

VILLARD ET L'ACTION CHIMIQUE DES RAYONS

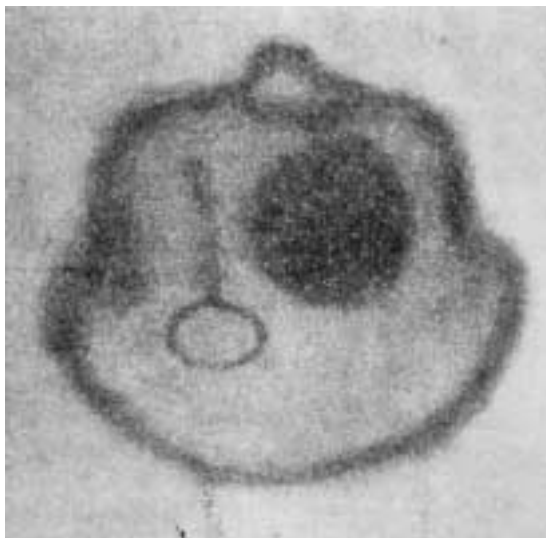
Villard étudie l'action chimique des rayons X, notamment la coloration du verre, qu'il interprète comme une oxydation (on sait aujourd'hui qu'elle est due à la création de défauts, nommés centres colorés, par les rayons X). Quand Pierre et Marie Curie annoncent une action chimique similaire du rayonnement émis par le radium, en 1899, Villard subodore l'existence d'une relation entre les deux types de rayons.

Il s'intéresse alors à la radioactivité et notamment aux rayons bêta, déviés sous l'action d'un champ magnétique. Il mesure leur réfraction, en utilisant une feuille d'aluminium, qui intercepte le faisceau émis par un sel faiblement radio-

actif. Une plaque photographique montre qu'une partie du demi-faisceau a subi une réfraction accompagnée d'une forte dispersion, tandis que l'autre partie, non réfractée, s'est propagée en ligne droite. Il essaye en vain de dévier cette dernière à l'aide d'un champ magnétique.

Ces nouveaux rayons sont suffisamment pénétrants pour impressionner une plaque photographique protégée par plusieurs couches de papier noir et par une feuille d'aluminium. Ils traversent une feuille de plomb de 0,2 millimètre d'épaisseur. Le 9 avril 1900, Villard présente ses résultats à l'Académie des sciences, dans un article intitulé *Sur la réflexion et la réfraction des rayons cathodiques et des rayons déviables du radium* et conclut que : «Les faits précédents conduisent à admettre que la partie non déviable de l'émission du radium contient des radiations très pénétrantes, capables de traverser des lames métalliques, radiations que la méthode photographique permet de déceler.»

Poursuivant ses expériences sur du radium, Villard compare le pouvoir pénétrant des rayons bêta et des nouveaux rayons. Ceux-ci, canalisés par un sillon creusé dans un bloc de plomb, impressionnent deux plaques photographiques placées l'une derrière l'autre. La première présente la trace de deux faisceaux, dont l'un (les rayons bêta) a été dévié et élargi par le champ magnétique appliqué, tandis que l'autre s'est propagé en ligne droite et ne s'est pas élargi. Sur la seconde plaque, on n'observe que la trace du faisceau non dévié, aussi petite et nette que sur la première plaque. Villard s'aperçoit que le faisceau non dévié peut traverser une plaque de verre d'un centimètre d'épaisseur sans atténuation notable. Le 30 avril 1900, il présente



3. La première radiographie gamma, réalisée par Marie Curie en 1904, montre un porte-monnaie, ainsi que la pièce de monnaie et la clé qu'il contenait.

ces résultats, identifiant les nouveaux rayons aux rayons X : «Ainsi les rayons X émis par le radium ont une puissance de pénétration beaucoup plus considérable que les rayons déviables : c'est l'analogue de ce qui a lieu avec les tubes de Crookes» (c'est-à-dire l'émission de rayons X). Le 19 mai 1900, il déclare encore : «L'auteur pense qu'il s'agit de véritables rayons X.»

La découverte de Villard passe inaperçue. Becquerel refait l'expérience décrite par son confrère et nie la présence de rayons pénétrants : «L'existence de ces rayons n'aurait pu échapper aux expériences de Monsieur et Madame Curie ou aux miennes.» Becquerel doit bientôt admettre l'existence des nouveaux rayons : «Le rayonnement des corps radioactifs comprend deux groupes distincts : l'un, qui consiste en rayons cathodiques, est déviable par un champ magnétique et par un champ électrique ; l'autre, dont la nature est inconnue jusqu'ici, n'est pas déviable et paraît comprendre des rayons ayant des puissances diverses de pénétration au travers des métaux et des corps opaques pour la lumière.» Pour Becquerel, seuls deux types de rayons existent. Dans un article de synthèse paru dans *Nature* en 1901, Becquerel mentionne la découverte de Villard de manière très succincte : «Récemment, Monsieur Villard a prouvé l'existence de rayons du radium très pénétrants et non déviables.»

L'absence de nom pour les nouveaux rayons, pendant les trois années qui suivent leur découverte, est révélatrice du peu d'intérêt qu'ils suscitent (c'est Rutherford et non Villard, qui met en place les notations alpha, bêta et gamma pour les rayons du radium en 1903). Les physiciens, qui ne comprennent pas la nature

des nouveaux rayons, en acceptent difficilement l'existence. En 1903, Rutherford et Frederick Soddy remarquent que le radium «émet aussi des rayons très pénétrants, mais qui n'ont pas été étudiés en détail [...]». Ces rayons n'ont pas été suffisamment examinés pour que l'on puisse discuter du rôle qu'ils tiennent dans les processus radioactifs. En 1904, Marie Curie présente une radiographie gamma dans sa thèse, montrant ainsi une application possible de la découverte de Villard. En éliminant les rayons bêta à l'aide d'un aimant, elle obtient une image plus nette, mais les temps d'exposition nécessaires sont plus long qu'avec les rayons X pour un contraste moindre.

La découverte de Villard dérange parce qu'elle va à l'encontre des connaissances de l'époque sur

la physique et la chimie des rayonnements. Après les travaux de Thomson sur l'électron, les scientifiques ont tendance à supposer que les éléments radioactifs libéraient des particules matérielles. Cette conception s'appliquait aux rayons cathodiques, aux rayons alpha et bêta, mais pas aux rayons gamma. Plus tard, Rutherford et Soddy assimilent les rayons gamma à des rayons X très pénétrants émis par les atomes radioactifs en même temps que les rayons bêta. En 1912, Max Laue établit que les rayons X sont indubitablement des ondes électromagnétiques (ce que Stokes avait suggéré en 1898), en montrant leur diffraction par un cristal. Quelques mois plus tard, Rutherford s'aperçoit que les rayons gamma sont de même nature.

Après la publication de ces deux articles sur les rayons gamma, en 1900, Villard abandonne le sujet. Est-il déçu par le peu d'intérêt que suscite sa découverte ? Quoi qu'il en soit, il se consacre à l'étude des rayons cathodiques et des rayons X, construisant lui-même tous ses appareils de mesure. Notamment, il invente le radioscléromètre, pour déterminer la quantité de rayons X émis dans un tube cathodique. L'intérêt de cet instrument est reconnu 20 ans plus tard, quand le roentgen (ancienne unité d'exposition aux radiations) est adopté. Aujourd'hui, le nom de Villard a quasiment disparu des livres de sciences et d'histoire, malgré l'importante contribution de cet homme à la science des radiations.

Leif GERWARD est professeur de physique à l'Université technique du Danemark. André RASSAT est professeur de chimie à l'École normale supérieure de Paris.



Ordres de grandeur

HERVÉ THIS

Les systèmes dispersés permettent d'obtenir beaucoup avec peu.

Le cuisinier qui fait des flans cherche souvent, pour des raisons économiques ou diététiques, à limiter la proportion d'œuf ou, ce qui revient au même, à augmenter la proportion d'eau. Jusqu'où peut-il aller ? Bien au-delà de ce que la cuisine fait classiquement.

Pour examiner ce problème, commençons par analyser deux cas voisins : combien de mayonnaise peut-on faire à partir d'un seul jaune d'œuf ? combien de blanc en neige obtient-on à partir d'un seul blanc ?

Les livres de cuisine indiquent souvent qu'un jaune d'œuf permet d'obtenir un grand bol de mayonnaise ; or, la compréhension de la physico-chimie de la mayonnaise conduit à la confection de plusieurs litres de sauce. Comment ? La mayonnaise est une dispersion de gouttelettes d'huile dans l'eau, chaque goutte étant entourée de molécules dites « tensioactives », dont une partie se dissout dans l'eau et l'autre pas. La quantité de molécules tensioactives du jaune d'œuf (environ cinq grammes) est suffisante pour couvrir un terrain de football d'une couche monomoléculaire. Aussi, quand ces molécules couvrent des gouttelettes d'huile dont le rayon moyen est de l'ordre du micromètre, ou millionième de millimètre, elles suffisent à stabiliser jusqu'à 25 litres de mayonnaise.

Pourquoi alors les mayonnaises classiques « tournent-elles » quand on y met trop d'huile, conformément à l'observation culinaire ? Parce qu'elles manquent d'eau, où les gouttelettes d'huile se dispersent. La vérification expérimentale est simple... mais elle gâche de l'huile ; faites plutôt un grand bol de mayonnaise à partir d'une seule goutte de jaune d'œuf (qui apporte le tensioactif) dissoute dans une cuillerée d'eau (ou de vinaigre, si vous souhaitez déguster votre préparation).

Passons au blanc d'œuf battu en neige. Formellement, il est analogue à la mayonnaise, mais l'huile (insoluble dans l'eau) est remplacée par l'air (bien peu soluble dans l'eau), et les molécules tensioactives, qui « isolent l'air », sont les protéines, qui constituent dix pour cent

du blanc. Le système obtenu n'est plus une émulsion, mais une mousse. D'où la question : combien de blanc en neige obtient-on à partir d'un seul blanc d'œuf ? Là encore, le calcul d'ordres de grandeur est simple : on commence par chercher le nombre de molécules de protéines présentes dans le blanc ; puis on détermine la surface totale que peuvent occuper ces protéines, et l'on détermine ensuite le nombre de bulles d'air qui peuvent être recouvertes par ces protéines ; en multipliant ce nombre par le volume d'une bulle, on obtient le volume maximal de blanc en neige accessible, à partir d'un seul blanc d'œuf : plusieurs litres, voire plusieurs mètres cubes, selon les hypothèses que vous choisirez pour la taille des bulles et le type de recouvrement des bulles par les protéines.

Pourquoi, alors, n'obtient-on généralement qu'un petit décimètre cube de mousse ? Puisque l'air ne manque pas,



Les deux répartitions extrêmes des protéines que l'on cuit en présence d'eau.

c'est l'eau qui fait défaut. Vérification expérimentale : à du blanc d'œuf, ajoutons de l'eau et fouettons ; le volume de mousse augmente et un battage assidu procure plusieurs litres de blanc en neige... moins stable toutefois qu'un blanc en neige classique : la stabilité de la mousse dépend en effet de la viscosité de la phase liquide (elle est réduite par l'ajout d'eau) et de la taille de bulles (qui détermine le jeu des forces capillaires,

entre les bulles).

Les émulsions et les mousses sont des systèmes dispersés. D'où l'idée : d'autres systèmes dispersés présents en cuisine auraient-ils le même comportement ? Culinairement la question se pose quand on réalise une quiche : sur de la pâte placée dans un moule, on ajoute des lardons et un mélange d'œufs et de lait. Toutefois le cuisinier qui hésite à surcharger ses plats ou à consommer des œufs qui lui semblent plus coûteux que le lait augmente parfois tant la quantité de ce dernier que la quiche reste liquide, à la cuisson. D'où la question : combien d'eau (le lait, c'est de l'eau, en première approximation) peut-on ajouter à un œuf afin d'obtenir ce qui est l'équivalent d'un flan ?

Supposons que les protéines qui assurent la coagulation soient des sphères. Lors de la coagulation, elles peuvent : soit se grouper de façon compacte, et aucune eau n'est incluse ; soit se disposer, adjacentes, selon les arêtes d'un très gros cube, et inclure un volume maximal d'eau ; soit enfin se répartir sur les arêtes d'un réseau que, pour la simplicité du calcul, on considérera comme cubique.

Dans le premier cas, le volume d'eau inclus est nul. Dans le deuxième cas, un calcul simple montre que le volume serait d'un trop grand nombre de mètres cubes pour être admissible. Considérons donc un cas intermédiaire, fondé sur l'observation d'un œuf sur le plat au microscope à force atomique. Cette fois, un calcul d'ordres de grandeur conduit à un volume de flan (ce que la physico-chimie nomme un gel) égal à un litre.

Pour vérifier ce calcul, partons d'un œuf et ajoutons-lui son volume en eau, puis cuissons. Ayant obtenu un flan, refaisons l'expérience en augmentant progressivement la quantité d'eau : deux volumes, trois volumes... On découvre ainsi que l'on fait « gélifier » jusqu'à plus de 0,7 litre d'eau avec un seul œuf, ce qui est du même ordre de grandeur que ce que prévoyait le calcul.

D'autres idées ? La gamme des systèmes dispersés est vaste : nous avons exploré le liquide dispersé dans un liquide, le gaz dispersé dans un liquide, le solide dispersé dans un liquide, mais il reste toutes les autres combinaisons.

La prévision des incendies de forêt

Le déclenchement et l'intensité des incendies de forêts dépendent de la teneur en ozone de l'atmosphère.

Aux mois de juillet et d'août 2000, des incendies gigantesques ravagent les forêts de l'Ouest américain. Ces feux sont si puissants que, selon les pompiers américains, seules les premières neiges pourront en venir à bout. Cet été, un quart du parc naturel de Cap de Creus, en Catalogne, a été détruit par les flammes. Chaque été revient avec son cortège de sinistres, et chaque année se pose la question de leur inéluctabilité. Peut-on en limiter les conséquences ? Peut-on les prévoir ?

Les incendies sont, en grande partie, allumés par la foudre dans les régions peu peuplées comme le Canada, et majoritairement par l'homme dans nos régions méditerranéennes. Quelles que soient leurs causes, leur fréquence et leur intensité dépendent de l'état du couvert végétal. Depuis quelques années, on connaît le rôle de la composition du feuillage, et celui du rayonnement ultraviolet dans leur sur-

nue. En modélisant les fréquences des incendies selon la qualité de la végétation, la météorologie et l'activité du Soleil, notre équipe a identifié pour la première fois un facteur météorologique déterminant dans la prévision à court terme des grands feux : la quantité d'ozone dans l'atmosphère.

Le rythme saisonnier des feux dépend de la composition du feuillage et de sa variation pendant la saison. Ainsi, les résineux ne perdent pas leurs aiguilles chaque année, et celles qui datent de l'année précédente, plus sèches et plus facilement inflammables, sont propices au déclenchement des incendies. En revanche, les feuilles des feuillus sont favorables simultanément au déclenchement et à la propagation du feu, car leur combustion produit plus de gaz. Des expériences récentes effectuées sur des rameaux de Pin d'Alep, très présents dans le bassin méditerranéen, ont montré qu'après une semaine d'exposition à un rayonnement ultraviolet, la sensibilité au feu des aiguilles augmente, tant au niveau de leur inflammation qu'à celui de la durée de la flamme.

Quand on élimine l'effet de ces paramètres saisonniers, deux facteurs environnementaux dominent : l'activité solaire et la quantité d'ozone atmosphérique. Notre modèle montre que les fréquences des feux et les superficies brûlées sont toutes deux fortement corrélées à l'acti-

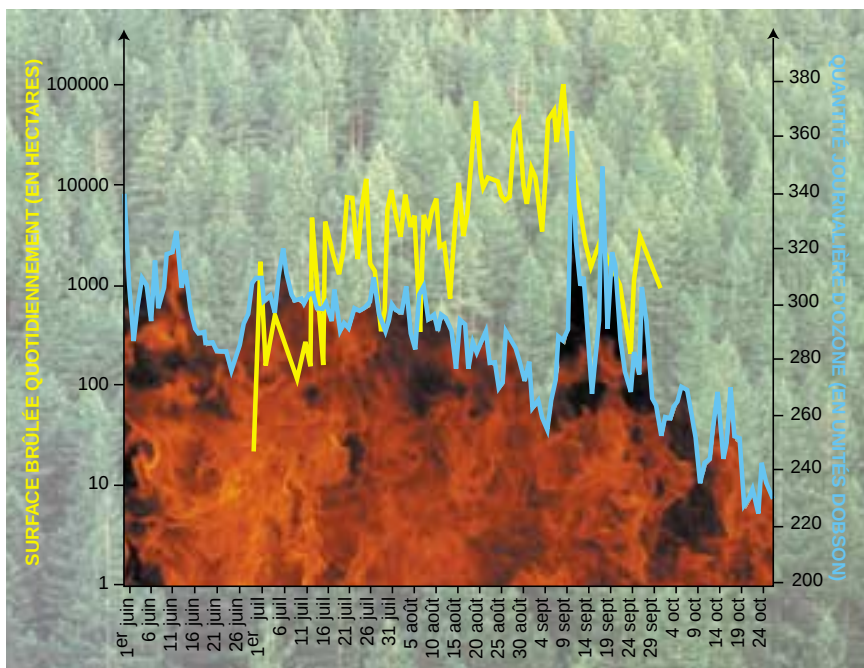
tivité solaire, cette activité déterminant l'intensité du rayonnement ultraviolet qui arrive au sol, elle-même liée à la quantité d'ozone dans l'atmosphère. La physique des interactions entre le rayonnement ultraviolet et l'ozone est compliquée parce que non linéaire : les ultraviolets participent à la production de l'ozone dans la haute atmosphère et sont absorbés dans l'atmosphère par l'ozone.

Ainsi, la quantité et la gravité des incendies dépendent de l'activité solaire et de la quantité d'ozone atmosphérique. Les données statistiques sont-elles en accord avec cette hypothèse ? Oui ! Nous l'avons vérifié, d'une part, à partir des chronologies de feux du parc américain Yellowstone, qui sont rigoureusement tenues depuis le début du ^{xx}e siècle, d'autre part, à partir des estimations de l'intensité des feux établies depuis 1700 par des analyses des cernes concentriques des arbres dans une partie du parc. Par exemple, on constate une absence de grands incendies entre 1647 et 1737, soit à la fin de la « petite période glaciaire » (les périodes glaciaires sont déterminées par les variations d'ensoleillement dues aux modifications de la trajectoire et de l'inclinaison de la Terre).

Notre modèle est aussi utile pour la prévision à court terme des grands incendies. Nous avons rapproché les statistiques journalières de l'ozone stratosphérique de celles des feux : ces derniers se produisent souvent après une chute importante de la quantité d'ozone en quelques jours. Par exemple, en 1988, à Yellowstone, 395 000 hectares ont brûlé entre le 30 juin et le 1^{er} octobre : la figure montre les variations d'aires brûlées quotidiennement en fonction des quantités d'ozone mesurées par le satellite TOMS. En outre, ces phénomènes ont été observés en région méditerranéenne française, lors des années de grands feux (1985, 1986 et 1990) et, plus récemment, lors des incendies américains et de l'Est méditerranéen pendant l'été 2000.

Bien entendu, ces « événements » climatologiques sont à replacer, en ce qui concerne leur gravité, selon leur position dans le cycle solaire où ils se produisent et également à plus long terme, en fonction de l'évolution du climat. Aujourd'hui, l'activité solaire est maximale et les variations de la quantité d'ozone dans l'atmosphère sont spectaculaires : les autorités concernées doivent rester vigilantes.

Michel BERNARD,
Université d'Aix-Marseille.



Les statistiques journalières des aires brûlées (en jaune, du 30 juin au 1^{er} octobre) et des quantités d'ozone atmosphériques (en bleu, du 1^{er} juin au 25 octobre) montrent la relation qui lie ces deux paramètres : lorsque la quantité d'ozone chute, la surface brûlée augmente.

Miroirs et ondes gravitationnelles

La détection des ondes gravitationnelles par le système Virgo nécessite des miroirs aux performances inégalées.

Avec le système *Virgo*, en construction près de Pise, le CNRS et l'Institut national de physique nucléaire italien (INFN) veulent détecter directement des ondes gravitationnelles sur la Terre, par une méthode d'interférométrie optique : la lumière d'un laser sera divisée en faisceaux, qui parcourront trois kilomètres avant d'interférer. Le passage d'une onde gravitationnelle conduira à une variation apparente de la longueur des bras de 10^{-18} mètre. Le système ne détectera les modifications résultantes des figures d'interférence que si ses performances optiques sont exceptionnelles.

Ainsi les miroirs de *Virgo* sont des blocs de silice polie, à faces parallèles, avec une couche antireflet sur une face et une couche réfléchissante sur l'autre face. Lorsqu'un faisceau lumineux rencontre un tel miroir, une partie de son énergie est perdue pour l'expérience : elle est soit absorbée, soit diffusée à de grands angles en raison de défauts présents dans la structure du miroir. Pour détecter les ondes gravitationnelles, les pertes totales devront être inférieures à quelques parties par million. Aussi a-t-on dû mettre au point de nouvelles méthodes de fabrication de composants, ainsi que des systèmes de mesure pour les caractériser.

L'idée constante des opticiens du Service des matériaux avancés (SMA) de l'Institut de physique nucléaire de Lyon a été : «Si on peut détecter un défaut, on peut l'éliminer». D'où la participation du Laboratoire de spectroscopie en lumière polarisée de l'École supérieure de physique

et de chimie de Paris, qui construit, depuis près de dix ans, des détecteurs de défauts dans les systèmes optiques. Les deux équipes ont utilisé une stratégie où la métrologie optique n'est plus le dernier maillon de la chaîne de fabrication, mais fait partie intégrante de la fabrication.

Ainsi l'absorption dans les blocs de silice et dans les revêtements a été détectée par effet mirage, le même qui fait apparaître des reflets sur les routes ensoleillées : la lumière chauffe le sol, et l'air qui s'échauffe alors par contact a un indice de réfraction diminué, de sorte que la lumière provenant des objets éloignés est déviée vers le haut quand elle traverse cette zone. Dans les blocs de silice que l'on teste, de même, on focalise un laser à l'intérieur du miroir, afin de chauffer le matériau, de sorte qu'un second faisceau laser qui traverse la région chauffée est dévié d'une quantité que l'on mesure avec une grande précision. On suit ainsi les variations de l'absorption dans le miroir.

En testant ainsi de petits blocs de silice produits par la Société allemande *Heradeus*, les physiciens français ont participé à la détermination des méthodes de fabrication optimales. Puis le même travail a été fait pour les revêtements, déposés par le SMA (par pulvérisation, à l'aide de faisceaux d'ions, de pentoxyde de tantale). On a ainsi obtenu de la silice synthétique dont le coefficient d'absorption, à la longueur d'onde du laser de *Virgo*, est passé sous la barrière symbolique d'une partie par million par centimètre. Bientôt le SMA construira des miroirs de grandes dimensions dont les pertes totales seront inférieures à cinq parties par million et dont l'amplitude des défauts géométriques de surface sera contrôlée à mieux que deux nanomètres près (le miroir du télescope spatial *Hubble* a des défauts de surface 50 fois supérieurs). Le grand moment de la détection d'ondes gravitationnelles approche.

Vincent LORIETTE, ESPCI, Paris

BRÈVES

Le parachute de Léonard vole

Léonard de Vinci aurait pu sauter du haut de la tour de Pise. Le génie visionnaire de la Renaissance avait dessiné un parachute en forme de pyramide, mais les spécialistes croyaient ce système incapable d'un vol stable. Prenant un risque calculé, le champion de parachutisme Adrian Nicholas vient de démontrer le contraire : sautant d'une montgolfière, toile déployée, il a mis cinq minutes pour passer d'une altitude de 3500 mètres à une altitude de 500 mètres d'altitude, freiné uniquement par sa pyramide de toile. Craignant d'être assommé à l'atterrissage par les 85 kilogrammes de bois et de toile du système de Léonard, il l'a largué en vol et a terminé sa descente à l'aide d'un parachute moderne.



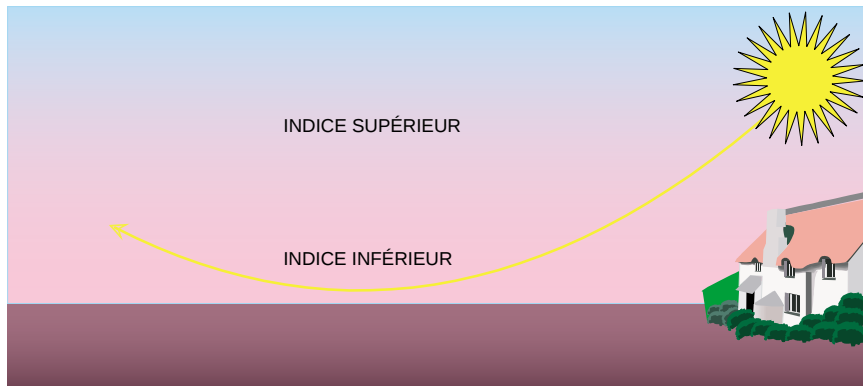
Heathcliff O'Malley

Toute une vie sans sexe

Scandale de l'évolution ! Depuis 35 millions d'années au moins, les organismes multicellulaires *Bdelloida* se passent de rapports sexuels. Manifestement, cette sous-espèce du groupe des rotifères a pourtant su maintenir sa diversité génétique. Comment ? À Harvard, David Mark Welch et Mathew Meselson ont étudié la question en comparant leurs gènes à ceux d'autres rotifères. Alors que, dans les espèces sexuées, les deux brins d'ADN sont parfaitement identiques, ils sont au contraire fortement différenciés chez les *Bdelloida*. Comment est-ce possible ? La question reste sans réponse à ce jour.

Les moines et la syphilis

On a longtemps prétendu que la syphilis était arrivée en Europe en 1492, rapportée du Nouveau Monde par l'équipage de Christophe Colomb. Des archéologues de l'Université de Bradford ont analysé les squelettes médiévaux enterrés au monastère de Hull : ils présentent des lésions caractéristiques de la syphilis. Le plus atteint appartenait à un homme qui semble être un moine, mort entre 1300 et 1450, d'après la datation au carbone 14. La découverte de ces squelettes enlève les derniers doutes quant à la présence de la maladie en Angleterre au Moyen Âge.



Un rayon lumineux est dévié par effet mirage quand il se propage dans des zones dont l'indice optique varie.

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.

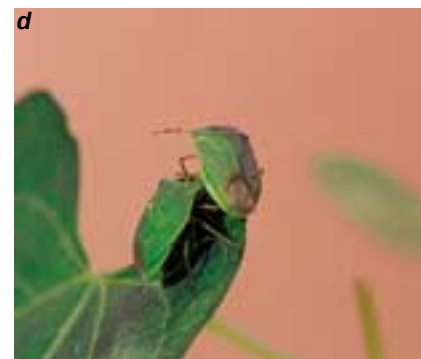
La punaise verte vit sur des plantes qui atteignent plus d'un mètre de haut, tels le maïs, le soja ou le coton. Dans cet environnement où la vue est limitée, l'insecte doit utiliser des moyens de communication plus adaptés.

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

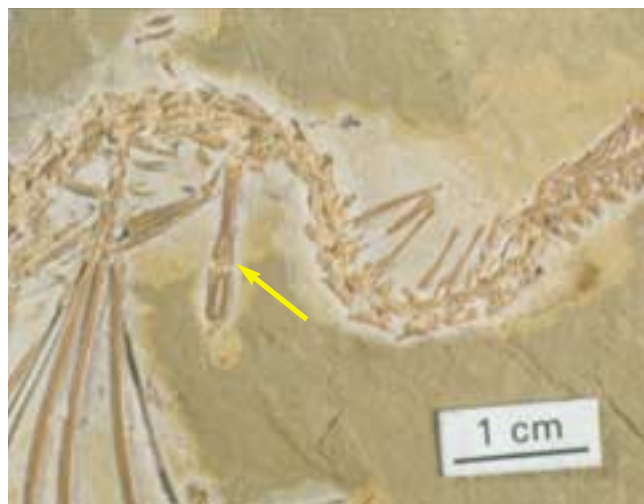
serpents non pas quadrupèdes mais bipèdes ! Ils ont été découverts au Moyen-Orient, dans des dépôts marins déposés au milieu du Crétacé, il y a quelque 95 millions d'années. Le premier, décrit par une équipe menée par Eitan Tchernov, de l'Université de Jérusalem, a été nommé *Haasiophis terrasanctus*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