

les êtres vivants ; dans les archéobactéries, ces molécules seraient les constituants de base des membranes, et, dans les organismes supérieurs, elles serviraient seulement de renforçateurs.

Pourrait-on alors reconnaître, parmi les substances isolées, quelles sont les plus anciennes ? Une molécule semblait ancienne quand sa synthèse pouvait s'effectuer à l'aide de peu d'enzymes et quand les réactions de synthèse étaient analogues à des réactions supposées prébiotiques. Les chimistes ont établi un arbre phylogénétique de tous les terpénoïdes connus ou postulés comme constituants membranaires, et ils ont observé que les constituants membranaires les plus anciens devaient avoir été les phosphates d'alcools polyterpéniques.

MEMBRANES PRIMITIVES

Ces derniers étaient connus, puisqu'ils sont les précurseurs biosynthétiques de tous les terpénoïdes, mais on ne les avait jamais préparés en quantités suffisantes pour vérifier s'ils formaient des vésicules. À Strasbourg, N. Plobeck s'est livré à cette synthèse, et il a alors obtenu des phosphates de bis-polyterpényle : ceux qui portaient deux queues hydrophobes courtes, à cinq atomes de carbone, étaient solubles dans l'eau, mais ceux qui portaient deux queues longues, à 15 ou à 20 atomes de carbone, formaient des vésicules. De surcroît, même le phosphate de bis-géranyle, avec deux queues à seulement dix atomes de carbone, formait également des vésicules.

Une vésicule n'est pas une cellule, mais elle en possède plusieurs propriétés caractéristiques. Par exemple, l'intérieur de la membrane elle-même constitue une phase lipidique : l'ajout d'une trace d'un hydrocarbure fluorescent, insoluble dans l'eau, mais soluble dans la membrane, rend fluorescente la mince pellicule qui entoure les vésicules. En outre, au moins sur de petites vésicules, l'environnement diffère des couches interne et externe conduit à des différences d'acidité et à des possibilités de transport qui sont à l'étude.

D'où viennent les phosphates d'alcools terpéniques ? On suppose aujourd'hui qu'ils résultent de réactions entre des alcools et des polyphosphates, présents dans les eaux volcaniques. Une simple catalyse acide due à des argiles, par exemple, devrait permettre d'obtenir les alcools polyterpéniques à partir de constituants plus simples, tels l'isobutène et le formaldéhyde. Ainsi la recherche des membranes de nos ancêtres les plus lointains passe, aujourd'hui, par l'exploration chimique de classes de molécules universelles, retrouvées grâce à l'étude du pétrole. □

Vaccin anti-cocaïne

*Chez la souris,
un vaccin diminue
les effets de la drogue.*

La consommation de cocaïne entraîne parfois des perturbations neurologiques, des anomalies comportementales et un besoin quasi irréprouvable de consommer la drogue. Comment lutter contre cette dépendance ? George Koob et ses collègues de l'Institut de recherches Scripps ont considéré la cocaïne comme un agent étranger et «vacciné» des animaux contre cette substance. Ils ont publié dans la revue *Nature* que, de la même façon qu'un vaccin classique protège contre un micro-organisme pathogène, leur vaccin contre la cocaïne rend les souris vaccinées insensibles à la drogue.

Depuis plus de 1 000 ans, les feuilles de coca sont consommées pour leurs effets psychotropes. Selon les Incas, «les anges de Dieu avaient fait cadeau à l'homme de la feuille de coca pour rassasier ceux qui avaient faim, donner une vigueur nouvelle à ceux qui éprouvaient fatigue et défaillance, et faire oublier leurs misères aux malheureux.» Les feuilles de coca sont apparues en Europe au milieu du XIX^e siècle. En 1863, un pharmacien corse, Angelo Mariani, a déposé le brevet du vin Mariani, une boisson aux extraits de coca, vite populaire en Europe. La frontière entre boisson plaisante et médication s'est encore estompée quand, en 1886, le pharmacien américain, John Pemberton, a inventé le Coca Cola.

Les feuilles de coca produisent sensiblement les mêmes effets que la substance pure, mais la cocaïne se déverse plus progressivement dans l'estomac, puis dans le sang, et ses effets sont moins intenses que ceux de la poudre administrée par inhalation ou par injection.

La cocaïne favorise la libération de la dopamine et bloque sa recapture dans les zones «de la récompense», le noyau accumbens et le cortex préfrontal : la concentration en dopamine y augmente, procurant les effets mentionnés.

Pour dresser le système immunitaire contre un antigène étranger, celui-ci doit

être stable ; or la molécule de cocaïne se décompose spontanément par hydrolyse. Ainsi, il fallait trouver un moyen d'en empêcher la dégradation. L'équipe de G. Koob y est parvenue en associant un analogue stable de la cocaïne à une protéine-porteur étrangère : le composé stabilisé était alors susceptible d'activer le système immunitaire.

Afin de tester l'efficacité de l'immunisation, les chercheurs ont d'abord évalué l'effet de la cocaïne sur des rats : leur activité locomotrice augmente, et leur comportement devient stéréotypé. Puis, ils ont administré à quelques animaux le «vaccin» contre la cocaïne. Après une injection et deux rappels, l'équipe américaine a injecté de la cocaïne aux rats vaccinés et observé leurs réactions : la drogue n'avait plus d'effet.

Après la vaccination, le système immunitaire produit des anticorps. Lors d'une injection ultérieure de la drogue, les anticorps se fixent sur la cocaïne, l'empêchant de traverser la barrière hématoencéphalique, de pénétrer dans le cerveau et d'y exercer ses effets. L'immunisation contre la cocaïne abaisse la concentration en cocaïne dans le cerveau.

Si, devant le vide thérapeutique auquel sont confrontés les médecins qui veulent traiter les toxicomanes, ce résultat est encourageant, de nombreuses questions restent ouvertes : lors de l'expérience menée sur les rats vaccinés, la drogue n'était pas injectée par voie intraveineuse, mais par voie sous-cutanée, de sorte que les anticorps avaient le temps de se fixer sur la cocaïne et de l'empêcher d'agir. Lorsqu'un toxicomane s'administre la drogue par voie intraveineuse, l'action est immédiate et les anticorps neutralisants n'auraient sans doute pas le temps d'interdire à la cocaïne de pénétrer dans le cerveau. De surcroît, si les anticorps avaient le temps d'agir, les toxicomanes, n'éprouvant plus les effets qu'ils recherchent, risqueraient de s'administrer des doses croissantes, et de mourir d'overdose.

Enfin, le système immunitaire est très précis, et même s'il reconnaissait la cocaïne, il serait insensible aux analogues que les trafiquants ne manqueraient pas de synthétiser : ces molécules seraient suffisamment proches de la cocaïne pour en reproduire les effets, mais assez différentes pour échapper au système immunitaire. □



Publicité pour le vin Mariani.

Cycliophora

Un nouvel embranchement d'invertébrés marins.

Comment imaginer, lorsque nous dégustons des langoustines, que nous pourrions observer l'une des créatures les plus originales de la planète ? *Symbion pandora*, qui vit sur les parties buccales de ce crustacé, doit à sa petite taille d'être longtemps passé inaperçu. Cette nouvelle espèce est pourtant si différente de tous les autres animaux qu'un nouvel embranchement systématique a été créé pour elle seule : *Cycliophora*.

Les zoologues classent les animaux en catégories hiérarchisées. Les espèces sont regroupées en genres, les genres en sous-familles et les sous-familles en familles. On trouve ensuite les ordres, les classes, les embranchements et, au sommet, les règnes, animal et végétal. L'embranchement *Cycliophora* a des affinités avec deux autres embranchements d'invertébrés, essentiellement marins : les

Bryozoaires et les Kamptozoaires. Il en diffère toutefois par des aspects déterminants : son cycle de développement original, l'existence de phases sexuées libres, la structure de sa bouche, l'absence de tentacules, la simplicité de son appareil digestif et ses organes excréteurs.

Les individus de *Symbion pandora*, d'environ 0,35 millimètre de long, vivent isolés. Ils sont asexués et se reproduisent en formant une larve par bourgeonnement interne. La larve, qui mûrit dans une chambre incubatrice, élabore elle-même un bourgeon interne : son nom, *pandora*, fait allusion à la jarre au contenu mystérieux que Zeus avait confiée à Pandore. Après sa libération, elle se fixe sur la langoustine et se métamorphose.

En période de mue de la langoustine, le bourgeon peut évoluer vers une forme mâle. Ce mâle nain, de 0,085 millimètre de long, incapable de s'alimenter, est libéré

à sa maturité sexuelle et se fixe sur un individu qui bourgeonne une larve femelle : lorsque cette dernière est libérée, elle contient un seul gros ovocyte. Après une période de vie libre et indépendante, elle se fixe et libère l'œuf qui produit alors une larve.

Les espèces de Bryozoaires qui produisent des larves n'incubent aussi qu'un œuf à la fois, toutefois ces animaux ne sont jamais libres et solitaires : ils sont toujours composés de deux individus au moins. Certains Kamptozoaires sont solitaires et leurs bourgeons sont parfois capables de mener une vie libre, comme les larves de *Cycliophora*.

PAS DE TENTACULES

À l'état adulte, *Symbion pandora* est constitué de trois parties : un cône buccal en forme de cloche renversée, un tronc ovoïde et un pédoncule. La bouche, circulaire, est formée d'une alternance de cellules ciliées et de cellules musculaires, et fermée par deux sphincters successifs. Le tube digestif, recourbé en U, se termine par un anus indépendant de la bouche, comme chez les Bryozoaires (chez les Kamptozoaires, les deux orifices sont réunis par un anneau de tentacules). L'absence de tentacules autour de la bouche ou de l'anus est une autre caractéristique de *Symbion pandora*.

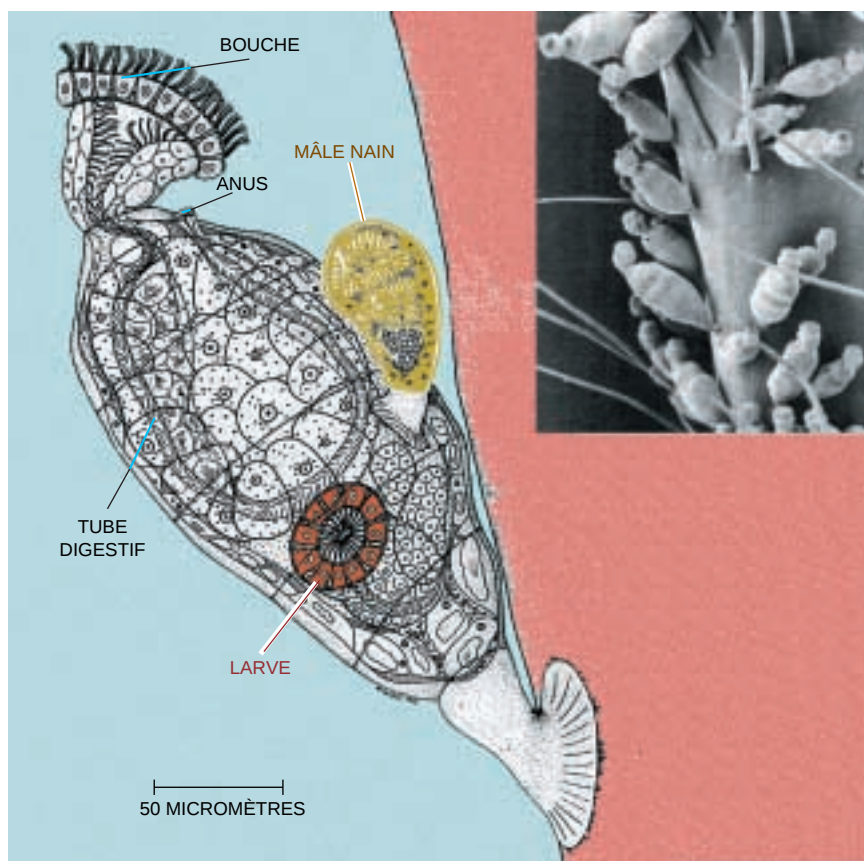
Le tube digestif est constitué d'un estomac, d'un intestin et d'un rectum. Il est formé précocement chez la larve où il semble fonctionnel, comme chez des larves évoluées de Bryozoaires. Le tube digestif des adultes de ces derniers est toutefois plus complexe : il comprend des segments individualisés plus diversifiés (œsophage, cæcum digestif, pylore).

Deux protonéphridies, des organes ayant la même fonction que le rein chez les vertébrés, assurent l'excrétion. Ces organes sont présents en grand nombre chez les Kamptozoaires, mais inexistantes chez les Bryozoaires. Un ganglion nerveux est situé à la partie antérieure du tronc, au niveau du pore anal et de la limite du cône buccal et de l'estomac ; il semble moins complexe que chez les Bryozoaires.

Comme chez deux des trois classes actuelles de Bryozoaires, le tube digestif et le ganglion nerveux de *Symbion pandora* dégénèrent périodiquement : ils sont simultanément remplacés par des viscères bourgeonnés à l'intérieur de l'organisme à partir de l'épiderme. On n'observe pas ce phénomène chez les Kamptozoaires ; toutefois la plupart des ganglions nerveux de la larve disparaissent lors de sa métamorphose.

Jean-Loup D'HONDT
CNRS, MNHN

Laboratoire de biologie
des invertébrés marins et malacologie



Symbion pandora, seule espèce de l'embranchement *Cycliophora*, vit sur les parties buccales de la langoustine (photographie à droite). Il se reproduit par bourgeonnement interne d'une larve. Une différenciation sexuelle peut apparaître : un mâle nain est produit. Il se fixe alors sur un autre individu et féconde la larve contenue par ce dernier.

Gènes et anxiété

Certains facteurs de l'anxiété sont héréditaires.

Sil'on dispose aujourd'hui de médicaments qui soulagent l'anxiété, on comprend encore mal les différents mécanismes qui la déclenchent. Quand deux lignées de souris consanguines sont élevées dans des conditions identiques, et que l'une d'elles présente des comportements plus anxieux que d'autres, des facteurs génétiques sont vraisemblablement en cause. La difficulté reste de trouver ces gènes liés à l'anxiété parmi la multitude des autres gènes. Nous avons utilisé des souris qui ont en commun la quasi-totalité de leur génome, hormis les gènes qui déterminent une caractéristique physique facilement identifiable (un pelage marron, une pigmentation claire ou encore de petites oreilles) et quelques gènes voisins. Certaines manifestent des réactions anxieuses exacerbées : l'anxiété serait modulée par des gènes localisés sur des fragments de chromosome qui contiennent aussi les gènes codant ces caractéristiques physiques.

Nous disposons d'une lignée de souris consanguines dite ABP/Le, où tous les sujets sont génétiquement identiques et présentent six caractères identifiables à l'œil nu, telles la couleur de la robe ou la taille des oreilles. Ces caractères sont commandés par des gènes situés sur de petits fragments de chromosomes dont la localisation est connue. Ces petits fragments comportent aussi des gènes inconnus. Dans le cas de la lignée ABP/Le, les caractères sont récessifs, c'est-à-dire que le caractère morphologique apparaît seulement quand la souris a le gène en double exemplaire.

Le gène *b* produit la couleur brune de la robe ; il est situé sur le chromosome 4 de la souris. Le gène *p*, responsable de l'éclaircissement de la pigmentation du pelage et des yeux, est situé sur le chromosome 7. Enfin le gène *se* qui produit les petites oreilles est localisé sur le chromosome 9. En croisant des souris ABP/Le avec des souris d'une autre lignée, on obtient, à la deuxième génération, des animaux porteurs d'une seule caractéristique morphologique commandée par ces gènes *b*, *p* ou *se* (c'est-à-dire porteurs de deux copies de l'un de

ces gènes). On peut comparer ces animaux avec d'autres qui possèdent une seule copie d'un de ces gènes, ou même qui n'en ont aucune. Si l'on observe une différence de comportement entre les sujets qui présentent un caractère morphologique et ceux qui en sont dépourvus, on attribue la différence à des gènes situés sur le fragment de chromosome qui commande la couleur du pelage ou la taille des oreilles.

En utilisant cette méthode, nous avons effectivement montré que certaines souris sont plus anxieuses que d'autres. Comment évalue-t-on l'anxiété chez ces animaux ? On qualifie d'anxieux des animaux qui passent plus de temps que les autres dans la périphérie d'une enceinte qu'ils doivent explorer : ils « n'osent » pas s'aventurer en zone découverte, au centre de l'enceinte. De même, le comportement de toilettage (les animaux se lèchent) est généralement déclenché par un stress et, par conséquent, associé à l'anxiété. Par ailleurs, on constate que les médicaments anxiolytiques administrés aux souris « anxieuses » suppriment ces comportements : traitées par les benzodiazépines, par exemple, elles explorent plus facilement une enceinte et leur activité de toilettage diminue.

Ainsi, nous avons constaté que les souris qui portent deux exemplaires des gènes *b* ou *p* évitent davantage le centre des enceintes inconnues que les autres, et que celles qui ont deux copies du gène *se* ont une activité de toilettage plus fréquente. Nous en avons déduit qu'un ou plusieurs gènes situés sur les chromosomes 4, 7 et 9 favorisent les comportements « anxieux » chez la souris.

On sait que le récepteur du GABA, sur lequel agissent les benzodiazépines, intervient dans l'anxiété. Or les gènes *b* et *p* sont localisés à proximité de gènes codant diverses sous-unités de ce récepteur. De même, le gène *se* est proche du gène codant un des récepteurs de la sérotonine, un neuromédiateur dont l'activité est perturbée chez les sujets anxieux. Les gènes *b*, *p* et *se* perturbent-ils l'expression de certains gènes proches qui participent à l'anxiété ? Sont-ils eux-mêmes anxiogènes ? Ces questions restent ouvertes.

Il reste difficile de préciser la part de l'acquis et de l'inné dans l'anxiété, et des travaux complémentaires devront confirmer que ces résultats, obtenus dans des lignées particulières de souris, s'appliquent à d'autres rongeurs, voire à d'autres mammifères. Toutefois, il semble désormais acquis que plusieurs gènes participent au déclenchement des comportements anxieux.

Yan CLÉMENT et Georges CHAPOUTHIER
CNRS – Université Paris VI



POUR LA
SCIENCE

**VOUS INVITENT
À L'ENREGISTREMENT
PUBLIC
DE L'ÉMISSION :
L'IMPOSSIBLE**

**Les impossibles
de
l'agriculture**

**avec
GUY PAILLOTIN,
président de l'I.N.R.A.**

**LE SAMEDI 9 MARS 1996
À 15 HEURES
AU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
SALLE DE CINÉMA
AVENUE FRANKLIN D. ROOSEVELT
75008 PARIS**

L'évolution des galaxies anciennes

La coalescence de deux galaxies engendre une flambée d'étoiles jeunes.

Le ciel est tapissé de milliards de galaxies bleues. Ces galaxies, les plus anciennes qu'on puisse observer, nous éclairent sur les mécanismes d'évolution des galaxies. Très lointaines et très peu lumineuses, elles étaient mal connues ; les nouvelles observations de notre équipe franco-canadienne apportent les premiers éléments quantitatifs sur l'évolution de ces galaxies. L'étude a montré que l'évolution temporelle passive des populations stellaires dans les galaxies et leur coalescence expliquent le grand nombre de galaxies peu lumineuses.

Au début des années 1980, l'astronome américain John Tyson et ses collègues poussent le télescope de Cerro

Tololo, au Chili, à ses limites. Grâce aux nouveaux détecteurs à transfert de charge et à des temps de pose avoisinant une nuit entière, les images explorent une profondeur inégalée ; une nouvelle population de galaxies d'éclat très faibles apparaît. Ces galaxies ont deux propriétés spécifiques : elles sont très bleues, et leur nombre, observé en projection sur le ciel, est extrêmement élevé. On en compte plus d'un demi-million par degré carré (une surface équivalente à cinq fois celle de la pleine lune), soit 5 à 15 fois plus que ce qui était extrapolé à partir de la densité locale des galaxies.

Quelles peuvent être les raisons de ces fortes densités ? Elles sont expliquées par l'histoire des galaxies, lesquelles changent de couleur lorsqu'elles vieillissent. Une galaxie, amas d'étoiles, a ainsi une couleur qui évolue dans le temps : elle est bleue et lumineuse lorsque l'essentiel des étoiles en son sein est jeune de quelques millions d'années, rouge et moins brillante lorsque la majorité des étoiles a évolué depuis plusieurs milliards d'années sans nouvelle formation stellaire importante. La coalescence entre deux galaxies (résultant de leur collision) est un événement majeur dans la vie d'une galaxie, qui modifie sa



Sur cette photographie, prise par le télescope spatial Hubble, on voit les galaxies les plus lointaines observables et donc les plus anciennes. Elles sont plus nombreuses que ce que l'on pensait : dans ce champ (celui du chas d'une aiguille tenue à bout de bras), on en distingue 1 500 à divers stades de leur évolution. Une période de formation stellaire intense et de coalescence entre galaxies accroît leur luminosité et augmente le nombre de galaxies visibles.

morphologie et entraîne une flambée d'étoiles.

Ces deux phénomènes expliqueraient la forte densité de galaxies bleues. Une formation d'étoiles plus élevée par le passé fait que les galaxies sont alors plus bleues et plus lumineuses, ce qui permet d'observer un plus grand nombre de galaxies de faibles masses. Si la coalescence est importante durant la vie d'une galaxie, les observations profondes doivent révéler un nombre de galaxies beaucoup plus important que ce qu'une simple extrapolation à partir de la densité locale le laissait supposer.

ÉLOIGNEMENT ET ÂGE DES GALAXIES

Pour dater les galaxies, ce qui est indispensable pour connaître leur évolution, on mesure leur distance, les deux données étant reliées par l'expansion de l'Univers : en observant les galaxies lointaines, on observe le passé. La mesure du décalage vers le rouge d'une galaxie (et donc de sa distance) nécessite dix fois plus de temps que l'enregistrement d'une image ; cette mesure est trop longue pour être systématiquement appliquée.

Fin 1992, notre groupe franco-canadien commence un sondage spectroscopique avec le télescope de 3,6 mètres de diamètre Canada-France-Hawaii. Grâce à la nouvelle technique multi-spectrale (qui consiste à enregistrer l'émission lumineuse d'une centaine de galaxies en une pose), notre équipe a mesuré l'éloignement de 600 galaxies lointaines en un temps record. Les galaxies les plus lointaines sont vieilles de six à sept milliards d'années. L'étude de cette population ancienne permet de retracer l'histoire des galaxies.

La luminosité des galaxies les plus bleues diminue d'un facteur trois en six milliards d'années. En revanche, pour les galaxies plus rouges, on observe peu de changements de luminosité sur une période analogue, ce qui dénote que leur âge est supérieur à la moitié de l'âge de l'Univers. Des observations conjointes, réalisées à l'aide du télescope spatial Hubble, montrent que les galaxies bleues les plus anciennes ont des formes plus torturées, indicatrices d'importantes interactions et de flambées localisées d'étoiles. La coalescence de petites galaxies avec des galaxies beaucoup plus massives a été très fréquente par le passé. Les traces de phénomènes plus violents, comme la rencontre de deux galaxies, chacune de masse comparable à celle de notre Voie lactée, sont, elles aussi, souvent observées.

Olivier LE FÈVRE
DAEC, Observatoire de Paris-Meudon

Photos révélatrices

Les bébés ressemblent à leur père.

Comme il ressemble à son père ! Quand les parents ou amis prononcent cette phrase rituelle, ils savent qui est le père. Qu'en serait-il s'ils l'ignoraient ? La ressemblance est-elle patente ? Des psychologues de l'Université de San Diego l'ont évaluée en montrant à des volontaires des photographies fournies par 22 familles. Les enfants avaient été photographiés quand ils avaient 1, 10 et 20 ans et leurs parents, quand l'enfant avait un et 20 ans. Les 122 volontaires devaient apparier les photographies de l'enfant avec une mère ou un père choisi parmi trois photographies de femmes ou d'hommes (et où figurait effectivement la mère ou le père).

Les enfants de 10 et 20 ans ne ressemblaient pas davantage à leurs parents qu'à des personnes prises au hasard. Les enfants de un an ne ressemblent pas à leur mère. En revanche, les appariements de photographies d'enfants de un an et de leur père sont corrects une fois sur deux (un appariement aléatoire ne serait juste qu'une fois sur trois, puisqu'il fallait choisir entre trois photos).

Pourquoi les enfants de un an (fille ou garçon) ressemblent-ils à leur père, plus qu'à leur mère ? Selon les psychologues responsables de l'étude, cette ressemblance spécifique aurait un avantage adaptatif pour le bébé : si la mère est sûre que l'enfant est d'elle, le père ne l'est pas. La ressemblance renforcerait l'instinct du père, rassuré sur sa paternité : reconnaissant l'enfant, il s'occuperait davantage de lui. Reste une question : quel est le handicap pour les enfants dont le père n'est pas celui que l'on pense, et qui représenteraient environ 10 pour cent des nouveau-nés ?



INSTITUT DE CALCUL MATHÉMATIQUE



L'Institut de Calcul Mathématique annonce le premier numéro de la "Lettre de l'ICM", qui paraîtra tous les trois mois et sera consacrée à des informations et à des débats à propos de la recherche mathématique et de ses applications. Sont concernés : les étudiants, à partir de la maîtrise, et les chercheurs.

Au sommaire du premier numéro, daté 1er janvier 1996 :

- Éditorial, par Bernard Beauzamy
- Les problèmes du mathématicien dans une Université non scientifique, par Jacqueline Fleckinger
- Les mathématiques vont-elles survivre ? Commentaires sur un article de V.I. Arnold
- Les processus mentaux de la création, par Gustave Choquet
- Nouvelles diverses
- Page culturelle

Au sommaire du deuxième numéro (parution au 1er avril) : Un dossier sur l'emploi en mathématiques

Abonnement annuel :
100 francs pour quatre numéros



Institut de Calcul Mathématique
37, rue Tournefort
75005 PARIS
Tél : 47-07-52-92
Fax : 48-07-83-97

Reconstitutions

En combinant tomographie, dessin assisté par ordinateur et stéréolithographie, on reconstitue des fossiles anciens sans les manipuler.

Nos connaissances sur l'évolution de l'homme reposent essentiellement sur des comparaisons de squelettes fossiles rares et incomplets. Leur reconstitution est un puzzle dont un grand nombre de pièces font défaut. De plus, la plupart des ossements sont si friables qu'on risque de les endommager lorsqu'on les dégage de leur gangue de roche, qu'on procède à des moulages d'empreintes ou qu'on les manipule lors d'une reconstitution.

Aussi nous avons mis au point une collaboration entre l'Institut d'Anthropologie et l'Institut d'Informatique de l'Université de Zurich pour développer et valider des méthodes assistées par ordinateur. Ces méthodes permettent d'extraire du peu de matériel fossile disponible un maximum d'informations sans recourir à la manipulation physique des échantillons. Elles reposent sur la combinaison de trois techniques : la tomographie assistée par ordinateur, l'imagerie sur ordinateur et la stéréolithographie.

La tomographie assistée par ordinateur, utilisée en médecine, est parfaitement adaptée au relevé des structures osseuses. Les ossements sont éclairés par un faisceau de rayons X qui les traverse par tranches successives. Les données accumulées sont traitées par ordinateur pour engendrer l'image complète.

Toutefois les images tomographiques telles qu'elles apparaissent sur l'écran ne sont pas très parlantes, et leur exploitation scientifique requiert le traitement de quantités énormes de données. Un

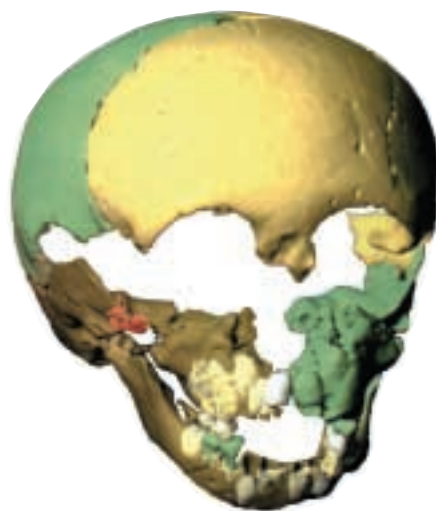
modèle solide est plus expressif, donc plus utile. La stéréolithographie permet de les reconstituer. Cette méthode, couramment utilisée par les ingénieurs pour créer des prototypes réels à partir d'éléments conçus par ordinateur, consiste à polymériser et durcir couche par couche une résine liquide par un rayonnement laser à ultraviolets. Cette technique n'est qu'une variante de haute technologie de la construction de maquettes de paysages à partir de couches de carton.

Nous avons aussi développé des logiciels réalisant, à partir des données tomographiques, des modèles tridimensionnels précis de fragments de fossiles que l'on pouvait manipuler de manière interactive à l'écran, mesurer, modifier si nécessaire, puis figer dans les répliques stéréolithographiques.

L'ENFANT DE NÉANDERTAL

Nous avons débuté nos recherches anthropologiques sur les fragments de crâne d'un enfant de Néandertal décédé depuis quelque 40 000 ans. Ces ossements ont été trouvés à Gibraltar et portent le nom du lieu de leur découverte, *Devil's Tower* (La Tour du Diable). Ce fossile est d'autant plus intéressant que seuls cinq fragments sont bien conservés et il n'était pas certain qu'ils provenaient du même individu.

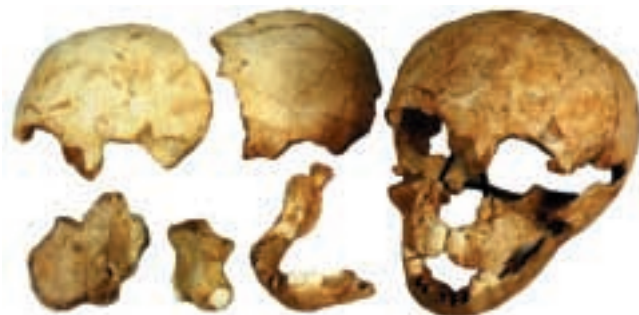
Avec la tomographie, nous avons reconstitué le crâne virtuel sur l'écran d'une station graphique (voir la figure 1). Au cours de ce processus, nous nous sommes efforcés de tirer le meilleur



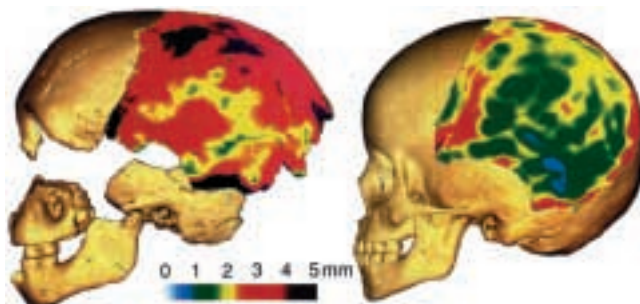
1. Reconstitution virtuelle du crâne de l'enfant de Néandertal découvert à Devil's Tower à l'aide de coupes tomographiques. Les fragments conservés (en jaune) ont été placés dans leur position correcte sur l'écran et les parties manquantes ont été complétées grâce à l'image-miroir des parties disponibles (en vert).

parti de l'ensemble des données tomographiques pour localiser les divers fragments dans leur position anatomique correcte. Les parties manquantes ont pu être reconstituées à partir de l'image-miroir de celles dont nous disposions, ce qui illustre les avantages du traitement des images : alors que dans le passé, les conservateurs passaient des semaines d'un travail manuel pénible et minutieux pour reconstituer une telle image-miroir tridimensionnelle, l'ordinateur les construit en quelques secondes.

La reconstitution du crâne débuta par la mâchoire inférieure : grâce à une opération de chirurgie virtuelle, nous avons pu compléter la branche gauche manquante du maxillaire et implanter des copies symétriques des molaires de lait gauches sur la partie droite. Nous avons alors placé la mâchoire supérieure gauche munie de ses dents ainsi que son image-miroir. Un point reste encore impossible



2. Répliques des fragments du crâne de l'enfant de Devil's Tower obtenues par stéréolithographie d'après les données de la tomographie (à gauche), et reconstitution par ordinateur du crâne (à droite).



3. Cartographie d'épaisseur des os de l'enfant de Devil's Tower (à gauche) et d'un enfant actuel de même âge (à droite). Les os du fossile néandertalien sont nettement plus épais.

à vérifier sur les ordinateurs actuels, aussi puissants soient-ils : le contact au niveau des dents. C'est pourquoi nous avons contrôlé l'ajustement de la dentition sur un modèle produit par stéréolithographie, tout comme le fait un dentiste sur un plâtre.

Nous avons visualisé les osselets de l'organe auditif. Ces derniers nous servirent de points de repère anatomiques précis et fiables pour placer correctement l'os temporal. Lors de l'étape suivante, nous avons ajusté l'os frontal avec l'os temporal gauche, et complété l'os temporal droit manquant. Puis nous avons placé la boîte crânienne ainsi reconstituée sur la base du crâne qui avait été reconstruite indépendamment. Les deux parties s'emboîtèrent au millimètre près, ce nous permit de conclure sans ambiguïté qu'elles provenaient d'un seul et même individu. Grâce à la technique stéréolithographique, nous avons matérialisé la reconstitution par ordinateur de notre crâne virtuel (*voir la figure 2*).

COMPARAISON MORPHOLOGIQUE

Nous avons utilisé cette méthode pour reconstituer deux autres crânes d'enfants de Néandertal qui avaient été découverts l'un en Belgique, l'autre en France. Dans ce cas, l'ordinateur nous fut d'un grand secours pour corriger les déformations des os par la roche environnante. Ce n'est qu'après cette étape que nous avons effectué les relevés anthropométriques permettant de comparer ces crânes à ceux d'enfants actuels.

On savait depuis longtemps que l'homme de Néandertal possédait des os plus épais que l'homme moderne. Mais comme l'épaisseur de l'os de la calotte crânienne est très variable, les mesures manuelles ne donnaient pas de résultats précis. Grâce à l'ordinateur, on a établi une cartographie de l'épaisseur de la couche osseuse permettant ainsi des comparaisons détaillées entre individus (*voir la figure 3*).

La morphologie crânienne de l'homme de Néandertal se différenciait nettement, dès l'âge de trois à cinq ans, de celle de l'homme moderne. Les reconstitutions montrent des détails morphologiques typiques de l'homme de Néandertal, tels que la mâchoire inférieure en saillie avec son menton arrondi, une partie frontale relativement courte et une forme générale de crâne plutôt oblongue. À notre avis, ces différences d'épaisseur des os et les autres détails anatomiques sont tellement marqués qu'ils imposeraient la classification de ces deux formes d'hominiens dans deux espèces différentes.

Christoph ZOLLIKOFER
et Marcia PONCE de LEON

Discrète séduction

Chez certains oiseaux tropicaux, les mâles parodent sous un éclairage qui donne à leurs couleurs un maximum de contraste.

Quelle facette de l'évolution Darwin n'a-t-il pas analysée? Citons-le : «D'autre part, j'admets volontiers qu'un grand nombre d'animaux mâles, tels que tous nos oiseaux les plus magnifiques, (...) ont acquis la beauté pour la beauté elle-même ; mais ce résultat a été obtenu par la sélection sexuelle, c'est-à-dire parce que les femelles ont continuellement choisi les plus beaux mâles». En liant le succès reproducteur des mâles à l'éclat de leurs couleurs lors de la parade amoureuse, Darwin expliquait l'évolution des plumages magnifiques de nombreuses espèces d'oiseaux tropicaux. Toutefois, si ces couleurs attirent les femelles sur les lieux de parade, ne risquent-elles pas d'attirer l'attention des prédateurs? Nous allons voir que, chez certains oiseaux, les couleurs et le comportement de parade ont évolué conjointement, conciliant séduction et camouflage.

La visibilité de l'oiseau pour ses congénères et ses prédateurs dépend de la composition de la lumière et de la façon dont son plumage réfléchit cette lumière (le «spectre de réflectance»). En se montrant dans des conditions de lumière spécifiques, le mâle tirerait le meilleur parti de son plumage lors de la parade et serait presque indécélable le reste du temps. Nous avons testé cette hypothèse chez trois espèces d'oiseaux qui vivent dans

la forêt tropicale en Guyane française : le coq-de-roche (orange, plumes jaunes, noires et blanches), le manakin à front blanc (noir tacheté de jaune, turquoise, blanc et orange) et le manakin à gorge blanche (noir à reflets bleu iridescent, taches blanches). Dans ces espèces, les mâles se regroupent sur des sites de parade pour séduire les femelles. Les mêmes sites sont utilisés pendant plusieurs générations. Les femelles, de coloration brune ou verdâtre, choisissent un mâle, s'accouplent sur des «arènes nuptiales», puis s'occupent seules de la construction du nid, de la couvaison et de l'élevage des jeunes.

Afin de comprendre comment ces oiseaux utilisent la lumière, nous avons noté les comportements de parade et leur fréquence dans différents environnements lumineux. Ces «qualités» de lumière sont déterminées par la couverture végétale, l'heure et l'état du ciel. Nous avons échantillonné la lumière à l'emplacement occupé par l'oiseau dans différentes conditions d'ensoleillement, puis nous avons comparé ces éclaircissements à ceux des abords du site de parade et de la forêt alentour. Enfin nous avons mesuré le spectre de réflectance de chaque élément coloré du plumage du mâle, ainsi que le spectre des éléments végétaux qui formaient l'arrière-plan.

La comparaison des spectres montre que les couleurs des mâles sont différentes de celles des fonds visuels, alors que celles des femelles et des jeunes sont proches de l'arrière-plan végétal. Alors que les femelles et les jeunes sont légèrement plus lumineux que l'arrière-plan, les mâles le sont beaucoup plus, à l'exception du mâle coq-de-roche. D'autre part, les taches de couleur des mâles sont soit très saturées, soit très lumineuses.

SE MONTRER PAR ÉCLIPSES

En outre, ces mesures révèlent que la visibilité des oiseaux varie beaucoup d'un environnement lumineux à l'autre. Par exemple, la parade des mâles coq-de-roche requiert un temps ensoleillé et la présence de petites taches de soleil sur leurs perchoirs. Cet éclairage n'existe qu'à certaines heures et résulte de l'architecture de la végétation au-dessus des arènes nuptiales. Les parades sont plus actives quand la tache de soleil n'illumine qu'une partie du corps orange du mâle : dans cette configuration, les flancs ornés de plumes jaunes sont éclairés alors que le reste du plumage demeure dans l'ombre. L'oiseau optimise ainsi les contrastes de luminosité et de couleur entre les éléments de son plumage ainsi que le contraste de chaque élément avec le fond.

Les mâles s'affrontent pour occuper cette position ; au cours de la journée, ils se déplacent le long de la branche pour rester au bord de la tache lumineuse ou coupent des feuilles pour que leur perchoir reste illuminé. L'accouplement a lieu au sol, dans l'ombre de l'arène : dans ces conditions spectrales, le mâle comme la femelle sont moins visibles et moins vulnérables. On observe des relations similaires entre couleur, lumière et parade nuptiale chez les deux autres oiseaux étudiés : aux heures et lieux de parade, la visibilité des femelles est minimale et celle des mâles est maximale à la distance où se tiennent les femelles. Les conditions lumineuses optimales varient d'une espèce à l'autre. Chez le manakin à front blanc, la parade se déroule dans l'ombre du sous-bois quand le soleil est masqué par les nuages : sa croupe turquoise se détache sur le reste du plumage.

En considérant les caractéristiques spectrales d'un milieu forestier, il est possible de prévoir les couleurs les plus utilisées dans cet environnement lumineux, et vice versa. De telles analyses «éclaircissent» les relations entre couleurs corporelles, comportements de parade, rythmes d'activité et microhabitat lumineux.

Marc THÉRY, Muséum d'histoire naturelle, CNRS URA1183
John ENDLER, Université de Californie



Lors de la parade, le mâle coq-de-roche se tient à la frontière d'une tache de lumière : le contraste est maximal entre les plumes jaunes éclairées et le reste du corps orange, dans l'ombre.