été sectionnée, en leur injectant, après la lésion et pendant plusieurs jours, un polysaccharide nommé CM101, produit par des bactéries. Cette substance bloque la formation de vaisseaux sanguins et la cicatrisation des tissus, ce qui laisse le temps aux neurones de se régénérer et de rétablir le contact entre le cerveau et les centres de commande des membres inférieurs. Les souris traitées ont presque toutes remarché après une douzaine de jours.

La température des dinosaures

S'il est maintenant établi que les premiers dinosaures étaient des animaux à sang froid, tels les reptiles, des zoologistes australiens ont montré que leur grande taille leur permettait de maintenir une température corporelle élevée et stable, malgré leur métabolisme lent. En nourrissant des crocodiles avec

des carcasses de poulets munies de thermomètres radio-émetteurs, ils ont noté que la température des animaux les plus gros était supérieure à celle des animaux plus petits. En extrapolant à des animaux plus gros le transfert de chaleur observé entre un crocodile et son environnement, les zoologistes déduisent qu'un animal de dix tonnes (un gros Tyrannosaure) avait une température corporelle de 36 °C en hiver et 31 °C en été avec des fluctuations journalières inférieures à 0,1 °C.



Suite page 28

Maîtresses matrices

Le jeu de solitaire, les atomes et les nombres premiers partagent un comportement régi par des matrices aléatoires.

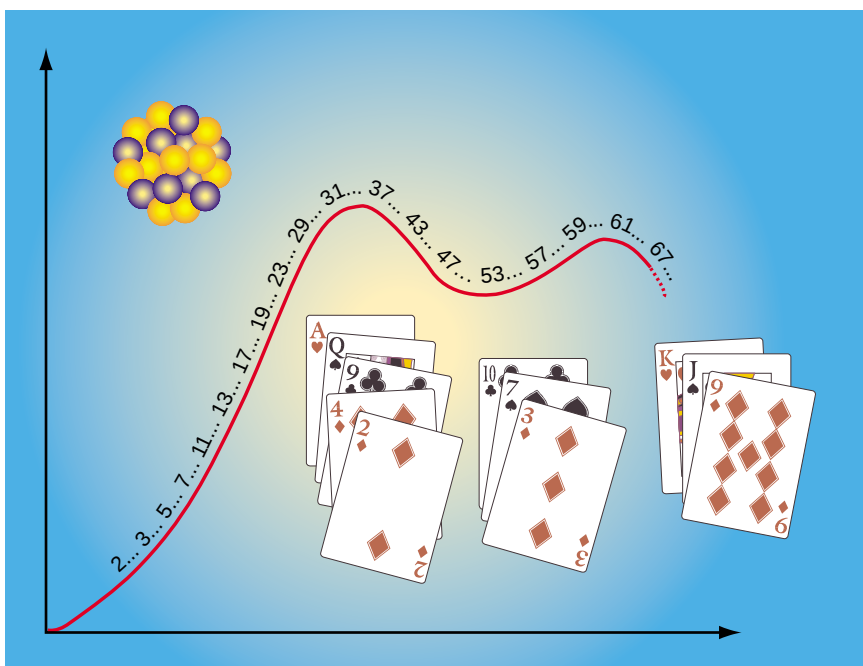
Dans de nombreux jeux, tels les dés, la représentation des probabilités des résultats possibles est une courbe de Gauss, en cloche. Les courbes de probabilité des jeux de cartes ont des formes plus rares, d'interprétation difficile. Néanmoins, des mathématiciens ont récemment percé les secrets d'une version simplifiée du jeu de solitaire. Selon eux, les scores obtenus se répartissent suivant les mêmes lois de probabilité que les valeurs caractéristiques – ou valeurs propres – d'un outil mathématique couramment utilisé par les physiciens qui étudient les gros atomes : les matrices aléatoires.

Le jeu de solitaire étudié est une variante de la réussite. En voici les règles. Retournez une à une les cartes d'un jeu que vous avez préalablement mélangé. Chaque fois que vous le pouvez, posez la carte retournée sur une pile dont la valeur de la carte du dessus est supérieure (voir les exemples sur la figure). Lorsque c'est impossible, entamez une nouvelle pile. Le but du jeu consiste à faire le moins de piles possible. Votre score dépendra uniquement de l'ordre des

cartes retournées. Jouez au moins quelques dizaines de milliers de fois et notez le nombre final de piles à chaque partie. Puis, sur un graphique, mettez en abscisse le nombre de piles et en ordonnée le nombre de fois où vous avez obtenu ce nombre de piles : la courbe résultante (voir la figure) représente la densité de probabilité des scores à ce jeu de solitaire. Ne trouvez-vous pas, à l'instar de Persi Diaconis, mathématicien de l'Université Stanford, que cette courbe a une forme «ésotérique»?

Les matrices aléatoires – des tableaux carrés à n rangées et n colonnes dont les termes sont choisis au hasard – constituent une curiosité mathématique. Les valeurs propres sont les nombres caractéristiques d'une matrice qui permettent, en conférant une symétrie à la matrice, de simplifier les calculs. Lorsque, par un processus aléatoire, vous choisissez les éléments de matrices aléatoires en piochant des nombres appartenant à un échantillon qui suit la loi de Gauss, les valeurs propres de ces matrices obéissent à une loi de distribution «ésotérique» avec deux sommets. Les mathématiciens se perdent en conjectures pour expliquer ce phénomène.

Toutefois, les matrices aléatoires rendent de grands services quand il s'agit de calculer en physique quantique le spectre d'un atome, c'est-à-dire les états qu'un atome adopte en fonction de son énergie. Pour de petits atomes, les physiciens utilisent de petites matrices carrées non aléatoires dont les valeurs propres constituent le spectre



L'état des noyaux des gros atomes, l'espacement des nombres premiers sur l'ensemble des entiers (la suite de nombres sur la courbe rouge) et les scores à certains jeux de cartes, tels que la réussite (la courbe rouge représente la probabilité des scores possibles) sont gouvernés par les mêmes lois de distribution que les valeurs propres des matrices aléatoires.

de l'atome. Pour de gros atomes, le calcul est fastidieux.

Dans les années 1930, Eugène Wigner, qui reçut le prix Nobel en 1963, a proposé d'utiliser les matrices aléatoires pour calculer le spectre de gros atomes, tels que l'uranium. Cette technique est fondée sur le principe ergodique, mis au point par Josiah Gibbs, qui stipule que l'étude d'un grand nombre d'états d'un atome – en fonction de l'énergie – est identique à l'étude du même grand nombre d'atomes à un instant donné. L'état de chacun des atomes est représenté par une matrice. Un gros atome peut être dans de nombreux états selon celui de chacune des particules qui le composent (par exemple, un atome d'uranium est composé de 714 quarks et de 92 électrons) : les matrices sont alors considérées comme aléatoires. En calculant les valeurs propres de certaines

de ces matrices aléatoires ayant une symétrie par rapport à leur diagonale, les physiciens calculent statistiquement le spectre des gros atomes.

L'énigme de la répartition des valeurs propres des matrices aléatoires sera-t-elle résolue grâce au jeu de solitaire ou à la physique quantique des gros atomes ? Les mathématiciens des nombres espèrent aussi beaucoup de l'élucidation de cette loi de probabilité. En effet, en 1859, Bernhard Riemann a défini une fonction décrivant la répartition des nombres premiers (divisibles seulement par 1 ou par eux-mêmes) dans l'ensemble des entiers. L'espacement des nombres premiers est défini par les solutions d'une équation à deux inconnues où intervient cette fonction. Sans pouvoir le prouver, Riemann avait établi une condition numérique sur l'une des inconnues de cette

équation. Aujourd'hui, les ordinateurs confirment cette condition, mais la démonstration résiste encore aux mathématiciens.

D'après Andrew Odlyzko, des Laboratoires AT&T, les solutions de la deuxième inconnue de cette équation se répartissent de la même façon que les valeurs propres des matrices aléatoires. Le mathématicien en conclut que ces solutions seraient les valeurs propres d'un ensemble de matrices aléatoires encore inconnu.

Avec une certaine ironie, un outil mathématique dont le comportement est encore inexplicable, expliquerait les comportements aussi variés que ceux des gros atomes, de certains jeux de cartes, de lois économiques, et des solutions d'un problème d'arithmétique que les mathématiciens tentent de résoudre depuis 140 ans.

Mystérieux nuages

Au cœur de la Galaxie, des nuages de gaz révélés par les pulsars.

Depuis la découverte des pulsars, en 1967, les astronomes étudient ces astres en rotation rapide dont le rayonnement radio balaye la Terre, comme le faisceau d'un phare balaye les flots. Ces études ne révèlent pas seulement les caractéristiques de ces objets, mais aussi celles du gaz situé entre nous et les pulsars observés. Ainsi, nous avons observé, dans le domaine radio, une scintillation d'un pulsar due au passage de gigantesques nuages de gaz ionisés sur la ligne de visée du pulsar.

Lorsque l'on observe les étoiles, leur lueur nous apparaît vacillante : elles scintillent en raison de la turbulence dans l'atmosphère terrestre. De même, la scintillation de l'émission radio des pulsars révèle la turbulence du milieu interstellaire, milieu ténu, principalement constitué d'hydrogène ionisé (une dizaine de protons ou d'électrons par litre).

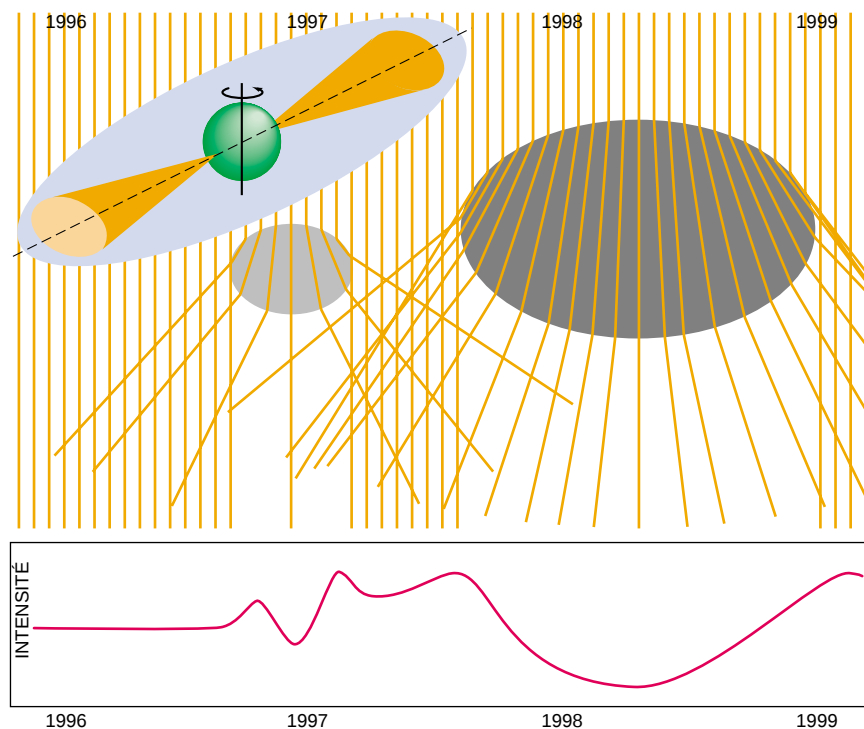
Depuis dix ans, afin d'étudier cette turbulence, les astronomes chronomètrent le rayonnement radio des pulsars les plus rapides, dont la période de rotation est de l'ordre de la milliseconde. Au radiotélescope de Nançay, notre équipe étudie le pulsar J1643-12 depuis trois ans. Voici deux ans, nous avons remarqué une forte diminution de l'intensité du rayonnement du pulsar. Quelles peuvent être les raisons de cette diminution ?

Cet événement, nommé scintillation forte, résulte vraisemblablement du pas-

sage entre le pulsar et la Terre d'un nuage ionisé, beaucoup plus dense que le milieu ambiant : lors de son passage, le nuage agit comme une lentille divergente qui réfracte le rayonnement radio du pulsar (l'indice de réfraction du nuage est supérieur à celui du milieu ambiant). Alors que l'on s'attendait à une remontée de l'intensité radio à son niveau initial après quelques mois d'affaiblissement, à notre grande sur-

prise, une diminution accrue a suivi une légère remontée. Finalement, après 24 mois, l'intensité est revenue à son niveau antérieur. Cette scintillation est la plus longue jamais observée.

À l'aide des lois de la réfraction de l'optique géométrique, applicables aux rayonnement radio, nous avons établi un modèle physique du «nuage-lentille» interposé entre le pulsar et la Terre. Pour rendre



Le pulsar J 1643-12 est analogue à une balise radio qui envoie des signaux à intervalles réguliers (ovale violet). Les rayons radio émis à intervalles réguliers sont réfractés par des nuages de gaz ionisé, plus denses que le milieu ambiant, qui passent entre le pulsar et la Terre. Comme les nuages se déplacent, l'intensité reçue par le radiotélescope varie au cours du temps (courbe rouge).

Scorpions polyandres

Pour avoir une belle progéniture, une femelle doit-elle être versatile? La femelle d'un pseudoscorpion tropical *Cordyllochneres scorpioides* féconde ses œufs avec du sperme provenant de différents mâles. Des biologistes américains ont observé que la femelle refusait de s'accoupler avec le même mâle dans les heures qui suivaient le premier accouplement, mais acceptait la copulation avec les autres. Cette discrimination disparaît 48 heures après le premier accouplement.

Un petit ver à tous

Les biologistes ont annoncé qu'ils avaient séquencé le code génétique complet d'un organisme, un ver microscopique dénommé *Caenorhabditis elegans*. Le génome de ce ver contient 97 millions de bases dans plus de 19 000 gènes. Ces informations, qui régissent le développement et le comportement du ver, devraient de plus éclairer d'une lumière nouvelle l'évolution des organismes multicellulaires. Ce travail constitue un entraînement pour le décodage du génome humain, lequel sera séquencé complètement au début du siècle prochain.



Beurre tendre

Quoi de plus agaçant que d'essayer d'étaler sur une biscotte un morceau de beurre sorti du réfrigérateur? Une équipe australienne a éliminé cette difficulté en produisant un beurre appauvri en graisses saturées dures, s'étalant mieux que le beurre ordinaire. Pour cela, ils ont mis au point des aliments spéciaux pour les vaches, enrichis en graisses mono- et polyinsaturées. Un enrobage par des protéines empêche la dégradation de ces graisses dans la panse des vaches : on les retrouve alors dans le lait qui donne un beurre plus malléable.

Troupeaux de poissons

Les bancs de thons se rassemblent sous les objets flottant en pleine mer. Les pêcheurs sénégalais tirent avantage de ces caractéristiques : pendant la saison de pêche, de juillet à février, des bateaux se relaient pour maintenir sous eux les bancs de thons qui fréquentent la côte mauritanienne. Le poisson est ainsi plus facilement pêché à la canne, et les petits pêcheurs résistent à la concurrence des gros navires thoniers qui pêchent au filet.

compte des variations d'intensité du pulsar, nous avons modélisé la lentille divergente par deux nuages traversant successivement la ligne de visée.

Ainsi, nous avons établi que le premier nuage a une dimension transverse de deux milliards de kilomètres et que le second a une extension de neuf milliards de kilomètres, soit l'équivalent du diamètre de l'orbite de Jupiter. Leur densité est égale à respectivement 30 000 électrons par litre et 500 000 électrons par litre. D'autres explications, telle la turbulence du milieu interstellaire, ont été écartées : on a calculé que la probabilité que les tourbillons du milieu interstellaire expliquent les observations est inférieure à un millionième.

Comment des nuages denses survivent-ils dans un milieu aussi ténu? En fait, ils finissent par se dissiper. En estimant leur température à 8 000 kelvins, voisine de celle du milieu ambiant, on calcule que la pression à l'intérieur du nuage est 10 000 fois supérieure à ce qu'elle est à l'extérieur : les nuages se dissipent rapidement (une trentaine d'années pour le premier nuage).

D'autres nuages plus petits et plus nombreux avaient déjà été découverts auparavant dans les directions des deux pulsars millisecondes B1937+21 et B1821-

24 observés à Nançay. Sur ces lignes de visée, les événements détectés ont une durée moyenne d'un mois environ, la taille des nuages est donc inférieure (environ 100 millions de kilomètres), ce qui entraîne une durée de vie avant dissipation de l'ordre de six mois. Si l'on extrapole ces résultats à l'ensemble de la Galaxie, on en déduit que ces petits nuages sont très nombreux (quelques millions par année-lumière au cube) et qu'il s'en fabrique continuellement de nouveaux (près de dix millions par année-lumière au cube et par an). Quels mécanismes créent ces nuages en si grande quantité?

Le mécanisme le plus probable est la compression des enveloppes de nuage d'hydrogène atomique neutre par des ondes de choc qui se meuvent dans la Galaxie, que ces dernières résultent de l'explosion des étoiles en supernovae, de vents stellaires ou de novae (les étoiles dont les couches superficielles sont éjectées). Toutefois la statistique est encore incertaine : les astronomes ont vu de tels événements devant trois pulsars seulement. Pour confirmer ce mécanisme de formation ou pour en invoquer un autre, l'analyse de nouveaux événements sera nécessaire.

Véronique MAITIA, ARPEGES, Observatoire de Meudon

Un virus contre le cancer

Les parvovirus stoppent la progression tumorale chez l'homme.

Les parvovirus sont de tout petits virus qui se multiplient très rapidement dans certaines cellules qu'ils finissent par tuer : en quelque 48 heures, une unique cellule libère plus de 500 particules virales. Ces virus ont la particularité de se multiplier spécifiquement dans les cellules cancéreuses et, par conséquent de les détruire. Les premiers essais cliniques viennent de montrer qu'ils bloquent la progression des tumeurs chez l'homme.

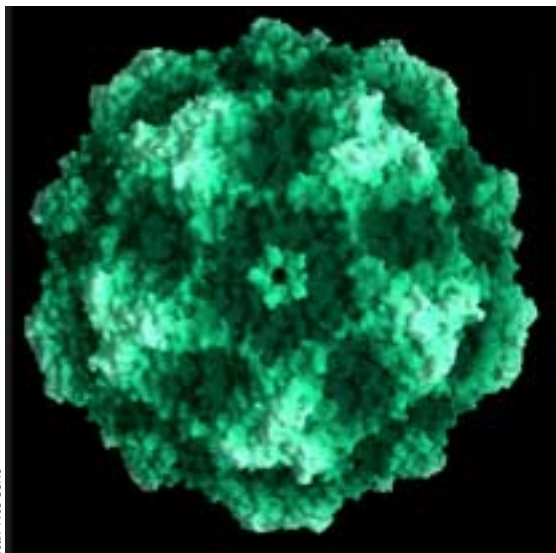
Ces virus infectent tant les vertébrés que les invertébrés. Ils sont très résistants et persistent longtemps dans l'environnement. Les parvovirus animaux ne sont pas pathogènes pour l'homme, mais cinq pour cent de la population environ ont des anticorps contre ces virus, signe d'une infection passée.

Il y a une trentaine d'années, on avait observé que les parvovirus ont la capacité de faire régresser les tumeurs, chez

l'animal. Malgré les résultats obtenus, les expériences avaient été abandonnées en raison de la difficulté à fabriquer des particules virales en quantité suffisante.

L'équipe de Dominique Stéhelin et de Thierry Dupressoir, à l'Institut de biologie de Lille, a repris ces expériences en collaboration avec le groupe de Jean Rommelaere, du Centre anticancéreux de Heidelberg. Ainsi, les parvovirus infectent toutes les cellules, mais ne se multiplient que dans les cellules tumorales qu'ils détruisent. *In vitro*, les cellules tumorales sont détruites par les parvovirus, quasiment quel que soit le type de cellules tumorales (plus de 90 pour cent des lignées cellulaires cancéreuses sont sensibles).

Devant l'intérêt apparent de la méthode, des essais cliniques de phase I ont été entrepris chez l'homme (les essais de phase I ne visent pas à tester l'efficacité du traitement, mais son absence de toxicité). Ces premiers essais ont été pratiqués dans le service de Thomas Tursz, à l'Hôpital Gustave Roussy, à Villejuif, sur des malades cancéreux résistant à tous les traitements existants. Ils ont reçu jusqu'à trois injections intratumorales de parvovirus réparties sur un mois.



Jean-Yves SGRO

Parvovirus canin.

Ces injections n'ont eu aucun effet secondaire à l'exception d'une poussée de fièvre indiquant une infection virale. Les doses administrées ont été bien supportées, et n'ont pas atteint la «dose maximale tolérée», celle au-delà de laquelle les effets secondaires indésirables apparaissent.

Le virus envahit toutes les tumeurs ou métastases, quelle que soit leur localisation. On a constaté un arrêt de la croissance de certaines métastases, mais pas de régression, sans doute parce que la dose administrée n'était pas assez élevée ou que le traitement n'a pas été assez long.

Le génome de ces virus ne s'intègre pas au génome des cellules infectées. C'est à la fois un avantage – une fois les cellules tumorales détruites, il disparaît de l'organisme – et un inconvénient, car si une cellule tumorale a eu

le temps de se diviser avant de disparaître sous l'effet de la multiplication virale, le génome viral n'est pas transmis aux cellules filles, elles-mêmes tumorales. Enfin, contrairement aux traitements dont on dispose aujourd'hui pour traiter le cancer, qui détruisent les cellules tumorales, mais aussi de nombreuses cellules saines, un traitement par les parvovirus serait parfaitement ciblé sur les cellules tumorales.

Pour ajouter aux parvovirus une seconde corde à leur arc thérapeutique, l'équipe de Lille tente de les utiliser aussi comme vecteur en thérapie génique.

Ils introduisent dans le génome viral un gène qui bloque l'angiogenèse, c'est-à-dire la formation des nouveaux vaisseaux sanguins indispensables à l'alimentation et à la croissance des tumeurs. Une protéine bloquant l'angiogenèse empêcherait la formation de ces néovaisseaux. Les parvovirus ainsi modifiés auraient une double action : ils détruiraient les cellules tumorales en cours de multiplication et feraient régresser les tumeurs établies en les «asphyxiant», le réseau sanguin ne pouvant plus se développer. Aujourd'hui, le principal obstacle à la méthode est la production des virus purifiés. Comme ils tuent les cellules tumorales où ils se multiplient, on doit remplacer sans cesse le milieu de culture tout en récupérant le maximum de particules virales intactes, et le rendement est médiocre.

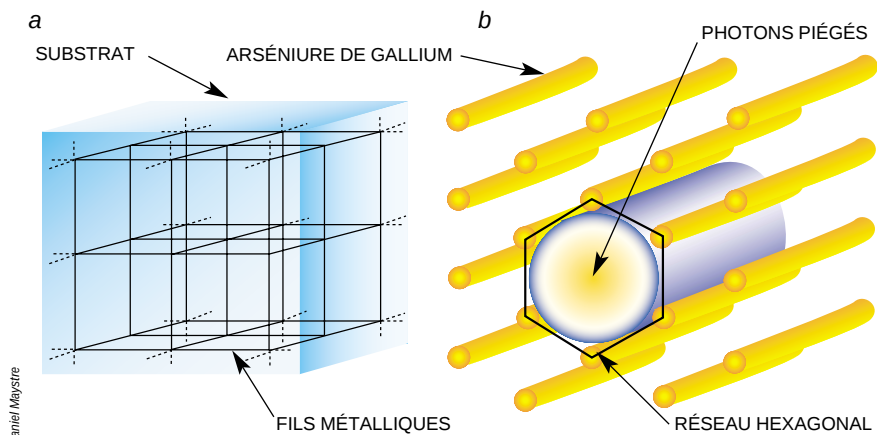
Les cristaux photoniques

Les cristaux photoniques, dont on sait aujourd'hui prévoir les performances, remplaceront-ils les fibres optiques?

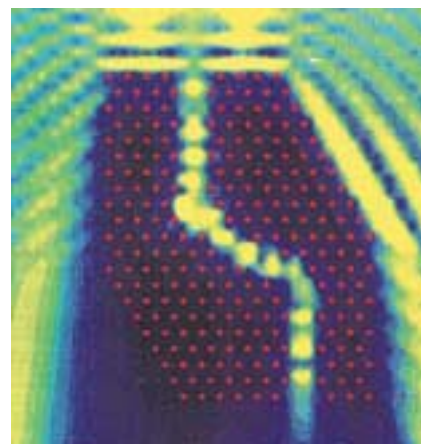
Quel est le point commun entre un électron et un photon lorsqu'ils se trouvent dans une structure atomique ou moléculaire périodique? Tous deux risquent d'y être piégés. Pour l'électron, ces arrangements sont connus depuis longtemps sous le nom de cristaux. En revanche, les structures capables de piéger des

photons ne sont connues que depuis une dizaine d'années seulement. Par analogie, elles sont nommées cristaux photoniques. Cependant, leur fabrication restait hasardeuse tant qu'aucune théorie n'en déterminait les performances. Récemment, l'équipe de Daniel Maystre et de Gérard Tayeb, au Laboratoire d'optique électromagnétique de Marseille, a mis au point, d'une part, des méthodes de prédiction fiables du comportement d'un cristal photonique avant sa construction et, d'autre part, des structures nouvelles qui orientent les photons piégés dans une direction précise.

Les cristaux photoniques sont caractérisés par une gamme de longueurs d'ondes, correspondant à des photons



1. Un cristal photonique métallique (à gauche) est constitué d'un réseau de mailles cubiques inclus dans un substrat transparent. Un cristal photonique diélectrique (à droite) est composé d'un arrangement régulier, par exemple hexagonal, de tiges cylindriques d'une matière à fort indice de réfraction. L'élimination d'une de ces tiges crée un canal (cylindre bleu) d'où les photons ne peuvent s'échapper : ils sont conduits de la source à l'extrémité ouverte.



2. Carte d'énergie lumineuse autour d'un cristal photonique (disques rouges). Le jaune et le vert symbolisent les densités d'énergie les plus élevées. La lumière ne pénètre dans le cristal que dans le canal creusé par le retrait de tiges.

incapables de se propager à l'intérieur du cristal. Les photons aux longueurs d'onde interdites sont renvoyés vers l'extérieur du cristal, alors que les autres pénètrent à l'intérieur et se propagent après diffraction. Les physiciens de Marseille ont effectué les modélisations théoriques et numériques de deux types de cristaux photoniques : les cristaux diélectriques et les cristaux métalliques. Ces derniers sont constitués d'un réseau de fils métalliques, de cuivre ou d'acier, dont les mailles ont une forme cubique (voir la figure 1a). La longueur d'arête est de l'ordre de quelques millimètres et le diamètre des fils est d'environ un vingtième de millimètre. La légèreté et les performances des cristaux photoniques métalliques en font des matériaux de choix pour fabriquer des supports pour les antennes embarquées sur les satellites. Inclus dans un substrat transparent, le maillage de fils métalliques éliminerait les signaux

nuisibles engendrés par la réflexion des ondes sur les supports aujourd'hui utilisés.

Les cristaux diélectriques bidimensionnels sont constitués de tiges transparentes d'une matière à fort indice de réfraction, disposées de façon périodique (voir la figure 1b), ou au contraire par des colonnes d'air creusées dans un matériau transparent. Par exemple, des tiges d'arséniure de gallium (matériau utilisé par ailleurs pour ses propriétés semi-conductrices) sont agencées selon une structure hexagonale : chaque tige est à égale distance, environ un micromètre (millionième de mètre), de six autres.

En retirant une ou plusieurs des tiges du réseau, on crée une cavité, parallèle ou perpendiculaire à l'axe des tiges, d'où aucun photon émis à l'intérieur ne s'échappe : ils sont contraints de suivre le canal (voir la figure 2). Les physiciens espèrent utiliser ces cristaux photoniques

diélectriques pour améliorer les performances des diodes électroluminescentes utilisées, par exemple, dans l'élaboration des panneaux publicitaires, ou des lasers. Pour ces derniers, les cristaux photoniques élimineraient les émissions spontanées, non désirées et inutiles pour l'effet laser recherché, de photons par les atomes excités.

Par ailleurs, les cristaux photoniques diélectriques présentent des avantages par rapport aux fibres optiques. En effet, ils sont moins sensibles aux courbures et peuvent être pliés fortement sans pertes importantes de lumière.

Aujourd'hui, les physiciens étudient les moyens de concentrer le flux de photons à la sortie du cristal photonique. Par exemple, en dilatant la structure selon l'axe vertical, les photons circuleraient, dans une cavité créée par le retrait d'une tige, dans une direction privilégiée dans laquelle ils s'échapperaient à la sortie du cristal.

Traces de lait

Du lait conservé dans des poteries anciennes.

Le lait est le premier aliment consommé par l'homme. Quand a-t-il eu l'idée de consommer celui des animaux, puis de le transformer en yaourt, en fromage ou en beurre pour mieux le conserver ? Les archéologues peuvent enfin aborder directement cette question : Stephanie Dudd et Richard Evershed, de l'Uni-

versité de Bristol, ont trouvé comment prouver la présence de lait dans des poteries archéologiques.

Les plus anciennes preuves de la collecte et du traitement du lait par l'homme sont des scènes agricoles représentées sur des sceaux ou peintes dans des temples de la fin du IV^e millénaire avant notre ère ou du début du III^e, en Égypte et en Mésopotamie. Toutefois, ces activités sont probablement plus anciennes, comme en témoignent des indices archéologiques. Ainsi, des récipients perforés, en céramique, découverts sur le site néolithique de

Clairvaux, dans l'Ain, seraient des faisselles (moules à fromage), qui indiqueraient la production de fromage. Sur le site de Combe Obscure, dans le Sud-Est de la France, l'analyse des ossements d'animaux domestiques a révélé l'abattage fréquent de jeunes animaux non sevrés il y a 6 000 ans : le lait des chèvres et des brebis était vraisemblablement consommé par les hommes.

Comment retrouver des traces directes de l'exploitation du lait à ces périodes anciennes ? Au cours de leur utilisation, les récipients en céramique qui n'ont pas été glaçurés ni recouverts