



HAL
open science

La figure de la Terre

André Capron, Jules Hoffmann, Jean-Paul Poirier, Anny Cazenave, Georges Balmino, Claude J. Allègre, Paul Caro, Yves Meyer, Eric Westhof

► **To cite this version:**

André Capron, Jules Hoffmann, Jean-Paul Poirier, Anny Cazenave, Georges Balmino, et al.. La figure de la Terre. La lettre de l'Académie des Sciences, 16, 2005. hal-04863145

HAL Id: hal-04863145

<https://academie-sciences.hal.science/hal-04863145v1>

Submitted on 3 Jan 2025

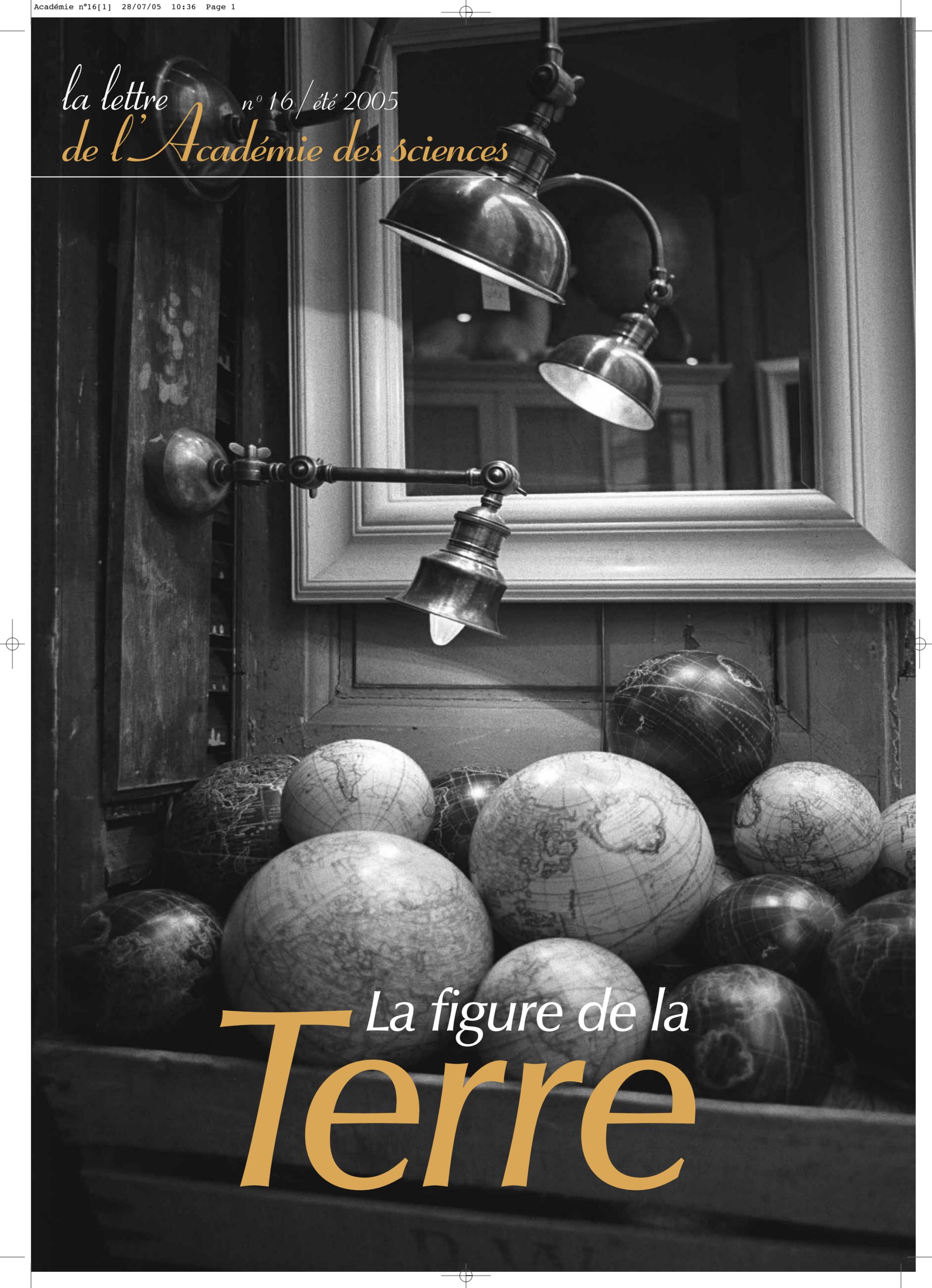
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

la lettre n° 16 / été 2005
de l'Académie des sciences



La figure de la
Terre

Sommaire

Éditorial

L'Europe de la Science
André Capron et Jules Hoffmann
page 2

Dossier

Histoire de la connaissance
de la Figure de la Terre
Jean-Paul Poirier
page 3

La forme de la surface marine
Anny Cazenave
page 6

Le géoïde : regard profond
sur l'image de la Terre
Georges Balmino
page 8

Les nouveaux outils du géologue
Entretien avec Claude Allègre par Paul Caro
page 10

Question d'actualité

Perception et compression
des images fixes
Yves Meyer
page 12

La vie des séances

Découvertes récentes
sur les nouvelles fonctions
régulatrices de l'ARN
Éric Westhof
page 19

La vie de l'académie

Propriété scientifique
et recherche : des pistes
pour l'avenir
page 20

Le Bower Award
& Prize for Achievement
in Science
page 20

Jean-François Bach, Secrétaire
perpétuel de l'Académie
des sciences
page 20

Éditorial

Science et innovation sont étroitement liées à l'histoire des pays européens et à leur rayonnement international. Des plantes médicinales de Garcia Orta à la microbiologie de Louis Pasteur, de la lunette de Galilée aux ondes électromagnétiques de Maxwell, de la photosynthèse de Priestley à la radioactivité de Pierre et Marie Curie, de multiples inventions pour n'en citer que quelques unes, ont marqué et continuent de marquer les progrès des connaissances, conférant depuis des siècles à l'Europe une double identité : celle du savoir et celle des découvertes.

Dans le contexte de l'ère post-industrielle, la recherche assure la compétitivité économique par ses applications, et contribue au progrès social et à l'amélioration de la qualité de vie dans les sociétés humaines. Terrain naturel de dialogues, d'échanges et de coopération,

Les Académies des sciences, par la diversité de leur expertise, leur prestige et leur indépendance, constituent des relais naturels de l'animation scientifique européenne et de la diffusion du savoir. A ce titre, le développement d'objectifs communs à plusieurs Académies, voire la création de réseaux interacadémiques, peuvent constituer au-delà d'autres mécanismes institutionnels un ciment fort d'échanges et de coopération scientifique européenne.

L'organisation récente, par l'Académie des sciences de l'Institut de France, d'une réunion conjointe avec les Académies des dix pays nouveaux membres de l'Union Européenne a permis de mesurer l'importance d'une volonté d'actions communes dans de nombreux domaines. Ont été mis en avant par les participants à cette réunion : l'innovation scientifique favorisée par les échanges équilibrés de chercheurs post-doctoraux et l'incitation à la réalisation de thèses en co-tutelles et la participation active

objectif de porter d'ici 2010, l'effort européen de recherche à 3 % du PIB de l'Union (2/3 viennent d'investissements privés, 1/3 du secteur public). Rappelons que l'actuel effort des recherches avec 2 % du PIB de l'Union se situe aujourd'hui derrière ceux des Etats-Unis (2.8 %) et du Japon (plus de 3 %). Six grands objectifs pour la politique de soutien à la Recherche de l'Union ont été définis en juin 2004 : (1) créer des pôles d'excellence européens par la collaboration entre laboratoires ; (2) lancer des initiatives technologiques européennes ; (3) stimuler la créativité de la recherche fondamentale par la compétition entre équipes au niveau européen ; (4) rendre l'Europe plus attractive pour les meilleurs chercheurs ; (5) développer des infrastructures de recherches d'intérêt européen ; (6) renforcer la coordination des programmes nationaux de recherche.

L'Europe de la Science

la Science a aussi contribué à l'intégration européenne dont elle constitue l'un des socles essentiels. De grands programmes scientifiques européens, comme le CERN et EMBO, et des programmes d'application comme Airbus et Ariane n'en constituent que quelques exemples parmi les plus notables. Les programmes Euréka et Marie Curie, par le flux d'échanges qu'ils ont permis à plusieurs dizaines de milliers de chercheurs et d'étudiants, ont contribué de manière significative à l'unité européenne, et, par les dialogues des cultures, ont déjà marqué toute une génération.



par André Capron ¹ et Jules Hoffmann ²

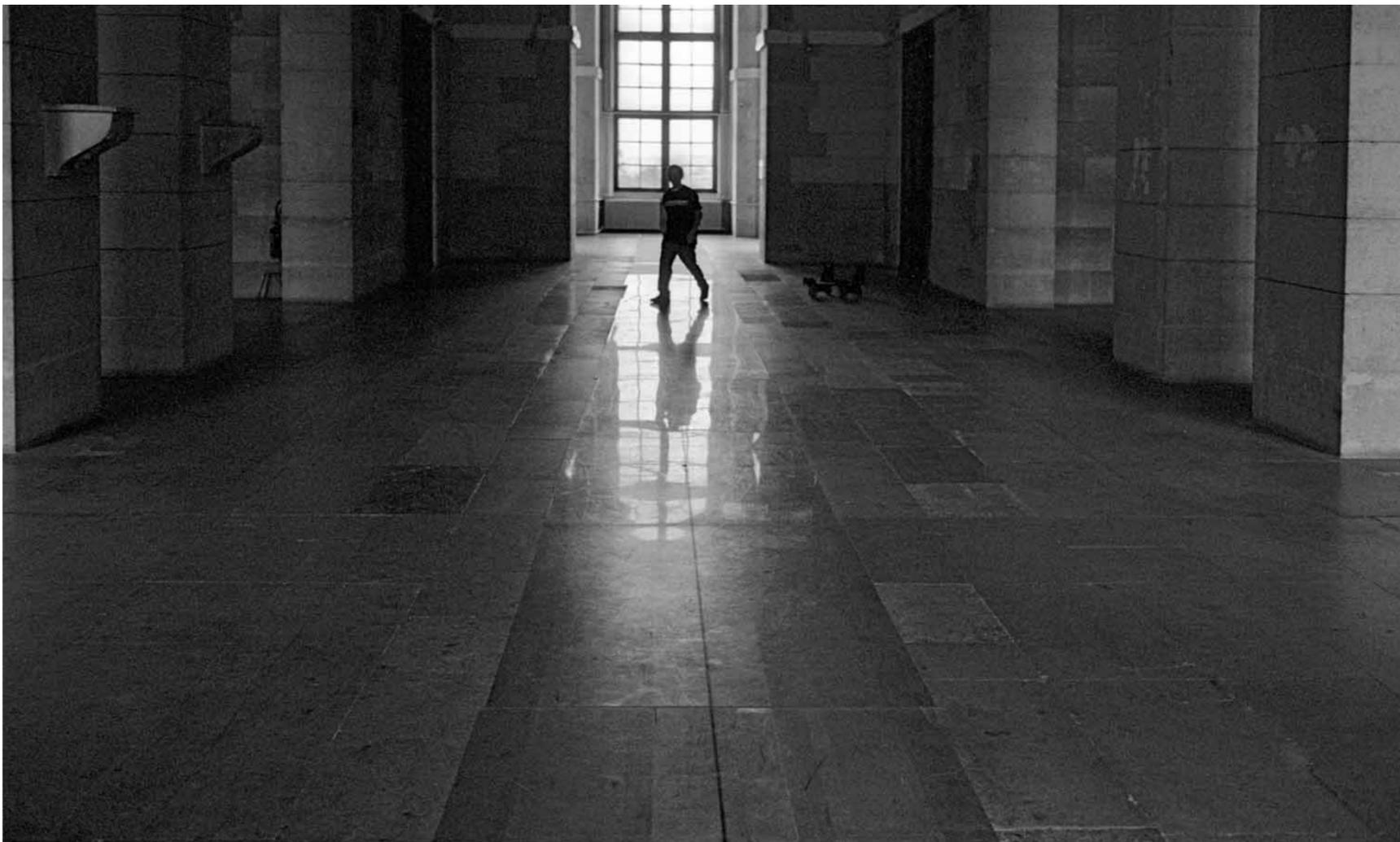
¹ Membre de l'Académie des sciences, directeur honoraire de l'Institut Pasteur de Lille.

² Vice-Président de l'Académie des sciences, directeur de recherche au CNRS, Institut de biologie moléculaire et cellulaire, Strasbourg

des Académies à la diffusion du savoir, et la mise en place de dispositifs européens de formation scientifique de haut niveau.

Les progrès de la Science suscitent à la fois fascination, espoirs et inquiétudes. Les rapports entre la Science et la Société sont au cœur des enjeux européens pour les prochaines années. Par les missions nationales qu'elles exercent dans la défense permanente de l'éthique et la diffusion maîtrisée et pertinente des connaissances, les Académies sont amenées à jouer un rôle croissant et essentiel dans l'interface indispensable entre le monde scientifique et les sociétés. Elles doivent, dans ce contexte, contribuer par les dimensions sociales, morales et politiques qui sont les leurs, au développement harmonieux de la Science européenne et à son appropriation par l'ensemble des pays de l'Union au service de leurs populations. En Mars 2000, le Conseil Européen de Lisbonne a présenté une stratégie s'étalant sur 10 ans et visant à faire de l'Union Européenne, l'économie la plus compétitive et la plus dynamique du monde et a lancé le projet d'Espace Européen de la Recherche établissant ainsi un cadre de référence pour la recherche en Europe. Deux ans plus tard, le Conseil Européen de Barcelone s'est fixé pour

Un débat important a lieu aujourd'hui en Europe au sujet de la recherche fondamentale, de ses enjeux et de la meilleure manière de les affronter au niveau européen. La création, dans ce contexte, d'un Conseil Européen de la Recherche destiné à promouvoir, grâce à des budgets spécifiques, la recherche fondamentale d'excellence est en cours de réalisation et fera de cette structure une pierre angulaire de l'Espace Européen de Recherche. A nos yeux, l'espace Européen de la Recherche doit reposer sur une double dynamique : celle de la volonté politique et de l'ambition permanente de l'excellence, et celle de l'émergence de toutes les potentialités et de tous les talents, particulièrement dans les nouveaux pays membres de l'Union Européenne ■



Le méridien de Paris, Observatoire de Paris

Histoire de la connaissance de la Figure de la Terre



par **Jean-Paul Poirier**¹

Des auteurs postérieurs rapportent que quelques pré-socratiques (1) tels qu'Anaximène de Milet ou Anaxagore de Clazomènes, ont pensé que la Terre était plate, mais il est clair que ce n'était pas l'opinion des plus grands philosophes anciens.

En effet, Aristote (384-322 av. J.-C.) enseignait la sphéricité de la Terre. L'élément terre, le plus lourd, tendait vers son "lieu naturel", au centre du monde et prenait la forme d'une sphère. Son hypothèse était confirmée par la circularité de l'ombre de la Terre sur la Lune, lors des éclipses de notre satellite, et par le fait

¹ Membre de l'Académie des sciences, physicien émérite à l'institut du globe de Paris

que la configuration du ciel étoilé changeait avec la latitude. Plus tard, Aristarque de Samos (environ 310-230 av. J.-C.) croyait que la Terre était sphérique et tournait autour du Soleil.

Enfin, Eratosthène (275-195 av. J.-C.) détermina la circonférence de la Terre en mesurant un arc de méridien entre Alexandrie et Syène (Assouan). D'après Strabon, il mesura la différence angulaire entre la direction du Soleil (environ 7°) vue des deux endroits, le jour du solstice d'été. La distance était mesurée par des bématistes, marcheurs qui comptaient leurs pas étalonnés. Eratosthène trouva, pour la circonférence de la Terre une valeur de 252 000 stades, probablement voisine de la valeur réelle. Il existait de nombreuses définitions du stade dans l'Antiquité, mais le stade de 700 au degré (correspondant à 159 m) était le plus couramment utilisé².

La majorité des Pères de l'Église se sont ralliés, sans difficulté, à la sphéricité de la Terre, qui n'a pas été l'objet de controverses comme celles qu'a soulevées la théorie de l'héliocentrisme. Au Moyen-Âge, Isidore de Séville et Bède le Vénérable, entre autres, croyaient à la sphéricité.

Cependant l'idée est répandue que les Anciens, les Pères de l'Église et les philosophes médiévaux pensaient que la Terre était plate. Cette idée reçue a peut-être son origine dans la Topographie chrétienne de Cosmas Indicopleustes, qui n'eut aucun écho à son époque et ne fut connue qu'à partir du XV^e siècle.

Vers 547 (sous Justinien), Cosmas Indicopleustes, voyageur alexandrin qui devint moine, écrivit sa Topographie chrétienne. Partisan de l'école antiochienne, qui interprétait littéralement l'Écriture (mais qui était minoritaire), il refusait catégoriquement la sphéricité de la Terre :

"Il y a de faux chrétiens, contempteurs des Écritures, et qui osent soutenir que la Terre est sphérique : je combats ces erreurs, venues des Grecs, par des citations incontestées des Livres saints³." Pour Cosmas, la Terre est un rectangle plat flottant sur l'Océan, borné de tous côtés par des murailles qui forment au-dessus d'elle, en se réunissant, le firmament ou voûte céleste. Vers le pôle Nord, il y a une haute montagne autour de laquelle tournent le Soleil, la Lune et les étoiles.

Ce n'est pas seulement au nom de la Bible que Cosmas attaquait la sphéricité de la terre, mais au nom de la "saine raison". Il trouvait ridicule que l'on soutienne que la Terre puisse rouler dans l'espace sans axe ou appui quelconque. Il appelle les antipodes des contes de vieille femme.

Un témoin et acteur des dernières phases de la grande aventure de la mesure de la Terre, l'astronome et physicien Jean-Baptiste Biot, écrivait en 1818 : "La détermination de la grandeur et de la figure de la terre, la mesure de la pesanteur à sa surface, la liaison de ce phénomène avec la constitution intérieure du globe, avec la disposition de ses couches et les lois de leurs densités, sont au nombre de ces questions de longue durée, que des sociétés savantes seules pouvaient se proposer d'attaquer et de résoudre. Elles ont été depuis un siècle et demi un des objets constants des travaux de l'Académie des sciences⁴."

Le problème de la figure et de la mesure de la Terre fut, en effet, avec celui des longitudes, un des grands problèmes scientifiques qui préoccupa le monde savant aux XVII^e et XVIII^e siècles. Il fut

l'objet d'une rivalité acharnée entre la France et l'Angleterre. Le géophysicien Ted Bullen pense que cette rivalité fut sans doute à l'origine des grands progrès effectués à l'époque dans la connaissance de la Terre solide, de même que les explorations spatiales de la fin du XX^e siècle doivent leurs succès à la concurrence entre les États-Unis et l'Union Soviétique. Il note les brillants résultats obtenus par les Français et relève, en particulier, les expéditions en Laponie et au Pérou et l'établissement d'une unité de longueur internationale basée sur la mesure de la Terre.

En effet, on parle souvent de la dispute sur la Figure de la Terre, aplatie aux pôles, comme le voulait Newton ou allongée comme le croyaient Jacques Cassini II et Johann-Caspar Eisenschmidt (1656-1712), correspondant à l'Académie de son père Jean-Dominique Cassini, auteur d'un écrit qui eut une certaine célébrité : *Diatrise de figura telluris ellipticosphæroïde*, publié à Strasbourg, en 1691.

Mais on sait moins que le système métrique, adopté par la Convention nationale en 1793, fut proposé par l'Académie des sciences et fondé par elle sur les mesures d'arcs de méridien que nombre de ses membres avaient effectuées avec persévérance, en France et ailleurs.

Avant de mentionner les contributions de l'Académie des sciences à la connaissance de la figure et de la mesure de la Terre, on peut brièvement rappeler ce que nous en savons maintenant.

La force centrifuge, liée au mouvement de rotation de la Terre, est nulle aux pôles et maximale à l'équateur où elle se soustrait à l'attraction gravitationnelle. La Terre est déformable et le "bourellet équatorial" ainsi créé lui donne, en première approximation, la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati selon l'axe des pôles. Il en résulte deux conséquences, qui ont alimenté la controverse entre savants aux XVII^e et XVIII^e siècles : Un arc de méridien de 1 degré correspond à la distance, sur le globe, entre deux points situés sur le même méridien et tels que l'angle entre les verticales en ces deux points soit de 1 degré. En pratique, on mesure l'angle entre les distances zénithales (comptées à partir de la verticale) d'une étoile, lors de son passage au méridien en ces points. Or, du fait de l'aplatissement de la Terre, le méridien n'est pas un cercle, mais une ellipse et la verticale en un point, perpendiculaire à l'ellipse, ne passe donc pas par le centre de la Terre. La courbure de l'ellipse est plus forte près des extrémités du grand axe (vers l'équateur) que près des extrémités du petit axe (vers les pôles). Il en résulte que l'arc de méridien entre deux points pour lesquels les verticales font un angle de 1 degré est plus petit près de l'équateur que du pôle. A partir de la longueur d'un arc de méridien aux latitudes moyennes (H" 4 5 °),

on peut calculer directement le rayon moyen de la Terre.

La pesanteur g , égale à l'attraction gravitationnelle diminuée de la force centrifuge, est plus faible vers l'équateur que vers les pôles. Or, la longueur du pendule battant la seconde (définie comme la quatre-vingt six mille quatre centième partie du jour solaire moyen) est proportionnelle à g . Le pendule battant la seconde est donc plus court vers les basses latitudes que vers les hautes latitudes. Ce sont ces deux grandeurs, l'arc de méridien de 1 degré et la longueur du pendule battant la seconde, qui ont été à la base des déterminations de la figure et de la mesure de la Terre, effectuées par les Académiciens.

En 1666, Newton, qui cherchait à rendre compte du mouvement de la Lune en s'appuyant sur les mesures de pesanteur à la surface de la Terre, n'avait pas obtenu de résultats satisfaisants et avait dû abandonner cette entreprise, car la valeur du rayon de la Terre, connue alors, était trop inexacte.

Mais, en 1669-1670, l'abbé Jean Picard, membre de l'Académie depuis la fondation de celle-ci, mesura, par triangulation, un arc de méridien entre la ferme de Malvoisine, à 30 km au sud de Paris, et Amiens. Il en déduisit pour le degré une valeur de 57 060 toises (1 toise H" 1, 9 5 m) et un rayon de la Terre égal, en unités modernes, à 6365,6 km. Lorsqu'en 1682, Newton eut connaissance de la mesure plus correcte de Picard, il reprit ses calculs et il fut, paraît-il, tellement ému de l'accord avec les observations qu'il dut demander à un ami de les achever.

En 1672, Richer, envoyé par l'Académie à Cayenne, pour y effectuer des observations astronomiques et des déterminations de longitude, découvrit que son horloge à pendule, qui battait la seconde à Paris, retardait près de l'équateur. Il écrit : "L'une des plus considérables Observations que j'ay faites, est celle de la longueur du pendule à secondes de temps, laquelle s'est trouvée plus courte à Caienne qu'à Paris, car la mesure qui avait été marquée en ce lieu-là sur une verge de fer, suivant la longueur qui s'estoit trouvée nécessaire pour faire un pendule à secondes de temps, ayant été apportée en France, et comparée avec celle de Paris, leur différence a été trouvée d'une ligne et un quart (2. 82 mm), dont celle de Caienne est moindre que celle de Paris, laquelle est de 3 pieds 8 lignes 3/5 (116,85 cm). Cette observation a été réitérée pendant dix mois entiers, où il ne s'est point passé de semaine qu'elle n'ait été faite plusieurs fois avec beaucoup de soin⁵." Admirez la précision des mesures : la différence relative de longueur est de 2,4 pour mille !

Les observations de Richer furent confirmées par celles de Varin, des Hayes et de Glos, envoyés par l'Académie au Cap Vert dans le but de déterminer les longi-

tudes, mais aussi de mesurer la longueur du pendule battant la seconde. Ils arrivèrent à Gorée en mars 1682. Au retour, ils passèrent par la Guadeloupe et la Martinique et, en chaque point, observèrent la longueur du pendule. Ils trouvèrent que la pesanteur était plus faible près de l'équateur ce qui s'accordait avec la théorie de Newton, suivant laquelle la Terre avait la forme d'un ellipsoïde aplati. Ce résultat aurait pu être confirmé par la mesure du degré aux extrémités d'une méridienne, mais l'arc mesuré par Picard, suffisant pour déterminer le rayon de la Terre, était trop court pour que l'on pût y déceler l'aplatissement.

Colbert avait chargé l'Académie de dresser une carte générale de la France. A cette fin, il fallait commencer par mesurer l'arc de méridien qui traverse la France de bout en bout, entre Dunkerque et Perpignan. Ce fut le grand œuvre des Cassinis, tous trois membres de l'Académie des sciences : Jean-Dominique Cassini I, son fils Jacques Cassini II et son petit-fils César-François Cassini de Thury (Cassini III). Mais cet arc était encore trop court, et les instruments employés encore trop imparfaits pour que l'on pût calculer sans erreur la figure de la Terre. De fait, en 1718, Jacques Cassini trouva un degré un peu plus long sur le segment sud (Paris-Collioure) que sur le nord (Paris-Dunkerque). Il en déduisit un allongement de la Terre suivant l'axe des pôles, contrairement à la théorie de Newton et aux observations de la longueur du pendule.

Les Cassini, comme d'ailleurs la communauté scientifique française, étaient cartésiens de père en fils : ils ne pouvaient accepter la force occulte de l'attraction et, opposés au vide, ils croyaient que des tourbillons de matière céleste éthérée entraînaient les étoiles et les planètes. Descartes ne s'était guère intéressé à la figure de la Terre, qu'il voyait simplement ronde, et il n'a certainement pas écrit qu'elle était allongée plutôt qu'aplatie. Mais, les cartésiens se réjouissaient de voir mise en échec une conséquence des calculs newtoniens, jetant par là le doute sur toute la théorie.

La différence de longueur entre les degrés nord et sud était évidemment dans la marge d'erreur, mais, écrit Biot : "L'Académie ne se rebuta point : elle sentit que la question ne pouvait être nettement décidée qu'en mesurant deux arcs du méridien dans les régions de la terre où l'aplatissement doit produire entre les degrés des différences plus sensibles, c'est à dire près de l'équateur et près du pôle. Elle trouva parmi ses membres des hommes assez dévoués pour entreprendre ces pénibles voyages." En 1735 donc, Bouguer, La Condamine et Godin s'embarquèrent pour le Pérou, tandis que Maupertuis, Clairaut, Le Monnier et l'abbé Outhier se mirent en route vers la Laponie, accompagnés par le savant suédois Celsius.

Les résultats des deux expéditions, publiés en 1744 et 1737 respectivement, mirent qualitativement hors de doute l'aplatissement de la Terre. Cependant l'exactitude des mesures, surtout celles de Laponie, n'était pas encore suffisante pour obtenir une valeur correcte de l'aplatissement. (1/179 au lieu de 1/298). "La faute n'en était à personne ; on ne pouvait faire mieux alors". écrit Biot. Quoiqu'il en soit, Cassini de Thury, qui avait poursuivi le travail de son père et de son grand-père sur la méridienne de France, finit par reconnaître, en 1740, que "les degrés vont en diminuant en s'approchant de l'équateur, ce qui est favorable à l'hypothèse de l'aplatissement de la Terre vers les Pôles⁶."

En 1750, l'abbé de La Caille, fut envoyé en mission au Cap de Bonne Espérance. Pendant quatre ans, il détermina la position de 10035 étoiles du ciel austral ; il mesura aussi un arc de méridien, ainsi que la longueur du pendule. Il observa que le degré qu'il avait mesuré était trop long, "ce qui semblerait indiquer que l'aplatissement de la Terre n'est pas régulier." Cette irrégularité fut maintes fois confirmée depuis : on sait maintenant que la Terre n'a la forme d'un ellipsoïde qu'en première approximation et, qu'en réalité, la surface du "géoïde" présente des bosses et des creux.

Les années passèrent, et l'idée d'une unité de longueur universelle, liée à la Terre, faisait son chemin. Déjà, en 1669, dans un rapport à l'Académie des sciences, l'abbé Picard écrivait : "Mais pour donner une mesure qui demeurât à la postérité et qui ne dépendît point de la nôtre particulière, je voudrais me servir de la longueur qui est nécessaire pour un pendule à seconde de temps, déterminant combien de fois cette longueur serait contenue dans un grand degré sur la Terre, et conséquemment à la circonférence et au diamètre. De sorte que la mesure de la grandeur de la Terre premièrement trouvée par la différence des hauteurs de pôle, et par rapport au ciel, serait attachée au mouvement journalier comme à un original commode et exposé à toutes les nations."

Cent-vingt ans plus tard, l'établissement d'une mesure universelle était encore à l'ordre du jour. Le 8 mai 1790, sur proposition de Talleyrand, l'Assemblée constituante décréta que le roi de France devait inviter le gouvernement anglais à faire désigner par la Société royale de Londres des savants anglais qui se joindraient aux savants français choisis par l'Académie des sciences, dans le but de déterminer en commun la longueur du pendule simple battant la seconde à la latitude de 45 ° et au niveau de la mer. La politique en décida autrement et les Français travaillèrent seuls.

La commission désignée par l'Académie des sciences était composée de Laplace, Lagrange, Borda, Monge et Condorcet. Elle devait, entre autre, décider de la divi-

Dossier

sion du système et de l'unité fondamentale. La division décimale présentait de tels avantages qu'elle fut adoptée très vite. Par contre, pour ce qui concernait le choix de l'unité, la commission ne suivit pas la Constituante, et choisit le dix-millionième du quart du méridien terrestre. Elle pensa, en effet, que la longueur du pendule battant la seconde n'était pas assez universelle ; en outre, le fait de lier l'unité de longueur à l'unité de temps posait problème. Il est d'ailleurs amusant de noter que depuis 1983, cette liaison est réalisée, puisque le mètre est maintenant défini comme la longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant la durée d'une fraction de seconde égale à $1/299\,792\,458$.

Dans les procès-verbaux des séances, conservés aux archives de l'Académie des sciences, on trouve, à la date du 11 juillet 1792, le rapport de la commission : "M. Laplace, conjointement avec MM. Lagrange, Borda et Monge, fait le rapport sur une instruction relative au cadastre de France pour laquelle l'Académie a été consultée par le ministre des

Contributions publiques. Les commissaires, conformément au désir que l'Académie a témoigné de voir les mesures de cette grande opération rapportées à la mesure universelle, se sont occupés de fixer les dénominations de ces diverses mesures, en réunissant dans cette nouvelle nomenclature la brièveté, la simplicité, et la précision de l'expression autant qu'il est possible dans une chose qui renferme toujours un peu d'arbitraire. Partant de la division décimale, et prenant la dix millionième partie du quart du méridien pour unité de mesure, ces messieurs lui donnent le nom de mètre. [...] "

On aurait pu, à la rigueur, pour déterminer la longueur exacte du mètre, utiliser les mesures de la méridienne de France, mais les instruments s'étaient perfectionnés et l'on pensa qu'il valait mieux remesurer un arc de méridien, de Dunkerque à Barcelone, avec les méthodes modernes. Méchain et Delambre, munis du nouveau cercle répéteur de Borda, furent chargés de l'opération, qu'ils menèrent à bien au milieu des troubles révolutionnaires.

Pour le mois d'août 1793, les procès-verbaux des séances de l'Académie recopient cet "Extrait du procès-verbal de la Convention nationale du 1^{er} août 1793, l'an II de la République française " :

"La Convention nationale convaincue que l'uniformité des poids et mesures est un des plus grands bienfaits qu'elle puisse offrir à tous les citoyens français, Après avoir entendu le rapport de son comité d'instruction publique sur les

opérations qui ont été faites par l'Académie des sciences, d'après le décret du 8 mai 1790, déclare qu'elle est satisfaite du travail qui a déjà été effectué par l'Académie, sur le système des poids et mesures et qu'elle en adopte les résultats pour établir ce système dans toute la République sous la nomenclature du tableau annexé à la présente loi et pour l'offrir à toutes les nations.

En conséquence, la Convention nationale décrète ce qui suit.

Article 1^{er}

Le nouveau système des poids et mesures fondé sur la mesure du méridien de la terre et la division décimale servira uniformément dans toute la République.[...]"

La satisfaction manifestée par la Convention le 1^{er} août ne l'empêcha pas de dissoudre l'Académie des sciences une semaine plus tard, le 8 du même mois. Mais les travaux continuèrent. L'Académie renaquit de ses cendres en 1795, et devint une classe de l'Institut de France. La même année, le Bureau des longitudes fut créé ; parmi ses premiers membres, on compte les pères fondateurs du système métrique : Laplace, Lagrange, Delambre, Méchain, Borda, Cassini IV.

On avait envisagé de prolonger la méridienne de France jusqu'aux Baléares, Méchain se dévoua pour cette tâche, mais il y laissa la vie, victime de la fièvre jaune. Le Bureau des longitudes chargea deux jeunes astronomes pleins d'ardeur, Arago et Biot, d'achever ce travail, ce qui fut fait en 1810. En 1817, il confia à Biot

le soin de prolonger la méridienne, à travers l'Angleterre et l'Ecosse, jusqu'à la plus septentrionale des îles Shetland. "Mais", dit Biot, "pour connaître la configuration réelle du sphéroïde terrestre, il faut mesurer sa courbure non-seulement dans la direction de ses méridiens, mais aussi dans le sens des arcs parallèles à l'équateur qui croisent ces premiers à angle droit". On pense à La Condamine, qui avait vivement regretté de n'avoir pu mesurer un arc de l'équateur. A la fin de 1823, on avait complètement déterminé un grand arc de parallèle, de Bordeaux à Fiume, et en 1824, le Bureau des longitudes chargea Biot de mesurer l'intensité de la pesanteur le long de cet arc. Il y trouva des irrégularités très sensibles, "dont la réalité est incontestable, puisqu'elles excèdent de beaucoup les erreurs que l'on pourrait attribuer aux observations". Ces observations, jointes aux irrégularités dans la décroissance de la longueur du degré le long de la méridienne, montraient définitivement "que la figure de la Terre est beaucoup plus compliquée qu'on ne l'avait cru d'abord." De la sphère, on était arrivé à l'ellipsoïde, puis au géoïde... et, au passage, on avait fondé le système métrique. Quant à l'aplatissement, sa valeur continua à être affinée, quoiqu'avec des fluctuations : Bessel, en 1840, et Faye, en 1880, trouvèrent respectivement $1/299$ et $1/292$. La valeur actuelle est $1/298.3$ ■

1 *Les Présocratiques*, La Pléiade, Gallimard, 1988

2 Gosselin, P.F.J., *De l'évaluation et de l'emploi des mesures itinéraires grecques et romaines*, Imprimerie Impériale, Paris, 1813.

3 *Cosmas Indicopleustes, Topographia Christiana*, Migne, Patrologie grecque, vol. 88, 52.

4 Biot, J.-B., *Mélanges scientifiques et littéraires*, Michel Lévy, Paris, 1858.

5 *Observations astronomiques et physiques faites en l'isle de Cayenne*, par M. Richer [1672], Amsterdam chez Pierre Mortier, 1736.

6 Cassini de Thury, C.F., *Mémoires de l'Académie des Sciences*, 1701, p. 171-184.

Le pied de Cassini, Observatoire de Paris.



Bibliographie : voir sur le site de l'Académie des sciences : www.academie-sciences.fr

La forme de la



par **Anny Cazenave**¹

L'altimétrie spatiale appliquée à l'étude de la planète

L'altimétrie radar sur satellite a été développée dès le milieu des années 1970 pour étudier les océans. Pourtant jusqu'au début des années 1990, elle a surtout permis d'étudier la « terre solide ».

L'altimètre embarqué envoie à intervalles réguliers (typiquement 1 seconde) un signal radar vers le nadir qui se réfléchit à la surface de la mer. De la mesure de la durée du trajet aller-retour de l'onde, on déduit l'altitude du satellite au-dessus de la surface marine. Grâce aux méthodes d'orbitographie aujourd'hui bien maîtrisées, on sait positionner le satellite sur sa trajectoire. La connaissance de l'orbite permet de calculer l'altitude du satellite par rapport à une surface de référence (qui, par convention, est un ellipsoïde dont les caractéristiques sont celles d'une "terre moyenne"). La différence entre les altitudes du satellite par rapport à l'ellipsoïde et par rapport à la surface de la mer fournit la hauteur « instantanée » de la mer par rapport à l'ellipsoïde. Les satellites altimétriques réalisent une couverture complète de la terre au cours d'un cycle orbital (dont la durée est de quelques jours) à l'issue duquel il survole à nouveau les mêmes régions du globe. La partie « permanente » de la hauteur de la mer (c'est à dire celle qui ne varie pas dans le temps) coïncide avec la hauteur du géoïde (surface équipotentielle du champ de gravité de la Terre ; voir article de G. Balmino). La surface instantanée de la mer comporte aussi une composante variable dans le temps et dans l'espace associée aux phénomènes océanographiques et aux marées.

¹ Membre de l'Académie des sciences, chercheur au CNES

Les satellites océanographiques, principalement les satellites altimétriques, mesurent de façon très précise la forme de la surface de la mer et ses variations spatio-temporelles. De ces mesures, on en déduit des informations précieuses sur la dynamique de l'océan, sur les marées, sur la hausse du niveau de la mer et même sur la topographie des fonds marins.

Les creux et les bosses « permanentes » de la surface marine, dont l'amplitude varie de quelques mètres à une centaine de mètres selon leur longueur d'onde, reflètent les variations géographiques du champ de gravité causées par les anomalies de masses au sein du globe ou à sa surface. Aux échelles spatiales les plus courtes (10-500 km), les ondulations permanentes de la surface marine sont une réplique exacte de la topographie des fonds marins. Pendant des décennies, la bathymétrie a été mesurée par sondage acoustique à partir de navires. Mais de vastes régions océaniques sont restées totalement inexplorées, en particulier dans l'hémisphère sud. Grâce aux mesures à haute résolution du géoïde marin par altimétrie spatiale, la topographie sous-marine a pu être calculée sur tout le domaine océanique avec une résolution de quelques km partout. Outre les grandes structures bien connues telles les dorsales océaniques, les zones de fractures et les zones de subduction, ou encore les alignements de volcans sous-marins, la topographie globale des fonds marins mesurée par satellite révèle d'autres structures jusqu'ici insoupçonnées ou incomplètement cartographiées à partir des bateaux. D'innombrables montagnes sous-marines dont la moitié d'entre elles n'avaient jamais été cartographiées, ont ainsi été identifiées. On a aussi découvert quantité de reliefs fossiles, témoins d'une activité tectonique aujourd'hui disparue. Outre leur intérêt majeur pour la géophysique marine, ces données sont aussi très utiles pour la navigation sous-marine, la pêche commerciale, ou l'exploration pétrolière en mer.

L'altimétrie spatiale de haute précision : un nouvel outil pour étudier l'océan

Le lancement en 1992 du satellite altimétrique Topex/Poseidon (développé conjointement par le CNES et la NASA) a marqué un tournant important dans l'étude des océans. La précision iné-

galée du système altimétrique Topex/Poseidon et l'amélioration spectaculaire de la précision de l'orbite du satellite (l'incertitude sur l'orbite, de plusieurs décimètres pour les missions antérieures, a été réduite à 1-2 cm pour Topex/Poseidon) a permis la véritable naissance de l'océanographie spatiale, en France et aux USA. Grâce à Topex/Poseidon, à son successeur Jason-1 en orbite depuis 2001 et à ENVISAT (lancé en 2002 par l'Agence Spatiale Européenne), les mesures précises, globales et quasi-continues des hauteurs de la mer nous permettent d'observer :

- les courants marins et leurs déplacements
- les « saisons » océaniques
- les tourbillons
- les perturbations climatiques à grande échelle du système couplé océan-atmosphère, tel le phénomène El Niño
- la hausse du niveau de la mer liée au réchauffement climatique
- les marées océaniques

La topographie dynamique de l'océan

Comme les continents ou les fonds marins, l'océan possède une topographie qui lui est propre. Celle-ci est superposée aux creux et bosses du géoïde marin. Cette topographie, qualifiée de "dynamique", dont la hauteur est seulement de 1 à 2 m, résulte des courants marins. Il existe en effet une relation entre la hauteur de la topographie dynamique et la vitesse des courants. Ces derniers qui suivent des courbes de niveau, ont une vitesse proportionnelle à la pente locale de la surface instantanée de la mer. Ceci résulte d'un équilibre entre la force de Coriolis et la force de pression exercée sur une parcelle d'eau par l'océan environnant. La mesure de la hauteur instantanée de la mer permet de calculer la vitesse et la direction des courants de surface. Il s'agit d'une information fondamentale pour déduire la circulation profonde à l'aide de modèles.

Les courants océaniques

L'océan est le principal régulateur du climat planétaire grâce à sa grande capacité à emmagasiner la chaleur et à la transporter sur de grandes distances au moyen d'une circulation océanique complexe, avant de la restituer à l'atmosphère. Grâce à l'observation spatiale de l'océan on peut suivre ainsi l'évolution de la position et de l'intensité des grands courants océaniques de surface comme le Gulf Stream. La circulation dans l'Atlantique nord est l'objet d'une attention toute particulière car c'est dans cette région que les eaux froides et salées plongent en hiver vers l'océan profond, maintenant ainsi la circulation à grande échelle de l'océan (appelée circulation thermohaline), dont le Gulf Stream n'est qu'une des branches superficielles. Ce courant contribue à la douceur du climat européen en transportant la chaleur des tropiques vers le nord. Mais à cause du réchauffement climatique, la circulation actuelle n'est pas forcément stable. Elle peut être perturbée par l'apport d'eau douce dans l'océan arctique dû au débit accru des rivières arctiques, à la fonte de la banquise et des glaces du Groenland, avec des conséquences critiques sur le climat européen.

Le phénomène El Niño

L'observation de l'océan nous permet aussi de décrire les grandes perturbations du système climatique comme le phénomène El Niño qui affecte de façon récurrente le Pacifique tropical. La circulation océanique en milieu tropical s'ajuste rapidement aux fluctuations des alizés. Ces vents, qui en régime normal soufflent d'est en ouest, entraînent les masses d'eau de surface vers la partie ouest du Pacifique équatorial, créant une accumulation d'eau chaude et un bombement de la surface de la mer dans la partie ouest du bassin. Chaque année, en décembre-janvier, les alizés faiblissent, causant un renversement de la tendance et un étalement des eaux chaudes vers le centre Pacifique tropical.

surface marine

Certaines années, l'affaiblissement des alizés est si fort que le courant transportant les eaux chaudes d'ouest en est peut traverser tout l'océan Pacifique en quelques semaines, créant cette fois une accumulation d'eaux chaudes dans la partie est du bassin, particulièrement marquée le long des côtes de l'Amérique centrale, de Colombie et du Pérou. C'est le phénomène « El Niño ». En 1997, un événement El Niño particulièrement intense est apparu : dès mars 1997, le satellite Topex-Poseidon a observé la naissance du phénomène, jusqu'à son paroxysme en décembre 1997, où l'anomalie de la hauteur de la mer dans le Pacifique-est tropical a atteint jusqu'à 30 cm. Le phénomène El Niño provoque des transferts d'énergie thermique considérables entre l'océan et l'atmosphère, causant des anomalies climatiques de grande envergure et de grande intensité : sécheresse intense dans le Pacifique ouest et particulièrement sur l'Indonésie, la Nouvelle-Guinée, le nord de l'Australie et précipitations catastrophiques et cyclones dévastateurs sur toute la bordure ouest du continent américain. Les répercussions climatiques de El Niño affectent la planète tout entière par le biais de « téléconnexions » atmosphériques. L'événement El Niño de 1997-1998 est considéré comme le

plus intense jamais répertorié. Son observation fine par Topex/Poseidon a permis d'améliorer les modèles. L'objectif aujourd'hui est de prédire l'arrivée de ce phénomène plusieurs mois à l'avance grâce à l'observation spatiale et la modélisation.

Réchauffement de la planète et hausse du niveau de la mer

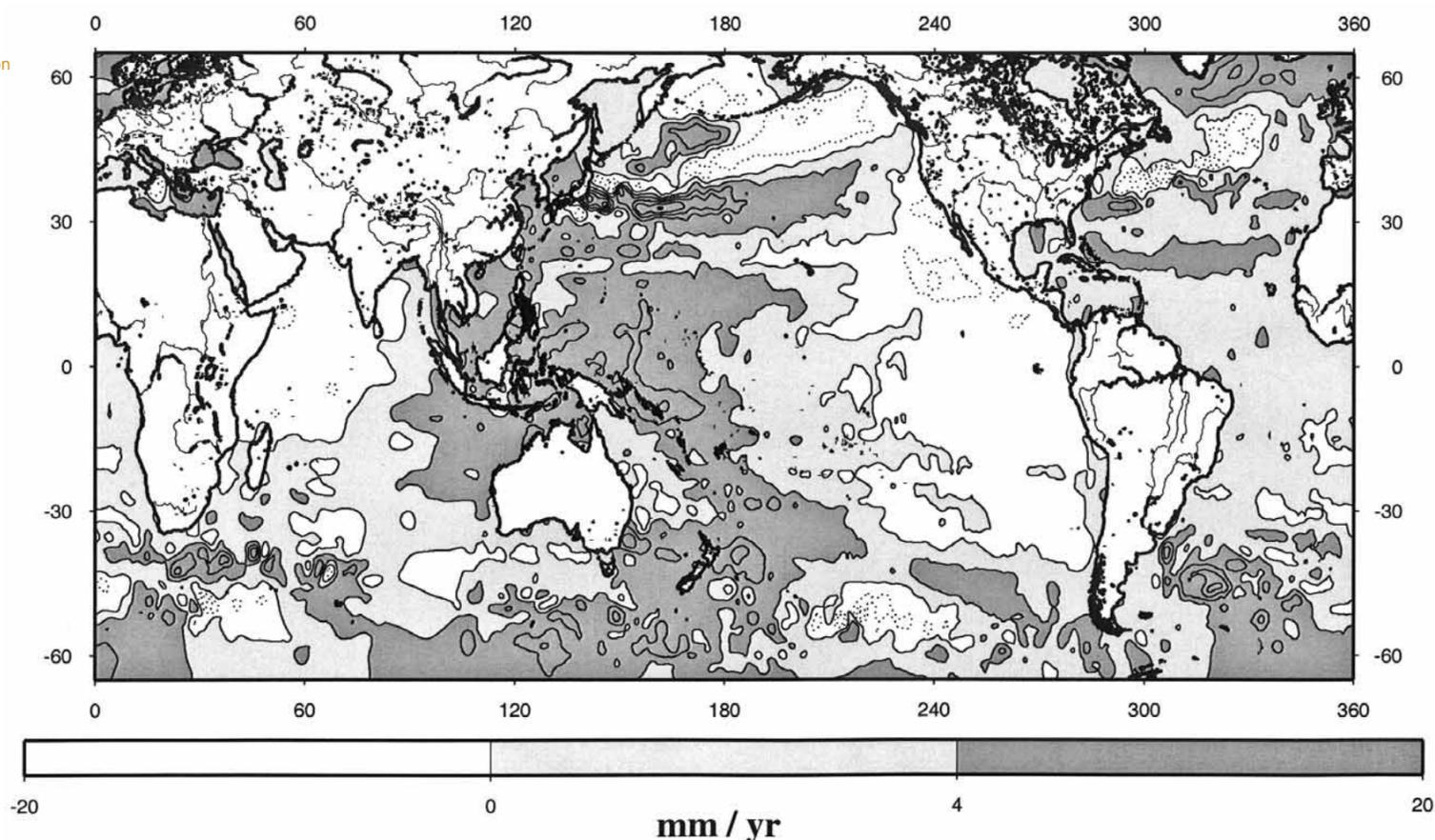
La hausse du niveau de la mer est une importante conséquence du réchauffement climatique observé au cours des décennies récentes. Grâce à Topex/Poseidon et maintenant Jason-1, on mesure avec grande précision et une couverture globale, l'évolution du niveau moyen de la mer au cours du temps. Depuis fin 1992, le niveau moyen de la mer s'est élevé de 4 cm. La vitesse d'élévation moyenne (de 3 mm par an au cours de la dernière décennie) est un peu supérieure à celle mesurée par les marégraphes au cours du XX^e siècle (environ 2 mm par an). Un résultat inattendu de l'altimétrie spatiale est la découverte que la hausse du niveau de la mer est loin d'être uniforme (figure) : dans certaines régions, la vitesse d'élévation du niveau de la mer a été 10 fois plus grande que la vitesse moyenne ; dans d'autres régions, la mer a baissé. Grâce à des données de température de

l'océan collectées par des bateaux au cours des 50 dernières années et publiées récemment, on sait à présent qu'une part importante (60 %) de la hausse du niveau de la mer des 12 dernières années est causée par la dilatation thermique de l'océan (qui se réchauffe). Ce phénomène est aussi responsable de l'hétérogénéité régionale des vitesses de variation du niveau de la mer. Des observations très récentes permettent aussi d'estimer la contribution à la hausse du niveau de la mer de la fonte des glaciers de montagne et des calottes polaires (environ 20-30 % pour la dernière décennie). Un autre facteur, moins connu, résulte du transfert d'eau provenant des réservoirs continentaux. L'eau contenue dans les sols, les aquifères et les réservoirs de surface peut être transférée à l'océan via les fleuves et ainsi contribuer à l'élévation du niveau de la mer. Inversement, une accumulation d'eau dans les réservoirs continentaux peut faire baisser le niveau de la mer. Nous disposons depuis 2002 de nouvelles observations spatiales provenant du satellite gravimétrique GRACE permettant de mesurer pour la première fois les variations spatio-temporelles de la gravité de la terre. Aux échelles de temps concernées (quelques mois à plusieurs années), ces variations tempo-

relles de gravité résultent principalement des variations des stocks d'eau sur les continents en réponse à la variabilité climatique ou aux activités humaines (construction de barrages, irrigation, déforestation, urbanisation). Avec les observations de GRACE, nous sommes à présent capables de mesurer les variations des stocks d'eau sur les continents, avec d'importantes applications en perspective sur l'étude du niveau de la mer, l'hydrologie des grands bassins fluviaux et la surveillance des ressources en eau douce de la planète.

La surveillance des océans depuis l'espace, en synergie avec la mise en place de réseaux d'observations in situ, est d'importance cruciale pour mieux comprendre le système climatique et améliorer les modèles d'évolution future du climat. Les satellites altimétriques sont aussi une composante essentielle des systèmes opérationnels de prévision à court terme de l'état de l'océan, aux domaines d'application nombreux comme la navigation civile, la pêche, le suivi des pollutions, les aménagements côtiers, l'exploration pétrolière off-shore et la défense. Il est donc indispensable d'assurer la pérennité des systèmes altimétriques en orbite ■

Carte de la distribution géographique des vitesses de variation du niveau de la mer entre 1993 et 2004 mesurées par le satellite altimétrique Topex/Poseidon.



Le géoïde :

regard profond sur l'image de la Terre

par Georges Balmino¹

La modélisation du champ de gravité terrestre et son étude font partie de la géodésie. Celle-ci s'attache à définir et étudier la forme de la Terre, ses déformations, sa pesanteur, sa rotation. L'utilisation des satellites artificiels a permis d'atteindre une vision globale et continue de notre planète et la géodésie a, ainsi que d'autres secteurs, bénéficié grandement de cette révolution. Elle est devenue une discipline incontournable au carrefour des géosciences.

Pour de nombreuses applications, dont certaines de la vie courante, le rôle du champ de gravité est central. Il donne, par le géoïde (surface de référence des altitudes), la forme globale de notre planète ; il rend possible la navigation inertielle ; il est indispensable pour restituer les trajectoires de satellites, qui permettent de constituer des réseaux mondiaux de stations de référence, de suivre la cinématique de la Terre et les déformations de sa surface, d'étudier les océans par altimétrie spatiale. Toute amélioration de notre connaissance du champ conduit à des progrès dans les domaines précités.

¹ Directeur de recherche, Groupe de recherches de géodésie spatiale, Équipe de géodésie spatiale du CNES

² CHALLENGING Mini-satellite Payload for geophysical research and application

³ Gravity Recovery and Climate Experiment

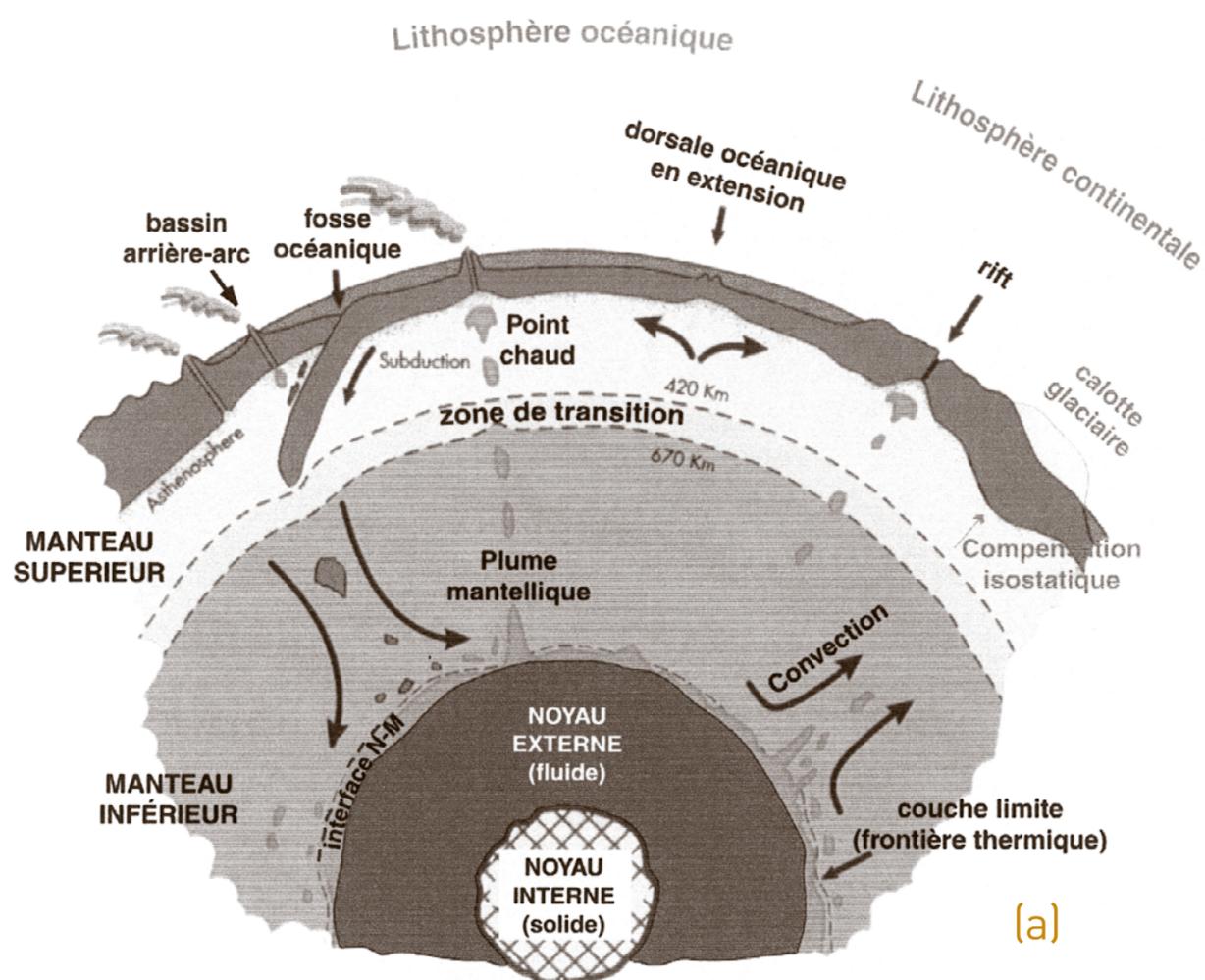
⁴ Gravity field and steady state Ocean Circulation Explorer

En sciences de la Terre, le champ de gravité joue un rôle dual

D'une part, en comparant le champ réel à celui d'un corps idéal (par exemple un ellipsoïde), on définit des anomalies de gravité qui caractérisent des écarts à un état d'équilibre interne, d'où une possi-

bilité de sondage de l'intérieur de la planète ; c'est l'un des quatre principaux moyens de « regarder » en profondeur, les trois autres étant la sismologie, le champ magnétique et les variations de la rotation terrestre ; mais la connaissance du champ de gravité est fonda-

mentale parce qu'elle apporte une information directe (bien que non inversible de manière univoque) sur le champ de densité. De ce fait on a un miroir du déséquilibre massique en profondeur, et en particulier des variations spatiales de structure de la lithosphère et du



(a)

manteau (fig. 1). Bien sûr, la tomographie sismique fournit, dans certaines régions, d'excellentes images tri-dimensionnelles, mais il est ensuite difficile de remonter aux variations de densité. La combinaison des deux informations (gravité et vitesses sismiques), allée aux données de déformation (mesurées en surface) et de propriétés des matériaux terrestres (étudiés en laboratoire), ouvre des perspectives nouvelles.

D'autre part, une surface particulière liée au champ de gravité, le géoïde, sert de référence à la définition et à la mesure des altitudes en tout point du globe. Le géoïde, partout orthogonal à la direction du fil à plomb, est une équipotentielle particulière du potentiel de pesanteur (somme des potentiels gravitationnel et centrifuge), qui peut être considérée, en milieu marin, comme coïncidant avec la surface d'un océan théorique au repos. La rotation terrestre étant supposée connue par ailleurs – et ses effets étant réguliers à la surface (décroissants avec la latitude), les irrégularités du géoïde (mesurées par rapport à un ellipsoïde de référence) caractérisent les variations spatiales du champ de gravité de manière équivalente aux anomalies précitées. A la surface terrestre, l'eau coule dans le sens de la pente par rapport au géoïde. Inversement, la circulation océanique peut être caractérisée par les écarts entre la surface réelle des mers et le géoïde, qui résultent des divers mouvements des eaux océaniques, initialisés et entretenus par les vents et les gradients de densité (dus aux variations spatio-temporelles de

température et de salinité). La variabilité de la circulation peut être assez bien appréhendée à travers la variabilité de la surface océanique elle-même, suivie par altimétrie satellitaire. Mais la circulation moyenne, qui est nécessaire pour quantifier en absolu les transports de chaleur par l'océan à long terme, en particulier dans les couches peu profondes (pour comprendre et modéliser les interactions atmosphère-océan dans l'étude du climat), exige de connaître le plus exactement possible l'écart entre la surface moyenne et le géoïde (appelé topographie de la surface moyenne océanique). Sur de grandes échelles de temps, la plupart des courants océaniques sont en équilibre (dit géostrophique), ce qui permet de déduire directement la circulation (c'est-à-dire leur vitesse). L'altimétrie par satellites permet d'atteindre, au cours du temps, cette surface moyenne avec une grande résolution et une précision de l'ordre du centimètre ; mais elle ne permet pas, à elle seule, de reconstruire le géoïde. Des modèles hydrodynamiques qui assimilent des données hydrologiques et altimétriques, permettent d'approximer la circulation océanique mais pas avec la précision suffisante. Seule la connaissance indépendante du géoïde doit permettre la détermination absolue de la circulation moyenne au niveau requis par les modèles de climat.

Enfin les variations temporelles, que ce soit du géoïde ou des anomalies de gravité, reflètent tout un spectre de phénomènes d'échanges massiques dans notre environnement (entre les

composantes solides, liquides, gazeuses), et leur analyse peut apporter des contraintes notables aux modèles encore incertains de ces phénomènes, par exemple en hydrologie.

La détermination d'un modèle global de champ de gravité est justiciable de deux approches :

- par analyse des perturbations observées de la trajectoire d'un corps (satellite) en orbite ; c'est un problème de mécanique céleste inverse, qui peut être très complexe suivant la sophistication désirée (et atteignable par les observations) du modèle, et suivant les autres forces perturbatrices gênantes (e.g. frottement atmosphérique) ; l'imperfection des systèmes de mesure, la sensibilité d'une configuration orbitale donnée (qui conditionne la stabilité de l'inversion) imposent en général d'avoir plusieurs satellites sur des trajectoires bien différenciées (en altitude et en inclinaison) ; c'est cette approche qui fut utilisée pendant quatre décennies.
- par mesure directe d'une fonction du potentiel de gravitation à bord d'un satellite donné.

Dans tous les cas une altitude la plus basse possible est souhaitable (compatible avec la durée de vie du satellite nécessaire à l'obtention d'une couverture suffisante) ; en effet les effets du champ de gravité décroissent exponentiellement avec l'altitude.

La communauté de géodésie spatiale est engagée dans de nouvelles missions de cartographie à haute résolution du champ de gravité terrestre avec trois missions d'un type nouveau : CHAMP², lancé en juillet 2000 (durée de vie de 6 à 10 ans) ; GRACE³, lancé en mars 2002 (durée de vie de 5 à 10 ans) et GOCE⁴ dont le lancement est prévu à partir de l'automne 2006.

CHAMP est dédié à la mesure globale des champs de gravité et magnétique terrestres, en coopération entre l'Allemagne, la France et les USA. Le satellite embarque un micro-accéléromètre qui permet la séparation entre les forces gravitationnelles et celles de surface (par exemple le frottement). L'extraction des paramètres du potentiel gravitationnel se fait par inversion des perturbations orbitales, déduites du suivi de l'orbite par les satellites de la constellation GPS.

GRACE est une mission à deux satellites qui se suivent à faible distance (150 à 300 km) celle-ci étant mesurée par lien micro-onde avec une précision micrométrique (information qui s'ajoute au suivi par les satellites GPS) ; chacun des satellites est muni d'un micro-accéléromètre. GRACE est particulièrement dédiée à l'étude des variations tempo-

relles du champ de gravité aux grandes et moyennes longueurs d'onde (échelle de 1 000 à 400 km) avec une résolution de l'ordre du mois, voire mieux.

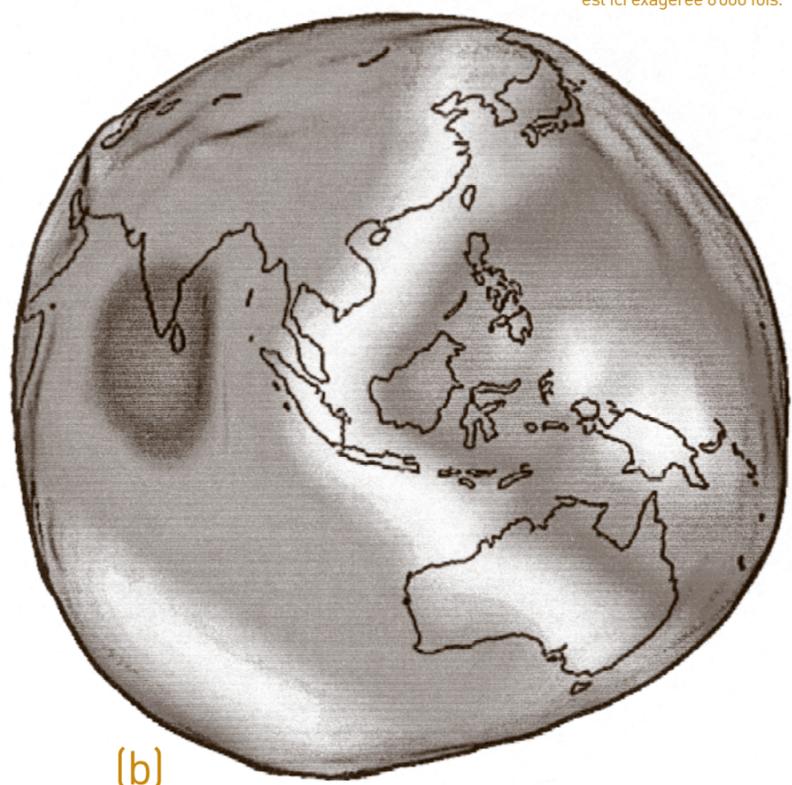
GOCE est une mission conduite entièrement par l'Agence Spatiale Européenne. Elle consiste à mesurer trois composantes du gradient de gravité à l'aide d'un instrument nouveau (un gradiomètre) constitué de 6 micro-accéléromètres triaxiaux (sensibilité de $\sim 10^{-12} \text{ ms}^{-2}$) ; ces données, qui fournissent l'information à petite longueur d'onde du géopotential, sont complétées par des mesures de suivi continu de la trajectoire (avec un récepteur GPS embarqué) pour les longueurs d'onde plus grandes. La sensibilité requise nécessite de faire voler ce satellite à une altitude exceptionnellement basse ($\sim 250 \text{ km}$) - et donc muni d'un système sophistiqué de compensation des forces de surface. Ainsi GOCE cartographiera le champ de gravité terrestre globalement avec une résolution de 100 km pour une précision restituée au sol d'au moins 1 mgal (10^{-5} ms^{-2}) ou 1 cm sur le géoïde.

Après ces trois missions qui révolutionnent notre connaissance du champ de gravité terrestre, la question se pose de poursuivre ce type d'expériences pour des objectifs clairement identifiés : suivi des variations temporelles de manière opérationnelle - pour l'hydrologie en particulier, nouveau gain en résolution pour toutes les disciplines utilisatrices. Le chiffre de 50 km est aujourd'hui avancé par les océanographes pour aller au-delà de la modélisation de la circulation moyenne que permettra GOCE ; une telle résolution est aussi souhaitable pour la compréhension du comportement de la lithosphère continentale au niveau des rifts, zones de subduction, bassins sédimentaires... bien que là d'autres techniques (aérogravimétrie par exemple) puissent être employées à combler la couverture des données-sol à l'échelle régionale. Dans le domaine temporel, un gain en résolution sera aussi nécessaire après GRACE, et sans doute un gain en précision de manière à décorrélérer quantitativement les divers phénomènes à la source des variations du champ dans le temps. Des études prospectives sont en cours ; des progrès, à l'horizon 2010-2015, sont effectivement envisageables.

Les besoins en précision et résolution iront encore sans doute croissant avec notre degré d'appréhension (mesures) et de compréhension (modèles) des phénomènes. Comme dans d'autres domaines, c'est une quête permanente ■

² CHALLENGING Mini-satellite Payload for geophysical research and application
³ Gravity Recovery and Climate Experiment
⁴ Gravity field and steady state Ocean Circulation Explorer

Fig. 1. La surface du géoïde, rapportée à un ellipsoïde approximant la forme géométrique de la Terre, reflète les variations de densité liées à la structure interne (a). L'amplitude des creux et bosses du géoïde (b) atteint $\pm 100 \text{ m}$ (elle est ici exagérée 6 000 fois).



Les nouveaux outils du géologue

Entretien avec Claude Allègre¹



par Paul Caro²

Question :

Qu'apporte à la géologie, et aux disciplines annexes comme l'océanographie, la possibilité d'observer la Terre depuis l'extérieur grâce aux satellites ?

L'exploration de la Terre au moyen des méthodes spatiales est une nouvelle révolution pour les sciences de la Terre. Je pense que nous n'en sommes qu'au début, nous allons assister à une évolution radicale. Pourquoi ? Tout d'abord, parce que ces techniques permettent d'avoir une vision de la terre d'un coup, en une seule fois. Par exemple, lorsque l'on observe les océans, on observe l'ensemble des océans. Autrefois, si l'on conduisait une expédition océanographique dans l'Atlantique nord par exemple, il n'y avait pas d'observation simultanée de l'Atlantique Sud, ni du Pacifique, etc. ... Donc on observait à un moment donné l'Atlantique, et puis à un autre moment le Pacifique. Aujourd'hui on peut surveiller l'ensemble de la Terre en une seule fois. Cela est valable pour tout, encore plus pour le cycle de l'eau, qui est un élément essentiel pour le climat, cela est valable pour les séismes, pour les volcans... Le deuxième point est que ces moyens sont extrêmement puis-

sants et relativement peu chers, contrairement à ce que l'on pourrait penser, parce que, avec les progrès de l'électronique, nous allons être capables de lancer avec une seule fusée Ariane dix satellites d'une taille réduite mais techniquement très puissants. Ils permettront une grande diversité d'observations. Cela reviendra beaucoup moins cher que d'envoyer des gens faire des observations à terre sur le terrain. Nous serons en mesure de réaliser une véritable cartographie de la Terre ; naturellement, il faudra des stations de calibrage au sol, mais l'observation ainsi calibrée donnera des résultats formidables. On fait déjà beaucoup de géologie à l'aide de photographies de satellites par exemple, Paul Tapponnier a été le précurseur de ces méthodes, mais on pourra faire demain de la prospection minière ou pétrolière, on pourra mesurer le degré d'humidité du sol, on pourra voir les glissements de terrain, prévoir les catastrophes naturelles. C'est une véritable révolution. Elle n'était pas évidente car lorsque l'on observe l'océan, pour quelqu'un qui n'est pas spécialiste, on voit des vagues qui font 10 mètres de haut, d'autres 20 mètres, mais, en passant des milliers de fois au même endroit et en faisant des moyennes, on peut mesurer le niveau de l'océan au millimètre près. En prenant une image par réflexion radar avant et après un tremblement de terre, on visualise le déplacement grâce à des interférences calculées par l'ordinateur, comme l'a montré, le premier, Didier Massonet ingénieur du CNES. Les photographies prises à partir de satellites sont vraiment décisives pour montrer par image radar ce qui se passe lors d'un tremblement de terre. On l'a vu pour le tsunami de décembre 2004, mais c'est encore plus spectaculaire pour les tremblements de terre dans la mesure où on voit la faille qui s'est déplacée, on voit les lobes de tension ; c'est extraordinaire. Je pense

que cela constitue la nouvelle révolution des sciences de la Terre. Cette révolution aurait pu commencer plus tôt, mais les militaires américains qui possédaient ces techniques de haute résolution, comme ils avaient un avantage sur tout le monde, n'avaient pas envie de les faire entrer dans le domaine public ! Aujourd'hui c'est le cas, et par conséquent l'Europe en particulier fait beaucoup de choses dans ce domaine. Il y a le problème de l'abondance des données qui peut submerger les chercheurs mais c'est une question qui se résout petit à petit grâce à la puissance des ordinateurs et un peu d'astuce.

Dès le début du XX^{ème} siècle, on a estimé l'âge de la Terre par l'observation des filières radioactives. Qu'en est-il aujourd'hui des mesures de datation isotopiques ? Qu'en est-il des rapports entre la géochronologie absolue et la géochimie isotopique ?

En fait, c'est la même chose. La géologie isotopique a pris naissance à partir de la géochronologie. Je viens de publier un livre sur ce sujet, dont le titre est *Géologie isotopique* (Éditions Belin), et dont toute une partie parle de géochronologie. La Terre s'est formée en 150 millions d'années, donc il n'y a pas un âge de la Terre, mais il y a un âge de

début et un âge de fin pour le processus de son agglomération. C'est un pan de recherches qui s'est énormément développé. On mesure des âges qui vont de quelques milliers d'années (pour étudier les fluctuations climatiques) jusqu'à ceux de la formation des éléments dans les mécanismes cosmiques. On obtient ainsi l'âge de l'uranium, l'âge de la nucléosynthèse d'un certain nombre d'éléments.

Quelle est la précision des analyses ? Quels progrès ont pu être apportés dans ce domaine par le développement de l'instrumentation ?

Considérables. Pour donner un ordre de grandeur, on mesure des événements qui ont eu lieu au moment de la formation de la Terre avec des précisions de 100 000 ans sur 4,5 milliards d'années. Aujourd'hui, nombre d'événements sont datés avec une précision extraordinaire. On sait mesurer les rapports isotopiques avec une précision de 1/1 000 000. Donc l'incertitude ne vient plus des mesures, et c'est une véritable révolution. C'est une conséquence de l'amélioration de la technologie scientifique, dont une bonne partie a été faite par les gens travaillant dans ce domaine : ces avancées ne sont pas venues de la physique, mais bien des sciences de la Terre. Et les physiciens ont récupéré les méthodes développées.

Quelles sont les principales méthodes utilisées par les géologues en rapport avec le type de matériau géologique (basalte, mica ou minéraux spécifiques) ?

C'est extrêmement complexe. Aujourd'hui on utilise 25 ou 30 décroissances radioactives différentes, c'est un monde entier : chronologies directes de longue période, de courte période (basées sur le déséquilibre radioactif), irradiation par les rayonnements cosmiques (qui produi-

¹ Membre de l'Académie des sciences, professeur à l'université Denis Diderot
² Correspondant de l'Académie des sciences, directeur de recherche honoraire au CNRS

sent le carbone 14). Il y a aussi la méthode des âges d'exposition. On arrive à dire à quel moment une roche a été à la surface, à quel moment la faille s'est produite : parce que la lèvre de la faille est irradiée... Mon livre a cinq cent pages ! On utilise beaucoup les terres rares³, on utilise le samarium et le néodyme, on utilise le lanthane et le cérium, on utilise le lutécium et l'hafnium... Cela fait partie de la « panoplie ».

Comment traitez-vous les roches avant analyse ?

Différentes techniques existent. Pour l'instant, on dissout les échantillons de roches, ensuite il faut séparer chimiquement les éléments pour éviter les superpositions isobariques ; en effet, le rubidium 87 interfère au spectromètre de masse avec le strontium 87, donc il faut les séparer complètement. Il faut de même séparer le samarium et le néodyme parce que sinon on récupère des interférences. On exécute une séparation chimique sur des résines échangeuses d'ions, ensuite on sépare les isotopes au spectromètre de masse. Quand les mesures ne demandent pas une très grande précision, on peut se servir de la sonde de Slodzian qui envoie un faisceau d'ions sur des points de l'échantillon (par exemple une inclusion) et les éléments sont ionisés, puis on les analyse dans un spectromètre de masse. Il existe encore une autre méthode qui consiste à taper sur la substance avec un faisceau laser pour obtenir un plasma analysé ensuite dans un spectromètre de masse. Certaines personnes pensent qu'avec cette méthode, à terme, on pourra contourner la chimie et arriver, avec un laser résonnant accordé sur des raies d'absorption dans le plasma, à ioniser spécifiquement un élément (le rubidium et pas le strontium, par exemple), on mesure un isotope pour ensuite le canaliser directement dans le spectromètre de masse. Mais nous n'en sommes pas encore là. La chimie, pour l'instant, est une chimie très complexe, car elle mesure des nanogrammes, voire des picogrammes. Il faut éviter de polluer. Dans mon laboratoire il y a des salles étanches. On a développé ces salles « blanches » à peu près en même temps que les gens qui préparent des semi-conducteurs pour la physique du solide. On dispose de salles sur-pressurisées. Nous devons en outre préparer les réactifs chimiques nous-mêmes, car dans le commerce, aucun réactif « pur » ne nous convient. Il s'agit d'une véritable usine avec des techniques de distillation, les technologies requises sont très spéciales. D'ailleurs parmi les gens qui travaillent avec moi se trouvent des chimistes de formation, car la chimie analytique mise en œuvre est vraiment difficile.

Utilisez-vous aussi la répartition des éléments trace pour caractériser une roche ?

Nous utilisons énormément ces éléments parce que les éléments trace ne servent pas seulement à caractériser les roches mais sont surtout utiles pour savoir comment elles se sont formées et d'où elles viennent. En effet, l'abondance des éléments majeurs varient relativement peu : entre un basalte et un granite, la teneur en silice (SiO₂) varie entre 65 % et 54 %. Elle ne varie donc que de 15 % tout au plus. En revanche, les éléments trace varient d'un facteur 10⁴ entre eux. Certains, comme l'uranium, sont enrichis dans les granites environ mille fois plus que dans les basaltes. Donc les éléments trace sont beaucoup plus discriminants que les éléments majeurs. Les couples d'isotopes radiogéniques – radioactifs sont tous des éléments trace. Ce sont eux qui nous occupent le plus. Les terres rares ont un avantage particulier, parce que, ayant une variation régulière de propriétés chimiques, elles forment un « pattern » qui n'est pas uniforme. Par exemple, le fractionnement terres rares légères / terres rares lourdes varie énormément d'un matériau à un autre. Le cérium, qui a des degrés d'oxydation différents, varie par rapport aux autres terres rares, l'euporium (que l'on peut trouver sous la forme d'euporium II) également.

Que peut-on apprendre par ces techniques sur la dynamique terrestre ?

L'analyse des basaltes montre que ceux du Deccan (Inde) et ceux de la Réunion sont identiques. Le Deccan était à l'emplacement de la Réunion il y a 65 millions d'années, il a ensuite migré vers le nord. Quand l'éruption du Deccan a eu lieu, celui-ci se situait encore à la Réunion. Cela fait déjà quinze ans que les méthodes géochimiques sont appliquées à l'étude des mouvements de l'intérieur du globe, de la déformation de la croûte, des trajets pression-température-temps-déformation... C'est la géodynamique chimique : on reconstitue les mouvements dans le manteau à l'aide des isotopes, à l'aide des éléments trace, et de nombreux

autres outils. C'est toute une discipline, et je ne peux pas l'expliquer brièvement. Ce que vous me demandez ressemble à un livre que j'ai chez moi dont le titre est : « *Le chinois en douze leçons* ». On détermine ainsi la composition de la Terre, son histoire, la manière dont elle s'est formée etc. ... On peut en déduire des informations utiles pour comprendre la formation des planètes à partir des modèles que nous avons développé sur la formation des météorites.

La précision des analyses isotopiques est suffisante pour mettre en évidence des différenciations dans les matériaux du manteau. Tant que l'on mesurait les précisions isotopiques au pour cent, on ne voyait rien. On a commencé à les voir lorsque l'on a mesuré les variations isotopiques au dix millième, notamment sur le néodyme. L'évolution des « points chauds » est l'un des grands moyens d'étude de l'intérieur du globe. On sait, par exemple, que la convection dans le manteau est séparée en deux couches : l'une profonde, l'autre superficielle.

Comment l'atmosphère s'est-elle formée ?

Elle s'est formée suite à un très fort dégazage, il y a 4,4 milliards d'années, au moment même où le noyau s'est constitué. L'atmosphère vient de l'intérieur de la Terre, car toute la partie gazeuse qui était dans la nébuleuse primitive n'a pas été retenue par notre planète du fait de sa petite taille ; l'hydrogène et l'hélium sont partis, et ont tout emmené avec eux. Ensuite l'atmosphère s'est formée par dégazage du manteau. Ce qui a été dégazé était de l'azote et du CO₂, surtout du CO₂ (75 %). Puis ce dernier a été piégé sous forme de carbonates. Quant à l'oxygène, il n'a commencé à croître qu'il y a 2 milliards d'années par suite de la photosynthèse. Ces chiffres sont parfaitement connus.

Comment ces résultats peuvent-ils être mis en relation avec les âges estimés des météorites (comme les chondrites), ou à ceux déduits des échantillons provenant de la Lune et de Mars ?

La composition des chondrites est une référence de base. Les météorites permettent de « caler » l'âge de la Terre, on les date très bien. Pour Mars, c'est différent, car on ne dispose que de quelques échantillons. Et encore, la provenance des météorites « martiennes » que nous avons n'est pas certaine.

Pouvez-vous dire un mot de la cosmochimie ?

En cosmochimie, on étudie deux types de phénomènes : premièrement la formation des planètes, ou comment à

partir des nébuleuses primitives les matériaux solides se sont condensés, agglomérés pour donner des planètes ; deuxièmement la nucléosynthèse dans les étoiles, car il se trouve que les météorites contiennent des grains interstellaires. On étudie leur composition, et on en déduit quantité d'informations, c'est un complément à ce que font les astronomes. La poussière interstellaire n'a pas été détruite ultérieurement. Son étude est un nouveau champ, qui a été révolutionné par les sondes électroniques, puis ioniques. On étudie aussi maintenant les molécules interstellaires par la spectroscopie, mais cela relève de l'Astrophysique.

Quelles conséquences pratiques peut-on déduire des travaux de géochimie en matière d'enfouissement de déchets nucléaires ?

Nos données nous permettent de dire que les éléments chimiques sont mobiles, que sur des milliers d'années des accidents tectoniques peuvent se produire donc que lorsqu'on stocke des déchets radioactifs, il y a danger de polluer les nappes phréatiques de manière sévère. Il faut donc faire attention. J'ai été l'un des militants contre l'enfouissement profond et j'ai gagné. Il était à mon avis criminel de les enfouir très profondément (le contact avec l'eau chaude est risqué). Je suis en revanche partisan du stockage en surface. Je pense qu'il y a un problème psychologique : il ne faut pas avoir peur du danger ; si nos ancêtres avaient eu peur du danger, ils n'auraient pas construit de locomotives ! Il faut faire face au danger, et le contrôler. Quand on stocke des déchets en surface, il convient de les visiter régulièrement. On regarde avec des compteurs, on vérifie si rien n'est fissuré, et on est tranquille. Si on met les déchets à 4000 mètres de profondeur, et qu'on scelle, on ne sait pas ce qui peut arriver : un tremblement de terre, ou une faille peuvent se produire, et les disperser dans la nappe phréatique qui du coup est polluée pour mille ans. Je n'ai pas peur des déchets, mais il faut les surveiller. Enfouir les déchets est anti-scientifique ■

³ Terres rares, un groupe de 17 éléments de la classification périodique qui ont des propriétés chimiques très voisines : scandium, yttrium, lanthane, et les 14 lanthanides du cérium au lutécium



Perception et COMPRESSION des images fixes

par Yves Meyer¹

Je remercie l'Académie des sciences de m'avoir invité à faire cet exposé. Le texte écrit bénéficie d'un certain nombre d'améliorations que je dois à l'aimable attention de Pierre Buser. La révolution numérique envahit notre civilisation et nous inonde d'un déluge d'images digitales qui engorgent les canaux de transmission. On ne peut transmettre ou archiver ces images sans les compresser et nous voilà dans le vif du sujet, c'est-à-dire face au problème de la compression en imagerie numérique. *Les progrès en imagerie numérique sont-ils reliés à une meilleure compréhension du fonctionnement du système visuel humain?* C'est la question que nous traiterons aujourd'hui et qui peut paraître paradoxale, tant la révolution numérique semble faire partie de la technologie et n'avoir rien à faire avec la neurophysiologie. Nous débiterons par une autre question : *Quels sont les fondements de notre perception des objets ou des images?* Nous chercherons ensuite à savoir s'il existe dans les images des formes simples et universelles qui soient à la base de leur compression et de leur perception. C'est en répondant à ce dernier problème que nous analyserons les succès des algorithmes de compression les plus performants.

¹ Membre de l'Académie des sciences, professeur émérite à l'École normale supérieure de Cachan

Des algorithmes de compression basés sur une analyse du contenu sémantique de l'image seraient encore plus puissants, car ils permettraient de compresser une image en utilisant des étiquettes, des « labels », pour désigner les objets. Nous n'en sommes pas là et les algorithmes de compression dont nous disposons s'apparentent encore à la partie « bas niveau » du système visuel humain.

1. Perception et petites impressions

Comment définir le mot *perception*? Le dictionnaire Robert nous dit que la perception est la fonction par laquelle l'esprit se représente les objets ; cette définition y est illustrée par deux citations. Jean-Jacques Rousseau écrivait : « *Nos sensations sont purement passives, au lieu que toutes nos perceptions ou idées naissent d'un principe actif qui juge* ». Jean-Paul Sartre va dans la même direction quand il nous dit que « *Dans la perception, un savoir se forme lentement* ». Pour chacun des problèmes qu'il étudie, Pierre Buser nous propose plusieurs solutions ou théories et cette largeur de vue fait le charme et la richesse de son ouvrage, *Cerveau de soi, Cerveau de l'autre*, publié chez Odile Jacob. En partant des découvertes de la neurophysiologie et des sciences cognitives, Pierre Buser analyse les liens entre sensation brute et perception : « *Helmholtz fut de ceux qui plaidèrent pour un processus en deux étapes, la sensation, donnée brute liée à la mise en jeu de nos capteurs sensoriels, et la perception, représentation consciente de la réalité que nous bâtissons à partir de la sensation, grâce à nos inférences et éventuellement nos jugements... Les don-*

nées récentes maintiennent-elles la dualité hiérarchique entre sensation et perception? Que la perception implique une interprétation de la donnée brute par une opération "psychologique" (qui s'opposerait au "physiologique" pur de la sensation) ne semble pas poser problème, dans la mesure précisément où l'opposition entre les deux domaines, physiologique et mental, s'estompe aux yeux de tant d'auteurs, ne serait-ce qu'avec l'abandon d'un certain dualisme. Il n'empêche que les perceptions complexes, au nombre desquelles sont, en bonne place, les classiques figures ambiguës (cubes de Necker, etc.) sont là pour nous rappeler que la perception d'une forme implique sans doute davantage que la seule réception des messages visuels... »

Pierre Buser insiste enfin sur l'existence de différents niveaux de perception ; il y a une perception implicite ou préconsciente et il y a aussi une appréhension consciente. Il écrit à propos de cette première : « *Helmholtz (1866), à son tour, discuta des problèmes généraux de la perception. Il introduisit la notion d'inférence inconsciente (unbewusster Schluss) pour signifier que dans la perception la référence objective peut trouver sa source dans des repères qui ne sont pas immédiatement accessibles à la conscience. Ainsi, dans une perception de profondeur et de distance relative des objets, créée par la disparité des images rétiniennes, nous savons maintenant que le sujet est totalement inconscient des processus intermédiaires... »*

La perception peut donc être basée sur un savoir inconscient. En outre la percep-

tion est subjective. Les peintres modifient notre perception à notre insu. En fait, les peintres nous apprennent à voir ; même les peintres classiques, comme Nicolas Poussin, nous éloignent du réel naïf, du simple reflet du monde visible, pour nous introduire dans un monde nouveau qui nous paraît d'abord étrange, mais qui nous deviendra ensuite familier. Entrer dans ce nouveau monde, c'est modifier à jamais notre propre perception. Mais quelles sont les conditions requises à l'élaboration de la perception ?

2. Peintres et philosophes

Nicolas Poussin y répond quand il écrivait : « *Il ne se crée rien de visible sans distance* ». Le philosophe Maurice Merleau-Ponty nous parle aussi d'éloignement : « *Dans la vie silencieuse de la perception, nous adhérons à quelque chose, nous le faisons nôtre, et cependant nous nous en retirons et le tenons à distance, sans quoi nous n'en saurions rien* ». La distance vis à vis d'une oeuvre, d'un tableau que nous admirons, nous la créons en prenant du recul et en sentant alors ce tableau se réorganiser au cours de ce « *zoom arrière* ». Cette réorganisation permet de découvrir les rapports de structure, tels que les définit le philosophe Ernst Cassirer : il écrit : « *L'imitation ne consiste jamais à redessiner, trait pour trait, un contenu de réalité, mais... à tracer les contours caractéristiques de sa silhouette... En ce sens, reproduire un objet ne consiste pas simplement à rassembler les caractères singuliers de sa forme, mais à en saisir les rapports de structure... »*

Cassirer comparait les problèmes posés par la perception à ceux, tout aussi redoutables, posés par le langage. Il écrit :



“ Dans la vie silencieuse de la perception, nous adhérons à quelque chose, nous le faisons nôtre, et cependant nous nous en retirons et le tenons à distance, sans quoi nous n'en saurions rien. ” Merleau-Ponty.

« Le chaos des impressions immédiates ne s'éclaircit et ne s'articule pour nous que parce que nous le "nommons" et le pénétrons ainsi par la fonction de la pensée linguistique et de l'expression linguistique... Le langage devient ainsi un des moyens fondamentaux de l'esprit, grâce auquel s'accomplit le progrès qui nous fait passer du monde des simples sensations à celui de l'intuition et de la représentation ».

Les peintres, les philosophes et Pierre Buser nous tiennent, en fait, le même langage. La perception d'une image ne nous fournit pas son reflet, sa copie conforme, pas plus que les mots ne peuvent être identifiés aux objets qu'ils désignent. Au contraire, passer du « chaos des impressions immédiates »

à la perception nécessite une opération intellectuelle complexe ; Ernst Cassirer parlerait d'une « opération spirituelle ». Le but de ces opérations complexes est de dévoiler les « rapports de structure ». Les thèses de Stéphane Mallat, sur lesquelles nous reviendrons, illustrent cette approche ; pour Stéphane Mallat, extraire la géométrie, c'est-à-dire comprendre la structure d'une image à partir de ses coefficients d'ondelettes, est le premier pas conduisant à la compression. En outre, ces coefficients s'apparentent aux réponses des neurones de la zone V1 du cortex. Cela nous amène à aborder la compression des images en nous appuyant sur les données de la neurophysiologie et sur les découvertes qui ont valu le Prix Nobel à David Hubel et Torsten Wiesel.

3. Le cortex visuel primaire

Voici ce que David Hubel écrit dans *Eye, Brain and Vision* (publié en 1988 par W.H. Freeman), sur le fonctionnement du cortex visuel primaire : « Ramon y Cajal fut le premier à comprendre que les connexions dans le cortex sont très courtes... Quel que soit le traitement effectué par le cortex, il reste certainement local : l'information concernant une petite région de l'environnement visuel atteint une petite région du cortex, où elle est transformée, analysée, digérée (utilisez l'expression que vous préférez), puis envoyée dans une autre région corticale où elle subit un autre type de traitement, indépendant du traitement effectué dans la région voisine. L'environnement visuel est ainsi analysé, fragment par fragment, dans le cortex visuel

primaire : par conséquent, celui-ci n'est pas l'endroit du cerveau où les objets entiers (bateaux, chapeaux, visages, etc.) sont reconnus, perçus ou traités ; le cortex visuel primaire n'est pas le centre de la "perception" ».

Cette description exclut un algorithme du type transformée de Fourier, car cette dernière est une transformation globale, opérant sur toute l'image. Bien au contraire, David Hubel, Torsten Wiesel et Margaret Livingstone ont montré que certaines cellules du cortex visuel primaire sont affectées à des tâches relativement modestes, parcellaires, répétitives, un peu comme un travail à la chaîne. Ces neurones ne procèdent pas à un découpage de l'image en blocs 8 fois 8, comme le ferait l'algorithme

Question d'actualité

JPEG, mais détectent des patterns, des structures universelles et rudimentaires qui se retrouvent dans toutes les images. Ces patterns ne se réduisent pas à des petits morceaux de l'image, mais sont les building blocks qui constituent la base de la perception. Par exemple, certaines cellules sont responsables de la détection des contours et il est tout à fait étonnant que différentes orientations soient prises en charge par différentes cellules, chacune étant spécialisée dans une orientation particulière. Écoutons David Hubel décrire son travail : « *Cells in the primary visual cortex, to which the optic nerve projects (with one intermediate nucleus interposed) are far more exacting in their stimulus requirements. The commonest type of cell fires most vigorously not to a circular spot, but to a short line segment to a dark line, a bright line, or to an edge boundary between dark and light. Furthermore each cell is influenced in its firing only by a restricted range of line orientations : a line more than about 15 to 30 degrees from the optimum generally evokes no response. Different cells prefer different orientations, and no one orientation, vertical, horizontal or oblique, is represented more than any other. These observations made in 1958, had not been predicted and came as a complete surprise. Evidently cells in this part of the cortex are determining whether there are contours (light-dark or color) in the visual scene, and collectively registering their orientations* ».

D'autres neurones sont affectés à la détection de motifs périodiques etc. Tous ces neurones font partie de la zone V1 du cortex visuel primaire. Aucun ne fournit la compréhension de l'ensemble de l'image, ni même la perception des objets qui y figurent. Cette compréhension fera appel à des processus cognitifs mettant en jeu des populations de neurones. Comme l'écrit Bernard Mazoyer : « *Les fonctions cognitives sont basées sur la mise en jeu d'un réseau distribué d'aires corticales possédant une dynamique temporelle* ».

D. Hubel s'est alors demandé si le cortex visuel primaire était déjà câblé à la naissance ou si le câblage s'élaborait dans les premiers mois suivant la naissance, grâce aux stimuli visuels que reçoit le bébé. L'air du temps était en faveur de l'apprentissage et du conditionnement. Le cerveau du bébé était vu comme une page blanche sur laquelle s'écrivent les expériences vécues par le bébé. La cohérence que notre cerveau acquiert se construirait ainsi en reflétant celle du monde qui nous entoure. Mais D. Hubel a découvert que c'était parfois l'inverse qui a lieu. Certaines parties du cerveau sont *précâblées* et ce câblage peut s'effacer, faute de stimulations. Cette décou-

verte a balayé bien des préjugés sur l'apprentissage et la pédagogie.

D. Hubel a travaillé sur des chats et des singes. En étudiant la période critique d'élaboration du fonctionnement de la vision, il a découvert un moyen de guérison d'une forme de cécité qui s'appelle l'amblyopie. Cette forme de cécité vient du fait que, dans certaines situations, une partie du cortex visuel primaire n'est pas stimulée, car elle ne reçoit pas l'information de l'œil (à cause d'un fort strabisme, par ailleurs temporaire, qui affecte certains bébés). Les neurones dégénèrent alors de manière irrécupérable et le bébé devient aveugle. Le problème n'est donc pas celui d'un défaut dans le précâblage. Les neurones, qui existent dès la naissance, ont besoin d'être stimulés pour survivre.

Ce travail illustre le lien entre recherche pure et recherche appliquée : D. Hubel dit, en effet, qu'il n'a pas cherché à guérir une forme de cécité et que sa découverte sur la façon de traiter l'amblyopie est un produit inattendu de son étude du fonctionnement du cerveau. Il ajoute, de façon très ironique, que si son program-

me de recherche avait porté sur l'étude de cette forme de cécité, il n'aurait jamais obtenu la moindre subvention. On lui aurait enjoint de travailler, comme cela semblait évident, sur l'œil et cela n'aurait conduit à rien puisque le problème se situe au niveau du cerveau !

Tout ceci nous oriente vers une analyse de l'image qui soit basée sur la notion de contour, puisque, comme nous le rappelle David Hubel, les contours sont à la base de la vision. Hubel va plus loin et interprète la détection des contours effectuée par le cortex visuel primaire en termes de compression de l'information. Nous y reviendrons dans la conclusion. Les « modèles de contours » consistent à représenter une image par un ensemble de courbes que l'on puisse dessiner. Pour le peintre, il s'agira d'une esquisse. En traitement de l'image, les contours sont les bords des objets ; ils les délimitent. Mais ceci n'est qu'un point de vue naïf, car la définition des bords des objets inclus dans une image est un problème mal posé. On pense au clair-obscur de Léonard de Vinci d'où les contours sont absents. Il faut évidemment en dire plus sur la nature des

contours utilisés et sur les algorithmes qui en assurent le tracé. Nous ne pouvons en dire plus ici et renvoyons le lecteur aux sections 8 et 9. Une seconde interprétation des découvertes de Hubel et Wiesel sera donnée dans la section 6.

4. Les images numériques

Le traitement de l'image est une discipline très jeune qui est née avec la révolution numérique. Seules les images numériques peuvent être manipulées à l'aide d'algorithmes qui soient reproductibles. Avant l'invention de la photographie, les peintres avaient le monopole de la production des images et leur perception du monde extérieur faisait partie de l'acte de peindre. En quelques traits de crayon, un dessinateur habile peut faire surgir, de façon précise et exacte, un visage familier. Le problème de la compression des images était ainsi résolu par le dessin, mais le résultat dépendait du talent du dessinateur. Les manipulations sur les photographies argentiques étaient de l'ordre du savoir-faire et n'étaient donc pas reproductibles. On pense aux retouches effectuées sur les photographies officielles des dignitaires de l'ex-URSS. Aujourd'hui les caméras numériques nous proposent des images "objectives" du monde, vierges de toute perception humaine, et que l'on peut manipuler à volonté.

Revenons alors à notre problème : La compression des *images digitales est-elle reliée à leur perception*? Signalons tout de suite qu'il s'agit ici de compression avec perte (dite *lossy*). C'est-à-dire qu'après cette compression, l'image n'est plus exactement la même ; elle a été simplifiée. Pouvons-nous accepter cette simplification ? Ne risque-t-on pas de caricaturer l'image de départ ? On ne dispose malheureusement pas à l'heure actuelle de critères objectifs permettant de décider de la qualité d'un algorithme de compression. On demande que l'image produite par l'algorithme soit perçue comme étant proche de l'image originale. C'est pourquoi il convient de savoir en quoi consiste la perception pour pouvoir juger de la compression des images.

La seconde relation entre *perception et compression* est plus subtile, car elle repose sur l'étude de la cohérence interne des images. En effet, si la compression des images fixes peut se faire à des taux impressionnants, c'est que l'information fournie par une image naturelle est fortement redondante. Comme nous l'avons déjà indiqué, cette redondance vient de ce qu'une image naturelle est structurée. La *syntaxe* qui est responsable des structures présentes dans les images naturelles peut être vue comme une traduction des contraintes logiques imposées par la



Vladimir Illitch Lénine (1870-1924) haranguant les foules, de la chaire Thomas d'Aquin (1225-1274), à Viterbe, Italie. (Montage de Nicolas Guilbert)

rationalité des lois de la physique. Cette *syntaxe* pourrait aussi être interprétée comme une aptitude de notre cerveau à ordonner et à classer. Ernst Cassirer considère que *la perception d'une image naturelle est basée sur la reconnaissance des formes ou des structures sous-jacentes qui y figurent*. Il en est de même pour la compression : par exemple, on ne peut résumer un texte si ce texte n'a pas de sens. En revanche, si le texte est trop dense, il est presque impossible de le résumer ; on rejoint le problème de la redondance. De même, on ne peut comprimer une image qui n'est pas structurée. Nous arrivons au cœur de notre débat en posant à nouveau la question suivante : *Existe-t-il dans les images des formes simples et universelles qui soient à la base de la compression et de la perception ?* Nous proposerons trois formes simples, les ondelettes, les curvelets et les bandelets et décrirons les algorithmes de compression correspondants ; chacun d'eux est adapté à un modèle particulier de bords.

5. Les ondelettes

L'analyse par ondelettes est née, à la fin des années 70, d'une étonnante découverte faite par un ingénieur, Jean Morlet. Cette découverte fut comprise et acceptée par un physicien, Alexandre Grossmann, puis par des spécialistes du traitement du signal. Vingt ans après, l'analyse par ondelettes débouchait sur le nouveau standard, nommé JPEG2000, de compression des images fixes. Ancien élève de l'École Polytechnique, Morlet était ingénieur de recherche chez Elf-Aquitaine. Quand il découvrit les ondelettes, Morlet travaillait depuis déjà une vingtaine d'années dans le secteur de la vibrosismique. Morlet créa l'analyse par ondelettes pour surmonter certaines difficultés rencontrées dans l'analyse des signaux acquis lors des campagnes pétrolières. De quoi s'agit-il ?

Autrefois, pour chercher du pétrole, on faisait exploser des charges et les échos recueillis permettaient d'estimer la position, la profondeur et la forme de la cavité contenant l'or noir. Les experts engagés par les compagnies pétrolières, les sourciers, étaient alors des physiciens. Analyser les bruits répercutés par le sous-sol, c'était imiter le savoir-faire du médecin qui, à l'aide du stéthoscope, ausculte le malade en écoutant sa respiration ou les battements de son cœur.

Pierre Goupillaud, collègue et ami de Jean Morlet, était au départ un ingénieur français. Il s'expatria aux USA et travailla pour la compagnie pétrolière Conoco, (aujourd'hui ConocoPhillips) dans le secteur de la géophysique. Goupillaud suggéra d'envoyer dans le sous-sol une vibration, courte et modulée en fréquen-

ce, au lieu de faire exploser des charges. L'énergie dépensée et les dégâts occasionnés sont alors réduits. Ce même principe est utilisé par le sonar de la chauve-souris. La vibrosismique était née. Mais les échos recueillis sont bien plus complexes à analyser que dans le cas des explosions de charges. Les physiciens durent céder la place à des spécialistes du traitement du signal. Ces derniers élaborèrent des logiciels informatiques qui, en un sens, imitent le fonctionnement du cerveau de la chauve-souris. Grâce à la vibrosismique, Elf-Aquitaine a pu mener une campagne pétrolière à Paris même. Les camions-vibrateurs ont sillonné les artères parisiennes pendant une quinzaine de jours, au milieu de nuits d'hiver de l'année 1986. L'exploitation des résultats a demandé une année entière. Cela donne une idée des difficultés rencontrées dans la vibrosismique.

Jean Morlet analysait donc les signaux provenant de la vibrosismique. Ces signaux sont des courbes graphiques assez irrégulières qui présentent de fortes parties transitoires (c'est-à-dire des comportements brutaux et inattendus). Jean Morlet étudiait ces courbes à l'aide d'une technique éprouvée, l'analyse de Fourier à fenêtre (en fait à l'aide des ondelettes de Gabor qui seront définies dans la section suivante). Mais un jour, Morlet, lassé des artefacts produits par cette technique, découvrit une nouvelle façon de représenter ce type de signaux. C'est ainsi que Morlet créa l'analyse par ondelettes.

J'ai souvent discuté avec Jean Morlet. Il ressemble beaucoup à Benoît Mandelbrot. Tout comme Mandelbrot, Morlet a une extraordinaire intuition et une réelle vision scientifique. Il a tout de suite compris la portée de sa découverte et a essayé d'alerter Elf-Aquitaine. Mais Elf-Aquitaine venait d'être la victime consentante d'une énorme escroquerie ; un escroc était arrivé à persuader les "têtes pensantes" de l'entreprise que l'on pouvait "flairer le pétrole" à l'aide des trop célèbres "avions renifleurs". Pour bluffer les "têtes pensantes" et autres "décideurs" d'ELF, l'escroc présentait, dans un certain ordre, des objets dans une pièce. Ces objets étaient "reniflés" par un miraculeux "gadget" situé dans une autre pièce. Ce gadget reconstruisait, en temps réel, les images des objets sur un écran d'ordinateur, lui aussi situé dans l'autre pièce. Les décideurs d'ELF étaient médusés. L'escroquerie fut révélée par Jules Horowitz, membre de l'Institut, qui eut l'idée d'inverser l'ordre de passage des objets présentés au "nez" du gadget. Comme tout était pré-enregistré, les images défilèrent évidemment dans l'ordre ancien. Mais c'était trop tard et l'argent d'ELF avait disparu.

Passant de l'extrême crédulité à une extrême méfiance, Elf-Aquitaine répondit à la découverte de Jean Morlet en lui octroyant une retraite anticipée. Plus de dix ans après cette mise à la retraite, Morlet obtint le prix Reginald Fessenden de la Société Américaine de Géophysique. Lors de la cérémonie, Pierre Goupillaud présenta l'œuvre de Morlet et dit : « *A product of the renowned Ecole Polytechnique, Morlet performed the exceptional feat of discovering a novel mathematical tool which has made the Fourier transform obsolete after 200 years of uses and abuses, particularly in its fast version... Until now, his only reward for years of perseverance and creativity in producing this extraordinary tool was an early retirement from ELF* ».

Roger Balian qui enseignait la physique à l'École Polytechnique orienta Jean Morlet vers Alexandre Grossmann. Alex Grossmann, directeur de recherches au CNRS, travaillait à Marseille-Luminy, au centre de physique théorique. Alex Grossmann fut patient, subtil et comprit ce que Morlet avait dans l'esprit. Grâce à la clairvoyance de Grossmann, les résultats de Morlet ont pu être publiés en 1984. Écouter Morlet n'était certainement pas une tâche aisée, tant ses idées étaient originales, allusives, approximatives et souvent exagérément optimistes. J'en parle d'expérience. Morlet pensait, par exemple, que l'analyse par ondelettes allait révolutionner la vibrosismique et la prospection pétrolière. Quelque chose d'autre s'est produit : les ondelettes servent à comprimer et transmettre les données recueillies dans les campagnes pétrolières.

Ni Grossmann, ni Morlet ne sont des numériciens. Ils avaient bien proposé des algorithmes de calcul pour la transformée en ondelettes et pour la transformée inverse, mais ces algorithmes étaient lourds sous leur forme exacte et imprécis sous leur forme approchée, alors que la révolution numérique repose sur l'utilisation d'algorithmes exacts et rapides. Par exemple, la transformation de Fourier peut se calculer par un algorithme rapide, dénommé *Fast Fourier Transform* ou *FFT*. C'est un algorithme exact. Il a été découvert, en 1965, aux États-Unis, par James W. Cooley et John W. Tukey. Sans la *FFT* le calcul d'une transformation de Fourier serait prohibitif. Il faudrait N^2 opérations pour un signal de longueur N . Avec la *FFT* ceci se réduit à $2N \log_2 N$. Plus concrètement cela revient à comparer un temps de calcul qui ne prend qu'une seconde à un temps de calcul qui prendrait plusieurs semaines. Sans la possibilité qu'offre la *FFT* de calculer une transformée de Fourier en temps réel, l'imagerie médicale ou la biologie moléculaire n'auraient pas vu le jour.

En ce qui concerne l'analyse par ondelettes, un long chemin restait à parcourir et il a fallu attendre les travaux d'Ingrid Daubechies, d'Albert Cohen et de Stéphane Mallat pour que la *Fast Wavelet Transform* se hisse au niveau atteint par la *FFT*. Le calcul de la *FWT* d'un signal de longueur N est exact et ne nécessite que CN opérations (C est une constante que nous retrouverons dans ce qui suit).

La construction de la *FWT* bénéficiait de deux découvertes antérieures : *les algorithmes pyramidaux et le codage en sous-bandes*. Les algorithmes pyramidaux furent découverts par P. Burt et E. H. Adelson en 1983, dans le cadre du traitement de l'image. Utiliser un algorithme pyramidal pour analyser une image revient à prendre du recul en reculant pas à pas (la pyramide se construit pendant cette itération). On rejoint ainsi le point de vue de Merleau-Ponty : il convient de prendre du recul pour percevoir une image ou un tableau dans un musée, car notre perception se réorganise et s'affine dans ce zoom arrière. Mallat découvrit en 1986 que l'analyse par ondelettes d'une image est un cas particulier d'algorithme pyramidal. Mais les *algorithmes pyramidaux* ne fournissent pas encore les bases orthonormées d'ondelettes ; c'est pour résoudre ce problème que Mallat proposa de construire la pyramide à partir de la version orthogonale du *codage en sous-bandes* ou *subband coding*. Ce codage et sa version orthogonale avaient été inventés en 1977 par D. Esteban et C. Galand au centre d'IBM de La Gaude. Leur motivation était le téléphone digital. Ni l'application à l'image, ni le problème de la stabilité dans le zoom arrière n'avaient pas été abordés par D. Esteban et C. Galand. Les algorithmes qu'ils proposaient ne pouvaient être utilisés sans précaution par Mallat ; la pyramide construite à l'aide du codage en sous-bandes peut s'effondrer. Nous devons à Mallat et à l'auteur de cet article d'avoir posé ce problème et à Albert Cohen et Ingrid Daubechies d'avoir complété l'étude de la stabilité de ces pyramides.

La construction, par Ingrid Daubechies (1987), des bases orthonormées d'ondelettes à support compact, de régularité r donnée, était la suite logique de ce programme. Cette régularité peut être aussi élevée que l'on veut, mais la base choisie dépend alors de r . La longueur du support de l'ondelette est la constante C intervenant dans la *FWT*. Le seul cas connu était celui du système de Haar (1909). Les ondelettes à support compact conduisent à des algorithmes qui fonctionnent en temps réel, alors même que le signal défile. Le calcul de la *FWT* se fait sur une *fenêtre mobile*, ajustée à l'échelle, et ne met donc en jeu que C

échantillons du signal. Dans le cas du système de Haar, l'algorithme calcule la demi-somme et la demi-différence entre deux valeurs consécutives. Mais le manque de régularité du système de Haar excluait toute application à la compression des images fixes. L'année suivante, Ingrid Daubechies construisit, en collaboration avec Albert Cohen et Jean-Christophe Feauveau, les ondelettes bi-orthogonales. Ce sont elles qui seront utilisées dans JPEG 2000.

6. La décomposition en composantes indépendantes ou ICAT

Peut-on mieux comprendre le succès des ondelettes en traitement de l'image ? Voici une nouvelle façon d'étudier cette question. Les neurophysiologistes se sont intéressés aux représentations efficaces des images et en particulier des images de scènes naturelles. Une image brute provenant du monde extérieur contient une information gigantesque et il est exclu qu'elle soit intégralement perçue par le système visuel animal ou humain. L'hypothèse de travail de certains neurophysiologistes est la suivante : si les cellules du cortex visuel primaire sont affectées aux tâches spécifiques de reconnaissance de certaines structures géométriques que nous avons décrites dans la troisième section, c'est peut-être parce que cette solution biologique au problème de la perception d'une image est optimale en terme de d'analyse et de compression des données. On peut penser qu'à la suite d'un lent processus d'évolution, la sélection naturelle ait conduit à cette spécialisation croissante des neurones du cortex visuel primaire.

Peut-on établir scientifiquement l'assertion suivante : « Si l'on optimisait l'analyse (plus précisément la détection ou la perception) des images provenant de scènes naturelles, on retrouverait précisément les images élémentaires qui correspondent aux diverses spécialisations des cellules du cortex visuel primaire ? » Cette question fondamentale sera étudiée en faisant appel à l'analyse en composantes indépendantes. Cette technique d'analyse est basée sur le concept intuitif de « contraste ». L'hypothèse de travail est que pour extraire une information pertinente d'un grand ensemble de données complexes et qui ne semblent pas structurées, il faut optimiser le contraste, c'est à dire disposer de différents points de vue à partir de directions les plus éloignées les unes des autres.

En suivant les travaux de D.J. Field et de B.A. Olshausen, nous chercherons à relier l'analyse des images de scènes naturelles qui est effectuée par le cortex visuel primaire à l'analyse de ces mêmes scènes que fournirait l'ICA, *independent*

component analysis, ou analyse en composantes indépendantes.

L'analyse en composantes indépendantes est née des problèmes de la séparation de sources et de la « déconvolution aveugle » qui se rencontrent, par exemple, dans l'utilisation des radars et que nous allons maintenant évoquer. On peut citer (en vrac) les noms de Bernard Picinbono, Christian Jutten, Odile Macchi, Jean-François Cardoso et Jean-Louis Lacoume, sans oublier David Donoho. Une première initiation à ces méthodes m'a été donnée par Jean-Louis Lacoume et le site web de Jean-François Cardoso (<http://sig.enst.fr/cardoso/stuff.html>) est une référence conseillée.

Voici le point de départ : un signal observé nous semble inintelligible, mais, en fait, cette complexité provient de ce que ce signal est un mélange, une combinaison linéaire entre plusieurs signaux « sources ». Ce mélange a créé la complexité apparente et a brouillé les sources. Par exemple, tout le monde parle à la fois dans une pièce et l'on ne comprend plus rien. Il s'agit alors d'extraire les conversations particulières. L'hypothèse essentielle qui fonde l'ICA est que les sources sont statistiquement indépendantes. C'est une hypothèse très forte. Si elle était remplacée par la décorrélation, on retomberait sur l'analyse en composantes principales.

D.J. Field et B.A. Olshausen ont utilisé l'ICA pour essayer de comprendre la façon dont fonctionne la vision humaine. Ces chercheurs ont appliqué un algorithme d'analyse en composantes indépendantes à une base de données d'images naturelles. A la plus grande surprise des chercheurs, les fonctions de base (les sources) obtenues sont des ondelettes ! Nous ne faisons pas ici de distinction entre ondelettes de Gabor et ondelettes de Grossmann-Morlet. Dans le premier cas on part d'une gaussienne d'écart type σ , que l'on module arbitrairement en fréquence par multiplication par $\exp(i\omega x)$ où, au facteur 2π près, ω désigne la fréquence. Puis on translate en position ces gaussiennes modulées et l'on parle alors d'atomes temps-fréquence ou d'ondelettes de Gabor. Dans le second cas, les ondelettes sont indexées par un paramètre positif α et un vecteur de translation β et sont définies en dilatant une ondelette-mère ψ par le facteur α , puis en effectuant sur l'ondelette dilatée ψ_α la translation par β . On parle alors d'ondelettes temps-échelle. L'ondelette-mère ψ doit satisfaire trois propriétés essentielles : être localisée (un support compact est idéal), être oscillante (l'intégrale de l'ondelette-mère doit être nulle, mais plusieurs autres moments nuls sont encore mieux) et enfin être la plus régulière possible,

compte tenu des deux conditions précédentes. L'ondelette-mère ψ est oscillante et n'a donc pas besoin d'être modulée. D.J. Field et B.A. Olshausen découvrirent que les images correspondant à ces ondelettes sont précisément les briques de base des images naturelles ; or ces briques de base sont détectées de façon privilégiée par les cellules du cortex visuel primaire. Il y a ici une extraordinaire convergence entre la neurophysiologie et l'analyse en aveugle, sans préjugé, des images. L'analyse en composantes indépendantes justifierait donc le travail effectué par les cellules du cortex visuel primaire. Rappelons les titres des travaux de D.J. Field et B.A. Olshausen. Ces titres, *Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code for natural images* ou bien *Sparse coding : A strategy employed by V1?* sont, en eux-mêmes, des programmes scientifiques.

7. Le standard JPEG 2000 et la compression des images fixes

Venons-en à ce qu'on appelle la technologie et, dans le cadre de la révolution numérique, au problème de la compression des images fixes. Une image en noir et blanc est vue comme une fonction, définie dans un rectangle, et dont les valeurs sont appelées les *niveaux de gris*. Ces niveaux de gris sont conventionnellement compris entre 0 et 1. Dans cette convention, 0 correspond au noir tandis que 1 est un blanc fortement éclairé. Le rectangle est ensuite remplacé par une grille fine (c'est-à-dire un réseau) dont les points sont appelés des pixels. L'image devient alors une énorme matrice. Les valeurs exactes des niveaux de gris sont finalement remplacées par des approximations digitales, c'est-à-dire par des suites de 0 et 1. L'image est ainsi devenue une suite finie de 0 et 1. Bien entendu, cette première représentation de l'image est très onéreuse et l'on cherchera à la rendre plus concise. Représenter une image par une suite concise de 0 et 1 pose des problèmes qui touchent à un ensemble de disciplines incluant les mathématiques, mais aussi la physique statistique ou les sciences cognitives.

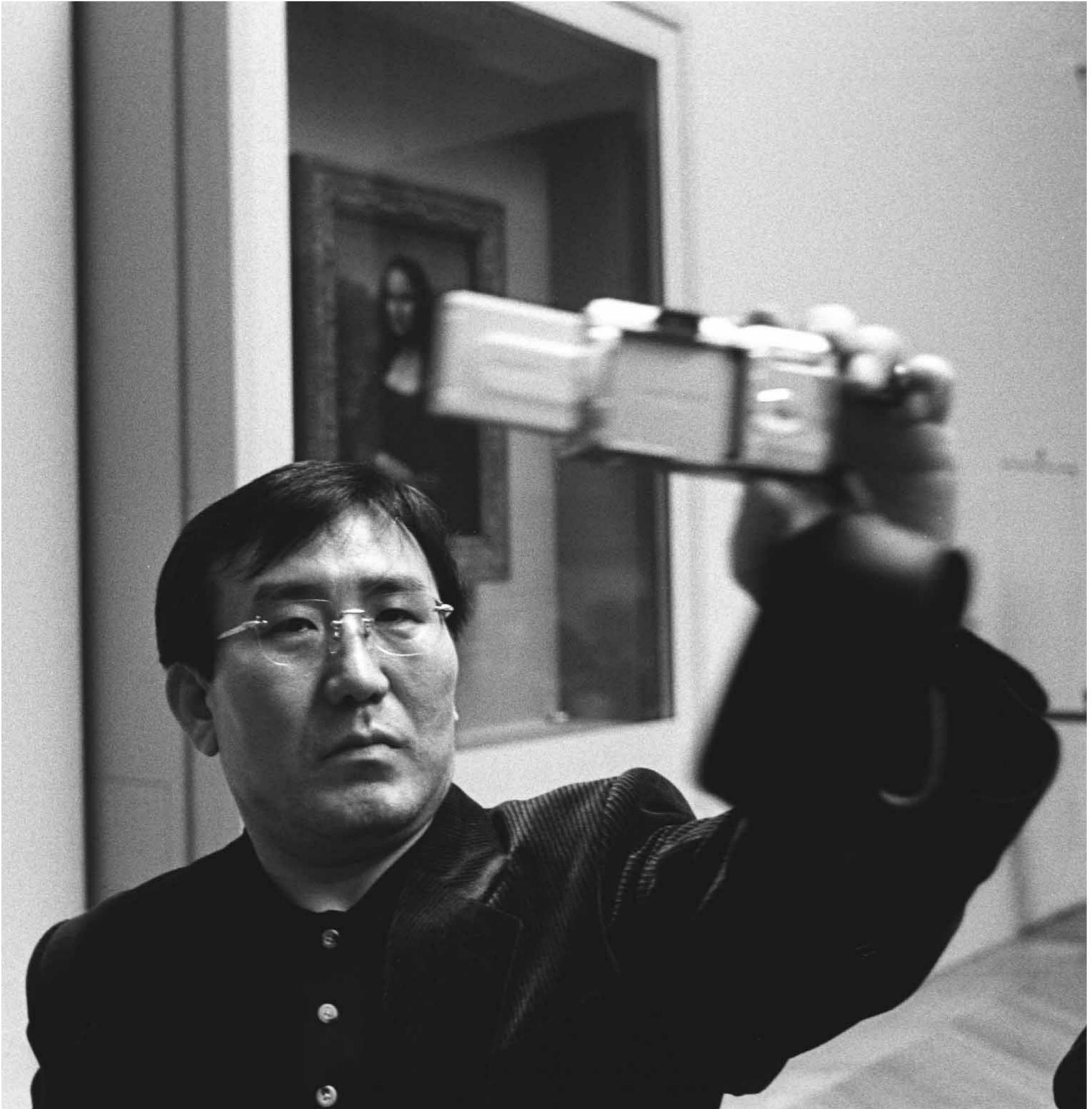
La chaîne de transmission des images se compose de trois tronçons. Le premier est le codage de l'image : on vous donne une image et vous devez la représenter par une suite concise de 0 et 1, ce qui vous oblige à négliger une partie importante de l'information contenue dans l'image en question. Vous voulez ensuite transmettre ces 0 et 1. Apparaissent alors tous les problèmes de codage en ligne qui font appel à la théorie des nombres, aux codes correcteurs d'erreurs, etc. Enfin vous devez

décoder la suite de 0 ou de 1 reçue afin de reconstruire une image qui soit perçue comme la plus proche possible de l'image de départ.

On touche, à nouveau, un point qui se relie aux neurosciences : « perçue comme la plus proche possible » signifie que c'est l'œil qui décide si l'image reçue est de bonne qualité, si elle lui plaît ou ne lui plaît pas. On profite alors des capacités de masquage liées à la vision humaine, c'est-à-dire du fait que l'œil est plus sensible à certains défauts qu'à d'autres. Les algorithmes de compression et de décodage doivent être conçus en tenant compte de la sensibilité de l'œil et, dans la littérature portant sur le traitement d'images et les problèmes de compression, vous avez toujours le jugement de l'expert qui vous dit si l'erreur est admissible ou pas ! Le jugement se fait donc par un groupe d'experts : JPEG signifie d'ailleurs *Joint Photographic Expert Group*, groupe d'experts commun à l'ISO (organisation internationale de normalisation) et à la CEI (commission électronique internationale) chargée d'établir les normes de codage numérique de compression pour les images fixes.

L'algorithme de compression des images fixes qui était utilisé jusqu'aujourd'hui est le célèbre JPEG. L'algorithme JPEG consiste à découper l'image en blocs 8 fois 8 et à utiliser une analyse de Fourier discrète sur chaque bloc. JPEG fournit une bonne qualité pour des taux de compression de l'ordre de 10. L'objectif de JPEG 2000 est de passer de 10 à 100 !

Comme nous l'avons déjà dit, l'un des points de départ de JPEG2000 a été le codage en sous-bandes ou subband coding, découvert à la fin des années 70 par D. Esteban et C. Galand, au centre de recherche IBM de La Gaude (près de Nice). Le codage en sous-bande va remplacer, dans JPEG 2000, la DCT (Discrete Cosine Transform) qui était utilisée dans JPEG. En gros, pour compresser une image, on commence par l'analyser en utilisant « l'algorithme de Mallat », c'est-à-dire l'algorithme rapide de calcul des coefficients d'ondelettes ; c'est ici qu'intervient le codage en sous-bande. Ensuite on quantifie les coefficients réels obtenus en les remplaçant par des approximations digitales appropriées. On hérite ainsi d'un ensemble fini de 0 et 1 que l'on transmet. On reconstruit alors l'image en utilisant le fait que les ondelettes forment une base orthonormée. Mais, comme les coefficients ont été quantifiés, on ne retombe pas exactement sur l'image de départ. L'erreur commise s'analyse en faisant appel à une très belle théorie mathématique, celle des bases inconditionnelles que l'on trouvera exposée dans les travaux de Ron DeVore



La distance vis à vis d'une œuvre, d'un tableau que nous admirons, nous la créons en prenant du recul et en sentant alors ce tableau se réorganiser au cours de ce " zoom arrière ".

(voir les références). Cette théorie permet de prévoir les effets du bruit de quantification. Les bases orthonormées d'ondelettes sont des bases inconditionnelles universelles ; c'est une nouvelle explication de leur supériorité sur les séries de Fourier qui constituent, de ce point de vue, le pire choix possible. C'est une nouvelle explication de la supériorité de JPEG 2000 sur JPEG.

Je voudrais encore insister sur cette liaison profonde, organique, entre le traitement d'images, vu du point de vue de l'informaticien, et les problèmes qui touchent la neurophysiologie et les neurosciences en vous citant (en traduction) un texte écrit par Peter Burt et son équipe dans les années 1980. Peter Burt y explique les performances de l'analyse des images par ondelettes et y prévoit le

succès de JPEG 2000 : « Pour compresser les images, on va utiliser des transformations pyramidales. On décompose donc l'image en un ensemble de fonctions de base qui correspondent à une orientation en fréquences spatiales, qui sont localisées et auto-similaires. Pour des raisons de facilité de calcul, on veut aussi que cet ensemble soit orthogonal et soit fourni par un algo-

rithme rapide... De telles transformations sont très utiles pour de nombreux aspects des images, car elles donnent des informations sur les changements d'intensité lumineuse à différentes échelles et les endroits où ces changements sont en train d'apparaître. Il y a aussi de fortes présomptions pour que le système visuel opère une décomposition de l'image similaire à celle-ci dans

Question d'actualité

son traitement de bas niveau, c'est à dire avant que les fonctions cognitives n'entrent en jeu ».

8. Le modèle d'Osher, Rudin et Fatemi

Une image en noir et blanc y est encore et toujours vue comme une fonction définie dans le plan et dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1. Ici 0 correspond au noir tandis que 1 est un blanc fortement éclairé. Par ailleurs cette fonction peut (et doit) présenter de fortes discontinuités qui correspondent aux bords des objets. Pour nous autres mathématiciens, une telle fonction est mesurable et bornée. Bien entendu la réciproque n'est pas vraie : toute fonction mesurable et bornée ne correspond pas à une image naturelle. Une quantité vraiment minuscule de telles fonctions provient d'images naturelles et le but de la modélisation consiste à en savoir un peu plus. Un des modèles utilise l'espace des fonctions à variation bornée dont la définition a été trouvée, en 1926, par le mathématicien italien Leonida Tonelli (Note aux CRAS, présentée par Jacques Hadamard, le 10 mai 1926). Il s'agissait de résoudre un problème posé par Lebesgue : savoir quand la surface du graphe d'une fonction continue f définie sur le carré unité est finie. Un problème contigu est la définition de cette surface. Mais ce dernier problème avait été résolu par Lebesgue. Alors le graphe a une surface finie si et seulement si la fonction f est à variation bornée. Passons à la version actuelle et moderne, de l'espace BV. On ne suppose plus que f est continue et sa norme dans l'espace BV des fonctions à variation bornée est, par définition, l'intégrale sur tout le plan de la longueur du gradient de f . Ce gradient est pris au sens des distributions (cette théorie n'existait pas encore en 1926). Si la fonction f est la fonction indicatrice d'un ensemble E , alors la norme de f dans BV est la longueur du bord de E , aussi notée le périmètre de E . Ceci est vrai si E est régulier et demande à être précisé dans le cas d'un ensemble E arbitraire (le bord de E doit être remplacé par le bord distingué de E). Le modèle d'Osher, Rudin et Fatemi consiste à définir une image f comme une somme $f = u + v$ entre une composante u , appartenant à BV, et qui modélisera les objets contenus dans l'image et une composante v qui modélisera la texture et le bruit. La composante v sera, tout simplement, de carré intégrable, car on ne peut plus trouver de structure géométrique dans v . Bien entendu, il y a une infinité de telles décompositions $f = u + v$ et l'on décide de choisir celle qui minimise une fonctionnelle $J(u)$ qui est définie comme la somme $K(u) + cR(v)$ entre deux termes $K(u)$ et $cR(v)$. Le terme $K(u)$ est simplement la norme de u dans BV tandis que

$R(v)$ est la valeur quadratique moyenne de v ; la constante c est réglée après quelques expériences. En effet le choix de ce paramètre positif c sert à décider à partir de quelle taille les "petits" objets doivent être regardés comme des textures.

Albert Cohen et ses collaborateurs ont montré que l'algorithme JPEG 2000 de compression des images fixes est le meilleur possible si l'on accepte le modèle d'Osher, Rudin et Fatemi. Cette remarque implique que l'on ne peut battre JPEG 2000 qu'en adoptant un autre modèle, ce qui est l'objet de la section suivante.

9. Les ondelettes ne sont pas optimales, car 500 octets suffisent

Pendant les années où JPEG 2000 a été élaboré, la "quête du graal" a continué. Il s'agissait de faire mieux que les ondelettes dans la course à la compression. Cela n'est possible qu'en utilisant des modèles plus précis que le modèle d'Osher, Rudin et Fatemi. Plusieurs chercheurs ont ainsi cherché à mieux tirer parti des particularités géométriques des images. Modélisons les images en imitant le peintre Ingres. Dans ce modèle, une image est définie par un ensemble de lignes assez régulières délimitant des zones où l'éclaircissement varie peu. Ces lignes seront appelées des bords. Dans le modèle d'Osher, Rudin et Fatemi, la contrainte imposée aux lignes est d'avoir des longueurs finies (elles peuvent alors être assez irrégulières). Ici nous insisterons, au contraire, sur la régularité. Si l'on utilise l'analyse par ondelettes pour décrire une telle image et si l'on désire atteindre une précision de l'ordre de $1/N$, il faut utiliser au moins N ondelettes distinctes, ce qui revient à coder les positions d'au moins N points (nous ne tenons pas compte de constantes multiplicatives et N signifie, en fait, CN). Il est clair que ce codage conduit à un gaspillage et que la même précision peut être obtenue en utilisant seulement $N^{1/2}$ données. Il suffit pour le voir de fournir les positions de $N^{1/2}$ points des bords et des $N^{1/2}$ tangentes à ces points. En utilisant l'approximation des bords par les cercles osculateurs, on fait encore mieux etc. Les ondelettes, quant à elles, sont sensibles à la présence de bords, mais n'arrivent pas à suivre la direction de ce bord, car elles sont "isotropes". Elles ne comportent pas un paramètre indiquant une direction. Seules la position et l'échelle sont prises en compte.

La première percée dans la direction de l'anisotropie a été réalisée par Emmanuel Candès et David Donoho. Ces deux chercheurs ont créé les ridgelets qui sont des ondelettes de seconde géné-

ration. Les ridgelets et leurs "cousines" les curvelets s'orientent et s'allongent en épousant automatiquement la géométrie d'un bord éventuel. La construction des ridgelets est un exploit scientifique.

Stéphane Mallat a relevé le défi lancé par Donoho et a fourni, en inventant les *bandelettes*, une solution qui est conceptuellement moins belle, mais bien plus réaliste. Les bandelettes épousent, le plus longtemps possible, le tracé des bords des images. La nouvelle technologie proposée par Mallat est développée par la start-up *Let It Wave* et s'appelle *Let It Wave Codec*. *Let It Wave* a obtenu le premier prix de l'innovation technologique 2002, décerné par le Ministre de la Recherche et de la Technologie.

Quelques mots sur ce dernier algorithme. Le point de départ théorique est la thèse d'Erwan Le Pennec. Dans ce travail, une image est modélisée comme il vient d'être indiqué, à l'aide de contours réguliers délimitant les objets contenus dans l'image. L'éclaircissement à l'intérieur de chaque objet est supposé très régulier. A cette image brute, assez schématique, est ajouté un bruit aléatoire. Le problème posé est la description la plus concise, la plus économique et la plus précise de ce type d'images. Bien entendu, une image réelle n'est pas de ce type; elle est plus complexe. Mais lorsque l'on modélise, on est toujours amené à utiliser un algorithme qui a été optimisé sur un ensemble de cas d'école où se présentent certaines des difficultés que l'on rencontrera dans les situations réelles. L'algorithme utilisé par Le Pennec est hybride, car il mêle l'utilisation des *level sets* de Jean-Michel Morel et Stanley Osher aux ondelettes. Le point de départ est la recherche des bords (supposés doux) des objets. En fait, on cherche seulement une information directionnelle décrivant les lignes parallèles aux bords. C'est ici qu'apparaissent les lignes de niveau de l'éclaircissement. On tire ensuite parti de la régularité locale de cet éclaircissement pour l'analyser à l'aide d'ondelettes anisotropes dont les paramètres sont réglés à l'aide de l'information directionnelle déjà obtenue. Les *bandelettes* de Mallat et Le Pennec ne sont pas fixées une fois pour toutes, comme le sont les ridgelets, mais leur construction s'adapte (automatiquement) à l'image analysée. Le passage d'un travail de recherche à l'application industrielle développée par *Let It Wave* n'était pas une mince affaire et le résultat final obtenu par l'équipe de Stéphane Mallat est une prouesse; 500 octets suffisent pour comprimer les photographies d'identité. Le lecteur dubitatif est prié de se reporter au site de *Let It Wave*. Cet exploit a été le point de départ d'un travail scientifique important où, en toute géné-

ralité, des méthodes innovantes d'analyse sont mises en œuvre pour dévoiler les structures géométriques d'une image, en se basant sur l'information donnée par les coefficients d'ondelettes usuels.

10. Conclusion

Revenons à la question posée : *peut-on relier la compression des images digitales à ce qui fonde la perception ?* Une fois de plus, écoutons David Hubel. Dans *Eye, Brain and Vision*, il écrit : « *Les contours qui séparent les régions sombres et les régions claires sont les paramètres majeurs de notre perception et de notre compréhension du monde visuel... Le cerveau a logiquement évolué de façon à minimiser le nombre de cellules nécessaires au traitement de l'information visuelle. Or la seule information dont nous ayons besoin concerne les bords d'une forme; ce qui se passe à l'intérieur ne compte pas* ».

David Hubel reprend donc à son compte l'hypothèse suivante : l'évolution du système visuel des mammifères aurait privilégié la compression de l'information. Partant de cette hypothèse, on peut considérer que perception et compression de l'information visuelle sont liées, car ce qui a été clarifié par un prétraitement et a été ainsi rendu plus simple ou plus accessible sera mieux perçu. En outre, David Hubel et Stéphane Mallat s'accordent sur la nature de ce prétraitement, puisque, dans les deux cas, il s'agit de construire ou de calculer un "croquis" à l'aide d'un algorithme. Ce croquis ou sketch serait la première étape conduisant à la perception et à la compression. Mais, pour l'instant, il est difficile d'aller plus loin et de choisir l'un des modèles de contours en traitement de l'image en se basant seulement sur les découvertes faites par David Hubel. Doit-on privilégier les contours réguliers ? Peut-on envisager de prendre en compte tous les contours de longueur finie ? Il n'est pas davantage possible de décider du choix d'une base d'ondelettes à lumière de la neurophysiologie. Tout le monde s'accorde à comparer l'activité des neurones de V1 à un calcul de coefficients d'ondelettes. Mais s'agit-il de vraies ondelettes, de curvelets ou de bandelets ? Nous ne le savons pas. En revanche, il n'est pas exclu que le traitement de l'information visuelle effectué dans la zone V2 du cortex corresponde aux nouveaux algorithmes de détection de la géométrie élaborés par Stéphane Mallat. Cette analogie est d'autant plus séduisante que dans un cas, il s'agit d'un post-traitement effectué à partir des données transmises par les neurones de V1, dans l'autre d'un post-traitement à partir de la transformée en ondelette ■

Références : voir sur le site de l'Académie des sciences : www.academie-sciences.fr

Découvertes récentes sur les nouvelles fonctions régulatrices de l'ARN



Comme l'a résumé Jacques Monod,
ce qui est vrai pour la bactérie *Escherichia coli* l'est pour l'éléphant

par **Éric Westhof**¹

Depuis plus d'un demi siècle, la biologie moléculaire s'est construite autour d'un concept central : la transcription de l'information génétique contenue dans l'ADN génomique en molécules intermédiaires, les ARN messagers, qui sont ensuite traduits en protéines. Les protéines mobilisent l'ensemble des rôles structuraux, enzymatiques, et régulent également l'expression des gènes en assemblant les différents composants de la machinerie cellulaire et en interagissant avec eux. C'est, en grande partie, grâce aux atouts de la génétique bactérienne que la biologie moléculaire a progressé si rapidement. Certes, comme l'a résumé Jacques Monod, ce qui est vrai pour la bactérie *Escherichia coli* l'est pour l'éléphant. Cependant, le contrôle de la complexité des organismes eucaryotes requiert des mécanismes moléculaires absents chez les bactéries. Déjà, dans les années 80, la découverte par Thomas

Cech et Sidney Altman des propriétés catalytiques de l'ARN avait ébranlé une vision des mécanismes cellulaires centrée sur les protéines. Les stupéfiantes structures cristallographiques du ribosome, la particule qui synthétise les protéines, ont démontré que le ribosome est un ribozyme ou enzyme à base d'ARN, confortant le rôle central de l'ARN aux origines de l'évolution biologique.

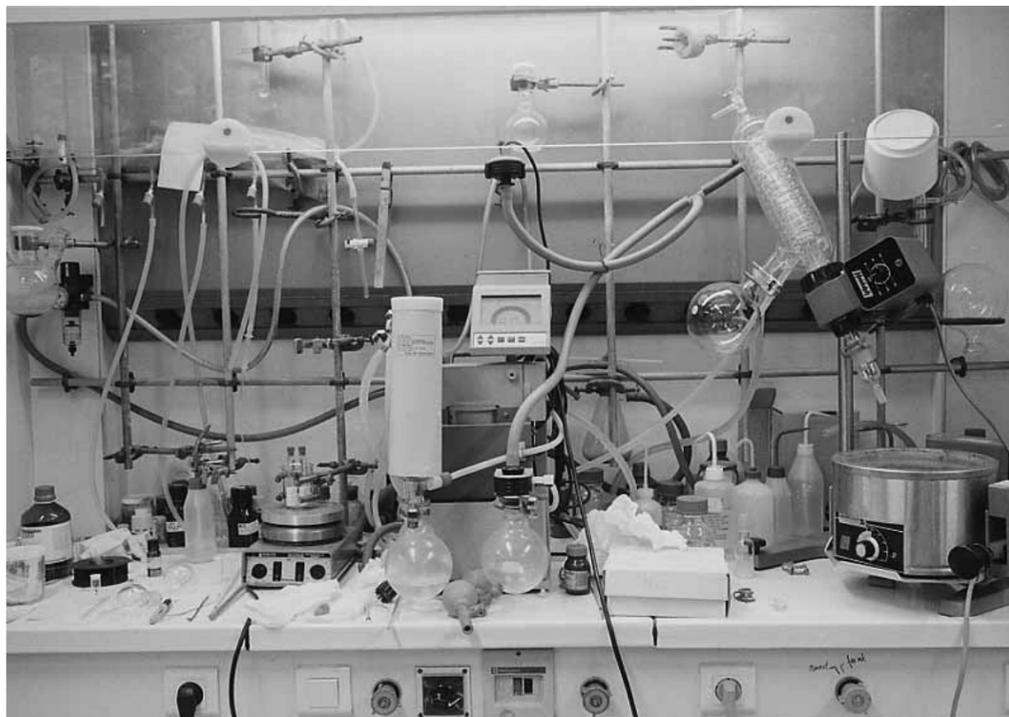
Une explosion de travaux récents sur des plantes, des champignons et des animaux ont révélé de nouveaux mécanismes de contrôle génétique conservés au cours de l'évolution et reliés à l'émergence et à l'évolution de la complexité des cellules et des organismes eucaryotes. Les régulateurs sont de petits ARN non codants, longs de 21 à 25 nucléotides obtenus après maturation soit d'ARN double brin exogène soit d'ARN endogène transcrit à partir de régions intergéniques ou répétitives. Les premiers sont appelés ARN interférents, les seconds microARN. De manière générale, ils agissent selon des processus identiques par lesquels de

l'ARN double-brin, endogène ou exogène, empêche l'expression ou provoque la dégradation d'un ARN messager qui contient des régions homologues à un segment du double brin introduit. Chez les plantes, la complémentarité entre l'ARN messager et l'oligonucléotide provenant du double brin est exacte, ce qui n'est pas le cas chez les vertébrés. Cette différence conduit à des difficultés théoriques de prédiction des cibles, mais aussi biologiquement à une versatilité accrue de régulation. L'interférence de l'ARN constitue un formidable outil d'analyse fonctionnelle génomique. De plus, une fois levées les difficultés de distribution intracellulaire des ARN, le potentiel thérapeutique de l'interférence de l'ARN sera considérable.

Au niveau fondamental, les rôles régulateurs des microARN interviennent dans de nombreux aspects de la vie cellulaire, de la virulence des pathogènes aux mécanismes épigénétiques des eucaryotes. Le répertoire de microARN exprimés dépend du type cellulaire, de

son origine embryonnaire, et de l'état de la cellule. On estime actuellement que le nombre de microARN conservés d'une cellule de mammifère pourrait être proche de 500 et qu'ils réguleraient jusqu'à 30 % des gènes bien qu'ils ne représentent qu'1 % d'un génome de mammifère. Chez l'homme, ce nombre pourrait atteindre 800 car beaucoup de microARN non conservés seraient spécifiques de primates. De plus, les relations entre les microARN et l'édition de l'ARN, particulièrement active dans le cerveau, impliquent les microARN dans l'évolution des primates. Très récemment, il a été montré que l'expression des microARN est fortement atténuée dans les cellules cancéreuses en comparaison des cellules saines et que leurs profils d'expression sont caractéristiques de la lignée tumorale. L'action biologique des microARN s'étend donc bien au-delà de la répression ponctuelle de l'expression génétique. Nous découvrons un nouveau mécanisme de régulation, à l'œuvre depuis les origines des organismes pluricellulaires et insoupçonné il y a seulement quelques années ■

¹ Correspondant de l'Académie des sciences, professeur à l'université Louis Pasteur, directeur de l'unité « Architecture et Réactivité de l'ARN », IBMC, CNRS, Strasbourg



Propriété scientifique et recherche : des pistes pour l'avenir¹

Dans le domaine de la recherche fondamentale, les chercheurs ne se voient reconnaître aucun droit de propriété ou de récompense pécuniaire sur les résultats ultérieurs de leurs découvertes : le Code de la propriété intellectuelle

¹ Actes de colloque, Éditions Tec & Doc, 14, rue de Provigny 94 236 Cachan CEDEX, <http://www.Lavoisier>
² Colloques organisés par l'Académie des sciences et l'Académie des sciences morales et politiques les 15 janvier 2002 et 14 janvier 2004 à la Fondation de la Maison de la Chimie

exclut de toute brevetabilité « les découvertes, théories scientifiques et méthodes mathématiques ». N'est-il pas possible, aujourd'hui, de relancer cette question, à l'heure où la compétition économique mondiale se joue sur le terrain de la recherche, d'une part, où la connaissance des lois de la nature a débouché sur de nouvelles technologies d'autre part ? C'est l'objet du premier colloque présenté ici : « La propriété scientifique : un droit sur les résultats de la

recherche fondamentale ? » Par ailleurs, il est souvent affirmé par les experts que la France dépose de moins en moins de brevets, preuve du mauvais état de santé de sa recherche. Le second colloque – « Entreprise de recherche et recherche dans l'entreprise » – avait pour objet d'analyser et d'expertiser les spécificités des régimes juridiques de l'activité de recherche, pour tenter de cerner les causes de cet affaiblissement, que celles-ci se situent sur le

plan organique, contractuel, fiscal, financier ou sur celui de la valorisation et de la motivation des chercheurs. Par ces deux colloques², regroupés sous le titre « Propriété scientifique et recherche : des pistes pour l'avenir » l'Académie des sciences morales et politiques et l'Académie des sciences poursuivent leur réflexion de fond pour contribuer à construire « l'Europe de la connaissance », souhaitée à l'horizon 2010 ■

Jean-François Bach, Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences



Jean-François Bach a été élu le 21 juin 2005 par ses pairs, Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences pour la division des sciences chimiques, naturelles, biologiques et médicales et leurs applications. Il prendra

ses fonctions le 1^{er} janvier 2006, en remplacement de Nicole Le Douarin.

Né le 8 juin 1940, Jean-François Bach, Professeur d'Immunologie à l'université René Descartes, dirige un laboratoire de recherche à l'hôpital Necker. Médecin et chercheur, il a su remarquablement réussir la synthèse de ces deux activités qui se sont mutuellement enrichies tout au long de sa carrière. Parmi ses contributions majeures à l'immunologie ont

notera la découverte de la thymuline, une hormone du thymus qui assure la maturation des lymphocytes T et la mise en évidence du rôle des cellules T régulatrices dans le contrôle de la reconnaissance du soi. Passionné par la physiopathologie des affections auto-immunes, il a tout particulièrement étudié le diabète insulino-dépendant avec l'ouverture d'approches thérapeutiques innovantes. L'œuvre de Jean-François Bach, marquée par une grande originalité concep-

tuelle, fait de lui l'un des immunologistes les plus en vue dans la communauté internationale.

Le biologiste a su garder une ouverture éclairée sur les liens subtils et mouvants entre Science et Société. Il s'est notamment impliqué dans l'organisation de la recherche et de l'enseignement des sciences au collège. Signalons enfin sa présence dans le comité de rédaction de notre "Lettre" dont il est un des plus actifs animateurs ■

Distinction

Le Bower Award & Prize for Achievement in Science de l'Institut Franklin à Philadelphie, a été décerné en 2005 à Henri Kagan pour ses découvertes dans le domaine de la catalyse. Professeur émérite de l'université Paris-Sud à Orsay, membre de la section de Chimie et président du Comité Lavoisier de l'Académie des sciences, Henri Kagan est le premier Français à recevoir cette distinction créée en 1988 dans le cadre du programme des prix de l'Institut Franklin, souvent regardé comme l'équivalent américain des prix Nobel. La médaille d'or et le prix lui ont été remis lors d'une cérémonie avec les lauréats des médailles Benjamin Franklin, récompensant ainsi l'ensemble de son œuvre pionnière sur la chiralité et la synthèse asymétrique ■



la lettre n° 16 / été 2005
de l'Académie des sciences

Publication de l'Académie
des sciences

23, quai de Conti 75006 PARIS
Tel: 01 44 41 43 68
Fax: 01 44 41 43 84
<http://www.academie-sciences.fr>

Directeur de publication :
Nicole Le Douarin

Directoire :
Nicole Le Douarin
Jean Dercourt

Rédacteur en chef :
Jean-Didier Vincent

Secrétariat général de rédaction :
Marie-Christine Brissot

Conception graphique
Nicolas Guilbert

Photographies :
p.p. 1, 3, 5, 13, 14, 17, 19, 20,
photos N. Guilbert
pp. 6, 7, 8, 9, photos [DR]
La rédaction remercie le service
de communication de l'Observatoire
de Paris pour son accueil.

Comité de rédaction :
Brigitte d'Artemare,
Jean-François Bach,
Roger Balian, Édouard Brézin,
Pierre Buser, Paul Caro,
Jules Hoffmann, Alain Pompidou,
Pierre Potier, Érich Spitz,
Jean-Christophe Yoccoz

Photogravure & impression :
Edipro/Printreference™
01 41 40 49 00

n° de C.P. : 0108 B 06337