

à la construction des ponts restent désormais sous l'eau sans danger pendant plusieurs heures.

Dans les années 1870, parce qu'il est médecin et que la France est en guerre, Paul Bert s'intéresse aux anesthésiques et en particulier au protoxyde d'azote, le gaz dit hilarant. Comme l'oxygène, ce gaz est dangereux quand il est respiré longtemps à forte dose. Au Muséum, Flourens découvre les propriétés anesthésiques du chloroforme, mais son utilisation chirurgicale « à la compresse » n'est pas aisée. Après quelques expérimentations chez l'animal, Paul Bert met au point un gaz anesthésique comprenant du protoxyde d'azote et de l'oxygène ; ce gaz est l'« ancêtre » des gaz anesthésiques que l'on utilise encore aujourd'hui en chirurgie. En outre, sa curiosité l'amène à étudier différents aspects de la zoologie et de la botanique ; il montre, par exemple, que la chlorophylle capte préférentiellement certains rayonnements lumineux.

## Scientifique... mais aussi politique

Paul Bert a mené une autre carrière qui lui vaut d'avoir son nom sur de nombreux édifices publics. L'humiliation de la défaite de 1870 le conduit en effet vers la politique, ce qui ne l'empêche pas de poursuivre ses activités scientifiques. La République des savants entreprend diverses réformes de l'enseignement scientifique et médical, et tente de mettre en place des instituts de recherche capables de rivaliser avec ceux de l'Angleterre et de l'Allemagne.

Il mène, en tant que député de l'Yonne, une campagne très agressive contre l'enseignement dispensé par l'Église qui réfute les sciences. On lui doit les textes de lois sur la laïcité (lois Jules Ferry), ainsi que l'accession des jeunes filles à l'éducation supérieure (lois Camille Sée). Luttant pour que tous les Français aient un même niveau d'éducation, il crée le certificat d'études. Sous Gambetta, il est nommé ministre de l'Instruction publique et des cultes (novembre 1881 – janvier 1882). Avec Jules Ferry, il est le père fondateur de l'école gratuite, laïque et obligatoire. Ami du chimiste Marcelin Berthelot (1827-1907) et du microbiologiste Louis Pasteur (1822-1895) et enseignant lui-même, il rédige les premiers manuels scolaires destinés à l'enseignement scientifique. En 1886, il est nommé résident général dans deux colonies françaises, l'Annam et le Tonkin. Travailleur infatigable, il souhaite y instaurer une société nouvelle, fondée sur les acquis scientifiques de la fin de ce siècle. Mais il meurt de dysenterie à Hanoï le 11 novembre 1886, huit mois seulement après son arrivée. Ses funérailles nationales seront célébrées à Auxerre le 15 janvier 1887.

Le tribun, l'homme politique engagé, parfois détesté pour son arrogance et sa fougue, soulevant tant de passions politico-religieuses pour son combat anticlérical, a sans doute masqué l'homme de science. L'enthousiasme et la haine conjugués ont effacé la gloire de ce savant singulier. Pourtant, c'est pendant les heures les plus noires de notre pays, en 1942, que le commandant Jacques-Yves Cousteau (1910-1997) et les Américains exhumant l'œuvre



**6. Une des premières anesthésies** au masque avec un mélange gazeux composé de protoxyde d'azote et d'oxygène.

scientifique de Paul Bert ; pour construire des avions volant à haute altitude et des sous-marins performants, il faut faire face aux problèmes de la vie dans des conditions anormales de pression et de l'immersion. Aujourd'hui, l'effet Paul Bert (ou crise hyperoxique, l'oxygène en trop forte concentration étant mortel) est connu par tous les adeptes de la plongée sous-marine ; l'Agence spatiale américaine et la Société américaine de physiologie et de médecine hyperbares décernent chaque année un prix Paul Bert pour des recherches en physiologie dans l'espace. Enseignants, scientifiques, politiques, plongeurs, aviateurs, cosmonautes, tunneliers, médecins réanimateurs et anesthésistes, sportifs des airs et des mers, tous se réfèrent – en le sachant ou non – à Paul Bert.

**William ROSTÈNE** est directeur de recherche en neuroendocrinologie dans l'unité INSERM 732, à l'Hôpital Saint-Antoine à Paris.

J.C. LE PÉCHON, *Risques liés à la respiration des mélanges gazeux hyperoxiques*, in INRS Hygiène et sécurité du travail, pp. 89-94, 2004.

S. KOTOVTCHIKHINE, *Paul Bert et l'instruction publique*, Éditions Universitaires de Dijon, 2002.

P.L. SERVETTAZ, *Paul Bert, un génie de caractère*, in Océans, vol. 156, pp. 98-99, 1986.

M. CHABEUF, *La vie ardente de Paul Bert*, Éditions Barre-Dayez, Paris, 1982.

J. COLIN, *Paul Bert*, in *Pour la Science*, n° 12, octobre 1978.

*Intervention de Paul Bert à la Chambre des députés*, le 4 décembre 1880, en qualité de rapporteur du projet de loi sur le principe de laïcité appliqué à l'enseignement primaire obligatoire : <http://www.assemblee-nationale.fr/histoire/7eb.asp>

## À l'heure de la cybertaxonomie

Pour répondre au défi de la gestion de la biodiversité, l'accès aux collections, aux bibliothèques et aux données doit être modernisé et généralisé.



La biodiversité traverse actuellement une crise sans précédent depuis 65 millions d'années. Que l'on se fonde sur le nombre d'espèces de vertébrés éteintes depuis le XVII<sup>e</sup> siècle ou sur la réduction de superficie des forêts tropicales, on estime le taux d'extinction entre 2 000 et 30 000 espèces par an. L'extinction de la moitié des espèces vivantes d'ici la fin du siècle est probable. Il est difficile de percevoir ce changement. Cataclysmique à l'échelle géologique, il est relativement lent à l'échelle d'une génération humaine. De plus, la majorité des organismes vivants sont très petits et nous avons tendance à les inclure dans des catégories – « microbes », « plancton », « insectes », etc. – qui ne rendent pas du tout compte de leur diversité.

Plus grave, nous ne mesurons que depuis moins de 20 ans l'étendue de notre ignorance : c'est seulement en 1984 qu'une projection simple, mais que nul n'avait faite auparavant, a montré que nous sous-estimons le nombre d'espèces vivantes d'au moins un ordre de grandeur. Suivant les estimations les plus récentes et les plus fiables, ce nombre se situe entre 6 et 60 millions, alors que moins de deux millions d'espèces sont connues et décrites.

Face à ces chiffres, on peut s'interroger. Cette ignorance est-elle si grave ? Est-il vraiment nécessaire d'en savoir plus sur la diversité des espèces ? À la première question, on ne sait pas vraiment répondre : on ignore aujourd'hui combien d'espèces, et lesquelles, sont nécessaires pour que l'humanité continue à se nourrir, à se reproduire et même à respirer – puisque la composition de notre atmosphère est déterminée par l'ensemble de la biosphère. Cependant, le simple fait que nous ignorions le nombre d'espèces nécessaires à notre survie devrait nous inciter à porter plus d'attention à la biodiversité.

Certes, afin de préserver autant que possible la biodiversité, des actions concrètes et immédiates (protection de certains sites ou de certaines espèces par exemple) sont nécessaires. Mais lesquelles ? Une bonne connaissance de la biodiversité est indispensable pour faire des choix pertinents.

Autrement dit, afin de gérer les écosystèmes dans une perspective de développement durable, nous devons chercher à en savoir le plus possible sur les espèces – leur nombre, leurs propriétés biologiques, leur classification qui permet de prédire ces propriétés. Tel est le rôle dévolu à la taxonomie depuis le XVIII<sup>e</sup> siècle. Or cette science n'est aujourd'hui pas en état de répondre au défi posé.

Dans le monde entier, les taxonomistes décrivent et nomment moins de 20 000 espèces en tout chaque année. Si l'on table sur un nombre total d'espèces vivantes de l'ordre de 20 millions (une estimation moyenne), il faudrait alors un millénaire pour tout décrire. Cela ne servirait pas à grand-chose dans l'urgence de la situation actuelle, et de toute façon la plupart des espèces auront disparu sans laisser de trace avant même d'être récoltées.

Une première réaction face à ce problème est de réclamer plus de moyens. Incontestablement, le désintérêt de la communauté scientifique a mis la taxonomie dans une misère dont il faut d'abord la sortir. Mais cela ne suffit pas. Il ne faut pas seulement faire plus, il faut aussi faire mieux : améliorer les méthodes, les techniques et les infrastructures de la taxonomie. Le filet à papillons n'est pas le seul outil des naturalistes. La taxonomie a en particulier besoin des collections des grands muséums d'histoire naturelle et jardins botaniques.

Les collections de spécimens et les bibliothèques qui les accompagnent ont été constituées depuis deux siècles, à un coût cumulé qui dépasse probablement celui de la conquête spatiale. Indispensables, elles stockent et rassemblent pour les chercheurs non seulement les échantillons dont ils ont besoin, mais aussi les connaissances de leurs prédécesseurs.

Or seuls ceux en mesure de visiter physiquement les collections et bibliothèques ont pleinement accès à ces connaissances. C'est un premier goulot d'étranglement. Supprimons-le par deux moyens : d'abord en soutenant les visites de chercheurs d'autres institutions, à l'instar de ce que fait la Commission européenne avec le programme *Synthesys* d'accès aux très grandes infrastructures de recherche ; mais aussi et surtout, pour l'avenir, par l'informatisation et la

mise à disposition sur le Web des catalogues, des images des spécimens et des textes, en développant le système dont le portail de données du GBIF (*Global Biodiversity Information Facility*, <http://www.gbif.org>) est le prototype. Seulement ainsi les scientifiques des pays en développement, où se situe la plus grande partie de la biodiversité, mais dont les experts et la connaissance se trouvent en Europe et en Amérique du Nord, pourront-ils disposer des données indispensables à leur développement durable.

L'accès à la science existante serait une bonne chose, mais il s'agit également de produire de nouvelles connaissances. Pour ce faire, il serait vain de vouloir multiplier par 1 000 le nombre de chercheurs taxonomistes, qu'en tout état de cause nous ne saurions pas former dans un délai utile. En revanche, les technologies de l'information et les techniques liées à l'ADN permettraient d'accélérer la création et l'acquisition de nouvelles connaissances.

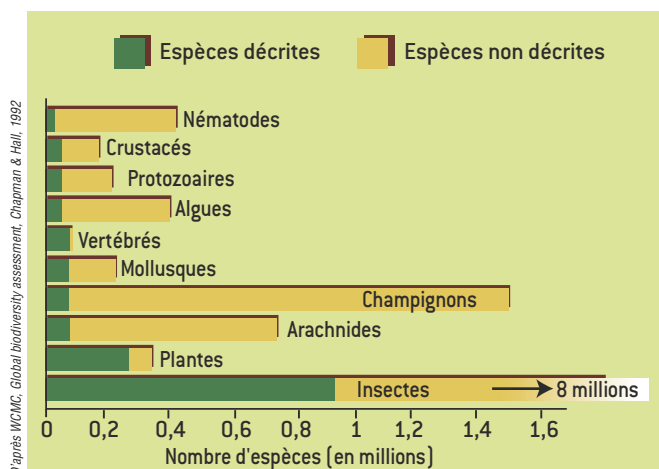
Ainsi, le programme *Barcode of Life* (le code-barres de la vie) ouvre une nouvelle perspective. En associant à chaque description, à chaque spécimen de référence conservé dans les collections, une courte séquence d'ADN placée dans un système d'information en ligne, nous pourrions à la fois accélérer le traitement des inventaires de faune et de flore, et permettre aux non-spécialistes d'accéder directement, par le Web, à l'identification des organismes vivants et, par là-même, à l'ensemble des connaissances disponibles.

## Accéder aux connaissances, moderniser les méthodes

Outre la mise en œuvre de tels outils, le Web doit également permettre un accroissement qualitatif et quantitatif des connaissances grâce à une plate-forme informatique, dite de cyber-taxonomie, qui permettra aux chercheurs de s'associer et de collaborer en temps réel pour décrire et réviser les espèces. On espère ainsi réduire notablement le temps qui sépare la récolte des spécimens sur le terrain de l'intégration des nouvelles connaissances au corpus de savoir disponible.

Les méthodes d'inventaires elles-mêmes peuvent et doivent être améliorées. Pour mieux connaître le patrimoine naturel et ainsi aider à le préserver et à le gérer, l'organisation collective du travail doit changer d'échelle. Il faut passer d'un système de récoltes individuelles et non standardisées à des opérations collectives massives, organisées selon des protocoles permettant à la fois d'évaluer la représentativité des échantillons récoltés et de comparer les inventaires, que ce soit dans l'espace ou dans le temps.

Ainsi, il s'agit aujourd'hui de changer la taxonomie collectivement et à grande échelle : développer les inventaires tous taxons, développer l'identification moléculaire, intégrer les données des inventaires, des collections et des bibliothèques dans un système d'information distribué, mettre au



**La connaissance de la biodiversité** est très insuffisante, comme le montrent ces estimations relatives aux groupes d'organismes les plus importants.

point la plate-forme informatique pour la cybertaxonomie. Sans oublier la formation des jeunes chercheurs qui assureront l'acquisition et la mise à disposition des connaissances.

Ces enjeux ne sont pas à l'échelle des chercheurs, mais à celle des grandes institutions mondiales qui se sont associées, avec le soutien de la Commission européenne, dans le Réseau d'excellence EDIT (*European Distributed Institute of Taxonomy*, institut européen distribué de taxonomie). Celui-ci réunit les plus grands muséums et jardins botaniques européens (18 institutions), nord-américains et russes. EDIT, qui vient d'être lancé et dont le budget est de 11,9 millions d'euros pour cinq ans, constitue le plus grand effort concerté jamais consenti pour la taxonomie.

Il est frappant de constater que l'initiative, qui trouve son origine dans la pression internationale (la Convention de Rio par exemple), vient de la Commission européenne. On attend toujours que la France, dont le Muséum national est l'une des trois plus importantes institutions taxonomiques de référence du monde, assume sa responsabilité vis-à-vis de la biodiversité, et que la politique de son gouvernement aille au-delà des bonnes intentions exprimées. En janvier 2005, à Paris, lors de la Conférence internationale sur la biodiversité qu'il avait lui-même suscitée, le président de la République déclarait notamment : « Parallèlement à l'action immédiate, nous devons donc approfondir la connaissance de la biodiversité [...] afin de permettre à la communauté internationale d'exercer ses responsabilités. » Reste à s'en donner les moyens.

**Simon TILLIER** est professeur au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, et directeur du Réseau d'excellence EDIT (*European Distributed Institute of Taxonomy*).



## Les limites de l'exploration de l'Univers

L'observation de l'Univers a notablement progressé, tant au sol que de l'espace. Le bestiaire des objets célestes ne cesse de s'étoffer. En revanche des limites techniques et théoriques subsistent. Seront-elles levées ? En partie seulement, selon l'astrophysicien Roland Lehoucq.

**Pour la Science : L'observation du ciel depuis la Terre révèle des objets de plus en plus éloignés grâce à des télescopes toujours plus puissants. Que peut-on observer de la Terre ?**

**Roland Lehoucq :** Même si l'observation depuis la Terre a ses limites, on peut facilement voir de nombreux objets célestes : la Lune, le Soleil, quelques planètes, les étoiles. Mais aussi d'autres objets qui ont été plus difficiles à découvrir parce qu'ils sont très peu lumineux. Les premières observations ont eu lieu à l'œil nu, puis vinrent les premiers instruments astronomiques – lunette ou télescope – permettant de récupérer davantage de lumière. On a fabriqué des télescopes et des lunettes toujours plus puissants non pas tant pour grossir les objets observés, mais surtout pour collecter toujours plus de lumière, ce qui a autorisé l'observation d'objets peu lumineux. Un télescope qui a un diamètre 100 fois supérieur à celui de notre pupille collecte 10 000 fois plus de lumière, et les grands télescopes modernes captent beaucoup plus de lumière que les anciens. La première limite franchie par de tels instruments a été celle de la luminosité. Petit à petit, on a observé des objets qui étaient trop faibles pour être vus à l'œil nu. L'accroissement de la taille des instruments a aussi amélioré la résolution des images observées, c'est-à-dire la capacité à distinguer deux détails proches.

**Pour la Science : Même si les progrès ont été remarquables, les observations réalisées depuis la Terre ne dépendent-elles pas trop des conditions météorologiques ?**

**Roland Lehoucq :** Si, bien sûr. Les perturbations de l'atmosphère, les nuages, les mouvements de convection perturbent les observations et, qui plus est, les astronomes ne peuvent rien faire durant la journée, ni les nuits où la Lune

est trop brillante ! Une façon d'éviter les nuages, c'est de faire les observations le plus haut possible, par exemple au sommet des montagnes. De plus, quand l'observateur est en altitude, l'épaisseur de l'atmosphère qui le surplombe diminue. L'atmosphère est une sorte de filtre qui s'interpose entre la source de lumière – les astres – et les détecteurs – les yeux ou les télescopes. Or l'atmosphère est parcourue de vents, de turbulences, de poussières diffusant la lumière, déformant les images et entravant l'observation. Qui plus est, une observation au sommet d'une montagne permet de s'affranchir de la pollution lumineuse intense due aux grandes villes. Enfin, en montagne, en altitude, l'air est froid et sec, la vapeur d'eau y est rare ; or c'est un gaz qui absorbe considérablement certains rayonnements, notamment dans le domaine infrarouge.

**Pour la Science : Une technique récente, l'optique adaptative, ne permet-elle pas de s'affranchir des fluctuations de l'atmosphère ?**

**Roland Lehoucq :** Les performances des télescopes se sont améliorées à mesure que l'on a su fabriquer des miroirs de grande taille. On a ainsi obtenu des miroirs d'un seul bloc de cinq à six mètres de diamètre et de 60 centimètres d'épaisseur. Ils pesaient des tonnes et étaient évidemment très difficiles à fabriquer. Avec l'optique active, il est possible d'élaborer des miroirs de grande taille, minces et donc légers. Le miroir doit alors être soutenu par un jeu de vérins pilotés, dotés de capteurs et qu'un ordinateur réactualise toutes les 30 secondes : ces capteurs peuvent détecter des différences de pression équivalant au poids d'une mouche déposée sur le miroir. Ce dispositif déforme le miroir en temps réel pour qu'il conserve sa forme parabolique. En même temps, ces vérins supportent le miroir,

qui ne risque plus de se rompre sous son propre poids. Mais, paradoxalement, on ne cherche pas à obtenir une forme parfaite ; au contraire, en jouant sur la souplesse du miroir, ces vérins permettent de compenser les déformations de l'image dues aux turbulences atmosphériques. Ce n'est plus de l'optique active, mais de l'optique adaptative, c'est-à-dire que les déformations doivent être appliquées en temps réel pour compenser l'effet des turbulences atmosphériques (le temps de réaction est de l'ordre du dixième de seconde, au plus de la seconde). L'électronique doit être suffisamment rapide pour analyser l'image et calculer les perturbations qu'elle a subies ; une petite partie de la lumière recueillie est déviée à cet effet, et permet de suivre comment évolue cette image. Le logiciel de contrôle évalue comment agir sur les vérins pour restaurer une image stable et de qualité. Grâce à cette technique, des miroirs de plus de six mètres ont été construits dès les années 1990.

Aujourd'hui, des miroirs de plusieurs dizaines de mètres de diamètre sont envisagés. Ces télescopes capteront beaucoup plus de lumière, de sorte que l'on détectera la lumière d'objets très faibles avec une résolution notablement améliorée. Le *Very Large Telescope* européen, VLT, installé au Chili, est constitué de quatre télescopes de 8,20 mètres de diamètre. La résolution des images obtenues par le VLT est meilleure que celle du télescope spatial *Hubble*, qui n'est certes pas soumis aux perturbations atmosphériques, mais dont le miroir mesure seulement 2,40 mètre de diamètre, de sorte que la résolution est plusieurs fois inférieure à celle d'un télescope terrestre. Le VLT est capable de distinguer un détail qui correspondrait à une pièce de un euro vue à 320 kilomètres !

#### **Pour la Science : Ces télescopes détectent-ils seulement la lumière visible ?**

**Roland Lehoucq :** Certains d'entre eux détectent, en plus de la lumière visible, une partie du rayonnement infrarouge qui parvient jusqu'au sol, l'essentiel de ce rayonnement étant piégé par l'atmosphère et le reste réémis vers l'espace. Une grande partie de la lumière infrarouge est absorbée par l'atmosphère terrestre. Mais les rayonnements ultraviolet, visible et infrarouge ne représentent qu'une toute petite partie du spectre électromagnétique. Imaginons que les sept octaves d'un piano représentent le spectre électromagnétique, de l'ultraviolet à l'infrarouge. La lumière visible ne représenterait qu'une seule de ces sept octaves. Cela donne une idée de la pauvreté de l'observation du ciel quand on se contente d'observer dans le visible. C'est pourquoi les astrophysiciens étudient tout le spectre, du rayonnement gamma jusqu'aux ondes radio. Quittant le domaine des ondes électromagnétiques, ils étudient aussi les particules de haute

énergie, détectées au début du XX<sup>e</sup> siècle par le physicien allemand Victor Hess. Ces particules sont essentiellement des protons de très haute énergie : quand ils arrivent sur la haute atmosphère, ils interagissent avec les molécules de l'air, et produisent des gerbes de particules secondaires. C'est pour cette raison que les pilotes d'avions qui voyagent à des altitudes élevées sur les vols transatlantiques portent, depuis quelques années, un badge qui enregistre la dose de rayonnement accumulée au fil des vols. On commence à détecter les particules cosmiques de très haute énergie à l'Observa-



L'observation de l'Univers se fait soit de la Terre, par exemple grâce au VLT, qui scrute le ciel en lumière visible (a), à l'Observatoire Auger qui traque les rayons cosmiques de très haute énergie (b), soit de l'espace avec *Integral*, qui détecte le rayonnement gamma (c) ou encore avec WMAP (d), qui enregistre les données du fond diffus cosmologique.

toire Auger en cours de construction en Argentine. L'Observatoire couvrira 3 000 kilomètres carrés de surface et des détecteurs régulièrement espacés scruteront sans cesse le ciel. On a déjà détecté des particules d'ultrahaute énergie, 100 milliards de fois plus énergétiques que les plus énergétiques observées jusque dans les années 1970-1980, qui créent des gerbes de particules très rapides. Ces particules secondaires sont détectées par des télescopes qui observent la fluorescence ultraviolette qu'elles induisent dans l'atmosphère, mais aussi par des cuves d'eau qui observent l'effet Cerenkov des pluies de particules (l'effet Cerenkov est une sorte d'onde de choc lumineuse, accompagnée d'un rayonnement bleu caractéristique, qui se produit quand une particule se déplace dans un milieu plus vite que la lumière dans ce milieu). D'après les caractéristiques des gerbes de particules, les physiciens sont capables d'évaluer l'énergie et la direction de la particule qui leur a donné naissance. L'Observatoire Auger est immense parce que la fréquence de ces particules de très haute énergie est de l'ordre de une par kilomètre carré et par siècle : elles sont extrêmement rares.

**Les limites techniques sont innombrables : la masse en orbite est nécessairement limitée, les détecteurs doivent être refroidis à l'hélium liquide, les matériaux résister à de fortes contraintes thermiques ou mécaniques...**

**Pour la Science : Après ces exemples des possibilités et des limites de l'observation depuis la Terre, abordons l'observation depuis l'espace : on évite ainsi toutes les contraintes évoquées dues à l'atmosphère. Quels sont les rayonnements étudiés grâce aux satellites ?**

**Roland Lehoucq :** Effectivement, dans l'espace, on s'affranchit des turbulences atmosphériques. Il n'est plus nécessaire de corriger leurs effets. Le télescope *Hubble* fonctionne depuis une quinzaine d'années. Il a produit une myriade de magnifiques images et de résultats scientifiques stupéfiants. Dans l'espace, il n'y a pas d'atmosphère qui diffuse la lumière du Soleil, de sorte qu'il fait nuit tout le temps et que l'observation des étoiles peut se faire en continu, à condition bien sûr d'observer à l'opposé du Soleil. *Hubble* fait ses observations quasiment 24 heures sur 24, 365 jours par an. Les difficultés sont essentiellement techniques : il faut mettre sur orbite des centaines de kilogrammes de matériel et, en cas de problème technique, il faut aller réparer sur place. L'espace présente des contraintes, mais la qualité d'observation est remarquable. On dispose de plusieurs télescopes dédiés à l'observation des différents rayonnements. *Hubble* observe dans l'infrarouge et en lumière visible. Bien qu'il ne soit pas obsolète, il va être mis hors service pour des raisons d'argent, semble-t-il. Aujourd'hui, il est devenu un instrument banal au regard

des instruments terrestres. Un autre télescope spatial dont le miroir devrait mesurer huit mètres de diamètre, c'est-à-dire captant beaucoup plus de lumière, est à l'étude. Mais on ne placera pas un tel miroir dans une fusée, et il faudra donc le « plier » sur Terre et le « déplier » dans l'espace ! Beaucoup des difficultés techniques semblent d'ores et déjà résolues, et il devrait y avoir sur orbite, d'ici quelques années, des télescopes de huit à dix mètres observant dans le visible et l'infrarouge. D'autres longueurs d'onde sont observées, notamment les rayons X et les rayons gamma. Pour les rayons X, il s'agit des télescopes XMM et *Chandra*, pour le rayonnement gamma c'est le satellite *Integral*, pour l'infrarouge, c'est *Spitzer*. Voici un autre exemple de contraintes : la caméra qui détecte les infrarouges émet elle-même des infrarouges. Pour ne pas confondre ces infrarouges avec ceux de la source, il faut refroidir la caméra... jusqu'à -269 °C ! Pour ce faire, il faut embarquer d'énormes quantités d'hélium liquide. Quand l'hélium est épuisé, le satellite cesse d'être fonctionnel.

SOHO est un observatoire spécifiquement dédié à l'étude du Soleil. Il observe la couronne et les oscillations solaires ; ces mouvements de la surface du Soleil, très faibles et lents, résultent des ondes de pression qui se propagent à l'intérieur du Soleil. Un autre satellite, WMAP, livre des informations sur le fond diffus cosmologique, un rayonnement capté dans la gamme des micro-ondes correspondant à la plus vieille lumière émise par l'Univers, au moment où il est passé de l'état de plasma à celui de matière neutre. SOHO et WMAP ont une particularité : ils ne sont pas en orbite proche autour de la Terre, mais sont situés à des points d'équi-attraction entre la Terre et le Soleil, les points de Lagrange. Pour observer le Soleil en permanence, SOHO est placé entre la Terre et le Soleil, à 1,5 million de kilomètres. WMAP est, quant à lui, situé à l'opposé de SOHO par rapport à la Terre afin d'explorer le fond diffus cosmologique sans être gêné par le Soleil.

**Pour la Science : À côté des limites techniques évoquées (l'hélium ou les masses limitées que l'on peut envoyer dans l'espace), une autre difficulté n'est-elle pas aussi celle du traitement des données ?**

**Roland Lehoucq :** Il y eut une difficulté liée aux mémoires embarquées dont la capacité de stockage était trop limitée. Après les temps héroïques des premiers satellites, les progrès en électronique ont permis de stocker l'information à bord. Il faut toutefois prendre des précautions car, à basse altitude, les particules de haute énergie du Soleil endommagent les mémoires, risquant de détruire des données précieuses. Une autre difficulté est liée aux différences de température auxquelles un satellite est soumis : du côté de la partie exposée au soleil, il peut régner une température de l'ordre de 100 à 120 °C, tandis que sur le côté à l'ombre, la température peut être négative. Les matériaux utilisés doivent supporter des gradients de température supérieurs à 100 degrés sur quelques mètres de longueur : les contraintes thermiques sont gigantesques. Soumises à de tels écarts de température, les soudures, par exemple, sont extrêmement fragiles, toute bulle d'air étant un site

de rupture possible. Enfin, évoquons la question de l'énergie. *Chandra*, par exemple, pèse cinq tonnes. C'est le plus gros satellite jamais envoyé par la navette spatiale. Pourtant, il ne consomme pas plus de puissance qu'une plaque électrique ! Les instruments embarqués doivent être conçus pour consommer peu et utiliser efficacement le peu d'énergie disponible. C'est une contrainte importante.

**Pour la Science : À ces limites techniques, ne doit-on pas ajouter les contraintes théoriques ? Comment évaluer la distance des objets célestes sans repère absolu ? Comment tenir compte de l'expansion de l'Univers ?**

**Roland Lehoucq :** Commençons par un problème très important, celui de l'évaluation de la distance. En astrophysique, tous les objets semblent disposés sur une sphère, la sphère céleste, et l'on n'a, *a priori*, aucune information sur leur distance. Quand on observe un point brillant, cela peut être une bougie toute proche ou une supernova extrêmement éloignée. Déterminer la distance permet de se faire une idée de la luminosité intrinsèque de l'objet observé, car une luminosité apparente faible n'est pas nécessairement synonyme d'éloignement. Les mesures effectuées par le satellite *Hipparcos* ont révolutionné la connaissance de notre univers proche. Ce satellite a directement mesuré la distance de près de 100 000 étoiles. Ces mesures ont révélé que 80 pour cent des distances d'étoiles que l'on avait évaluées auparavant présentaient des erreurs comprises entre 10 et 20 pour cent. Comme toutes les autres méthodes d'estimation des distances sont fondées sur la connaissance de celles des étoiles les plus proches, on comprend l'intérêt des mesures astrométriques d'*Hipparcos*, et de son successeur *Gaïa*, qui devrait observer 10 000 fois plus d'étoiles !

Parle-t-on d'éloignement spatial ou d'éloignement temporel ? En fait, les deux sont liés. Quand on reçoit un rayonnement lumineux, il a voyagé dans l'espace et conjointement dans le temps. De plus, comme l'Univers est en expansion, la lumière qui, au départ, était dans la gamme visible, arrive avec une longueur d'onde différente de celle qu'elle avait à l'émission : elle est décalée vers le rouge. Plus ce décalage (en anglais, *redshift*) est important, plus l'objet observé est éloigné. Ce paramètre nous permet d'ordonner les objets célestes dans le temps et dans l'espace. Pour en déduire une distance ou un temps de parcours de la lumière, il faut un modèle cosmologique décrivant l'évolution dynamique de l'Univers. Disposant d'un tel modèle et du décalage vers le rouge d'un objet particulier, on peut calculer séparément sa distance et le temps que sa lumière a mis pour nous parvenir. Selon le taux d'expansion de l'Univers, la lumière n'aura pas mis le même temps pour arriver et la distance de l'objet s'en trouvera modifiée : ainsi les distances calculées reposent sur le choix du modèle cosmologique, ce qui impose une limite théorique.

**Pour la Science : La mesure des distances des étoiles est donc une limite qu'on devrait franchir. Mais comment évalue-t-on les distances des objets situés aux confins de l'Univers ?**

**Roland Lehoucq :** Aujourd'hui, les objets les plus lointains observés ont un décalage vers le rouge voisin de dix. En fait, le décalage le plus lointain que l'on puisse observer, c'est celui du fond diffus cosmologique : il vaut 1 100. Nous l'avons évoqué, le fond diffus cosmologique est une lumière émise au moment où la matière de l'Univers est passée d'un état

*Si certaines contraintes techniques seront levées, certaines limites théoriques persisteront, notamment le fait que l'astrophysicien observe l'Univers de l'intérieur et d'une position particulière.*

de plasma à celui où les électrons et les noyaux se sont combinés pour former des atomes neutres. Dans un plasma, la lumière diffuse très facilement sur les électrons, qui sont séparés des noyaux. En revanche, dès que les électrons et les atomes ionisés se combinent, la lumière cesse quasiment d'interagir avec les électrons de la matière (à l'exception de quelques longueurs d'onde particulières). Le plasma, opaque à la lumière visible, devient matière neutre : elle est transparente. Toute la lumière émise au moment de la recombinaison (des électrons avec les atomes ionisés) a commencé à se propager dans toutes les directions de l'Univers, et nous parvient aujourd'hui après 13,7 milliards d'années d'expansion. À cause du décalage vers le rouge, on la reçoit sous forme d'un rayonnement micro-ondes, qui porte la trace de l'état de la matière au moment où l'Univers est devenu transparent. Le fond diffus cosmologique est une frontière absolue, au-delà de laquelle l'Univers est opaque. C'est une limite intrinsèque à l'observation de l'Univers dans le domaine des ondes électromagnétiques.

Ainsi, l'exploration de l'Univers est soumise à des contraintes techniques que l'on repousse progressivement. Elle est aussi soumise à des contraintes théoriques intrinsèques au modèle cosmologique, et l'on ne pourra jamais observer le rayonnement initial, au-delà du fond diffus cosmologique, du moins si l'on reste dans le domaine des ondes électromagnétiques. Une des solutions consistera sans doute à explorer l'Univers plus jeune avec des signaux différents des ondes électromagnétiques (mais cela ne sera guère facile). Enfin, contrairement au physicien qui observe de l'extérieur le système sur lequel il expérimente, l'astrophysicien observe de l'intérieur l'Univers qu'il étudie : situé au milieu d'une clairière, il ignore si les arbres qu'il observe ne représentent qu'un mince rideau d'arbres ou une épaisse forêt ! C'est une limite incontournable, inhérente à la position de l'homme dans l'Univers.

**Roland LEHOUCQ** est astrophysicien dans le Service d'astrophysique du Commissariat à l'énergie atomique, CEA, de Saclay.

Ce texte est un résumé d'une conférence que Roland Lehoucq a donnée au Palais de la Découverte. Le texte intégral de la conférence sera en ligne sur le site de France Culture (<http://www.radiofrance.fr/chaines/france-culture/sommaire/>) durant le mois d'août 2006.

## Les prémices de la pensée symbolique

Des coquillages percés, découverts sur des sites algériens et israéliens, font remonter la parure – et la pensée symbolique – à plus de 100 000 ans.



M. Vanhaeren et F. d'Errico, CNRS

En 2004, Francesco d'Errico et Marian Vanhaeren du CNRS et deux collègues sud-africains avaient analysé 41 petits coquillages de l'espèce *Nassarius kraussianus* découverts dans la grotte de Blombos, en Afrique du Sud. Ils avaient déduit de leur nature (non alimentaire), des trous (pratiqués par l'homme) et de l'usure due à leur port qu'il s'agissait de parures. Selon eux, ces ornements étaient destinés à modifier l'image de la personne qui les portait en symbolisant son sexe, son âge, son appartenance à un groupe ou encore son rôle au sein de ce groupe. Or les coquillages percés de Blombos datent de 75 000 ans. La pensée symbolique aurait donc au moins cet âge...

Toutefois, M. Vanhaeren et F. d'Errico ont considéré que les perles de Blombos ne suffisaient pas à établir sans contestation possible l'ancienneté de l'ornementation personnelle. Ils ont retrouvé d'autres coquillages percés dans les musées et en ont fait l'analyse avec des confrères anglais et israéliens. Ainsi, au musée de l'Homme à Paris, ils ont découvert une boîte contenant un coquillage percé du genre *Nassarius gibbosulus* entreposé avec d'autres collections au Laboratoire de Préhistoire par Jean Morel. Dans les années 1940, ce préhistorien fouilla dans l'Est de l'Algérie le site de l'oued Djebbana, situé à 200 kilomètres

Dans cette boîte (a), le préhistorien Jean Morel a soigneusement entreposé le coquillage percé qu'il a trouvé sur le site de l'oued Djebbana dans les années 1940. D'autres perles de ce type avaient déjà été mises au jour : ce sont des coquillages du genre *Nassarius* percés par l'homme, il y a quelque 75 000 ans (b).

à l'intérieur des terres, un site de la culture atérienne. Cette culture nord-africaine serait issue, pense-t-on, de la culture moustérienne (-300 000 à -30 000). En Europe, on associe généralement la culture moustérienne aux Néandertaliens, mais, du moins au Proche-Orient, elle l'est aussi avec l'homme moderne, *Homo sapiens sapiens*. Malheureusement, on ne dispose que d'une datation ancienne au carbone 14 du site de l'oued Djebbana, qui établit seulement que son âge est supérieur à 35 000 ans. De nouvelles datations suggèrent aujourd'hui que les âges de plusieurs sites atériens seraient compris entre 60 000 et 90 000 ans.

Les chercheurs ont aussi retrouvé d'anciens coquillages percés au Muséum d'histoire naturelle de Londres, dont deux exemplaires appartiennent à l'espèce du coquillage algérien. Ils proviennent du site moustérien de Skhul, fouillé dans les années 1930 en Palestine par des préhistoriens anglais. L'analyse des concrétions attachées à l'un des deux spécimens révèle que ces coquillages proviennent de la couche qui a livré plusieurs sépultures d'humains modernes. Or les datations récentes des restes trouvés à Skhul indiquent un âge compris entre 100 000 et 135 000 ans !

Ainsi, deux nouveaux indices, dont l'un est incontestable, attestent que l'ornementation personnelle remonte à 100 000 ans au moins. En outre, ils suggèrent qu'elle est venue d'Afrique avec les hommes modernes. Une version différente de la vision classique qui faisait remonter l'apparition de la pensée symbolique à l'arrivée d'*Homo sapiens sapiens* en Europe, il y a 40 000 ans.

François Savatier

Science, vol. 312, pp. 1785-1788, 23 juin 2006