

Science et société

Des milliards d'euros qui partent en fumées

Plusieurs dizaines de milliards d'euros : c'est le coût associé à la pollution de l'air en France, selon un bilan dressé par une commission d'enquête du Sénat et rendu public le 15 juillet. Olivier Chanel, économiste de l'environnement à l'AMSE-GREQAM, à Marseille, nous décrit les divers impacts des polluants et la façon dont on calcule leur coût.

Une heure après le passage de la sonde au plus près de Pluton, une image de la planète occultant le Soleil a été prise. On voit ainsi son atmosphère, éclairée par l'étoile (c). Elle s'étend jusqu'à 130 kilomètres d'altitude. La couche au-dessus de 80 kilomètres est plus diffuse et composée de méthane. Exposées au rayonnement ultraviolet du Soleil, ses molécules se combinent pour former de l'éthylène et de l'acétylène qui migrent dans la partie basse de l'atmosphère. Ces composés organiques, sous l'action de la lumière, forment alors des molécules diverses nommées tholins, qui se déposent sur le sol et lui donnent sa couleur sépia.

Les compagnons de Pluton sont aussi à l'honneur sur les images de *New Horizons*. Un cliché de Charon (d), corps de 1 200 kilomètres de diamètre, révèle des structures impressionnantes et variées : un canyon profond de 7 à 9 kilomètres et des falaises s'étirant sur 1 000 kilomètres, qui seraient le résultat d'une activité géologique interne. La tache sombre visible au pôle Nord, baptisée Mordor en référence au *Seigneur des anneaux*, serait un mince dépôt noir encore non identifié. Comme Pluton, Charon semble relativement pauvre en cratères d'impact, probablement effacés par une activité géologique encore importante.

New Horizons est loin d'avoir transmis toutes les données recueillies lors de son bref survol de Pluton : elles sont envoyées vers la Terre au rythme de 2 000 bits par seconde, et il faudra 16 mois pour toutes les réceptionner ! Les astronomes sont impatients de pouvoir les éproucher pour y trouver des réponses à leurs questions... et de nouvelles énigmes.

Sean Bailly

Site de la mission : <http://pluto.jhuapl.edu/>

Quels sont les principaux polluants et leurs sources ?

Olivier Chanel : Nous vivons dans un cocktail de multiples polluants : oxydes d'azote, particules fines, ozone, ammoniac, oxydes de soufre... Les pollueurs varient selon le composé et la zone géographique. Les oxydes d'azote sont principalement émis par les transports, l'ammoniac par l'agriculture, les oxydes de soufre par l'industrie... Quant aux particules fines, les principales sources sont les transports en zone urbaine, mais l'industrie et les chauffages individuels sur le reste du territoire.

Quels effets néfastes ont ces polluants ?

O. C. : Principalement des effets sanitaires. La pollution de l'air augmente par exemple le risque de cancer du poumon, d'accident cardiovasculaire et de crise d'asthme. Cela réduit l'espérance de vie de quelques mois en moyenne en France. Avec de grandes disparités : chacun est plus ou moins sensible et les citadins sont particulièrement exposés. À Marseille, la plus touchée des grandes villes, la baisse de l'espérance de vie atteint 7,5 mois par habitant en moyenne.

Il existe également des effets non sanitaires. Les polluants, parfois toxiques pour les plantes, entraînent une baisse des rendements agricoles et forestiers, et dégradent les bâtiments.

Comment quantifie-t-on les effets sanitaires ?

O. C. : On mesure à la fois les émissions polluantes à un endroit particulier et certains indicateurs de santé, tels que le nombre de cas de cancer du poumon dans la population habitant ou travaillant à proximité de cet endroit. Des traitements statistiques permettent ensuite d'éliminer les autres causes potentielles et d'attribuer les troubles aux polluants.

Reste alors à évaluer leur coût. Pour les maladies,



Olivier Chanel est directeur de recherche au CNRS.

l'une des méthodes consiste à compter le nombre de jours d'arrêts de travail ou d'hospitalisation, et à multiplier par les salaires et les frais de santé. Pour les décès prématurés, c'est plus compliqué. Depuis une trentaine d'années, on utilise des méthodes dites de préférences déclarées, où l'on demande aux gens combien ils seraient prêts à payer pour réduire leur probabilité de mourir. On estime ainsi la valeur d'une année de vie perdue entre 30 000 et 80 000 euros.

Comment les coûts se répartissent-ils ?

O. C. : Environ 80 % du coût de la pollution atmosphérique est lié à la surmortalité. L'augmentation des pathologies représente 5 à 10 %, comme les effets non sanitaires. Au total, on obtient plusieurs dizaines de milliards d'euros pour l'impact sanitaire et quelques milliards pour les autres effets.

Le rapport du Sénat propose-t-il des solutions ?

O. C. : Oui, il préconise toute une série de mesures. La plupart visent à diffuser les bonnes pratiques (nettoyage des équipements, cycles de combustion optimisés, etc.) ou à favoriser la recherche et l'innovation. L'instauration d'une fiscalité écologique est aussi conseillée, par exemple pour développer les véhicules électriques.

Un levier important, et insuffisamment traité dans le rapport à mon sens (une seule mesure), serait de réduire les transports individuels. Plusieurs pistes existent, telles qu'un meilleur maillage du territoire par les transports publics. Si l'on diminue le nombre de véhicules, on fait baisser non seulement la pollution, mais aussi les nuisances associées, tels le bruit ou les émissions de gaz à effet de serre.

Guillaume Jacquemont

Pollution de l'air : le coût de l'inaction, rapport n° 610, 2015 (www.senat.fr/rap/r14-610-1/r14-610-11.pdf)

Une cousine de la Terre

L'exoplanète Kepler-452b, découverte en juillet, se distingue de la Terre par peu de choses. Elle est située dans la zone habitable – la région autour de l'étoile où l'eau est susceptible d'être liquide. Et contrairement aux autres planètes connues dans cette zone, Kepler-452b est en orbite autour d'une étoile similaire au Soleil. La durée de sa révolution est de 385 jours. La différence la plus marquée est sa taille : un diamètre 60 % plus important que celui de la Terre. La composition rocheuse de cette super-Terre reste à confirmer.

Captivantes diatomées

Dans l'océan, les diatomées sont parmi les membres les plus efficaces du phytoplancton pour fixer le dioxyde de carbone par photosynthèse : ces organismes unicellulaires contribuent autant à la production de matière organique planétaire que les forêts tropicales. Benjamin Bailleul, de l'université de Liège, et ses collègues ont compris pourquoi. Chez les diatomées, des échanges énergétiques soutenus se produisent entre les chloroplastes, sièges de la photosynthèse, et les mitochondries, sièges de la respiration, ce qui, en ajustant l'énergie fournie aux chloroplastes, optimise la photosynthèse.

Percées de pulsar

Le système binaire B1259 contient un pulsar – une étoile à neutrons en rotation rapide – et une étoile 30 fois plus massive que le Soleil, également en rotation rapide sur elle-même. Cette dernière expulse de la matière qui forme un disque autour d'elle. Grâce à l'observatoire spatial *Chandra*, George Pavlov, de l'université d'État de Pennsylvanie, et ses collègues ont observé que le pulsar perce le disque et en disperse la matière lors de chacun de ses passages au plus près de l'étoile, tous les 41 mois.

Biophysique

Quand l'hippocampe inspire la robotique



© bluehand/shutterstock.com

Les os de la queue de l'hippocampe forment des plaques carrées articulées.

Chez les différentes espèces animales, la queue est généralement cylindrique. Pas celle de l'hippocampe, qui est constituée d'une succession de segments osseux carrés. Ces derniers sont formés de quatre plaques en forme de L reliées par des joints offrant une grande flexibilité. Quel avantage cette structure confère-t-elle à l'hippocampe ?

Michael Porter, de l'université de Clemson aux États-Unis, et ses collègues ont utilisé une imprimante 3D pour reproduire deux structures : une carrée s'inspirant de la queue de l'hippocampe, et une circulaire. Ces prototypes ont ensuite été soumis à différentes contraintes : torsion, pliage, compression et écrasement.

Il faut fournir plus d'énergie (environ dix fois plus) pour casser la structure carrée que pour briser la circulaire. Cette résistance confère sans doute à l'hippocampe une meilleure protection face aux prédateurs. De plus, comme la surface de contact des plaques carrées est plus grande que celle des plaques rondes, l'hippocampe saisit des objets plus aisément et avec un meilleur contrôle.

Cette étude pourrait aider les ingénieurs à créer de nouveaux dispositifs robotiques. L'une des idées est, par exemple, d'imiter la structure de l'hippocampe pour construire un solide bras automatisé capable d'intervenir dans des environnements hostiles.

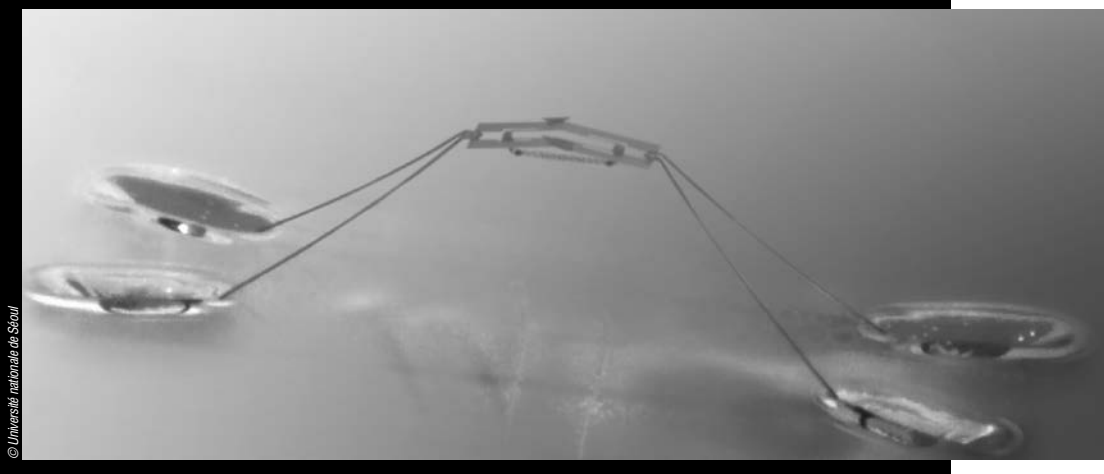
Dylan Beiner

M. M. Porter et al., *Science*, vol. 349, n° 6243, 2015

Insolite

Le robot qui saute sur l'eau

Décidément, la nature est une bonne source d'inspiration pour la robotique. Dans la catégorie « marcher sur l'eau », les gerris, des punaises d'eau, sont imbattables. Ces insectes profitent de la tension superficielle de l'eau, qui fait de sa surface une sorte de peau sur laquelle ils évoluent. Des robots se déplaçant sur l'eau existent depuis une dizaine d'années, mais plus difficile à reproduire était le saut du gerris : l'insecte est capable de créer une poussée verticale sans percer la surface du liquide, évitant ainsi le risque de noyade. Je-Sung Koh, de l'université nationale de Séoul, et ses collègues ont montré que pour ce faire, les pattes de l'insecte effectuent un mouvement de rotation, que leur robot sauteur (*ci-dessous*) reproduit parfaitement.



© Université nationale de Séoul

Archéologie



© Juan Luis Arsuaga

La vraie tombe de Philippe II de Macédoine identifiée

La « Tombe de Philippe » de la nécropole royale d'Aigéai, la première capitale macédonienne, était censée être celle de Philippe II, le père d'Alexandre le Grand. Mais une tombe voisine, où est inhumé un personnage boiteux, est probablement la véritable sépulture du monarque.

Juan Luis Arsuaga, de l'université de Madrid, et son équipe viennent d'aligner une série d'indices suggérant que les restes de Philippe II de Macédoine (-382 à -336) se trouvaient dans la tombe royale I d'Aigéai plutôt que dans la tombe II.

Aigéai, près de Vergina au nord de la Grèce actuelle, était la première capitale du royaume de Macédoine. Découverte intacte en 1977, la tombe II est une tombe à incinération qui contenait un riche mobilier funéraire. Plusieurs indices suggèrent qu'il pourrait s'agir de la tombe de l'un des fils de Philippe II, mais « l'establishment archéologique s'acharne à maintenir qu'il s'agit de celle de Philippe II », souligne Juan-Luis Arsuaga.

Pour sa part, la tombe I est une tombe à inhumation qui contenait les squelettes d'un homme, d'une femme et d'un bébé. Plus ancienne que la tombe II, elle est flanquée d'un autel dédié au culte d'un héros. Elle se distingue aussi par ses magnifiques peintures. L'étude de l'usure des dents de l'homme défunt suggère qu'il est décédé vers l'âge de 45 ans ; celle des dents de la jeune femme suggère

un décès à 18 ans ; quant au bébé, ses os longs indiquent une mort vers 10 ou 11 mois.

Or ces âges correspondent au récit historique relatif au monarque, père d'Alexandre le Grand. Philippe II a en effet presque 46 ans quand il est assassiné. On soupçonne qu'Olympias, sa quatrième épouse, a trempé dans ce meurtre qui ouvre le chemin du trône à son fils Alexandre. Quoi qu'il en soit, aussitôt après l'assassinat, Olympias vient tuer « sur les genoux de sa mère » le bébé de la septième épouse Cléopâtre, qu'elle oblige ensuite à se pendre.

Toutefois, ce sont surtout les lésions osseuses du genou gauche de l'homme qui convainquent les chercheurs espagnols qu'ils ont bien affaire à Philippe II. D'après son opposant Démosthène (-384 à -322), quelques années avant sa mort, le roi est blessé « à la jambe » au cours d'une bataille, et il en aurait gardé une forte boiterie. Or les chercheurs ont constaté que le genou gauche de l'homme de la tombe I était figé par une ankylose – une prolifération de tissu, qui, selon les chercheurs, s'est produite pendant l'inflammation due à une agression de l'articulation et non

pas à une maladie. En outre, le tibia et le fémur sont fusionnés autour d'un trou rond de la taille d'une pointe de lance.

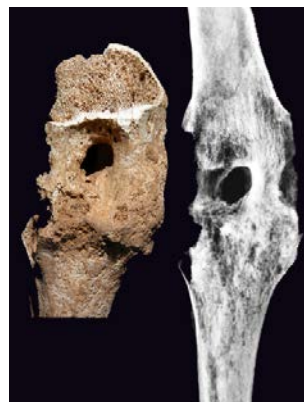
D'après les chercheurs, l'irruption de cette pointe dans l'articulation a violemment séparé le tibia du fémur. Malgré cela, les médecins du roi ont longtemps évité de retirer l'arme afin d'éviter une hémorragie mortelle. La prolifération qui s'est enclenchée a donc soudé les os de part et d'autre de la pointe. Ce n'est que quand la cicatrisation a été assez avancée que les médecins du roi ont osé retirer la pointe, ce qui a laissé un trou béant au milieu d'une articulation désormais figée.

Pour les chercheurs, la présence dans la tombe de trois défunts d'âges correspondant aux âges historiques de Philippe II, de Cléopâtre et de leur bébé, la blessure handicapante de l'un d'eux au genou, la présence d'un autel dédié à un grand héros, l'ornementation somptueuse de la tombe et son antériorité ne s'expliquent que si la tombe I est bien celle du père d'Alexandre le Grand.

François Savatier

PNAS, en ligne le 22 juillet 2015

Cette fresque (ci-dessus) de grande qualité retrouvée dans la tombe I d'Aigéai représente le rapt de Perséphone, la future reine des morts, par le dieu des enfers Hadès, thème attendu dans un contexte funéraire. Des clichés de la jambe endommagée du présumé Philippe II révèlent le passage de la lance que le roi reçut dans le genou lors d'une bataille (ci-dessous).



Neurobiologie

Des neurones de vitesse complètent le GPS cérébral

Dans la lignée de ses travaux sur la représentation mentale de l'espace, l'équipe des prix Nobel May-Britt et Edvard Moser a découvert des neurones qui traduisent la vitesse de déplacement.



Des neurones situés dans le cortex entorhinal (à droite, en bleu) s'allument d'autant plus vite que la vitesse de déplacement est grande.

15%

des neurones

du cortex entorhinal médian sont des « neurones de vitesse ».

Depuis les années 1970, plusieurs travaux ont révélé la façon dont nous dressons une carte mentale de l'environnement. Certains ont d'ailleurs été récompensés par le prix Nobel de médecine et de physiologie 2014, tels ceux des époux May-Britt et Edvard Moser, de l'Université norvégienne de sciences et technologie. L'équipe de ces deux chercheurs vient de découvrir chez les rats une nouvelle pièce du GPS cérébral : des neurones indiquant la vitesse de déplacement.

Notre système de navigation interne repose sur plusieurs régions de l'encéphale, parmi lesquelles le cortex entorhinal médian. Dans ce dernier, certains neurones traduisent la position de la tête, d'autres la présence éventuelle d'un « bord » (un mur, un précipice, etc.) et d'autres encore créent un maillage spatial virtuel : chacun de ces neurones, nommés cellules de grille, s'allume quand l'animal passe par, ou pense à, divers points de l'environnement, points qui dessinent une grille hexagonale.

Si la représentation mentale de l'espace commençait donc à être bien comprise, le signal de vitesse permettant une navigation dynamique au sein de cette représentation était plus obscur. Les chercheurs l'ont traqué dans le cortex entorhinal médian. Pour ce faire, ils ont mesuré l'activité de neurones individuels grâce à des microélectrodes implantées dans le cerveau des rats, pendant que ces derniers se déplaçaient. Au total, plusieurs milliers de neurones ont été suivis à la loupe.

Les chercheurs ont trouvé qu'environ 15 % des neurones du cortex entorhinal médian sont des « neurones de vitesse » : ils émettent des impulsions à un rythme proportionnel à la vitesse de déplacement de l'animal (mesurée par ailleurs). En d'autres termes, leur fréquence d'allumage est d'autant plus haute que la vitesse est élevée, et ce quels que soient l'environnement et le sens du déplacement.

Comment des informations sur la vitesse parviennent-elles à ces neurones ? Apparemment pas

via des signaux visuels – tels que le défilement des objets –, car les neurones de vitesse s'activaient de la même façon dans le noir. Les chercheurs supposent donc que ces informations viennent en partie des signaux neuraux de type proprioceptif ou moteur, issus des muscles et des articulations.

Restait à déterminer comment la vitesse est intégrée au GPS cérébral. Par une analyse de l'activité des neurones de vitesse et des neurones de grille, les chercheurs ont montré que l'allumage des premiers influe sur celui des seconds. Mieux : plus la vitesse (et donc la fréquence d'activation des neurones de vitesse) est grande, plus les neurones de grille s'allument en avance sur le passage réel au point de la grille. Le signal de vitesse sert donc au cerveau à anticiper en permanence les positions atteintes l'instant d'après et ainsi à se représenter mentalement les déplacements dans l'espace.

G. J.

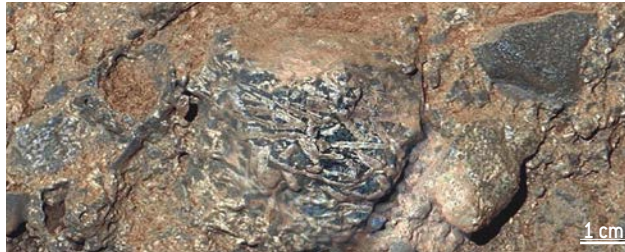
E. Kropff et al., *Nature*, en ligne le 15 juillet 2015

Géosciences

Curiosity : de la croûte continentale sur Mars

La géologie martienne serait bien plus proche de celle de la Terre qu'on ne le pensait. Dans la croûte terrestre, on distingue la croûte océanique, dense et constituée de basalte, et la croûte continentale, plus légère et granitique. Qu'en est-il sur Mars ? Les observations spectroscopiques orbitales et l'analyse de météorites en provenance de la planète rouge indiquaient une prédominance de basalte, formé lors de processus de fusion partielle du manteau martien. Toutefois, des observations en orbite suggéraient l'existence d'îlots de croûte continentale, mais seule une mesure *in situ* pouvait le confirmer. C'est ce qui vient d'être fait avec l'analyse de 22 échantillons de roche du cratère Gale par le robot *Curiosity*.

Le robot *Curiosity* explore la région nord du cratère Gale, daté de 3,61 milliards d'années et situé sur un terrain ancien. Ses parois forment une coupe géologique naturelle de 2 à 3 kilomètres d'épaisseur. Violaine



Les instruments du robot *Curiosity* ont révélé des cristaux de feldspaths (traces claires allongées) typiques des croûtes continentales.

Sautter, du Muséum national d'histoire naturelle à Paris, et ses collègues ont utilisé l'instrument *ChemCam* installé sur le mât de *Curiosity* pour analyser la nature des roches. Il s'agit d'un spectromètre utilisant un laser pour analyser la chimie des roches et d'un imageur à haute résolution permettant d'en apprécier la texture.

Les chercheurs ont ainsi découvert une variété de roches, de couleur claire, riches en feldspaths et contenant parfois du quartz, soit des compositions analogues aux roches granitiques de la croûte continentale terrestre.

Ces résultats suggèrent que, il y a 4,1 à 3,7 milliards d'années, une croûte basaltique préexistante aurait fondu en présence de fluides et engendré cette croûte continentale. Deux scénarios sont possibles : la croûte primitive dense s'est enfoncée dans la lithosphère et a partiellement fondu, ou bien un point chaud a fait fondre la croûte, comme c'est le cas en Islande. De plus amples observations seront nécessaires pour trancher entre ces pistes.

S. B.

V. Sautter et al., *Nature Geoscience*, en ligne le 13 juillet 2015

Des résultats de *Philae*

Le 12 novembre 2014, le robot *Philae* s'est posé sur la comète « Tchouri » dans le cadre de la mission *Rosetta*. Cependant, l'appareil a rebondi et s'est immobilisé dans une zone peu éclairée. Le robot a effectué des mesures, alimenté par ses batteries pendant deux jours. Ces premiers résultats donnent une vision inattendue de la comète. Le radar CONSERT a montré que la partie de la comète surnommée la « tête » est plus homogène qu'on ne le pensait et que sa porosité est d'environ 80 %. Les chercheurs ont identifié 16 molécules organiques avec l'analyseur chimique COSAC, dont 4 sont observées pour la première fois sur une comète, tel l'acétone. Ces composés, précurseurs et produits les uns des autres, créent une vision cohérente de la chimie dans ce milieu. Par ailleurs, ils sont aussi les précurseurs des sucres et des acides aminés, molécules essentielles à la vie. *Philae* a repris contact, par intermittence, avec *Rosetta* depuis juin 2015. D'autres mesures suivront peut-être.

Paléontologie

Un énigmatique fossile de serpent tétrapode

David Martill, de l'université de Portsmouth, a fait une trouvaille en Allemagne : un fossile de serpent à quatre pattes provenant du Brésil. Comme il était conservé depuis plusieurs décennies par un particulier, il s'agit sans doute d'un fossile détenu illégalement, le Brésil ayant interdit toute sortie de fossiles du pays depuis 1942...

La finesse du calcaire lithographique qui le contient et la couleur orange des os suggèrent qu'il pourrait provenir de la formation du Crato, au nord-est du Brésil, laquelle date de 126 à 113 millions d'années. Avec un collègue anglais et un collègue allemand,

David Martill a réussi à obtenir la pièce pour décrire cette nouvelle espèce. Les chercheurs l'ont nommée *Tetrapodophis amplexus*, c'est-à-dire « constricteur à quatre pattes ».

Ils ont constaté que toutes ses caractéristiques morphologiques, sauf une, font penser à un serpent. Ainsi, *Tetrapodophis* avait un museau court, une boîte crânienne allongée, un corps serpentiforme, des écailles, des dents acérées et une mâchoire extensible pour avaler des proies plus grosses que lui. De plus, le corps a 160 vertèbres, suivies de 112 vertèbres de la queue. Il s'agit là d'un caractère crucial,

puisque seuls les serpents ont plus de 150 vertèbres. Un autre argument fort est le fait que l'animal avait des écailles sur toute la largeur du ventre, trait qui n'est connu que chez les serpents. Quelle est alors l'unique raison militante contre l'idée que *Tetrapodophis* soit un serpent ? Ses quatre pattes !

S'il est bel et bien un serpent, *Tetrapodophis* est d'une grande signification paléontologique. En effet, sa queue n'est pas aplatie en forme de nageoire, mais conique : les serpents seraient donc d'origine terrestre, et non aquatique.

F. S.

Science, vol. 349, pp. 416-419, 2015



Un détail du fossile montrant les deux pattes postérieures de l'animal, situées peu avant la queue.

Paléontologie

Hallucigenia retrouve sa tête

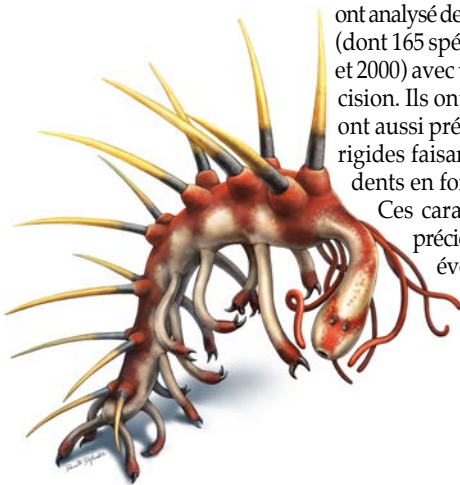
Avec ses sept paires de pics dorsaux, ses dix paires de pattes et tentacules, l'animal fossile *Hallucigenia* intriguait beaucoup les chercheurs qui l'ont découvert en 1977 dans les schistes de Burgess, au Canada. Les paléontologues ont d'abord pensé que les pics étaient les pattes et les pattes des tentacules sur le dos... et que la queue était la tête! *Hallucigenia* est une de ces espèces bizarres qui sont apparues au cours de l'explosion cambrienne, il y a entre 541 et 485 millions d'années, avec de nombreuses autres espèces animales et végétales.

Martin Smith, de l'université de Cambridge au Royaume-Uni, et Jean-Bernard Caron, de l'université de Toronto au Canada, ont analysé de nombreux spécimens fossilisés (dont 165 spécimens découverts entre 1992 et 2000) avec un microscope de grande précision. Ils ont ainsi pu identifier la tête. Ils ont aussi précisé la présence de structures rigides faisant le tour de la bouche et des dents en forme de pics dans le pharynx.

Ces caractéristiques sont des indices précieux pour reconstruire l'histoire évolutive des proches parents de *Hallucigenia*.

S. B.

M. R. Smith et J.-B. Caron, *Nature*, vol. 523, pp. 73-78, 2015



Archéologie

Une vieille maison d'Amazonie

Dans un talus tranché par la création d'un chemin, non loin de Puyo en Équateur, l'équipe de Stéphane Rostain, du CNRS, a remarqué une zone noire. Il s'agissait d'un foyer rempli de restes charbonneux. Leur datation indique un âge de plus de 3 100 ans.

Cette ancienneté est remarquable, puisqu'elle fait remonter le foyer à la Période formative (-2700 à -200) qui, dans les Andes voisines, est celle de l'apparition des premiers villages de paysans. Un décapage a mis en évidence une vingtaine de trous de poteaux. Le plan dessiné par les poteaux a révélé qu'une case ovale de 19 mètres par 11 (soit 220 mètres carrés) contenant un grand foyer décentré se dressait à cet endroit il y a quelque trois millénaires. Ce type d'habitation est tout simplement la version locale d'une maison longue, genre universel de demeure destinée à loger une famille élargie et ses animaux. La version amazonienne découverte par l'équipe de Stéphane Rostain est, elle, d'un modèle toujours employé par les Amérindiens de la région.

F. S.

Biologie végétale

La plante choisit ses bactéries

Le microbiote n'est pas l'apanage des animaux. Les plantes, elles aussi, vivent avec de nombreux micro-organismes, principalement des bactéries. Chez l'humain, ces microbes sont sur la peau, dans la bouche, le vagin ou l'intestin. Chez la plante, ils colonisent en particulier le sol proche de ses racines – la rhizosphère. L'ensemble des microbes associés à un organisme – son microbiote – lui est propre.

Un fait étonnant est que, bien que le sol soit riche d'une immense variété de communautés bactériennes, les quelque 10 milliards de cellules par gramme de sol qui colonisent la rhizosphère d'une plante ne représentent qu'une infime portion de cette diversité. Comment la plante « choisit-elle » ses bactéries? Une équipe américaine vient de découvrir un mécanisme en jeu. La plante enverrait un signal depuis ses feuilles via une molécule, l'acide salicylique (le principe actif de l'aspirine).

L'acide salicylique est une hormone des plantes impliquée dans leur développement et leur défense contre des agents pathogènes. Il constitue un acteur clef de leur système immunitaire: synthétisé dans les feuilles en cas d'attaque par un agent pathogène biotrophique (qui se nourrit de la plante), il sert de message et déclenche des mécanismes de résistance. Il n'est pas la seule phytohormone à

remplir ce rôle. D'autres, telles que l'acide jasmonique et l'éthylène, présents dans les racines, sont activées par des bactéries nécrotrophiques (destructrices) ou des insectes mâcheurs.

Sarah Lebeis et Sur Herrera Paredes, de l'université de Caroline du Nord, à Chapel Hill aux États-Unis, et leurs collègues ont voulu savoir si ces phytohormones jouent un rôle dans la composition du microbiote racinaire. Pour ce faire, les biologistes ont comparé son génome (le microbiome) chez une plante modèle sauvage, l'arabette des dames, et divers mutants de cette plante où au moins l'une de ces phytohormones n'était plus synthétisée ou ne remplissait plus son rôle. Ils ont ainsi montré que l'acide salicylique module la composition du microbiote racinaire: tant sa synthèse que la voie de signalisation qu'il déclenche sont nécessaires pour que la composition du microbiote soit normale.

Ainsi, le système immunitaire de la plante influe directement sur la sélection des communautés microbiennes qui formeront le microbiote de sa rhizosphère. Comme chez l'animal, ces communautés participent à sa défense contre les agents pathogènes. Une piste pour améliorer le rendement des cultures?

Marie-Neige Cordonnier

S. L. Lebeis et al., *Scienceexpress*, 16 juillet 2015

Une hormone synthétisée dans les feuilles de la plante orchestre la sélection des populations de microbes qui colonisent le sol autour de ses racines.



© Shutterstock.com/amanic 181

Astrophysique

Du footballène interstellaire

Une énigme astronomique de près de 100 ans aurait trouvé un début de réponse grâce aux footballènes, ces molécules sphériques formées de 60 atomes de carbone. En 1922, Mary Lea Heger, étudiante à l'université de Californie, observa que le rayonnement émis par une étoile est absorbé à certaines longueurs d'onde (plus de 400, entre l'infrarouge proche et l'ultraviolet proche), nommées bandes interstellaires diffuses, sans doute par des composés présents dans le milieu interstellaire. Parmi les candidats possibles, les ions C_{60}^+ étaient suspectés d'absorber deux bandes particulières. John Maier, de l'université de Bâle, en Suisse, et son équipe ont confirmé cette hypothèse en mesurant en laboratoire le spectre d'absorption des ions C_{60}^+ dans des conditions comparables à celles du milieu interstellaire.

S. B.

E. K. Campbell et al., *Nature*, vol. 523, pp. 322-323, 2015

Génétique

L'origine du parfum de la rose

Faite d'une multitude de composés, l'odeur de la rose est surtout due à des molécules de la famille des monoterpènes. Les biochimistes pensaient qu'il n'existait qu'une seule voie de synthèse de ces monoterpènes, faisant intervenir des enzymes de la famille des terpènes synthases.

Toutefois, Jean-Louis Magnard, de l'université de Saint-Étienne, et ses collègues ont mis en évidence une nouvelle voie de biosynthèse de ces molécules qui est contrôlée par la nudix hydrolase, une enzyme codée par le gène *RhNUDX1*. Plus l'expression de ce gène dans la fleur est importante, plus cette dernière présente une quantité élevée de monoterpènes, et donc plus elle est parfumée.

À terme, les biologistes pourront utiliser le gène *RhNUDX1* comme marqueur pour sélectionner des roses très parfumées.

D. B.

J.-L. Magnard et al., *Science*, vol. 349, pp. 81-83, 2015

Préhistoire

Un métissage tardif avec des Néandertaliens en Europe

Il y a environ 45 000 ans, *Homo sapiens* arrive en Europe, tandis que *Homo neanderthalensis* disparaît. Pourquoi? Qiaomei Fu, de l'Académie chinoise des sciences, apporte une pierre au débat : elle vient de montrer que l'ADN d'un *H. sapiens* mort il y a plus de 40 000 ans en Roumanie contient 7,3 % d'ADN néandertalien – soit trois fois plus que chez les Eurasiens actuels!

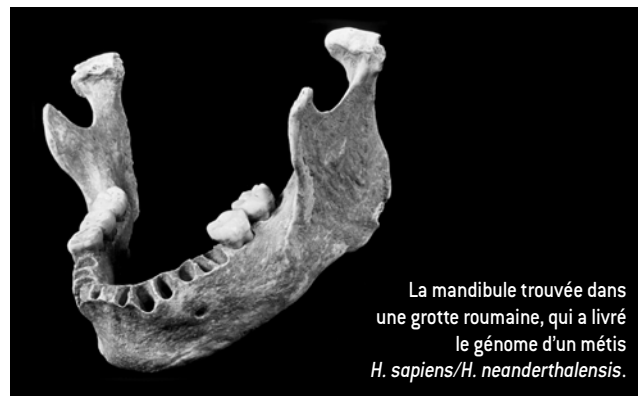
Par ailleurs, l'étude de sept segments d'ADN néandertalien représentant 1,6 à 6,3 % du génome de l'individu a montré qu'il a eu un ancêtre néandertalien 4 à 6 générations seulement avant lui. Tout aussi frappant : l'individu est plus apparenté aux Extrêmes-Orientaux

et aux Amérindiens qu'aux Européens actuels...

Comment interpréter cela? Un point semble acquis : un métissage tardif a eu lieu en Europe. Il s'est produit entre les Néandertaliens et les premiers *H. sapiens* européens qu'étaient les porteurs de la culture aurignacienne (-40 000 à -28 000 ans). Or on sait que des milliers d'années plus tard, la culture gravettienne (-31 000 à -22 000) recouvre la nappe aurignacienne. Bien plus nombreux et moins métissés que les Aurignaciens, les Gravettiens auraient dilué le métissage tardif *sapiens/neanderthalis* en Europe.

F. S.

Nature, en ligne le 22 juin 2015



La mandibule trouvée dans une grotte roumaine, qui a livré le génome d'un métis *H. sapiens/H. neanderthalensis*.

E. Trinkaus et al., *PNAS*, 100 : 11231-11236, 2003

Une dent humaine de 550 000 ans à Tautavel

Deux jeunes archéologues amateurs ont découvert, jeudi 23 juillet, à Tautavel dans les Pyrénées-Orientales, une incisive appartenant à un individu humain et vieille de 550 000 ans. Nommé Arago 149, ce spécimen a 100 000 ans de plus que le célèbre homme de Tautavel, ce qui en fait le plus ancien humain trouvé en France. La découverte est remarquable, dans la mesure où très peu de fossiles humains datant de cette période ont été mis au jour en Europe.

De l'argile au menu des chimpanzés

En Ouganda, des chimpanzés utilisent des feuilles comme éponges pour boire de l'eau argileuse. Vernon Reynolds, de l'université d'Oxford, et ses collègues ont constaté que cette habitude récente est corrélée à la disparition de palmiers *Raphia*

farinifera. Comment l'expliquer? Les feuilles de palmiers étaient pour les singes une source de minéraux, mais ils ont disparu à cause de leur utilisation par l'industrie du tabac. Les singes pourraient avoir trouvé une nouvelle source de minéraux dans l'eau argileuse, riche en sodium, calcium ou fer.

Suivez les dernières actualités de Pour la Science sur les réseaux sociaux



Retrouvez plus d'actualités sur www.pourlascience.fr

POINT DE VUE

Réforme du collège : l'interdisciplinarité est une bonne chose

Plusieurs expériences de projets transversaux menés en classe avec l'aide de chercheurs suggèrent que cette démarche favorise l'apprentissage.

Ange Ansour et François Taddei

Le 10 avril dernier, le Conseil supérieur de l'éducation a adopté le décret et l'arrêté qui définissent les principes de la réforme du collège en France prévue pour la rentrée 2016. Parmi les réactions que suscite cette réforme, plusieurs critiques portent sur les EPI – les enseignements pratiques interdisciplinaires que suivront les élèves de la 5^e à la 3^e, à raison de trois heures hebdomadaires maximum.

Ces nouveaux modules ont pour vocation de « construire et d'approfondir des connaissances et des compétences par une démarche de projet conduisant à une réalisation concrète, individuelle ou collective ». En d'autres termes, il s'agit de mener à bien des projets croisant plusieurs disciplines. Huit thématiques ont été définies, telles que « corps, santé, bien-être et sécurité » ou « sciences, technologie et société ». À l'issue du cycle, chaque élève doit avoir abordé six des huit thématiques.

Les critiques de ces EPI sont variées : « Au collège, c'est trop tôt pour ce genre d'enseignement, il faut rester sur les fondamentaux pour qu'ils soient bien acquis ; seuls les meilleurs élèves s'en sortiront ; les disciplines mères seront fragilisées par le temps qu'on leur prend ; les enseignants ne sont pas formés à une telle approche ; les infrastructures sont insuffisantes et les élèves trop nombreux... » Pourtant, divers indices en France et ailleurs suggèrent que, bien mise en œuvre, cette approche est très prometteuse, tant pour

favoriser l'apprentissage que pour aider les enfants à devenir des citoyens éclairés.

Une discipline est un corpus de concepts, un champ d'investigation ou un ensemble de méthodes propres ; mais c'est aussi une construction sociale – institutionnelle et universitaire –, prise dans des enjeux et luttes de pouvoir. Les disciplines scolaires sont issues des disciplines traditionnelles de l'université. Mais alors que les savoirs de la recherche sont en mutation permanente, faits d'emprunts à d'autres domaines, ils ont été, à l'école, fractionnés et inscrits dans des pratiques très éloignées des disciplines génitricées.

Partout dans le monde, des programmes visent à renouer avec l'héritage de la recherche.

Toutefois, la raison d'être originelle des disciplines est leur valeur d'usage, c'est-à-dire leur pertinence pour faciliter la compréhension d'un monde en mutation, où ce qui compte est la capacité explicative des modèles mis en œuvre. Partant de ce constat, partout dans le monde, divers programmes pédagogiques se sont montés ces dernières années, visant à renouer avec l'héritage de la recherche scientifique et son approche interdisciplinaire. Un article paru dans *Nature* le 16 juillet dernier recense plusieurs initiatives dans ce sens.

Lancé en 2006 en Allemagne, le programme *Haus der kleinen Forscher* (la maison des petits scientifiques) est installé dans

plus de 24 000 structures (crèches, garderies, écoles élémentaires) accueillant les enfants de trois à dix ans. Des enseignants formés à cette approche amènent les enfants à poser des questions sur les phénomènes naturels ou les objets du quotidien et à concevoir des activités pour tester leurs hypothèses. Le programme a fait des émules jusqu'en Australie, en Thaïlande et au Mexique. D'autres initiatives, telles que l'institut Hwa Chong à Singapour ou l'école Simon-Langton en Grande-Bretagne, visent à donner une chance à des jeunes de faire de la vraie recherche avec des équipements professionnels, dès l'adolescence.

En France, l'approche se répand aussi, notamment grâce à des organisations telles que la fondation La main à la pâte qui, depuis 1996, vise à développer à l'école primaire et au collège un enseignement des sciences fondé sur l'investigation, et le Centre de recherches interdisciplinaires (CRI), à Paris, né en 2005 de la volonté de chercheurs de former les jeunes à la démarche de projet et de promouvoir l'interdisciplinarité.

Avec le programme les *Savanturiers*, lancé en 2012, le CRI forme de jeunes élèves à cette démarche en prenant modèle sur la recherche. Élèves et enseignants sont engagés dans des projets coopératifs où ils observent, questionnent, décrivent, formulent des hypothèses, capitalisent des savoirs, expérimentent, modélisent, échangent des informations, argumentent et valident des résultats. Ces activités aident l'apprentissage et dotent les élèves de