

Un cadavre exquis?

Un poisson fossile chinois trahit une origine peu compatible avec l'arbre généalogique des vertébrés.

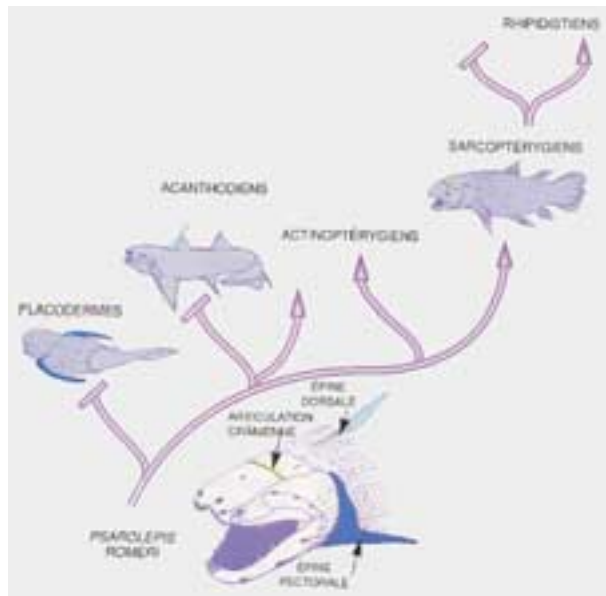
Jusqu'en 1998, la famille des poissons osseux était unie et harmonieuse. La phylogénie de ce grand groupe satisfaisait la communauté des paléontologues et bénéficiait d'un large consensus. Les fossiles s'inséraient sans ambiguïté dans l'un ou l'autre de ses groupes. Pourtant, un poisson fossile daté de 400 millions d'années et étudié récemment est venu semer la discorde dans cet équilibre familial. Ses différents caractères morphologiques en font un «vilain petit canard» qui n'a pas encore de place dans sa famille.

Plusieurs crânes ont été découverts il y a près de 20 ans sur le gisement de Oujing, dans la province chinoise du Yunnan, par Yu Xiaobo, alors de l'Institut de paléontologie des vertébrés et de paléoanthropologie de Pékin. Ces crânes étaient conservés aux États-Unis, tandis que d'autres éléments du squelette avaient été négligés, car, en dépit de leur aspect identique, ils paraissaient ne pas appartenir à la même espèce. Ces os, ainsi que des fragments d'os des joues et de mâchoires, ont été réanalysés et attribués à une seule et même espèce, *Psarolepis romeri*, par Zhu Min, alors invité au

Muséum national d'histoire naturelle de Paris.

Psarolepis romeri présente des caractères morphologiques de chacun des grands groupes de vertébrés à mâchoires. Il n'est connu que par des éléments isolés d'individus différents (crâne, ceinture pectorale, écailles, etc.). Néanmoins, la structure caractéristique de la couche de tissu dur qui recouvre les éléments fossiles indique indubitablement une même espèce. Nommé cosmique, ce tissu proche de la dentine et de l'émail de nos dents est connu uniquement chez les Sarcoptrygiens, groupe de vertébrés dont une partie des nageoires est charnue ou transformée en membres. Les Sarcoptrygiens actuels sont représentés par le coelacanth qui vit au large des Comores et de l'Indonésie, les dipneustes (des poissons à poumons), et les tétrapodes (les vertébrés terrestres pourvus de pattes, tels les êtres humains). *Psarolepis romeri* appartient-il pour autant à ce groupe?

Sa boîte crânienne est effectivement articulée en deux parties, antérieure et postérieure (en vert sur la figure), comme celles des Sarcoptrygiens primitifs, dont le coelacanth. Cependant, alors que sa mandibule fortement recourbée permettrait de le classer dans un sous-groupe éteint des Sarcoptrygiens, ses dents à structure plissée sont caractéristiques de l'autre sous-groupe, celui des Rhipidistiens, dont tous les vertébrés tétrapodes actuels sont issus. Par ailleurs, les os de la joue de *Psarolepis romeri* et le trajet de ses canaux sensoriels ressemblent à ceux des Actinoptérygiens primitifs – le groupe frère des Sarcoptrygiens, composé des poissons à nageoires rayonnées que nous connaissons aujourd'hui. En outre, sa ceinture pectorale, constituée de larges plaques osseuses et prolongée latéralement par une gigantesque épine (en bleu sur la figure), rappelle celle des placodermes aujourd'hui disparus. Enfin, des épines isolées (en turquoise sur la figure), présentant l'ornementation caractéristique de *Psarolepis romeri*, étaient



Psarolepis romeri (en bas) présente un mélange de caractères : l'articulation de sa boîte crânienne (en vert) ressemble à celles des sarcoptrygiens ; son dos est armé d'épines en avant des nageoires dorsales (en bleu clair), comme les acanthodiens ; sa ceinture pectorale était prolongée par une épine latérale comme les placodermes (en bleu foncé). Les traits obliques sur les branches de l'arbre indiquent des familles éteintes.

BRÈVES

Perles (moins) rares

À l'Université de Mayence, Wolfgang Tremel, Jörg Küther et Ram Seshadri ont synthétisé des perles. Le travail des chimistes ne vise pas la production de bijoux, mais la compréhension des mécanismes de la «biominéralisation», qui régit la constitution des dents, des os... et des perles. Les chimistes ont obtenu des perles bien rondes, au lieu des cubes classiquement attendus, en faisant cristalliser la calcite sur une sphère d'or prétraitée : le prétraitement est la clef du succès ; selon les conditions, on obtient une croissance sphérique ou des agrégations de petits cristaux.

La sélection du maïs

Le maïs n'est pas une plante naturelle : il a été obtenu par sélection à partir de la teosinte, graminée sauvage d'Amérique centrale. L'équipe de John Doebley, de l'Université du Minnesota, a identifié l'un des gènes touchés par cette sélection : il régule la production d'une protéine qui limite la longueur des tiges latérales. Cette protéine est produite en plus grande quantité dans le maïs : les tiges de la teosinte sont longues et se terminent par une aigrette, tandis que celles du maïs sont courtes et portent de longs épis. L'examen des variantes de ce gène montre que la variété de teosinte la plus proche du maïs actuel est originaire du Sud-Ouest du Mexique : c'est probablement là que la plante céréalière a été domestiquée.



Congélation en altitude

L'archéologue Johan Reinhard vient d'annoncer la découverte, sur les pentes du volcan argentin Llullaillaco, à environ 7 000 mètres d'altitude, des corps congelés de trois enfants incas, probablement sacrifiés il y a 500 ans. Ces momies sont bien conservées : elles ne sont pas desséchées, le sang est encore gelé dans le cœur et dans les vaisseaux sanguins. Les analyses que Fon pratiquera sur ces restes préciseront leurs conditions de vie, le régime alimentaire ou les maladies des Incas, comme cela a été fait pour l'homme des glaces Otzi, découvert dans un glacier tyrolien il y a quelques années.

Nouvel océan

La vallée du Rift, en Afrique de l'Est, résulte de la séparation du continent africain en deux plaques : la plaque somalienne, à l'Est, et la plaque nubienne, à l'Ouest. En rassemblant des données géométriques, Dezhi Chu et Richard Gordon, de l'Université Rice, confirment la conclusion issue de l'analyse de la topographie et de la composition des roches : les deux blocs ont des mouvements différents par rapport à la plaque Antarctique qui les borde au Sud. Ils pivotent l'un par rapport à l'autre, s'écartant de six millimètres par an au Nord (la vallée du Rift), et se rapprochant de deux millimètres par an au Sud (sous l'océan Indien).



Menace d'extinction

L'une des missions du Muséum national d'histoire naturelle de Paris est la conservation et la présentation au public des espèces, vivantes ou disparues. Saura-t-il conserver le savoir-faire nécessaire ? Les taxidermistes qui préparent les peaux des animaux et les reconstituent sur des mannequins, et qui étudient comment conserver ou imiter les végétaux, y sont en voie de disparition : de 14 il y a quelques années, leur nombre est aujourd'hui réduit à six. Au total, les organismes publics français n'emploient plus qu'une cinquantaine de ces spécialistes, dont la formation récente de nombreuses années de pratique.

Balance de précision

Si vous voulez de la précision, faites une mesure de fréquences, préconisait Pierre Curie. La masse des virus et d'autres particules très légères, de l'ordre du femtogramme (10-15 gramme), sera bientôt mesurée. Une équipe de l'Institut de technologie de Géorgie a mis au point une balance microscopique, constituée de nanotubes de carbone. Lorsque l'on applique une tension oscillante à ces tubes, ils vibrent comme des cordes de guitare. Les particules collées à un nanotube modifient sa fréquence de résonance, et cette variation mesure la masse de la particule qui y est attachée. Par cette méthode, les physiciens ont pesé une particule de graphite de 22 femtogrammes. Un record.

probablement situées en avant des nageoires dorsales comme celles des Acanthodians.

L'analyse informatique de ses caractères indique que ce «cadavre exquis» paléontologique pourrait être un Sarcoptérygien très primitif ayant conservé des caractères hérités d'un ancêtre commun avec les autres groupes de vertébrés. Ces caractères, tels que la présence d'épines en avant des nageoires auraient alors été perdus par les Actinoptérygiens et par les Sarcoptérygiens. Une autre possibilité serait que *Psarolepis romeri* soit l'ancêtre

des Sarcoptérygiens et des Actinoptérygiens, présentant des caractères des deux groupes.

La découverte d'éléments osseux du squelette interne, par exemple des nageoires, fournira peut-être des indices moins équivoques. *Psarolepis romeri*, qui n'est peut-être qu'un Sarcoptérygien aberrant, trouvera alors sa place dans un des groupes de la grande famille des vertébrés. Le vilain petit canard sera peut-être alors un cygne qui bouleversera la généalogie des vertébrés.

Philippe JANVIER
Muséum national d'histoire naturelle

Bleu cerise

La perception des couleurs dépend du vocabulaire acquis pendant l'enfance.

Selon Paul Éluard, *La terre est bleue comme une orange, Jamais une erreur les mots ne mentent pas.* (L'amour, la poésie.) Cependant, dans notre vie quotidienne, notre langage oublie toute poésie : une orange est... orange et le ciel est bleu. Pendant notre enfance, nous nous sommes habitués à distinguer les couleurs et, même si le turquoise est ambigu (certains le voit bleu, d'autres vert), aujourd'hui nous avançons au feu vert, freinons au feu orange et stoppons au feu rouge.



1. La perception des différentes couleurs dépend du vocabulaire acquis. Alors qu'un Européen met dans deux catégories différentes le ciel (bleu) et l'herbe (verte), le Berinmo les regroupe sous le même vocable, le nol.

Notre rétine est composée de cellules nerveuses qui, grâce à des pigments, sont sensibles aux ondes lumineuses dont la longueur d'onde est comprise entre 400 et 800 nanomètres (milliardièmes de mètre). Les pigments ne sont pas suffisamment sensibles pour distinguer toutes les longueurs d'ondes : notre cortex cérébral caractérise alors les longueurs d'onde que nos yeux perçoivent de façon identique par un seul mot qui désigne une couleur. Ce sont les sept couleurs de l'arc-en-ciel et quelques autres, tels le rose, le marron... Ces catégories chromatiques sont-elles universelles et innées ou dépendent-elles d'un vocabulaire acquis ?

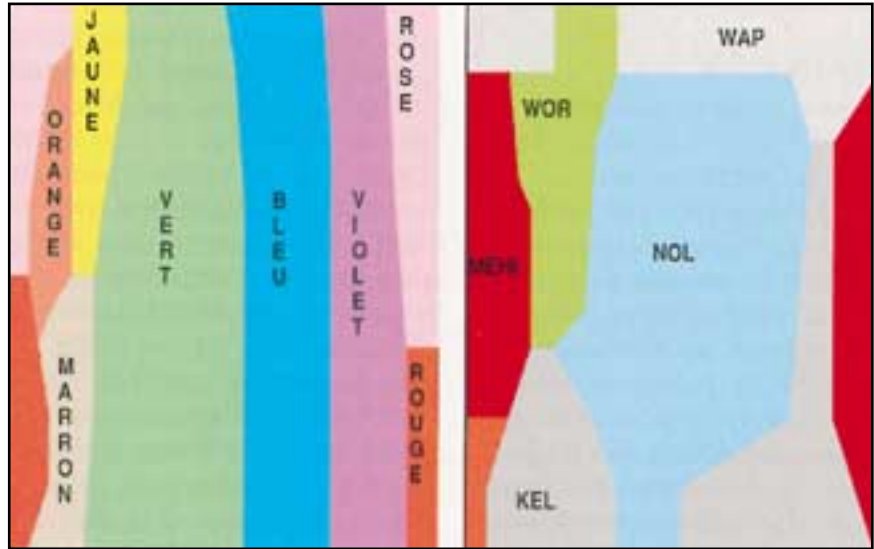
Deux équipes anglaises ont étudié les perceptions des Berinmo, une tribu de chasseurs-cueilleurs de Papouasie Nouvelle-Guinée, et ont conclu que la perception des couleurs a, pour une large part, une composante linguistique.

Les Britanniques ont présenté aux Berinmo un nuancier composé de 160 couleurs que nous classons en huit catégories : le marron, le rouge, le rose, l'orange, le jaune, le vert, le bleu et le violet. Les Berinmo ont réparti ces couleurs selon cinq termes – wap, mehi kel, nol et wor – dont les chercheurs ont évalué le contenu sémantique. Chacun des groupes a nommé les échantillons (voir la figure 2) en fonction de son vocabulaire et ainsi défini les catégories de couleurs propres aux deux cultures. On constate que les frontières des couleurs ne se superposent pas, c'est-à-dire qu'une couleur unique (le nol) aux yeux des Berinmo est perçue comme deux couleurs différentes par les Européens (le vert et le bleu). En revanche, les couleurs proches de la frontière nol/wor correspondent pour nous à du

vert ; notre œil établit deux distinctions – entre le bleu et le vert, et entre le vert et le jaune –, auxquelles les Berinmo sont insensibles.

Les linguistes ont ensuite approfondi l'étude par une série de tests. Ils présentaient au sujet – Berrinmo ou Anglais – un échantillon de couleur à mémoriser, puis 30 secondes plus tard, une paire d'échantillons peu différents et contenant la couleur initiale que le sujet devait retrouver : les résultats de ces tests ont confirmé que les Berinmo classaient bien les objets situés de part et d'autre de la frontière nol/wor (contrairement aux britanniques), mais se trompaient pour les nuances de bleu ou de vert.

Afin de tester l'universalité de la perception des couleurs, ils ont ensuite tenté d'enseigner à des anglophones la distinction nol/wor, et à des Berinmo, les distinctions bleu/vert et vert/jaune. Ils ont aussi enseigné une distinction arbitraire qui n'existe dans aucune des deux langues : vert 1 et vert 2. Les Berinmo ont appris avec la même difficulté à distinguer le bleu du vert que le vert 1 du vert 2. A l'inverse, les Anglais ont eu plus de facilités à différencier le jaune du vert que le nol du wor. La perception de couleurs différentes est plus facile lorsque les



2. Les deux graphes montrent les catégories de couleur discernées par un européen (à gauche) et un Berinmo (à droite). En abscisses sont notées les différentes nuances, et en ordonnées, l'intensité lumineuse. Les frontières des zones de couleurs ne sont pas superposables. À l'inverse des européens, les Berinmo ne distinguent pas le vert du jaune, ni le vert du bleu, mais différencient le nol du wor. La perception des couleurs dépend du langage acquis.

couleurs correspondent à une division linguistique acquise depuis longtemps.

Les chercheurs ont conclu de ces résultats que l'influence du langage est prépondérante dans la catégorisation

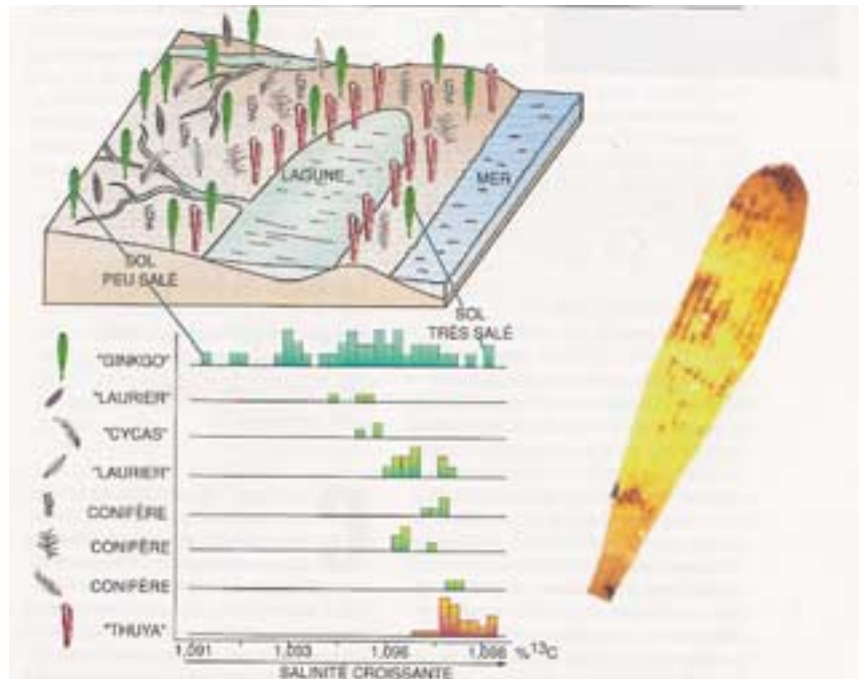
des couleurs. La façon dont on évoque un objet oriente sa perception. Avec un langage différent, les monochromes de Klein nous apparaîtraient-ils comme de magnifiques paysages ?

La résistance des ginkgos

Comme son parent actuel, un ginkgo disparu survivait dans des conditions variées.

Le Ginkgo biloba, ou Arbre aux 40 écus, se répand comme arbre d'ornement le long des trottoirs de nos villes : les paysagistes apprécient sa grande résistance aux agressions, maladies infectieuses, attaques d'insectes ou pollution atmosphérique. Il est le dernier représentant vivant de l'ordre des Ginkgoales, qui a prospéré à l'ère secondaire : une centaine d'espèces de ginkgo ont été répertoriées dans les sédiments de cette époque en Afrique, en Asie et en Amérique du Nord. L'une de ces espèces possédait, comme son parent actuel, d'étonnantes capacités d'adaptation : elle poussait dans des sols de salinité très variée.

Comment connaître l'écologie d'une plante fossile ? Vivait-elle dans un milieu aride ? Ou sur un sol salé ? La morphologie est parfois trompeuse : des



Plusieurs espèces de plantes poussaient il y a 100 millions d'années au bord d'une lagune située près d'Angers. La salinité du sol, donc la distance à la lagune, déterminée par le pourcentage de carbone 13 présent dans les feuilles fossiles, est caractéristique de chaque espèce, sauf pour un arbuste, aujourd'hui disparu de la famille du Ginkgo biloba (feuille à droite) : celui-ci s'adaptait à des milieux de salinités très diverses.

Décaper au blé

Comment décaper sans altérer le support? Avec de la farine! Fort de ce constat, la Direction générale de l'armement a mis au point un robot qui utilise ce végétal amylacé respectueux du support. La structure du grain de blé est modifiée par un processus de cuisson et d'extrusion. En faisant varier la dureté et la granulométrie des grains, on décape la peinture sur des matériaux composites, très fragiles, sans les abîmer. La forme de l'objet à décaper est préalablement numérisée ; un robot assure ensuite le travail.

Un système extrasolaire

La vie n'a pas encore été découverte sur une planète extrasolaire, mais des astronomes américains viennent d'annoncer la découverte de deux planètes autour d'une étoile qui en comptait déjà une. Autour d'upsilon de la constellation



d'Andromède, située à une cinquantaine d'années-lumière de la Terre, tournent ainsi trois planètes : c'est le premier système planétaire autour d'une étoile analogue au Soleil. La planète déjà découverte, à 0,059 unité astronomique de l'étoile (la Terre est à une unité astronomique du Soleil), est aussi massive que Jupiter. Les nouveaux candidats sont à 0,83 et 2,5 unités astronomiques de l'étoile centrale et ont une masse plusieurs fois supérieure à celle de Jupiter.

Le virus de la variole

Faut-il détruire les échantillons du virus de la variole? En 1980, lorsque l'Organisation mondiale de la santé a déclaré l'éradication de la variole, elle a promis une destruction des souches existantes pour le 30 juin 1999. Aujourd'hui, le débat reste ouvert. Les partisans de la destruction des souches virales estiment que leur conservation ferait planer un risque : des terroristes qui s'empareraient des souches pourraient déclencher une pandémie, car ce virus est extrêmement contagieux. Au contraire, des biologistes prônent la conservation des souches en vue d'étudier les atteintes virales voisines, telles le monkeypox et le cowpox qui frappent maintenant l'homme.

caractères persistent dans des lignées dont l'environnement a changé. Ainsi les conifères, qui ont émergé sous des climats arides, ont-ils conservé l'épaisse cuticule qui les protège de l'évaporation, alors qu'ils vivent aujourd'hui à des latitudes tempérées, où l'eau abonde. L'assemblage des espèces trouvées dans le même gisement fossilifère ou la composition des sédiments dans lesquels elles sont enfouies donnent aussi des informations, mais toujours indirectes.

En revanche, les proportions relatives des isotopes stables du carbone nous informent directement sur l'environnement où la plante a vécu. Le carbone présente deux isotopes stables : le carbone 12, le plus abondant, dont le noyau contient six protons et six neutrons, et le carbone 13, dont le noyau contient un neutron supplémentaire et qui est donc un peu plus lourd. Lors de la photosynthèse, qui permet aux plantes de fabriquer les molécules nécessaires à leur croissance à partir du dioxyde de carbone de l'atmosphère, celles-ci utilisent plutôt le carbone 12, plus léger donc plus facile à incorporer. Cette préférence est moins marquée en cas de stress, en période de sécheresse par exemple : les teneurs en carbone 13 d'une plante sont donc plus grandes lorsqu'elle pousse en milieu aride que lorsqu'elle pousse en milieu humide.

En mesurant leur teneur en carbone 13, nous avons reconstitué l'écologie des plantes qui poussaient il y a environ 100 millions d'années au bord d'une lagune, à quelques kilomètres au Nord d'Angers. Outre les restes de nom-

breux exemplaires d'un ginkgo fossile, *Eretmophyllum andegavense*, ce gisement contient plusieurs autres plantes : un thuya de Berbérie fossile, deux autres conifères, un cycas et deux lauriers fossiles. Ces plantes sont très bien conservées : lorsqu'ils ont vu les feuilles fossiles, les fouilleurs ont d'abord cru que le vent avait apportés des feuilles mortes de l'automne précédent. Après un court transport dans des ruisseaux, les tissus végétaux se sont fossilisés, au fond de la lagune, dans de l'eau saturée en sel et dépourvue d'oxygène. Leur composition en carbone n'a pas changé depuis leur mort.

Les fortes teneurs en carbone 13 du thuya montrent qu'il était très stressé : il vivait juste au bord de la lagune, là où le sol était très salé. Pour chacune des autres espèces, tous les individus étaient aussi étroitement regroupés autour d'une valeur moyenne de salinité, variable selon l'espèce. Seul le ginkgo fossile fait exception : la diversité des teneurs en carbone 13 des individus montre que l'espèce vivait aussi bien sur un sol salé que sur un sol «doux».

Cette adaptabilité ne lui a pourtant pas permis de subsister jusqu'à aujourd'hui. Le Ginkgo biloba lui-même n'existe plus à l'état naturel que dans une petite région de Chine. La faible efficacité du mode de reproduction des Ginkgoales (leurs graines ne sont protégées ni par un ovaire ni par un fruit, et ils ne possèdent pas d'organe qui retienne le pollen) ne leur a sans doute pas permis de résister à l'invasion des plantes à fleurs.

T.T. NGUYEN TU et H. BOCHERENS,
Lab. de biogéochimie isotopique,
Université Paris 6.

Le tout et les parties

Parmi les primates, seuls les hommes perçoivent plus vite une forme globale que ses détails.

Comment reconnaissons-nous visuellement un objet? Sommes-nous plutôt attentifs à l'identité des parties qui le composent ou, au contraire, à leur arrangement spatial? Lorsqu'on nous présente des formes construites par assemblage de formes plus petites (par exemple, un grand cercle construit avec de petits carrés), nous identifions plus vite la grande forme (le cercle) que la petite (le carré). Ce traitement prio-

ritaire des attributs globaux est certainement un avantage : la structure générale des objets ou des scènes visuelles est souvent une meilleure source d'identification et de discrimination que la structure des parties qui les composent. Pourtant, parmi les primates, nous seuls avons cette capacité.

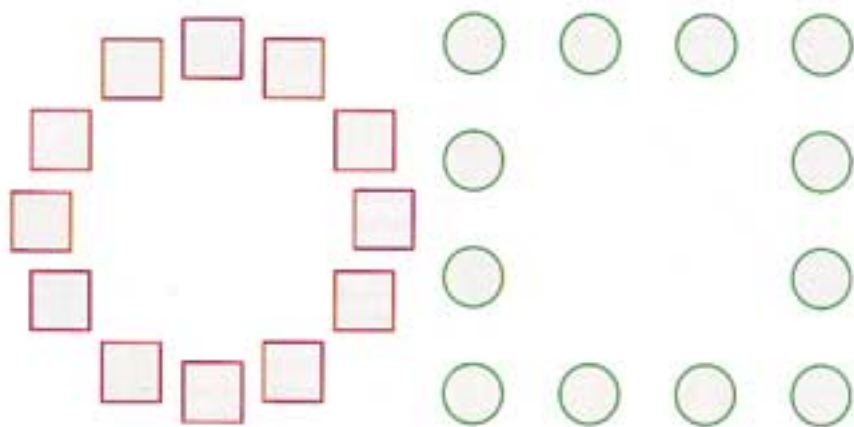
Des singes perçoivent-ils plutôt le tout d'un objet, ou plutôt ses parties? Nous avons placé des babouins devant un écran d'ordinateur sur lequel étaient affichées des formes composites, tels des carrés composés de petits cercles ou, à l'inverse, des cercles composés de petits carrés. Les singes devaient actionner le plus rapidement possible une manette de jeu dès que la forme présentée contenait un cercle, grand ou petit. Chaque bonne réponse était

récompensée par une friandise au goût de banane.

Contrairement à l'homme, les babouins détectent plus rapidement le cercle lorsqu'il est un constituant de la forme que lorsque c'est la forme globale. Cette perception préférentielle des constituants, qui s'applique à une grande variété d'objets, semble révéler un principe général du traitement visuel chez le babouin ; on la retrouve pour d'autres combinaisons de formes géométriques.

La différence entre l'homme et le babouin suggère qu'il y a eu une évolution des traitements visuels des objets chez les primates, notamment au sein de la lignée des singes dits de «l'Ancien Monde» qui a donné les singes anthropoïdes et l'homme. Avec Masaki Tomonaga, du Centre de recherche sur les primates d'Inuyama au Japon, nous avons confirmé cette hypothèse évolutive, en réalisant les mêmes expériences avec des chimpanzés, qui se situent, du point de vue de la phylogénèse, entre l'homme et le babouin. Le chimpanzé reconnaît les formes à la même vitesse, quel que soit le niveau de présentation : sa perception des objets et des scènes visuelles semble donc, comme sa position dans l'évolution, intermédiaire entre celle du babouin et la nôtre.

Des travaux utilisant les techniques récentes d'imagerie cérébrale ont montré que les zones du cerveau impliquées dans le traitement de la globalité des



Lorsque nous observons ces deux formes, nous percevons d'abord le cercle (à gauche) ou le carré (à droite) : nous sommes plus sensibles à la forme globale qu'aux détails. Au contraire, les babouins sont d'abord sensibles aux détails, sans doute parce qu'ils n'ont pas appris à associer automatiquement les constituants d'un objet.

images sont différentes de celles mises en œuvre pour le traitement des détails. La diversité dans la manière de percevoir les objets proviendrait-elle alors de différences neurobiologiques entre les cerveaux du babouin, du chimpanzé et de l'homme ? Probablement pas : toutes les données disponibles indiquent une grande ressemblance entre les voies visuelles et les aires corticales mises en jeu dans la perception des objets chez ces différentes espèces.

Nous proposons au contraire que ces variations entre espèces reflètent des différences dans la capacité à relier entre elles les parties pour percevoir

le tout. Le groupement des éléments locaux en une structure globale s'effectue de manière automatique chez l'homme, alors qu'il requiert une attention soutenue chez le singe, en particulier chez le babouin. Il est possible que certains apprentissages propres à l'homme, tel celui de la lecture, favorisent le caractère automatique de ce processus de groupement. Pourrait-on, par des apprentissages analogues, favoriser un traitement prioritaire de la structure globale chez le singe ?

Joël FAGOT et Christine DERUELLE, Centre de recherches en neurosciences cognitives, CNRS, Marseille

Nœuds et ADN

Les nœuds de l'ADN éclairent la réplication.

La voie la plus directe n'est pas toujours la plus rapide. Ainsi, les biologistes doivent-ils inventer des approches indirectes pour explorer les cellules vivantes. Nous avons utilisé une méthode qui se fonde sur les nœuds de l'ADN pour déterminer la structure de la molécule au cours de sa réplication.

L'étude de l'ADN dans les bactéries vivantes ne peut se faire par examen de minces coupes de bactéries, au microscope électronique : comment pourrions-nous alors discerner les molécules d'ADN, parmi les autres constituants cellulaires ? Même si nous localisions une molécule d'ADN, ce serait grand miracle que de l'avoir tout entière dans la coupe. Pourrions-nous

alors extraire l'ADN entier des cellules, et observer ensuite des micrographies électroniques de molécules en cours de réplication ? Nous ne verrions alors pas la structure tridimensionnelle des molécules, car elle aurait été modifiée par les manipulations.

Nous avons contourné cette difficulté en regardant l'ADN noué *in vivo* : les nœuds de l'ADN subsistent alors au cours des manipulations, de sorte qu'ils permettent de suivre à la trace la structure de l'ADN au cours de la réplication.

Les nœuds de l'ADN apparaissent au cours de la réplication. Lors de cette opération, les deux brins de la double hélice sont localement séparés par des enzymes, chaque brin constituant un modèle pour la synthèse du brin complémentaire. La région de séparation des deux brins, nommée «bulle de réplication», grossit à mesure que les brins complémentaires sont synthétisés.

Quand les hélices se détordent, la torsion des brins est reportée sur les

extrémités de la bulle de réplication ; pour dix bases répliquées, un tour de la double hélice d'ADN doit être éliminé par des enzymes nommées topo-isomérases. Celles-ci coupent l'ADN et laissent passer une autre partie de la molécule à travers la coupure, puis elles ressoudent ensuite les brins. Les erreurs qui ont lieu lors de ces passages conduisent à la formation de nœuds dans les parties répliquées de l'ADN.

Ces nœuds nous intéressent. Pour les étudier, nous avons introduit des séquences à des points particuliers de l'ADN. Ces séquences bloquaient la réplication. Ainsi nous avons préparé des échantillons d'ADN qui étaient enrichis en bulles de réplication toutes de même taille. Puis, à l'aide d'«enzymes de restriction» (qui reconnaissent des séquences de l'ADN et coupent à ces séquences particulières), nous avons coupé les molécules d'ADN des deux côtés des bulles de réplication et obtenu des fragments que nous avons sépa-