

L'action échappe à l'intention

Nous ne contrôlons pas toujours les mouvements rapides de notre main. À l'INSERM, Yves Rosseti et ses collègues ont demandé à des sujets de pointer du doigt une cible sur un écran d'ordinateur, mais d'arrêter leur geste si la cible sautait avant qu'ils ne l'aient touchée : des mouvements irrépressibles de la main sont apparus, amenant les sujets à pointer vers la deuxième position de la cible. Les chercheurs ont localisé le réseau de neurones responsable de ces mouvements, grâce à une patiente dont la région pariétale du cerveau avait été endommagée lors d'un accident vasculaire : ses mouvements étaient toujours délibérés. Ainsi, en cas d'urgence, un réseau de neurone situé dans l'aire pariétale prend de vitesse les circuits de l'action volontaire.

Bouées climatiques

Comment évoluera le climat? Quelle est l'influence de l'océan sur celui-ci? Les océanologues de l'*Ifremer* étudient cette question à l'aide de flotteurs dérivants qu'ils libèrent aujourd'hui dans les divers océans du Globe ; ils en lâcheront 3000 d'ici 2003. Placés dans les courants principaux qui les répartissent, ces flotteurs mesurent la température et la salinité de l'eau, de la surface jusqu'à 2 000 mètres de profondeur, et envoient leur données via un satellite *Argos* : ils flottent pendant une heure, coulent à 2 000 mètres pendant 10 jours, puis remontent. On espère ainsi comprendre et anticiper le refroidissement qui guette l'Europe du Nord et l'assèchement qui menace l'Europe du Sud.



La couleur des toxiques

Comment détecter les produits chimiques toxiques? En «regardant» leur odeur : une équipe de chimistes américains a mis au point un indicateur composé de petites zones qui prennent une couleur vive quand elles sont exposées à des vapeurs organiques. Chaque zone comprend des molécules qui se colorent quand elles réagissent avec des composés spécifiques. De ce fait, les diverses vapeurs organiques «allument» des zones colorées spécifiques, et sont révélées par une empreinte particulière. Les couleurs s'intensifient avec la concentration. Résistants à l'eau, de lecture claire, ces indicateurs seront faciles à utiliser.

Vibrer d'amour

Les punaises vertes utilisent des signaux acoustiques et des signaux chimiques pour attirer leurs partenaires sexuels.

Perdu dans une immense forêt, vous cherchez votre guide, mais la densité des arbres vous empêche de voir à plus de quelques mètres. Que faire? Vous hurlez le nom du guide en espérant que celui-ci vous entende et vous localise. En collaboration avec l'équipe d'Andrej Cokl, de l'Institut slovène de biologie, nous avons démontré que la punaise verte *Nezara viridula* cherche ses partenaires sexuels de la même façon : à l'aide de signaux acoustiques.

La punaise verte vit sur des plantes qui atteignent plus d'un mètre de haut, tels le maïs, le soja ou le coton. Dans cet environnement où la vue est limitée, l'insecte doit utiliser des moyens de communication plus adaptés.

Les insectes n'utilisent généralement qu'un seul système de communication : soit des signaux chimiques (les phéromones), tels ceux qui sont émis par les papillons de nuit ; soit des signaux acoustiques, dont le chant des cigales est un

bel exemple. Toutefois, la rencontre des punaises vertes met en jeu à la fois des signaux chimiques émis par les mâles, et des signaux acoustiques émis par les deux sexes et transmis par la plante.

Les phéromones émis par un mâle agissent à grande distance et attirent les femelles sur la plante sur laquelle le mâle est posé. La femelle signale alors sa présence en faisant vibrer le végétal. Ces vibrations résultent des contractions musculaires de l'abdomen à la fréquence de résonance de ce dernier (ce phénomène de résonance a causé l'effondrement de ponts : aussi les soldats rompent le pas quand ils franchissent les ponts) : ces vibrations font alors vibrer le thorax, puis les pattes et enfin la plante. Les signaux des femelles sont des pulsations durant 0,8 à 1 seconde, répétées à intervalles réguliers (environ toutes les cinq secondes). Ces signaux suscitent trois réactions simultanées des mâles. La première est locomotrice : le mâle recherche la femelle en s'orientant grâce aux vibrations transmises par la plante. À chaque embranchement, il pose ses pattes et ses antennes sur les tiges et détermine l'origine des vibrations (*voir la figure*).

La deuxième réaction est acoustique : le mâle émet des chants, dits de cour, en alternance avec les appels de la femelle. Ces chants entretiennent les vibrations de celle-ci et facilitent ainsi sa localisation. Enfin, la troi-



Le mâle de la punaise verte, sur une tige, a libéré des substances chimiques, nommées phéromones, qui ont attiré la femelle sur une feuille du même végétal (a). La femelle produit alors des vibrations d'appel qui se propagent dans la plante et orientent le mâle, notamment aux bifurcations (b et c). Il répond à la femelle par d'autres vibrations et par des phéromones qui stimulent la femelle. Enfin, la rencontre a lieu (d).

sième réaction est chimique : le mâle augmente sa production de phéromones, qui ont, cette fois, un rôle aphrodisiaque.

Nous avons également découvert que les mâles différencient les chants d'appel d'individus de différentes provenances : les réactions locomotrices et acoustiques des mâles aux vibrations d'appel dépendent de l'origine des deux partenaires ; ainsi, les mâles français répondent mieux et plus rapidement aux femelles françaises qu'à celles de Gualdeloupe, et *vice versa*.

La durée de chaque pulsation et les intervalles entre elles varient selon les

populations. En revanche, la fréquence de ces chants est la même (100 hertz), quelle que soit l'origine des insectes. Cette fréquence de 100 hertz est très proche de la fréquence de résonance des végétaux colonisés par les punaises vertes : les signaux sont ainsi conduits sur de longues distances.

La découverte des interactions entre la chimie et l'acoustique nous a permis de mieux appréhender la complexité des systèmes de communication chez les punaises. La localisation et la reconnaissance du partenaire sexuel sont des étapes primordiales de la phase précopulatoire. Ces comportements sont

à la base des phénomènes de sélection sexuelle : ils déterminent le choix de la femelle par le mâle.

En outre, les variations de ces signaux entre populations géographiquement isolées indiquent probablement une évolution divergente de la communication sexuelle au sein d'une même espèce. La punaise verte est un modèle original pour observer la mise en place de mécanismes qui favorisent l'isolement des populations et donc, peut être, l'apparition de nouvelles espèces.

Nadège MIKLAS et Michel RENOU,
Station INRA de Versailles

Les serpents nageaient...

...quand ils avaient des pattes.

Les serpents semblent l'archétype d'animaux sans pattes. Pourtant certains d'entre eux conservent des vestiges de membres postérieurs, et tous leurs caractères anatomiques montrent que ce sont des vertébrés tétrapodes (ou quadrupèdes) : issus d'animaux à quatre pattes, ils ont perdu celles-ci au cours de leur évolution. Selon cette hypothèse, les paléontologues avaient prédit qu'ils finiraient par trouver des fossiles qui présenteraient des caractéristiques des serpents et de leurs ancêtres, avec, notamment, des pattes bien développées.

On a récemment trouvé de tels fossiles : curieusement, on vient de signaler à très peu d'intervalle, non pas un, mais deux fossiles de serpents munis de pattes... seulement postérieures. Des

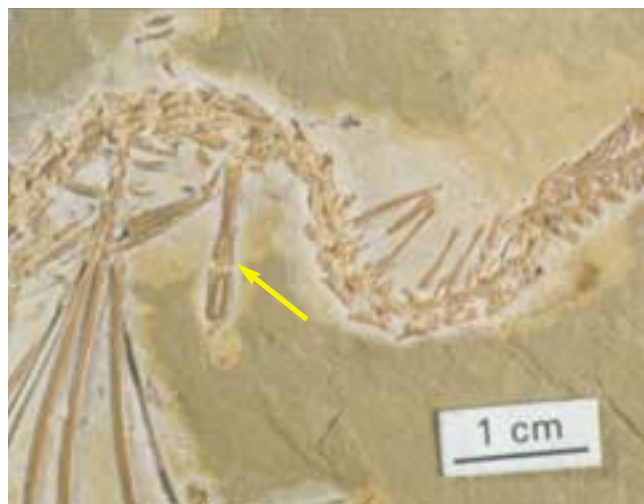
serpents non pas quadrupèdes mais bipèdes ! Ils ont été découverts au Moyen-Orient, dans des dépôts marins déposés au milieu du Crétacé, il y a quelque 95 millions d'années. Le premier, décrit par une équipe menée par Eitan Tchernov, de l'Université de Jérusalem, a été nommé *Haasiophis terrasanctus* ; l'autre, que nous avons étudié, est *Podophis descouensi*.

Ce ne sont pas les premiers serpents à pattes connus, mais leur découverte a déclenché une acerbé polémique. En effet, en 1997, les deux paléontologues Michael Caldwell et Michael Lee avaient réuni deux fossiles incomplets, auparavant énigmatiques, et montré qu'ils appartenaient à une même espèce, reconstituant ainsi le premier serpent à pattes, *Pachyrhachis problematicus*. Également trouvé au Moyen-Orient, il est contemporain des deux fossiles qui viennent d'être trouvés. Ces derniers confirment que M. Caldwell et M. Lee ne se sont pas trompés en reconstruisant *Pachyrhachis* et en le considérant comme un serpent à pattes postérieures.

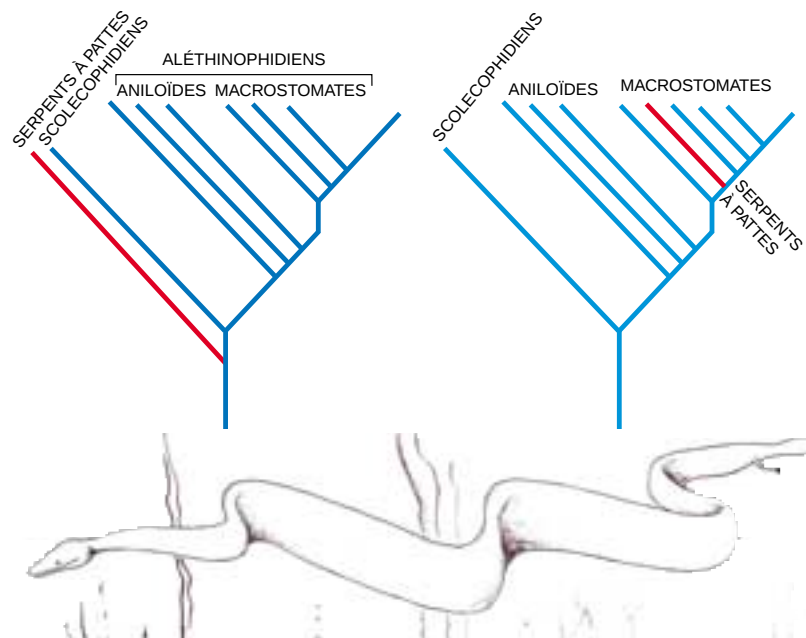
Ces trois animaux ne se distinguent pas notablement des serpents actuels : ils n'ont ni ceinture, ni pattes antérieures. Leur corps était aplati latéralement, comme les serpents marins actuels, et ils avaient une grande bouche. Leurs membres étaient courts (deux centimètres pour une longueur totale de 85 centimètres, chez *Podophis*), dans une position surprenante : très postérieure, à seulement 4,5 centimètres de l'extrémité de la queue, cette dernière étant très courte.

Pour comprendre la polémique, examinons la phylogénie des serpents modernes. Ces derniers se composent de deux groupes issus d'un ancêtre commun inconnu : les aléthiophidiens et les scolécophidiens. Les premiers comprennent les aniloïdes, supposés primitifs, et les macrostomates, supposés évolués. Ces derniers (boas, couleuvres, vipères...) se caractérisent par une très grande ouverture buccale, qui leur permet d'avaler des proies dont le diamètre est supérieur au leur.

M. Caldwell et M. Lee avaient supposé que ces serpents à pattes représentaient



Podophis descouensi, fossile de serpent à pattes (à droite, l'une d'elles est marquée par une flèche jaune) découvert au Moyen-Orient.



Deux arbres généalogiques concurrents des serpents. En bas, reconstitution du serpent à pattes *Podophis descouensi*. On remarque la très petite taille relative des pattes et leur curieuse position, près de l'extrémité caudale.

une branche ancienne, qui s'était détachée du tronc commun des serpents avant que les scolécophidiens et les aléthynophidiens ne s'individualisent. En revanche, E. Tchernov et ses collègues, se fondant surtout sur l'analyse d'*Haasiophis*, dont la bouche

est étonnamment grande, considèrent que ces serpents bipèdes sont des macrostomates, c'est-à-dire des serpents évolués.

Podophis, lui, semble confirmer l'hypothèse de M. Caldwell et M. Lee : il montre que les serpents bipèdes sont primitifs.

Dans cette hypothèse, les serpents anciens auraient été macrostomates ; la grande bouche des serpents actuels serait une structure anatomique ancienne. Autrement dit, les serpents évolués ne seraient pas ceux que l'on croit.

Dans l'hypothèse inverse, comment les serpents à pattes seraient-ils dérivés de serpents ne possédant plus de pattes ? Autrement dit, soit tous les groupes de serpents autres que les formes bipèdes ont perdu indépendamment leurs pattes postérieures, soit les pattes postérieures sont réapparues chez les serpents bipèdes.

Des caractères anatomiques importants ayant été mal interprétés par E. Tchernov et ses collègues, leur hypothèse semble douteuse, mais le paradoxe subsiste. On devra commencer par revoir les données sur ces trois fossiles. On n'oubliera pas non plus que les serpents bipèdes étaient marins. S'ils sont effectivement primitifs, il s'agit d'un argument qui s'ajoute au fait que les plus proches parents des serpents sont des lézards vanaroïdes du Crétacé, marins eux aussi. Ainsi, on devrait conclure que les serpents sont nés de lézards en milieu marin, alors qu'on pensait naguère qu'ils étaient issus d'animaux fouisseurs.

Jean-Claude RAGE
et François ESCUILLIÉ

Le plomb au service de l'environnement

Pour détecter la contamination des nappes phréatiques par les décharges publiques

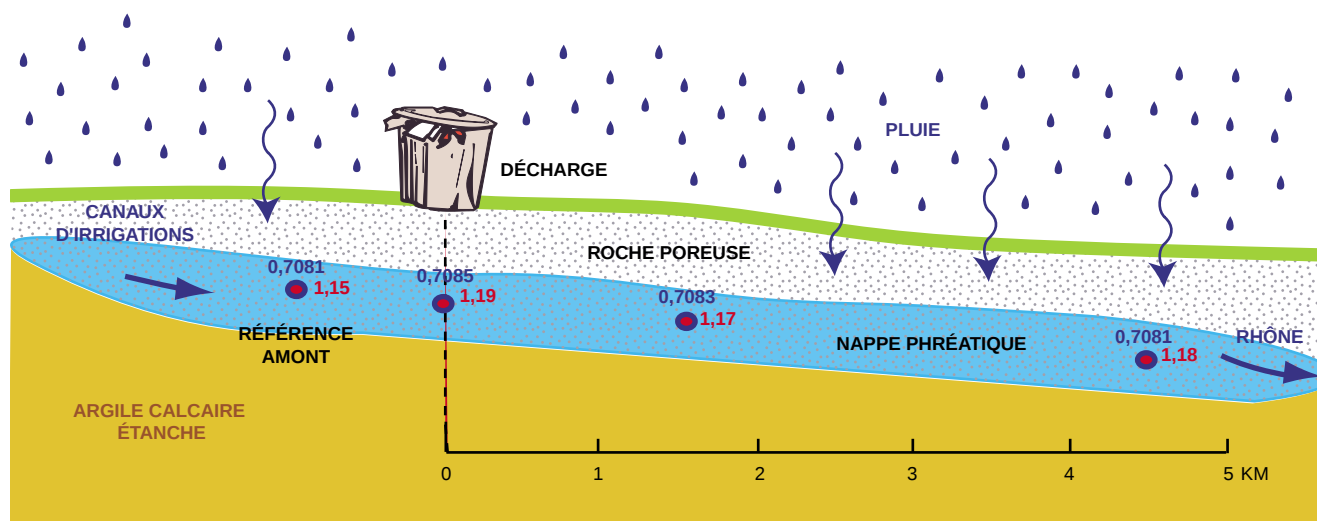
Les décharges d'ordures ménagères sont disgracieuses et nauséabondes. On sait moins qu'elles polluent les sols et les eaux : quand l'eau de pluie traverse les déchets, elle en extrait certaines substances solubles (des sels, des composés organiques...) qu'elle emporte avec elle ; ce «lixiviat» passe dans le sol. Aussi, depuis quelques années, on utilise des barrières composées de couches successives d'argile et de matériaux synthétiques, afin de confiner les lixivats. Cependant, en l'absence de barrière ou en cas de fuite, ceux-ci s'infiltrent dans les aquifères (les formations géologiques poreuses) et se mélangent à la nappe phréatique. Pour détecter une éventuelle contamination de ces réserves d'eau, voire leur pollution, on compare les concentrations en

certaines substances chimiques en amont et en aval de la décharge. Les plus utilisées sont les ions chlorures, sulfates et nitrates, ainsi que le carbone présent dans des molécules organiques. Cependant, à cause de leur dilution dans l'eau des aquifères, les concentrations de ces molécules sont parfois inférieures à la limite de détection (en général, un microgramme par litre). En outre, ces traceurs ne sont pas toujours issus de la décharge : le carbone organique est omniprésent dans la nature ; les chlorures viennent parfois du salage des routes, et les sulfates et les nitrates des engrais. Notre équipe a mis au point une méthode à la fois plus fiable et plus sensible de détection des lixivats : nous proposons de mesurer les rapports isotopiques du plomb et du strontium dans les eaux des nappes phréatiques (les isotopes sont des atomes qui ont le même nombre de protons, mais un nombre de neutrons différent : ils n'ont pas la même masse).

Dans les décharges d'ordures ménagères, le plomb est surtout présent dans les circuits électriques et dans les piles, tandis que le strontium vient principalement des objets en plastique, où

il est associé aux carbonates de calcium, qui améliorent leur résistance mécanique. On retrouve ces deux éléments en faibles concentrations dans les lixivats : quelques microgrammes par litre de plomb et jusqu'à un milligramme par litre de strontium.

Chaque minerai de plomb ou de strontium présente une composition isotopique qui dépend de son âge, de sa composition et des conditions où il s'est formé. Les variations de cette composition résultent de mécanismes de fractionnement naturels, lors de la formation du minerai : les rendements des transformations physiques et chimiques des isotopes d'un même élément sont légèrement différents, surtout dans le cas des éléments légers (la différence relative de masse entre les isotopes est plus grande que pour les éléments lourds). Dans les lixivats issus des décharges, les abondances isotopiques relatives résultent de celles des déchets, dont les matériaux ont été fabriqués à partir de minerais variés (il n'y a pas de fractionnement lorsque les lixivats traversent les formations géologiques). Elles sont distinctes des abondances naturelles dans la nappe phréatique, qui sont



Les rapports isotopiques du plomb ($^{206}/^{207}$, en bleu) et du strontium ($^{87}/^{86}$, en rouge) diffèrent en amont et en aval de cette décharge. En amont, ils dépendent de la nature géochimique du sous-sol. En aval, ils résultent du mélange avec la nappe phréatique de l'eau qui

a traversé les déchets (dont les matériaux ont des rapports isotopiques propres aux minerais utilisés pour les fabriquer) et s'est infiltrée dans le sol. Grâce à la mesure de ces rapports, on détecte une éventuelle contamination de la nappe phréatique.

déterminées par la nature géochimique du sous-sol.

Dans les nappes phréatiques analysées, on détecte le plomb et le strontium par spectrométrie de masse : les plus faibles concentrations mesurables sont de l'ordre de 10 picogrammes (10 millièmes de microgramme) par litre pour le plomb et de 50 nanogrammes (50 millièmes de gramme) pour le strontium. Les concentrations effectivement mesurées sur le terrain sont trop faibles pour que l'on parle de pollution : celle du plomb est 500 fois inférieure à la limite autori-

sée dans l'eau potable. En revanche, les rapports isotopiques différents, en amont et en aval des décharges, prouvent que les lixiviats qui en sont issus atteignent les nappes. Sur l'un des sites étudiés, nos analyses montrent que le rapport isotopique du strontium dans l'eau de la nappe phréatique revient à sa valeur amont à 4,5 kilomètres en aval de la décharge. En revanche, à cette distance, le rapport isotopique du plomb reste supérieur (voir la figure) : grâce au plomb, on détectera une éventuelle contamination à plus grande distance.

Lorsque les lixiviats pénètrent dans les aquifères, ils participent à des réactions biologiques conduisant à la dégradation de la matière organique par des bactéries et à des réactions physico-chimiques concomitantes, qui fixent une partie des métaux. En étudiant les rapports isotopiques du plomb et du strontium dans l'aquifère, on espère mieux comprendre ces phénomènes.

J.-Y. BOTTERO et J.-D. VILOMET
Unité mixte 6635
(CNRS/CEREGE/Université d'Aix-Marseille III)

Pas de quoi en faire un plat

Faute d'une théorie convenable, le débat cosmologique s'enlise.

Depuis quelques années, le public est averti des « progrès » spectaculaires de la cosmologie : un jour, on découvre que l'expansion de l'Univers s'accélère ; un autre, que l'origine de la masse manquante est enfin élucidée ; le mois dernier, des cosmologistes affirmaient que, dans le cadre des modèles proposés, l'Univers est plat. Pourquoi les nouvelles de ce genre s'accumulent-elles sans être confirmées. Qu'avons-nous réellement appris sur l'Univers depuis 50 ans ? Que signifie la platitude de l'Univers ?

La théorie de la gravitation d'Einstein a permis de forger le concept d'univers courbe. Cette courbure apparaît quand on considère comment deux rayons lumi-

neux issus de la Terre et qui se propagent selon deux directions voisines s'écartent, à mesure que la lumière se propage. Dans un univers plat, l'écartement entre les rayons varie conformément à la géométrie euclidienne : il augmente proportionnellement à la distance parcourue à partir de la source. Dans un univers courbe, la courbure se manifeste par une différence entre l'écartement mesuré et celui que donnerait, à la même distance de la source et au même écartement angulaire, la formule euclidienne.

Selon la courbure, positive ou négative, cette différence correspond à un déficit ou à un excès d'écartement par rapport à celui qui existerait dans un univers euclidien.

Le point clé du débat est que la courbure n'est perceptible que suffisamment loin du point d'observation, lorsque la distance à ce point est une fraction notable d'une longueur caractéristique nommée « rayon de l'Univers ». Ce rayon indique à quelle échelle de dis-

tance la différence avec le cas euclidien devient notable. Dans un univers à courbure positive, à une distance égale à son rayon, l'écart entre les faisceaux lumineux est 16 pour cent inférieur à l'écart euclidien, tandis qu'il n'est que 4 pour cent inférieur à l'écart euclidien à une distance égale à la moitié de ce rayon.

Le problème est de déterminer le rayon d'un univers. Notre Univers est âgé d'environ 15 milliards d'années, ce qui fixe la distance de l'horizon cosmologique et limite le volume observable de l'Univers (la lumière qui est au-delà de l'horizon cosmologique n'a pas pu nous parvenir). Ainsi, si le rayon de notre Univers est bien supérieur à 15 milliards d'années-lumière, la courbure sera indétectable, et notre Univers paraîtra plat. C'est comme si l'on décrétait que la Terre est plate parce que, à l'échelle de la France, elle semble plate (voir la figure). Tant que l'horizon cosmologique est bien inférieur au rayon de l'univers, tout univers semble plat.