

Tourner autour du mot

Les mots qu'on a sur le bout de la langue résultent d'un manque temporaire de coordination entre divers domaines du cerveau.

Définition : renoncer au trône, en huit lettres. Vous le savez, c'est certain, vous avez le mot sur le bout de la langue, mais vous ne pouvez l'énoncer. Les noms des capitales, des ministres, ou des mots peu usités nous échappent souvent. Quand, malgré nos efforts, un mot continue à se dérober, il fait naître un sentiment de frustration. Cette incapacité de prononcer un nom connu est fréquente chez les personnes âgées. Elles s'en plaignent et considèrent qu'elle détériore leurs relations sociales : elle est perçue comme une marque de sénilité. Vous avez trouvé ? *Abdiquer*. « Ah, bien sûr ! ». Pourquoi donc ne l'avez-vous pas dit plus tôt ?

Ces mots qui résistent à l'énonciation sont une aubaine pour les psychologues. Ils les exploitent pour expliquer la production de la parole. La majorité des modèles de production de la parole séparent les mémoires sémantique (le sens du mot), lexicale (le mot lui-même) et phonologique (les sons associés au mot). En résumé, une parole spontanée fait d'abord intervenir l'examen des ressources sémantiques (« Voilà ce que je veux dire »), puis un choix parmi les ressources lexicales (« Voilà les mots qui conviennent pour le dire ») et enfin, la sélection de la représentation phonologique associée à ce mot.

Lori James et Deborah Burke, psychologues à l'Université de Los Angeles et de Ponom College, ont montré que les mots qu'on a sur le bout de la langue proviendraient d'une difficulté à faire appel aux représentations phonologiques des mots. Jusqu'à présent, on admettait qu'un mot résiste à l'énonciation quand un autre mot interfère avec lui, créant un blocage. Après deux expériences qu'ils ont menées avec plus de 100 sujets, L. James et D. Burke réfutent cette hypothèse. La

moitié des sujets étaient des jeunes d'une vingtaine d'années, l'autre moitié des personnes âgées de 72 ans en moyenne.

Dans la première expérience, le sujet était placé devant un ordinateur et dix mots s'affichaient, les uns après les autres, sur l'écran. Le sujet devait prononcer chaque mot à voix haute. À la fin de la liste, une question apparaissait. La réponse à cette question était un mot connu, mais peu utilisé, tel *amnistie*, *vaudeville*... Le sujet donnait la réponse, annonçait qu'il l'ignorait ou alors qu'il la connaissait sans pouvoir la formuler. Dans ce dernier cas, on lui soumettait trois mots, parmi lesquels figurait la bonne réponse, pour vérifier qu'il la connaissait bien.

La liste des mots à énoncer contenait soit des mots qui partageaient un ou deux phonèmes avec la réponse, par exemple *abject*, le mot à trouver étant *abaque* ou *marinade* pour *sérénade* ; soit des mots choisis au hasard sans lien avec la réponse. L'exercice de prononciation des dix mots corrélés phonétiquement à la réponse diminue la proportion de mots que les sujets ont sur le bout de la langue : il augmente aussi la proportion de bonnes réponses. La répétition des mots ayant des phonèmes semblables renforce dans le cerveau les liens entre le mot que l'on veut dire et sa représentation phonologique.

Dans la deuxième expérience, le sujet était toujours face à l'écran, mais on lui posait d'abord la question destinée à lui faire énoncer un mot peu usité. Quand il répondait qu'il ne savait pas ou qu'il avait le mot sur le bout de langue, alors seulement on lui faisait énoncer, un à un, les dix mots de la liste. Quand la liste contenait des mots reliés phonologiquement au mot recherché, le nombre de réponses correctes augmentait, mais seulement quand le sujet disait avoir le mot sur le bout de la langue (pas quand il disait ignorer la réponse). Ce résultat confirme que la liste de mots reliés ravive le lien entre le mot activé dans le registre lexical et sa représentation phonologique. En revanche, quand le sujet disait ne pas connaître la réponse, aucun stratagème ne l'aidait. Par ailleurs, l'effet d'activation par la répétition de phonèmes identiques à la réponse fonctionne aussi bien dans les groupes des jeunes et des personnes âgées : cet effet semble indépendant de l'âge.

Quand on a un mot sur le bout de la langue et qu'au prix d'efforts, on parvient à le prononcer, le cerveau a probablement produit d'autres mots aux phonèmes similaires dont on n'a pas conscience ; il « tourne autour du mot » jusqu'à activer la représentation sonore correcte. Plus on utilise le langage, plus on augmente ses chances de préserver longtemps les liens entre les différents domaines cérébraux. Soyez bavards !

BRÈVES

Arsenic et vieilles fougères

Comment débarrasser certains sols riches en arsenic, tels des sites industriels, du poison qu'ils contiennent ? Des équipes américaines ont peut-être la solution : ils ont découvert que les plants de la fougère *Pteris vittata*, commune dans les régions tempérées, extraient du sol et stockent dans leurs feuilles de grandes quantités d'arsenic, sans en souffrir. Non seulement cette fougère décontaminerait les sols pollués, mais sa croissance semble favorisée par l'arsenic.



Menace d'éruption du Mont Fuji

Le Mont Fuji, au Japon, connaît un regain d'activité volcanique depuis six mois. Au mois d'octobre 2000, 133 séismes de faible amplitude ont été enregistrés, et 221 au mois de novembre, tandis que les sismologues n'en comptaient pas plus de 10 par mois en moyenne au cours des années précédentes. Ces séismes, imperceptibles, mais d'une durée de 30 minutes, sont considérés par les sismologues japonais comme les signes annonciateurs d'une éruption. Le Mont Fuji appartient à une chaîne volcanique qui comprend le Mont Oyama, entré en éruption en juin 1999, et les îles de Shikine, Kozu et Niiijima, également soumises à des séismes depuis quelques mois. La dernière éruption du Mont Fuji remonte à 1707.

Être humain

Qu'est-ce qui fait de nous des humains ? Probablement, la capacité, entre autres, de décoder chez les autres les signes de gaieté, de déception, d'ironie... Ces capacités d'identification des sentiments d'autrui seraient localisées dans le cortex préfrontal droit. C'est ce qu'ont montré Donald Stuss et son équipe de l'Université de Toronto après avoir étudié 32 personnes dont les lobes frontaux étaient endommagés à la suite d'un accident. Au cours d'un des tests, on demandait aux patients de deviner sous quelle tasse était cachée une petite balle. Pour les aider, un assistant exprimait soit la déception lorsque la personne allait soulever la mauvaise tasse ou, au contraire, la satisfaction si c'était la bonne tasse. Contrairement aux sujets témoins, les personnes qui ont des lésions dans le cortex préfrontal droit ne percevaient pas les messages que véhiculent les mimiques.



Brevet lipogramme

Le brevet d'invention numéro 2 795 457, délivré à son inventeur, Robert Signore, par le très sérieux Institut national de la propriété industrielle, porte sur un dispositif propulsif utilisant un corps noir. Rien de bien exceptionnel? Que si : le brevet tout entier est un lipogramme, le texte ne comportant, comme son titre, aucune lettre *e*. Ce fait d'armes digne des écrivains qui ont fondé l'ouvrage de littérature potentielle, réconcilie définitivement deux cultures trop longtemps séparées, la technique et la littérature.

La vie en rose

Les personnes extraverties, optimistes et sociables réagissent plus aux images positives que les personnes plus renfermées et inquiètes, d'après une étude par IRM (imagerie par résonance magnétique) fonctionnelle menée par Turhan Canli et son équipe de l'Université de Stanford. Ces psychologues ont évalué le degré d'extraversion de 14 femmes, puis leur ont présenté des images négatives (des scènes de guerre, des cimetières...) ou positives (des couples heureux, des crèmes glacées...) pour déclencher des réactions émotionnelles. Le cerveau des femmes les plus extraverties réagit plus aux images positives (signaux plus intenses et plus nombreux) qu'aux images négatives ; les femmes les moins extraverties ne réagissent pas aux images positives. Certaines personnes voient vraiment plus la vie en rose que d'autres...

Les neurones du grattage

Quelles sont les bases neuronales des démangeaisons? Existe-t-il des voies neuronales séparées pour la douleur et pour le prurit? Ce sont des sensations différentes, mais intimement liées : les substances opiacées, par exemple, réduisent les sensations douloureuses, mais peuvent déclencher des démangeaisons ; inversement un stimulus douloureux peut inhiber le prurit. Des neurobiologistes de l'Institut Barrow, à Phoenix, ont découvert des neurones de la moelle épinière, connectés au thalamus (qui transmet les informations sensorielles au cortex), et spécifiquement associés aux démangeaisons. Connaissant ces neurones, on trouvera sans doute des substances spécifiques pour inhiber le prurit associé à certaines maladies de la peau, du foie ou du rein.



Lente lumière

Les physiciens ralentissent la lumière dans un milieu ultrafroid.

Debout sur un quai de gare, un voyageur est intrigué par une sorte de soie iridescente tendue en travers de la voie. Voilà qu'un TGV surgit et fonce vers le tissu. Le voyageur n'en croit pas ses yeux : au lieu de déchirer la soie, le train y disparaît en quelques secondes, puis, aussi soudainement qu'il a disparu, il réapparaît dans toute sa longueur de l'autre côté de la soie avant de disparaître au loin.

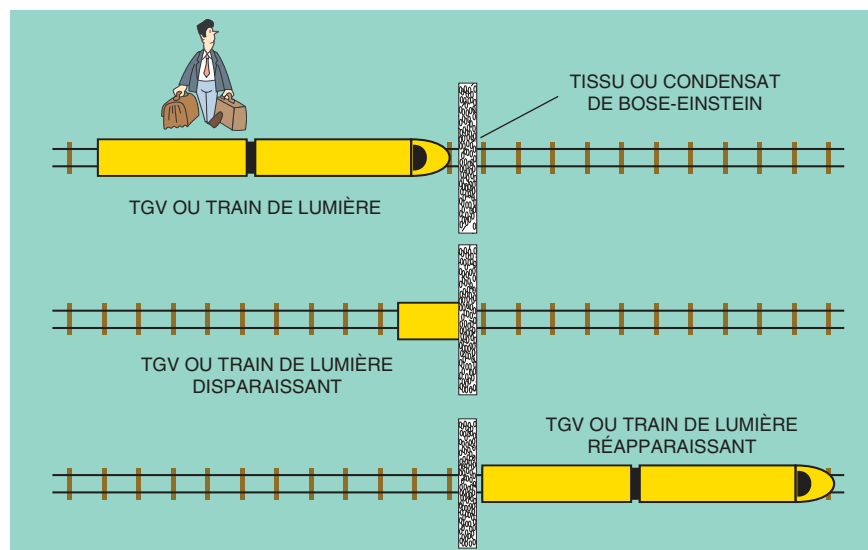
Cette scène fait penser à un effet spécial de cinéma plutôt qu'à la physique. Elle illustre pourtant à merveille les jeux de trains de... lumière auxquels se livre le groupe de Lene Vestergaard Hau, à l'Université d'Harvard. Ces physiciens réduisent la vitesse de la lumière en exploitant les interférences optiques dans un milieu qu'ils ont préparé. Ils sont parvenus à ralentir les photons à une vitesse de seulement 17 mètres par seconde... celle d'un cycliste. Dans une autre expérience, ils stockent dans ce milieu l'image d'un train de lumière, qu'ils régénèrent à volonté.

Pour ralentir la lumière, le groupe de Harvard contrôle la transparence d'un nuage d'atomes de sodium ultrafroids à l'aide d'un laser. Rappelons que si la lumière se propage plus lentement dans un milieu transparent que dans le vide, c'est parce qu'elle y crée des interférences. En se propageant, elle excite les atomes du milieu, modifie le mouvement de leurs

électrons et leur fait diffuser à leur tour de la lumière qui interfère avec le rayonnement incident. Il en résulte une réduction de la vitesse des paquets de photons qui traversent le milieu. Ainsi, dans le verre, la lumière ne dépasse pas 200 000 kilomètres par seconde, soit les deux tiers de sa vitesse dans le vide.

Dans le nuage d'atomes de sodium, la vitesse de groupe des photons n'excède pas un dix millionième de sa valeur dans le vide ! Pour la réduire à ce point, les physiciens contrôlent la transparence d'un milieu constitué d'atomes de sodium ultrafroids à l'aide d'un « laser de contrôle ». Le faisceau du « laser d'essai », celui qui émet les trains de lumière étudiés, est combiné à celui du laser de contrôle. Les photons issus du faisceau combiné excitent les atomes de sodium dans un état particulier, l'état noir. Malgré ce nom, un nuage d'atomes de sodium excités dans cet état quantique laisse passer la lumière. Les photons du faisceau combiné excitent de cette façon certains atomes de sodium ou interfèrent avec les photons émis par d'autres atomes qui se dés excitent. Ils produisent des interférences destructives qui réduisent à l'extrême la vitesse de groupe des photons du laser d'essai.

Qu'observent les physiciens ? Trois microsecondes d'émission du laser d'essai produisent, par exemple un train de lumière de presque un kilomètre de longueur. Les physiciens le joignent au faisceau continu du laser de contrôle, puis l'envoient dans le nuage d'atomes de sodium, épais de 0,3 millimètre. Ils constatent alors que le train de lumière disparaît dans le milieu ; il y chemine pendant une dizaine de microsecondes, avant de réapparaître quasi identique à lui-même, bien qu'atténué.



Les physiciens ont réussi à freiner la lumière, au point qu'elle reste piégée dans un milieu adapté ; on parvient à la restituer, identique à elle-même. C'est comme si un TGV s'engloutissait dans un morceau de tissu, y disparaissait quelques secondes et réapparaissait, identique à lui-même, de l'autre côté du tissu.

Les physiciens d'Harvard portent des atomes de sodium à une température extrême : moins d'un millionième de degré au-dessus du zéro absolu. Ils s'affranchissent ainsi des effets parasites de l'agitation thermique. Ces atomes froids s'accumulent tous dans leur état de plus basse énergie, nommé l'état fondamental. Ils forment alors un condensat de Bose-Einstein, un état où ils se comportent de façon collective, dite cohérente. Des photons issus d'une source lumineuse fournissent un autre exemple d'ensemble de particules cohérentes.

Les physiciens ont voulu étudier comment la cohérence d'un train de photons est transmise à un tel groupe d'atomes cohérents. Pour ce faire, ils arrêtent le laser de contrôle à l'instant même où un train de lumière disparaît dans l'échantillon. Puis, ils attendent une demi-milliseconde avant de rétablir le laser de contrôle. Pour des photons, une demi-milliseconde est une éternité ; dans

le vide, elle leur suffit pour parcourir 150 kilomètres. Pourtant, dès que le laser de contrôle fonctionne à nouveau, le train de lumière émerge du milieu gazeux, comme si aucune interruption n'avait eu lieu.

Que s'est-il passé ? En l'absence du faisceau de contrôle, le gaz d'atomes de sodium n'est plus transparent (puisque c'est le faisceau de contrôle qui rend le milieu transparent), de sorte que la lumière ne peut plus s'y propager. Que reste-t-il alors du train de lumière initial ? Seulement l'information relative à sa cohérence, qui s'imprime dans le condensat. L'holographie repose sur un phénomène analogue. Proche de la photographie, cette technique permet de stocker des images tridimensionnelles. Dans ce cas aussi, un milieu récepteur enregistre les informations sur la forme de l'objet holographié ; celles-ci sont restituées quand on éclaire le milieu récepteur avec un faisceau cohérent.

L'équipe de Lene Vestergaard Hau a mis en évidence qu'il fallait un milieu récepteur cohérent pour enregistrer un train de lumière cohérent. Une fois stockée, cette information reste inscrite dans le condensat d'atomes aussi longtemps que l'agitation thermique ne la détruit pas. Dans un nuage d'atomes ultrafroids, ce temps est extrêmement long (à l'échelle de temps des phénomènes optiques), puisque pratiquement aucune agitation thermique n'y règne.

L'empreinte du train de lumière y reste disponible, prête à s'imprimer dans le rayonnement du laser de contrôle, une fois celui-ci rétabli. Éteignant, puis rallumant par intervalles leur laser de contrôle, les physiciens ont même montré que des lectures successives sont possibles. Ils espèrent que leur dispositif ouvrira la voie à la réalisation de systèmes de stockage d'informations cohérentes, précieux pour les futurs ordinateurs quantiques.

Des dents en éventail

Un petit dinosaure bipède d'un nouveau genre a été découvert à Madagascar.

À la fin du XIX^e siècle, le paléontologue français Charles Depéret décrit pour la première fois des fossiles de dinosaures provenant de Madagascar. Depuis, des fouilles épisodiques ont été menées, mais elles se sont intensifiées récemment, avec les travaux d'équipes de paléontologues américains au Nord-Ouest de l'île, dans des terrains datant de la fin du Crétacé (entre -73 et -65 millions d'années). Scott Sampson, du Musée d'histoire naturelle de Salt Lake City, Matthew Carrano et Catherine Forster, de l'Université de New York, viennent de découvrir un nouveau genre de dinosaure carnivore dans le bassin de la rivière Mahajamba ; ils l'ont nommé *Masiakasaurus knopfleri*. Ce nom vient du malgache *masiaka*, qui signifie violent ou haineux, et du nom du chanteur du groupe *Dire Straits*, Mark Knopfler, dont les compositions semblent avoir inspiré les découvreurs durant leurs fouilles sur le terrain.

Les paléontologues disposent de quelques dizaines d'os qui proviennent de six animaux (au moins) et représentent environ 40 pour cent d'un squelette de *Masiakasaurus*. L'animal était un petit dinosaure bipède carnivore qui mesurait environ 60 centimètres de hauteur et 1,8 mètre de longueur, du bout du museau

au bout de la queue. S. Sampson et ses collègues l'ont classé dans le groupe des abelisaurides, des dinosaures carnivores (théropodes) qui vivaient au Crétacé, sur des continents qui se trouvaient alors dans l'hémisphère Sud (notamment en Amérique du Sud, en Inde et à Madagascar) et en Europe de l'Ouest. Certains étaient très grands, tel *Carnotaurus*, qui mesurait environ huit mètres et vivait en Amérique du Sud. Dans la plupart des régions où ils vivaient, les abelisaurides occupaient presque toutes les niches écologiques de prédateurs, petits ou grands. En revanche, à la même époque, en Amérique du Nord et en Asie, les prédateurs appartenaient à d'autres familles de dinosaures carnivores, tels les Tyrannosauridés. D'un continent à l'autre, les dinosaures étaient d'espèces très différentes.

Masiakasaurus se distingue par ses dents de devant, en éventail et presque horizontales. Chez la plupart des autres théropodes, les dents sont plutôt verticales et servaient à découper de la viande : le régime alimentaire de *Masiakasaurus* devait être très différent. Cette disposition des dents existe chez certains mammifères actuels de la famille des Caenolestidés, des marsupiaux insectivores. *Masiakasaurus* était-il, lui aussi, insectivore ?

Dans les mêmes couches géologiques, les paléontologues ont découvert plusieurs espèces d'oiseaux et de

crocodiles, des dinosaures herbivores de la famille des Titanosauridés et un *Majungatholus*, un grand prédateur du même groupe que *Masiakasaurus*, mais aux dents bien plus classiques.

Les découvertes de dinosaures sur un continent austral sont exceptionnelles : aujourd'hui, nous n'avons qu'une connaissance médiocre de la diversité et de la paléobiologie des dinosaures en dehors de l'Amérique du Nord et de l'Europe. On estime connaître entre 5 et 15 pour cent des espèces de dinosaures qui ont vécu sur Terre. Les autres ont probablement vécu sur les continents du Sud, où les recherches paléontologiques sont encore rares.

Jean LE Lœuff, Musée d'Espéranza



Intelligence et douleur

Des souris transgéniques notablement plus intelligentes que les autres ont vu le jour il y a plusieurs mois. Elles produisent, en quantité supérieure à la normale, une protéine qui facilite l'apprentissage et améliore la mémoire. Cette superintelligence a son revers : les souris ont des réactions exacerbées face aux douleurs chroniques et prolongées. Elles sont plus sensibles à ce type de douleurs, mais conservent des réactions normales face à la douleur aiguë, une brûlure, par exemple. Cette découverte aura sans doute des conséquences non pas sur les éventuelles relations entre intelligence et douleur, mais plutôt sur les circuits de la douleur : quand on administre une substance qui inhibe les douleurs chroniques, la sensation de douleur aiguë, celle qui fait que l'on retire la main du feu, doit rester intacte.

Corail mal en point

Selon le dernier rapport du réseau mondial de surveillance des coraux, 16 pour cent des récifs coralliens du monde ont disparu en 1998, principalement dans l'océan Indien, le Sud-Est asiatique et le golfe Persique, tandis que l'océan Pacifique semble avoir été épargné. Cette destruction serait la conséquence d'épisodes El Niño et La Niña, ainsi que de l'augmentation de la température des océans. Environ 50 ans seront nécessaires au corail pour retrouver son ancien niveau... si on lui en donne l'occasion.



Virus de riz

La structure du virus de la panachure jaune du riz a été identifiée. Cette maladie, qui menace la riziculture irriguée en Afrique, est transmise par un coléoptère, et elle est due à un virus résistant et dévastateur. Les variétés cultivées dans les rizières africaines qui ont un rendement élevé, sont très sensibles au virus de la panachure jaune du riz. Après avoir identifié des variétés de riz résistantes à ce virus, les agronomes de l'IRD ont identifié des gènes de résistance à la maladie : ils bloquent la propagation du virus dans la plante. Aujourd'hui, la structure du virus est élucidée, des gènes de résistance sont identifiés : on devrait trouver comment éviter la propagation du virus en Afrique et éviter qu'il ne touche les rizières asiatiques, qui représentent près de 90 pour cent de la production mondiale.

Rivalité sexuelle

Les conditions climatiques semblent influencer sur les stratégies de reproduction des tortues des steppes.

Chez les tortues, mais aussi chez les mammifères, les mâles entrent en compétition pour la conquête des femelles. En général, les mâles les plus grands et les plus forts reçoivent davantage que les petits les faveurs des dames. Chez la tortue terrestre *Gopherus agassizii*, qui vit aux États-Unis, dans les zones désertiques, les grands mâles dominent les petits, remportent les combats et s'accouplent avec un nombre plus élevé de partenaires. Cette compétition explique en partie pourquoi les mâles sont généralement plus grands que les femelles chez la plupart des tortues terrestres. La tortue des steppes fait exception : les mâles sont plus petits que les femelles.

Leur carapace mesure en moyenne 12,5 centimètres, tandis que les femelles ont une taille moyenne de 16 centimètres. La période d'accouplement ne dépasse pas trois semaines, à cause de l'environnement désertique, et les mâles s'affrontent parfois plusieurs fois par jour, pendant plus d'une heure, dans de violents combats. Alors que les grands mâles devraient être avantagés, pourquoi sont-ils plus petits que les femelles ? Pour le savoir, nous avons observé les tortues de la réserve de Boukhara, en République d'Ouzbékistan. Nous avons étudié 56 groupes de trois mâles adultes – un petit, un moyen et un grand – dans un enclos. Nous y avons introduit une femelle, pour observer les différents comportements de parade et de combat des mâles. Comme les altercations se soldent souvent par le retournement de l'un des adversaires sur la carapace, nous avons placé 49 tortues mâles sur le dos, pour déceler une éventuelle relation entre la taille et la capacité qu'ont les tortues à se remettre sur leurs pattes. Force nous a été de constater que taille, capacité de retournement, intensité de la parade et efficacité au combat sont indépendantes. Quelle que soit leur taille, les mâles accèdent également aux femelles (tout du moins dans l'enclos). Sur le terrain, le nombre de partenaires qu'un mâle rencontre dépend de l'in-

tensité avec laquelle il prospecte son territoire : les grands mâles, plus rapides, sont peut-être favorisés.

En mesurant l'écart entre les stries, sur les carapaces des tortues, nous avons montré que la croissance des jeunes tortues varie en fonction des conditions météorologiques. Les stries des tortues, comme les cernes des troncs d'arbres, reflètent la rapidité de la croissance, laquelle dépend directement des conditions climatiques. Elles sont très variables d'une année à l'autre : il tombe de 4 à 27 centimètres de pluie par an, ce qui détermine la quantité de nourriture disponible. Au cours des années de sécheresse, la végétation est clairsemée et pauvre en nutriments. En revanche, durant les années de fortes pluies, la végétation est dense et de meilleure qualité. Dans ces conditions, les jeunes grandissent plus vite. Ils atteignent alors leur maturité sexuelle plus rapidement, généralement avant l'âge de 10 ans.

Nous avons constaté que les tortues qui grandissent vite ont, une fois adultes, une petite taille. Ainsi, les tortues qui bénéficient de conditions climatiques favorables ne profitent pas de l'abondance des ressources pour continuer à grossir, mais s'arrêtent plus tôt de croître pour acquérir, précocement, leur maturité sexuelle : le territoire qu'ils prospectent à la recherche de femelles est plus restreint, mais le handicap est compensé par une vie reproductive précoce. Dans les années de sécheresse, les tortues grandissent lentement, atteignent leur maturité sexuelle tardivement, mais leur taille est supérieure. Cette maturation tardive engendre une vie reproductive retardée, compensée par une plus grande capacité de prospection. Au sein d'une même population, deux stratégies reproductives permettent aux mâles de s'adapter au mieux aux conditions météorologiques.

D. CHARFALLOT, A. LEGRAND, F. LAGARDE et X. BONNET, Laboratoire d'Herpétologie, Centre d'études biologiques de Chizé



Le mâle des tortues des steppes est plus petit que la femelle. Quand il part à la recherche de partenaires, il est pénalisé parce qu'il n'avance pas vite. En revanche, il atteint sa maturité sexuelle plus tôt que ses rivaux plus gros, de sorte que sa période reproductive est plus longue.

Le séisme de Bhuj

Le séisme intraplaque du 26 janvier 2001, prémisse d'une cassure du continent indien en avant de l'Himalaya?

A la nouvelle qu'un séisme catastrophique de magnitude 7,6, résultant d'une compression Nord-Sud, venait de se produire en Inde, beaucoup de personnes ont pensé que l'épicentre devait se situer dans la zone très sismique de l'Himalaya. En effet, le front de cette chaîne est jalonné par une grande faille de chevauchement qui cause périodiquement des séismes destructeurs, en faisant avancer les reliefs sur le continent indien. Or, le séisme de Bhuj s'est produit à environ 1 000 kilomètres plus au Sud, dans une région de faibles reliefs. L'emplacement du séisme est étonnant, mais est-ce une première? Comment expliquer ce séisme qui paraît inhabituel?

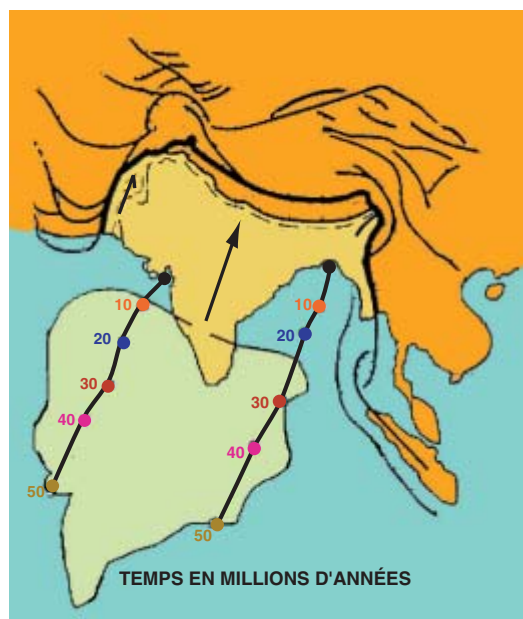
Remarquons d'abord que l'épicentre se trouve dans ce qu'on nomme la « plaque indienne » et que l'Inde correspond à un vieux continent analogue à l'Australie (à laquelle elle était accolée, il y a plus de 120 millions d'années). Le continent est constitué, pour l'essentiel, de roches très anciennes (allant de 600 millions d'années à 2 500 millions d'années), difficiles à déformer, ce qui explique la rigidité et l'apparente stabilité de

cette plaque continentale où les séismes sont rares.

Toutefois, nous savons que les grands continents « stables » peuvent être touchés par des séismes très importants, mais aussi très espacés dans le temps. Un bilan sur ce type de séismes a été présenté il y a dix ans par Arch Johnston et Lisa Kanter (*Pour la Science*, mai 1990) ; ils signalaient qu'un très important séisme s'était produit en Inde, en 1819, à Kutch, situé à 200 kilomètres au Nord-Ouest du séisme de Bhuj. Lors de ce séisme de magnitude 7,7, il s'était formé, sur une longueur de près de 100 kilomètres, un escarpement en faille inverse (c'est-à-dire de compression), d'une hauteur de six à neuf mètres, qui fut dénommé le « Mur de Dieu ».

Ainsi, en presque 200 ans, la plaque indienne a été affectée dans la même région par deux séismes majeurs. Quelle est leur signification? Pour essayer de répondre, situons-nous dans le contexte général de la collision Inde-Asie représenté sur la figure 1.

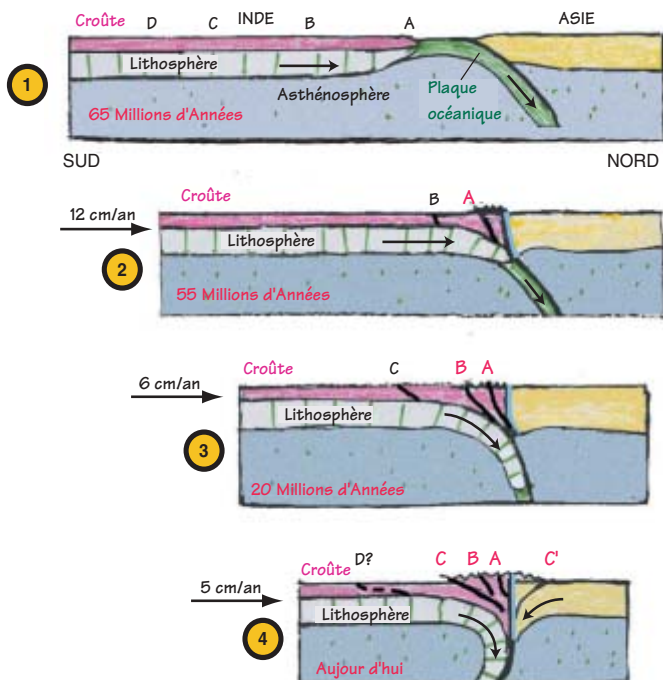
Il y a 65 millions d'années, le continent indien se trouvait à environ 5 000 kilomètres de sa position actuelle, et il était bordé au Nord d'une plaque océanique qui s'enfonçait sous l'Asie par une subduction (*phase 1 de la figure 2*). Il y a 55 millions d'années, la plaque océanique s'étant entièrement enfouie, les deux continents sont rentrés en collision (*phase 2*), et



1. Déplacement de la plaque indienne au cours des 50 derniers millions d'années.

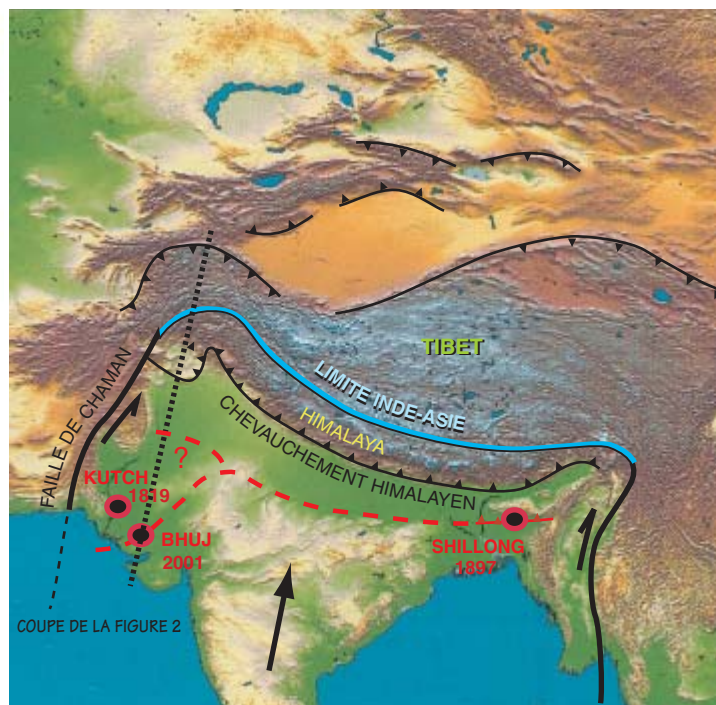
une chaîne de montagne a commencé à s'édifier au dépens de la croûte indienne, alors que la lithosphère était englobée dans l'asthénosphère (*voir la figure 2*). Dès le début, la chaîne montagneuse était limitée au Sud par un chevauchement (A). Il y a 20 millions d'années (*phase 3*), une grande partie de la plaque indienne est déjà enfouie dans l'asthénosphère, tandis qu'en surface, la chaîne himalayenne agrandie est limitée par un nouveau chevauchement (B).

Lors des derniers 20 millions d'années, la chaîne himalayenne continue



(La limite entre l'Inde et l'Asie a été supposée fixe)

2. Évolution, en coupe, de la collision entre l'Inde et l'Asie.



3. Les séismes récents présagent peut-être d'une cassure de la plaque indienne.

de s'élargir et de progresser vers le Sud par sauts successifs ; elle est limitée par le chevauchement (C). Ainsi, depuis le début de sa formation, l'Himalaya a fonctionné comme un prisme d'accrétion crustal (accumulation de lambeaux de croûte dans une zone triangulaire, voir la figure 2). Et pour la première fois, la déformation affecte l'Asie, avec un chevauchement (C') vers le Nord, qui correspond à une subduction continentale qui plonge vers le Sud. La chaîne s'est donc encore élargie et présente une allure en éventail dissymétrique.

Quel est le mécanisme qui a permis d'aboutir à cette structure générale de la chaîne ? Dès le début de la collision, le continent indien a été soumis à des forces compressives d'autant plus importantes que l'on se rapprochait du contact Inde-Asie. En raison de sa faible densité (2,7) par rapport à celle du manteau (3,3), la croûte ne peut être entraînée à grande profondeur, et elle se désolidarise du manteau plus dense et plus rigide. En avant du chevauchement himalayen, à intervalles réguliers, les forces tectoniques atteignent le seuil de rupture des roches en provoquant des séismes. De nouvelles failles apparaissent par cassures successives, et le prisme d'accrétion s'élargit.

Actuellement, au stade 4, le continent indien n'est ébréché que par quelques séismes rares, mais de forte puissance, tels ceux de Kutch et de Bhuj. Un séisme encore plus puissant s'est produit en 1897 dans l'Est du continent indien, sur le versant Sud du massif de Shillong, à 200 kilomètres du front de l'Himalaya. Ce séisme de magnitude 8,7 s'est manifesté par une faille de chevauchement Est-Ouest et un ressaut de plus de dix mètres de haut (plus haut que le Mur de Dieu !)

Comme, aujourd'hui, le front himalayen s'avance vers le Sud à une vitesse de deux centimètres par an, il ne tardera pas à absorber le massif de Shillong, dans à peine cinq millions d'années. Revenons à l'Ouest ; les séismes de Kutch et de Bhuj sont à environ 1 000 kilomètres du front himalayen ; celui-ci n'avancera pas aussi loin, mais cette partie de l'Inde sera profondément modifiée, car le continent indien aura certainement continué sa marche tranquille à la même vitesse qu'aujourd'hui, soit cinq centimètres par an, 500 kilomètres en 10 millions d'années.

Les failles de Kutch et de Bhuj pourraient être une préfiguration d'une grande faille (nouvelle cassure D) qui coupera le Nord-Ouest de l'Inde et qui finira par rejoindre vers l'Est le front d'une chaîne himalayenne qui aura beaucoup changé et qui aura bien avancé vers le Sud.

Hervé PHILIP et Maurice MATTAUER

Nouveau thermomètre intergalactique

Des astrophysiciens ont mesuré la température du fond diffus cosmologique dans un nuage intergalactique lointain.

La théorie du Big Bang stipule que notre univers est issu d'une gigantesque explosion primordiale et que, depuis, son rayon croît et sa température diminue. Il y a environ 15 milliards d'années, cette température est passée au-dessous d'une valeur critique telle que les électrons et les protons ont pu se combiner. L'Univers est devenu transparent, car les photons ont cessé d'interagir avec le mélange des particules qui emplissait l'Univers primordial. Un gaz de photons s'est maintenu dans tout l'espace. Ce gaz que les astrophysiciens nomment le fond diffus cosmologique se refroidit selon une loi décrite par la relativité générale : la température du cosmos décroît comme l'inverse du rayon de l'Univers. Une nouvelle évaluation de cette température vient d'être réalisée par Patrick Petitjean de l'Institut d'astrophysique de Paris, Cédric Ledoux de l'Observatoire européen austral et Raghunatan Srianand du Centre interuniversitaire pour l'astronomie et l'astrophysique de Pune, en Inde.

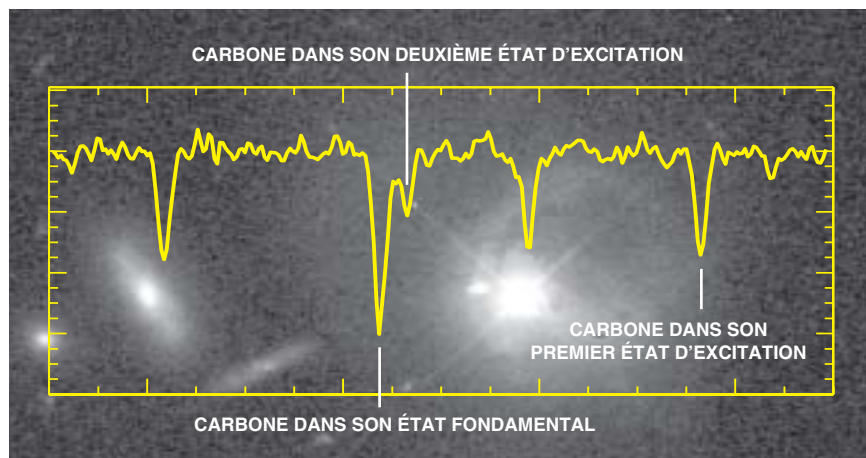
La loi de refroidissement constitue l'un des piliers du modèle cosmologique standard, la théorie cosmologique acceptée aujourd'hui. Découvert fortuitement par

Arno Penzias et Robert Wilson en 1965, ce « rayonnement fossile » a pu être mesuré il y a une dizaine d'années par le satellite COBE, et le résultat était en parfait accord avec ce que prévoit le modèle cosmologique standard.

Toutefois, il n'a été testé qu'au voisinage immédiat de la Terre. Il se pourrait que le rayonnement perçu sur la Terre n'existe que dans son voisinage, ou dans celui de la galaxie. Il s'agirait alors non pas d'un fond cosmologique, qui, par définition, doit être présent dans tout l'Univers, mais d'un fond local qui créerait, dans notre voisinage, l'illusion d'une explosion primordiale. P. Petitjean et ses collègues viennent de lever le doute.

Ils ont découvert un moyen indirect de mesurer la température du fond diffus cosmologique dans les nuages du milieu intergalactique situés sur le chemin qui nous sépare des quasars. Les quasars (en anglais *quasi stellar objects*, c'est-à-dire objets quasi stellaires) sont des objets très lumineux situés aux confins de l'Univers observable, qui seraient en cours d'effondrement dans un trou noir. Pour évaluer cette température, les astrophysiciens utilisent le fait que des nuages de gaz composés d'éléments divers se trouvent sur l'axe qui nous relie à ces géants éloignés. Ainsi, ils ont découvert la présence de raies d'absorption dans le rayonnement qui nous parvient du quasar PKS1232+0815. Ces raies sont les signatures spectrales des éléments chimiques présents dans le nuage intergalactique analysé.

Les électrons superficiels des atomes responsables de ces raies ont subi des transitions qui les ont fait passer de leur



Les trois formes du carbone présent dans le nuage intergalactique analysé (neutre et dans deux états d'excitation) ont des raies d'absorption différentes : au centre, la plus grande des raies est celle du carbone dans son état fondamental ; les trois raies de taille voisine qui entourent la grande raie sont celles du carbone neutre excité dans son premier niveau d'énergie. Deux petites raies, l'une à droite de la grande raie centrale et l'autre à l'extrême droite, sont celles du carbone neutre excité dans un deuxième état d'énergie. Ces mesures montrent que le fond diffus cosmologique micro-onde a l'énergie et, par conséquent, la température adéquate pour faire passer les atomes de carbone présents dans ce nuage de leur état fondamental (raie principale) à leurs deux premiers états d'excitation. Ce spectre a été obtenu avec le spectrographe à haute résolution du télescope KUYEN de l'Observatoire européen austral au Chili.

état fondamental à un niveau d'énergie supérieur. Plusieurs mécanismes déclenchent de telles transitions, mais le plus fréquent est l'absorption de photons dont l'énergie correspond à celle du niveau excité. Les astrophysiciens ont constaté que le nuage qui entoure le quasar contient de nombreux atomes de « carbone neutre excité », c'est-à-dire comportant un électron dans son premier état d'excitation. Ils ont montré que seule la présence dans le nuage d'un rayonnement diffus à 10 kelvins pouvait expliquer l'énergie reçue par l'électron de ce carbone neutre excité.

Pour le prouver, les astrophysiciens ont estimé l'importance des mécanismes qui pourraient donner des signaux identiques à ceux du carbone neutre excité par le fond diffus cosmologique. Trois mécanismes – l'excitation des atomes de carbone par le rayonnement ultraviolet, leurs collisions avec des molécules d'hydrogène et leur collisions avec des électrons – devaient être pris en compte. P. Petitjean et ses collègues ont utilisé les raies du carbone ionisé et celles de l'hydrogène moléculaire pour estimer les quantités de carbone et d'hydrogène moléculaire

présents dans le nuage, ainsi que la densité et la température du nuage. Grâce à ces résultats, ils ont montré que les trois mécanismes concurrents ne peuvent, seuls, expliquer l'abondance du carbone neutre excité constatée dans le nuage. Ils en ont conclu qu'un fond diffus cosmologique y a aussi contribué et estimé que la température de ce rayonnement est comprise entre 6 et 12 kelvins, ce que prévoit la théorie de la relativité générale pour l'époque de l'émission de la lumière du quasar, il y a 15 milliards d'années.

Christophe PICHON

Des glaciers voués à la disparition

La fréquence accrue des épisodes El Niño accélère la fonte des petits glaciers des Andes tropicales

Contrairement aux glaciers alpins, qui fondent très peu en été et accumulent de grandes quantités de neige en hiver, les glaciers des tropiques fondent toute l'année dans leur partie inférieure, à cause de l'absence de saison froide marquée. De ce fait, ils sont particulièrement sensibles aux fluctuations climatiques. Quel sera leur devenir, dans le contexte actuel de réchauffement du climat ? Cette question est d'autant plus pré-occupante que l'approvisionnement en eau des régions andines dépend en grande partie des glaciers de la Cordillère. Bernard Francou et ses collègues de l'Institut de recherche pour le développement (IRD), ainsi que des glaciologues boliviens et équatoriens, ont montré que dans 10 ou 15 ans, un grand nombre de ces glaciers aura disparu.

Ils ont étudié le glacier de Chacaltaya, situé entre 5 100 et 5 400 mètres d'altitude, au Nord de la Bolivie, et celui de l'Antizana, entre 4 800 et 5 760 mètres, en Équateur. Par leur petite taille (inférieure à un kilomètre carré), ces glaciers sont représentatifs de ceux qui parsèment la Cordillère sous les tropiques. Depuis 1991 pour le premier, et 1995 pour le second, B. Francou et ses collègues évaluent chaque mois le volume de la glace dans la partie basse des glaciers : ils mesurent la hauteur émergente de balises fichées dans la glace et disposées en réseau dans cette zone du glacier. Ils ont ainsi estimé la différence entre la quantité d'eau reçue sous forme de précipitations solides et celle perdue par la fonte

et par la sublimation de la glace. Pour les périodes antérieures à ces mesures, les glaciologues ont réalisé ces « bilans de masse » d'après des photographies aériennes et des documents d'archives.

Les résultats montrent que l'avenir des petits glaciers andins est compromis. Depuis dix ans, Chacaltaya a perdu 1,4 mètre d'eau par an (l'équivalent en épaisseur moyenne d'eau répartie sur toute la surface du glacier du volume de la glace fondue). Entre 1991 et 1998, son épaisseur totale a diminué de 40 pour cent et son volume des deux tiers. Rien qu'entre 1992 et 1998, sa surface s'est rétrécie de 40 pour cent et ne représente plus, aujourd'hui, que 10 pour cent de celle de 1940. Si cette évolution se poursuit, Chacaltaya aura disparu d'ici 10 à 15 ans.

Antizana évolue de la même façon, mais à un rythme moins rapide : depuis 1956, il a perdu près du quart de sa surface. Dans les années 1990, les pertes d'eau se sont accrues, pour atteindre 0,6 mètre d'eau par an en moyenne.

Le recul des glaciers s'est-il intensifié récemment ? Des études plus anciennes portant sur d'autres glaciers andins de la zone tropicale, notamment au Pérou, montrent que l'accélération de ce phénomène date du début des années 1980. Les résultats obtenus sur Antizana et Chacaltaya le confirment : ce dernier a perdu 0,2 mètre d'eau par an entre 1940 et 1963, 0,6 de 1963 à 1983 et 0,9 depuis 1983. La surface de l'Antizana s'est, pour sa part, réduite trois fois plus vite entre 1993 et 1998 qu'entre 1956 et 1993. Globalement, la perte de volume d'eau des deux glaciers a été trois à cinq fois plus élevée au cours de la dernière décennie que pendant les précédentes.

En étudiant le contexte climatique de ce recul exceptionnel des glaciers, les glaciologues ont découvert qu'il était relié aux événements El Niño et La Niña, respectivement les phases chaudes et les phases froides d'un phénomène qui touche le climat global : les bilans mensuels sur

les glaciers montrent que la fonte a été maximale pendant ou juste après les événements El Niño, notamment les événements particulièrement intenses de 1991-1992 et de 1997-1998, qui ont encadré une période chaude anormalement longue de 1991 à 1995. En revanche, pendant les événements La Niña, la perte d'eau a diminué ou s'est arrêtée. C'est le cas d'Antizana, dont la fonte a pratiquement cessé depuis le milieu de l'année 1998, quand un événement La Niña s'est déclenché et a perduré. En 1999 et 2000, Antizana a même gagné de la glace, avançant de 40 mètres sur les pentes de la montagne. Ainsi, cette étude confirme que les glaciers proches de l'Équateur réagissent davantage et plus vite aux variations climatiques liées au phénomène El Niño que ceux de Bolivie ou du Pérou.

La même équipe a aussi étudié le glacier Zongo, proche de Chacaltaya en Bolivie, mais de plus grande taille et plus élevé (il culmine à 6 000 mètres) : il réagit de façon semblable aux oscillations climatiques du Pacifique. Ainsi, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements El Niño observée depuis plus de 20 ans, expliquerait, du moins en grande partie, la récente accélération du recul des glaciers tropicaux andins.



Le glacier Antizana, au Nord de la Bolivie.

Échanges d'énergie dans l'atome

Dans certaines conditions, les électrons et le noyau d'un même atome échangent de l'énergie.

Le principe des vases communicants s'appliquerait-il au noyau atomique et à son cortège d'électrons ? Habituellement, le noyau et les électrons n'interagissent pas, car leurs domaines d'énergie sont très séparés. Pourtant, dans certains atomes, les électrons et le noyau échangent de l'énergie : parfois, quand un électron se désexcite, au lieu d'émettre un photon, il transmet son énergie excédentaire au noyau, excité à son tour. Inversement, quand le noyau est excité, il cède une partie de son énergie à un électron. Pour la première fois, nous avons observé, en même temps qu'une équipe japonaise, ces phénomènes très rares de transfert d'énergie.

Ces échanges sont rares, car les énergies des nucléons et des électrons sont très différentes. Selon les lois de la mécanique quantique, les électrons se répartissent sur des états d'énergie. Lorsqu'un électron passe d'un état à un autre, il absorbe ou émet une énergie dite de transition, égale à la différence des énergies entre les deux états considérés. De même, un noyau passe d'un état fondamental à un état excité, quand il absorbe une quantité d'énergie égale à la différence des

énergies entre deux états autorisés. Les énergies les plus élevées des électrons, ceux situés le plus près du noyau, sont de l'ordre de quelques milliers d'électronvolts, tandis que les énergies de transition entre deux états du noyau sont de l'ordre de plusieurs centaines de milliers d'électronvolts.

Ainsi, l'atome est considéré comme une superposition de deux systèmes quantiques indépendants. Cependant, dans certains isotopes, les énergies de transition dans le noyau et dans le cortège électronique sont du même ordre de grandeur. Dans ces conditions, le noyau et le cortège électronique ne sont plus deux systèmes quantiques indépendants : ils interagissent et échangent de l'énergie.

Expérimentalement, les énergies de transition dans le noyau et dans le cortège électronique doivent être ajustées avec une très grande précision. Pour cela, nous avons choisi un atome de tellure 125 (un isotope naturel très rare du tellure) et nous lui avons enlevé 45 électrons. Nous avons ainsi formé un ion tellure très chargé (il porte 45 charges positives), où seuls sept électrons, les plus proches du noyau, subsistent. Or, les états d'énergie des électrons les plus proches du noyau étant plus distants que ceux des électrons périphériques, les énergies de transition sont plus élevées et se rapprochent de certaines en jeu dans le noyau, qui sont de l'ordre de 35 milliers d'électronvolts dans ce noyau inhabituel. En outre, l'absence des électrons périphériques modifie les états d'énergie des électrons de cœur et les deux énergies de transition (nucléaire



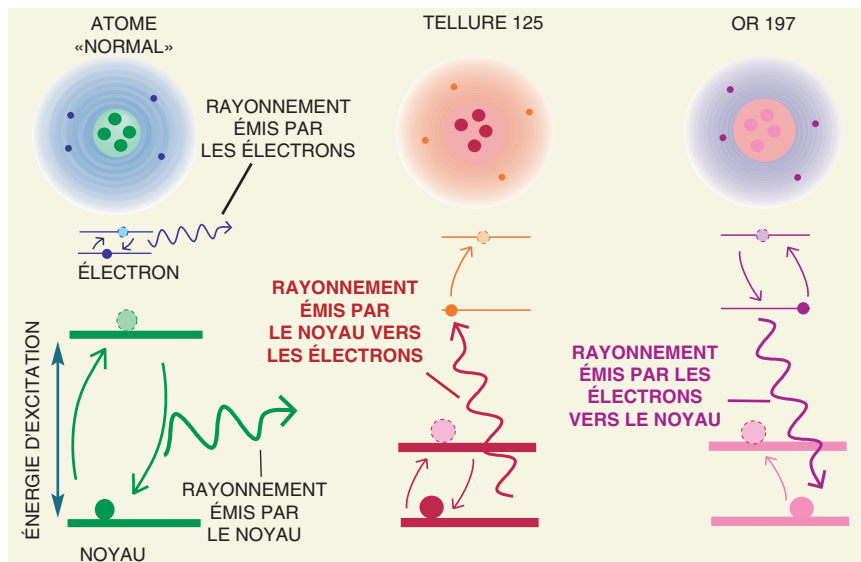
John Vervaeke

et atomique) sont ainsi ajustées avec une excellente précision.

Nous avons obtenu ces ions au grand accélérateur national pour les ions lourds, le GANIL, à Caen. Pour ce faire, on envoie à grande vitesse (un tiers de la vitesse de la lumière) des atomes de tellure sur une cible très mince. Les collisions des atomes avec la cible arrachent des électrons et excitent quelques noyaux de tellure, qui retrouvent leur état initial au bout de quelques milliardièmes de seconde. Pendant cette fraction de seconde, les noyaux des ions tellure, excités par les collisions, se dés excitent en émettant de l'énergie qu'ils cèdent au cortège électronique (les noyaux émettent un rayonnement gamma). Les électrons sont alors excités temporairement, puis ils retrouvent leur état initial en émettant des photons X. Ce mode de dés excitation d'un noyau, jamais observé jusqu'alors, est nommé BIC (pour *Bound Internal Conversion*, conversion entre états liés).

Simultanément, le mécanisme inverse, c'est-à-dire l'excitation du noyau grâce à l'énergie de dés excitation des électrons (effet NEET, pour *Nuclear Excitation by Electronic Transition*, ou excitation nucléaire par transition électronique), recherché depuis longtemps, a été mis en évidence par l'équipe japonaise de S. Kishimoto, de l'Université de Tokyo, dans le noyau d'or 197. Ces physiciens ont utilisé un rayonnement synchrotron pour exciter les électrons de l'atome. Dans la majorité des cas, le cortège électronique excité de l'or revient dans son état fondamental en émettant un rayonnement X, mais, parfois, le retour vers l'état fondamental se produit sans émission de rayonnement : le noyau d'or absorbe l'excès d'énergie des électrons et passe de son état fondamental vers son premier état excité. Il se dés excite ensuite en émettant des photons gamma. Ces échanges d'énergie sont-ils les prémices d'une nouvelle forme de stockage d'énergie au cœur même des atomes ?

Jean-François CHEMIN, Centre d'études nucléaires de Bordeaux-Gradignan



Dans un atome classique (à gauche), les énergies d'excitation du noyau sont beaucoup plus élevées que celles des électrons. En revanche, dans certains atomes, les énergies en jeu sont du même ordre de grandeur : le noyau et ses électrons échangent alors de l'énergie. Ainsi, dans l'ion tellure 125 (au centre), l'énergie de dés excitation du noyau sert à exciter le cortège électronique, et dans l'or 197 (à droite), les électrons se dés excitent en transférant leur énergie excédentaire au noyau.

Riche hérédité islandaise

Malgré leur isolement, les Islandais auraient la plus grande diversité génétique d'Europe.

Le gouvernement de l'Islande s'est livré, il y a deux ans, à une transaction commerciale hors du commun. Il a vendu à l'entreprise *deCODE Genetics* l'accès aux données génétiques et médicales des 275 000 Islandais. Ainsi, pour quelques millions de dollars, la société a obtenu, pour 12 ans, le droit exclusif d'étudier les liens entre les maladies héréditaires et le patrimoine génétique de chacune des familles d'Islande. Grâce à ces données, elle espère trouver les gènes qui participent à l'apparition de maladies aussi diverses que le psoriasis, le cancer du sein ou l'infarctus.

Pourquoi cette société s'intéresse-t-elle tellement aux Islandais ? Étant donné leur isolement, les généticiens de l'entreprise présumant qu'une grande consanguinité doit régner dans la population islandaise : cette homogénéité génétique est supposée faciliter l'étude statistique qu'ils veulent entreprendre, car, à coup sûr, elle leur permettra d'évaluer les effets de tel ou tel gène dans un contexte génétique homogène.

Einar Arnason et ses collègues de l'Université de Reykjavik ont voulu vérifier que l'hypothèse était correcte. Ils ont évalué la variabilité génétique d'un échantillon de 73 Islandais qu'ils ont considérés comme représentatifs de la population générale, puis ils ont comparé le résultat avec ceux obtenus dans d'autres pays européens. Force a été de constater que la diversité génétique des Islandais est tout à fait comparable à celle des divers pays d'Europe ; elle semble même lui être supérieure !

Le résultat surprend ! Il tient sans doute aux vagues successives de colonisation. Ainsi, il y a 1 100 ans, les Norvégiens occupèrent l'Islande. Puis, des Vikings de passage ont sans doute apporté du sang neuf. Ultérieurement, nombre d'Islandais ont quitté l'île à la recherche de travail, puis ont ramené les familles qu'ils avaient fondées dans d'autres lieux. Ces apports expliqueraient la grande diversité génétique qui caractérise curieusement la grande île glacée perdue dans les brumes du Nord.

L'entreprise *deCODE Genetics* a au moins une consolation : en Islande, la recherche sur la transmission des maladies génétiques est facilitée par l'engouement des Islandais pour la généalogie ; ils connaissent parfaitement leurs ascendants sur de nombreuses générations.

Clio

l'art de voyager

Des conférenciers historiens ou spécialistes d'art vous feront partager leur passion.

Des voyages en petits groupes pour profiter des découvertes dans les meilleures conditions.

Plus de 200 circuits vers 80 pays, riches en trésors artistiques ou archéologiques.

27, rue du Hameau - 75015 Paris

Tél : 01 53 68 82 82 - Fax : 01 53 58 82 60

Lic. 075 95 0468 - Mél : information@clio.fr

Je souhaite recevoir gratuitement le catalogue général des circuits Clio.

Nom : _____

Prénom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

