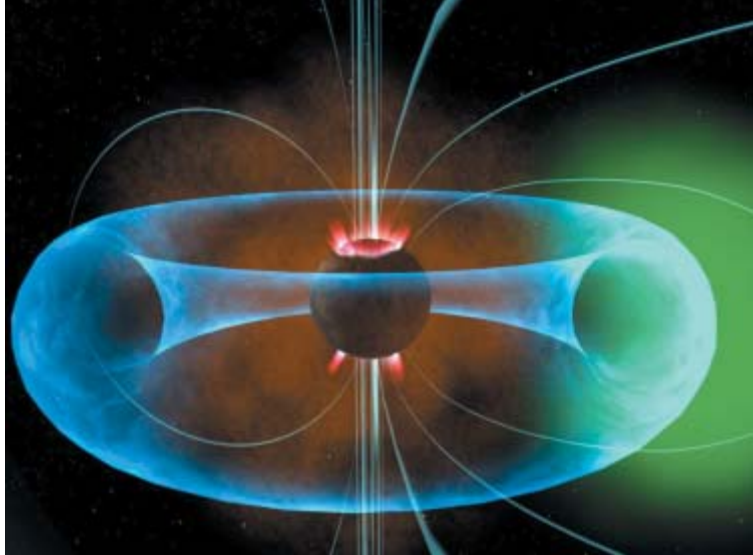




Modélisation, dans la haute atmosphère, des conséquences d'un soubresaut du vent solaire. Le vent solaire, qui s'enroule autour de la Terre, chauffe l'ionosphère au point que des atomes d'oxygène en sont éjectés (la couronne en bleu). Ces atomes diffusent ensuite autour de la planète (en rouge) et font un aller et retour (en vert) en suivant les lignes de champ magnétique (en blanc).

L'algue du ginkgo

La première algue vivant en symbiose avec un végétal supérieur a été découverte : elle a choisi le plus ancien d'entre eux, le Ginkgo biloba.

Le *Ginkgo biloba*, fossile végétal vivant, est le seul survivant de l'ordre des *ginkgoales* qui a atteint son apogée à la fin du Jurassique et au début du Crétacé, il y a quelque 200 à 150 millions d'années. Cet arbre, contemporain des dinosaures, intrigue les botanistes. Ses feuilles bilobées sont en éventail, vestige de son lointain passé. Ses gamètes mâles sont mobiles et attestent d'un mode de reproduction en environnement aqueux, proche de celui des fougères. Il est très résistant aux insectes, à la pollution atmosphérique ou encore aux rayonnements ionisants : à Hiroshima, un ginkgo a résisté à la déflagration du 6 août 1945. Enfin, il dispose d'une exceptionnelle longévité : le plus vieux a 3 000 ans et se trouve au Temple Dinlinsi dans la province de Shandong, en Chine. Qui plus est, Jocelyne Trémouillaux-Guiller (UPRES-EA 2106) à l'Université François Rabelais de Tours, a découvert, dans des cellules de ginkgo, une algue unicellulaire qui vit en symbiose avec son hôte.

Dans le monde végétal, les symbioses sont fréquentes : par exemple, le lichen résulte de l'association d'une algue et d'un champignon. Par ailleurs, *Ginkgo biloba* est connu pour héberger dans ses racines des champignons parasites ou symbiotiques. Cependant, pour la première fois, une algue a été identifiée à l'intérieur des cellules d'un végétal supérieur.

Dans un premier temps, l'examen au microscope électronique de cellules cultivées a révélé que cette algue, d'une taille de trois à cinq micromètres, a un noyau : elle est eucaryote. Ultérieurement, à l'aide d'une autre culture cellulaire de *Ginkgo biloba*, les biologistes ont mis en évidence l'intense prolifération de l'algue à l'intérieur des cellules en voie de nécrose. À mesure de la multiplication de l'algue, les cellules de ginkgo enflent, puis se rompent et libèrent leur contenu d'algues dans le milieu extérieur. La prolifération de l'algue est ainsi liée à la mort des cellules hôtes. On ignore encore le mécanisme qui déclenche la multiplication intense de l'algue. Cultivées

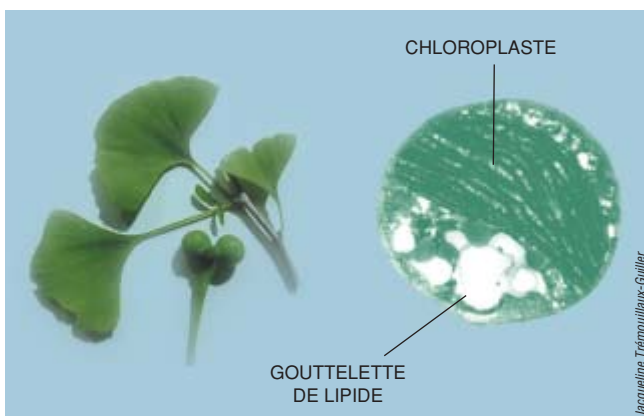
en milieu liquide, ces algues sont devenues autonomes et ne nécessitent qu'une source lumineuse pour subsister.

Après avoir découvert la présence de l'algue dans des cultures de cellules de *Ginkgo biloba*, on a détecté l'algue à l'intérieur d'une cellule vivante de ginkgo. Il s'agissait d'une forme mature et de formes immatures. L'algue réside en permanence dans les cellules de son hôte, vraisemblablement sous sa forme la plus immature. Elle n'a alors aucune activité photosynthétique. De plus, étant donné les difficultés que l'on a pour la démasquer, elle n'est sans doute pas présente dans tous les arbres, ni dans toutes les parties de la plante ni dans tous les types cellulaires d'une même zone.

L'étape suivante a consisté à identifier cette algue verte par l'analyse des ARN ribosomiaux. Ainsi, l'endosymbiote appartient à la classe des *Trébouxiphytes*, dont plusieurs membres sont connus pour être des symbiotes d'invertébrés ou de champignons, par exemple. Les analyses moléculaires indiquent une étroite relation phylogénique de l'algue verte découverte avec *Coccomyxa*, une algue unicellulaire présente dans certains lichens. L'association de cette algue avec *Ginkgo biloba* est un nouveau type d'interaction de deux plantes.

L'étape suivante a consisté à identifier cette algue verte par l'analyse des ARN ribosomiaux. Ainsi, l'endosymbiote appartient à la classe des *Trébouxiphytes*, dont plusieurs membres sont connus pour être des symbiotes d'invertébrés ou de champignons, par exemple. Les analyses moléculaires indiquent une étroite relation phylogénique de l'algue verte découverte avec *Coccomyxa*, une algue unicellulaire présente dans certains lichens. L'association de cette algue avec *Ginkgo biloba* est un nouveau type d'interaction de deux plantes.

L'étape suivante a consisté à identifier cette algue verte par l'analyse des ARN ribosomiaux. Ainsi, l'endosymbiote appartient à la classe des *Trébouxiphytes*, dont plusieurs membres sont connus pour être des symbiotes d'invertébrés ou de champignons, par exemple. Les analyses moléculaires indiquent une étroite relation phylogénique de l'algue verte découverte avec *Coccomyxa*, une algue unicellulaire présente dans certains lichens. L'association de cette algue avec *Ginkgo biloba* est un nouveau type d'interaction de deux plantes.



Les cellules du *Ginkgo biloba* (à gauche) hébergent des algues vertes de la famille de *Coccomyxa*. Quand on l'observe au microscope électronique à transmission (à droite), on constate que cette algue (environ trois micromètres de diamètre) contient, dans son cytoplasme, un volumineux chloroplaste (vert plus foncé) et de nombreuses gouttelettes lipidiques (en blanc).

La sixième désintégration

La découverte d'une sixième forme de radioactivité contribue à l'amélioration de la théorie des noyaux.

Jusqu'à présent, on connaissait cinq formes de radioactivité : la fission (un noyau se partage en deux « sous-noyaux »), la désintégration alpha (un noyau libère une particule alpha, c'est-à-dire un noyau d'hélium), la désintégration bêta (un noyau libère un électron), la radioactivité gamma (un noyau libère un photon gamma) et la désintégration à un proton, découverte au début des années 1980. Ce dernier type correspond au cas d'un noyau instable parce qu'il contient trop de protons ; en émettant un proton, il se transforme en un noyau léger plus stable. Au Grand accélérateur d'ions lourds de Caen, le GANIL, et au Centre de recherche sur les ions lourds de Darmstadt, deux équipes de physiciens viennent de mettre en évidence la désintégration à deux protons. Les deux groupes ont observé l'émission simultanée des deux particules par un noyau instable de fer 45. Ils ajoutent ainsi une forme de radioactivité aux cinq déjà connues.

Les physiciens avaient prédit que ce noyau, qui contient 26 protons et 19 neutrons, devait se désintégrer en libérant deux protons en même temps. Ils ont d'abord exclu le mécanisme qui aurait été la succession de deux désintégrations à un proton, phénomène qui pourrait se confondre avec une désintégration à deux protons. Si un tel scénario en cascade se produisait, le fer 45 deviendrait d'abord du manganèse 44, qui, cédant à son tour un proton, se transformerait en chrome 43. Or, le manganèse 44, trop massif, ne peut être produit à partir du fer 45. Aussi, les physiciens ont-ils tenté d'observer la désintégration du fer 45 en sachant que s'ils détectaient un phénomène, il s'agirait de la désintégration à deux protons.

Pour produire le fer 45, l'équipe du GANIL dirigée par Bertram Blank (IN2P3) a bombardé trois jours durant une cible avec 10^{12} noyaux de nickel 58 par seconde, obtenant ainsi environ un noyau de fer 45 toutes les deux heures... Dirigés vers un détecteur où ils se sont incrustés dans un cristal de silicium, ils y ont « vécus » environ deux millisecondes avant de se désintégrer. Cette durée de vie, si petite soit-elle à notre échelle, suffit à l'observation de l'arrivée du fer 45, puis de sa transformation en chrome 43, laquelle est accompagnée de l'émission de deux protons. Parmi la vingtaine de noyaux créés, seuls 12 ont conduit à des désintégrations « observables ». Ces 12 événements confirment l'existence d'un mode de désintégration qui n'avait pas encore été détecté. Par une méthode indépendante, les physiciens allemands sont arrivés aux mêmes conclusions.

Selon les physiciens, il est vraisemblable que cette nouvelle forme de radioactivité n'aura pas d'application. En revanche, sa

découverte est d'une grande importance pour notre compréhension des phénomènes qui se déroulent dans le noyau. Beaucoup de modèles décrivent la physique du noyau, notamment le modèle en couches (les nucléons sont situés sur des niveaux d'énergies successifs comme l'électron autour de l'atome) ; ils s'appliquent bien aux noyaux stables, situés dans ce que l'on nomme la « vallée de stabilité ». En dehors de cette vallée, le modèle des bosons interagissants suppose que les protons (des fermions) s'associent par paires pour former des pseudoparticules bosoniques (les autres restent disposés sur des couches). Puisque ces paires constituent des bosons, elles peuvent se trouver à plusieurs dans un état physique de même énergie, où elles interagissent. Ainsi, grâce à la formation de paires de protons, le noyau serait stabilisé pour un coût énergétique faible. Dès la découverte de la désintégration à deux protons, les physiciens se sont demandé si les quantités de mouvement des deux protons émis étaient corrélées. Si c'est le cas, cela indiquerait que c'est bien une paire bosonique qui est émise au cours de la désintégration à deux protons, ce qui confirmerait l'existence de telles paires au sein des noyaux et, par là-même, l'intérêt du modèle de bosons interagissants.

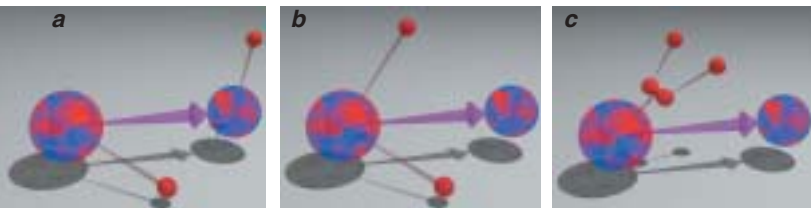
L'hormone du fer

On a découvert l'hormone qui contrôle la quantité de fer dans l'organisme.

La quantité de glucose circulant dans notre sang est maintenue constante, à environ un gramme par litre. Cet équilibre résulte de l'action conjuguée, mais antagoniste, de deux hormones : l'insuline, qui diminue la concentration sanguine en glucose, et le glucagon, qui l'augmente. Cette homéostasie est vitale pour l'organisme et de nombreux éléments font l'objet d'un contrôle aussi rigoureux. C'est le cas du fer, indispensable aux cellules pour certaines réactions enzymatiques et, surtout, pour l'élaboration de l'hémoglobine, une protéine qui transporte l'oxygène dans les globules rouges. L'équipe d'Axel Kahn et de Sophie Vaulont, de l'Institut Cochin à Paris, a identifié l'hormone qui participe à la régulation de la concentration en fer de l'organisme.

L'histoire de cette découverte doit beaucoup au hasard et commence par l'étude du gène *usf2* codant un facteur de transcription (une molécule qui favorise ou, à l'inverse, diminue l'expression des gènes), que l'on supposait spécifique du métabolisme des sucres. Le pancréas et le foie des souris dont ce gène est muté par génie génétique sont marron et attestent ainsi d'une quantité anormalement élevée de fer dans ces organes. Or ces signes cliniques sont aussi ceux de l'hémochromatose, une maladie génétique qui touche 1 Européen sur 300. Ces malades présentent une surcharge en fer, qui cause la dégénérescence de nombreux tissus. L'origine de cette maladie est, dans 80 pour cent des cas, due à une mutation du gène *Hfe-1* qui participe au contrôle de l'absorption intestinale du fer.

Une première hypothèse s'imposait. Outre le métabolisme du glucose, le facteur de transcription *usf2* participe-t-il aussi au métabolisme du fer ? Pour répondre à cette question, les biologistes ont comparé l'expression de divers gènes chez des souris mutées et normales. Ils ont ainsi identifié un gène dont l'expression est très perturbée chez les souris mutantes. Il s'agit du gène codant l'hepcidine, un peptide de 25 acides aminés sécrété par les cellules du foie et connu pour ses propriétés antibactériennes. Or des biologistes, du



L'émission de deux protons par un noyau est possible selon trois mécanismes : deux émissions successives de un proton (a), l'émission simultanée de deux protons indépendants l'un de l'autre (b) ou l'émission d'une paire de protons liés entre eux (c). Le fer 45 se désintègre en chrome 43 par l'un des deux derniers mécanismes, c'est-à-dire par une nouvelle forme de radioactivité : la désintégration à deux protons.



Sophie Vautour, Gaël Nicolas / INSERM

Les souris normales disposent de suffisamment de fer et, par conséquent, d'hémoglobine : elles sont bien colorées et leur sang est normal (à droite en haut). Les souris dont le gène de l'hepcidine est surexprimé (flèche) ont une anémie, car le fer n'est pas absorbé et elles manquent d'hémoglobine : elles sont pâles et leur sang (à droite en bas) est pauvre en hémoglobine.

Centre hospitalo-universitaire Pontchaillou de Rennes, avaient mis en évidence la sensibilité de ce gène à la quantité de fer dans l'organisme.

Par la suite, des analyses ont montré que le gène *hepcidine* est voisin du gène *usf2* : la mutation de ce dernier, chez les souris mutées, endommage aussi le gène de l'hepcidine,

ce qui explique la concomitance des anomalies observées. L'hepcidine appartient à une famille de molécules antibactériennes, nommées défensines, fréquentes chez les insectes notamment. Chez les mammifères, l'hepcidine semble avoir acquis une nouvelle fonction dans le métabolisme du fer, celle de freiner l'absorption du fer par des cellules spécialisées de l'intestin, les entérocytes. En effet, l'organisme a des besoins limités en fer, celui-ci étant le plus souvent recyclé à partir des globules rouges dont le contenu est libéré quand ils ont terminé leur cycle de vie. Afin de vérifier cette hypothèse, les biologistes ont fabriqué des souris mutantes dont le gène de l'hepcidine est, cette fois, surexprimé : comme prévu, ces animaux souffrent d'une grave anémie et sont, de ce fait, très pâles, car leurs organismes ne disposent pas de quantités suffisantes de fer pour construire l'hémoglobine. Une injection de fer les sauve d'une mort inéluctable.

La découverte du rôle de l'hepcidine est vraisemblablement un premier pas vers la mise au point de médicaments qui, en cas d'excès de fer, imiteraient les effets de l'hepcidine, ou qui, en cas de manque de fer, inhiberaient l'hepcidine, notamment dans les anémies chroniques.

La détection des mines antipersonnel

Une forme de résonance magnétique nucléaire permet de détecter les explosifs des mines.

Les conflits armés ont laissé entre 60 et 100 millions de mines antipersonnel, qui tuent ou estropient 20 000 personnes chaque année. Un espoir est né depuis que plus de 140 États ont signé un traité d'interdiction des mines antipersonnel et se sont promis d'en débarrasser la planète en dix ans. Pour ce faire, les méthodes de déminage doivent progresser. Les démineurs utilisent une bobine à induction qu'ils déplacent sur le sol : la présence d'un objet métallique produit un signal. Toutefois, les mines contiennent de moins en moins de constituants métalliques. Pourrait-on détecter directement les explosifs ? Franz Fujara et son équipe de l'Université technique de Darmstadt viennent d'améliorer notablement une technique possible. Nommée résonance quadrupolaire nucléaire, cette méthode est fondée sur le fait que les noyaux des atomes d'azote de l'explosif entrent en résonance quand on les soumet à une radiofréquence particulière.

La résonance quadrupolaire nucléaire révèle les résonances de certains noyaux atomiques. Pour faire passer un noyau d'un niveau d'énergie à un autre, on lui applique le champ magnétique oscillant d'une onde radio de fréquence adéquate. Pour la plupart des atomes, les écarts énergétiques entre les sous-niveaux nucléaires sont constants. Pour certains, ayant un moment électrique quadrupolaire non nul (leur noyau n'a pas de symétrie sphérique), ces écarts sont irréguliers. Ainsi la résonance quadrupolaire nucléaire révèle les résonances particulières des atomes sans symétrie sphérique : c'est le cas de l'azote. En outre, la forme particulière du signal dépend aussi de la structure cristalline de l'explosif.

Malheureusement, l'efficacité de la résonance quadrupolaire nucléaire est limitée, parce que le signal dû aux atomes d'azote est noyé dans le bruit de fond résultant de la résonance des atomes d'hydrogène. F. Fujara et son équipe ont tiré parti de cet inconvénient, car, dans certaines conditions, les atomes d'hydrogène excités transfèrent leur énergie aux atomes d'azote. Ils ont «accordé» les résonances de l'hydro-

gène aux résonances nucléaires de l'azote : ils polarisent d'abord les protons à l'aide d'une bobine d'induction supplémentaire, puis mesurent l'aimantation des noyaux d'hydrogène. La fréquence du champ magnétique supplémentaire est ensuite réduite, de telle sorte que les énergies des résonances de l'hydrogène s'accordent à celles des résonances quadrupolaires nucléaires de l'azote. On coupe le champ supplémentaire et un transfert d'énergie se produit des atomes d'hydrogène excités à ceux d'azote. On mesure alors l'aimantation résiduelle des atomes d'hydrogène. La différence entre les deux signaux fait apparaître les résonances quadrupolaires nucléaires propres de l'azote.

Les physiciens ont testé cette nouvelle méthode sur des échantillons d'explosifs placés dans des tubes de six millimètres de diamètre. Ces échantillons comprenaient du trinitrotoluène (TNT) ainsi que du paranitrotoluène, proche du TNT, mais qui ne comporte qu'un seul groupe $-NO_2$ au lieu de trois. À chaque fois, on a détecté les résonances quadrupolaires nucléaires de l'azote.

Reste à construire un spectromètre-détecteur de mines de terrain. Il devra être monté sur un véhicule, car il faudra transporter plusieurs bobines capables de produire les champs magnétiques nécessaires. Les protons devront d'abord être polarisés par ce champ magnétique pendant quelques dizaines de secondes ; le signal émis par le sol sera mesuré avec, puis sans le champ ; finalement, la différence calculée par un dispositif embarqué dans le véhicule révélera la présence éventuelle d'explosifs dans le sol, sur une vingtaine de centimètres d'épaisseur.



Les interactions durables des génomes

CLAUDE COMBES

Les associations de certains parasites avec leur hôte forment des systèmes dont le tout est plus que la somme des parties : les interactions de longue durée des génomes font apparaître des propriétés nouvelles.

Une manière de représenter l'évolution du monde vivant consiste à dessiner un arbre gigantesque dont les branches se sont multipliées et ont divergé sans cesse depuis quelque quatre milliards d'années : plus les branches sont éloignées, plus la divergence génétique entre les espèces est grande et, par conséquent, plus leur plus proche «ancêtre commun» est lointain dans le temps. Par exemple, l'homme et le chimpanzé, dont l'ancêtre commun aurait vécu il y a sept ou huit millions d'années, sont voisins sur l'arbre, tandis que le chien et le ver de terre, dont le plus proche ancêtre commun vivait il y a quelque 600 ou 700 millions d'années, se trouvent sur des régions de l'arbre très écartées.

Aussitôt que l'on prend en compte les liens qui se nouent entre les êtres vivants dans les écosystèmes actuels, la représentation d'un arbre aux branches qui divergent sans cesse ne convient plus : des espèces dont la parenté évolutive est extrêmement lointaine peuvent se retrouver rapprochées dans l'espace par les liens qu'elles contractent. Parmi ces rapprochements, ceux qui donnent lieu à des interactions durables entre individus d'espèces différentes sont riches en conséquences fonctionnelles et évolutives.

Considérons le «lien» qui unit dans un écosystème une «espèce prédatrice» et une «espèce proie», par exemple le renard et le campagnol des champs. Lorsqu'un individu-renard poursuit et capture un individu-campagnol, l'interaction entre eux dure peu de temps : celui de la poursuite et de la capture elle-même (souvent quelques secondes seulement) plus celui de la digestion et de l'assimilation (au plus quelques heures). De surcroît, pareille interaction implique seulement un flux d'énergie : toute l'information génétique que représentait le campagnol disparaît lorsque son organisme est digéré. Le support matériel de cette information, l'ADN, ne survit pas davantage que les tissus de la proie et se trouve emporté dans le tourbillon des sucs digestifs du prédateur. Pareille interaction est qualifiée d'instantanée. À l'échelle des populations, la prédation par les renards peut contribuer à la sélection naturelle de certains génotypes (ou ensemble de gènes) chez les campagnols mais, à l'échelle individuelle, le génome du renard et celui du campagnol

n'interagissent pas. Au contraire, les interactions qui peuvent s'établir entre un parasite ou un mutualiste et son hôte sont d'une tout autre nature. De nombreux exemples illustrent ces interactions.

Le gîte et le couvert

Certains insectes provoquent chez les végétaux des galles, des excroissances aux couleurs souvent voyantes. Parmi ces insectes, de petites guêpes (des Hyménoptères du groupe des cynipides) pondent leurs œufs sur les feuilles des chênes ou des rosiers sauvages : peu de temps après le dépôt de l'œuf et l'éclosion de la larve d'insecte, une galle apparaît. Cette dernière est due à une multiplication accélérée des cellules végétales. La galle dissimule la larve d'insecte sous une épaisse paroi, lui procurant une certaine protection contre ses ennemis potentiels. Ces ennemis sont, par exemple, des insectes parasitoïdes qui pondent leurs œufs dans d'autres insectes. La galle offre aussi à la larve qui s'y terre une nourriture abondante et facile à prélever : la larve consomme par l'intérieur les tissus qui constituent la galle. La larve de l'insecte exerce un contrôle sur l'édification de la galle : celle-ci grossit graduellement, selon les exigences de son «locataire».

Citons un autre exemple d'interaction. Le nématode *Trichinella spiralis*, ou trichine, est un ver qui contamine les mammifères lorsqu'ils consomment les muscles d'un autre mammifère précédemment infesté ; ces muscles contiennent de minuscules larves du nématode qui évoluent en adultes, mâles et femelles, dans le tube digestif du mammifère contaminé. Les femelles donnent naissance à de nouvelles larves, qui traversent la barrière intestinale et vont coloniser les muscles du nouvel hôte. La larve de trichine est constituée de nombreuses cellules, mais réussit pourtant à pénétrer dans une cellule musculaire de son hôte. En quelques semaines, la larve de trichine réorganise son «habitat», c'est-à-dire la cellule musculaire de l'hôte. Par des signaux moléculaires codés par son génome, la larve de trichine «dissout» les filaments d'actine et de myosine de la cellule-hôte (qui en constituent l'«ossature») et