

Prise de conscience

Les perceptions inconsciente et consciente d'un mot activent différemment certaines aires du cerveau.

Les images subliminales et les histoires qui ont cours à leur propos en sont la preuve : nous percevons des stimulus – des mots ou des images – sans en avoir conscience. Quels mécanismes cérébraux sous-tendent cette perception inconsciente ? Comment cette dernière diffère-t-elle de la perception consciente ? Selon une thèse matérialiste dominante en neurosciences, à chaque état mental donné correspond un état cérébral. Cependant, existe-t-il des états neuronaux spécifiques des états mentaux conscients ?

L'équipe de Stanislas Dehaene, de l'unité INSERM 334, et celle de Denis le Bihan, du Commissariat à l'énergie atomique, ont visualisé les différences entre les traitements conscient et inconscient à l'aide de techniques d'imagerie cérébrale fonctionnelle. Ils ont présenté des mots pendant 29 millisecondes sur un écran d'ordinateur à des volontaires. Ces mots étaient précédés et suivis, soit d'écrans blancs sans stimulus, soit de figures géométriques. Dans le premier cas, les mots sont perçus consciemment,

car les écrans blancs ne perturbent pas le traitement de l'information ; dans le second, ils sont masqués et ne sont pas perçus consciemment, parce que les figures géométriques (exposées plus de deux fois plus longtemps que le mot) perturbent le traitement du mot : le masque – les figures géométriques qui entourent le mot – domine sans doute le mot dans une sorte de « compétition mentale ». Plusieurs tests ont confirmé que les volontaires n'avaient aucune perception ni aucun souvenir des mots masqués, pourtant ils en ont une perception inconsciente. En effet, on a montré qu'un mot perçu inconsciemment accélère le temps de reconnaissance de ce mot, lorsqu'il est présenté ultérieurement, au cours d'une nouvelle expérience : une personne qui a eu une perception inconsciente (ou encore une image subliminale) d'un mot ou d'un objet reconnaît plus vite ce mot ou cet objet qu'une personne qui n'a pas eu ce type de perception. Ainsi, il y a un traitement inconscient des mots, mais on ignorait lequel.

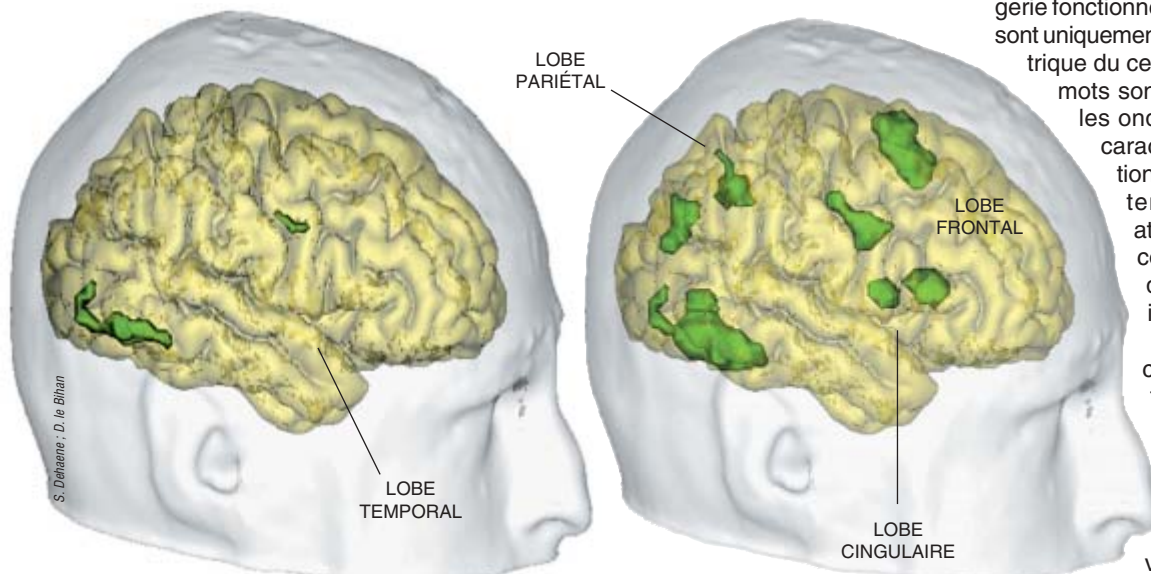
Dans une première série d'expériences, les neurobiologistes ont enregistré le débit sanguin dans le cerveau par résonance magnétique : la présentation de mots masqués entraîne une activation d'une région ventrale du lobe temporal connue pour traiter la forme visuelle des mots, indépendamment du style d'écriture (c'est-à-dire que les lettres soient en majuscules ou en minuscules).

Toutefois, l'activité de cette aire est 12 fois inférieure à celle observée quand le mot est visible : la perception consciente augmente donc l'activité de ces aires. Est-ce tout ? Non, lors de la perception consciente sont aussi sollicitées des régions distantes situées dans le cortex préfrontal et dans le cortex cingulaire antérieur (associées à la planification des opérations cognitives et à notre mémoire de travail), ainsi que des zones du cortex pariétal requises dans l'attention.

Dans une seconde étape, S. Dehaene, D. le Bihan et leurs collègues ont caractérisé l'influence d'un mot perçu inconsciemment sur la perception consciente du même mot. Quand le mot a déjà été présenté masqué, l'activation qu'entraîne la perception consciente du même mot est inférieure à celle due à une présentation consciente seule : la perception inconsciente représente une sorte d'habitude du cerveau qui est moins activée lorsqu'il doit traiter le mot perçu consciemment après l'avoir traité de façon subliminale. Ainsi, le traitement inconscient du mot réduit les activations conscientes. Par ailleurs, l'absence d'influence du style d'écriture montre que le traitement inconscient des mots est poussé, au-delà de la simple information graphique, jusqu'à l'extraction de l'identité abstraite des mots.

L'enregistrement de l'activité électrique du cerveau, qui renseigne sur la succession temporelle des aires activées, a confirmé les résultats obtenus par l'imagerie fonctionnelle, dont les informations sont uniquement spatiales. L'activité électrique du cerveau diminue quand les mots sont masqués. Par ailleurs, les ondes électriques tardives, caractéristiques de la perception consciente quand le traitement de l'information atteint les aires distantes du cortex, disparaissent lorsque les mots sont perçus inconsciemment.

Ainsi, la prise de conscience d'un mot consisterait-elle en une augmentation d'activation des régions qui traitent l'information lors de la perception inconsciente, accompagnée de l'activation de nombreuses autres régions distantes, mais qui participent également au traitement des mots.



La perception inconsciente (à gauche), d'un mot sollicite des aires (en vert) du lobe temporal ventral. Ces aires, auxquelles s'ajoutent des régions

du cortex préfrontal, du cortex pariétal et du cortex cingulaire antérieur, sont beaucoup plus activées lors de la perception consciente (à droite).

Homme et machine face aux Dames

Le premier match homme-machine de l'histoire du jeu de dames va opposer un des meilleurs joueurs mondiaux au logiciel le plus performant.

Pour la première fois, un ordinateur va affronter un grand maître international de dames. Le logiciel *Buggy*, développé depuis trois ans par Nicolas Guibert, champion de France senior 1999 de jeu de dames, et Maxime Kouamé (Grand-Maître international), est considéré comme le meilleur logiciel de jeu de dames au monde, après avoir remporté les deux dernières compétitions entre logiciels. Il va se mesurer au onzième joueur mondial, N'Diaga Samb, du 13 au 19 août 2001, à la Roche-sur-Yon.

On se souvient de la victoire retentissante (mais contestée) remportée, en 1997, par le logiciel *Deep Blue*, construit par IBM, sur le champion russe d'échecs Garry Kasparov. Les logiciels de jeux de stratégie battent les humains aux échecs ou encore aux checkers, les dames anglo-américaines, mais pas au jeu de dames international. Il existe plus d'une douzaine de règles, issues du jeu de dames originel, probablement apparu au X^e siècle sous le nom *Al-qirq* (le moulin) et dont les règles ont varié avec sa diffusion. Pour le jeu de dames international, les meilleurs logiciels battent à plate couture n'importe quel joueur ordinaire, mais s'inclinent devant les meilleurs. Un programme va-t-il enfin triompher d'un maître international ?

Le logiciel *Buggy* procède, comme les autres logiciels de jeux de stratégie, en deux étapes. La première, fondée sur l'«algorithme de recherche», consiste à calculer tous les coups possibles à partir

d'une configuration des pions. Si les processeurs avaient une capacité suffisante, cette étape suffirait pour que l'ordinateur gagne à coup sûr : il analyserait, dès le premier mouvement, toutes les variantes possibles jusqu'à la fin du jeu, et jouerait à chaque fois le meilleur coup. Aujourd'hui, les logiciels ont des capacités restreintes et ne calculent à l'avance qu'un nombre limité de coups (ce nombre est nommé profondeur). Ils doivent user de stratégie, dans la seconde étape dite «d'évaluation statique», qui différencie un bon d'un excellent logiciel : la première étape relève de la simple tactique, mais la seconde doit déployer toute la finesse du jeu.

D'un coup d'œil sur un damier, les bons joueurs parviennent à estimer lesquels des pions noirs ou blancs ont l'avantage. Toute la difficulté consiste à apprendre à l'ordinateur à disposer de ce coup d'œil. Lors de cette étape, le logiciel évalue de façon globale la situation pour chacune des positions calculées lors de la première étape. Son évaluation est fondée sur le nombre de pièces, puis sur la reconnaissance de configurations connues. En pratique, les deux étapes sont imbriquées : le logiciel fait un choix parmi les coups permis, en étudiant l'arbre de décision possible. Imaginons que pour chaque position, 10 coups soient permis. Si le logiciel calcule toutes les positions possibles à trois coups de profondeur, il doit calculer $10 \times 10 \times 10 = 1\,000$ positions et évaluer chacune d'entre elles. Ces 1 000 positions évaluées, le logiciel choisit le meilleur coup en considérant que son adversaire va toujours choisir le coup qui lui est le plus favorable. Au lieu de chercher les positions à une profondeur égale à trois, le logiciel les étudie à une profondeur n , il doit calculer 10^n positions ! Même si le programme calcule 250 000 positions par seconde, la décision doit être prise dans le temps imparti. Le logiciel cherche à réduire le nombre de calculs. S'il trouve qu'un coup de l'adversaire est mauvais, il ne cherche pas les positions aux profondeurs suivantes, mais il «élague» l'arbre de décision. Pour étudier une position jusqu'à une profondeur n , il ne calcule plus, par exemple, que $10^{n/2}$ coups possibles.

Buggy a deux autres points forts : une base de fins de partie qui contient toutes les configurations à six pièces (ou moins) sur le damier et une bibliothèque d'ouvertures. Grâce à la base de données, le logiciel joue à la perfection les fins de partie, mais l'accès à cette base est long et peut pénaliser le logiciel s'il y fait trop souvent appel. Dans la bibliothèque d'ouvertures, 150 000 positions d'ouvertures ont été produites automatiquement à partir de 230 000 parties recensées. Cette armada sera-t-elle suffisante pour battre le grand maître international ?

BRÈVES

Cousu d'or

Le fil en or le plus fin du monde vient d'être fabriqué par des physiciens de l'Université de Madrid et de l'Université technique du Danemark, à Lyngby : il est composé de sept atomes seulement. Les physiciens ont relié les deux extrémités du fil aux pointes de deux microscopes à effet tunnel, et ont mesuré la résistance de la chaîne en or et la force des liaisons interatomiques : les liaisons de la chaîne sont deux fois plus fortes que celles qui lient les atomes dans l'or massif, résultat prévu par la théorie, mais jamais vérifié avant cette expérience.

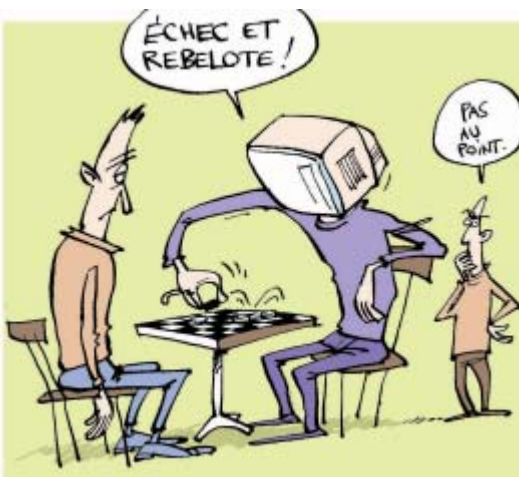
Bi-bip

L'oiseau lyre (*Menura Superba*) est un des six oiseaux imitateurs d'Australie. Les mâles de cette espèce ont développé une aptitude à copier les bruits de leur environnement (le chant d'oiseaux concurrents ou les sons caractéristiques d'autres animaux) qu'ils exploitent lors de leurs parades nuptiales. Greg Czechura, du Muséum du Queensland, vient de détecter de nouveaux sons dans le répertoire des oiseaux lyre vivant près des zones résidentielles : les sonneries de téléphones portables, des réveils électroniques et même le démarrage des vélomoteurs. Toutefois, les femelles de l'espèce ne s'y trompent pas : elle font la différence entre un téléphone portable et un oiseau-lyre.



Premières taches solaires

Dans une chronique anglaise du XIII^e siècle, un physicien de l'Université de Durham vient de découvrir un dessin de taches solaires, qui semble être le tout premier connu. Cette chronique relate de nombreux phénomènes célestes, des aurores boréales, le passage de comètes, ou encore des éclipses. Une des descriptions les plus étonnantes est celle de deux taches solaires observées le 8 décembre 1128 de la ville de Worcester, en Angleterre. La description est écrite en latin et illustrée du dessin des taches décrites. Or on connaît, par ailleurs, la description consignée dans une chronique coréenne de l'époque d'une aurore boréale observée le 13 décembre de la même année. C'est précisément la durée moyenne qui sépare l'apparition d'un groupe de taches solaires et l'apparition d'une aurore boréale. Une façon de réécrire l'activité passée du Soleil.



Du nouveau pour une vieille bactérie

La tuberculose est due à une bactérie, le bacille de Koch, qui s'attaque à différents organes, mais les poumons sont généralement les premiers exposés. Ces agents pathogènes se logent dans les alvéoles pulmonaires, où ils sont avalés par les éboueurs de l'organisme, les macrophages. Toutefois, ces cellules sont tenues en échec et colonisées par la bactérie qui s'y multiplie. Les macrophages infectés passent dans le sang et sont disséminés vers d'autres cibles. Du moins le croyait-on. Camille Locht et ses collègues de l'Institut Pasteur de Lille viennent de montrer que le mécanisme de pénétration de ces bactéries dans l'organisme semble assuré non pas par les macrophages, mais par les pneumocytes (des cellules de l'épithélium pulmonaire) grâce à la molécule d'adhérence HBHA. Cette protéine est indispensable à la colonisation des organes autres que le poumon. Elle représente une nouvelle cible thérapeutique au moment où la tuberculose réémerge : en bloquant cette molécule, on cantonnerait l'infection aux poumons, et on éviterait une contamination grave des autres organes.

Autant en emporte le vent

Thomas Schoener et ses collègues de l'Université de Californie étudiaient les effets de l'introduction artificielle de prédateurs sur des écosystèmes insulaires de l'archipel des Bahamas. Soudain, l'ouragan Floyd dévasta les lieux. Les œufs



d'une espèce de petits lézards qui constituaient le plat favori des prédateurs introduits ont été épargnés. En revanche, sur les deux tiers des îles où les prédateurs avaient été

Bateau pirate dans les Caraïbes

Des archéologues allemands ont trouvé le *Merchant Jamaica*, qui avait coulé à la fin du XVII^e siècle près d'Haïti. Ils ont identifié le couvercle d'un pot fabriqué entre 1650 et 1670 en Angleterre. Le bateau était probablement celui d'Henry Morgan (1635-1688), l'un des plus célèbres pirates anglais de cette époque. Avec le soutien de son pays, il pillait les bateaux espagnols naviguant dans les Caraïbes (alors sous domination de l'Espagne).

Billes liquides

Des gouttes d'eau truquées, qui ne mouillent pas, prennent la forme de cacahuètes en roulant.

Déplacer une goutte d'eau posée sur une surface solide n'est pas chose facile. Même si cette surface est inclinée, la goutte y reste souvent collée, à cause du contact qu'elle établit avec le solide : pensons par exemple aux gouttelettes de pluie qui adhèrent aux vitres (pourtant verticales). Afin de réaliser des surfaces peu mouillantes à l'eau, où les gouttes ne resteraient pas accrochées, une première stratégie consiste à s'inspirer de substrats naturels, tels la feuille de lotus, l'aile de papillon ou encore la plume de canard. Ces substrats sont hydrophobes (une sorte de cire les recouvre) et texturés, c'est-à-dire pourvus d'aspérités qui rendent la surface rugueuse (c'est d'ailleurs la texture de l'aile de papillon qui lui donne ses belles irisations). À cause du caractère hydrophobe de la surface, l'eau ne peut pas s'insinuer entre les aspérités de la texture et repose donc sur un patchwork de solide et d'air. Plus les aspérités sont petites, plus la goutte est entourée d'air et plus sa forme est sphérique, comme dans un nuage. En minimisant le contact avec l'eau, ce type de surface réduit l'adhésion des gouttes.

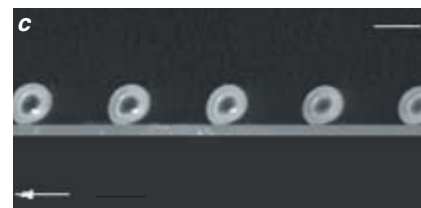
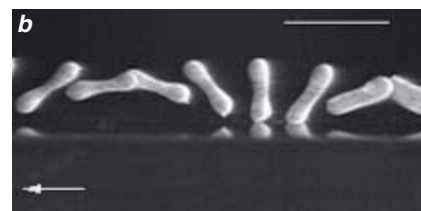
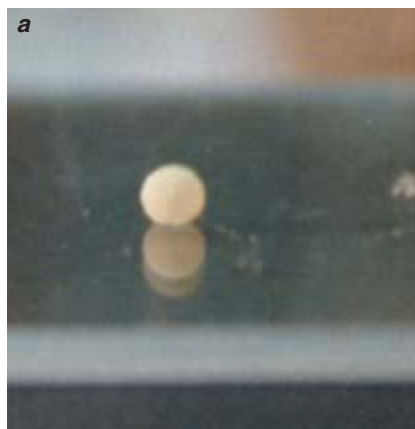
Une autre stratégie, pour réduire encore davantage le contact, consiste à modifier la surface de la goutte, et non plus celle du solide. On part d'une poudre fine (dont les grains mesurent entre un et dix micromètres de diamètre) et hydrophobe, par exemple de la suie, ce que l'on mélange à quelques millimètres cube

d'eau : les grains couvrent spontanément la surface de l'eau, leur caractère hydrophobe leur interdisant de pénétrer dans le volume. On forme ainsi une sorte de capsule, que nous avons appelée bille liquide, dont la surface est recouverte de grains hydrophobes et dont l'intérieur est rempli d'eau. On peut ensuite transférer cette bille sur un solide quelconque (où elle garde une forme quasi-sphérique), voire même sur de l'eau, où elle flotte.

Cette capsule molle est à mi-chemin entre un solide et un liquide. Le contact qu'elle établit avec son substrat est inhabituel, puisqu'il n'est plus dû qu'à son poids. Ce contact diminue avec la taille de la bille : les micro-billes liquides descendent plus facilement sur un plan incliné, puisque la taille du contact, donc les frottements, sont réduits, au contraire d'une goutte ordinaire, d'autant plus difficile à déplacer qu'elle est petite. Deux billes liquides de tailles différentes dévalent une pente à des vitesses différentes, mais c'est la plus petite qui va le plus vite !

L'état hybride d'une bille a des conséquences plus curieuses encore. Au lieu de glisser, la bille roule sur le plan incliné, comme si elle était solide. Cependant, elle est déformable, comme un liquide. Or, sa vitesse est inhabituellement élevée pour une goutte (à cause du contact réduit qu'elle a avec la surface, elle va 100 à 1 000 fois plus vite qu'une goutte normale), si bien qu'elle se déforme sous l'effet de la force centrifuge.

On observe deux modes de déformation. Dans le premier cas, la goutte, sphérique au départ, prend la forme d'une cacahuète, qui rebondit sur la surface comme une gymnaste sur sa poutre. Cet objet résiste aux chocs qu'il subit lors des rebonds et transporte donc le liquide sans fuite. Dans le second cas, la goutte prend en roulant (quasi-tautologiquement, pour



Cette goutte d'eau d'un millimètre de diamètre, recouverte d'une poudre hydrophobe (a), ne mouille pas la plaque de verre où elle repose, mais se reflète sur ses deux faces. Lorsqu'elle dévale un plan incliné à une vitesse de l'ordre du mètre par seconde, elle prend la forme d'une cacahuète (b) ou d'une roue (c), sous l'effet de la force centrifuge (la caméra qui a pris ces clichés successifs est inclinée du même angle que le plan ; les traits blancs correspondent à une longueur de un centimètre).

rait-on dire) la forme d'une roue. Les théoriciens avaient imaginé ces deux formes. En particulier, Lord Rayleigh avait prédit qu'une goutte en rotation pouvait se transformer en roue. Par ailleurs, lors d'une expérience récente réalisée par la NASA, on avait observé la caca-huète, en mettant une goutte en rotation dans l'espace (hors du champ de la gravitation). Toutefois, on pensait que la roue était instable, une hypothèse que l'astrophysicien Subrahmanyan Chan-

drasekhar avait avancée. Dans nos expériences, la roue progresse sur un plan incliné, qui semble la stabiliser.

Les billes liquides soulèvent de nombreuses questions, liées à leurs frottements avec les solides et à leurs déformations. Elles pourraient aussi avoir un intérêt pratique : on envisage de les utiliser pour transporter de petits volumes de liquide sur de grandes distances et à grande vitesse, notamment en microfluidique. Ces objets, faciles à réaliser au laboratoire,

apparaissent parfois spontanément dans la nature. Une forte pluie sur une route couverte de pollens ou de poussières engendre parfois ce qu'on appelle, dans le Sud-Ouest, un « verglas d'été », constitué de billes liquides. Ces billes se forment probablement aussi sur les sols argileux (l'argile est hydrophobe), où elles pourraient donner lieu à un type d'érosion original.

Pascale AUSSILLOUS et David QUÉRÉ
Laboratoire de physique de la matière condensée, Collège de France

Le compteur des abeilles

Les abeilles évaluent les distances grâce à la quantité d'images perçues pendant leur trajet.

Une abeille éclaireuse explore les prés voisins de sa ruche à la recherche de nourriture, du pollen ou du nectar. Après avoir repéré un parterre de fleurs mûres, elle retourne à la ruche prévenir ses congénères et leur indiquer l'endroit. Pour ce faire, elle danse en libérant une substance olfactive, une phéromone, qui attire les abeilles ouvrières ainsi recrutées pour aller quêrir de la nourriture. Le prix Nobel de médecine Karl von Frish (1886 – 1983) a montré qu'une danse en rond indique une nourriture très proche qui ne requiert aucune information pour la trouver, alors qu'une danse en forme de huit, dite frétilante, rend compte, d'une part, de la distance à parcourir et, d'autre part, de la direction à prendre pour accéder à la source de nourriture. Comment ces informations sont-elles codées ?

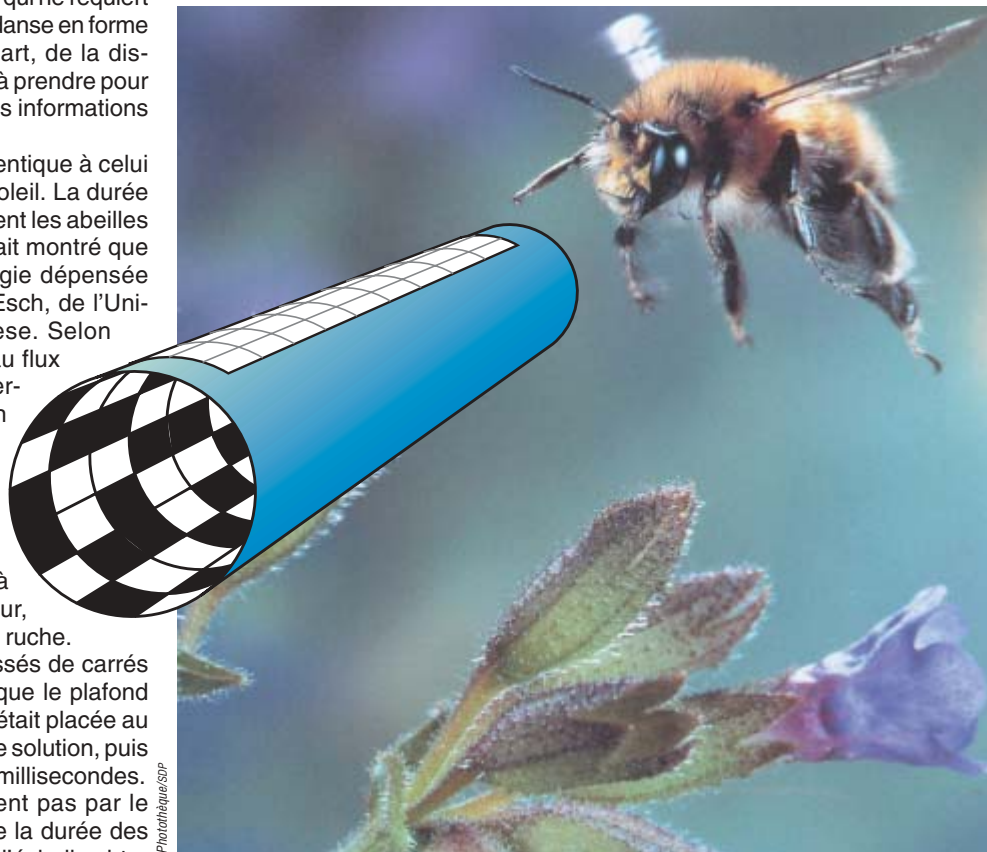
L'angle de la danse avec la verticale est identique à celui de la direction de la nourriture avec celle du Soleil. La durée de cette danse indique la distance, mais comment les abeilles l'estiment-elles ? En 1963, Martin Lindauer avait montré que les abeilles évaluent les distances par l'énergie dépensée pour les parcourir. Or, les travaux de Harald Esch, de l'Université d'Indiana, contredisent cette hypothèse. Selon lui, les abeilles évaluent les distances grâce au flux optique, c'est-à-dire à la quantité d'images perçues par unité de temps. Par exemple, dans un train, les objets proches, qui passent devant nos yeux rapidement, créent un flux optique plus important que ceux qui sont éloignés et, par conséquent, plus lents.

Dans un premier temps, les éthologues ont habitué des abeilles (*Apis mellifera ligustica*) à traverser un tunnel de huit mètres de longueur, orienté vers le Sud et placé à trois mètres de la ruche. Les côtés et le plancher du tunnel étaient tapissés de carrés blancs et noirs disposés aléatoirement, alors que le plafond était grillagé. Enfin, une coupelle d'eau sucrée était placée au fond du tunnel. Les abeilles qui atteignaient cette solution, puis revenaient à la ruche, dansaient pendant 358 millisecondes.

Ensuite, avec des abeilles qui ne passaient pas par le tunnel, ils ont établi les correspondances entre la durée des danses et l'éloignement de la nourriture : selon l'échelle obtenue, une danse de 358 millisecondes représente une distance de 72 mètres, et non les 11 mètres que les abeilles éclaireuses avaient réellement parcourus. Effectivement, des observateurs ont vu un maximum d'abeilles recrutées par celles qui avaient traversé le tunnel, mais qui, elles, ne passaient pas

par le tunnel, explorer une région distante de 70 mètres dans la direction du tunnel.

Ainsi les abeilles, habituées à une « densité » moyenne d'objets sur leur trajet, étaient trompées par la présence des carrés noirs et blancs : la quantité d'images perçues par unité de temps étant supérieure à la normale, elles pensaient avoir parcouru une distance supérieure à la longueur réelle du tunnel. L'expérience a été renouvelée avec succès avec un tunnel de six mètres de longueur et orienté vers le Nord-Ouest. Toutefois, d'autres paramètres, tels l'altitude du vol et les éléments du paysage influent sur le flux optique. Ainsi, les abeilles recrutées qui suivent les consignes de la danse de l'abeille éclaireuse convertissent une quantité d'images en une distance précise qui les sépare de la nourriture.



Les abeilles indiquent, par une danse, à leurs congénères l'endroit où se trouve la nourriture. La durée de cette danse indique la distance estimée grâce à la quantité des images perçues pendant le trajet. Les abeilles qui passent par le tunnel tapissé de carrés blancs et noirs (à gauche) apprécient mal les distances, car le flux optique (la quantité d'images perçues) est artificiellement augmenté.

Petit trou noir

Depuis environ 10 ans, les astronomes se sont persuadés que le centre des grandes galaxies – dont la Voie lactée – renferment chacun un énorme trou noir de plusieurs millions, voire des milliards de masses solaires. La matière qui se trouve violemment aspirée par ces monstres est chauffée à des températures considérables et émet de grandes quantités de rayonnement, ce qui expliquerait que les noyaux des galaxies produisent beaucoup d'énergie à partir d'un très faible volume (du même ordre que celui du Système solaire pour une production d'énergie équivalente à celle de dizaines de milliards de soleils). Cependant, en étudiant la vitesse de révolution des étoiles de la galaxie M33 autour du centre de cette galaxie, David Merritt, de l'Université d'État du New Jersey, et ses collègues viennent d'établir qu'elle renferme un trou noir central n'excédant pas (si toutefois il existe) 3 000 masses solaires (1 000 fois moins que le plus petit trou noir central connu). Si ce résultat était confirmé, il remettrait en cause un des rares faits qui semblaient acquis quant au mécanisme encore inconnu de formation des galaxies.

La croissance des dinosaures

Une équipe de paléontologues franco-portugaise a montré que les mécanismes de croissance des os des théropodes, des dinosaures carnivores, sont plus proches de ceux des oiseaux, leurs descendants, que de ceux des tortues et des crocodiles. Ils ont étudié les os d'embryons vieux de 150 millions d'années, provenant du gisement de Lourinha, à 60 kilomètres de Lisbonne. Jusqu'à présent, la biologie des théropodes était mal connue, car les fossiles découverts étaient surtout des embryons de dinosaures végétariens du Crétacé supérieur, vieux de 70 millions d'années.

Les moustaches du phoque

Le phoque suit une proie en détectant, grâce à ses moustaches, le sillage du poisson. Une équipe allemande a simulé le mouvement d'un poisson au moyen d'un



Science

sous-marin miniature et a constaté que le phoque est capable de suivre l'engin à longue distance, même dans l'obscurité, alors qu'il échoue lorsque ses moustaches sont recouvertes par un bandeau. Les moustaches, très sensibles aux vibrations de l'eau, joueraient le rôle d'un détecteur. C'est la première fois que l'on identifie chez un animal ce type de repérage des proies.

Prélude aux éruptions

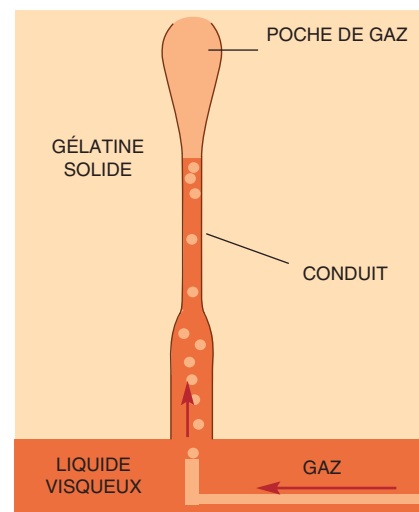
Un modèle expérimental de volcan explique l'origine des jets de gaz précurseurs des éruptions volcaniques.

Le 15 juin 1991, aux Philippines, le volcan Pinatubo se réveille après 500 ans d'inactivité, envoyant dans l'atmosphère un immense nuage de gaz et déversant sur ses flancs une lave qui balaiera tout sur son passage faisant 850 morts et détruisant les habitations d'un million de personnes. Le bilan a été lourd, mais il a pourtant été limité par la prévision de la catastrophe. Pendant les deux mois qui l'ont précédée, des éruptions annoniatrices riches en gaz et de faible volume avaient alerté les autorités du réveil du volcan et des mesures avaient été prises pour évacuer les personnes vivant à proximité. Ces jets précurseurs ont aussi été observés pour d'autres volcans, tels la Soufrière de l'île de Montserrat, aux Antilles, et le volcan Usu, au Japon. Pourquoi ces gaz initialement dissous dans le magma précédent-ils le magma ? Empruntent-ils un réseau connecté de fissures ? Thierry Menand et Stephen Tait, de l'Institut de physique du Globe de Paris, proposent un modèle expérimental de volcan, en laboratoire, qui rend compte des caractéristiques des jets de gaz précurseurs.

La source d'un volcan est une chambre magmatique, réservoir situé à quelques kilomètres sous la surface, où le magma s'accumule jusqu'à ce que la pression qu'il subit l'en éjecte. À mesure que le magma remonte, sa pression diminue et les gaz auparavant dissous s'échappent de la lave. L'observation des fissures magmatiques fossiles montre que ces gaz ont tendance à s'accumuler à l'avant des fissures et à former une poche. Dans le modèle expérimental de T. Menand et S. Tait, un cube de gélatine de 50 centimètres de hauteur simule la roche, et un liquide visqueux le magma. Le cube de gélatine obstrue hermétiquement la cuve contenant le liquide, et l'on en augmente la pression. On amorce un conduit dans la gélatine par une encoche. À mesure que l'on augmente la pression, le liquide se fraye un chemin vertical dans la gélatine. Puis, on stabilise la pression, et le liquide continue à monter lentement ; on injecte alors dans la cuve quelques bulles d'air comprimé qui déforment la fissure : une poche de gaz apparaît à l'avant du liquide alors que celui-ci continue de progresser vers le haut. En même temps qu'elle se forme, la poche s'élève de plus en plus vite dans la gélatine. Le liquide, à cause

des frottements avec les parois du conduit, monte moins vite. Malgré l'accélération, le débit du liquide reste constant, ce qui signifie que la section du conduit diminue : la cheminée se referme derrière la bulle de gaz, laquelle continue à progresser et perce la surface de la gélatine quelques instants avant le liquide.

Ce modèle est-il une bonne image de la réalité ? La pression des gaz précurseurs augmente jusqu'à la limite de rupture de la gélatine. Le modèle montre qu'une fois cette limite atteinte, la poche de gaz se désolidarise du magma, car, du fait de sa faible viscosité, elle avance plus vite que le liquide. Dans ce modèle, le liquide emprunte le même chemin que les gaz et l'intervalle de temps entre le jet précurseur et la véritable éruption dépend de la viscosité du liquide. Dans la réalité, cet intervalle dépend de la nature des gaz dissous et des pressions auxquelles ils quittent le magma. Le modèle prévoit toutefois qu'il est plus court dans le cas des volcans à lave basaltique, peu visqueuse, que dans les volcans où la lave contient de la silice. Cette hypothèse semble confirmée par le volcan Parícutin, au Mexique, où des gaz et des cendres sont émis quelques heures avant que le magma n'atteigne la surface, alors que dans le cas des éruptions à silice, des semaines, voire des mois (pour le volcan Pinatubo), séparent les deux événements.



Dans ce modèle, une couche de gélatine simule la roche et un liquide visqueux le magma. Les gaz injectés s'accumulent en une poche qui progresse dans la gélatine, devant le «magma».

AP Photo/Koji Sasahara



Un scribe moléculaire

Grâce à des mutations et à des sélections, des biologistes ont mis au point une molécule d'ARN qui copie des molécules... d'ARN.

La biologie des êtres vivants est régie par un dogme : l'ADN code l'ARN et l'ARN code les protéines (l'ADN est l'acide désoxyribonucléique, l'ARN l'acide ribonucléique). En a-t-il toujours été ainsi ? De nombreux biologistes pensent que cette organisation requiert trop d'acteurs moléculaires pour être apparue *ex nihilo*. Selon eux, la vie serait née avec l'apparition de molécules simples capables de se répliquer elles-mêmes sans avoir recours à une machinerie complexe : le meilleur candidat pour ces molécules primordiales est l'ARN, dont certains, nommés ribozymes, sont doués de propriétés catalytiques, c'est-à-dire qu'ils favorisent certaines réactions chimiques. Toutefois, aucun fossile moléculaire d'un tel ARN n'existe et aucun ribozyme connu ne copie des brins d'ARN. Pourtant, l'équipe de David Bartel, de l'Institut de technologie du Massachusetts, a mis au point une molécule d'ARN qui copie un brin modèle.

Les ARN sont constitués de nucléotides, c'est-à-dire d'assemblages d'une molécule azotée, nommée base, choisie parmi quatre (l'uracile, la cytosine, la guanine et l'adénine), d'un sucre (le ribose) et d'un acide phosphorique. C'est l'enchaînement des bases qui code l'information contenue dans l'ARN. Les bases sont complémentaires deux à deux : ainsi, la cytosine se lie à la guanine et l'adénine à l'uracile. La copie d'un brin d'ARN se fait par ajout successif des nucléotides complémentaires du brin modèle. Les nucléotides complémentaires sont présents sous une forme triphosphate : lorsqu'ils sont liés, une molécule de pyrophosphate (deux molécules d'acide phosphorique) est libérée. La copie démarre quand, sur le brin modèle, est déjà fixé un petit brin complémentaire initiateur.

Les biologistes avaient à leur dispo-

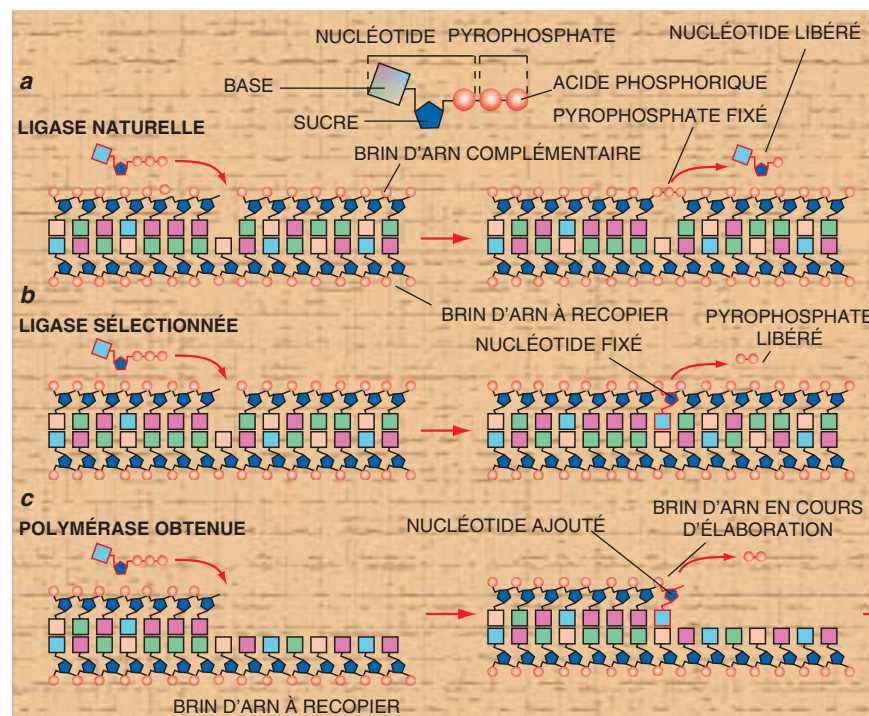
sition une molécule d'ARN catalytique connue, une ligase, qui lie deux petits brins d'ARN, chacun complémentaire d'une partie d'un brin modèle plus grand (voir la figure). Cependant, cet ARN fixait le pyrophosphate entre les deux brins complémentaires et libérait le nucléotide, alors qu'elle aurait dû faire exactement l'inverse ! L'un des deux brins complémentaires joue le rôle d'initiateur. Ainsi, les biologistes ont-ils tenté de modifier la ligase afin qu'elle libère le pyrophosphate et fixe le nucléotide et afin qu'elle lie à l'initiateur non pas un brin, mais un seul nucléotide. En fait, ils cherchaient à transformer cette ligase en une polymérase, le ribozyme qui copie les brins d'ARN nucléotide par nucléotide.

En 1993, les biologistes avaient franchi la première étape : la ligase qu'ils ont obtenue à partir de séquences aléatoires sélectionnées libérait bien le pyrophosphate et fixait le nucléotide, mais elle restait une ligase. Aujourd'hui, ils ont soumis le noyau catalytique – la partie active

de la molécule – de la ligase de deuxième génération à des mutations aléatoires. Puis, ils ont modifié certaines parties pour obtenir les propriétés recherchées : par exemple, ils ont rajouté un fragment aléatoire de 76 nucléotides à une extrémité de la molécule originale afin de créer une cavité où s'insère l'ARN à copier. Auparavant, l'activité de la ligase dépendait de la séquence de l'ARN à copier. La nouvelle molécule (qui agit maintenant comme une polymérase) recopie tous les brins d'ARN quelle que soit leur séquence.

Les biologistes ont sélectionné les différents ARN obtenus et étudié leurs propriétés de répllication. Après 18 opérations de mutation et de sélection, ils sont parvenus à un ARN de 189 nucléotides capable de copier jusqu'à 14 nucléotides de n'importe quel brin modèle, avec une fidélité de 96,7 pour cent.

La vie est-elle née avec les ARN ? Les travaux de D. Bartel rendent cette hypothèse plausible.



Les ARN catalytiques, ou ribozymes, sont des ARN qui favorisent une réaction. Un ribozyme naturel, nommé ligase, lie deux brins d'ARN complémentaires sur un brin modèle avec une molécule de pyrophosphate et libère un nucléotide (a). À partir de cette ligase naturelle, des biologistes ont d'abord sélectionné une ligase (b) qui lie deux brins complémentaires par un nucléotide. Puis, dans un deuxième temps, ils ont mis au point une polymérase qui, à partir d'un brin initiateur copie un brin modèle par additions successives de nucléotides (c).

Vous cherchez un article scientifique ou technique ?

//articlesciences.inist.fr

Le moteur de recherche et de commande d'articles scientifiques et techniques

Un service de l'Institut de l'Information Scientifique et Technique du CNRS

www.inist.fr