

Un scribe moléculaire

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

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

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

Les biologistes avaient à leur dispo-

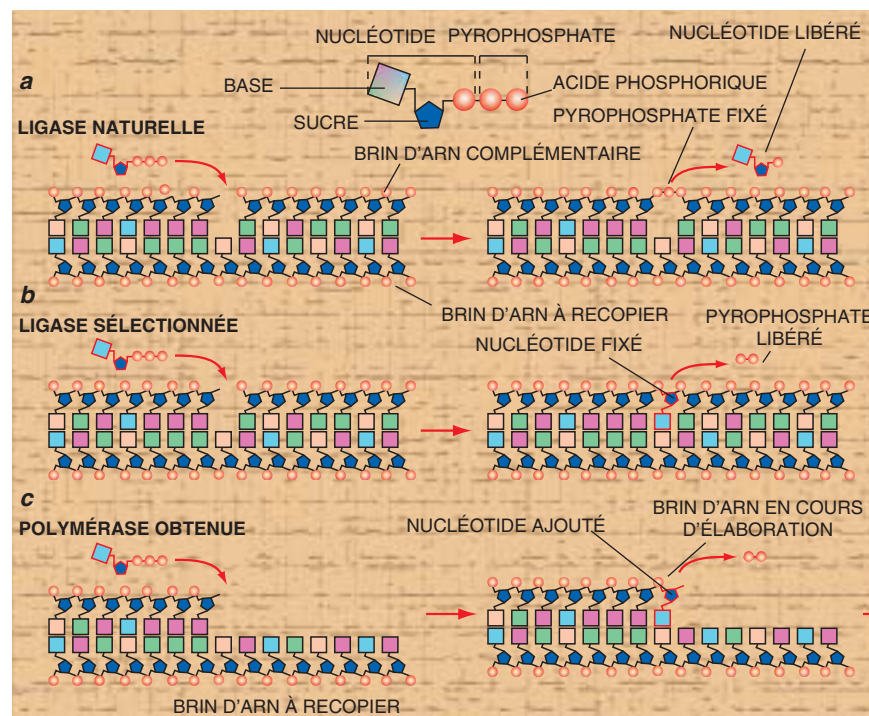
sition une molécule d'ARN catalytique connue, une ligase, qui lie deux petits brins d'ARN, chacun complémentaire d'une partie d'un brin modèle plus grand (voir la figure). Cependant, cet ARN fixait le pyrophosphate entre les deux brins complémentaires et libérait le nucléotide, alors qu'elle aurait dû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

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

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

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

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



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

Vous cherchez un article scientifique ou technique ?

//articlesciences.inist.fr

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

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

www.inist.fr

Des réseaux de neurones auto-organisés

Des robots commandés par un nouveau type de réseau de neurones s'adaptent à des situations nouvelles, sans oublier ce qu'ils ont déjà «appris».

Les réseaux de neurones artificiels sont de plus en plus utilisés pour contrôler l'activité de robots que l'on nomme animats. Au cours de l'évolution d'un animat dans son environnement, son réseau de neurones change de configuration en fonction des stimulus qu'il reçoit, mais aussi de ses configurations antérieures. Ainsi, le réseau de neurones contient, à chaque instant, des informations sur les objets qui entourent l'animat et sur les conséquences de ses actions passées. Contrairement aux systèmes plus rigides dont le comportement est déterminé par des décisions définies à l'avance, l'animat est doué d'une certaine autonomie et d'une capacité d'apprentissage. Toutefois, les réseaux de neurones artificiels ont un grave défaut : ils ont tendance à apprendre de façon globale (ils codent toutes les informations avec le même niveau de priorité) et une modification notable de l'environnement peut les conduire à remettre en cause l'ensemble des comportements appris indépendamment du contexte : c'est l'«oubli catastrophique». Nous avons proposé et testé, au cours de simulations informatiques, un nouveau modèle de réseau capable de s'en affranchir.

Le plus souvent, pour éviter l'oubli catastrophique, on hiérarchise à l'avance les informations traitées par l'animat. Le

réseau de neurones est ainsi divisé en modules spécialisés, par exemple, dans les tâches de reconnaissance de l'environnement ou encore de gestion des mouvements. Toutefois, cette méthode est peu satisfaisante, parce que cette modularisation reflète davantage les *a priori* du chercheur qu'une division des tâches fondée sur la façon dont le robot extrait des informations pertinentes de son environnement.

Pour créer un nouveau modèle, nous nous sommes inspirés de la neurobiologie. En effet, selon les neurobiologistes, l'information traitée par un réseau de neurones – le cerveau – est codée non seulement dans les motifs formés par les groupes de cellules qui sont actives à chaque instant, mais aussi dans l'évolution au cours du temps de ces motifs. Cette dépendance temporelle provient, semble-t-il, du fait qu'un neurone n'est activé qu'après une phase pendant laquelle il ne fait qu'accumuler les impulsions émises par les neurones auxquels il est connecté. En conséquence, il change d'état d'autant plus vite qu'il a été fortement stimulé. Nos neurones artificiels simulent ce comportement de façon simple : à chaque séquence, le programme ne réévalue que l'état des neurones les plus stimulés à la séquence précédente. Nous avons appelé ce mode d'activation, le mode ordonnancé.

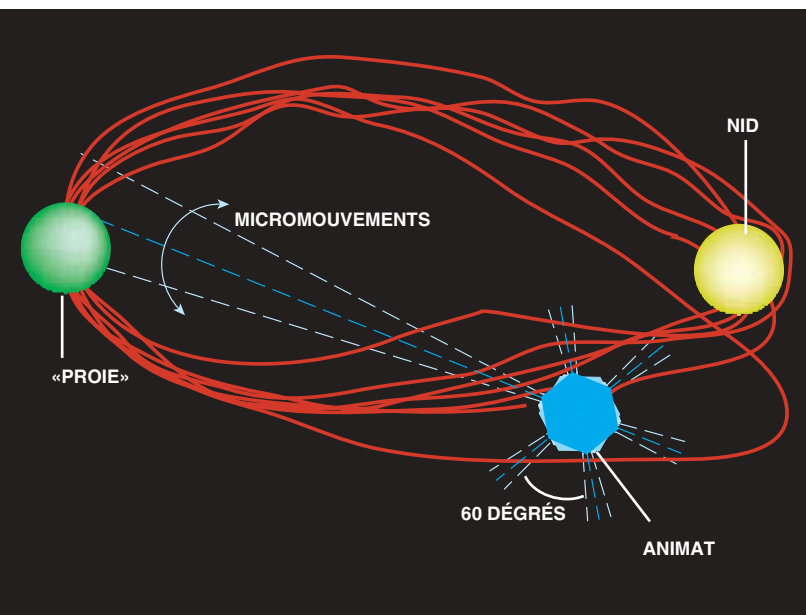
Notre animat évolue dans une pièce à deux dimensions contenant une «proie» qui se déplace aléatoirement et qu'il doit capturer et ramener à un «nid» fixe. Nous avons délibérément limité ses capacités sensorielles et motrices : il ne dispose d'aucune information sur sa propre position dans la pièce, ni sur celle du nid, ni sur la distance qui le sépare de sa cible. Ses six «yeux» lui indiquent simplement le secteur (de 60 degrés) où se trouve la cible et il ne perçoit les murs qu'à très faible distance. Par ailleurs, lors de sa «venue au monde», le réseau neuronal de l'animat est «brut» (nous n'avons introduit aucun module préalable) et toutes les cellules sont connectées entre elles. Au cours de l'évolution de l'animat, ces connexions sont renforcées ou affaiblies par un algorithme d'apprentissage qui favorise celles qui accompagnent les comportements à succès.

À cause du mode d'activation ordonnancé, tout se passe comme si l'influx nerveux se propageait à une vitesse finie dans le réseau. Ainsi, le nombre de neurones activés dans un comportement donné est limité par la vitesse à laquelle l'environnement évolue autour de l'animat. L'algorithme d'apprentissage ayant tendance à fixer les motifs de neurones qui provoquent les «bons» comportements, des populations de neurones différenciées émergent et l'animat les utilise pour réaliser des comportements différents : tout se passe comme si une structure en modules apparaissait spontanément dans le réseau.

Cette modularité n'est pas contenue à l'avance dans la structure du réseau. Si elle est difficile à observer directement, elle est mise en évidence par le fait, vérifié lors des simulations, que le phénomène d'oubli catastrophique disparaît. En outre, on observe d'intéressantes conséquences dans le comportement de l'animat. Il développe, notamment, des stratégies de repérage et d'approche de la cible fondées sur des micro-mouvements (de petites fluctuations du mouvement autour d'une trajectoire moyenne). Ces stratégies sont intéressantes parce qu'elles rappellent celles que l'on observe chez un grand nombre d'animaux et parce qu'elles émergent spontanément (nous n'avons en rien favorisé leur apparition).

Ce modèle offre un nouveau champ de recherche. Il devra être testé pour des tâches et des environnements dynamiques plus complexes. Ainsi, l'animat devra bientôt affronter le monde réel...

Guillaume BELSON et Hédi SOULA,
Institut national des sciences appliquées de Lyon



Le robot (en bleu) commandé par un réseau de neurones ne perçoit de ses cibles, la «proie» (en vert) ou le «nid» (en jaune) que leur présence ou non dans des secteurs de 60 degrés. Grâce au nouveau réseau de neurones, il adopte spontanément une stratégie «astucieuse» : à l'aide de petites fluctuations de sa trajectoire, il maintient sa cible entre deux capteurs ce qui améliore sa précision. Ces «micro-mouvements» rappellent, par exemple, ceux qui animent les yeux des mouches. Dans le cas où la cible est immobile, cette stratégie qui vise à maintenir une orientation moyenne constante entre le robot et la cible explique l'allure quasi elliptique de la trajectoire qu'il apprend, de lui-même, à parcourir.

Bouillants noyaux

Lorsque qu'un noyau atomique se «vaporise», sa température baisse brièvement.

Avez-vous déjà renversé de l'eau sur une plaque chauffante à 300 °C? Loin de disparaître, les perles liquides qui se forment sont projetées de droite et de gauche, parce que leur base se vaporise instantanément au contact de la plaque. Selon les lois classiques de la thermodynamique, sa température se maintient à 100 °C tant qu'une goutte «survit». Philippe Chomaz du GANIL, et Francesca Gulminelli, à l'Université de Caen, ont émis l'hypothèse que la température d'une goutte assez petite baisse brièvement pendant son ébullition! Ils ont eu cette intuition après qu'un autre physicien du GANIL, Bernard Borderie, a observé un phénomène thermodynamique comparable à ce qui arrive à une goutte d'eau sur une plaque chauffante : la «vaporisation nucléaire».

Au GANIL, ces physiciens étudient le comportement thermodynamique d'un système nucléaire dont on augmente l'énergie interne. Pour cela, ils précipitent des noyaux les uns contre les autres, et fabriquent des «systèmes nucléaires chauds», c'est-à-dire des milieux intermédiaires constitués de nucléons (protons ou neutrons). En faisant varier l'énergie du choc, ils en modifient la température. Ils ont ainsi mesuré trois régimes différents de collision : l'évaporation nucléaire, la multifragmentation et la vaporisation nucléaire. L'évaporation se produit à des énergies de collision relativement basses ; les deux noyaux sont peu modifiés, mais laissent échapper des particules légères, telles que des protons (des noyaux d'hydrogène) ou des deutons (un proton et deux neutrons). Quand l'énergie du choc augmente (dès 2×10^{13} joules par nucléon), le milieu nucléaire intermédiaire émet de nombreuses particules et des fragments lourds (plus lourds que des noyaux d'hélium) : c'est la multifragmentation. La vaporisation a lieu lorsque l'énergie de collision dépasse 5×10^{15} joules par nucléon ; le

milieu nucléaire intermédiaire est alors comparable à un gaz de particules constitutives des noyaux, contenu dans un volume triple de celui des noyaux avant la collision. Alors que les deux premiers régimes étaient connus depuis plusieurs années, la vaporisation a été découverte récemment au GANIL.

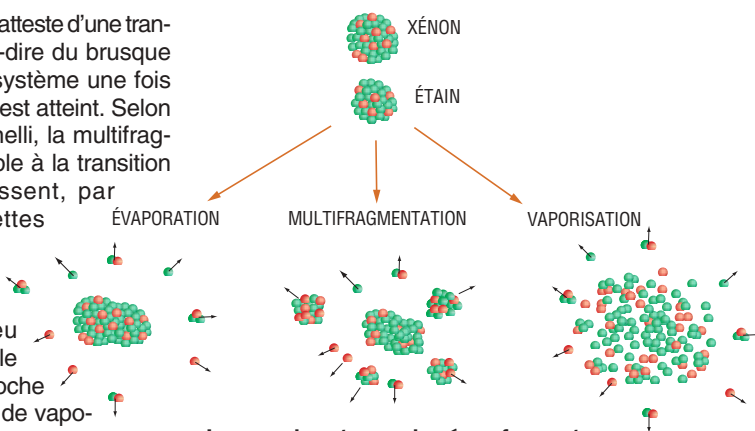
B. Borderie et ses collègues ont notamment envoyé un faisceau de noyaux de xénon (54 protons et 77 neutrons) sur une cible d'étain (50 protons et 69 neutrons). Dans le cas d'une collision frontale, ces deux noyaux fusionnent en un seul système nucléaire chaud, dont l'énergie dépend des conditions du choc. Après de multiples collisions, l'équipe a déterminé la capacité calorifique du milieu nucléaire intermédiaire en fonction de son énergie interne. La capacité calorifique d'un système est l'énergie qu'il faut lui fournir pour augmenter sa température de un kelvin. Cette grandeur est en général positive. Toutefois, dans le cas du milieu nucléaire intermédiaire, on constate que lorsque l'énergie interne atteint 4×10^{13} joules – soit l'équivalent d'une température de 70 milliards de degrés! – la capacité calorifique devient brièvement négative. L'énergie interne du milieu nucléaire intermédiaire décroît durant un court instant avant de recommencer à augmenter. Sur la courbe tracée par les physiciens, le phénomène se traduit par une «divergence».

Un tel comportement atteste d'une transition de phase, c'est-à-dire du brusque changement d'état du système une fois qu'un seuil énergétique est atteint. Selon P. Chomaz et F. Gulminelli, la multifragmentation est comparable à la transition liquide-gaz que subissent, par exemple, des gouttelettes d'eau déposées sur une plaque chauffante. Tandis que dans la phase d'évaporation, le milieu nucléaire est comparable à un liquide, il se rapproche d'un gaz dans la phase de vaporisation. Toutefois, à la température critique, un «liquide nucléaire» a une capacité calorifique négative ; il se refroidit brièvement pendant la multifragmentation.

Comment s'explique cette particularité ? Pour produire et lancer les fragments

qui constituent le milieu vaporisé, le système consomme de l'énergie. Quand le nombre de particules qui le constituent est grand, le refroidissement associé à cette dépense énergétique n'a guère d'influence sur le comportement du système global. En revanche, un système constitué d'un petit nombre de particules (c'est le cas d'un milieu nucléaire) devient sensible au coût énergétique de la vaporisation.

Jusqu'à présent, on n'avait encore jamais décrit de système qui se refroidit pendant une transition de phase! Toutefois, les lois de la thermodynamique ont été élaborées pour les systèmes macroscopiques. P. Chomaz et F. Gulminelli pensent que les propriétés thermodynamiques des transitions de phase de systèmes à grand nombre de particules ne subsistent pas lorsqu'on étudie les changements d'états de système à petit nombre de particules. Selon eux, les transitions de phase à l'échelle élémentaire seraient toujours accompagnées d'un bref refroidissement du milieu à la température critique. Si tel est le cas, le phénomène devrait se retrouver pour tout corps subissant une transition de phase à cette échelle, notamment pour les microgouttelettes d'eau sur une plaque chauffante. Hellmut Haberland et son équipe de l'Université de Fribourg l'ont également observé lors de la fusion de minuscules morceaux de sodium qui ne comportent que 147 atomes.



Lorsque des atomes de xénon frappent une cible d'étain, il se produit soit une évaporation, où les deux noyaux sont peu modifiés et laissent échapper des protons, notamment ; soit une multifragmentation, où diverses particules et des fragments lourds sont émis ; soit une vaporisation libérant un gaz de particules.

Vous cherchez des services personnalisés d'information scientifique ?

//connectsciences.inist.fr

Le portail CNRS d'information scientifique et technique

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

www.inist.fr

Des planètes aux orbites chaotiques

Les lois de la gravitation universelle imposent à certaines des planètes découvertes autour d'étoiles lointaines des comportements très différents de celui des astres du Système solaire.

En 1999, un système de trois planètes gravitant autour de l'étoile *Upsilon Andromedae* a été découvert par Paul Butler et ses collègues de l'Observatoire anglo-australien de Siding Springs. *Upsilon Andromedae* est une étoile semblable au Soleil située à 44 années-lumière ; elle est visible à l'œil nu dans l'hémisphère Nord. Ces trois planètes ont des masses importantes (respectivement de l'ordre de une, deux et quatre fois la masse de Jupiter). Il s'agit de planètes géantes qui gravitent relativement près de leur étoile (si ces planètes géantes étaient dans le Système solaire, toutes les trois seraient contenues à l'intérieur de la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter). Ainsi, elles sont plus proches les unes des autres que les planètes géantes du Système solaire. De ce fait, les interactions gravitationnelles qui s'exercent entre ces trois astres sont considérables et doivent rendre leurs trajectoires fort complexes. Éric Bois et ses collègues de l'Observatoire des sciences de l'Université de Bordeaux ont construit une série de modèles de systèmes planétaires leur permettant d'étudier les orbites de ces planètes pour différentes configurations compatibles avec les observations faites sur ces systèmes. Leurs calculs montrent que les trajectoires des planètes au voisinage d'*Upsilon Andromedae* sont, dans la plupart des cas, chaotiques. Leurs résultats suggèrent que beaucoup de systèmes planétaires découverts autour d'étoiles lointaines sont dynamiquement très différents du Système solaire.

Dans le cas du Système solaire, les interactions entre les planètes sont faibles. De ce fait, on peut calculer l'orbite de chaque planète en ne considérant, dans un premier temps, que son interaction avec le Soleil : on obtient alors les orbites en forme d'ellipse découvertes par Johannes Kepler. On peut ensuite moduler ces ellipses à l'aide des effets complémentaires

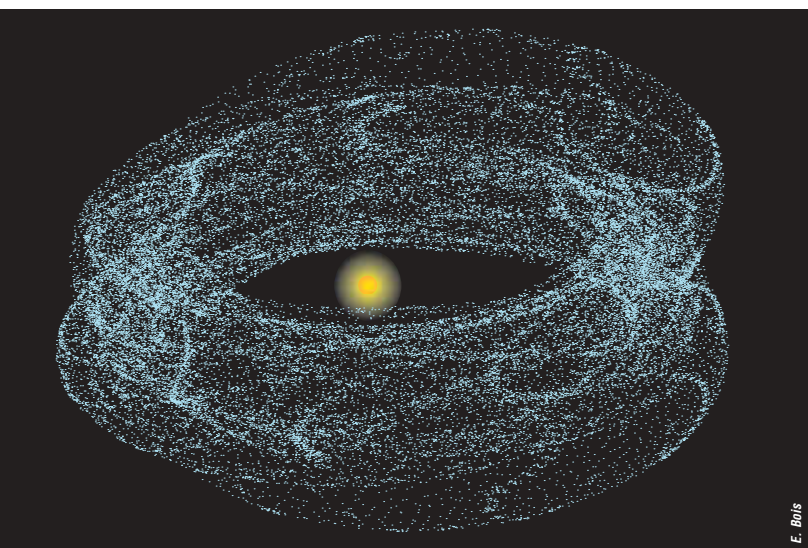
produits par la présence des autres planètes. Dans le cas du système d'*Upsilon Andromedae*, cette approche est impossible.

É. Bois, A. Maciejewski, B. Dauphole, K. Gozdziewski, L. Kiseleva et N. Rambaux ont utilisé un modèle numérique simulant les interactions gravitationnelles en jeu dans le système d'*Upsilon Andromedae*. Ils ont placé les trois planètes dans différentes configurations initiales compatibles avec les observations. En effet, les méthodes actuelles de détection des planètes autour d'étoiles lointaines ne permettent d'évaluer que leurs périodes de révolution et une valeur minimale de leurs masses. De ce fait, plusieurs paramètres, par exemple, les masses exactes des planètes et l'inclinaison dans l'espace de leurs orbites respectives, ne sont pas complètement déterminés par les mesures.

Le système *Upsilon Andromedae* est très instable : les caractéristiques des orbites varient de façon chaotique et sont radicalement modifiées en quelques milliers d'années. C'est le cas, par exemple, de leurs excentricités (un paramètre qui détermine l'aplatissement d'une trajectoire elliptique par rapport au cercle parfait). L'excentricité d'une orbite elliptique est comprise entre zéro (correspondant à une orbite circulaire) et une valeur inférieure à un (correspondant à une orbite parabolique). Si l'excentricité devient égale ou supérieure à un, la planète est éjectée du système. Alors que les orbites du Système solaire sont durablement stables et restent proches d'un plan moyen, les simulations montrent que l'excentricité de la deuxième planète d'*Upsilon Andromedae*, par exemple, peut assez rapidement balayer près de 60 pour cent de l'intervalle des valeurs de l'excentricité d'une ellipse. É. Bois et ses collègues ont même montré que, pour certaines conditions initiales compatibles avec les observations, le système est tellement instable qu'il se désintègre en éjectant sa planète la plus extérieure dès les premiers 1 000 ans.

Par ailleurs, les trajectoires de ces planètes ne peuvent pas être des figures planes. En mécanique, on montre que si la force qui s'exerce entre deux masses est portée par une droite passant par leurs centres de gravité respectifs, le mouvement qu'elles adoptent reste toujours dans un même plan. Cependant, si les deux corps ne sont pas rigoureusement sphériques, il faut, pour calculer leur attraction mutuelle, découper chaque astre en petits volumes élémentaires et calculer la somme de leurs interactions mutuelles. En général, la force résultante ne permet plus, en toute rigueur, que le mouvement des planètes soit confiné dans un plan, même si son effet est très faible. Toutefois, le système d'*Upsilon Andromedae* est chaotique et très sensible aux petites perturbations, de sorte que cette interaction élémentaire est suffisante pour empêcher les planètes de graviter dans un plan commun autour de leur étoile.

Ainsi, notre Système solaire, avec ses orbites durables, ne semble pas être un modèle universel. De nombreuses étoiles semblables au Soleil ont des températures et des longévités qui seraient favorables à l'apparition de la vie, mais si elles sont dotées de planètes semblables à celles d'*Upsilon Andromedae* – dont les conditions climatiques doivent varier brutalement au rythme de leurs trajectoires chaotiques – il est peu probable que la lente évolution chimique nécessaire au développement d'une biosphère puisse y avoir lieu. L'étude dynamique des nouveaux systèmes planétaires pourra peut-être, à l'avenir, fournir des indications aux exobiologistes qui cherchent à déterminer la fréquence à laquelle la vie apparaît dans l'Univers. Par ailleurs, avec les méthodes actuelles de détection, la détermination des masses et des orbites des planètes extrasolaires dépend d'une hypothèse implicite : on leur attribue des trajectoires elliptiques assez stables. Les comportements dynamiques mis en évidence par l'équipe de Bordeaux incitent à la prudence quant à la validité de cette hypothèse. La célébrité de Kepler ne saurait traverser tout l'Univers !



E. Bois

Les trois planètes qui gravitent autour de l'étoile *Upsilon Andromedae* (au centre) ont des trajectoires chaotiques, comme l'illustre cette simulation, réalisée à Bordeaux. Elle représente les 17 000 premières révolutions de la deuxième planète de ce système (les échelles n'ont pas été respectées).

L'arche de Noé des vertébrés

De nombreuses espèces de vertébrés auraient survécu au cataclysme qui a entraîné la disparition des dinosaures, sur le continent indien au cours sa dérive de l'Afrique vers l'Asie.

Il y a 65 millions d'années, un cataclysme planétaire, vraisemblablement la chute d'un astéroïde combinée à une intense activité volcanique, mettait fin au règne des dinosaures et bouleversait le monde vivant. Jusqu'à présent, on admettait que la plupart des vertébrés terrestres avaient également été détruits au cours de cet épisode. Pourtant Michel Milinkovitch, de l'Unité de génétique de l'évolution, et Franky Bossuyt, de l'Unité d'écologie et de systématique, à l'Université libre de Bruxelles, ont échaudé un nouveau scénario d'après diverses données géologiques et génétiques : de nombreuses espèces se seraient multipliées sur le sous-continent indien lors de sa dérive entre l'Afrique et l'Asie, et auraient survécu, à bord de cette arche de Noé, au cataclysme survenu vers -65 millions d'années. La traversée aurait duré quelque 75 millions d'années (entre -130 et -55 millions d'années), du moment où le sous-continent indien s'est séparé de la plaque Africaine jusqu'à celui où il aurait touché la plaque eurasiennne. Alors certains vertébrés auraient recolonisé le monde selon ce nouveau scénario *Out of India*.

En analysant le patrimoine génétique des grenouilles *Ranidae* actuelles, F. Bossuyt et M. Milinkovitch ont montré que les grenouilles de Madagascar et d'Inde forment deux groupes qui ont divergé au moment où ces deux masses de terre se sont séparées. Cette séparation a eu lieu il y a 88 millions d'années. À partir de ce moment-là, les grenouilles qui se trouvaient du côté de Madagascar ont évolué vers les espèces actuelles typiques de cette région, tandis que celles restées sur la plaque qui allait devenir l'Inde

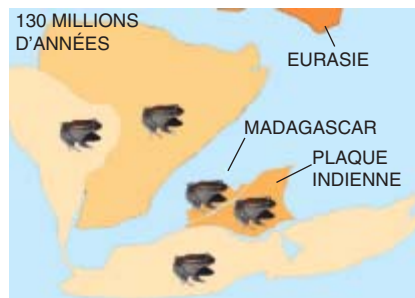
ont évolué vers les espèces actuelles endémiques d'Inde.

La séparation de l'Inde et de Madagascar est l'événement clé de l'histoire des *Ranidae* qui est à la base de la reconstruction de leur arbre généalogique. Cet arbre nous apprend ainsi que certaines lignées ancestrales de grenouilles se sont multipliées au cours du Crétacé sur la plaque indienne et sur celle de Madagascar. Certaines se sont éteintes au moment du cataclysme, mais d'autres ont subsisté jusqu'au moment de la collision de la plaque indienne et de la plaque asiatique, il y a 55 millions d'années : une fois la jonction établie, les espèces qui avaient été apportées par la plaque à la dérive ont commencé à coloniser le reste du monde. Ce scénario expliquerait pourquoi tant de lignées de *Ranidae* vivent en Indonésie, en Chine du Sud et aux Philippines : elles y sont beaucoup plus nombreuses que dans le reste du monde. Il justifierait aussi que les premiers fossiles du genre *Rana* apparaissent en Europe seulement il y a une trentaine de millions d'années (bien après la jonction Inde-Asie).

Toutefois, cette vision des vertébrés issus de l'Inde s'oppose à la théorie *Out of Africa*, qui postule que les animaux auraient colonisé le monde via l'Eurasie en partant d'Afrique après le cataclysme ayant abouti à l'extinction des dinosaures. Selon l'équipe de Bruxelles, ce dernier scénario a plusieurs points faibles : il n'explique pas le petit nombre d'espèces de *Ranidae* d'Afrique, ni les similitudes entre les *Ranidae* d'Inde et de Madagascar. On conçoit difficilement comment ces amphibiens, quittant les côtes africaines, auraient traversé l'océan sur plusieurs milliers de kilomètres, pour atteindre le continent indien.

Si la biodiversité des *Ranidae* a été préservée sur la plaque continentale de l'Inde lors de sa traversée d'Afrique vers l'Inde entre -130 et -55 millions d'années, alors des centaines d'autres espèces appartenant à divers groupes d'animaux, notamment des mammifères, ont vraisemblablement survécu de la même façon avant de débarquer sur le continent de l'Eurasie. Ce radeau à la dérive aurait été une planche de salut pour de nombreuses espèces.

Sébastien BOHLER



Il y a 88 millions d'années, une plaque s'est séparée de Madagascar, entraînant avec elles divers animaux, dont les grenouilles *Ranidae*. Durant le cataclysme qui eut lieu il y a 65 millions d'années et qui provoqua l'extinction des dinosaures, de nombreuses espèces disparurent. Lorsqu'il y a 56 millions d'années, la plaque, qui allait devenir l'Inde, toucha la plaque eurasiennne, les animaux qui y avaient survécu, notamment les *Ranae*, commencèrent à coloniser ce continent. Les espèces de *Ranidae* d'Inde et de Madagascar ont évolué indépendamment.

Vous cherchez de l'Information Scientifique et Technique ?



[//www.inist.fr](http://www.inist.fr)

L'Institut de l'Information Scientifique et Technique du CNRS

