Le courrier du CNRS Terre

Auteur(s) : CNRS

Les folios

En passant la souris sur une vignette, le titre de l'image apparaît.

61 Fichier(s)

Les relations du document

Ce document n'a pas de relation indiquée avec un autre document du projet.

Citer cette page

CNRS, Le courrier du CNRS Terre

Valérie Burgos, Comité pour l'histoire du CNRS & Projet EMAN (UMR Thalim, CNRS-Sorbonne Nouvelle-ENS)

Consulté le 16/10/2025 sur la plate-forme EMAN : https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265

Présentation

Mentions légalesFiche : Comité pour l'histoire du CNRS ; projet EMAN Thalim (CNRS-ENS-Sorbonne nouvelle). Licence Creative Commons Attribution – Partage à l'Identique 3.0 (CC BY-SA 3.0 FR).
Editeur de la ficheValérie Burgos, Comité pour l'histoire du CNRS & Projet EMAN (UMR Thalim, CNRS-Sorbonne Nouvelle-ENS)

Information générales

LangueFrançais
CollationA4

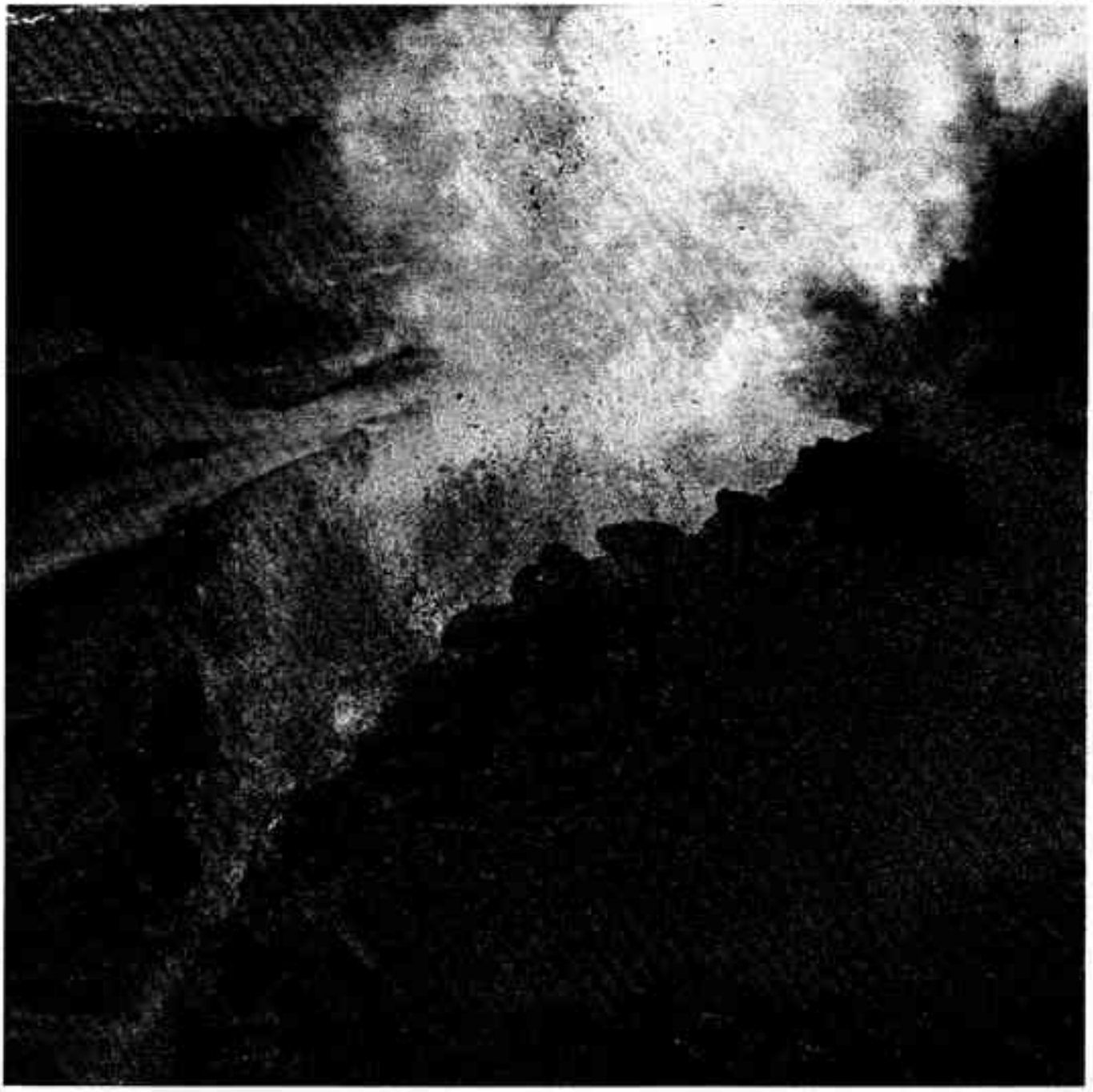
Informations éditoriales

N° ISSN0153-985x
Notice créée par Richard Walter Notice créée le 20/10/2024 Dernière modification le 13/12/2024

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

LE COURRIER DU CNRS

Spécial terre - Juin 1980 - 12 F



Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

CNRS
Dépot des archives
de la Délégation Paris Michel-Ange
Bâtiment 19
1, avenue de la Terrasse
91198 Gif-sur-Yvette

30 000 ans d'informations dans une carotte de glace de 905 m recueillie au Dôme C. Campagne 1977-78, Antarctique. Laboratoire de glaciologie de Grenoble.

Michel PETIT

A l'occasion du 26ème congrès géologique international qui rassemblera à Paris cinq mille spécialistes des sciences de la terre venus du monde entier, il a paru opportun de consacrer un numéro spécial du « Courrier du CNRS » à la Terre. C'est aussi l'occasion d'examiner ce que représente actuellement en France, la recherche géologique et en raison du développement important – on pourrait dire inévitable – de cette recherche dans les prochaines décennies, d'observer comment se prépare l'avenir.

La recherche géologique en France s'effectue au sein des universités et du CNRS d'une part, et au sein de grands organismes à structure semi-étatique d'autre part. Il existe des départements des sciences de la terre dans chaque université scientifique qui, à raison de trois à quatre laboratoires par université, regroupent 850 enseignants-chercheurs. La direction « terre, océan, atmosphère, espace » du CNRS a sous sa responsabilité scientifique, 750 chercheurs et 1 600 techniciens rémunérés par le CNRS. Ces agents travaillent au sein de laboratoires propres ou de formations ayant un contrat d'association avec le CNRS.

Ces contrats d'association sont passés essentiellement avec les universités ; toutefois, il existe des accords avec le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), le Centre national pour l'exploitation des océans (CNEXO) ainsi qu'avec le Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Ces associations avec des grands organismes de recherche autres que l'université préfigurent peut-être une tendance future du CNRS à élargir ses relations organisées avec les grands organismes à vocation appliquée ou industrielle. A côté de la recherche fondamentale menée au sein des universités et du CNRS, il existe des laboratoires de recherche souvent plus appliquée en particulier dans les Ecoles des Mines, à l'Office de recherche scientifique et technique d'Outre-Mer (ORSTOM), au BRGM, au CNEXO, au CEA, à l'Institut français des pétroles (IFP). On peut estimer approximativement à 275 chercheurs, répartis dans une vingtaine de laboratoires, ce potentiel en recherche appliquée qui s'effectue en dehors de l'université. Un certain nombre de sociétés savantes dont principalement la Société géologique de France et la Société française de minéralogie, servent de lieu de rencontre pour cette communauté et par leurs bulletins, assurent la diffusion des résultats scientifiques. Créées il y a près de dix ans, les réunions annuelles des sciences de la terre constituent un forum populaire où se retrouvent pendant quelques jours, chaque année de 500 à 1 000 chercheurs.

Pour répondre aux exigences d'une révolution scientifique comme celle de la tectonique des plaques ainsi qu'à des impératifs économiques pressants (énergie fossile et géothermie, matières premières, environnement et aménagement du territoire), la communauté scientifique subit actuellement une mutation profonde. A la fin du XVIIIe siècle et au début du XIXe siècle, les sciences géologiques sont nées autour de la paléontologie et de la minéralogie ; sont apparues ensuite la stratigraphie, la tectonique et la pétrographie. Le crédit de la découverte de la tectonique des plaques revient essentiellement à la géophysique et plus spécialement à la géophysique marine, qui était à l'époque une discipline pratiquement inexistante en France. Actuellement, le progrès en recherche fondamentale est aussi conduit par des disciplines nouvelles comme la géochimie et la tectonophysique. Les besoins économiques mentionnés plus haut exigent par ailleurs, un développement rapide de la géophysique appliquée, de la métallogénie, de l'hydrogéologie ainsi que de toutes les recherches liées à l'environnement. En cette période de contraintes budgétaires, une telle évolution est certes difficile à réaliser. Elle a cependant cette propriété commune à toutes les évolutions scientifiques de substituer mesure et raisonnement à description et classification. Les sciences de la terre s'ouvrent davantage ainsi à la physique et à la chimie et leur développement serait hâté si des spécialistes de ces secteurs s'intéressaient à la Terre. Puisse ce volume y contribuer.

□ Michel Petit, directeur scientifique par intérim pour le secteur des sciences de la terre, de l'océan, de l'atmosphère et de l'espace.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

le courrier du CNRS

Centre national de la recherche scientifique
15, quai Anatole France
75700 Paris - Tél. : 555.92.25

Directeur de la publication
Wladimir Mercouroff

Secrétaire de rédaction
Martine Chabrier-Elkik

La vie des laboratoires
Véronique Brossollet

Entretiens
Monique Mounier

Comité de rédaction
Martine Barrère, Pierre Chaunu
Michel Crozon, Jean-Didier Dardel,
Francis Garnier, Alain Giraud,
Lucien Hartmann, James Hiéblot,
Jacqueline Mirabel, Geneviève Niéva
Henri Peronnin, Pierre Potier,
Jean-Claude Ribes, Janine Rondest
Lionel Salem

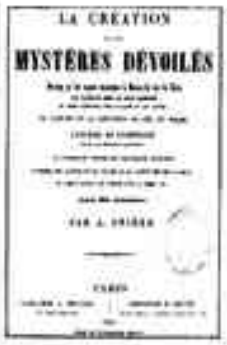
Direction artistique
Guy Clergironnet
Industrie Service

CNRS
Délégation du Siège
Service Logistique
Dépôt des archives - Bâtiment 19
[illegible] rasse
[illegible] tte
Tél : 01 [illegible] 29 17

Spécial terre

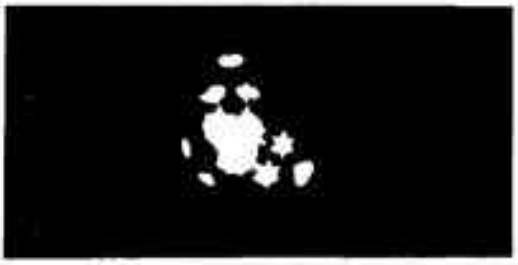
Photo 1 de couverture :
Le volcan Ardoukoba (République de Djibouti) – Un cône de scories de 50 m de hauteur sur 200 m de longueur s'est construit autour de la fissure émissive principale. Le rift d'Asal Ghoubbet est situé à 80 km à l'Ouest de Djibouti et au Sud-Est de la dépression Afar. (Photo Forces Armées Françaises à Djibouti).

Photo 4 de couverture :
Atlas géologique du monde réalisé au 1/10 000 000 – (voir p. 45).



Entretien avec Jean Coulomb 4

L'apport des programmes spatiaux à la connaissance de la Terre
Michel Lefebvre 10



La structure interne de la Terre
Jean-Paul Poirier 15

La naissance de la tectonique des plaques
Xavier le Pichon 22

Les gisements métallifères et leur genèse : la métallogénie
Pierre Routhier 27

La paléoclimatologie
Jacques Labeyrie 38

La télédétection au service du géologue
Philippe Masson 44

Point de vue : incidences économiques et géopolitiques de l'exploitation des matières premières minérales et énergiques
Claude Guillemin 51

Pour en savoir plus 58

Abonnements et ventes au numéro, le numéro 12 F. Abonnement annuel : 40 F (voir bulletin p. 35-36). Tout changement d'adresse doit être signalé au secrétariat de rédaction. Nous remercions les auteurs et les organismes qui ont participé à la rédaction de ce bulletin. Les intertitres et les chapeaux introductifs ont été rédigés par le secrétariat de rédaction. Les textes et illustrations peuvent être reproduits sous réserve de l'autorisation du directeur de la publication – C.P.A.D. 303 – Réalisation ALLPRINT, 8 rue Antoine Chantin, 75014 Paris – ISBN 2-222-02736-5 – © Centre national de la recherche scientifique

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

Entretien avec Jean Coulomb
La terre : on y vit, on en vit

Qu'ils soient physiciens, chimistes, géologues, archéologues, mathématiciens ou économistes, tous les scientifiques contribuent à une meilleure compréhension de notre planète. Jean Coulomb nous présente l'état des connaissances actuelles sur la Terre et explique dans quelles perspectives se situent les recherches nouvelles à l'ère de la conquête de l'espace et de la gestion des ressources naturelles.

On connaît la Terre depuis toujours – On y vit, on en vit – Que sait-on d'elle ?

« Depuis toujours », c'est beaucoup dire. En gros, régions polaires exceptées, terres et mers étaient découvertes à la fin du XVIIIe siècle, mais leur inventaire scientifique ne sera jamais terminé ; il fournit encore constamment des faits significatifs dont l'interprétation, les géologues le savent depuis longtemps, doit être cherchée en profondeur. Les parties de la Terre dont nous avons une connaissance directe, dont nous vivons, puisque nous en tirons nos ressources, ne forment qu'une mince pellicule. Très peu de mines descendent à plus de mille mètres, très peu de forages dépassent quelques kilomètres ; des forages scientifiques russes seraient allés jusqu'à 15 kilomètres. En mer, le bathyscaphe Trieste a presque atteint 11 kilomètres dans le fossé des Marianes ; les explorations scientifiques des fonds, comme celles du groupe FAMOUS dans la dorsale Atlantique se sont faites en soucoupe ou en sous-marin ordinaire. De toute façon, le rayon terrestre est de 6 370 km !

□ Jean Coulomb, membre de l'Institut, a été directeur général du Centre national de la recherche scientifique (1957-1962), et ensuite président du Centre national d'études spatiales (1962-1967). Ses travaux portent essentiellement sur la sismologie et le géomagnétisme.

Sur l'ensemble du globe, les données actuelles ont suffi aux géophysiciens, suivis des géochimistes, pour bâtir des modèles quantitatifs encore fragiles, mais qui coordonnent l'essentiel.

Pouvez-vous esquisser les grandes étapes de cette découverte de la Terre ?

Ce serait long. Disons que les océans d'une part, l'Antarctique de l'autre ont été les dernières régions explorées. L'étude systématique des fonds marins est due en grande partie à Maurice Ewing, mort il y a six ans ; actuellement encore, les forages du Glomar Challenger complètent notre information. Dans l'Antarctique, les lecteurs du Courrier connaissent déjà (1) les travaux du Laboratoire de glaciologie du CNRS dont le dernier carottage, suivi d'une analyse isotopique de l'oxygène et de l'hydrogène, renseigne sur le climat depuis 30 000 ans.

Si, à l'opposé, on remonte au XVIIe siècle, le grand problème posé par la Terre était celui de sa forme ; Newton, interprétant la différence de marche d'une horloge entre Paris et Cayenne comme un effet conjoint de l'attraction universelle et de la force centrifuge, avait correctement conclu à l'aplatissement de la Terre. Mais en France, la majorité de l'Académie refusait l'attraction à distance, se déclarait fidèle aux tourbillons de Descartes, et se fiait exclusivement aux mesures géodésiques, alors peu précises. Le triomphe des Newtoniens dut attendre le milieu du XVIIIe siècle, après le retour des expéditions de Laponie et du Pérou montées par l'Académie des sciences pour forcer la décision.

Les opérations géodésiques ont, bien plus tard, bénéficié de l'utilisation de la radio pour la détermination précise des longitudes, sans que cela permette aux triangulations de traverser les océans. On a longtemps espéré que ce serait le rôle des mesures de gravité, qui progressaient de leur côté : les mesures absolues de la gravité ont atteint la précision du milliardième au Bureau international des poids et mesures, grâce aux progrès de la métrologie ; les mesures relatives sont devenues rapides et commodes grâce aux gravimètres de prospection. Et l'on a étendu ces mesures aux océans qui couvrent, vous le savez, plus de deux tiers de la surface du globe. Il y a soixante ans, Vening-Meinesz faisait osciller des pendules en sous-marin, mais aujourd'hui les mesures par gravimètres embarqués sur des navires de surface sont devenues courantes, et se sont multipliées. C'est un phénomène général, observé par exemple pour les mesures magnétiques ou pour celles du flux de chaleur, qu'une fois vaincues les difficultés liées aux mouvements du bateau, les observations se font beaucoup plus rapidement et plus économiquement qu'à terre, d'où leur multiplication.

Aujourd'hui, suivre le mouvement des satellites artificiels dans le champ de gravité de la Terre est devenu la méthode de choix pour en connaître les grandes lignes. Les mesures terrestres ou marines restent précieuses pour défi-

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

nir les détails, mais commencent à être concurrencées par l'enregistrement des variations de distance entre deux satellites et surtout, en mer, par la mesure au radar altimétrique des distances entre un satellite d'orbite bien connue et la surface liquide, qui est approximativement de niveau zéro.

Le coup d'œil beaucoup trop rapide que nous venons de jeter sur les problèmes posés depuis deux ou trois siècles par l'étude de la pesanteur en direction ou en intensité montre l'ampleur d'un historique qui porterait sur toute la géophysique interne : sismologie, marées simultanées de l'océan, de la terre et de l'atmosphère ; déplacements du pôle, variations de la vitesse de rotation, géomagnétisme, radioactivité des roches, géothermie, etc... Et il resterait encore à évoquer les multiples branches de la géologie et de la géochimie ! J'aimerais parler aussi de la sismologie, parce qu'elle a joué le premier rôle dans la découverte des structures terrestres.

Les satellites géodésiques sont-ils les seuls apports de l'ère spatiale aux sciences de la Terre ?

Certes non, ne serait-ce que pour la vue synthétique de la surface terrestre fournie par les satellites de météorologie, d'océanographie, de télédétection ; témoin une description récente des effets tectoniques produits par la poussée de l'Inde jusqu'en des régions éloignées de l'Asie centrale. La détermination des trois composantes du champ magnétique et de ses anomalies à bord d'un satellite atteint dès maintenant la précision de quelques (ou nanoteslas) (2) suffisante pour envisager des applications à la recherche des minerais.

Les satellites ne sont pas seuls en cause : les sondes spatiales ont apporté une moisson de résultats, notamment une valeur précise du produit de la constante de gravitation par la masse de la Terre. Les instruments qu'elles emportaient, ou déposaient sur la Lune et Mars, magnétomètres, sismomètres ou cataphotes, nous ont fourni des idées sur la structure des planètes. La physique planétaire a bénéficié des acquis antérieurs de la géophysique plutôt que l'inverse. Cependant la mesure répétée, au laser, des distances entre des stations terrestres et les cataphotes lunaires déposés par les astronautes, permet des conclusions sur les variations de la rotation et les déplacements du pôle, phénomènes qui dépendent eux-mêmes des marées terrestres, océaniques, atmosphériques, des déplacements de masses produits par les grands séismes, etc...

La géochimie, à mon sens, a tiré beaucoup d'enseignements des analyses d'échantillons lunaires. La cosmochimie, qui comprend l'étude des météorites et l'interprétation des abondances d'éléments dans l'Univers, a reçu un coup de fouet dont bénéficieront nos idées sur l'origine et l'évolution de la Terre.

Vous semblez séparer soigneusement les diverses disciplines qui concourent à accroître nos connaissances. La pluridisciplinarité n'est-elle pas essentielle dans les sciences de la Terre ?

Cela dépend un peu du moment. Cox, paléomagnéticien de Stanford, constate que les disciplines qui concourent depuis 1962 à la construction de la théorie des plaques avaient eu auparavant, un siècle de développements séparés. Ce n'était peut-être pas un mal : il y a en effet des limites au volume de connaissances bien digérées qu'un scientifique peut avoir présentes à l'esprit pour les confronter, et il n'est guère indiqué de leur ajouter des informations de seconde main. Mieux vaut consulter des experts. C'est ce que faisait Urey après sa conversion à la géochimie. Une telle démarche est légitime si l'expertise sert seulement à choisir un modèle, dont les conséquences seront ensuite éprouvées, sans accepter définitivement un argument d'autorité.

Un chercheur associe rarement plus de deux techniques. La sismologie a pris appui sur les mathématiques et la mécanique, très peu sur la géologie. Mais les contacts avec celle-ci se sont imposés d'eux-mêmes le jour où la sismologie, sûre de ses méthodes, les a appliquées aux régions superficielles.

Je voulais précisément vous demander si les hypothèses simplificatrices et les modèles mathématiques utilisés par beaucoup de géophysiciens cadrent vraiment avec la réalité ?

L'épistémologie n'est pas mon fort, mais je ne vois pas comment on pourrait se passer de modèles si on désire aller au-delà de l'observation immédiate. Les géologues imaginaient des phénomènes sans pouvoir toujours mesurer leurs conséquences. Les géophysiciens, voulant avoir des notions quantitatives sur les milieux et les forces, ont dû, pour tester la validité de chaque idée, accepter les schématisations qui choquent certains. Actuellement, l'emploi des ordinateurs et les progrès de l'analyse numérique permettent d'ailleurs de rendre les modèles beaucoup moins grossiers. L'époque n'est pas lointaine où l'on cherchait aux équations des solutions mathématiquement rigoureuses, en négligeant des termes réputés secondaires, alors qu'on obtient souvent aujourd'hui des solutions approchées utilisant toute la précision des données.

Le choix même des modèles a été longtemps arbitraire, comportant seulement des paramètres à déterminer par comparaison entre les résultats théoriques et les données d'observation. Les répercussions du choix initial étaient très mal connues. Une première amélioration fut l'utilisation de la méthode de Monte-Carlo, où l'on tire au sort les caractéristiques d'un grand nombre de modèles à l'intérieur de limites plausibles. Depuis une douzaine d'années, à la suite de Backus et Gilbert, les géophysiciens considèrent systématiquement ce qu'on appelle le « problème inverse », c'est-à-dire la détermination de l'ensemble des modèles compatibles avec les données possédées et les hypothèses admises. La théorie des problèmes inverses a d'ailleurs trouvé des applications en dehors de la géophysique.

L'amélioration obstinée des modèles quantitatifs comporte cependant le risque de faire oublier la fragilité de leurs principes de base et de retarder une remise en cause éventuellement nécessaire. Votre question, et la précédente sur la pluridisciplinarité, visaient peut-être la longue méfiance des géophysiciens envers la théorie de Wegener. Je pourrais répondre que beaucoup de géologues agissaient de même, mais l'histoire vaut mieux qu'une boutade.

Il est exact que la plupart des géophysiciens, dont Jeffreys, le meilleur mathématicien d'entre eux, ont refusé de passer du fixisme au mobilisme sans démonstration péremptoire : les forces auxquelles Wegener faisait appel étaient inadéquates ; les basaltes océaniques étaient trop résistants et les continents trop enracinés pour une navigation plausible (le mécanisme de la théorie des plaques sera tout différent). Quant à la pression interdisciplinaire, elle était faible : les naturalistes étaient eux aussi divisés et certains voyaient d'un mauvais œil les incursions paléontologiques de Wegener.

Un autre fait montrera que le fétichisme envers une théorie ancienne n'était pas seul en cause : c'est après une longue et célèbre exploration des fonds marins que Ewing et son équipe avaient conclu à leur permanence. Ils avaient pourtant découvert en 1959, le

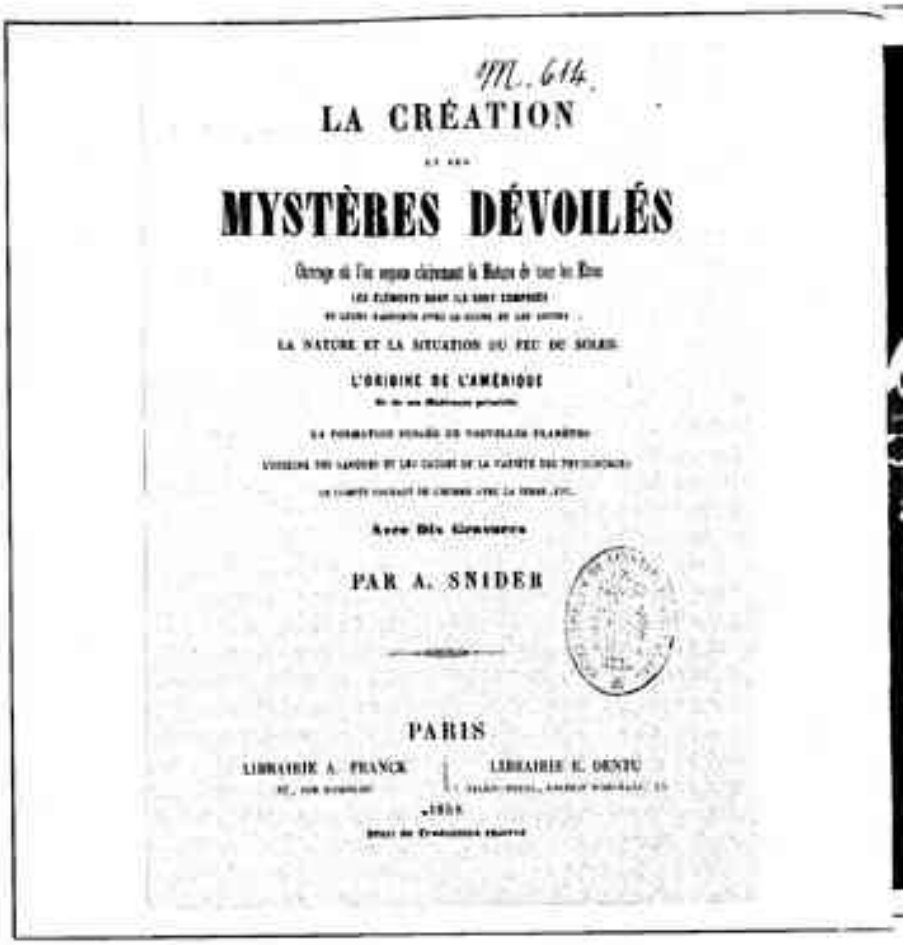
Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

manteau anormal sous la dorsale médio-atlantique et à la même époque, le flux de chaleur s'était montré élevé sous la crête. Les idées de Hess sur l'expansion océanique sont de 1962, l'interprétation des bandes d'anomalies magnétiques par Vine et Matthews de 1963. Mais Ewing ne sera pas convaincu avant 1966.

Le progrès scientifique n'est-il pas tiraillé entre la hâte et la prudence ?

Une prudence exagérée est parfois préférable aux engouements pour des vues imprécises. La science aurait peut-être progressé plus vite si Wegener avait triomphé alors que des pièces essentielles manquaient encore au dossier ; c'était un risque à courir. Mais ce qui est sûr, c'est qu'il eût été grave de prendre au sérieux un précurseur comme Snider (fig. 1), lequel attribuait au déluge la séparation entre l'Afrique et l'Amérique du Sud.

Je ne décris pas les modèles globaux qui se partagent aujourd'hui, la faveur des géophysiciens, la tectonique des plaques faisant l'objet d'un article dans ce même numéro. Quant à la tectonique de détail, il y aurait sur elle beaucoup trop à dire !


M. 614.

LA CRÉATION

ET LES

MYSTÈRES DÉVOILÉS

LA NATURE ET LA SITUATION DU FEU DU SOLEIL

L'ORIGINE DE L'AMÉRIQUE

PAR A. SNIDER

PARIS

LIBRAIRIE A. FRANCK

LIBRAIRIE E. DENTU

Vous souhaitiez parler de la sismologie.

Je serai bref : l'énergie des tremblements de terre est transportée par des ondes, qui renseignent sur les milieux traversés. La sismologie des géophysiciens est donc une acoustique un peu particulière car les milieux rigides propagent, en plus des ondes sonores, une autre espèce d'ondes qui déforme les particules sans changer leur volume (3).

Dans la Terre grossièrement sphérique, les propriétés élastiques varient avec la profondeur ; les ondes sismiques s'y réfractent, brusquement ou continûment, d'où à grande distance une multiplicité de signaux. On s'est contenté longtemps de déterminer leurs instants d'arrivée, ce qui a suffi pour reconnaître la division fondamentale de la Terre en un « manteau » solide ou très lentement déformable, qui va jusqu'à 2 900 km, un « noyau » liquide mis en évidence par Gutenberg en 1914 et qui va jusqu'à 5 100 km, enfin une « graine » solide découverte par Mlle Lehmann en 1936. A vrai dire, les arguments pour la solidité ou la liquidité des différentes parties de la Terre ne sont pas tous sismologiques ; ainsi l'amplitude des marées terrestres exige un noyau qui se comporte comme un liquide pour les périodes correspondantes.

Les ondes sismiques peuvent être aussi diffractées. Une onde diffractée, observée par Anton Mohorovicic en 1909, et dont la théorie sera faite par Cagniard trente ans après, caractérise le « Moho », passage discontinu de la croûte au manteau. D'autres ondes diffractées, ondes de Rayleigh et ondes de Love, sont guidées par la stratification sphérique du manteau. Leur étude a notamment montré l'existence, plus bas que la croûte, d'une couche où les vitesses sismiques sont relativement faibles, ce qu'on attribue généralement à une fusion partielle de la matière.

A la suite des très grands tremblements de terre, la superposition des ondes précédentes produit un ébranlement durable qu'on analyse depuis 1960 en série de vibrations propres lentement amorties. La connaissance des périodes propres (actuellement plus de mille) est un outil puissant pour la détermination des propriétés élastiques et de la densité en fonction de la profondeur (3).

Enfin la sismologie a délimité les bords de plaques et commence à interpréter les séismes occasionnels intérieurs aux plaques. La connaissance de la sismicité est essentielle pour la sécurité des installations humaines ; la prévision et la prévention des séismes ne sont que des espoirs à moyen et long terme.

La sismologie n'est cependant pas l'accès unique à l'intérieur du globe !

Elle a fourni un cadre de travail aux autres disciplines. Les efforts des pétrographes et des minéralogistes pour imaginer la nature du manteau supérieur conjuguent les résultats sismiques et l'observation en surface de roches présumées mantelliques : xénolithes des basaltes ou des kimberlites (3). Plus bas, il faut extrapoler en tenant compte de la température et de la pression. C'est de nouveau la sismologie jointe à l'hypothèse d'un état hydrostatique, qui fournit la pression. Nos idées sur la composition du noyau s'inspirent de celle des fers météoritiques ; mais la valeur de la pression est toujours donnée par la sismologie, et cela jusqu'au centre, où elle approche 4 mégabars (4×10^{11} pascals).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

Et la température ?

On la déduirait de la pression si on connaissait l'équation d'état des matériaux supposés. Or on sait depuis longtemps produire les pressions voulues au sein d'ondes de choc, et on possède les adiabatiques d'Hugoniot pour un grand nombre de corps. Désormais les grandes presses à enclumes de diamants polycristallins permettent de monter jusque là en pression statique (3). Reste le problème énorme de travailler à des températures dont l'ordre de grandeur est probablement de 3 000 °C à l'entrée du noyau, 5 000 °C au centre (sans qu'il faille parler de « feu central », puisqu'il n'y a pas de combustion).

Autre retombée de le sismologie : la mise en évidence du noyau liquide probablement métallique et donc conducteur de l'électricité, a amené Elsasser puis Bullard à attribuer la partie principale du champ magnétique terrestre à des mouvements de ce liquide ; le noyau serait une dynamo auto-excitatrice. Trente ans d'efforts n'ont pas abouti à une théorie complète du phénomène, mais c'est la seule explication du géomagnétisme à avoir survécu.

Une voie ancienne, mais difficile à suivre, pour obtenir les températures internes est l'observation des variations du champ magnétique terrestre. Les variations d'origine externe sont provoquées par des courants dans l'atmosphère, celles d'origine interne s'interprètent par des fluctuations de la dynamo, mal transmises à travers le manteau semi-conducteur. Les unes et les autres informent sur la conductivité de ce manteau ; témoin de la figure 2, encore imprécise, tirée d'un travail français récent. Passer des conductivités électriques aux températures exigera de nouvelles recherches en physique des solides.

Après tous ces éloges de la sismologie, avouons qu'elle renseigne peu sur l'évolution du globe. Quelques cas de sismicité résiduelle jalonnent des accidents disparus. Mais on ne sait à partir de quelle époque ont existé des plaques plus ou moins analogues à celles d'aujourd'hui.

Quelles sont donc les sciences qui nous renseignent sur la lente histoire de la Terre ?

Je passe sur les variations climatiques récentes qui relèvent de techniques particulières, dont certaines bien implantées en France (1). L'histoire de la Terre est avant tout le domaine de la géochronologie, comme son nom l'indique. Elle utilise les variations d'abondance des roches en isotopes radioactifs à partir d'une origine supposée. La mise au point des méthodes est pratiquement terminée depuis une vingtaine d'années, et le nombre de laboratoires fiables, dont au moins trois en France soutenus par le CNRS, semble suffisant pour les besoins géologiques et géophysiques.

La stratigraphie classique, qui couvre l'ère phanérozoïque, n'a pas été détrônée par la géochronologie, qui a permis au contraire de transformer son échelle relative en échelle absolue.

Enfin, le magnétisme terrestre a des applications chronologiques. L'archéomagnétisme, codifié en France, retrouve par l'étude de terres cuites datées, le champ magnétique au moment de leur cuisson, ce qui peut servir à en dater d'autres. Le paléomagnétisme étudie de même l'aimantation des roches éruptives et renseigne sur leur distance au pôle magnétique, donc approximativement au pôle de rotation,

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

au moment du refroidissement ; on s'en sert pour tenter de reconstruire les positions anciennes des continents. L'apport le plus spectaculaire du magnétisme a été la mise en évidence des inversions accidentelles du champ, simultanées en tous lieux, compatibles avec l'idée de la dynamo terrestre mais encore mal expliquées par ses théoriciens. Ce sont ces inversions qui ont permis de repérer dans tous les océans les bandes d'anomalies de même âge.

Pouvez-vous préciser le rôle qu'a joué le CNRS dans le développement des sciences de la terre ?

Les sciences de la terre ont reçu du CNRS des chercheurs, des techniciens, du matériel sans lesquels elles n'auraient pu vivre. Le séjour prolongé de jeunes chercheurs dans de grands centres étrangers est aussi une nécessité, reconnue très tôt par le CNRS même si son financement est resté longtemps difficile. L'injection d'idées nouvelles est indispensable dans nos équipes encore trop peu nombreuses, et les liens formés au cours d'un travail commun assurent les échanges ultérieurs avant publication, qui sont si importants aujourd'hui.

Le CNRS édite les Annales de géophysique, dans lesquelles la géophysique externe tient cependant une grande place. Enfin le CNRS a créé en 1958, le Centre de recherches géophysiques de Garchy dans la Nièvre, avec l'ambition de fournir à la géophysique un appui analogue à l'Observatoire de Haute-Provence pour l'astronomie. En fait, le CRG a permis à Cagniard, qui l'a longtemps dirigé, le développement de la prospection magnéto-tellurique.

Dans la liste actuelle des laboratoires propres du CNRS, j'en ai trouvé une dizaine, tous en province, dont l'activité est consacrée à la géologie ou à la géophysique. Pour les laboratoires associés, une dizaine aussi, la majorité est également en province. D'autres centres sont communs avec des disciplines voisines. Je citerai seulement le Centre d'études géodynamiques et astronomiques ou CERGA situé près de Grasse, qui tire parti des observations de satellites et des échos laser sur la Lune.

Et l'INAG ?

La création en 1967 de l'Institut national d'astronomie et de géophysique, l'INAG, a été un événement majeur ; la lettre G n'était pas prévue au départ, j'ai quelque responsabilité dans son adjonction, et je ne la regrette pas, tant l'astronomie et la géophysique ont de points communs : scientifiques d'abord, opérationnels ensuite, comme l'emploi d'observatoires et de grands instruments, ou comme le statut des personnels.

L'INAG a fait de grandes choses pour la géophysique, y compris la géophysique interne qui nous occupe seule aujourd'hui. Grâce à l'INAG, ont été menés à bien deux projets importants, qui ont mis la France en pointe dans les études des « croûtes nationales », si j'ose faire sourire, et permis d'exporter les techniques correspondantes. Il s'agit d'une part des cartes aéromagnétiques de la France, des mers voisines, et de certains territoires d'Outre-Mer, d'autre part de la réalisation de grands profils sismiques par enregistrement d'explosions lointaines. Bien interprétées, suivie par des équipes enthousiastes, combinées parfois (comme dans l'Afar) avec d'autres modes d'étude, les déterminations magnétiques et sismiques ont produit des résultats spectaculaires. Le plus récent est la mise en évidence de failles au niveau du Moho.

Un grand service rendu aux géophysiciens par l'INAG est d'avoir facilité les travaux sur le terrain. Le CNRS le faisait déjà pour les géologues, mais ceux-ci se contentent souvent de frais de voyage, alors que les géophysiciens transportent un matériel encombrant et fragile, du moins tant qu'il n'a pas été adapté aux besoins des prospecteurs. Des expéditions fructueuses comme celles de l'Afar auraient été impossibles sans l'INAG.

Je voudrais enfin signaler l'engagement de l'INAG dans les problèmes de sécurité posés essentiellement par les séismes et les volcans. C'est un domaine compliqué par des réactions épidermiques (je pense moins à l'épiderme de la Terre qu'à celui des populations, des chercheurs et des techniciens), mais il semble désormais abordé avec l'ampleur nécessaire.

Il y a aussi les actions thématiques programmées

En effet, financièrement, une partie des recherches aidées par l'INAG au cours du VIIe Plan relève de l'importante action thématique programmée de « géodynamique » ou de l'ATP « transfert d'énergie thermique à travers l'écorce terrestre » dont la portée pratique est évidente.

Le CNRS lui-même a consacré plusieurs actions thématiques programmées à des programmes interdisciplinaires, intéressant la géologie et la géophysique interne. Celle de « géochimie » est très générale ; celle de « tectonophysique » s'efforce de stimuler l'étude théorique et expérimentale de la déformation des roches ; quant à l'ATP « IPOD », elle assure la participation des chercheurs français à la phase internationale des carottages profonds exécutés par le navire « Glomar Challenger ».

A quel niveau, à votre avis, situent nos équipes actuelles par rapport à la tradition française ? Et par rapport aux réalisations étrangères ?

On peut faire remonter la « tradition française » en géophysique à 1921, date de la fondation des Instituts de physique du globe. Charles Maurain et Edmond Rothé voulaient sauver ce qui pouvait l'être des débris du Bureau central météorologique, débordé par le développement de la prévision aéronautique. Le modèle qu'ils voulaient suivre, c'était l'organisation astronomique à cette époque. Pour Maurain, l'unité de la géophysique était cimentée par l'ambivalence du géomagnétisme, à la fois externe et interne. Cette tradition n'est pas morte, mais un fossé se creuse progressivement entre l'aéronomie et les sciences de la terre, comme une fissure dans une zone en voie d'extension. Il serait vain de regretter la spécialisation accrue de nos successeurs.

Situer nos géophysiciens par rapport à leurs collègues d'autres pays est plus délicat. Je n'aime guère les palmarès et je n'ai cité aucun nom de géophysicien français vivant. Constatons seulement que les grandes revues étrangères sont largement ouvertes à nos meilleurs chercheurs, qui hésitent cependant parfois devant la « page charge » des belles américaines. Nos géophysiciens sont couramment invités par des collègues étrangers, qui leur rendent leurs visites. Ils appartiennent donc à cette fraternité scientifique fondée sur l'estime plus que sur les titres, une appartenance particulièrement bénéfique aux chercheurs dispersés, encore trop nombreux en France. L'individualisme et l'isolement ne sont stimulants que pour quelques génies.

Quant aux réalisations matérielles, leur volume en France paraît acceptable. De grands efforts ont pu être consentis par exemple pour financer notre participation à des campagnes d'exploration, à des descentes en soucoupe, ou

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

aux forages IPOD. Comme toujours, c'est le pain quotidien des petites équipes et le renouvellement des chercheurs qui sont le plus difficiles à assurer.

Comment orienter et soutenir la recherche de demain pour étudier plus systématiquement notre planète, afin d'en mieux connaître le potentiel de ressources ?

Le CNRS exerce une action d'orientation libérale et qui sans doute le restera. « L'étude systématique », si elle devait engager ses chercheurs dans la véritable prospection géophysique, sortirait un peu du domaine qui doit rester le sien. La prospection au pays de Conrad Schlumberger est d'ailleurs l'objet d'une industrie florissante. Mais l'on peut souhaiter que le CNRS et l'INAG accentuent leur effort en faveur des disciplines d'inventaire.

Dans cet ordre d'idées, une approche à surveiller est celle d'un groupe américain qui ausculte la croûte en enregistrant les signaux provenant d'un vibrateur à fréquence modulée, réverbérés par les accidents du sous-sols. Il faut aussi continuer les efforts entrepris pour obtenir une carte convenable des flux de chaleur en France et pour préciser par des campagnes de tirs sismiques, la position des réservoirs éventuellement utilisables par la géothermie. Enfin l'INAG, devrait, sans perdre son caractère scientifique, continuer l'étude et la prévention des catastrophes naturelles.

On ne peut parler de potentiel de ressources sans faire appel à la géologie, aux recherches pétrolières ou minières, à la métallogénie ; disciplines qui commencent, me semble-t-il, à ne plus négliger les indications apportées par la tectonique globale. Je me sens peu compétent pour parler de ces disciplines.

J'espère qu'on m'excusera d'avoir tiré la couverture du côté qui m'intéressait. J'ai surtout du remords en pensant à la géochimie, discipline en plein essor. La géochimie des éléments traces et la cosmochimie devraient permettre d'éclaircir des questions aussi fondamentales que l'origine de la Terre, la formation et l'évolution des premiers continents, les changements dont la théorie des plaques implique l'existence dans la composition du manteau. Si les géophysiciens ont maintenant les pieds sur terre, les géochimistes sentent pousser leurs ailes !

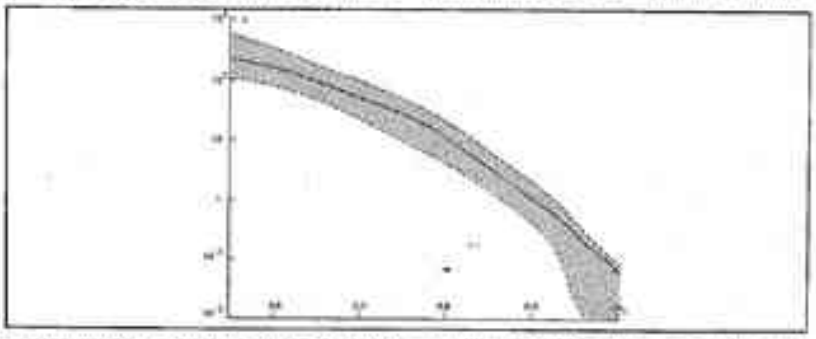
Les études dont vous parlez s'articulent-elles avec nos préoccupations concernant ce qu'on pourrait appeler « la gestion de la Terre » ?

Les ressources minérales n'étant pas renouvelables, gérer ne peut avoir ici le même sens qu'en matière de forêts ou de pêches maritimes. Il s'agit plutôt d'une politique d'épargne. On s'est surtout occupé de gisements présumés rentables ; la prospection géophysique ne fait rien d'autre que d'en chercher de nouveaux. Mais les découvertes se raréfient. Au risque d'atteintes à l'environnement, on se rabat sur des gisements un peu plus difficiles d'accès, ou de nature un peu différente, prolongeant ainsi les possibilités de gaspillage. Au contraire, les disciplines d'inventaire, dont j'ai souligné l'importance, devraient susciter l'établissement de bilans globaux. Même incertains, même provisoires, ils permettent de mesurer les dangers d'épuisement qui menacent les prochaines générations.

Le résultat obtenu, on se trouve devant un problème moral : à quel rythme consommer sans compromettre les chances de l'humanité future, compte tenu des adaptations prévisibles, on se trouve aussi, bien entendu, devant des problèmes politiques. Laissons la parole aux sciences humaines.

Entretien réalisé avec Monique Mounier.

(1) Courrier du CNRS n° 30, oct. 1978, pp. 6-17.
(2) Dans le système international SI, l'unité d'induction magnétique et le weber par mètre carré ou tesla – 1 γ = 10^{-5} gauss = 10^{-9} tesla.
(3) cf. article sur « La structure interne de la terre ».



La conductivité électrique σ (en Ω^{-1} m^{-1}) du manteau en fonction du rayon réduit r/a (a rayon de la terre). La marge d'incertitude est indiquée en tramé. Jusqu'à 2 000 km de profondeur, les valeurs sont déduites d'une analyse des variations d'origine primaire externe du champ magnétique. Les périodes utilisées vont de quatre jours à onze ans. La méthode d'inversion est celle de Bailey. La partie profonde de la distribution de conductivité est déterminée par l'observation de la propagation (diffusion) d'un saut d'accélération séculaire d'origine nucléaire (1969). L'incertitude des valeurs de surface est due à l'absence de données de courte période. On pense que l'effet des hétérogénéités latérales y est très important. Les valeurs de la conductivité du manteau profond sont compatibles avec des températures assez basses, de l'ordre de 3 500 K. – D'après Achache, Courtillot et Le Mouël (en préparation).

L'INSTITUT NATIONAL D'ASTRONOMIE ET DE GEOPHYSIQUE (INAG)

L'idée de créer un organisme assurant un développement harmonieux de l'astronomie a sans doute été émise pour la première fois lors de la rédaction du rapport national de conjoncture, publié en 1964 par le CNRS. Les réflexions qu'elle a suscitées ont conduit à étendre, à la géophysique, la compétence de cet organisme et à lui donner un statut original, celui d'Institut national du CNRS, dont il fut le premier à bénéficier. L'Institut national d'astronomie et de géophysique fut ainsi effectivement créé en septembre 1967. Organisme de type fédéral, l'institut a été conçu pour faciliter la recherche en astronomie et en géophysique qui s'effectue dans les laboratoires propres du CNRS et dans les observatoires astronomiques et instituts de physique du globe dépendant du Ministère des universités. L'INAG est chargé de coordonner les recherches en astronomie et en géophysique, de définir et d'élaborer les plans et programmes d'équipement, d'étudier et de mettre en place les équipements lourds et collectifs, enfin de gérer les contrats de recherche devenus très importants depuis le développement des recherches de type quasi industriel, liées aux activités spatiales. Les domaines d'intervention de l'institut sont : l'astronomie, l'astrophysique, la physique spatiale, la géophysique externe, la physique de la basse atmosphère, la glaciologie, la géodésie spatiale, la géodynamique, la géophysique interne. Les activités de l'INAG ne se substituent en aucune façon à celles des laboratoires qui conservent toutes leurs responsabilités et leur autonomie en matière de recherche non planifiée, de fonctionnement, de personnel et de gestion administrative courante dans le cadre de leur organisme de rattachement respectif : CNRS ou Ministère des universités. Pour définir sa politique de coordination, le directeur de l'INAG est assisté d'un conseil de direction et d'un conseil scientifique. Pour l'exécution de cette politique, il s'appuie sur les services propres de l'institut : division technique et division administrative, soit en tout quatre-vingt-sept personnes. Par ailleurs, plusieurs services communs ont été mis en place : Centre de dépouillement des clichés astronomiques, Centre de données stellaires, Service de traitement interactif des images.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

L'apport des programmes spatiaux à la connaissance de la terre

L'exploration spatiale permet de replacer la Terre dans un contexte planétaire et d'étudier l'ensemble de ses phénomènes de surface. On peut ainsi par exemple mesurer les variations de la topographie dynamique des océans et en déduire le régime de courants lié à la circulation générale globale.

Michel LEFEBVRE

Il y a près de vingt-cinq ans que l'exploration spatiale a débuté. C'est un temps court mais suffisant pour dresser un premier bilan et présenter les perspectives futures. C'est aussi une tâche difficile : les techniques spatiales ont contribué peu ou prou à la plupart des disciplines scientifiques et plutôt que d'établir un tableau exhaustif de ces contributions, je m'efforcerai de dégager l'apport spécifique de ce qu'on appelle l'« espace » – mot qui couvre aussi bien une technologie, des techniques, une méthodologie, des programmes thématiques appuyés sur des projets spécifiques –

La Terre dans le système solaire

Le premier apport est la reconnaissance de la Terre en tant que planète. Bien sûr, depuis longtemps, nous apprenons en astronomie le mouvement de la Terre dans le système solaire – mais nous n'en avions pas une conscience aussi vive, presque charnelle. Une première raison tient à l'absence de données sérieuses et à une échelle comparable sur les autres planètes.

Désormais, à l'ère spatiale, la Terre est replacée dans un contexte général. Il y a d'abord un effet psychologique, un choc. Les images recueillies lors du programme Voyager sur les satellites de Jupiter ont été, pour l'opinion publique mais aussi pour de nombreux chercheurs, une révélation. Il est maintenant possible de comparer la planète Terre avec d'autres planètes sœurs, d'entreprendre l'étude de leurs différences actuelles et de leur différenciation passée. Leur histoire thermique et physico-chimique peut être patiemment reconstituée (fig. 1 et 2). Ces études comparatives sont aussi génératrices d'idées nouvelles qui viennent rompre un anthropocentrisme pourtant bien établi.

On peut comparer différents modes de tectoniques, d'atmosphères, de champ magnétique, de géomorphisme et ce dans des conditions d'environnement différentes et connues – conditions thermiques, gravitationnelles, cinétiques, etc...

Cette planétologie comparée a eu aussi l'inverse mérite de servir de champ d'action commun à des chercheurs de disciplines aussi différentes que la géologie, la biologie, la géophysique externe, l'astrophysique. Autour des projets planétaires, des groupes de chercheurs de haut niveau se sont ré-

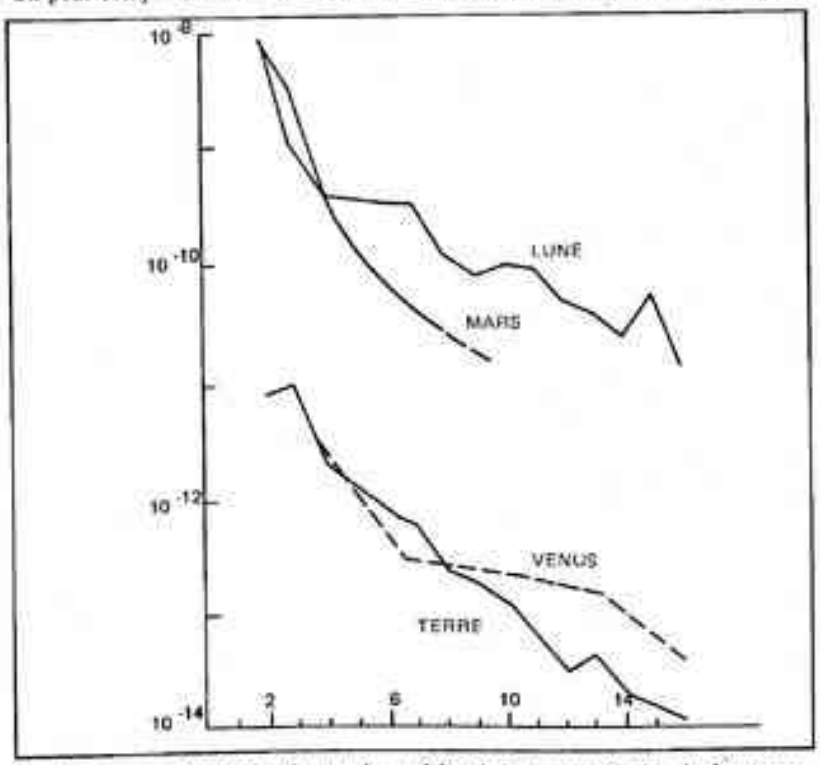


Fig. 1 – La connaissance des champs de gravité et de la topographie des planètes terrestres et de la lune permet des études comparées, des profils de densité externe et des structures.

□ Michel Lefebvre, ancien capitaine au long cours a été astronome à l'observatoire de Paris, puis il est entré au CNES (division mathématiques et département géodésie spatiale). Il est actuellement responsable de l'équipe de recherche « Dynamique terrestre et planétaire » (ER 234) et du groupe de recherche de géodésie spatiale de Toulouse.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

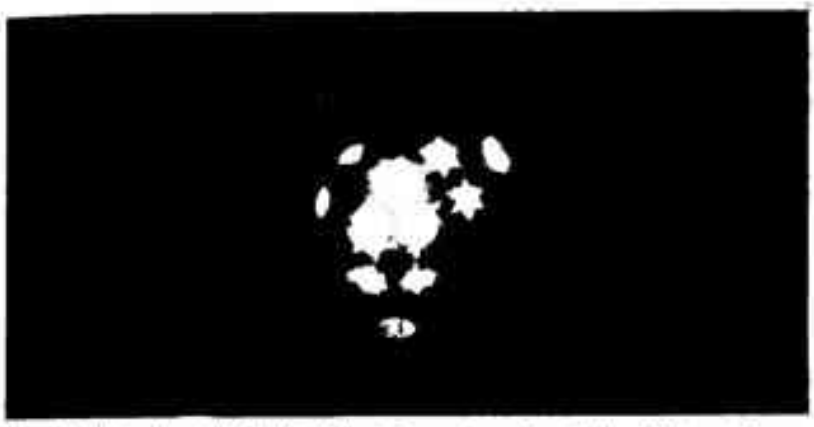


Fig. 2 – Photo du satellite Starlette illuminé par un laser. Le satellite sphérique et dense a été lancé en 1975 par le CNES pour l'étude des marées terrestres et océaniques et de la dissipation d'énergie dans le système terre-lune.

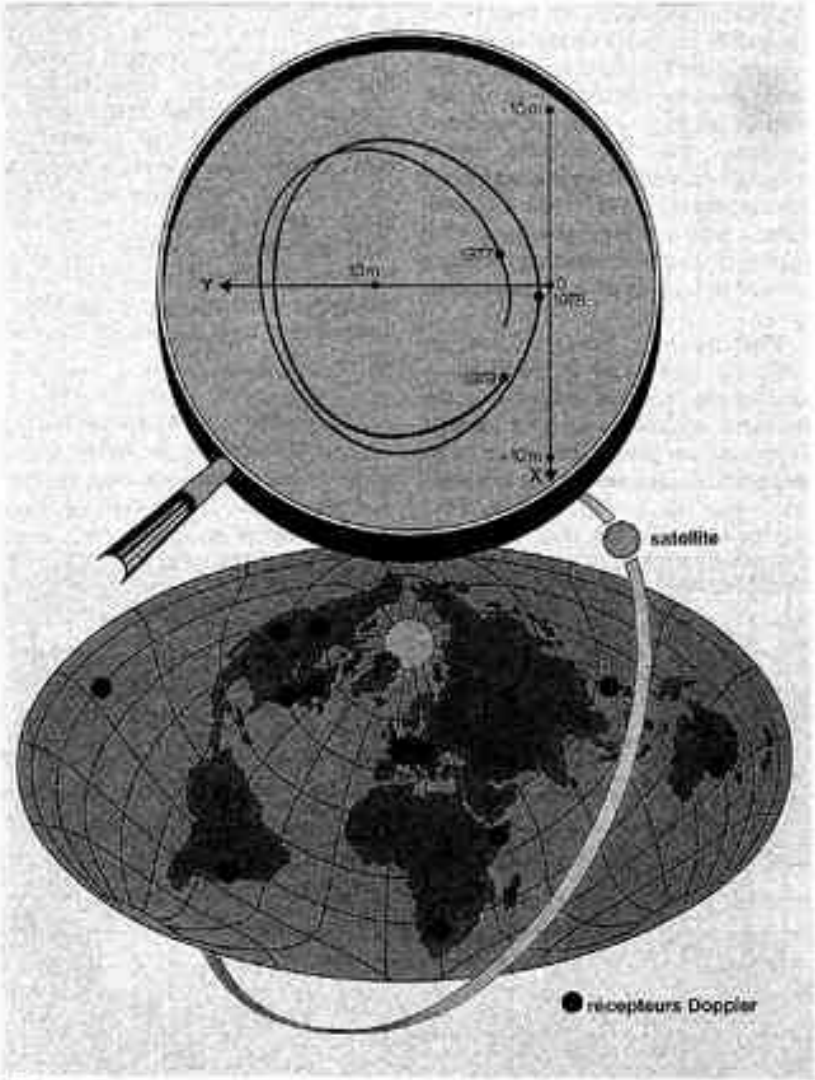


Fig. 3 – Mouvement du pôle de 1977 à 1979. Expérience Medoc : détermination du mouvement de l'axe de rotation de la Terre (pôle) à partir de la poursuite de satellites par effet Doppler. Les stations d'observation de l'expérience Medoc sont réparties à : Uccle, Mizusawa, Herndon, Smithfield, Ottawa, Calgary, Ukiah, Graz, Sao Jose dos Campos, Papeete, Djibouti, Prétoria.

unis et ont tenté une interprétation commune des phénomènes observés. Cette approche planétaire est maintenant utilisée pour la compréhension de la planète Terre.

Cette planète Terre, replacée dans son contexte, nous percevons mieux ce qu'elle a d'unique et de spécifique. Mais aussi, et c'est le deuxième apport de l'espace, nous savons que nous disposons maintenant d'un outil essentiel qui peut nous permettre une étude synoptique et permanente de l'ensemble des phénomènes de surface.

La métrologie spatiale

Nous pouvons tout d'abord faire de la métrologie spatiale comme en laboratoire : par exemple, peser la Terre, en connaître la forme, les dimensions. Cela a toujours été un des objectifs de l'homme (rappelons-nous les expéditions pour mesurer le quart du méridien terrestre). Donnons un exemple : le satellite français Starlette lancé de Kourou en 1975 est une représentation presque parfaite (fig. 3) du point M de masse m. L'étude très précise de son mouvement – ainsi que celle d'autres satellites spécialisés – a permis de déterminer la masse de la Terre, son aplatissement, son champ de gravité, sa forme et bientôt ses déformations. En quelques mois d'observations, il est possible d'estimer les marées océaniques diurnes et semi-diurnes responsable de la dissipation de l'énergie dans le système Terre-Lune. Pour la première fois, on peut dans un système de référence unique relier les différentes positions des stations terrestres et dans un avenir proche, étudier leurs déplacements, que ceux-ci soient dus aux marées ou aux divers mouvements locaux qui affectent les zones actives. On peut étudier avec un et bientôt deux ordres de grandeur de mieux que par les méthodes classiques de l'astrométrie, le mouvement du pôle et les variations de vitesse de la rotation de la Terre (fig. 4). Ceci ne servirait à rien si parallèlement on n'était capable de mesurer à l'échelle globale les phénomènes géophysiques qui en sont la cause. Et là encore l'espace apporte une contribution importante. Il est possible par exemple, de mesurer les vents troposphériques sur toute la planète, de calculer les variations zonales du moment cinétique et de les relier aux irrégularités saisonnières de la vitesse de rotation. D'une façon plus générale, on peut apprécier toutes les forces qui agissent sur les grands mouvements de la cryosphère, de l'atmosphère, de l'hydrosphère, de la terre solide et leur interaction. C'est ainsi qu'on peut mesurer

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

la température de brillance des zones arctiques et antarctiques et étudier les variations saisonnières : des régions d'une superficie égale à celle de la France subissent en quelques semaines, des variations de plusieurs dizaines de degrés. C'est ainsi qu'on peut mesurer la vitesse des vents à différentes altitudes par la mesure des déplacements de nuages ou de ballons à plafond constant servant de traceurs ainsi que le bilan radiatif de la Terre. De même on peut mesurer les variations de la topographie dynamique des océans et en déduire le régime de courants lié à la circulation générale globale, déterminer la force et la direction du vent ou la hauteur des vagues à l'échelle d'un océan.

Parmi les techniques, la télédétection a été une des plus marquantes – même si elle est un objet de controverse pour de nombreux chercheurs qui estiment que le côté visuel et spectaculaire l'emporte sur le côté quantitatif. Nous reviendrons sur cet aspect mais il vaut mieux constater que la plupart des chercheurs en sciences de la terre placent dans leurs articles un ou deux clichés qui parlent par eux-mêmes et servent de support aux explications plus techniques. Ce support visuel, nous le retrouvons dans les manuels de géographie ou même d'économie politique.

Observation synoptique

On trouvera dans ce même numéro, des articles sur la théorie de la tectonique des plaques et la structure interne du globe. Le modèle qu'ils offrent même s'il doit subir des retouches sert de support aux sciences de la terre – on devrait dire à la science de la terre –. Il faut se rappeler qu'il n'a pu être élaboré *ex nihilo*, mais qu'il a été précédé par l'accumulation de données globales de divers types à l'échelle globale : données magnétiques, géochimiques, géologiques, géophysiques. Cette aventure de la tectonique est l'exemple d'un processus constant et dynamisant : la mise à la disposition d'observations à l'échelle de la planète oblige à revoir des modèles, à réviser des conceptions – les anciens modèles n'expliquant que la toute petite partie des phénomènes observés.

L'exploration spatiale apporte précisément la possibilité de recueillir des données à cette échelle synoptique et de manière permanente. On a parfois oublié ce que signifiait le terme de physique du globe. L'espace donne un outil très précieux pour aborder tous les problèmes de physique du globe. Les chercheurs les plus éclairés ont toujours été conscients de l'insuffisance de la couverture ou de l'échantillonnage des mesures dont ils disposaient et ils ont tenté de pallier ce défaut majeur en organisant des campagnes internationales comme l'année géophysique internationale en 1957-1958. Ils continuent à le faire et le programme GARP (global atmospheric research program) en météorologie en est un exemple marquant.

Mais qu'on le veuille ou non, les difficultés logistiques ou politiques – accrues ces dernières années – ou des barrières mentales ont pour résultat d'apporter un grand nombre de données précises dans des régions très limitées – toujours les mêmes. Avec l'exploration spatiale, on peut vaincre la plupart des difficultés : le satellite ignore les frontières et survole toutes les régions. Il survole en particulier les zones océaniques qui représentent 60 % de la surface, les zones polaires et les zones d'accès difficile sinon impossible.

Des instruments uniques et fiables

Le satellite a également l'avantage de fournir une instrumentation unique et qu'il est possible de calibrer en permanence. Ceux qui ont effectué des mesures géophysiques savent la grande difficulté d'homogénéiser les résultats d'instruments de types différents, traités avec des méthodes différentes. Cette instrumentation utilise une technologie de pointe coûteuse, trop coûteuse disent certains, mais qui a l'avantage de la fiabilité. Le chercheur, le théoricien peuvent avoir une grande confiance dans les mesures qui sont mises à leur disposition. L'utilisation de technologies avancées a du reste eu des retombées inattendues et indirectes en sciences de la terre. Le coût des échantillons de roche lunaire a été tel qu'on a développé au sol des analyseurs sophistiqués et sûrs qui servent maintenant couramment pour l'analyse d'échantillons terrestres, des météorites et qui ont contribué au développement d'une géochimie d'avant-garde.

La gestion des grandes banques de données

Un autre apport important de l'espace vient de la nécessité d'apprendre à gérer des données très nom-

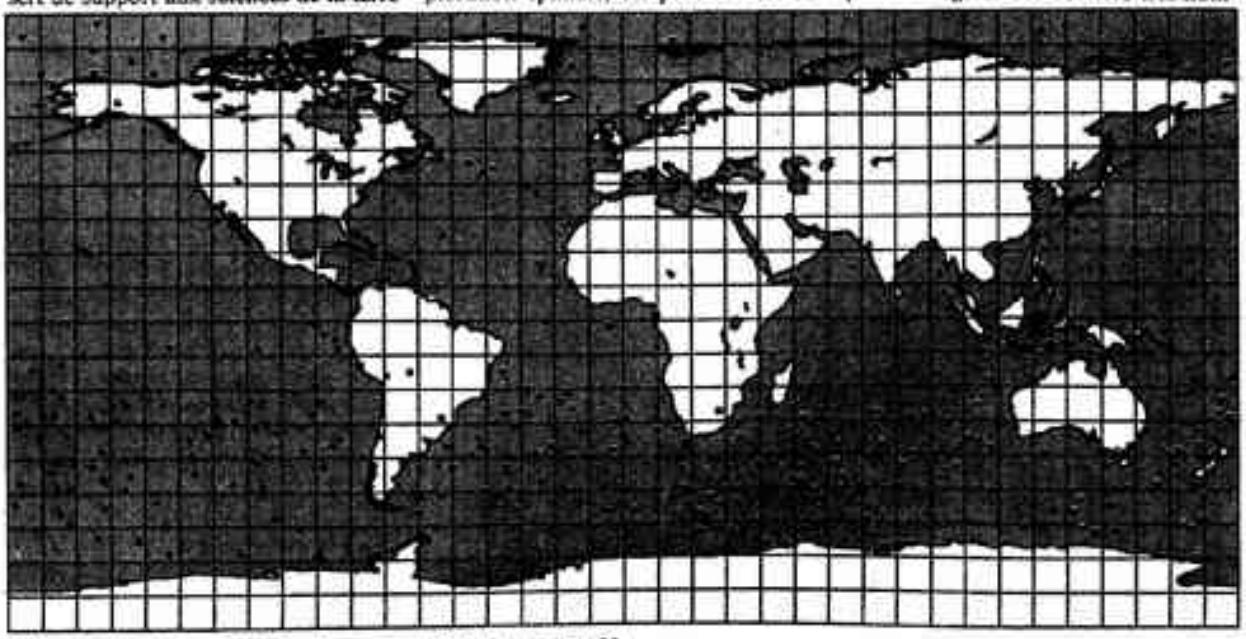


Fig. 4 – Répartition des balises Argos en activité le 8 avril 1979.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

terrestres, bouées, ballons) pourront être mis en grand nombre et automatisés ou au contraire être placés rapidement *in situ* dès la détection par les moyens spatiaux d'un phénomène intéressant.

Donnons un exemple concret : avec le satellite américain Seasat, qui n'a duré que trois mois en 1978, on a pu se rendre compte qu'il était possible de mesurer à l'échelle d'un océan, la hauteur des vagues, la force et la direction du vent, de reconstituer l'imagerie des zones côtières, de mesurer la topographie dynamique des océans et les variations liées à la circulation globale (fig. 6).

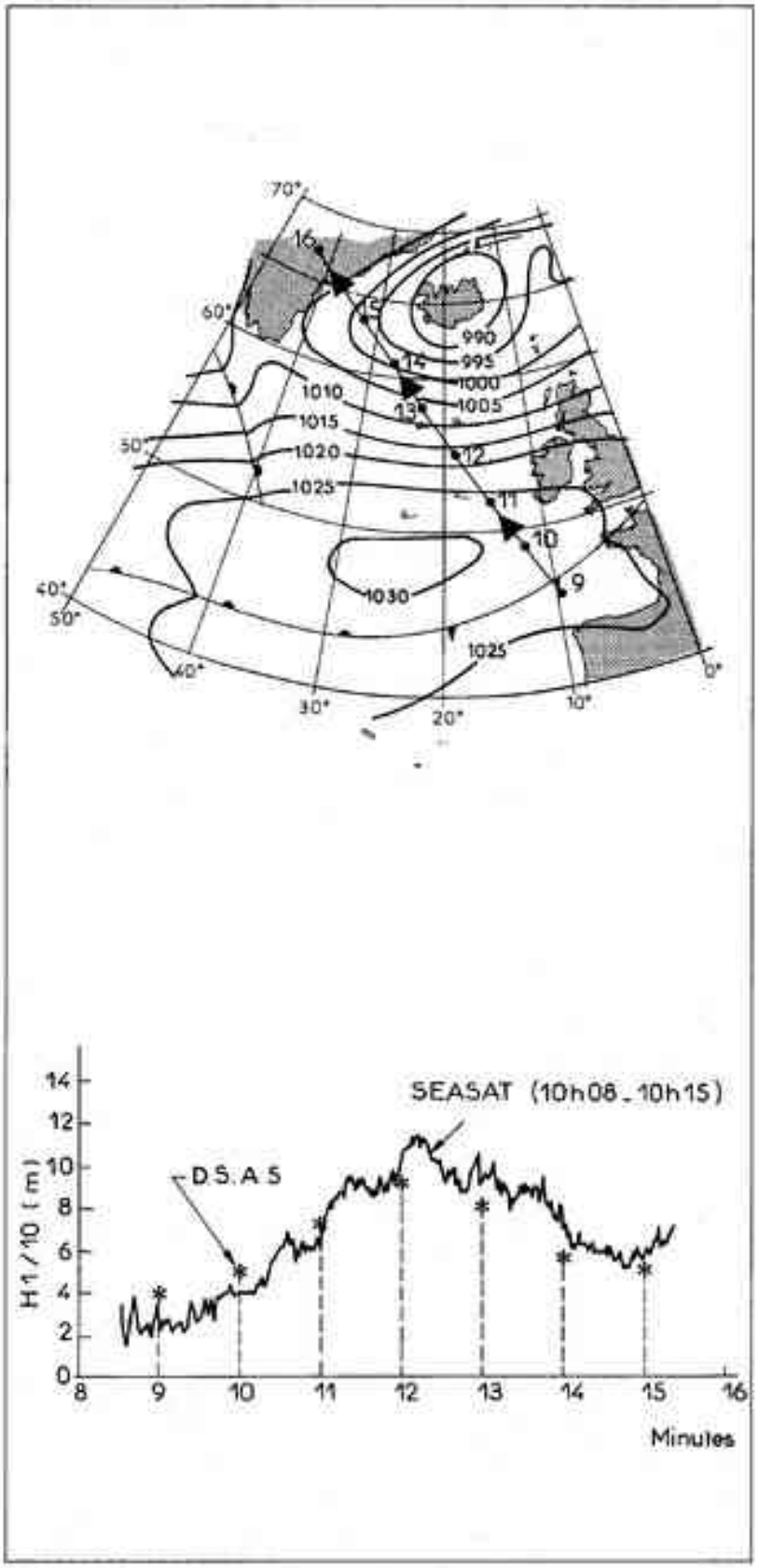
Il s'agissait d'un système probatoire. Il est clair qu'il est maintenant nécessaire de mettre en place un système qui permettra de mesurer ces phénomènes sur des périodes de temps de trois heures avec une restitution en temps très peu différé. Cela nécessitera d'avoir en permanence plusieurs satellites en opération, de collecter les données de bouées mesurant par exemple, la bathythermographie, la salinité, de réunir l'ensemble des mesures et de les mettre à la disposition des utilisateurs de manière simple. Cela permettra d'optimiser les campagnes à la mer coûteuses mais de plus en plus nécessaires.

A la recherche de modèles nouveaux

L'obstacle principal ne réside pas seulement dans l'organisation de tels programmes mais dans l'insuffisance du développement de modèles globaux qui puissent rendre compte de l'ensemble des phénomènes observés et de les extrapoler sur des échelles de temps allant de quelques heures à plusieurs décennies. Ce défi lancé aux chercheurs est exaltant et nul doute qu'il sera relevé.

J'espère que les considérations ci-dessus auront suffisamment montré que les moyens fournis par l'exploration spatiale répondent à ce désir très profond de replacer la Terre dans son contexte planétaire et de l'étudier sous tous ces aspects pour la mieux connaître maintenant et pour être à même de mieux en gérer les ressources plus tard. L'espace au service de la Terre aura été totalement intégré lorsqu'on n'en parlera plus – comme c'est déjà le cas dans les télécommunications.

Le nombre de chercheurs qui ont conscience qu'ils vivent une aventure unique et qui se réunissent autour de programmes communs va croissant. Chez tous, la prise de conscience de l'existence du vaisseau terre sur lequel nous sommes embarqués est manifeste.



a) Carte météorologique des pressions en millibars à 12 h TU, le 25 septembre 1978. La figure b) donne le profil de hauteur des vagues en mètres communiqué par le satellite SEASAT. La longueur du profil est de 2 600 km. Les astérisques correspondent aux hauteurs de vague prévues par le modèle DSA 5 de la météorologie nationale. Lorsqu'il y a désaccord entre les prévisions de DSA 5 et le relevé de SEASAT, les données du satellite permettent de recaler l'emplacement des dépressions.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

breuses. Les chercheurs impliqués dans les programmes spatiaux ont souvent succombé sous l'avalanche des mégabits de télémesure. Cela a certainement retardé une utilisation quantitative rationnelle des mesures, mais cela a permis également d'acquérir petit à petit la maîtrise de ce type de traitement des données : celui qui a eu l'occasion de suivre le traitement d'images et les modèles de correction peut témoigner que l'effort accompli – qui pour certains étaient un but – est essentiel pour une utilisation quantitative qui reste fondamentale.

Complémentarité, moyens spatiaux, moyens classiques

Il est tout à fait clair que l'espace ne peut pas tout et que ses partisans ont parfois retardé son essor en voulant trop démontrer. Mais il est clair aussi que de nombreuses réticences de chercheurs viennent de la méconnaissance du bon usage de ces techniques et peut être aussi d'un certain corporatisme traditionnel. Il est vrai qu'il faut des moyens importants non seulement pour développer les techniques, mais surtout pour les analyser : moyens matériels (calculateurs) et surtout moyens humains. Il est vrai aussi qu'il y a eu pendant plusieurs années une certaine discrimination entre les chercheurs dits spatiaux – disposant de moyens importants – et les autres. Cette discrimination disparaîtra peu à peu. Elle disparaîtra lorsqu'on aura compris que l'exploration spatiale ne donne pas tout, ne serait-ce que parce qu'elle est limitée aux phénomènes de surface mais qu'elle fournit à de nombreux domaines de recherche des observations à grande et à moyenne échelle permettant une étude synoptique des phénomènes et permettant de mieux interpréter les mesures classiques au sol, de plus en plus indispensables, mais qui se référeront à un modèle unique.

La complémentarité entre les mesures spatiales et classiques est évidente. Les mesures spatiales n'ont souvent pas la résolution nécessaire et elle ne donne qu'une partie des informations. Elles ont besoin de mesures classiques pour être calibrées et mieux comprises (problème des vérités terrain). Les mesures classiques apporteront une étude détaillée, régionale et approfondie des phénomènes plus nombreux.

On pourrait comparer cette complémentarité en prenant une analogie avec les transports. L'apparition de l'aviation a complètement bouleversé les relations mondiales. Elle n'a pas empêché l'essor constant des autres formes de transport bien au contraire. Chacun a son domaine propre avec une région de recouvrement où le choix est possible et se fait sur des critères de commodité, de prix, d'agrément, souvent subjectifs.

Vers une utilisation quantitative

On a pu reprocher – à juste titre parfois – aux techniques spatiales de ne pas fournir d'éléments quantitatifs qui seuls peuvent être pris en compte par le chercheur. Ce péché de jeunesse reconnu, avoué, est en voie d'être corrigé. Il le sera d'autant plus vite que les chercheurs auront mieux compris tout le parti qu'ils peuvent tirer de ces mesures d'un type nouveau et que les spécialistes feront l'effort pour les mettre sous forme abordable. Des équipes devront faire le pont entre les deux mondes qui l'ignorent.

Les variations temporelles

J'ai souligné les problèmes d'échelle qui permettent de voir les mêmes phénomènes avec une optique différente. Il faut insister encore plus sur l'aspect temporel. Quel chercheur n'a pas regretté de ne pouvoir disposer de longues séries temporelles. L'espace permet d'aborder ce problème de variations temporelles et cet apport est à mon sens fondamental d'où l'installation d'observatoires permanents.

Ceci peut être fait de manière directe grâce à l'instrumentation embarquée ou de manière indirecte grâce aux systèmes de collecte de données (tel qu'Argos) qui constituent et constitueront une révolution en physique du globe (fig. 5) ; limitée pour l'instant aux stations automatiques comme les bouées et les ballons, elles s'étendront rapidement à d'autres types de données lorsque la conception des instruments au sol sera optimisée dans cette optique.

Vers les programmes intégrés

On arrivera très bientôt à une conception de programmes globaux intégrés avec un segment spatial et un segment classique – la mise à la disposition des chercheurs ou des utilisateurs, de manière aisée, de paramètres significatifs en temps très peu différé.

Dans ce type de programme, les satellites assureront la surveillance synoptique permanente, et les moyens classiques une recherche détaillée et plus approfondie. Dans un avenir prochain, ces moyens classiques (stations

A la conférence de Nice, sur l'origine du système solaire (1972) des synthèses furent présentées de l'état de nos connaissances sur ce sujet. La crédibilité de la théorie pouvait sembler acceptable. Nous savons aujourd'hui qu'elle était surestimée.

Les observations accumulées nous ont montré en résumé que le problème est beaucoup plus compliqué que nous le pensions à cette époque.

L'hypothèse implicitement admise que la nébuleuse protosolaire forme un système isolé, sans interaction importante avec le restant de l'Univers, est fortement remise en question.

L'observation d'inhomogénéités isotopiques (en particulier de l'oxygène) entre différents corps solides, la détection de radioactivités fossiles à courte période (7,4 x 10^5 ans pour le ^{26}Al ; 6,3 x 10^6 ans pour le ^{107}Pd) dans certains météorites, nous indiquent l'occurence de perturbations importantes au moment de la formation et de la solidification du système solaire.

L'observation astronomique de régions où se forment les étoiles, nous mène à des conclusions analogues. Elle nous apprend que les étoiles naissent en groupes et qu'à leurs premiers instants, les embryons stellaires sont au moins cent fois plus rapprochés que les étoiles plus âgées de la galaxie. Elle nous indique aussi la présence, au sein de ces amas, d'étoiles massives (OB) qui termineront leur jour et exploseront en supernovae avant la dispersion de l'amas (c'est-à-dire en moins de trois millions d'années). Ces explosions ne peuvent que provoquer chez les autres étoiles en formation des perturbations d'importances variées : apports d'énergie thermique et de matière qui pourraient bien expliquer les observations météoritiques décrites précédemment.

Du coup, il faut élargir notre vision. Il faut envisager l'existence d'un amas protosolaire dont le soleil est issu parmi beaucoup d'autres étoiles. Dans cet amas, ces étoiles en formation (vraisemblablement entourées de nébuleuses) évoluent en s'influençant mutuellement à des degrés divers.

Avant 1972, on décrivait l'histoire thermique de la nébuleuse protosolaire en terme « d'une courbe de refroidissement » monotone et continue. L'apparition de régions d'hydrogène ionisé au moment de l'allumage des étoiles voisines, les déflagrations des supernovae, suggèrent une histoire thermique beaucoup plus complexe au niveau de l'amas dans son ensemble. Voilà une illustration des complications apportées dans le sujet par les développements des dix dernières années. Ces complications ne sont peut-être pas de trop pour expliquer la multitude des données apparemment incohérentes qui ne cessent d'affluer dans le domaine de l'analyse isotopique du système solaire.

Nous aideront-elles, par exemple, à comprendre pourquoi Vénus possède beaucoup plus de gaz nobles que la Terre, en contradiction avec ce qu'auraient prévu les théories présentées à Nice en 1972.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

La structure interne de la terre

L'intérieur de la terre est encore bien mystérieux. Cependant, grâce aux renseignements fournis par la sismologie et la physique des matériaux, on acquiert peu à peu une connaissance raisonnable des grands traits de la structure interne du Globe.

Jean-Paul POIRIER

Lorsque les philosophes de l'Antiquité se furent avisés que la Terre était ronde, c'est-à-dire que sa surface, à laquelle la vie se trouve confinée, était celle d'un sphéroïde, on put se poser la question de ce qu'il y avait à l'intérieur. A vrai dire, cette question avait depuis longtemps été posée en ces termes : qu'y a-t-il sous nos pieds, en-dessous de la couche qui nous est directement accessible ? Une certaine logique veut que l'on juge du contenu d'un récipient par ce qui en sort, la réponse était donc simple : puisque les volcans – ces soupiraux de l'enfer, c'est-à-dire des régions inférieures – émettent des matières enflammées ou en fusion, c'est qu'il existe un « feu central ». Par ailleurs, et sans qu'il y ait là matière à contradiction, on imaginait assez bien la Terre comme une vaste et profonde garenne parcourue de mille galeries et cavernes majestueuses où faisaient rage des vents déchaînés et des explosions colossales de soufre et de nitre, cause évidente des tremblements de terre et des éruptions volcaniques comme le pensaient encore après Lucrèce, le P. Aubert ou Buffon au XVIIIe siècle. Que la Terre fut creuse – et donc accessible par les volcans – était d'ailleurs bien pour plaire aux écrivains de fiction comme le baron de Holberg (fig. 1) ou Jules Verne. Toutefois, en dépit de tous les efforts de l'imagination, l'intérieur de la Terre est resté inaccessible et mystérieux – bien plus en fait que les planètes du système solaire : on a rapporté des échantillons de la Lune, les sondes Voyager nous ont envoyé des photographies du petit satellite Galiléen de Jupiter, Io où l'on voit des détails de 10 km ; mais le forage le plus profond dans l'intérieur de la Terre ne dépasse pas 6 km – la millième partie du rayon terrestre – et il semble bien peu probable que l'on aille beaucoup plus loin.

La seule information directe que nous ayons de la nature d'une portion (encore bien superficielle) de la Terre nous est donnée justement par les volcans : les laves sont des produits de fusion partielle du matériau profond et remontent parfois à la surface des morceaux de roche non fondue. Le messager de la zone la plus profonde que nous ayons ainsi vient d'environ 250 km sous l'Afrique, il est remonté par les cheminées de kimberlites (source des diamants) ; il s'agit d'un nodule de péridotite constitué d'olivine, de pyroxènes et de grenat alumineux (fig. 2), (voir tableau I). Nous devons donc, pour connaître la structure de la Terre, nous reposer sur des méthodes indirectes et c'est ainsi que nos connaissances actuelles ont été obtenues – avec les limitations que cela comporte.

Connaître la structure de la Terre veut dire essentiellement disposer d'un modèle de Terre que nous donne la composition pétrologique en fonction de la profondeur. Ce modèle doit être compatible avec les renseignements indirects obtenus mais n'est pas nécessairement unique : nous savons en effet que les informations sur l'intérieur de la Terre, fournies en grande partie par la sismologie et la physique des matériaux sont soumises à des contraintes assez strictes de l'astronomie, de la géodésie ou de la cosmochimie mais les degrés de liberté sont néanmoins assez nombreux pour que, par exemple, plusieurs roches composées en proportions différentes de minéraux ayant des compositions chimiques, des densités et des propriétés élastiques différentes soient des candidats également valables.

Les modèles de Terre sismologiques

Examinons donc les maillons principaux de la chaîne logique qui permet d'avoir une assez bonne idée de la structure des régions internes du globe. On peut tout d'abord remarquer que si la Terre était constituée de matériaux transparents (et peu absorbants), nous retirerions certainement une quantité importante d'information en éclairant vivement l'intérieur et en observant de divers points de vue la lumière transmise, réfléchie ou réfractée. La Terre, certes, n'est poins transparente mais elle conduit bien les ondes sonores et c'est en observant le comportement de celles-ci que l'on recueille des informations précieuses, les sources d'« éclairage » étant ici les tremblements de terre qui sont de puissants émetteurs sonores dans une large bande de fréquences. Les basses fréquences (de l'ordre du Hertz au millième de Hertz) sont peu absorbées et se propagent très loin de la source. Le premier maillon de la chaîne est donc siamologique.

Il y a deux sortes d'ondes sonores : les ondes P, longitudinales ou de compression et les ondes S, transversales ou de cisaillement qui se propagent

□ Jean-Paul Poirier, physicien titulaire de l'Institut de physique du globe de Paris, dirige le laboratoire de physique et mécanique des matériaux terrestres.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

avec des vitesses différentes, fonction de la densité du matériau et de ses constantes élastiques (voir tableau II).

Comme la pression augmente avec la profondeur et que les matériaux terrestres sont compressibles, leur densité augmente ; par ailleurs, leur compressibilité devient de plus en plus faible lorsque la pression augmente, et de façon générale les constantes élastiques augmentent avec la pression. Au total, les vitesses des ondes P et S augmentent lorsque la profondeur augmente. Avec des raisonnements complètement analogues à ceux de l'optique géométrique, on voit alors que les rais sismiques se réfractent de plus en plus à mesure qu'ils s'enfoncent dans la Terre et se courbent donc vers le haut pour émerger finalement à la surface du globe (fig. 3).

Si un tremblement de terre de foyer assez voisin de la surface se produit à un instant pris comme origine, les observations sismologiques situées à des distances (angulaires) Δ de l'épicentre enregistrent sur des sismogrammes les ondes directes, réfractées ou réfléchies sur des surfaces de discontinuité internes. Les courbes du temps d'arrivée T de ces diverses ondes en fonction de la distance Δ permettent de calculer les vitesses sismiques en fonction de la profondeur. De façon générale, on détermine des « modèles de Terre » en minimisant les différences entre les temps d'arrivée réels et les temps d'arrivée calculés, en imaginant la Terre formée de couches sphériques homogènes, de densité et de constantes élastiques données.

Une autre façon d'obtenir des modèles de Terre consiste à calculer les modes propres de vibration d'une Terre en couches sphériques et de comparer, en ajustant les paramètres, les spectres théoriques aux spectres réels observés lors des très gros tremblements de terre qui font résonner la Terre entière sur ses fréquences propres (la première mise en évidence claire des oscillations libres de la Terre date du gros séisme du 22 mai 1960 au Chili, de magnitude Richter 8,5 qui dégagea une énergie sismique d'environ 10^{19} Joules). Les gros ordinateurs rapides ont fait faire des progrès considérables à l'élaboration des modèles de Terre en permettant de comparer aux données sismiques, les prévisions d'un très grand nombre de modèles différant entre eux par les valeurs de leurs paramètres et donc d'affiner ces dernières. Les modèles de Terre, qui maintenant ne diffèrent plus entre eux que par des détails, donnent en fonction de la profondeur

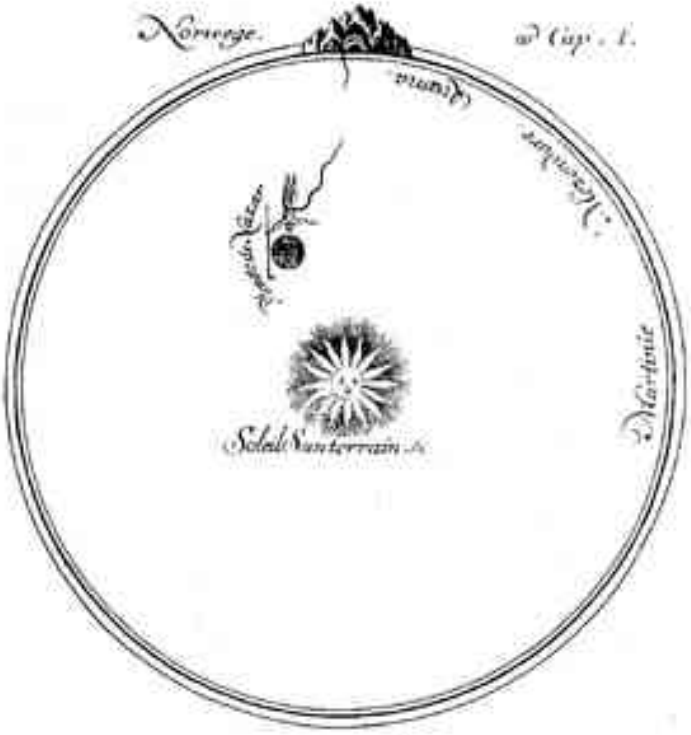


Fig. 1 – « Voyage de Nicolas Klimius dans le monde souterrain », par le baron L. de Holberg (1753).

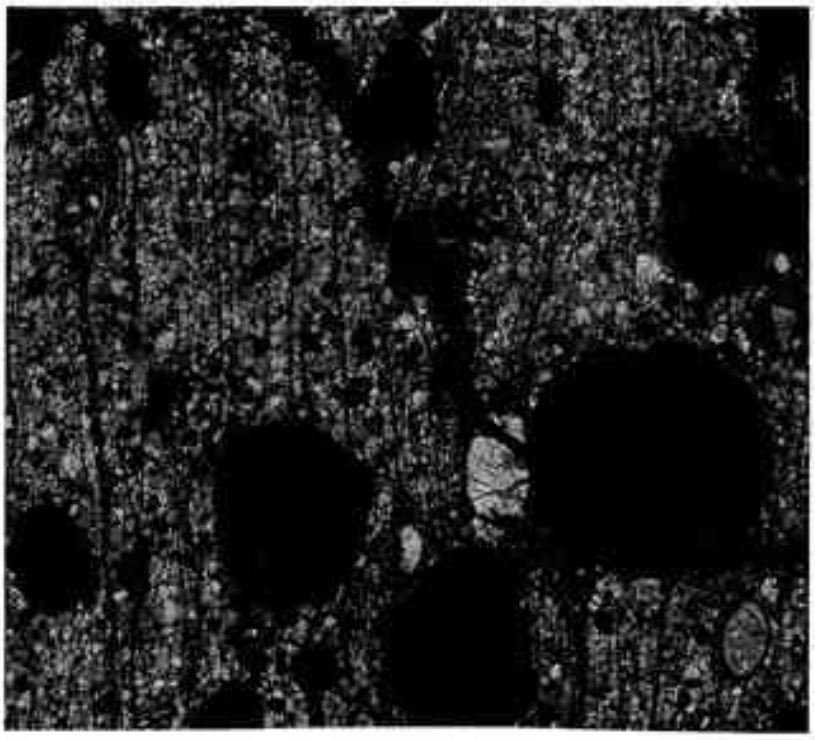


Fig. 2 – Nodule de péridotite à grenats (PHN 1 611). Cet échantillon représente le type de roche terrestre le plus profond que l'on connaisse (de 230 à 250 km). Ce spécimen remonté par la kimberlite de Thaba Putsoa (Lesotho, petit territoire enclavé dans l'Afrique du Sud) a un âge de 1,4 milliard d'années. Les grandes plages noires sont des grenats alumino-magnésiens (pyrope), le plus grand a un diamètre de 5 mm. La matrice de petits grains est formée d'olivine recristallisé. L'orthopyroxène est en grande partie recristallisé en grains très fins de 10-20μ de diamètre (fins rubans gris). (Photo J.C. Mercier).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

FORMULE	NOM	STRUCTURE
CO_3Ca	CALCITE	
SiO_2	QUARTZ	CHAINES HELICOIDALES DE TETRAEDRES SiO_4
Si_3AlO_8 (K, Na)	FELDSPATH ALCALINS	CHARPENTE TRIDIMENTIONNELLE DE TETRAEDRES SiO_4
$Si_2Al_2O_8Ca$	PLAGIOCLASE (ANORTHITE)	"
SiO_4 $(Mg_{0,9}Fe_{0,1})_2$	OLIVINE (ORTHOROMBIQUE) A BASSE PRESSION, PREND LA STRUCTURE SPINELLE (CUBIQUE) A HAUTE PRESSION	TETRAEDRES SiO_4 ISOLES EMPILEMENT COMPACT D'OXYGENES HEXAGONAL COMPACT (OLIVINE), CUBIQUE A FACES CENTREES (SPINELLE)
SiO_3 $(Mg_{0,9}Fe_{0,1})$	ORTHOPYROXENE (ORTHOROMBIQUE) A BASSE PRESSION, PREND LA STRUCTURE GRENAT (CUBIQUE) PUIS LA STRUCTURE PEROVSKITE (CUBIQUE) A HAUTE PRESSION	CHAINES LINEAIRES DE TETRAEDRES SiO_4 CHARPENTE DE TETRAEDRES SiO_4 CHARPENTE D'OCTAEDRES SiO_6
$(Mg_{0,9}Fe_{0,1})O$	MAGNESIOWUSTITE (CUBIQUE)	CHARPENTE D'OCTAEDRES MgO_6

Tableau I – Les minéraux essentiels

1) Vitesse des ondes de compression P et de cisaillement S :

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{3}{4}\mu}{\rho}} \qquad V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} < V_P$$

ρ : densité μ : module de cisaillement $K = \frac{dP}{d}$: incompressibilité P : pression hydrostatique

Paramètre sismique : $\Phi = \frac{K}{\rho} = V_P^{\,2} - \frac{4}{3} V_S^{\,2} = \frac{dP}{d\rho}$ (adiabatique)

est donné en fonction de la profondeur par inversion des données sismiques.

2) Connaissant la valeur de V_P et V_S (donc de Φ) avec la profondeur z, on calcule la variation de la densité avec z :

$$\frac{d\rho}{dz} = \frac{d\rho}{dP} \cdot \frac{dP}{dz} = \frac{1}{\Phi} \cdot \rho g$$

d'où, par intégration dans une zone homogène, on tire ρ (z)

3) Pour trouver les assemblages de minéraux, il faut connaître ρ_0 ramenée à P = 1 atmosphère ; on a besoin d'équation d'état comme par exemple :

$$\rho = \rho_0 \quad 1 + \frac{K'_0}{K_0} P \quad ^{1/K'_0} \qquad \text{(Murnaghan)}$$

obtenue en supposant que K varie linéairement avec P

$$K = K_0 + K'_0 P$$

$$\text{ou} \quad \rho = \bar{m}\,(0.048\ \Phi^{0.323}) \qquad \text{(Anderson)}$$

obtenue empiriquement pour des minéraux de poids atomique moyen $\bar{m}$

Tableau II – Des données sismiques à la composition pétrologique de la Terre

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

les vitesses des ondes P et S, la densité du matériau et ses constantes élastiques ainsi que la pression hydrostatique (fig. 4). A ce stade, on a déjà bien sûr vérifié que ces résultats sont compatibles avec les données plus globales fournies par l'astronomie et la géodésie concernant la densité moyenne de la Terre et la valeur de son moment d'inertie autour de l'axe de rotation.

On voit (fig. 4) que la densité augmente avec la profondeur, de façon continue, dans de larges intervalles mais présente des augmentations brutales, correspondant à des discontinuités dans les vitesses des ondes sismiques. La première de celles-ci est la discontinuité de Mohorcvicic (ou Moho), à environ 6 km sous le plancher des océans et 30 km sous les continents, elle marque la limite entre croûte et manteau. Plus bas, dans le manteau, on a d'autres discontinuités vers 400 km et 700 km (limite entre manteau supérieur et inférieur). La discontinuité à 2 900 km représente la frontière entre le manteau et le noyau : la vitesse des ondes P augmente considérablement et celle des ondes S tombe à zéro, ce qui caractérise un milieu liquide (qui, par définition, ne résiste pas au cisaillement, au repos et ne peut donc conduire des ondes élastiques de cisaillement), le noyau est donc liquide. Une dernière discontinuité à 5 100 km marque la frontière de la région la plus centrale du globe : la graine, de nouveau solide. On ne peut évidemment pas rendre compte des discontinuités par l'effet continu de la pression sur la densité et les constantes élastiques, on doit donc les attribuer à des modifications de la composition chimique ou de la structure des matériaux qui conduisent les ondes, c'est-à-dire des minéraux profonds.

C'est donc la cosmochimie et la physique des matériaux terrestres qui vont permettre maintenant d'élaborer des modèles de Terre pétrologiques (compatibles avec les modèles sismologiques) qui nous diront de quoi la Terre est faite.

Les modèles de Terre pétrologiques

La contrainte peut-être la plus importante sur les modèles de Terre est que la nature et les proportions des éléments majeurs qui composent la Terre sont maintenus dans des limites assez étroites par les données de la cosmochimie. La composition du système solaire est celle du nuage de gaz et de poussières interstellaires qui lui a donné naissance ; en moyenne,

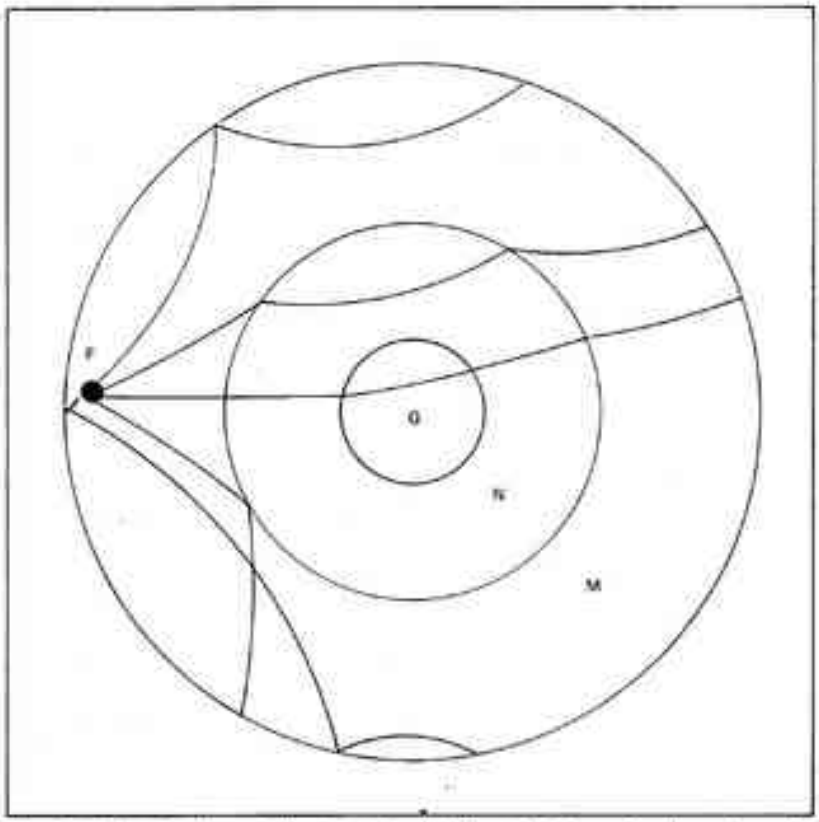


Fig. 3 – Trajectoire des rais sismiques dans l'intérieur de la Terre. La vitesse des ondes sonores augmente avec la profondeur ; les rais se propageant dans un milieu dont l'indice de réfraction augmente sont donc courbés vers le haut. Aux surfaces de séparation entre milieux d'indices de réfraction différents, on a (comme pour des ondes lumineuses) réfraction ou réflexion. Les ondes S (de cisaillement) ne sont pas transmises dans le noyau liquide . Symboles = F : foyer d'un séisme ; M : manteau ; N : noyau liquide ; G : graine.

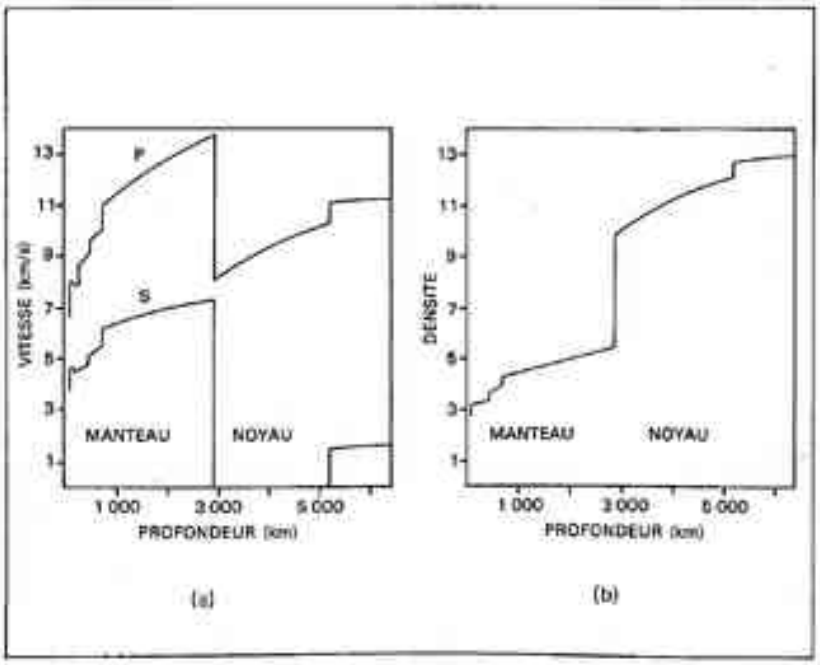


Fig. 4 – Variation avec la profondeur, des vitesses des ondes sismiques de compression P et de cisaillement S (a) et de la densité (b). Les discontinuités de vitesse et de densité sont dues à des variations de composition chimique (Moho, à la base de la croûte à 30 km, ou interface noyau-manteau à 2 900 km) ou à des variations de structure cristalline des minéraux (discontinuités du manteau à 400 km et 700 km). (Modèle de Terre PEM).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

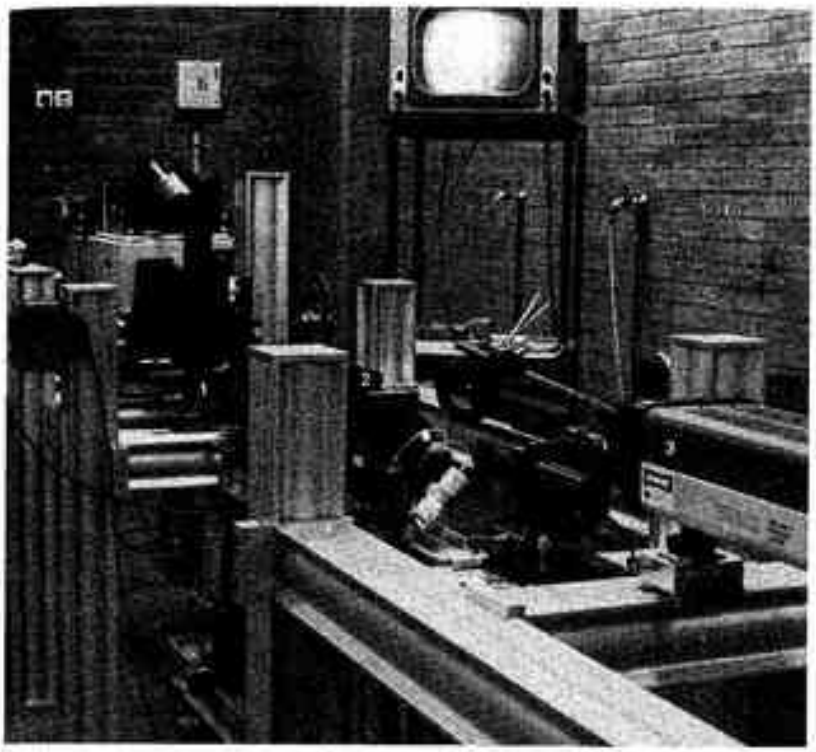


Fig. 5 – La cellule à enclumes de diamants de l'Institut de physique du globe de Paris. Les hautes pressions sont obtenues entre les diamants taillés en brillants qui agissent en multiplicateurs de pression (1), un laser YAG de puissance (2) est focalisé à travers un diamant sur l'échantillon et l'échauffe à haute température. La pression est mesurée par le décalage des raies de fluorescence d'un petit cristal de rubis excité par un laser à He-Cd (3) ; le rayonnement de fluorescence est recueilli dans un spectromètre (4). La température est mesurée par pyrométrie optique et la transition peut être suivie par une caméra de télévision (5). (Photo A. Lacam).

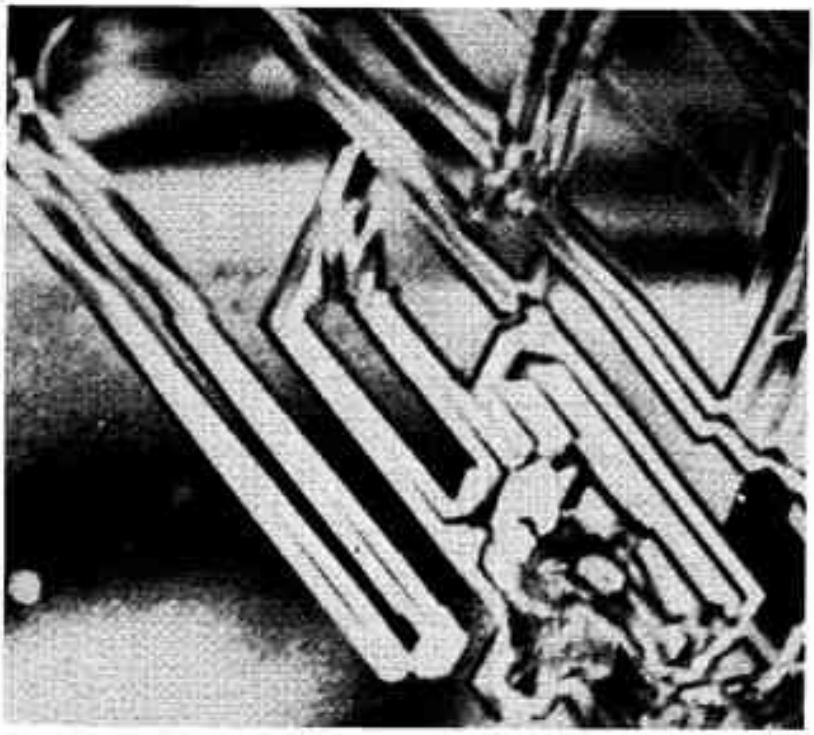


Fig. 6 – Micrographie en microscopie électronique par transmission de la phase spinelle Fe_2SiO_4 obtenue à la cellule à diamants. On peut ainsi caractériser les phases et en étudier les défauts cristallins : on voit ici des fautes d'empilement dans le réseau cristallin comme des rubans à contraste frangé (largeur des rubans, environ 200 Å). (Photo M. Madon).

c'est celle du soleil et celle des chondrites carbonées C 1, ces météorites pierreuses, témoins du matériau planétaire primitif.

Parmi la centaine d'éléments qui constituent la classification de Mendeleleff, seuls le silicium, l'oxygène, le fer, le magnésium, le soufre, l'aluminium et le calcium jouent un rôle essentiel dans la composition chimique des minéraux terrestres. Certes, tous les éléments sont présents dans des proportions variables mais malgré la rôle important joué par certains (comme les éléments radioactifs dont la désintégration fournit une part considérable de la chaleur interne), leur abondance est beaucoup trop faible pour qu'on les prenne en compte à l'échelle de la constitution minéralogique de la Terre.

La croûte est une mince pellicule à la surface du globe et les minéraux majeurs dont elle est formée (de façon d'ailleurs très hétérogène) sont connus par expérience directe : quartz, feldspaths, silicates, ferromagnésiens en moindre abondance, calcite, etc. Nous ne nous y attarderons pas dans ce bref exposé. Le noyau voit en première approximation sa composition imposée par les exigences de la cosmochimie et de l'astronomie : la valeur assez faible du moment d'inertie de la Terre impose une concentration de masse vers le centre, l'élément le plus lourd dont nous disposons en abondance étant le fer, on peut s'attendre à un noyau en fer ; la dimension et la densité du noyau des modèles de Terre sismologiques conduisent en fait à un noyau constitué de fer allié de nickel et de soufre (l'accord n'est encore pas total sur les éléments d'addition dans le noyau). Le fait que le noyau externe soit liquide est dû au fait que la courbe de variation de la température terrestre avec la profondeur est située dans cette région au-dessus de la courbe de variation de la température de fusion avec la pression. Reste la composition du manteau – 80 % en volume de la Terre – dont la connaissance est vitale pour la compréhension des grands processus géodynamiques liés aux mouvements de matière par convection dans le manteau. Un certain nombre d'arguments conduisent à penser que la composition chimique du manteau varie peu. Il faut donc attribuer les discontinuités sismiques à des variations minéralogiques à composition chimique globale constante, c'est-à-dire à des transitions de phase. Le problème de la composition minéralogique du manteau se pose donc comme suit :

- Quels sont les minéraux (compa-

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

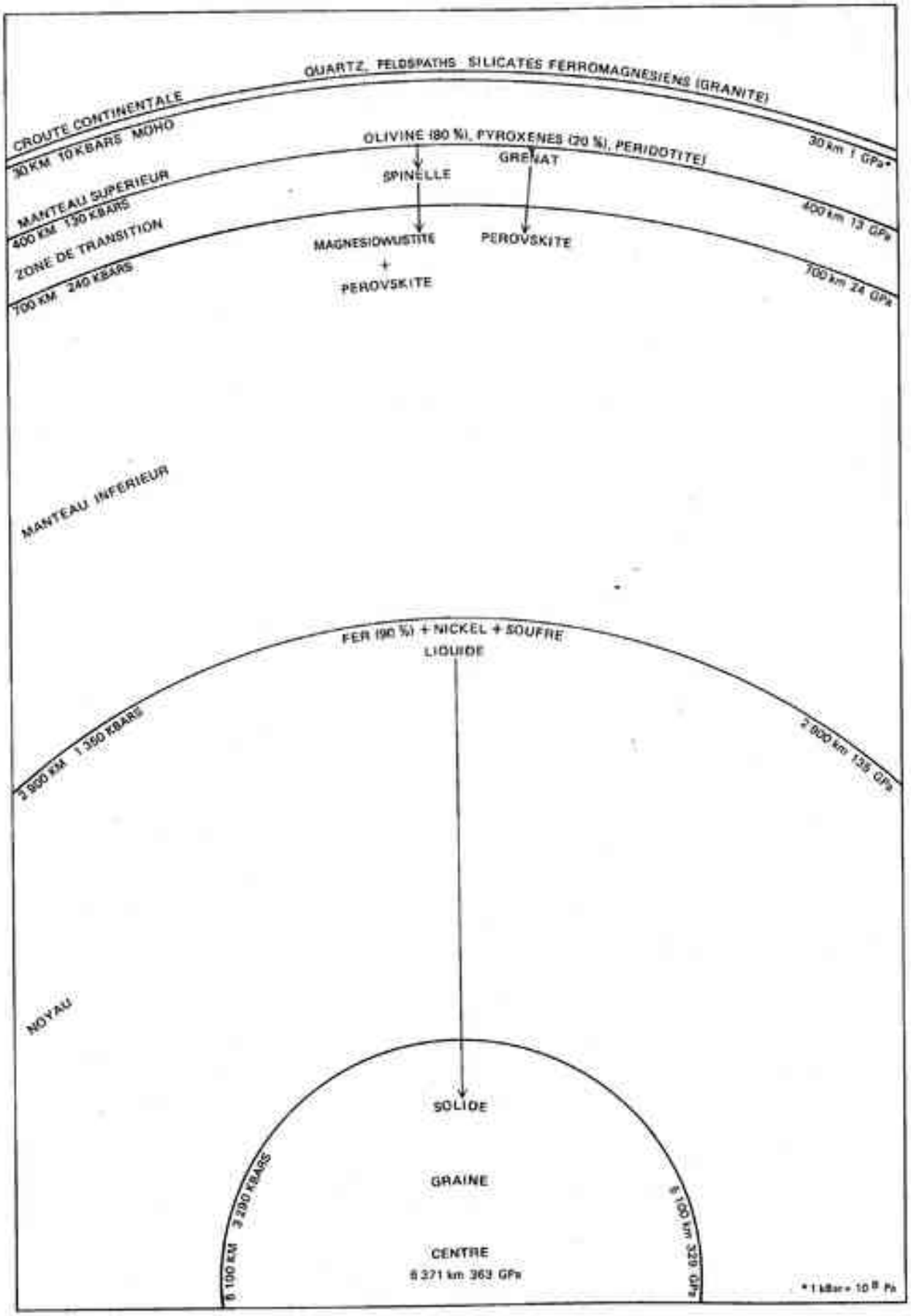


Tableau III — Structure interne du globe

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

tibles avec les exigences chimiques) dont les mélanges en proportions données ont des densités et des constantes élastiques compatibles avec les données sismologiques ?

• Comment se transforment ces minéraux pour rendre compte des discontinuités ?

La réponse à la première question n'est pas si simple car les modèles de Terre sismologiques donnent la densité *in situ*, sous pression. Pour pouvoir comparer à ces données des mélanges de minéraux, dont les densités nous sont connues à pression ambiante, il faut connaître la variation de la densité avec la pression, c'est-à-dire posséder une équation d'état des minéraux (voir tableau II) qui permettra de ramener les densités à la pression ambiante. On peut aussi, et cela a été couramment utilisé, déterminer des équations d'état sismiques qui relient systématiquement la densité et les vitesses sismiques à pression ambiante pour de nombreux minéraux : le principe de cette approche consiste à admettre que cette équation établie pour des minéraux différents sert d'équation d'état pour chacun d'eux, c'est-à-dire que l'effet sur la vitesse d'une variation de densité à poids atomique moyen constant est le même que la variation de densité soit due à un changement de structure cristalline ou à la pression hydrostatique.

Une approche moins indirecte commence maintenant à être possible avec l'utilisation de cellules à diamant chauffées par laser (fig. 5). Les très hautes pressions et les hautes températures obtenues permettent de reproduire dans un très faible volume, les conditions du manteau à toutes les profondeurs. En partant d'un mélange ayant la composition chimique du manteau supérieur, on peut identifier, par diffraction de rayons X, ou diffraction électronique (fig. 6), les phases minérales présentes à des pressions diverses et obtenir des renseignements sur les transitions de phase. Ce dispositif prend le relais vers les très hautes pressions des appareils à piston et cylindre (ou de type Bridgman) qui avaient déjà permis de vérifier que la discontinuité de 400 km, correspond à la transition de $(Mg, Fe)_2SiO_4$ de la structure olivine à la structure spinelle, plus dense d'environ 10 %. Grâce à la cellule diamant, on attribue maintenant la discontinuité de 700 km à une décomposition du spinelle en magnesiowüstite (Mg, Fe)O et en un silicate $(Mg, Fe)SiO_3$ ayant la structure de la perovskite (où le silicium est hexacoordonné au lieu de tétracoordonné).

$$(Mg, Fe)_2SiO_4 \rightarrow (Mg, Fe)O + (Mg, Fe)SiO_3$$

Il ne semble pas qu'on puisse obtenir des structures plus compactes. Tous les problèmes ne sont certes pas résolus, mais on peut admettre que l'on a maintenant une connaissance raisonnable des grands traits de la structure interne du globe (tableau III) grâce à la conjonction de méthodes qui ont apporté des renseignements à l'échelle du système solaire, de la Terre et de la structure atomique des minéraux.

PROGRAMME INTERDISCIPLINAIRE DE RECHERCHE SUR LA PREVISION ET LA SURVEILLANCE DES ERUPTIONS VOLCANIQUES (PIRPSEV)

Le PIRPSEV a été mis en place après les événements de la Soufrière pour promouvoir le développement d'une science volcanologique. Programme de recherche, il se situe très en amont des préoccupations de la surveillance opérationnelle des volcans actifs.

Les recherches suscitées portent principalement sur les propriétés des magmas et sur les mécanismes qui contrôlent leur évolution et les phénomènes éruptifs.

Deux axes de recherche principaux sont retenus :

• Le premier concerne la magmatologie. Il repose sur l'étude des propriétés des silicates liquides et des interactions entre silicates liquides, phases gazeuses et phases solides.

• Le second concerne la tectonophysique. Il repose sur la mécanique des roches et l'analyse des relations entre les propriétés rhéologiques des matériaux de la lithosphère et des formations volcaniques, et les champs de contraintes.

A travers ces objectifs apparaissent les nécessités de recherches pluridisciplinaires, en particulier avec physiciens et chimistes pour la mise au point des techniques de mesure et d'observation. C'est le cas par exemple pour l'amélioration des mesures géodésiques, des techniques analytiques ou de la télétransmission, etc.

Dans le domaine de l'étude des silicates liquides, plusieurs équipes de chimistes sont intéressées par l'étude des propriétés structurales ou thermodynamiques de ces matériaux. Ce thème rapproche aussi le PIRPSEV de milieux industriels du verre, de la métallurgie et des organismes concernés par le stockage des déchets radioactifs.

A ce thème, sont liés également des problèmes essentiels de métallogénie, faisant appel à des stabilités et des solubilités d'éléments dans les silicates, et aux échanges entre silicates liquides, phases gazeuses, phases aqueuses, phases solides, ainsi que ceux de la géothermie pour ce qui concerne les mécanismes de transfert de l'énergie thermique à travers l'écorce terrestre. Et dans le domaine de la mécanique des roches où doivent être développés des travaux de recherche sur les propriétés rhéologiques des minéraux et des roches ainsi que sur les mesures des contraintes in situ, parallèlement à une analyse tectonique et micro-tectonique fine. Cette partie est très liée aux études entreprises dans le cadre de l'action thématique programmée « Mécanismes de transfert de l'énergie thermique à travers l'écorce terrestre » de l'Institut national d'astronomie et de géophysique et plus particulièrement aux travaux, sur site expérimental du Mayet de Montagne, de fracturation in situ.

OBSERVATOIRES GEOPHYSIQUES

Les observatoires géophysiques sont des lieux privilégiés où sont observés de manière continue un certain nombre de paramètres physiques ou physico-chimiques relatifs à la Terre. Ces observatoires sont placés sous la responsabilité des Instituts de physique du globe (Paris, Strasbourg, Clermont-Ferrand). Ils font souvent partie intégrante de réseaux mondiaux dont les données sont centralisées. Il existe trois types d'observatoires : les observatoires volcanologiques, les observatoires sismologiques et les observatoires magnétiques.

Les observatoires volcanologiques. Placés sous la responsabilité de l'Institut de physique du globe de Paris, ils ont pour objet l'étude et la surveillance des volcans actifs. Ils comprennent un certain nombre de réseaux instrumentaux (sismique, déformations, géochimie, magnétisme...), développent des études structurales et géologiques et effectuent des observations phénoménologiques. Trois observatoires existent actuellement : l'observatoire de la Guadeloupe pour surveiller l'activité de la Soufrière de Guadeloupe, l'observatoire de la Martinique pour surveiller l'activité de la Montagne Pelée, l'observatoire de la Réunion pour surveiller l'activité du Piton de la Fournaise.

Les observatoires sismologiques. De différents types, ils sont destinés principalement soit à l'étude de la structure de la Terre (sismologie longues et moyennes périodes), soit à l'étude de la sismicité nationale ou régionale (sismologie courtes périodes).

Dans le premier cas, on rattache des observatoires comme ceux de St-Sauveur (Loire), de Moulis (Ariège), de Segré (Maine-et-Loire) ou de Ste-Marie-aux-Mines (Haut-Rhin), ainsi que les stations du réseau « longues périodes » mondial de l'IPG de Paris.

Dans le second cas correspondent divers observatoires et réseaux de stations en métropole et Outre-Mer : Alsace, Alpes-Maritimes, Alpes centrales, Pyrénées atlantiques, Antilles, ainsi que des stations isolées (Clermont-Ferrand, Brest...). Des données sont également enregistrées par un réseau spécialisé du Commissariat à l'énergie atomique.

Les observatoires magnétiques. Ils sont destinés à suivre l'évolution du champ magnétique terrestre au cours du temps, à en étudier l'origine, à permettre la mise à jour de la carte de déclinaison utilisée pour la navigation aérienne et maritime...

La France a la responsabilité de quatre observatoires : l'observatoire national de Chambon-la-Forêt, près d'Orléans, ceux de Crozet, de Kerguelen et de Terre Adélie, dans les Terres australes et antarctiques françaises.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

La naissance de la tectonique des plaques

L'intuition d'Alfred Wegener était donc exacte ..., les continents dérivent et la surface de la terre est en continuelle évolution. Les techniques modernes d'exploration sous-marines et les nouvelles connaissances acquises en sismologie et magnétisme ont donné naissance à la tectonique des plaques, modèle d'évolution globale de notre planète.

Xavier LE PICHON

C'est en 1970 qu'est apparue l'appellation « tectonique des plaques », il y a tout juste dix ans, deux ans après qu'on ait démontré que l'activité sismique et volcanique actuelle est, en première approximation, due au mouvement relatif de quelques grandes plaques indéformables dont on peut mesurer les taux d'écartement et calculer les taux de rapprochement.

Le renouvellement du fond des océans

Dix ans plus tôt, en 1960, Harry Hess, à Princeton, avait proposé le concept de base de cette nouvelle synthèse, celui du renouvellement du fond des océans. Ceux-ci proposait-il, ont une durée de vie géologiquement brève, moins de deux cents millions d'années. Ils naissent le long du Rift, au milieu des océans, à l'axe des dorsales et vont disparaître dans les grands fossés océaniques qui bordent les océans. Son hypothèse s'était heurtée au scepticisme général. Pourquoi le fond des océans se comporterait-il comme ce tapis roulant auquel Hess le comparait, se transportant sans déformation sur le dos de cellules de convection du manteau ? D'ailleurs, la géométrie de ces cellules de convection était tout à fait extraordinaire. Il y a dix mille kilomètres entre la crête de la dorsale du Pacifique et les fossés du Pacifique occidental : par contre, les Rifts entourent l'Afrique et le continent Antarctique sans qu'aucun fossé ne permette la descente des cellules de convection proposées.

C'est Fred Vine, un étudiant anglais de l'université de Cambridge, qui fournit en 1963 la clef permettant de prouver que le fond des océans se forme bien à l'axe des dorsales de la manière proposée par Hess. Etudiant le magnétisme, il savait que les roches volcaniques s'aimantent de manière stable suivant la direction du champ magnétique en se refroidissant. Il savait aussi qu'on venait d'établir la réalité des inversions du champ magnétique terrestre. Il devenait donc évident, pour lui, que le tapis roulant de Hess était en fait une bande magnétique enregistrant les inversions du champ terrestre sous la forme de zones aimantées de polarité alternée, symétriques par rapport à l'axe des dorsales.

Mais Vine travaillait dans le nord de l'océan Indien et l'océan Atlantique, qui sont les deux régions où le tapis roulant avance trop doucement pour être un bon enregistreur de ces inversions. Ce fut donc Walter Pitman, un étudiant américain du Lamont geological observatory, qui confirma l'hypothèse de Hess et le corollaire de Vine à partir de l'étude d'un magnifique profil magnétique enregistré sur la dorsale dans le sud-est du Pacifique. Dès lors, tout devenait simple. Il suffisait de reprendre la grande quantité de données magnétiques obtenues dans tous les océans depuis dix ans et de les réinterpréter pour déchiffrer l'histoire du fond des océans. En moins de deux ans, au Lamont, l'équipe de Jim Heirtzler, à laquelle j'appartenais, transformait ainsi les cartes d'anomalie magnétique en cartes de l'âge du fond des océans. Le renouvellement du fond des océans (« sea-floor spreading »), tel qu'il avait été formulé par Hess, se trouvait ainsi entièrement confirmé. Le long des cinquante-deux mille kilomètres de frontières de Rift s'ajoutent tous les ans trois kilomètres carrés de nouvelle croûte océanique, la vitesse d'expansion moyenne est de trois centimètres par an de part et d'autre, soit six centimètres pour la vitesse d'écartement total entre les deux bords du Rift. Et l'âge moyen du fond des océans n'est que de soixante-trois millions d'années alors que l'âge de la terre est de 4,6 milliards d'années.

Lithosphère et asthénosphère

Ainsi, en 1966 et 1967, ceux parmi nous qui avaient la chance de participer à ces découvertes, ne doutaient plus de la réalité de l'expansion du fond des océans à l'axe des dorsales. Mais où donc avaient disparu les fonds océaniques plus anciens ? Etait-il possible que la terre soit entrée en expansion rapide depuis deux cents millions d'années, comme l'avait proposé un géologue australien, Carey ? Cela paraissait invraisemblable, d'autant plus que le taux d'expansion aurait alors augmenté de manière régulière et rapide depuis deux cents millions d'années car plus les fonds sont âgés, moins ils sont étendus et ceux dont l'âge dépasse cent quarante millions d'années n'existent que dans des zones très restreintes de l'océan Pacifique occidental et de l'Atlantique nord. Bruce Heezen, au Lamont, qui avait cartographié une grande partie des fonds océaniques penchait pourtant pour cette solution.

□ Xavier Le Pichon est professeur de géodynamique à l'université Pierre et Marie Curie à Paris. De 1963 à 1968, il a séjourné au Lamont geological observatory de l'université Columbia à New York à l'époque où se faisaient les principales découvertes qui ont amené la naissance de la tectonique des plaques, à laquelle il a ainsi été amené à participer.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

On voit, disait-il, sur les fonds océaniques, l'indication évidente de leur formation dans un contexte d'expansion. Mais nulle part, la compression qui devrait signer leur disparition n'est lisible. Et personne ne croyait plus aux cellules de convection de Hess.

C'est à ce moment que s'imposa progressivement la notion de stratification des propriétés mécaniques (rhéologiques) des roches formant les premières centaines de kilomètres de la terre. On savait bien sûr depuis le début du siècle que l'intérieur de la terre se déformait de manière visqueuse en réponse aux charges qu'on lui imposait. La calotte glaciaire scandinave a disparu il y a huit mille ans ; pourtant le bouclier scandinave continue à se soulever en réponse à la charge aujourd'hui disparue. La constante de temps du phénomène est de l'ordre de vingt mille ans. On savait aussi que la partie la plus superficielle avait un comportant rigide et élastique. On distinguait donc classiquement une lithosphère rigide et cassante au-dessus d'une asthénosphère capable de fluer pour expliquer les phénomènes de rebondissement glaciaire. Cette constatation paraissait raisonnable puisque la température augmente très vite avec la profondeur, jusqu'à 1 350° C vers cent kilomètres, et que la capacité du fluage des roches augmente beaucoup lorsqu'on approche de leur température de fusion. On expliquait du même coup le fait que les reliefs terrestres semblent en équilibre hydrostatique lorsqu'on choisit un niveau suffisamment profond du manteau (c'est ce qu'on appelle l'isostasie). Mais il existait une grave difficulté : l'existence de tremblements de terre jusqu'à sept cents kilomètres de profondeur, existence découverte par un sismologue japonais, Wadati, dès 1928. Qui dit séisme, dit accumulation de contraintes importantes soudainement relâchées lors d'une fracture. Qu'il y ait des séismes dans la lithosphère rigide et élastique était donc normal mais par contre, il était tout à fait impossible qu'il y en eût dans l'asthénosphère.

L'argument était de poids. Ce sont deux sismologues du Lamont, Jack Oliver et Bryan Isacks, qui levèrent en 1967 la difficulté en montrant que ces zones de séismes profonds étaient dues à l'enfoncement de la lithosphère océanique froide et cassante au sein de l'asthénosphère. A la même époque, Walter Elsssser, à Princeton, montrait qu'il n'était pas nécessaire de recourir aux cellules de convection de son ami Hess. Tout se passait dans la lithosphère elle-même, véritable guide de contraintes qu'on pourrait, bien que l'analogie soit très grossière, comparer à une feuille de papier flottant sur l'eau. Une poussée exercée sur un bord se transmet facilement à l'autre bord car elle repose sur un liquide. Et la poussée, proposait Elsasser, est due au poids de la lithosphère. Celle-ci se forme donc à l'axe des dorsales lorsque la matière remontant de l'asthénosphère se refroidit par conduction à travers le fond des océans. En se refroidissant, elle s'alourdit et devient plus lourde que l'asthénosphère dans laquelle elle finit par replonger.

La cinématique des plaques

Mais comment se fait le transfert des zones de formation de lithosphère, les Rifts, aux zones de plongée, les fossés de subduction ? C'est Jason Morgan, qui venait de passer sa thèse à Princeton avec Hess et Elsasser qui fournit la réponse en avril 1967, à la réunion de l'American Geophysical Union à Washington. Cette réunion fut une étape importante durant laquelle l'ensemble de la communauté américaine des Sciences de la Terre bascula du « fixisme » vers le « mobilisme ». Pourtant la communication de Jason Morgan fut à peine remarquée. Celui-ci

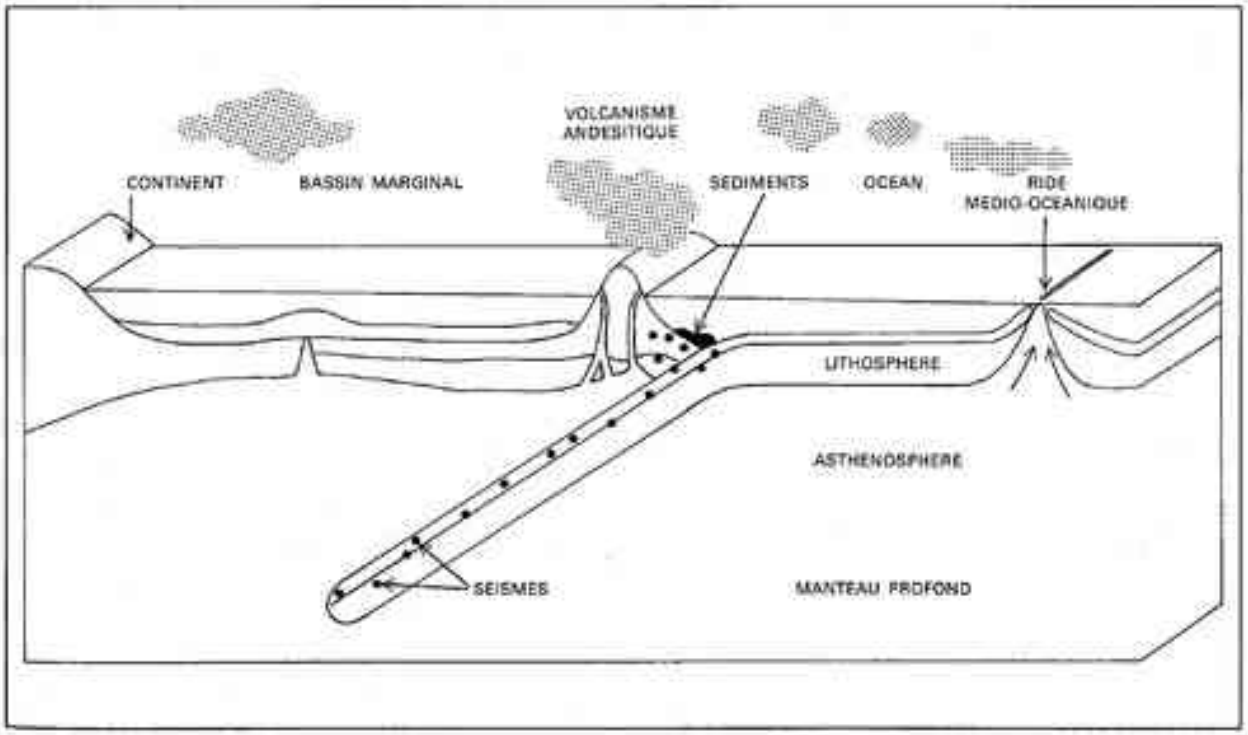


Fig. 1 – Schéma d'organisation des mouvements de la lithosphère sur la terre. Les rides médio-océaniques sont le lieu où se séparent deux plaques de lithosphère entrainant la remontée de l'asthénosphère chaude. Celle-ci en se refroidissant s'accrète de part et d'autre aux deux plaques. Il y a donc accrétion symétrique au Rift. La lithosphère lorsqu'elle est âgée et lourde peut plonger dans l'asthénosphère où elle se réchauffe et perd son identité thermique. C'est le phénomène de la subduction qui s'accompagne de séismes très importants et d'un volcanisme andésitique. Une zone d'extension se forme souvent en arrière des zones de subduction conduisant à l'apparition d'un bassin marginal.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

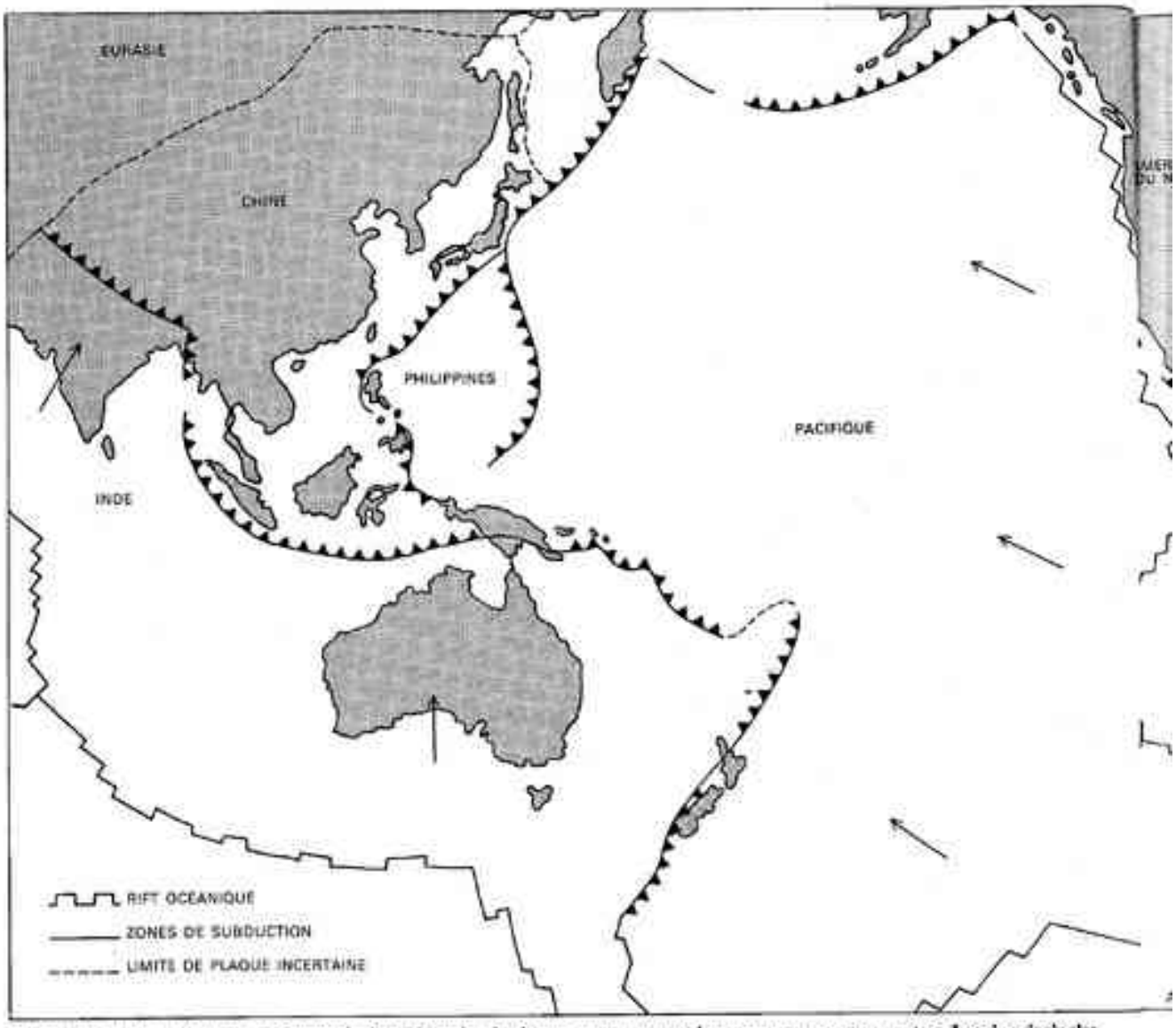


Fig. 2 – La surface de la terre est composée d'une douzaine de plaques en mouvement les unes par rapport aux autres. Les six principales, Pacifique, Amérique, Afrique, Eurasie, Inde et Antarctique furent utilisées par l'auteur pour calculer un modèle cinématique global don-

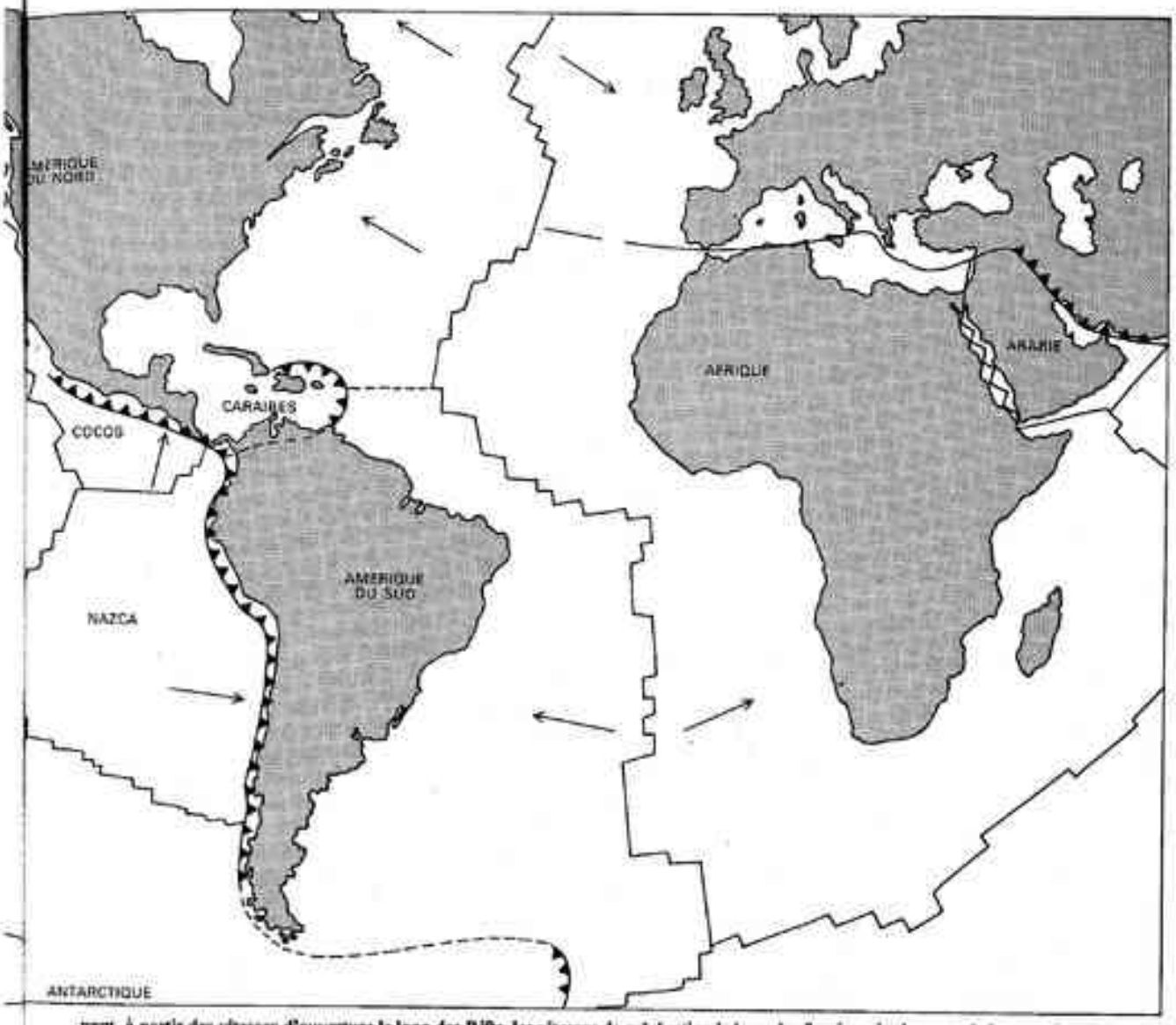
tirait simplement les conséquences du modèle d'Elsasser. Si la lithosphère est indéformable, les déplacements sont ceux de corps rigides à la surface d'une sphère. Il devient donc facile de calculer le mouvement le long d'une frontière entre deux portions de lithosphère : deux plaques. On peut de même composer les mouvements de deux paires de plaques A, B et A, C pour trouver le mouvement entre les plaques B et C.

Pour ma part, j'avais suivi cette communication avec beaucoup d'attention car le titre annoncé concernait une controverse que nous avions sur la dynamique des fossés océaniques. Le titre ne correspondait pas à la communication, mais, travaillant depuis un an à déchiffrer les mouvements d'ouverture à l'axe des dorsales, je compris l'importance de cette démonstration. Je consacrai donc les six mois suivants à établir un modèle cinématique global qui rende compte de l'ensemble des mouvements le long des Rifts, les frontières d'accrétion, et des zones de subduction, les frontières de convergence. J'utilisai pour cela six plaques principales, Pacifique, Amérique, Eurasie, Afrique, Inde et Antarctique. A partir des mouvements de divergence mesurés grâce aux anomalies magnétiques le long des zones d'accrétion, je pus calculer les mouvements de convergence qui devaient se produire le long des zones de subduction. Il apparaissait clairement que, grâce à l'indéformabilité des plaques, les 3 km² de surface créés à l'axe des dorsales chaque année disparaissaient d'une manière compliquée au sein des zones de subduction réparties de manière très différente.

Il n'y a que trente-deux mille kilomètres de fossés océaniques de subduction, mais la vitesse moyenne de subduction atteint 8,7 cm/an. Il existe bien une convergence intracontinentale, sur une frontière de près de douze mille kilomètres de long, mais le taux moyen de convergence y est beaucoup plus faible, à peu près 3 cm/an.

En fait, la meilleure analogie qui ait été trouvée depuis pour rendre compte de ce système est celle du lac de lave du Kilanea. La lave liquide en arrivant au contact de l'atmosphère se solidifie et forme des plaques qui s'épaississent et s'alourdissent au cours du temps. Comme la lave considérée est plus lourde que la lave en fusion, ces plaques finissent par plonger au sein du lac où elles sont remises en fusion.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf



nant, à partir des vitesses d'ouverture le long des Rifts, les vitesses de subduction le long des fossés océaniques et de la zone de subduction himalayenne.

Mais écartement et rapprochement ne se font pas nécessairement aux deux bords d'une même plaque. Bien que sur la surface du lac de lave, tout accroissement de surface de plaque soit compensé par une diminution égale, la conservation de surface se réalise en fait au sein d'une véritable mosaïque. Il en est de même sur la terre : la surface créée dans l'Atlantique, par exemple, est résorbée en grande partie sur le pourtour du Pacifique et au nord de l'océan Indien.

Lorsque je montrai mes résultats à Jason Morgan, il me fit tout de suite remarquer que les frontières des plaques sur lesquelles j'avais calculé le mouvement, rendaient compte de l'essentiel de l'énergie sismique dissipée à la surface de la terre. Bien plus, comme j'avais dû faire passer une frontière de convergence le long de la chaîne alpino-himalayenne, il devenait évident qu'il ne s'agissait plus seulement d'un modèle concernant la géologie des océans, mais bien d'un modèle global rendant compte de l'évolution dynamique de l'ensemble de la surface de la terre, continents compris.

A la même époque, Dan Mc Kenzie, qui venait de terminer sa thèse à Cambridge lui aussi, tirait indépendamment les conséquences cinématiques de la rigidité des plaques en prenant comme exemple l'enfoncement du Pacifique le long des zones de subduction. Les directions d'enfoncement qu'il obtenait à partir des mécanismes au foyer des séismes étaient entièrement compatibles avec celles que j'avais calculées à partir de mon modèle global. Il était clair qu'il fallait maintenant tirer les leçons sismologiques et géologiques de cette nouvelle vision de la terre. C'est ce que firent Bryan Isacks, Jack Oliver et Lynn Sykes au Lamont en 1968, bientôt suivis par John Dewey et John Bird alors à l'université d'Albany. Ces derniers, en 1970, montrèrent comment la tectonique des plaques amenait à reprendre entièrement les modèles de formation des chaînes de montagnes.

L'intuition d'Alfred Wegener qui disparut au Groëland, il y a cinquante ans cette année, était donc exacte. Les continents dérivent et la terre est un milieu dynamique en continuelle évolution. Mais Wegener n'avait pas su tirer les conséquences du rebondissement glaciaire, engageant ainsi son hypothèse dans une impasse. Il faisait jouer à la croûte un rôle réservé à la lithosphère.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

Fig. 3 – Photographie du lac de lave du Kilauea, volcan de l'île d'Hawaii. La lave remonte en surface le long d'une fissure ouverte qui apparaît sur la photo. Elle se refroidit et s'accrète à la croûte solide de part et d'autre. La fissure est l'analogue d'un rift océanique. La lave liquide, l'analogue de l'asthénosphère. La croûte, l'analogue de la lithosphère. La situation sur la photo peut être comparée à celle de l'Atlantique, vu du nord, avec le décalage équatorial de la dorsale que reflète le décalage de la fracture continentale initiale (photographie de Wendell A. Duffie U.S. Geological Survey).

Fig. 4 – Photographie du lac de lave du Kilauea. On voit un ensemble de cinq fissures en cours d'expansion active formant deux jonctions triples telles que celles des Galapagos dans l'océan Pacifique ou de l'île Rodrigues dans l'océan Indien. Les directions d'ouverture apparaissent dans le grain de la lave consolidée. La distribution des zones d'ouverture et des zones de résorption de croûte se fait de manière complexe dans le lac de lave de manière qu'à tout moment il se forme autant de croûte qu'il s'en résorbe. Il en est de même sur la terre. (Photo Wendell A. Duffield, U.S. Geological Survey).

C'est l'exploration du fond des océans qui a brisé ce blocage en démontrant que le fond des océans était éphémère. Mais c'est la sismologie et une réflexion physique sur la structure de la terre qui ont permis de fournir le cadre interprétatif dans lequel nous vivons maintenant. Il est frappant que la plupart des découvertes-clefs se soient faites dans des laboratoires tournés vers l'océan mais s'occupant aussi des continents, où cohabitaient physiciens et naturalistes, les problèmes des uns étant résolus par les autres et vice et versa. En fait, l'essence elle-même de cette révolution des Sciences de la Terre est d'offrir un modèle d'évolution globale de notre planète. Les chercheurs, éparpillés entre des disciplines de plus en plus complexes et diversifiées, découvrent que la Terre est une planète qui doit être étudiée de manière globale, et replacée dans le système solaire, pour être comprise. Globalité et interdisciplinarité, voilà donc les deux aspects essentiels qui caractérisent cette révolution, bien plus que l'aspect quantitatif, essentiel certes, mais déjà présent dans toutes les disciplines.

En fin de compte, un modèle aussi bon qu'il soit, ne vaut que par les données sur lesquelles il repose. Le développement extraordinaire des moyens d'exploration et d'analyse durant ces vingt dernières années a évidemment joué un rôle considérable dans la naissance de la tectonique des plaques. C'est parce que la France ne disposait pas à l'époque de ces outils qu'elle y a joué un rôle aussi effacé. Nous sommes maintenant dans une seconde phase de cette révolution, celle durant laquelle chacune des disciplines des Sciences de la Terre se renouvelle en s'insérant dans le cadre de ce modèle d'évolution globale. En dix ans, nos laboratoires oint pris largement place dans le courant de la recherche internationale. Mentionnons par exemple la participation active des Français au programme de forage international IPOD et le rôle de promoteurs que nous avons joué dans l'exploration par submersible des frontières immergées de plaques, sans oublier la contribution majeure de la France à l'interprétation tectonique des chaînes, à l'évolution de la géochimie ou à l'exploration de l'océan Indien. Il faut maintenant progresser dans l'exploration en profondeur de la lithosphère, clef des mécanismes physiques et chimiques de son évolution et aborder le champ immense des modifications de l'environnement au cours de l'évolution géologique.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

Les gisements métallifères et leur genèse : la métallogénie

Carrefour de connaissances et de méthodes, la métallogénie, par la richesse et la complexité des techniques qu'elle met en jeu, est une grande science synthétique de la Terre.

Pierre ROUTHIER

L'histoire des métaux dans les civilisations illustre bien les relations incessantes et entrecroisées entre observations, accidentelles puis répétées, créations de besoins et recherches orientées pour les satisfaire. Cette histoire a commencé par les métaux natifs : or et cuivre puis, ici et là, fut observée, dans des foyers, la réduction d'oxydes ou de carbonates par le charbon de bois.

De l'orpaillage (1) à la métallogénie

La métallurgie du fer n'a pu se développer, après quelques millénaires, qu'en franchissant de nombreux seuils parmi lesquels : au début du XIIIe siècle fabrication de « fonte » grâce à l'application de la force hydraulique aux soufflerie ; de 1625 à 1735 remplacement partiel du charbon de bois (carbone quasi pur) par de la houille préalablement transformée en coke ; en 1784 transformation de la fonte en fer par puddlage (2), puis amélioration rapide des méthodes d'affinage et de travail du fer.

Dès lors les conditions essentielles se trouvèrent réunies pour le développement explosif de la métallurgie, de l'exploitation des bassins charbonniers et, de fil en aiguille, la pénétration dans le sous-sol, l'expansion de l'industrie minérale dans son entier et la naissance des sciences de la terre. Géologie, minéralogie et cristallographie, ainsi d'ailleurs que la chimie minérale sont très largement filles de l'« art des mines » et de la métallurgie qui sont devenues des chaînes de techniques très complexes exigeant des investissements parfois considérables (se comptant en centaines de millions de francs par mine) de plus en plus difficiles à mobiliser.

Désormais, on allait chercher de plus en plus de gisements (3) de minerais (4) très variés. Actuellement, un peu plus de mille exploitations minières fournissent au monde non communiste 90 % des métaux et de divers minéraux. Depuis des millénaires, des hommes prospectent pour découvrir des gisements. Leur démarche est bien traduite par les mots grecs metallon (métal) et metalleion (mine), qui évoquent le mouvement, la quête vers (meta)... quelque autre chose ou quelque autre lieu ? (allon). Sans nul doute les géologues-prospecteurs dès 3000 avant J.-C. au moins, se guidaient à la lumière de multiples analogies finement observées. Mais ce n'est qu'après la fin du XVIIIe siècle que la somme des connaissances acquises a pu commencer de s'organiser en un domaine scientifique. Celui-ci n'a finalement reçu un nom à peu près partout adopté qu'en 1905, sous la plume du grand ingénieur au Corps des mines et géologue Louis de Launay. Il forgea le terme **métallogénie** pour la science des gisements de substances minérales, surtout de métaux (uranium compris) et de leur genèse (5).

C'est vraiment une gageure et même une acrobatie que de présenter, en si peu d'espace, un tableau de la métallogénie. Mais en isoler un volet pour le présenter à un large public ne pourrait conduire qu'à une sous-estimation de son contenu et de ses méthodes. En effet, alors que les gisements de charbons et d'hydrocarbures liquides ou gazeux sont essentiellement liés à l'histoire de bassins sédimentaires le plus souvent postérieurs au Précambrien, ceux de métaux sont liés : *à tous les phénomènes géologiques ; à toutes les étapes des cycles géologiques : érosion et altération des masses continentales, sédimentation, volcanisme sous-marin, plissement ou tectogenèse et mises en place de roches granitiques, puis soulèvement et formation des reliefs ou orogenèse, souvent accompagnée encore d'un volcanisme ; à des systèmes chimiques et thermodynamiques très variés et cela à toutes les époques, même les plus reculées, de l'histoire de la terre saisies par la datation des roches ;* des oxydes de fer s'accumulèrent dès – 3,8 milliards d'années au Groenland.

Dès lors, l'éventail des connaissances et des méthodes à maîtriser est extrêmement large. Nous ne pouvons en donner qu'une vue schématique, surtout centrée sur l'idée force du transformisme crustal. Nous exprimons ici, à

□ Pierre Routhier, directeur de recherche au CNRS, est responsable de l'équipe de recherche « Provinces métallogéniques » à l'université de Paris VI (ER 194).

(1) Orpaillage : lavage à la batée, ou par d'autres procédés, d'alluvions ou de terres pour en extraire les particules d'or.
(2) Puddlage : fabrication de fer ou d'acier (moins de 1,5 % de carbone) par décarburation de fonte liquide (3 à 5 % de carbone) avec une scorie oxydante dans un four à réverbère (Henry Cort, 1784).
(3) Gisement : – sens économique : accumulation de minerai susceptible d'être exploitée avec profit, ou du moins sans perte ; cela exige que la teneur moyenne du minerai extrait dépasse une « teneur limite » fixée par les cours des métaux, les techniques, les conditions géographiques (disponibilité d'eau et d'énergie) ; – sens scientifique : forte anomalie géochimique par rapport à la teneur moyenne de l'élément considéré dans l'écorce continentale (« clarke »).
(4) Minerai : association de minéraux d'où l'on peut tirer un ou plusieurs éléments chimiques ou minéraux utiles.
(5) Il n'existe en réalité aucun mot totalement et universellement satisfaisant pour désigner cette science. Seul l'allemand, avec son génie des mots composés, a pu forger : « Lagerstättenkunde » pour les gisements de substances utiles en général et « Erzlagerstättenkunde » pour les gisements de minerais métalliques.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

plusieurs reprises, des conclusions personnelles ; elles sont étayées dans un ouvrage édité par le BRGM et qui sera paru à l'ouverture de la 27ème session du Congrès géologique international (juillet 1980).

Du fourmillement des gisements aux classifications et aux modèles
Les types de gisements

Les ingénieurs des mines du XIXe siècle furent en quelque sorte vite débordés par l'extrême variété des cas individuels, variété des formes, du contenu métallique, de la minéralogie, des relations avec le milieu géologique. Ils s'efforcèrent d'organiser toutes ces données dans des classifications génétiques. Comme la thermodynamique naissait (Sadi Carnot, 1824), comme ils utilisaient des machines à vapeur, ils furent naturellement tentés par des classifications fondées sur la température et la pression, donc la profondeur, au moment de la formation des gisements. Cette ambition était partiellement fondée, car les gisements ont été des machines à collecter et à concentrer les éléments chimiques, mais elle anticipait la connaissance objective. Les méthodes et les techniques pour mesurer les paléo-températures et les paléo-pressions n'étaient pas encore nées. D'autre part, les « machines-gisements » ont fonctionné dans des milieux géologiques particuliers dont elles sont indissociables. Leur réduction à des modèles ne peut être réalisée en négligeant l'histoire géologique de ces milieux. Les progrès du décryptage historique, des chronologies en géologie furent donc et restent décisifs pour l'évolution de la métallogénie.

Il aura fallu plus d'un siècle pour en venir, après beaucoup de résistances, à une organisation des données beaucoup plus « naturaliste », où les gisements sont considérés comme des *organismes* présentant des liens fonctionnels, en quelque sorte « physiologiques », avec leur milieu générateur, dont il faut décrypter l'histoire par une rétro-reconstitution. Finalement, ce n'est qu'après 1950 que s'est vraiment construite une typologie des gisements ; à des variantes près, elle réduit ceux-ci à une dizaine ou une douzaine de grands modèles anatomiques, à partir desquels, et en faisant converger de nombreuses méthodes et techniques, on peut commencer à passer aux modèles de fonctionnement, c'est-à-dire à la genèse. Des géologues français ont joué et jouent un rôle important dans l'élaboration de la typologie en général et de certains modèles en particulier.

Le modèle « amas sulfuré ». Il en existe certainement des milliers de représentants. La figure 1 montre une « cheminée » passant vers le haut à un « amas ». La cheminée représente la fin de l'ascension au travers de roches, souvent volcaniques, d'une solution aqueuse chaude minéralisée. Celle-ci monte d'une profondeur inconnue : quelques centaines de mètres à quelques kilomètres (?). Sous la cheminée, ce voyage de la solution ne laisse pas de traces que l'on puisse lire aisément. Les roches pénétrées par la cheminée ont subi une « altération hydrothermale ». En arrivant sur un fond sous-marin, en général peu profond – quelques mètres à quelques dizaines de mètres – la solution minéralisée s'est « extravasée » et, en se refroidissant, a déposé un amas de forme lenticulaire, constitué de sulfures : pyrite (FeS_2), chalcopyrite ($CuFeS_2$), sphalérite (ZnS) et parfois galène (PbS). Dans l'amas, qui renferme 50 % en poids, ou plus, de pyrite, les trois autres sulfures se distribuent verticalement, et souvent aussi latéralement, suivant une zonalité : chalcopyrite en bas, sphalérite et galène en haut.

Cette loi de zonalité est quasi universelle en métallogénie et traduit les affinités respectives des éléments pour le soufre (chalcophilie), d'où leur ordre de dépôt, à condition qu'assez de soufre soit présent dans le milieu de dépôt.

Le type amas sulfuré ne s'est pas formé dans tous les bassins marins. Dans 90 ou 95 % des cas, il s'installe sur un volcanisme sous-marin (non représenté sur la figure) et lui succède ; dans l'immense majorité des cas ce volcanisme comporte des laves et des tufs « acides » (riches en SiO_2). Pourtant, il existe quelques exemples d'amas sulfurés importants mis en place loin de centres d'émission volcaniques ; c'est le cas de celui de Rouez, récemment découvert dans l'Est du Massif Armoricain. Il faut donc concevoir le modèle le plus général comme celui d'un champ géothermal, où des eaux réchauffées en profondeur et y collectant

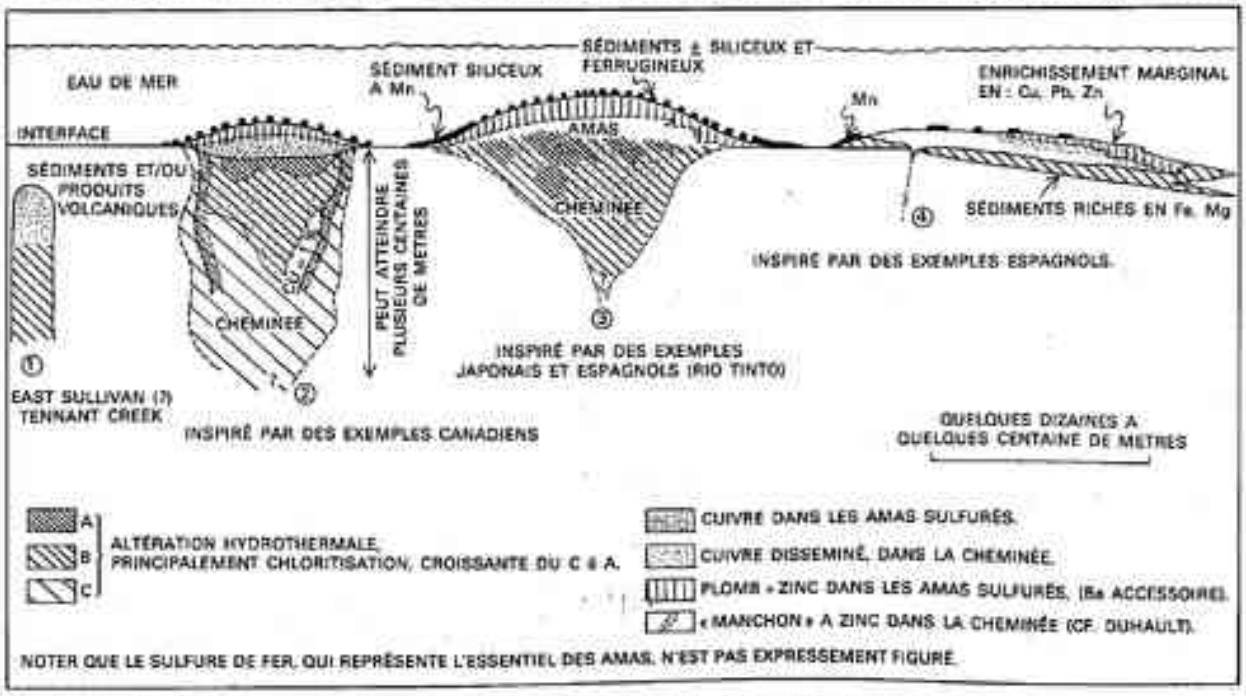


Fig. 1 – Modèle général des amas sulfurés, reconstitué par le rapprochement de nombreux exemples.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

des métaux, viennent émerger par des « griffons » (6). Au gradient géothermal anormal est statistiquement associé du volcanisme, mais il arrive que l'activité magmatique reste enfouie à l'aplomb du gisement. Statistiquement le volcanisme, surtout acide, reste un bon guide vers les gisements de ce type, mais un certain nombre nous échapperont si nous nous fions seulement à lui.

L'importance économique des amas sulfurés est considérable. Ils fournissent près de 10 % du cuivre mondial et une proportion importante, mais mal estimée, du zinc.

Ce type présente un trait remarquable dans l'histoire de la terre. De tous les modèles c'est le plus ubiquiste dans le temps géologique : on le connaît depuis l'Archéen (>2,5 milliards d'années) jusqu'au Pliocène (environ cinq millions d'années). Les tonnages de métaux impliqués n'évoluent pas clairement en fonction du temps, bien que les amas précambriens soient souvent parmi les plus gros, comme Broken-Hill (Australie), où sont accumulées 185 millions de tonnes de zinc et plomb à une teneur de 20 % de métal. Il ne fait aucun doute que la genèse des amas correspond à une chaîne de mécanismes hautement répétitive, relativement indifférente aux changements radicaux de la large géométrie des plaques lithosphériques intervenus depuis l'Archéen le plus ancien jusqu'à aujourd'hui. De plus cette chaîne s'est sans doute « alimentée », à des profondeurs à discuter, dans un « fond continu » déjà légèrement enrichi en cuivre et zinc. Ainsi on évoque le problème des sources des éléments, sur lequel on va revenir.

Le modèle « porphyry ». (7) Il en existe des centaines démontrés, voire des milliers de représentants. Ceux qui sont exploités fournissent plus de 50 % du cuivre mondial (porphyry copper) et presque tout le molybdène. La figure 2 le résume à l'extrême. Différence essentielle avec le modèle amas sulfuré : ici le fluide minéralisé, venu encore de la profondeur, n'a pas émergé. Tous les métaux restent enfermés dans un ou plusieurs drains en forme de doigts de gant et ils se distribuent suivant la même zonalité que dans les amas. Une altération hydrothermale bien zonée a modifié la minéralogie des roches initiales. Très souvent le zinc et le plomb ne constituent, autour de l'accumulation de cuivre, qu'un « halo » à très basses teneurs. Cependant, lorsque des porphyries se sont mis en place dans des domaines de l'écorce terrestre très chargés en ces deux métaux, il leur arrive d'être ceinturés d'importantes accumulations de ceux-ci ; c'est le cas du fameux Bingham (Utah, Etats-Unis). D'autre part du molybdène, sous forme de molybdénite (MoS_2), s'ajoute souvent au cuivre vers le cœur du dispositif. Bien que fluctuant, le rapport Mo/Cu augmente fréquemment de la bordure des masses continentales, comme par exemple la bordure pacifique des Etats-Unis, jusque profondément dans l'intérieur. On passe ainsi à de véritables « porphyries à molybdène », tel le fameux Climax (Colorado), situé à plus de 1 500 km de la côte. Or celui-ci, qui renferme aussi un peu de tungstène, s'installe dans une croûte précambrienne qui contient de petites concentrations en tungstène et molybdène ! Ces divers faits montrent que le contenu métal d'un « système porphyry » n'est pas indifférent à la composition du panneau de la croûte continentale dans lequel il est monté. La discussion des sources des éléments doit donc en tenir compte ; la source du cuivre, quoique encore discutable, semble plus profonde.

Le milieu géologique est bien typé lui aussi. Les « porphyry coppers » se sont presque tous formés à quelques centaines de mètres ou quelques kilomètres (un à trois ou quatre), sous une surface continentale parfois peuplée d'édifices volcaniques vomissant des laves surtout andésitiques (à teneur moyenne en SiO_2), et au sein d'essaims de petites intrusions « subvolcaniques », c'est-à-dire peu profondes. Les roches subvolcaniques présentent une structure « porphyrique » c'est-à-dire à cristaux assez gros de « premier temps » noyés dans une matrice à grain fin ; d'où le nom donné à ce type de gisements. Le fluide aqueux minéralisé s'est accumulé, à haute température et pression, au sommet de « chambres » un peu plus profondes, et s'insinuant à travers toutes les microfissures du « toit » il s'est condensé par chute de température et a déposé son contenu métallique.

Si l'on prend de la hauteur par rapport aux larges structures terrestres, on constate que la très grande majorité des « porphyry coppers » s'est installée dans les ceintures volcanisées, et riches en intrusions de granitoïdes, péripacifiques, sur les marges continentales ou dans les arcs insulaires, en particulier ceux du Pacifique sud-ouest (Philippines, Bornéo, Nouvelle-Guinée et archipels adjacents).

Dans le temps géologique les plus nombreux et les plus gros (et de beaucoup !) prirent naissance après – 200 millions d'années, c'est-à-dire après le Trias, date à laquelle commence l'expansion océanique, le fonctionnement bien démontré des rides médio-océaniques où la lithosphère océanique se régénère sans cesse, tandis qu'elle s'engouffre sous la lithosphère continentale dans les zones de subduction. C'est le mécanisme bien connu de la « tectonique des plaques ». Il est donc normal qu'on lie la genèse des « porphyry coppers » à ce mécanisme et que, par voie de conséquence, on soit tenté de trouver la source première du cuivre dans la lithosphère océanique subductée, sous les marges ou les arcs insulaires. Cependant ce chemin direct, en un seul temps, sans relais éventuellement multiples, reste contestable. Et l'on a dit plus haut pourquoi la source de tous les éléments entrant dans la composition des systèmes porphyries ne peut pas être trouvée directement dans la seule lithosphère océanique.

Par ailleurs, le modèle porphyry est, lui aussi, fort ubiquiste dans le temps. Il apparaît dès l'Archéen, et donc à des époques où le mécanisme de la tectonique des plaques, avec les mêmes propriétés rhéologiques que beaucoup plus tard, est loin d'être démontré ; il n'y est même pas du tout vraisemblable. Mais les porphyry coppers archéens, et même précambriens en général, actuellement connus sont très modestes : peu volumineux et (ou) très peu concentrés. En d'autres termes, la genèse de tels systèmes ne semble pas obligatoirement sous la dépendance de la tectonique des plaques – telle qu'on la conçoit actuellement – mais elle a été fortement activée par elle. On peut dire que la subduction en est un puissant « révélateur », notion sur laquelle on revient plus loin.

La loi des forts gradients

Dans les deux modèles précédents, on voit que le dépôt des éléments, dont la source est mal connue, s'effectue après un transport dont l'ampleur est aussi mal connue, dans un domaine superficiel où les gradients de température et pression sont nécessairement rapides. *Mutatis mutandis*, et pour tous les modèles...

Toutes les grandes accumulations et fortes concentrations de métaux sont sous la dépendance de forts gradients horizontaux et (ou) verticaux.

Cette loi des forts gradients semble

(6) Griffon : fontaine publique jaillissante (d'après l'ornementation des robinets) ; puis : endroit où l'eau émerge.

(7) Le terme a été défini aux Etats-Unis ; il est devenu universel et il n'y a donc pas lieu de le traduire ; il se réfère à la structure « porphyrique » des roches éruptives associées, comme on va le préciser plus loin.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

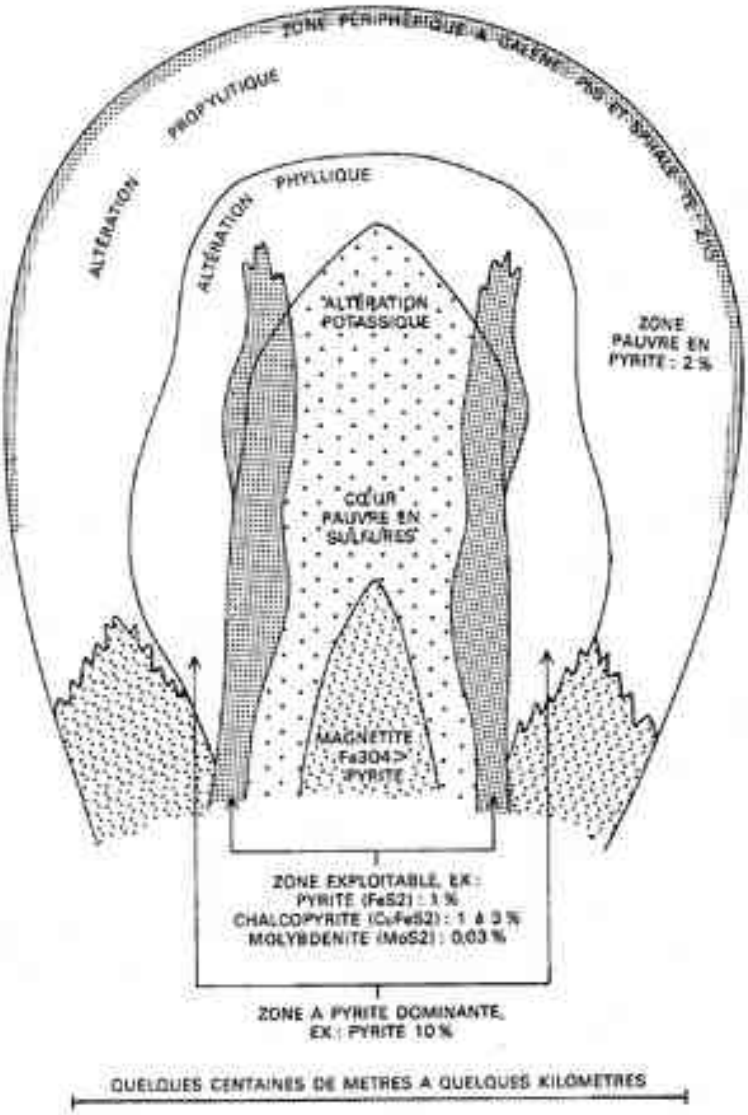


Fig. 2 – Section verticale schématique d'un « porphyry copper ». La zonalité se manifeste dans la distribution : des oxydes et des sulfures, du cœur à la périphérie : magnétite – chalcopyrite, molybdénite, pyrite – pyrite dominante – galène et sphalérite ; de l'altération « hydrothermale » qui affecte les roches dans lesquelles s'est installé le porphyry copper. Chaque nom de zone d'altération correspond à une association de minéraux spécifiques (non indiqués ici) et à des modifications chimiques (apports et départs d'éléments). Ce sont les relations entre zones d'altération et zones à sulfures qui servent de guides dans la reconnaissance de tels gisements.

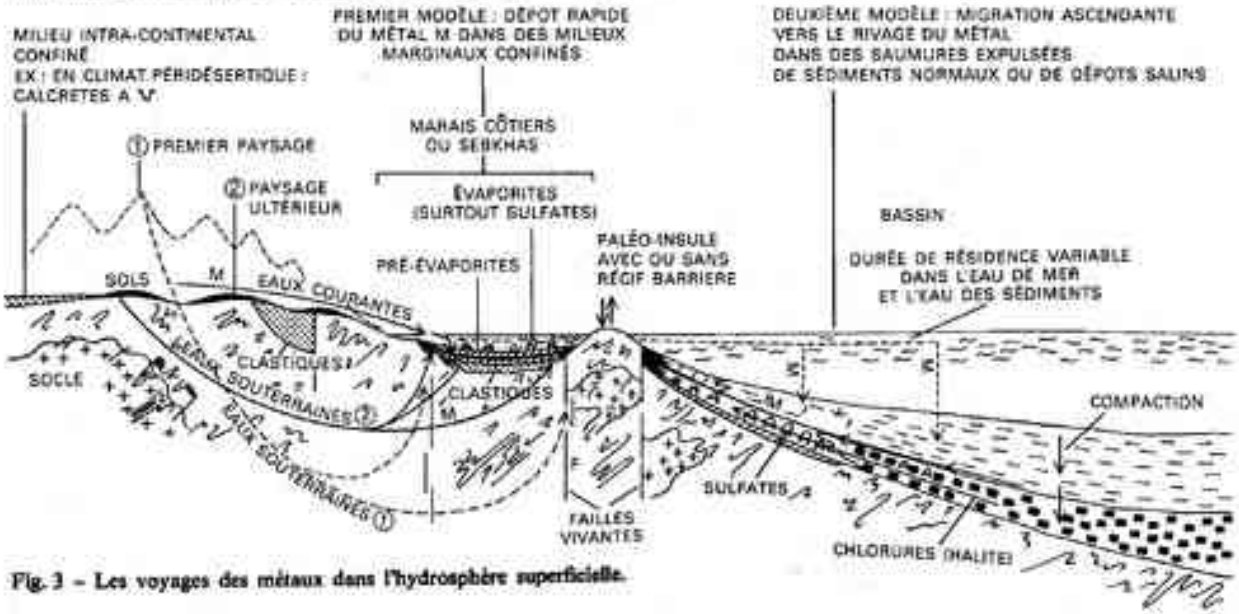


Fig. 3 – Les voyages des métaux dans l'hydrosphère superficielle.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

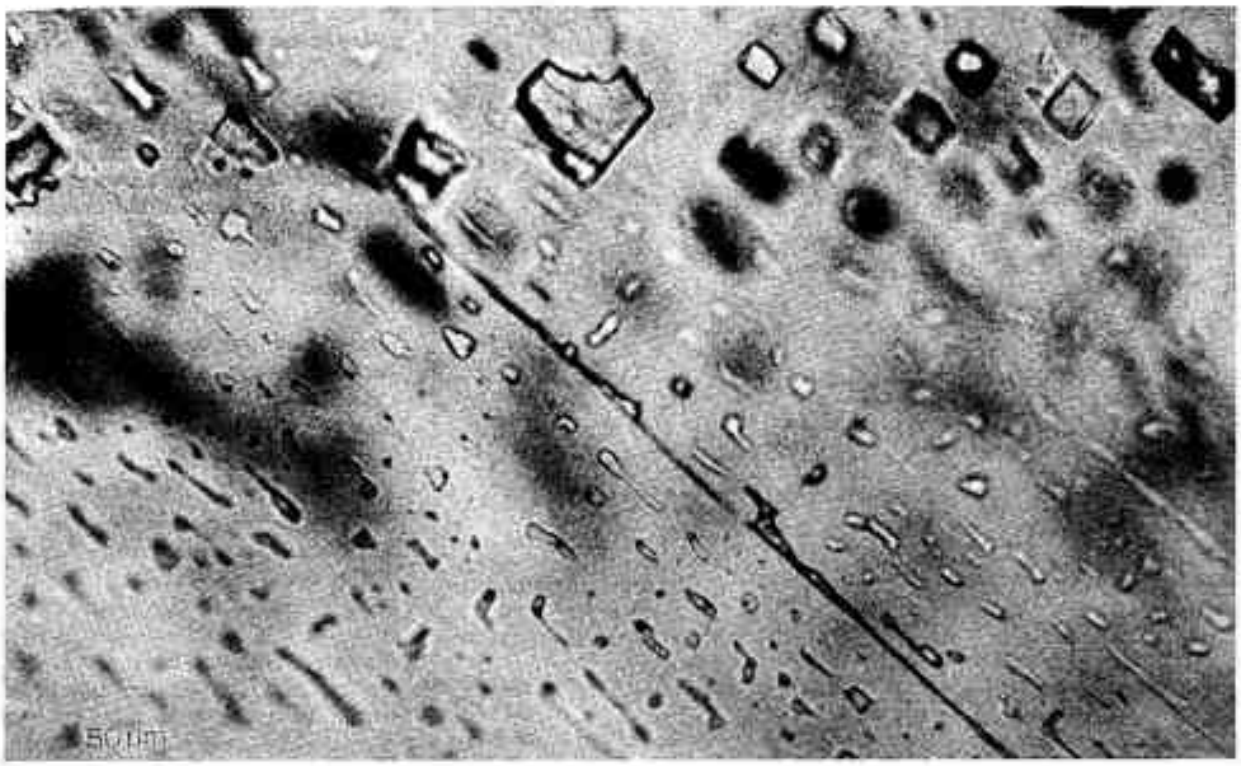


Fig. 5 – Dans un cristal de fluorine du gisement de Durfort (région du Vigan, bordure sous-cévenole) deux générations de cavités intracristallines scellées à des températures différentes. Les plus grosses, dessinant un alignement en haut de la photographie, présentent un remplissage monophasé piégé à une température inférieure ou égale à 50° ; les plus petites, disposées obliquement sur l'alignement précédent, ont un remplissage biphasé, piégé aux environs de 120°.

refroidissant. L'eau peut déposer sa charge métallique dans un bassin marin ou intra-continental. Elle peut aussi ne pas réussir à émerger et se décharger à quelque profondeur dans des fissures ouvertes ou dans des magasins à porosité intergranulaire.

De microscopiques témoins des fluides générateurs : les inclusions dans les minéraux ; l'eau salée lymphe de l'écorce terrestre

On saute maintenant dans la gamme scalaire et l'on passe de l'échelle régionale (kilométrique) à celle du minéral (millimètre ou micron). Les fluides aqueux minéralisés se sont délestés de l'essentiel de leur charge métallique et ont été évacués jusqu'à la surface ou dans des roches environnantes. Une petite partie cependant est restée piégée dans des cavités microscopiques des minéraux constitutifs des gisements, au moment où ceux-ci cristallisaient. Ce sont les « inclusions » liquides, gazeuses, ou les deux à la fois, parfois accompagnées de phases solides. Les inclusions nous apportent des informations de divers ordres sur les fluides générateurs au moment du dépôt.

Il s'agit d'abord de leur température. On peut par exemple, sous le microscope, réchauffer les inclusions, jusqu'à ce qu'elles retrouvent l'homogénéité supposée régner dans la solution mère, lors de leur piégeage. Cette température d'homogénéisation doit être corrigée d'un facteur de pression, ce qui peut être difficile. Mais, au sein d'un même gisement, on peut obtenir des résultats cohérents. Ainsi, dans certains « porphyry coppers », on a trouvé que la température de cristallisation s'abaisse du cœur des gisements (600°) vers la périphérie. Notons ici la nécessité de ne pas perdre de vue la chronologie et le caractère polyphasé de bien des gisements. C'est ainsi que, dans des cristaux de fluorine de France dont on n'avait jusqu'ici examiné que les très nombreuses inclusions biphasées piégées à environ 120° C, on découvre une génération plus précoce d'inclusions monophasées, scellées à des températures n'excédant pas 50° C (fig. 5). La fluorine s'est donc déposée dans un milieu superficiel où la température était faible et a subi plus tard un réchauffement dont le mécanisme reste discutable.

Il s'agit ensuite de la composition des fluides. Dans le domaine de cette géochimie microscopique portant sur d'infimes quantités de matière, on a rencontré longtemps des difficultés technologiques. Il a fallu passer par les chambres à vide, l'absorption atomique, la spectrographie d'émission ; mais la microsonde moléculaire à effet Raman (MOLE) vient d'entrer en action et fera accomplir des progrès. Quoi qu'il en soit, le résultat le plus marquant jusqu'ici atteint concerne la salinité des inclusions. Dans certains « porphyry coppers » on a trouvé des salinités (en chlorure de sodium) de 40 à 60 % en poids, dans des gisements de zinc-plomb, fluorine au sein de couches sédimentaires des salinités de 20 à 30 %. On a ainsi acquis la certitude que les métaux ont été transportés par des eaux fortement chlorurées sodiques, de véritables saumures, qui ne sont que des concentrations des eaux de mer fossiles, plus ou moins anciennes, imprégnant les masses rocheuses jusqu'à des profondeurs de vingt à trente kilomètres. Bien souvent, en arrivant en bordure de bassins marins riches en sulfates, elles y introduisaient le métal tandis que des bactéries réduisaient les sulfates en libérant le soufre, lequel s'unissait au métal en donnant des sulfures. Ainsi se sont formés les grands gisements, en couches, de cuivre comme ceux de Zimbwawe-Rhodésie, du Zaïre et de Silésie polonaise, ou de zinc et plomb comme ceux de la bordure du sud du Massif Central français (fig. 6). Notons que l'activité

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

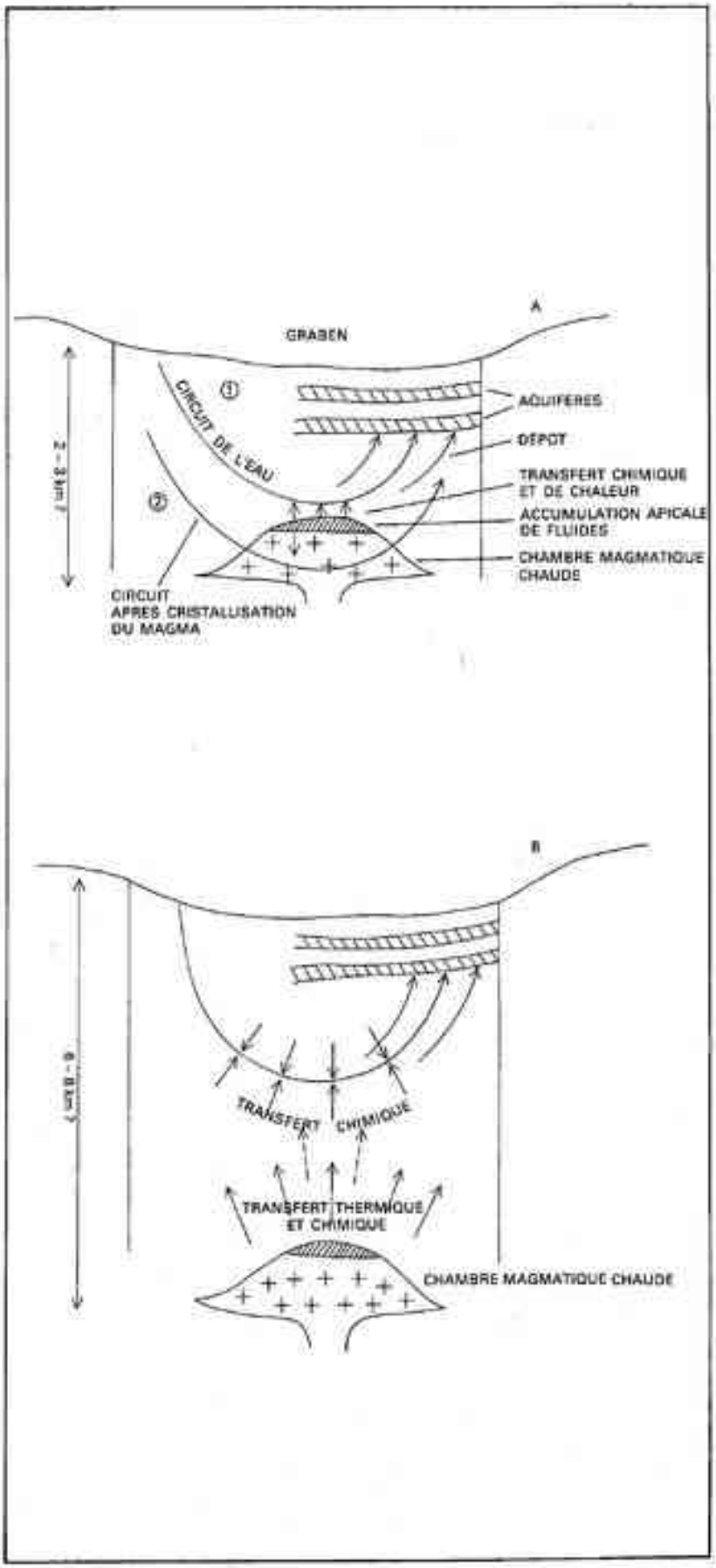


Fig. 4 – Les voyages des métaux à quelques kilomètres sous la surface.

la plus générale en métallogénie en ce qui concerne les sites de dépôt des gisements. Les gradients peuvent être paléogéographiques et sédimentologiques aussi bien que thermiques et barométriques. Ils se traduisent par de brusques variations des roches, de leurs minéraux, de leur composition chimique, des structures à diverses échelles. Statistiquement ces forts gradients sont des guides vers les gisements. En recherchant des anomalies qui « vont avec » le minerai les prospecteurs ont eu, sur des cas particuliers, la prescience de cette loi.

Les voyages des métaux dans l'écorce continentale

On vient d'évoquer le transport des métaux au sein de la lithosphère. Si l'on reconstitue l'histoire des apparitions de gisements depuis l'Archéen, on en arrive à la conclusion que, depuis ces époques reculées, des stocks de métaux ont été emmagasinés dans la lithosphère continentale. C'est en très grande partie les mises en mouvement de ces stocks qui ont constitué les gisements. Ces voyages furent très complexes et quasiment toujours polyphasés. Ajoutons cette réserve qu'il n'en va pas ainsi pour les gisements de tous les métaux. Certains ont été alimentés directement par des montées de roches basiques (pauvres en silice) produites par la fusion plus ou moins complète du manteau supérieur sous-jacent. Ce sont surtout des gisements de chromite (oxydes de chrome et d'autres métaux), comme ceux du Bushveld en Afrique du Sud (soit près de 90 % des réserves mondiales) et des gisements de nickel sulfuré comme ceux d'Australie occidentale ou d'URSS (Norilsk).

Les schémas de principe, évidemment déduits d'une foule de cas réels, des voyages des métaux dans la lithosphère continentale, sont présentés dans deux figures (3 et 4). L'une concerne les voyages les plus superficiels, dans le domaine habituellement qualifié d'hydrosphère, où les eaux sont latéralement très mobiles. L'autre envisage un domaine un peu plus profond, au niveau duquel les eaux sont fortement réchauffées et passent éventuellement par l'intermédiaire de magmas qui se « différencient », à la fois par cristallisation fractionnée et distillation, dans des chambres magmatiques.

Il suffira au lecteur de suivre les flèches pour comprendre, à travers ces simplifications, l'extrême complexité des voyages des métaux. L'un des grands principes de base est que l'eau chaude dissout et qu'elle dépose en se

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

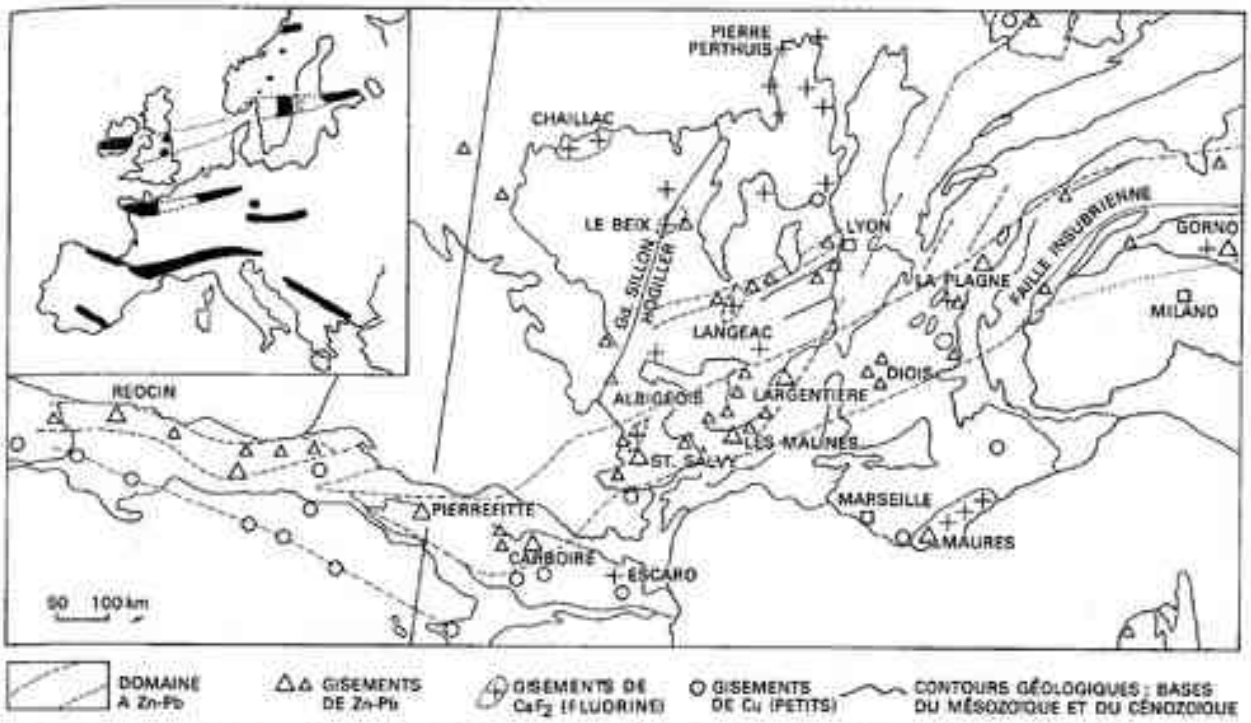


Fig. 6 – La ceinture à zinc et plomb pyrénéo-alpine. Dans l'encadré en haut à gauche : ceintures à zinc et plomb d'Europe.

de la vie et l'intervention de la matière organique sont souvent à prendre en compte dans la genèse des gisements.

Le bilan spatial des voyages. Les provinces métalliques

Les voyages superficiels (fig. 3) étalent les métaux, à partir de leur source immédiate, à quelques kilomètres ou dizaines de kilomètres. Cependant, la remontée vers les rivages des eaux des sédiments de bassins tend à réduire cet étalement. Plus profondément (fig. 4), la composante verticale de ces voyages est plus grande, mais la composante horizontale sans doute plus limitée, par exemple de l'ordre du rayon des plus grands « porphyry coppers », soit cinq à dix kilomètres.

Quoi qu'il en soit de ces spéculations un fait s'impose, qui a pourtant été très sous-estimé, voire méconnu, jusqu'à une date très récente, par la métallogénie « officielle ». C'est la spécialisation métallique des gisements dans de nombreux domaines géographiques de l'écorce terrestre. Ce fait a été perçu par tous les prospecteurs, à l'échelle habituellement modeste de leurs investigations, soit sur quelques dizaines ou centaines de kilomètres carrés. On peut l'étendre à des surfaces beaucoup plus vastes et le généraliser en un système théorique.

Par exemple, en Europe occidentale, on peut enserrer la grande majorité des gisements de zinc avec plomb, de leurs productions passées et des réserves, dans des domaines allongés en forme de ceintures sublatitudinales, dont la largeur n'excède guère quatre-vingts à cent kilomètres et dont la longueur peut atteindre mille cinq cents kilomètres. L'une de ces ceintures traverse le Midi de la France, en englobant notamment le sud du Massif Central et sa bordure sédimentaire secondaire (Cévennes et Causses), la Montagne Noire, et un long segment médian des Pyrénées (fig. 6).

Dans de telles ceintures, les gisements de zinc et plomb se rattachent à des types variés, notamment filons et couches (gisements stratiformes). En outre, ils sont d'âges fort différents : les uns ont commencé de naître dès le début du Paléozoïque, vers – 500 millions d'années, les plus importants au Trias, un peu avant – 200, d'autres sont plus tardifs.

La spécialisation prolongée de telles ceintures « hétérotypiques » et « hétérochrones » soulève bien des questions d'un grand intérêt général, non seulement pour la métallogénie mais pour l'ensemble des géosciences. On s'en tiendra ici aux relations avec les voyages des métaux. Premier constat : ces voyages n'ont pas entraîné un chaos indéchiffrable, preuve que leurs résultantes restent dans des domaines limités. Deuxième constat : il y a en général peu de cuivre dans ces ceintures à zinc et plomb ; cela signifie qu'après une première spécialisation celle-ci s'entretient et qu'elle est peu « polluée » par des apports « étrangers ». Il faut donc tenter de remonter jusqu'à la première spécialisation saisissable, en se posant la question : les provinces à gisements d'un métal donné se greffent-elles sur des provinces « géochimiques », définies par des teneurs « anomaliques » de ce même métal ? La réponse exigerait une exploration géochimique systématique de toute l'écorce continentale. Celle-ci est hors de portée surtout parce qu'il faudrait échantillonner jusqu'à des profondeurs de dix, vingt kilomètres ou plus pour espérer jalonner complètement la remontée des métaux vers la surface. Cependant, on a réussi des démonstrations convaincantes sur quelques cas, d'amplitude géographique limitée ; par exemple :

– la formation de filons à antimoine à partir de niveaux où cet élément est pré-concentré,

– la concentration progressive de l'étain dans une succession de roches granitiques dont les premières se forment sans doute par fusion de matériaux à teneur déjà anormale en étain.

Par cet aspect comme par bien d'autres, qu'il faut omettre ici, la métallogénie s'apparente donc à la géochimie qui étudie le comportement, dans les diverses enveloppes terrestres, des éléments chimiques et de leurs isotopes ; en même temps, elle lui fournit des données et maints sujets de réflexion.

Lorsqu'on rapproche tous les cas connus de provinces métalliques on en vient finalement à cette apparente lapalissade : « un gisement n'est jamais étranger à sa province ». La *permanence* de la spécialisation métallique d'un domaine implique des *héritages* répétés, dont les mécanismes et les conditions restent encore fort mal connus

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

(seuils de teneurs, sites minéralogiques occupés par les éléments, réalisations de concentrations élevées, etc.) ; dans ce champ de recherches sur le transformisme crustal les problèmes restent d'ailleurs encore souvent très mal posés.

Finalement les masses continentales présentent une « architecture métallogénique » fort complexe, que l'on ne peut pas toujours – ni même souvent – déduire seulement des traits géologiques de leur surface. Il faut donc la décrypter pas à pas, en dissociant et en réassociant les paramètres. Pour ce décryptage on dispose depuis peu d'un guide intellectuel que l'on peut exprimer sous la forme d'un théorème.

Théorème fondamental de la métallogénie

« Les accumulations-concentrations d'un métal prennent naissance à l'intersection : d'un domaine métallique (volume de lithosphère pouvant descendre jusqu'au manteau), porteur pendant de longues durées (cf. permanence) d'un « potentiel métal » et de « révélateurs » géologiques : structures, paléogéographies, gradients de toutes sortes (cf. plus haut : la loi des forts gradients).

Ce théorème s'exprime graphiquement dans un schéma unitaire (fig. 7). Théorème et schéma ne sont finalement pas autre chose, répétons-le, que la généralisation et l'expression, en langage scientifique, de toutes les expériences des prospecteurs et des géologues d'exploration. S'ils sont exacts ils doivent, avec la typologie des gisements, apporter quelque chose en retour à l'exploration minérale. Est-ce bien le cas ?

Les applications pratiques de la métallogénie sont évidentes. Plutôt qu'un discours général, proposons deux exemples.

Exemple d'application de la typologie (modélisation). En se fondant sur la zonalité minéralogique et géochimique des « porphyry coppers » on a pu en atteindre jusqu'à environ mille mètres de profondeur, d'une part dans l'Arizona, d'autre part en Hongrie ; à ces profondeurs, ils échappent à la prospection géophysique, d'ailleurs encore très décevante pour ce type de gisement.

Exemple d'application du théorème fondamental ou schéma unitaire. Dans une province métallique à peu près circonscrite, il faut chercher tous les révélateurs géologiques et les forts gradients, en particulier dans les aires restant anormalement vides où pourraient se présenter de tels révélateurs. Ainsi, dans la ceinture à zinc et plomb de la figure 6, la bordure secondaire septen-

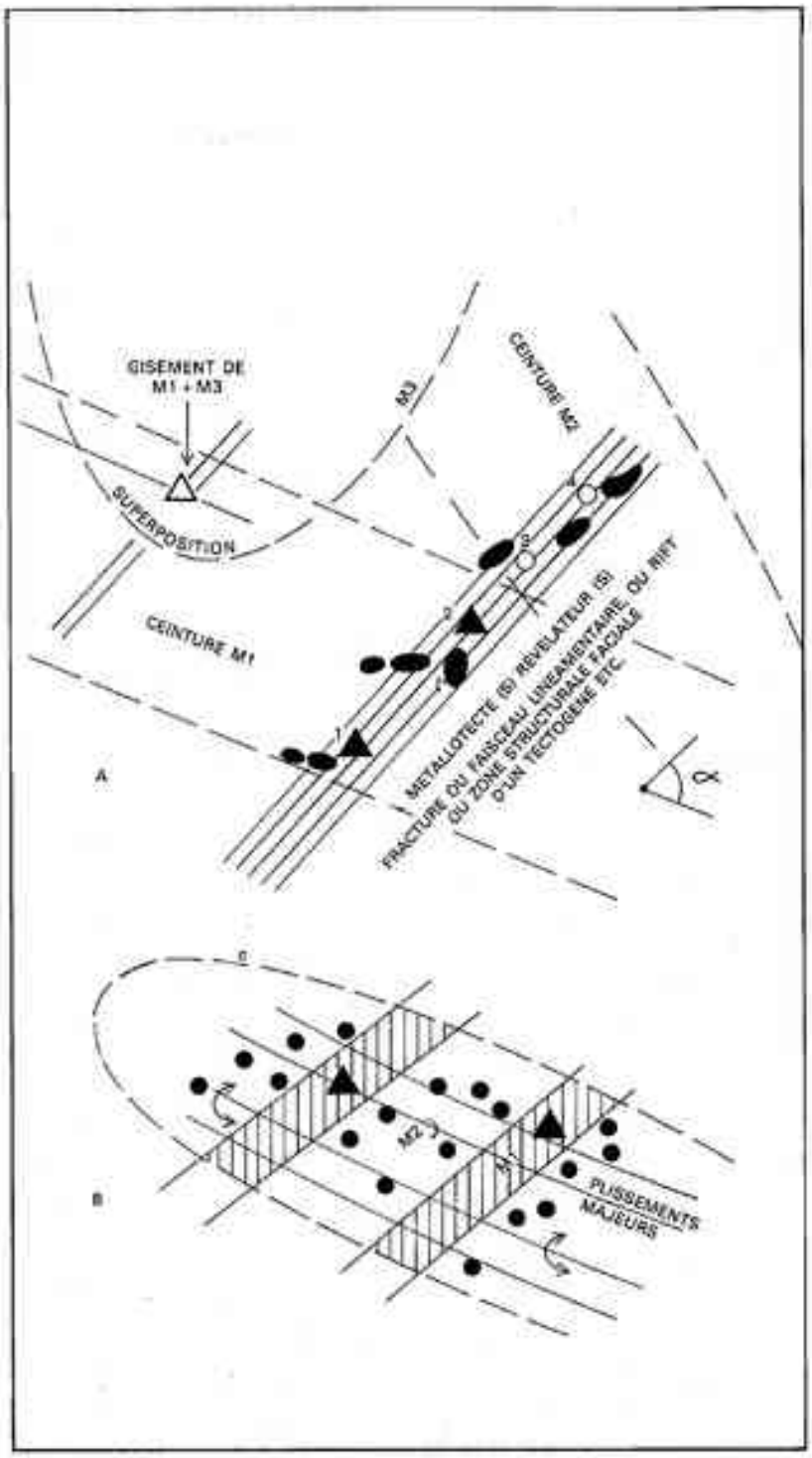


Fig. 7 – Le schéma unitaire de la métallogénie, expression graphique du « théorème fondamental ». Cette figure résume les deux modes de relation les plus fréquents des domaines (ceintures) métalliques avec les structures majeures, jouant directement ou indirectement comme métallotectes révélateurs. (a) Deux domaines métalliques : M 1 et M 2 sont recoupés par les structures majeures ; α est l'angle entre la ceinture M 1 et celles-ci. Le long de l'alignement structural sont placées des intrusions : I. Cet alignement structural « révélateur » est une « ceinture polymétallique » transversale par rapport aux domaines métalliques. 1 et 2 sont des gisements du métal M 1, 3 et 4 des gisements du métal M 2. A gauche est figuré un cas de superposition de deux domaines métalliques M 1 et M 3 avec naissance d'un gisement porteur des deux métaux. (b) Ici la ceinture polymétallique C se superpose à une zone structurale d'un tectogène et est parallèle aux plissements majeurs ; α de la figure (a) est égal à O. Des structures et zones paléogéographiques transversales découpent la ceinture en domaines alternés à gisements de contenus métalliques différents. Ce cas est celui des ceintures volcaniques à amas sulfurés, comme par exemple à « ceinture pyriteuse sud ibérique », où M 1 = pyrite avec Cu, Zn, Pb et M 2 = Mn.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

trionale des Pyrénées est dans ce cas ; un géologue s'y rend et retrouve des travaux gallo-romains oubliés. Ce pourrait être le départ d'une nouvelle aventure, car l'exploration minérale, si méthodique soit-elle, reste une aventure pleine de rebondissements, d'ajustements et de réexamens successifs.

Ailleurs, on pourrait viser des objectifs qui ne se manifestent en surface par aucun indice, mais la visée d'objectifs profonds ne pourra se faire que par approches ménagées.

Autre exemple, cette fois par élimination, qui peut éviter à la prospection de s'égarer dans des domaines non favorables à tel ou tel métal : au nord du domaine riche en zinc-plomb, le Massif Central français passe à un domaine riche en fluorine et barytine, avec un peu de plomb et très peu de zinc.

Ainsi, les liens étroits de la science métallogénique avec l'approvisionnement minéral du monde et des nations sont désormais si flagrants que les Etats lui consacrent des crédits de plus en plus importants, en même temps que les grandes compagnies minières encouragent des travaux dans ce domaine. En France : le CNRS a lancé en 1976 une action thématique programmée intitulée « formation et distribution des gisements », qui, en 1980, se prolonge en s'unissant à celle de « géochimie » ; la Délégation générale à la recherche scientifique et technique entretient depuis dix-sept ans des actions concertées, dans le cadre de sa section « valorisation des ressources du sous-sol ». Ces efforts ont eu un double impact. Tout d'abord des progrès notables ont été accomplis sur les amas sulfurés, les « porphyry coppers », les gisements de nickel sulfuré, ceux de chromite, ceux de zinc-plomb, d'étain et de tungstène, de fluorine et de barytine. Ensuite un rôle d'« entraînement » s'est manifesté : des géoscientifiques français qui ne s'intéressaient pas à la métallogénie auparavant commencent à y venir. Rien n'est plus judicieux et nécessaire car...

En guise de conclusion, on peut dire que, par la richesse et la complexité des connaissances qu'elle doit mettre en jeu, la métallogénie est une grande science synthétique de la terre. Elle a donc à la fois besoin de « spécialistes », qui y apportent leurs méthodes et leurs outils, et d'un certain nombre de « généralistes », parmi lesquels figurent les grands géologues de l'exploration minérale aux expériences très variées ; sans leur vision synthétique, on pourrait se perdre parfois dans des sophistications redondantes. Vraiment peu de géoscientifiques (sans compter des chimistes, des thermodynamiciens, des statisticiens, voire des archéologues)... ne pourraient y trouver une place, fut-elle momentanée. Mais pour cela il faut qu'ils viennent avec le sincère souci de faire un « apprentissage », car les gisements obéissent à des lois qui leur sont propres et, de ce fait, la métallogénie est autant un domaine autonome qu'un carrefour de connaissances et de méthodes. Si cette condition est respectée l'effet d'entraînement s'amplifiera et se consolidera.

Mine de cuivre à ciel ouvert des environs de Bingham – Etats-Unis. (Photo Usis)

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

La paléoclimatologie

La connaissance des variations paléoclimatiques, rendue possible depuis environ une trentaine d'années par les nouvelles méthodes de datation, nous permet de mieux connaître les climats du passé et nous offre peut-être la chance de prévenir les climats de l'avenir.

Jacques LABEYRIE

La paléoclimatologie, science des climats du passé, entre maintenant dans sa troisième période.

La première commence dans la nuit des temps et se termine – pour les pays occidentaux au moins – en 1837. Pendant cette durée imprécise, il semble que l'on pensait que les climats étaient quelque chose d'immuable : chaque région avait son climat, variable certes d'une année à l'autre, mais la moyenne des caractéristiques de ce climat, prise sur une longue durée, était immuable. Tout au plus pensait-on, qu'il y avait de temps en temps, un accident catastrophique : le Déluge de la Bible en était l'exemple le plus connu. Puisqu'à part cela rien ne changeait, il n'y avait aucune raison de s'intéresser aux climats du passé.

La seconde période commence donc en 1837. Cette année-là, Louis Agassiz, alors président de la Société suisse des sciences naturelles fait une communication au congrès annuel de cette société. Aujourd'hui, cette communication nous semblerait fort banale, mais il paraît qu'à l'époque, elle souleva une tempête de protestations dans le monde savant. Louis Agassiz osait prétendre qu'à une époque relativement récente du passé, quelques milliers d'années, des glaciers avaient recouvert le Jura – à preuve les rayures que l'on voyait encore sur les rochers – et même avaient recouvert l'essentiel de la surface du plateau Suisse : les grands blocs erratiques et les tas de cailloux que l'on trouvait parmi les prairies étaient selon lui les témoins de leur retraite.

□ Jacques Labeyrie dirige le Centre des faibles radioactivités, laboratoire mixte CNRS-CEA.

Pourtant en moins de quelques dizaines d'années, éclairés par ces révélations, les naturalistes changeaient d'avis et découvraient un peu partout en Europe, aussi bien qu'en Amérique du Nord, les traces d'une immense glaciation. Elle était autrement importante que celle qui avait couvert la Suisse, puisqu'en Europe, elle allait du Nord de la Scandinavie jusqu'en Irlande, à l'Ouest, et la frontière Sud de ces glaciers, révélée par leurs anciennes moraines frontales, descendait jusqu'au milieu de l'Allemagne et de la Pologne. Quant à l'équivalent américain de cette glaciation, il était encore plus grand, puisqu'il couvrait tout le Canada, avec des moraines terminales que l'on retrouvait au Sud des Grands Lacs, vers 41° N, qui est la latitude de Naples en Italie. En 1880, Penck, un géographe allemand, distingua quatre glaciations successives qu'il nomma, par ordre d'ancienneté décroissante, le Guntz, le Mindel, le Riess, et la dernière le Würm. Cette dénomination est du reste encore en honneur chez certains. Cette seconde période de la paléoclimatologie, que l'on pourrait appeler celle des géologues, a duré un peu plus d'un siècle, puisqu'elle s'est terminée vers 1950. Durant cette période, elle s'est affirmée comme une science véritable, ayant même ses théoriciens, comme Adhémar (1842), Croll (de 1864 à 1875) et surtout Milankovitch (de 1915 à 1941), qui essayèrent d'expliquer par des effets astronomiques ces variations climatiques découvertes par les géologues : les modifications de l'inclinaison de l'axe de la Terre, combinées avec la précession des équinoxes, et avec la déformation de l'orbite de sa trajectoire sous l'influence des mouvements des autres planètes, pouvaient, tantôt ajoutant leurs effets et tantôt les retranchant, modifier l'ensoleillement de la Terre aux diverses latitudes. Durant toute cette seconde période de la paléoclimatologie, il manqua deux connaissances essentielles, la mesure des températures du passé, et les dates auxquelles s'étaient produits les changements climatiques : les beaux travaux des théoriciens restaient invérifiables. En outre, encore privée de cet aspect quantitatif, cette science commençait à piétiner.

Vers 1950, tout change. Tout d'abord, la datation précise des événements du passé devient possible, du moins jusque vers – 30 000 ans grâce aux travaux de Willard Libby basés sur l'utilisation du carbone 14 naturel. Désormais, on saura dater un événement avec une précision incomparable (quelques dizaines d'années à quelques centaines d'années suivant l'âge), pourvu qu'il y ait association d'un reste carboné à cet événement, et il y en a presque toujours.

Ensuite, également vers 1950, la méthode imaginée par Harold Urey pour mesurer la température des mers du passé, à quelques dixièmes de degré près, commence à entrer en application. Cette méthode consiste à mesurer le rapport d'abondance entre les deux isotopes de l'oxygène, ^{18}O et ^{16}O, dans les coquilles de calcaire des animaux marins.

A partir de ce moment, la paléoclimatologie est devenue une science quantitative, et je dirai donc qu'elle est entrée dans sa troisième période. Aussitôt, ses progrès deviennent rapides et des chercheurs venus de disciplines aussi diverses que la botanique, la géophysique, l'astronomie, l'océanographie, ou de spécialités un peu ésotéri-

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

ques comme la morphologie des foraminifères, viennent apporter leur contribution, presque toujours décisive. Même des historiens commencent à s'y intéresser, découvrant des renseignements extrêmement utiles. Tant et si bien qu'il devient difficile de suivre un ordre logique lorsqu'on essaye de raconter ces progrès. Voici, cependant, quelques faits qui me semblent saillants.

Les archives du fond des océans

En 1955, Cesare Emiliani, un élève de H. Urey, commence à publier les analyses isotopiques de l'oxygène des foraminifères provenant des sédiments de la mer des Caraïbes et de l'Atlantique tropical. La méthode est très simple : on « carotte » dans ces sédiments et on analyse les divers niveaux de la carotte. Pour ce faire, une fois celle-ci ramenée au laboratoire, on trie parmi les foraminifères ceux qui vivaient près de la surface de la mer et on analyse leur composition isotopique. On en déduit la température de l'eau dans laquelle ils vivaient, à chacune des époques correspondant aux divers niveaux de sédiments. Pour dater les plus anciens, comme la méthode du carbone 14 ne permet pas d'aller au-delà de 30 000 ans environ, on extrapole, en supposant constante la vitesse de sédimentation. On obtient ainsi une courbe qui a l'aspect de celle de la figure 1. La température de l'eau y est exprimée en fonction du temps, le début, c'est-à-dire l'époque actuelle, se trouvant à l'extrémité gauche.

Cette courbe permet de remonter jusqu'à – 420 000 ans, et montre durant tout ce temps, une succession ininterrompue de réchauffements et de refroidissements. Le dernier de ceux-ci a atteint son maximum d'amplitude vers – 18 000 ans, et une remontée brutale de la température lui a succédé – c'est l'Holocène – qui nous amène à la période actuelle. Un peu plus de cent mille ans auparavant, un phénomène presque semblable a eu lieu, avec une période très froide précédant de peu une période chaude, à température voisine de celle que nous connaissons actuellement : c'est l'Eemien. Entre ces deux périodes chaudes, deux ou trois oscillations de moindre amplitude apparaissent. Et ainsi de suite en remontant de plus en plus profondément vers le passé : une sorte de rythme oscillatoire semble apparaître, les coups de la percussion étant représentés par les minima de températures. Ce rythme a une ressemblance avec le rythme des oscillations de l'ensoleillement de la Terre qu'avait prévues Milankovitch. En particulier, celles qui ont lieu vers les latitudes 60°, un peu supérieures aux latitudes tempérées, là où se trouvent le Nord de la Scandinavie et le Centre du Canada : c'est là-même où semble s'être trouvée la plus grande épaisseur des calottes de glace formées lors du maximum de la dernière glaciation vers – 18 000 ans. Disons tout de suite que les analyses modernes de l'influence des planètes, basées sur des données astronomiques plus précises, comme celle par exemple qu'a faites récemment André Berger, semblent confirmer tout à fait celles de Milankovitch tout en déplaçant légèrement, à la fois dans le temps et en amplitude, les minima et maxima de température. De plus, comme les mouvements des planètes sont connus à l'avance pour des dizaines, et même pour des centaines de milliers d'années, on peut espérer prévoir les grands traits du climat de notre planète tout au long de ces temps futurs.

En somme, la connaissance des variations paléoclimatiques venue de l'examen des sédiments océaniques, en permettant la vérification d'une théorie astronomique, nous ouvre la possibilité de prévoir le futur. C'est certainement une des raisons qui ont fait le succès de cette branche que nous appellerons la paléoclimatologie océanographique : un quart de siècle après ses débuts, elle est encore en pleine exploitation. Bien sûr, comme toutes les grandes méthodes, elle a connu des variantes. Dans l'une d'elle, au lieu d'utiliser la variation des compositions isotopiques, on utilise les variations d'abondance entre les faunes « froides » de foraminifères (celles qui vivent dans les eaux de surface froides) et les faunes « chaudes ». Par cette méthode, on a pu cartographier avec une précision étonnante la température de surface des mers à certaines époques climatiquement importantes du passé. On verra un très bel exemple de cela sur la figure 3 qui représente la situation climatique du globe, il y a 18 000 ans : c'est la fameuse carte de CLIMAP, parue il y a déjà trois ans, et qui est le résultat d'une collaboration de six ans entre dix-sept laboratoires (au début, sans compter ceux qui s'y sont joints par la suite). Elle a été obtenue par l'examen de la répartition des diverses variétés de microfaunes (principalement de foraminifères) dans les niveaux de centaines de carottes de sédiments, et nous fait voir de façon frappante l'extraordinaire changement climatique qui s'est produit depuis cette époque : durant les mois d'août « würmiens », la banquise permanente se tenait à la latitude du Nord de l'Angleterre. Elle nous montre aussi une chose qui est fort intéressante : l'essentiel de la glace, à cette époque, s'est accumulé de part et d'autre de l'Atlantique Nord. L'Antarcti-

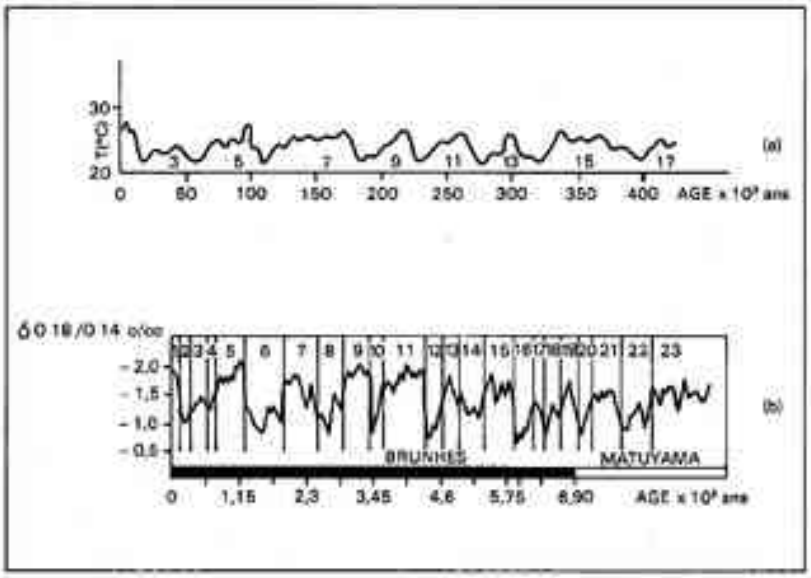


Fig. 1 – La courbe des paléotempératures pour l'eau de surface des Caraïbes (d'après C. Emiliani, 1966, Jr of geology). 1a – Cette courbe « historique » montre ce que l'on pensait à l'époque entre les variations de température de surface de la mer des Caraïbes dans le passé jusqu'à 425 000 ans. 3, 5, 7 etc... sont les périodes chaudes définies à l'époque par C. Emiliani, et qui sont encore utilisées. 1b – Cette courbe publiée par N. Shackleton en 1973 montre les variations, cette fois-ci isotopiques, de la mer dans le passé. La calibration en âge est faite à partir de la frontière « Brunhes-Matuyana » où a changé, il y a 690 000 ans le champ magnétique terrestre.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

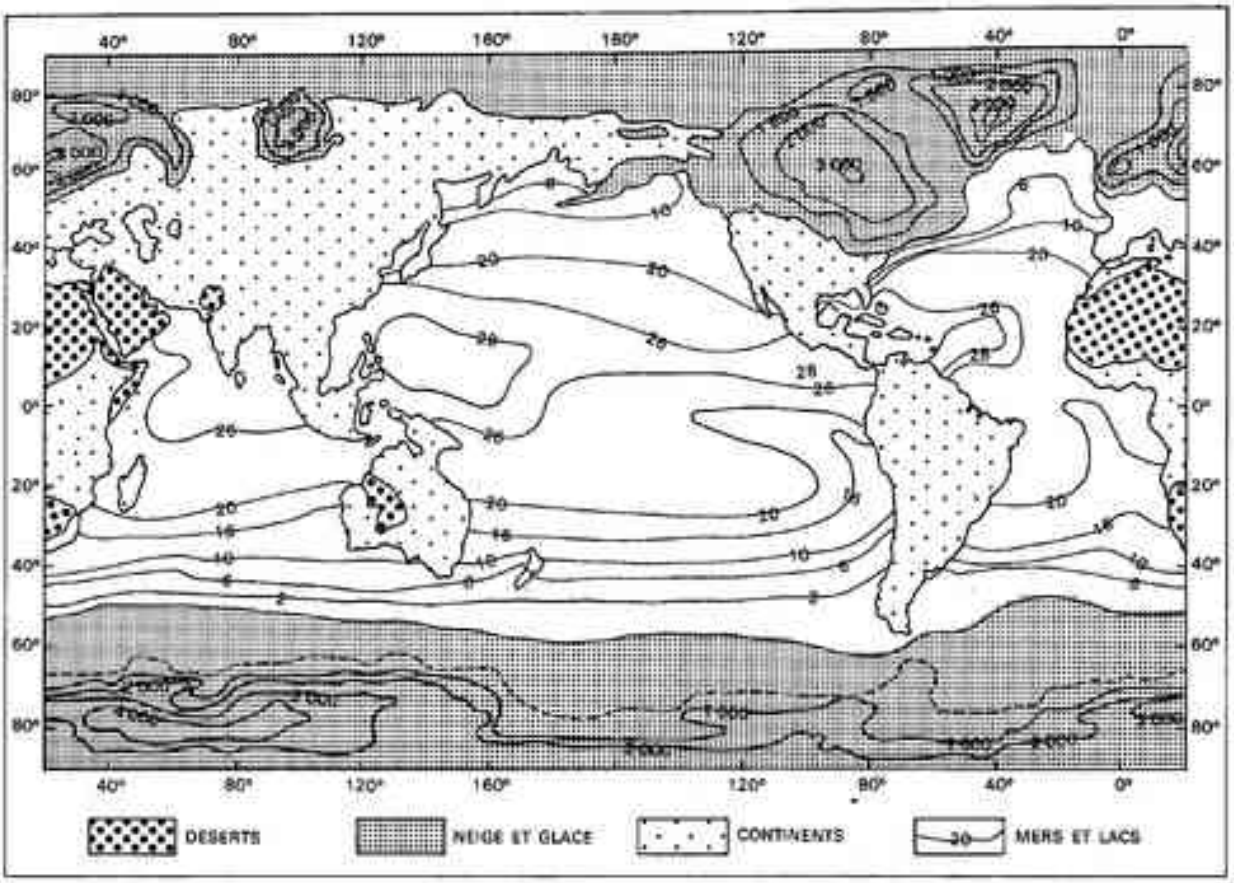


Fig. 2 – La carte de CLIMAP : la situation climatique de la Terre, au mois d'août, il y a 18 000 ans (à l'époque du dernier maximum glaciaire). Cette carte a été obtenue essentiellement à partir des paléotempératures de la surface de la mer déduites des proportions relatives des diverses espèces de foraminifères dans les sédiments marins. Ces températures sont indiquées. Par rapport à l'actuel, les plus grandes variations de température apparaissent dans le Pacifique Est-Equatorial et surtout dans l'Atlantique Nord, au-dessus de 42° N. On remarquera aussi l'énorme extension de l'inlandsis Canada-Groëland et de celui de la Scandinavie. Les contours continentaux correspondent à la profondeur actuelle de – 85 mètres (en fait le niveau de la mer a été probablement encore plus bas vers – 100 mètres).

que, qui de nos jours renferme 90 % de la glace de la Terre, n'était guère plus gros alors ; tout au plus, son volume était-il accru de 10 %. Les inlandsis canadien et scandinave, quant à eux, avaient un volume nettement plus grand que celui de la calotte antarctique actuelle.

Les variations de la mer

La fonte de cette glace, durant l'Holocène, a provoqué l'élévation du niveau général des mers d'environ cent vingt mètres. Cette élévation du niveau des mers peut se mesurer de façon simple : il suffit de remarquer que lorsque la mer a monté, elle a recouvert des colonies de coquillages ou de végétaux (les mangroves tropicales) qui vivent à quelques mètres près au niveau de la surface de la mer. En draguant, de nos jours, les fonds marins sur la douce pente du plateau continental, on récupère ces reliques, souvent en bon état de conservation, encore enfouies à l'endroit même où elles avaient vécu. Une simple datation de ces restes par le carbone 14 permet d'avoir les niveaux où était la surface de la mer aux différentes époques du passé. La courbe de ces variations a été déterminée au Centre des faibles radioactivités de Gif-sur-Yvette, à partir des côtes d'Afrique et aussi à partir de celles du Languedoc : elles concordent à peu près complètement. Que la mer fut basse au glaciaire, on s'en doutait déjà avant qu'on ne mesure avec précision le rythme de sa remontée : voilà longtemps déjà que les pêcheurs ramenaient des dents de Mammouth du fond de la Manche. Peut-être la remontée de la mer a-t-elle cachée les restes de l'homme de Néanderthal, qui semblent être relativement abondants en Europe et en Géorgie au début du refroidissement, (en gros de – 100 000 à – 30 000 ans) et deviennent si difficiles à trouver lorsqu'on approche du maximum du Würm : ces hommes, dans cette période très froide, étaient peut-être tout simplement partis au bord de la mer, et leurs restes se trouvent dans ce cas éparpillés sur le plateau continental, sous la mer actuelle.

Une petite méprise instructive

A l'époque où H. Urey inventait sa méthode isotopique pour déterminer les paléotempératures de la mer, on ne connaissait pas bien ces variations. On ne savait pas non plus que l'eau de la mer, dans les périodes chaudes comme celle où nous sommes aujourd'hui, est nettement plus légère – isotopiquement parlant – qu'elle ne l'est dans les périodes froides : cela vient de ce que le rapport $^{18}O/^{16}O$ de la neige qui tombe dans les hautes latitudes est environ 40 % plus faible que celui de l'océan. Les coquilles des animaux ma-

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

rins enregistrent cette variation qui s'est révélée être, lorsque le climat oscille entre une période froide et une période chaude, d'un effet beaucoup plus grand que celui que produisent les variations de température. En somme, Urey et ses élèves, en croyant mesurer les variations de la température des eaux de surface, mesuraient surtout les proportions plus ou moins grandes dans l'océan de l'eau de fonte des glaces polaires. C'est Nicolas Shackleton, de Cambridge, qui montra cela en 1967. Heureusement, la fonte des glaces et l'accroissement de la température font l'une et l'autre varier dans le même sens la composition isotopique des foraminifères, ce qui fait que les courbes d'Emiliani sont toujours valables pour indiquer les variations climatiques.

Les archives de la glace

Entre temps, les glaciologues s'en sont mêlés, car les glaciers qui subsistent aujourd'hui des calottes polaires de jadis, au Groënland et en Antarctique, recèlent dans leurs profondeurs de la glace qui est très ancienne, datant de plusieurs dizaines de milliers d'années. Or, plus la neige se forme à température basse, plus elle est légère – toujours isotopiquement parlant. Donc, en carottant dans les glaciers polaires et en analysant niveau par niveau le rapport $^{18}O/^{16}O$ de la neige (ou aussi le rapport D/H des isotopes de l'hydrogène), on a un moyen commode de savoir comment a varié localement la température dans le passé. Le seul ennui, c'est que l'on ne sait pas encore dater la neige : il y a trop peu de carbone dedans (il provient du CO_2 atmosphérique piégé dans les cristaux de neige) pour qu'on puisse utiliser la méthode classique du carbone 14 (mais d'ici un ou deux ans, on pourra mesurer directement, avec des accélérateurs de particule, non pas la radioactivité de ce carbone 14, mais le nombre d'atomes de carbone 14 restant, et donc dater ces carottes). Toutefois, dès aujourd'hui les courbes de variations isotopiques obtenues dans les glaces du Groënland par Dansgaard, puis dans celles de l'Antarctique par les américains, les soviétiques, et récemment par Claude Lorius*, du Laboratoire de glaciologie du CNRS à Grenoble, sont très utilisables. En effet, elles ont une telle ressemblance avec celles obtenues à partir des foraminifères des sédiments marins que l'on peut fort bien y établir une échelle de temps en repérant

* Les analyses isotopiques étant faites par Mme L. Merlivat au Centre d'études nucléaires de Saclay.

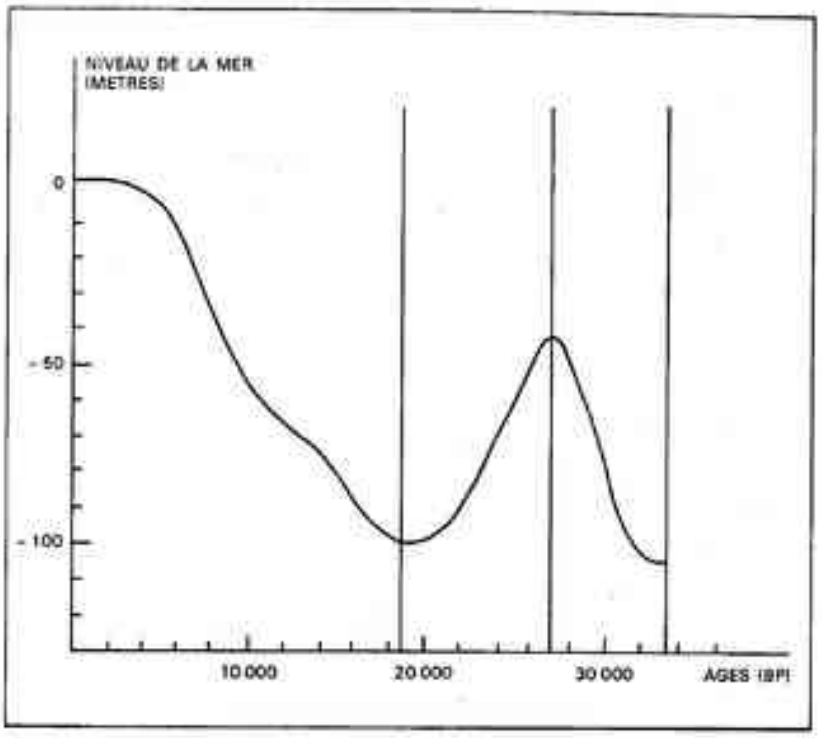
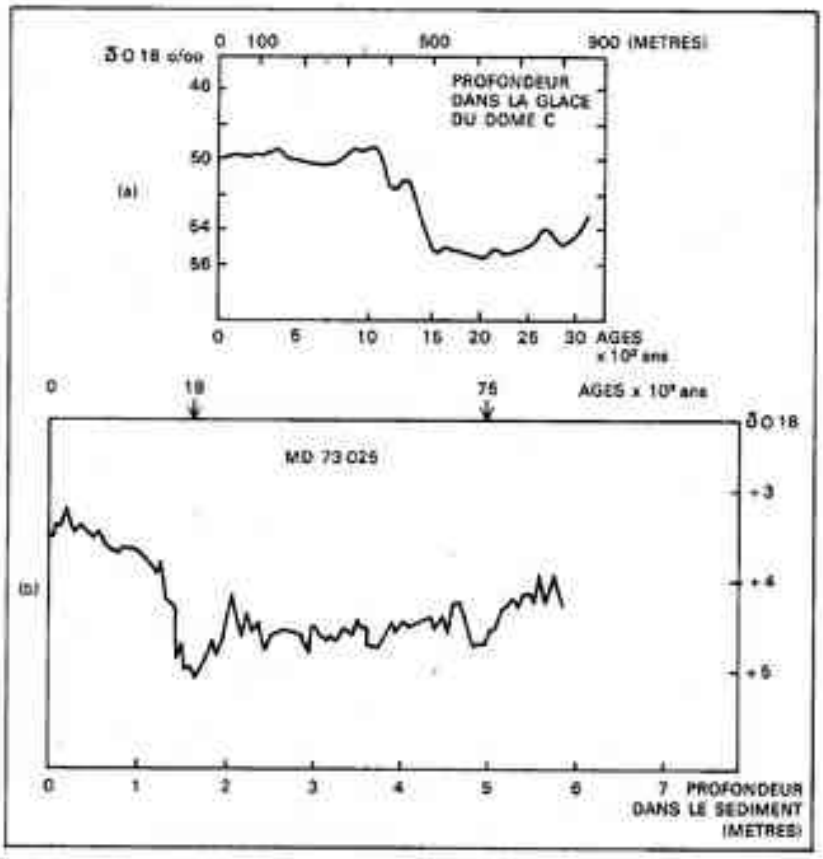


Fig. 3 – La variation des hauteurs de la mer depuis 25 000 ans (courbe du CFR). Cette courbe a été tracée à partir de la datation du C-14 de coquillages draqués sur la côte du Languedoc par A. Monaco, et datés par J. Thommeret.

Fig. 4 – La courbe climatique du Dôme C (C. Lorius) comparée à une courbe $^{18}O/^{16}O$ de sédiments dans l'océan Indien (J.C. Duplessy). Sur cette carotte collectée par C. Lorius et son équipe dans l'Antarctique, les mesures isotopiques de L. Merlivat montrent (4a) une ressemblance frappante avec les variations obtenues sur des foraminifères benthiques de l'océan Indien par J.C. Duplessy (4b). Il ne faut pas, toutefois, en conclure que les échelles d'âge, pour l'instant provisoires, coïncident.



Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

les grands événements, tels que le maximum du Würm et la montée de l'Holocène. Sur la figure 5, nous avons reproduit la courbe D/H de Lorius faite à partir des glaces du Dôme C dans l'Antarctique et aussi, pour comparaison, une courbe $^{18}O/^{16}O$ faite par J.C. Duplessy, du Centre des faibles radioactivités, à partir d'une carotte de l'océan Indien.

La sécheresse tropicale des temps glaciaires et les lacs du Sahara

Il n'y a pas que la neige qui peut être utilisée, la pluie peut l'être aussi car sa composition isotopique varie lorsque l'on s'élève de plus en plus en latitude, à mesure que l'on s'éloigne des zones principales d'évaporation que sont les mers équatoriales. Ainsi, par exemple, la pluie et la neige qui tombent (essentiellement au moment de la mousson) sur l'Himalaya et les bassins du Gange, du Bramapoutre et de l'Irrawadi a un rapport $^{18}O/^{16}O$ très nettement plus petit que celui de l'océan. Et le débit de ces fleuves géants est si grand dans le golfe du Bengale que la composition isotopique de l'eau de celui-ci, et donc celle des foraminifères qui y vivent, s'en trouve très affectée. Et si la mousson n'était qu'un phénomène de période chaude et cessait d'exister lors des périodes glaciaires ? C'est ce que Duplessy s'est demandé, et qu'effectivement il a vérifié en comparant les variations isotopiques dans des carottes du golfe du Bengale et dans des carottes prélevées à l'extérieur de celui-ci, dans l'océan Indien.

De même, dans une autre région tropicale du monde, en carottant dans le delta sous-marin du Niger, Duplessy a pu montrer que non seulement le Sahel, mais aussi la région de forêt équatoriale du golfe de Guinée avaient été pratiquement sans pluies pendant le glaciaire. Par contre, l'étude de ces carottes montre qu'une période de crues gigantesques de ce fleuve a eu lieu vers – 11 000 ans, et a duré quelques siècles à peine, au milieu donc de la remontée climatique de l'Holocène. Cette période inaugurait ce qu'on appelle le « pluvial » Saharien, bien connu déjà grâce aux indices fournis par les recherches archéologiques récentes. Durant ce pluvial, qui dura près de 6 000 ans, il semble maintenant certain que de vastes régions de ce désert furent couvertes de lacs, de végétations variées, de bovidés et de population qui évoluèrent rapidement : on retrouve aujourd'hui les dessins gravés et peints (et même des restes de poterie) durant les deux ou trois derniers millénaires de leur présence, sur les falaises du Tassili, du Hoggar et du Fezzan. Depuis – 5000, le Sahara s'est progressivement désertifié, à part un retour humide de courte durée vers – 2 000, aux alentours des débuts de l'ère chrétienne. On est en train de découvrir les mêmes variations, dans le même sens, pour les diverses régions de la vaste ceinture de déserts qui occupent aujourd'hui le Sud-Ouest et le Sud de l'Asie.

On ne sait rien encore sur les causes de ces variations climatiques, si visiblement corrélées avec l'essor et la disparition des sociétés humaines dans ces pays. Mais il est très intéressant de remarquer que la désertification du Sahara de l'Ouest (pour les autres régions, on ne sait pas encore ce qui s'est passé) est très exactement corrélée avec chacune des périodes froides qui se sont succédées depuis les dernières centaines de milliers d'années. C'est Shackleton qui s'en est aperçu en mesurant les quantités de sable qui apparaissent aux niveaux correspondant aux périodes froides, dans les sédiments de l'Atlantique carottés au large de la côte du Sahara : lorsque le vent entraîne du sable vers l'océan, c'est que la couverture végétale disparaît et qu'on est donc en situation désertique.

On peut en déduire que puisque le Sahara est en train de se désertifier de plus en plus, de nos jours, c'est donc que le climat du globe est probablement en train de se refroidir. Ceci concorde parfaitement avec ce qu'on peut déduire en extrapolant les variations isotopiques des sédiments marins. Mais on peut être à peu près sûr que ce refroidissement que connaîtront nos descendants ne se produira pas progressivement : il viendra par à-coups, intercalés avec des petits réchauffements momentanés.

Les pollens

Les pollens des fleurs sont parmi les objets les plus résistants de la croûte terrestre. A part le feu et certains enzymes, rien ne les détruit. D'autre part, pour un œil exercé, de l'examen de chaque pollen au microscope, on peut remonter à la famille, voire au genre, ou même à l'espèce dont il provient. Enfin, presque chaque espèce de plante a son habitat favori, qui dépend avant tout et de façon souvent très précise, des conditions climatiques qui y règnent. On comprendra alors que les pollens peuvent être d'excellents indicateurs du paléoclimat (et de ses variations) dans les environs de l'endroit où on les trouve. Par exemple, en traçant les trois courbes d'abondance par centimètre cube des chênes, des pins et des graminées, le long d'une carotte prélevée dans l'épaisseur d'une tourbière profonde, on verra augmenter la proportion des premiers par rapport aux seconds lorsque le climat se réchauffe, ne serait-ce que de quelques degrés. Sur la figure 6, on a transcrit une courbe tirée d'une tourbière des Vosges par Geneviève Woillard. En la comparant à la courbe climatique du dôme C ou à celle de l'océan Indien, on peut voir que ces trois enregistrements ont une ressemblance frappante. Donc les pollens sont d'aussi bons indicateurs climatiques que les variations isotopiques de l'oxygène. D'autre part, on peut aussi déduire de cette comparaison que continents, mers et régions polaires ont connu des variations analogues, sinon identiques, et probablement concomitantes. Mais il y a plus, et c'est cela qui est extrêmement important ; la courbe des pollens, à condition de faire des mesures extrêmement rapprochées les unes des autres, permet d'avoir un relevé beaucoup plus détaillé que celui obtenu par les autres méthodes. Or, ce relevé pollinique montre en de nombreux points des variations très brusques de la végétation qu'il est très tentant d'attribuer à des variations très brusques du climat (ce pourrait être aussi des invasions d'insectes ou des épidémies destructrices de certaines espèces, qui produisent la même variation, mais c'est peu probable). Par brusque variation, j'entends par exemple un refroidissement ou une sécheresse, qui se développe en quelques années, dure cinq, dix ou vingt ans, et retourne ensuite à la valeur moyenne normale de température ou d'humidité. Si un tel accident se produisait de nos jours dans une région de pâturages, ou dans une région productrice de céréales, il est évident qu'il risquerait de mettre en péril l'économie du pays correspondant. On en a eu un exemple pour les pays du Sahel en 1974-76, et on en avait un autre, deux ans plus tôt, lorsque la sécheresse frappa certaines régions de l'URSS. Même pour un pays très civilisé, un tel événement, s'il dure un peu longtemps, peut avoir des conséquences plus dramatiques qu'une grave défaite militaire.

Certains historiens, comme Emmanuel Leroy-Ladurie, ont entrepris l'examen des archives pour déceler les variations climatiques du passé par des indices aussi variés que la date des vendanges, les dessins représentant un

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

même paysage à diverses époques, ou les plaintes des habitants à leurs administrateurs. Leurs conclusions sont encore bien plus nettes et parlantes que celles des palynologues, bien que malheureusement beaucoup plus localisées dans le temps : le climat varie parfois brutalement, ou insidieusement, mais en tous cas, peut entraîner des conséquences catastrophiques pour les sociétés humaines.

On comprend alors pourquoi, depuis quelques années, divers gouvernements commencent à porter intérêt au développement des études de paléoclimatologie.

Il y a plus inquiétant encore : on commence à voir arriver l'époque où les sociétés humaines, par le développement exponentiel de leurs activités industrielles, vont modifier elle-même le climat, bien entendu dans un sens qui risque de perturber gravement leurs habitudes et leurs entreprises. Par exemple, les accroissements incessants de la chaleur que dégagent les industries de la déforestation équatoriale aussi bien que boréale, et de la production de gaz carbonique par la combustion du carbone fossile, gaz carbonique que l'océan n'est déjà plus capable d'absorber assez vite, sont trois facteurs qui concourent chacun de leur côté à des modifications imprévisibles de la température et de la pluviosité. Celles-ci entraînent, entre autres conséquences, un déplacement également imprévisible des zones productrices de nourriture.

Mais cela n'est plus, à première vue tout au moins, du ressort de la paléoclimatologie.

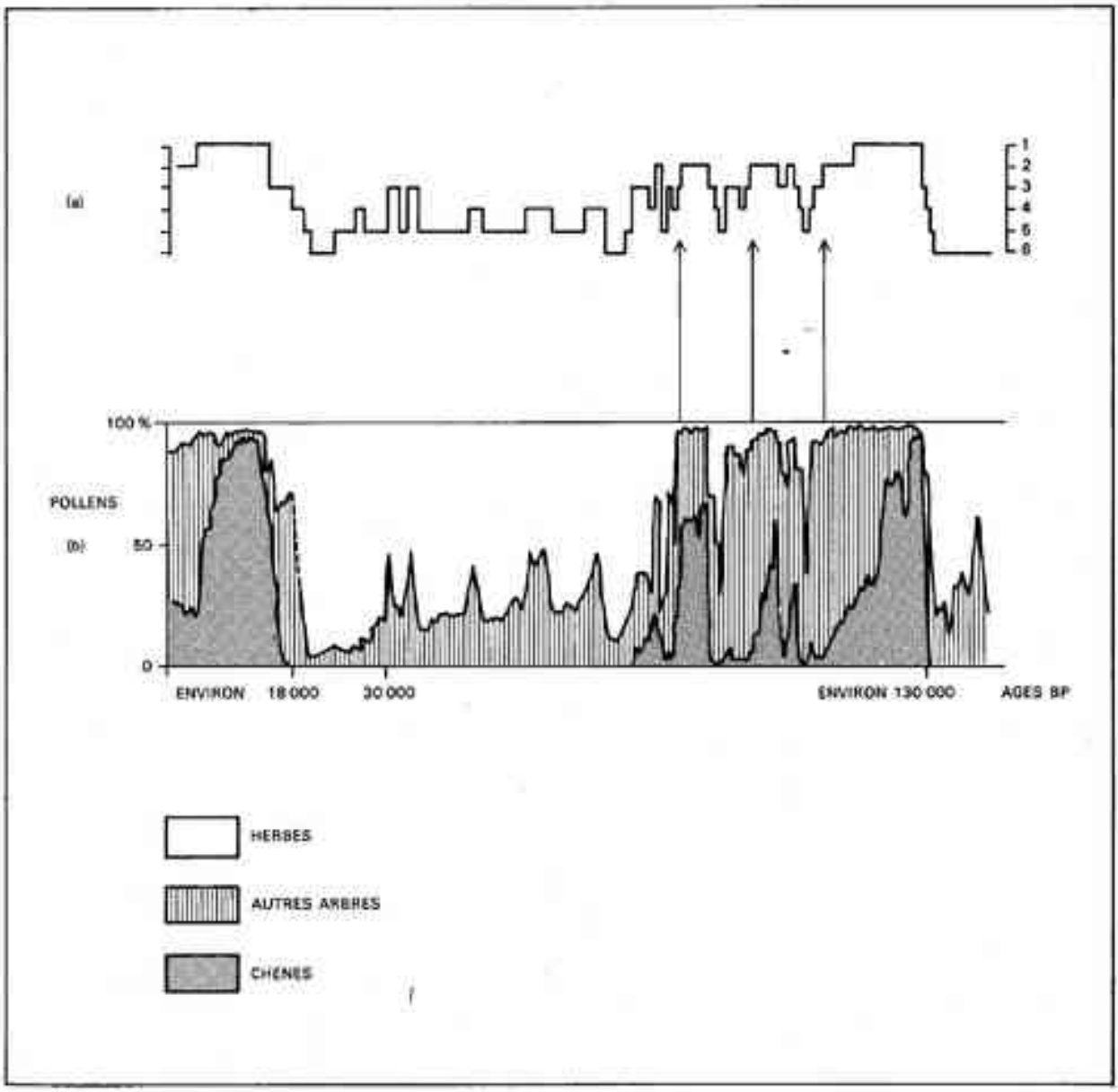


Fig. 5 – Courbes des variations climatiques du dernier « cycle » climatique, à partir des pollens de la tourbière de la Grande-Pile (Vosges). Les deux courbes sont dues à l'analyse des pollens par G. Woillard, Louvain : 5a – Variation de « l'index climatique », 1. forêt de bois durs (chênes, etc...) ; 2. forêt mixte (bois durs plus résineux) ; 3. Taïga, résineux, plus bouleaux denses ; 4. Taïga clairsemée ; 5. Toundra plus buissons ; 6. Toundra. 5b – Détails d'analyses polliniques qui montrent les proportions relatives des pollens des diverses plantes. Les époques marquées par les trois flèches noires de la fig. 5a correspondent à des diminutions brutales de la population de chênes. Etudiées en détail, elles ont amené G. Woillard à conclure qu'elles correspondaient à des variations climatiques importantes se produisant en quelques dizaines d'années.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

La télédétection au service du géologue

La télédétection est une méthode d'étude complémentaire et une méthode de synthèse permettant au géologue de considérer la géologie terrestre dans une perspective globale.

Philippe MASSON

Le terme de télédétection (TD) recouvre toutes les méthodes d'observations à distance. Mais il s'applique plus particulièrement à l'observation de la surface de notre planète à partir de « plates-formes » diverses (avions, ballons, satellites artificiels), situées à plus ou moins haute altitude. Avec le développement des satellites artificiels, les moyens de détection et d'enregistrement (chambres photographiques, multispectrales, caméras TV, radiomètres à balayage, radars à ouverture synthétique, etc...) se sont perfectionnés. Les méthodes de dépouillement et de traitement des données ont elles-mêmes considérablement évolué grâce à l'informatique. Aujourd'hui, le géologue de terrain dispose de données nouvelles et de moyens d'investigation variés (tels que : cartes thématiques, images multispectrales, enregistrements thermiques) qui lui permettent une meilleure approche des phénomènes qu'il étudie. Il faut souligner que la télédétection ne prétend en aucune manière se substituer au géologue. Cette technique ne doit être considérée que comme un outil complémentaire utile, voire indispensable au géologue.

Ainsi, de simple photo-interprète qu'il était, le géologue a-t-il dû s'adapter aux diverses méthodes de traitement (optiques, informatiques, etc.) des données, tout en contrôlant étroitement ses interprétations sur le terrain, à une exception près ... la planétologie. En effet, depuis quinze ans environ, le géologue a commencé à s'intéresser à la géologie d'autres corps du système solaire (Lune, Mars, Mercure, satellites de Jupiter... Vénus). A une exception près, la Lune, le géologue est encore dans l'impossibilité de vérifier au sol ses interprétations, et en est réduit à des comparaisons avec la géologie terrestre et lunaire (planétologie comparée).

□ Philippe Masson, laboratoire de géologie dynamique interne – université Paris-Sud, Orsay.

Pour en revenir à des problèmes plus « terre à terre », grâce à la télédétection, le géologue peut maintenant d'une part prendre suffisamment de recul par rapport au terrain et de ce fait intégrer les phénomènes dans leur contexte régional, d'autre part bénéficier de la répétitivité des observations, et par conséquent s'affranchir plus facilement des contraintes météorologiques (couvert nuageux et neigeux) ou en apprécier les effets (hydrologie de surface, variations de températures, courants et marées, etc...).

Dans cet article, il ne saurait être question de présenter en quelques pages une revue complète de tous les apports de la télédétection à l'ensemble de la géologie. En effet, la plupart des domaines couverts par cette discipline ont largement bénéficié des progrès de la télédétection, à savoir : la cartographie, la sédimentologie littorale, la géologie structurale, la gitologie et la prospection, l'hydrologie et le génie civil, la géomorphologie, la géophysique, la géologie planétaire, etc... Dans ce qui suit, seuls quelques résultats obtenus dans certains de ces domaines seront évoqués : géomorphologie littorale et sédimentologie, géologie structurale et tectonique des plaques, planétologie.

Géomorphologie littorale et sédimentologie

Grâce aux données des satellites Landsat de la NASA, un certain nombre de programmes d'études littorales ont été menés à bien en France.

Des points particulièrement sensibles du littoral atlantique français ont été l'objet d'études approfondies (programme FRALIT) ; de même, des études comparées de formes deltaïques (Rhône, Danube, Pô et Nil) ont été entreprises et se poursuivent actuellement.

Avant l'avènement de l'ère des satellites artificiels, l'étude de l'évolution d'un littoral (érosion et régression d'une côte, remblaiement et sédimentation, transport de matériel, courantologie, etc...) ne pouvait se faire que d'une façon relativement fragmentaire et onéreuse (coût élevé des moyens au sol, à la mer et aéroportés). Grâce à la télédétection spatiale, les observations répétées régulièrement pendant une longue période de temps (plusieurs mois, voire plusieurs années), la surface relativement étendue de chaque secteur observé (une image Landsat couvre une surface au sol de 185 x 185 km), les divers types d'enregistrements (capteurs multispectraux), et les méthodes de traitement des données (combinaisons colorées des images, numérisation et restitution analogique ou numérique) ont permis d'une part l'étude dans le temps et donc le suivi des phénomènes, d'autre part leur intégration dans leur contexte régional, et enfin une classification thématique des observations (divers matériels sédimentaires, végétation, influence des marées, etc...). Ces observations doivent bien entendu être confrontées avec des observations au sol (prélèvements d'échantillons, mesures *in situ* de températures, de salinités, de turbidités, confrontation avec les données météorologiques et courantologiques) mais un « petit » nombre seulement de vérifications est nécessaire, compte tenu de l'importance des surfa-

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

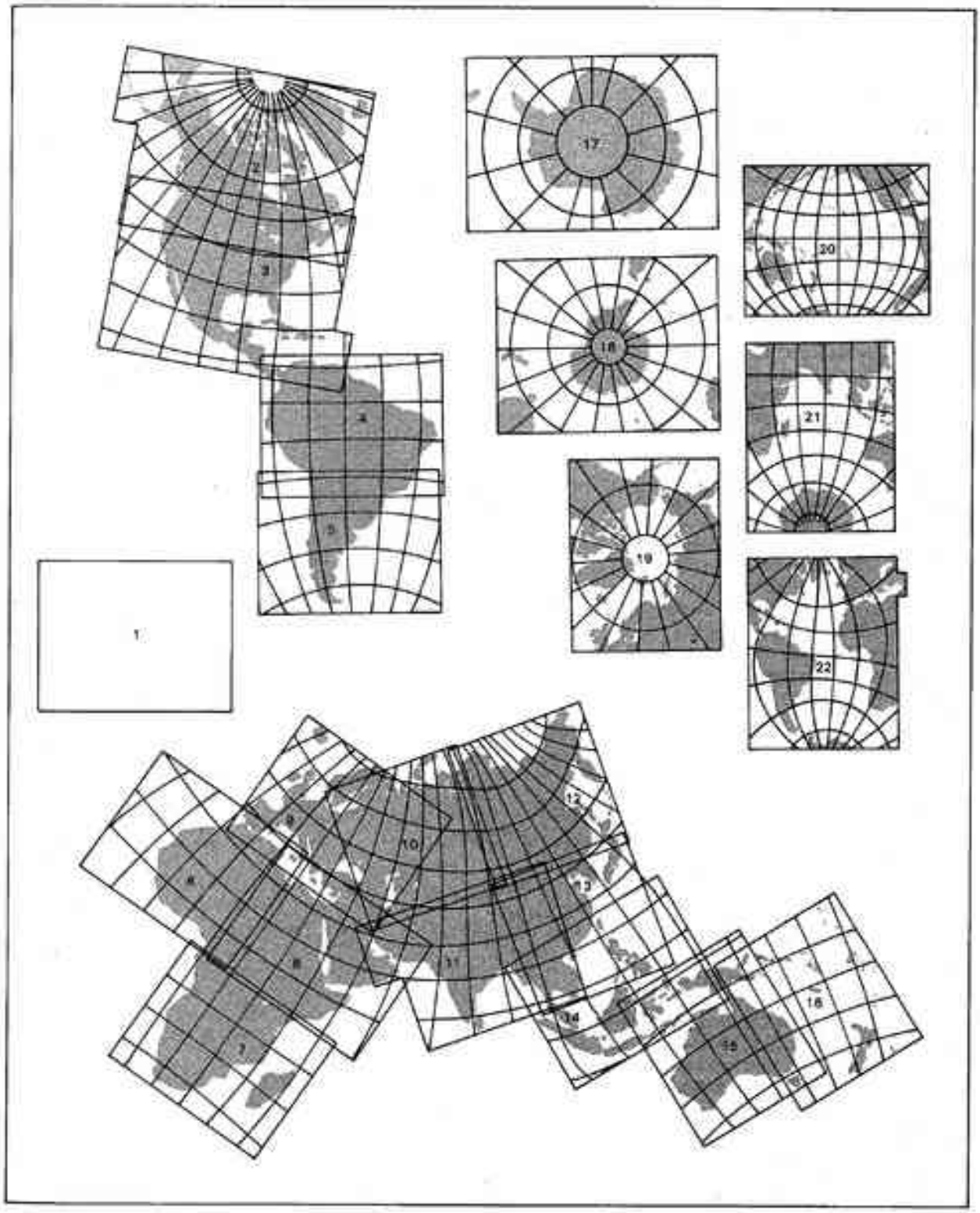


Tableau d'assemblage de l'Atlas géologique du monde – Le bureau de cartographie géologique internationale a été créé pour l'établissement de cartes géologiques synthétiques internationales. Il s'occupe en premier lieu de réaliser l'atlas géologique du monde au 1/10 000 000, ce qui est fait pour la première fois. L'atlas comportera vingt et une feuilles et une légende générale ainsi que des notices explicatives. Il y aura seize feuilles continentales et cinq feuilles océaniques. Les feuilles continentales représentent la géologie classique. Les feuilles océaniques font appel à toutes les données de prospection moderne des fonds océaniques qui permettent de préciser leur nature et l'âge de leurs fonds. Ceci est indiqué par des teintes appropriées et fait ressortir l'expansion des fonds océaniques. Les rides océaniques apparaissent clairement et montrent le taux d'expansion pour chaque grande période géologique. Actuellement, cet ouvrage important est en voie d'achèvement. On commence dès maintenant la carte géologique internationale de l'Afrique au 1/5 000 000. Elle comportera, sur une même feuille, la géologie continentale et la géologie profonde des fonds océaniques ainsi que celle des marges continentales. D'autre part, ont été également réalisées des cartes thématiques de l'Afrique telles que carte tectonique de l'Afrique au 1/5 000 000 et au 1/15 000 000 ; les carte du Quaternaire du Nord-Ouest de l'Afrique au 1/2 500 000. Tous ces travaux sont réalisés sous la direction des coordinateurs généraux de ces cartes : Georges Choubert et Anne Faure-Muret.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

ces étudiées. Il s'ensuit bien évidemment un gain de temps considérable et une économie substantielle. Par exemple, l'étude, à partir d'images Landsat 1, de la région de Noirmoutier réalisée en 1974 par l'équipe FRALIT, a permis l'établissement automatique de cartes sédimentologiques et phytosociologiques de cette région qui n'était connue jusqu'alors que grâce à des études ponctuelles. Un tel document présente non seulement les avantages d'une carte hydrographique puisque les différentes profondeurs d'eau et les niveaux de marées y sont indiquées, mais également ceux d'une carte sédimentologique, les divers types de matériels sédimentaires étant distingués. A partir d'une telle carte, des études sédimentologiques ponctuelles peuvent alors être entreprises et reliées entre elles.

De même, l'étude de la structure du delta du Nil, de son érosion et des effets du transit sédimentaire le long des côtes égyptiennes, n'a été vraiment perçu qu'après l'étude des images multispectrales du satellite Landsat et après leur traitement numérique. Seules les images spatiales pouvaient, grâce à la surface couverte au sol, permettre une observation d'ensemble des phénomènes.

Géologie structurale et tectonique des plaques

La télédétection a donné une autre dimension à l'étude des grandes structures géologiques. Alors que des centaines de photographies aériennes auraient été nécessaires pour leur étude, il suffit maintenant de quelques images par satellites pour percevoir ces structures dans leur ensemble et pour intégrer les études de terrain dans un vaste contexte régional. L'examen de documents de satellites permettent un recensement détaillé des structures dont certaines étaient alors inconnues (en dépit de leur importance), en raison même de leurs dimensions ou du fait de l'existence de masques superficiels. Les relations entre ces structures et la séismicité d'une part, et la gitologie d'autre part, ont permis de faire des progrès substantiels dans l'évaluation de risques séismiques régionaux, et dans la prospection de gîtes utiles potentiels. Dans ce domaine, l'utilisation de techniques nouvelles de télédétection, telles que le radar à ouverture synthétique et la radiométrie infrarouge thermique, ont permis de déceler des accidents cassants importants masqués soit par un couvert végétal dense (ex. en Amérique centrale), soit par des formations

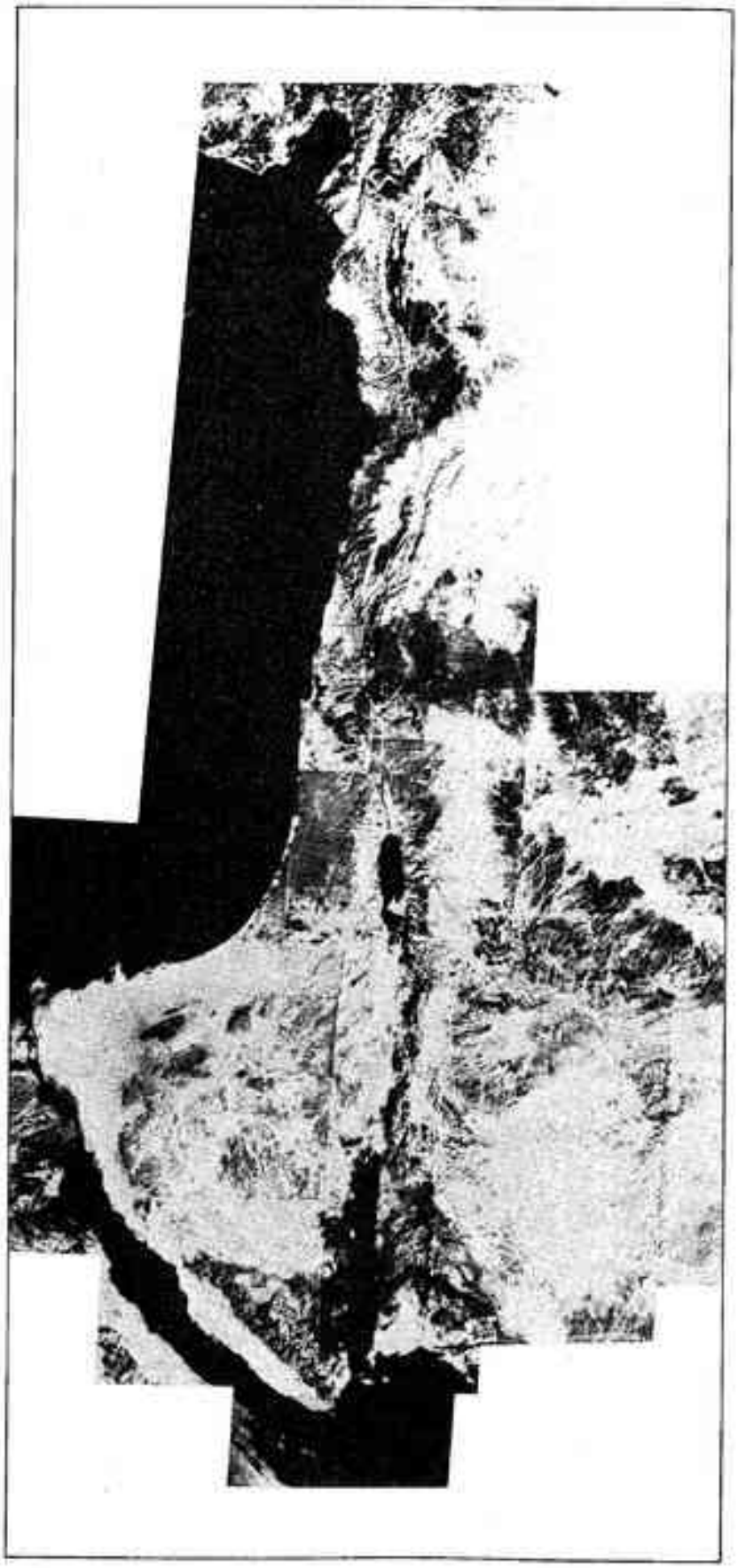


Fig. 1 – Mosaïque photographique Landsat 1 des failles libano-syriennes et de la vallée de la Mer Morte.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

superficielles au travers desquelles certaines différences de températures sont perçues grâce à la circulation hydrothermale existant au voisinage de ces accidents. Ces techniques associées à d'autres méthodes géophysiques aéroportées (gravimétrie, magnétisme) permettent de déceler la présence d'anomalies importantes pour la prospection (minière ou pétrolière) ou la recherche de sources d'énergies nouvelles (géothermie).

Un des domaines de la géologie structurale particulièrement favorisé par l'utilisation de la télédétection et surtout par celle des images de satellites est celui de l'étude des frontières de plaques lithosphériques. Ainsi, grâce à l'imagerie Landsat, de grands décrochements intra-continentaux actifs (faille à coulissage horizontal) ont été reconnus en Chine, au nord de l'Everest et interprétés comme le résultat de la collision entre le continent indien et l'Eurasie. L'ensemble des déformations provoquées par le déplacement de ce continent, et l'interprétation de ses conséquences structurales à l'échelle continentale sont le résultat d'une analyse combinée des données de télédétection (images Landsat) et de géophysique (séismicité).

De même, l'étude des structures liées aux déplacements de la Péninsule Arabique fait appel à la télédétection. Les limites de cette péninsule, à savoir les failles libano-syriennes et la vallée de la Mer Morte à l'ouest, les chaînes plissées du Taurus turc et du Zagros indien au nord et à l'est, et les Rifts des Afars au sud, font l'objet d'une étude intensive à partir des documents Landsat. Sans le concours de ces images qui permettent une étude structurale détaillée, l'interprétation régionale des déformations n'aurait pu être menée à bien, en raison des distances et des superficies couvertes, et des difficultés d'accès de certaines de ces régions.

La Plaque Arabique se déplace vers le nord, en coulissant le long du système de failles libano-syriennes et de la vallée de la Mer Morte (fig. 1 et 2) qui fonctionnent en décrochement senestre. Ce déplacement engendre l'ouverture de la Mer Rouge, du Rift des Afars et du golfe d'Aden, avec des mouvements d'extension et un volcanisme de type océanique actuellement observé dans les Afars. Ce déplacement entraîne une collision entre l'Arabie et l'Eurasie et provoque des plissements au nord-est au niveau de la Turquie orientale et du Zagros iranien.

En Californie, le système des failles de San Andreas a été largement observé à partir de l'espace. Outre la car-

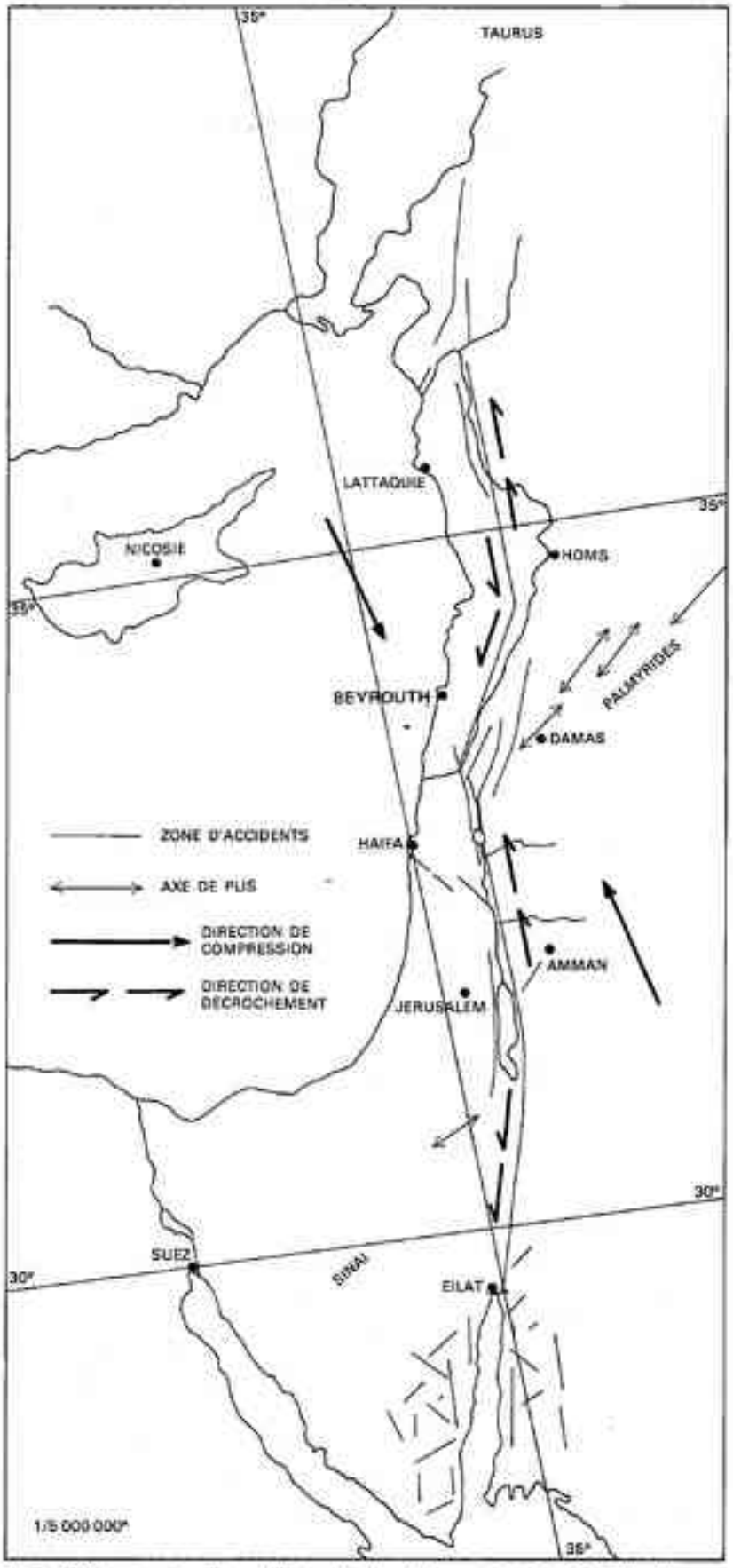


Fig. 2 – Schéma structural issu de l'interprétation des images Landsat 1 des failles libano-syriennes et de la vallée de la Mer Morte (d'après Ph. Masson, 1978 – Rev. Photo-Interprétation, n° 1).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

tographie d'ensemble du système réalisé à l'aide des images Landsat, l'observation et l'évaluation des déformations actuelles de la surface au voisinage des failles, obtenues par des mesures de radio-interférométrie, ont montré récemment une expansion superficielle de l'ordre d'une vingtaine de centimètres en six mois. Ces mesures, si elles ne relèvent pas strictement du domaine de la télédétection au sens où il est généralement entendu, à savoir imagerie et enregistrement de données à partir de l'espace, n'appartiennent pas moins à l'ensemble des techniques de mesures à distance, au même titre que les mesures précises de déformation du géoïde dont le géophysicien et le géologue ont besoin pour interpréter des phénomènes tectoniques globaux à l'échelle de la Terre.

Planétologie

Depuis une quinzaine d'années, l'homme a entrepris l'exploration du système solaire. Les planètes qui nous entourent avaient été longuement observées par les astronomes, mais exception faite pour la Lune, la résolution des images télescopiques ne permettait pas d'interprétation géologique. Il a donc fallu attendre les expériences spatiales américaines et soviétiques pour que les géologues puissent bénéficier d'images ayant une résolution suffisante pour leur permettre une interprétation sérieuse. A l'exception de la Lune dont certaines régions ont été explorées par l'homme (missions Apollo) et par conséquent où certaines interprétations à distance ont pu être vérifiées au sol, tous les autres corps du système solaire ne sont connus (du point de vue géologique) que par l'intermédiaire de la télédétection. La Lune et les planètes du système solaire ont été soit survolées par des sondes automatiques passant à leurs voisinages (missions Voyager 1-2 passant près de Jupiter), soit observées systématiquement par des stations orbitales, comme par exemple les engins Mariner 9 et Viking 1-2 autour de Mars. Ces missions ont fourni une quantité impressionnante d'images de résolution allant du kilomètre à la centaine de mètres, couvrant tout ou partie des surfaces de ces planètes. Les images ont été traitées comme l'ont été des photographies aériennes ou des images spatiales de la Terre. Elles ont d'abord servi à l'établissement de cartes topographiques, en général à petite échelle (par exemple à 1/5 000 000 pour Mars ou Mercure). Ces cartes ont ensuite été utilisées par les géologues pour l'établissement de cartes géologiques obtenues à partir de la photo-interprétation des images orbitales. Dans le cas de certaines planètes, et en particulier pour Mars, cette interprétation a été accompagnée d'une comparaison avec des phénomènes analogues terrestres, eux-mêmes étudiés par télédétection (images Landsat).

Au contraire de la Terre, certaines des petites planètes du système solaire sont dépourvues d'atmosphère. Ayant de ce fait subi une évolution superficielle beaucoup moins poussée que la Terre, leurs surfaces doivent avoir conservé les mêmes caractères géomorphologiques primitifs que cette dernière après sa formation. Par conséquent, l'étude des planètes telluriques doit renseigner le géologue sur l'histoire primitive de la Terre. Dans ce qui suit, les âges relatifs des différentes périodes géologiques ont été établis à partir de la densité de population de cratères d'impacts météoritiques, leurs tailles et leur état de conservation. Des courbes de datation relative ont pu ainsi être établies sur la Lune et comparées avec les âges obtenus à partir des échantillons rapportés sur Terre. Par extension, les datations relatives ont pu être extrapolées à Mars et Mercure.

La Lune

La morphologie de la Lune est dominée par les cratères d'impacts météoritiques de toutes tailles. Du point de vue géomorphologique, la surface lunaire présente deux types principaux de formations : les mers (sombres) et les Highlands (clairs).

La croûte lunaire s'est formée il y a un peu moins de 4,6 milliards d'années. Cette croûte constitue les Highlands. Peu après sa formation, elle a été soumise à un intense bombardement météoritique dont le flux est allé en diminuant. Puis ($-3{,}9.\ 10^9$ ans), un certain nombre d'impacts géants ont formé de grands bassins, ensuite remplis de magmas basaltiques pour former les mers lunaires. Ce remplissage a commencé environ à $-3{,}8.\ 10^9$ ans et a continué pendant environ sept cents millions d'années. Pendant et après cette période de remplissage, le bombardement météoritique a érodé et bouleversé les bords des bassins et leurs remplissages magmatiques sous l'effet des impacts directs et secondaires et des séismes provoqués par les ondes de choc dues aux impacts.

La surface des mers lunaires est recouverte sur cinq à quinze mètres d'épaisseur par une accumulation de fins débris (le Régolithe), provenant du remaniement des roches sous-jacentes par les impacts météoritiques répétés.

Mercure

La surface de Mercure ressemble beaucoup en première approximation, à celle de la Lune, avec une morphologie dominée par les cratères d'impacts et des terrains plus plats, semblables aux mers lunaires. Comme sur la Lune, il n'y a pas d'évidence morphologique indiquant des effets d'érosion de type atmosphérique (eau ou vent). La morphologie de Mercure est dominée par un grand bassin (Caloris) de mille trois cents kilomètres.

Après sa différenciation, la surface de Mercure a été soumise à un intense bombardement météoritique. Pendant le déclin de l'intensité de ce bombardement, la surface a été recouverte d'épanchements volcaniques qui ont été soumis eux-mêmes à un nouvel épisode de bombardement météoritique. Pendant cette même période, Mercure a connu une activité tectonique globale, interprétée comme la conséquence d'une contraction générale de la croûte sous l'effet du refroidissement du noyau. Vers la fin de la période de bombardement météoritique, le grand bassin de Caloris se serait formé. Des coulées volcaniques ont envahi ensuite de grandes régions, et ont été par la suite soumises à une dernière période de bombardement météoritique moins intense que les précédents.

Mars

La surface de Mars montre de nombreux cratères d'impacts météoritiques ainsi que quelques vieux bassins comme sur la Lune ; mais on observe également des structures tectoniques telles qu'un grand canyon équatorial (Valles Marineris) long de près de cinq mille kilomètres, large de cent soixante kilomètres et profond de six kilomètres (semblable au Grand Rift Est Africain), telles que des édifices volcaniques géants (Olympus Mons, Tharsis Montes) semblables aux volcans hawaiiens, ainsi que de nombreuses traces des effets d'une érosion atmosphérique (champs de dunes et chenaux de type fluviatile) (fig. 3).

Après la phase initiale d'accrétion et de différenciation ($-4{,}5.\ 10^9$ ans), la croûte primitive a été soumise à un intense bombardement météoritique. Pendant cette période, une surface intensément cratérisée et chaotique se formait, semblable aux Highlands lunaires. Un réseau de failles se développe à cette époque sur l'ensemble de

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

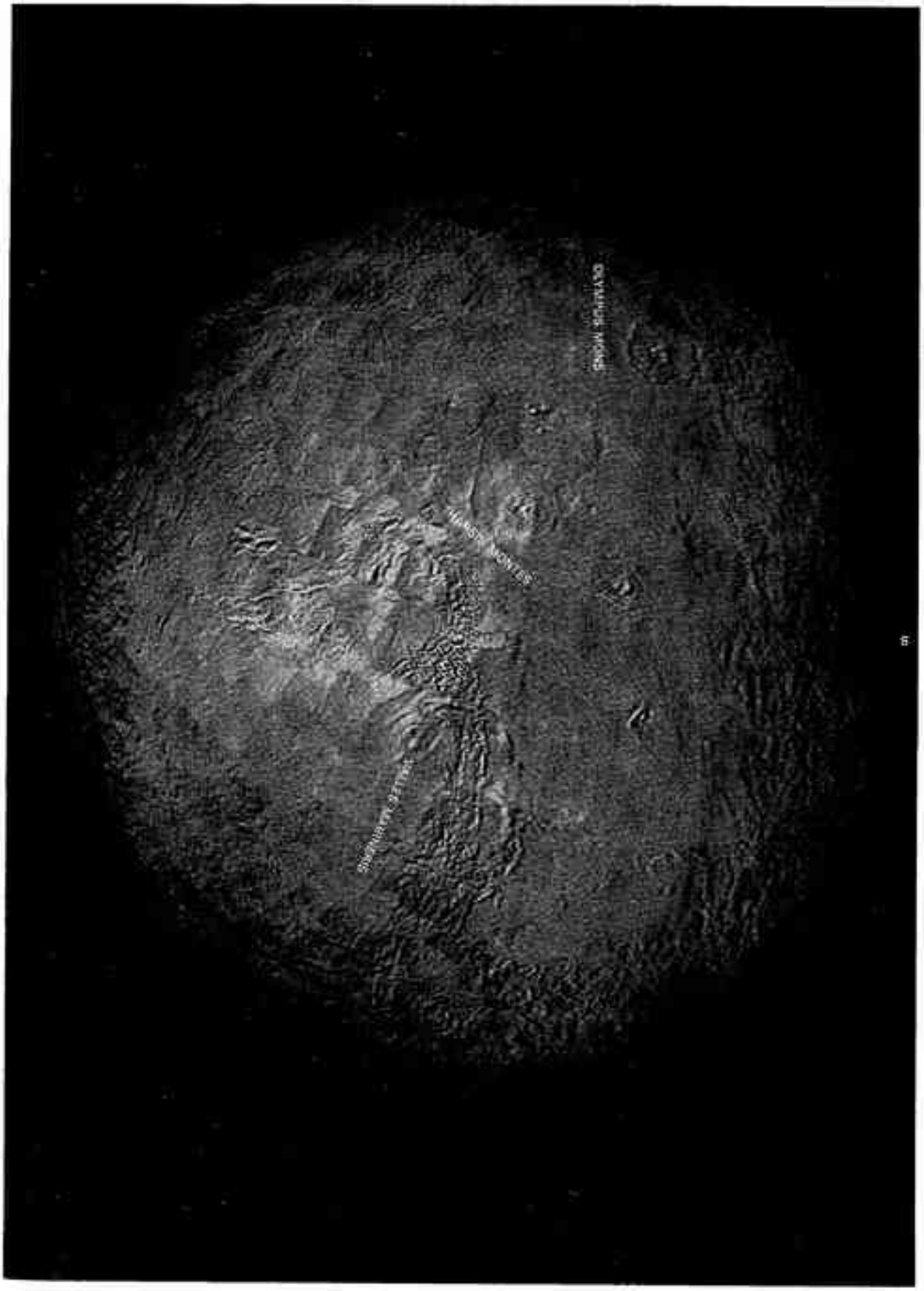


Fig.3 – Montage photomosaïque des images Mariner 9 (1971, NASA-J.P.L.) montrant certains des grands traits morphologiques de la planète Mars (volcans, canyon équatorial) décrits dans le texte.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

Fig. 4 – Image de la sonde Voyager 1 (1979, NASA-AMES) montrant une éruption volcanique à la surface d'un satellite de Jupiter (Io). Le panache en haut et à gauche de l'image correspond aux particules projetées par le volcan, à une altitude d'environ 210 km. Cette image a été réalisée à une distance de 490 000 km.

la planète, ainsi qu'une fracturation à grande échelle liée à un soulèvement régional de la croûte qui s'amorce dans la région des grands volcans de Tharsis. Vers la fin de cette période, des coulées fissurales de basalte recouvrent de grandes étendues. Puis la fonte du pergélisol, sous l'effet du volcanisme, des impacts météoritiques ou de changements climatiques provoque d'importantes inondations responsables de la formation des réseaux de type fluvintile observés en certains endroits de la planète. Au cours de la dernière période importante de l'histoire géologique de Mars (– 2,5. 10^9 ans), l'activité volcanique atteint son paroxysme avec la formation de volcans géants (du type d'Olympus Mons), et le recouvrement des grandes plaines avoisinantes par des coulées volcaniques. L'érosion fluviatile a pu se prolonger au cours de cette période, mais d'une façon moins catastrophique. L'activité éolienne a probablement été importante tout au long de l'histoire géologique de la planète, mais les premiers dépôts éoliens observés semblent dater de la dernière période (– 2,5. 10^9 ans).

Vénus

Vénus, en raison de son atmosphère nuageuse, n'a pu être observée (jusqu'à ce jour) en « direct » à partir d'une sonde spatiale. Les seules données de télédétection dont dispose le géologue sont celles qui ont été obtenues à partir du radar terrestre de Goldstone en Californie.

Les images radars à la surface de Vénus montrent, dans certaines régions de cette planète, la présence de structures semblables à des impacts météoritiques géants. Si tel est le cas, il semblerait qu'il existe sur Vénus des régions très anciennes sur lesquelles les agents d'érosion ont eu peu d'effets. En d'autres endroits, la présence d'une vaste dépression allongée, semblable au Grand Rift Est Africain de la Terre ou au Grand Canyon Equatorial de Mars (Valles Marineris), et de grandes chaînes montagneuses pouvant atteindre deux mille mètres de haut, semble indiquer l'existence d'une importante activité tectonique sur Vénus. En outre, un relief de forme plus ou moins circulaire, d'environ deux cent cinquante kilomètres de diamètre, et présentant une dépression de quatre-vingts kilomètres de diamètre environ à son sommet, semblable aux volcans géants de Mars, a été observé. La présence de tels traits géomorphologiques (vallée de failles, chaîne montagneuse, volcan) semblerait indiquer que Vénus a (ou a eu) une activité interne importante, semblable à celles de Mars et de la Terre.

La Lune, Mars, Mercure et probablement Vénus ont connu, après leur formation, une période importante de bombardements météoritiques. D'importantes régions de la Lune et de Mercure ont été envahies par des formations volcaniques après cette phase de bombardement météoritique, mais leur activité interne semble s'être calmée rapidement après la période d'activité volcanique. De semblables phénomènes volcaniques se sont produits sur Mars mais ont continué plus longtemps, avec la formation de grands volcans et d'importantes déformations tectoniques. Mars et apparemment Vénus, montrent une évolution géologique plus étendue dans le temps que la Lune et Mercure, avec un volcanisme tardif et une tectonique récente. En outre, Mars semble avoir été soumise aux effets de l'érosion éolienne (toujours active) et fluviatile. L'évolution géologique de la Lune et de Mercure s'est achevée relativement rapidement, et de ce fait, leurs surfaces doivent ressembler à la surface primitive de la Terre avant qu'elle n'ait subi les différentes phases de sa propre évolution.

Les satellites de Jupiter

Certains des satellites de Jupiter viennent d'être observés pour la première fois par les sondes Voyager 1 et 2. Les surfaces de ces satellites (Io, Europa, Ganymède, Callisto) présentent chacune des caractères morphologiques très différents. *Io* est le siège d'une activité volcanique intense : huit volcans en activité ont été observés (fig. 4). La surface de Io est recouverte par des coulées de type sulfureux qui la remanient sans cesse. De ce fait, elle est totalement dépourvue de cratères d'impacts météoritiques.

Europa et *Ganymède* présentent une surface de glace intensément fracturée. Les structures observées à la surface de Ganymède semblent indiquer que sa croûte aurait eu une certaine mobilité qui pourrait être rapprochée, dans une certaine mesure, de la tectonique des plaques terrestres. L'étude approfondie de ce satellite de Jupiter pourra apporter d'utiles compléments à la compréhension des problèmes que posent la tectonique des plaques au géologue terrestre. Lors de la prochaine mission spatiale projetée par la NASA pour étudier en détail les satellites de Jupiter (mission Galiléo), la télédétection aura à jouer un rôle fondamental et le géologue sera l'un des investigateurs privilégiés.

La télédétection a ouvert au géologue des perspectives nouvelles. Elle lui permet sur Terre de s'affranchir des distances, de replacer ses observations dans un contexte plus vaste, de percevoir les phénomènes sous un angle différent et de prendre du « recul » par rapport au terrain. La télédétection est à la fois pour le géologue une méthode d'investigation complémentaire par rapport à celles qu'il utilise normalement sur le terrain, et une méthode de synthèse lui permettant de considérer la géologie terrestre dans une perspective globale. Avec l'ère des grandes expériences spatiales, le géologue a en outre appris à considérer la géologie à l'intérieur du contexte du système solaire et de son évolution, en fonction de ce qu'il apprend chaque jour sur la géologie des autres planètes.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

Incidences économiques et géopolitiques de l'exploitation des matières premières minérales et énergétiques

Rien ne sera plus comme avant, l'ère du gaspillage est terminée. Claude Guillemin nous fait part des réflexions que la crise de l'énergie lui inspire.

Claude GUILLEMIN

Bien que l'on m'ait demandé un article sur les incidences économiques, il m'a paru impossible de ne pas tenir compte des interactions entre matières premières et politique mondiale, sinon nationale, interactions qui, hélas, ne sont que trop visibles actuellement. De même, je serai amené à envisager, rapidement, le vaste domaine des interactions entre géosciences et recherche minière.

Les matières premières minérales et énergétiques (MPM & E) représentaient en 1973 environ 4,5 % du produit national brut mondial, depuis 1974, elles étaient montées à 8 %, l'augmentation s'étant surtout portée sur les produits énergétiques ; ce passage brutal, s'il n'a pas créé la crise sous-jacente des années 1975, l'a révélée de façon explosive. Les années 1977 et surtout 1978 ont pu faire croire à certains qui ne voulaient pas ouvrir les yeux que le gros de la crise était passé et que les vertus de l'inflation nous ramenaient vers la croissance due à l'énergie bon marché. L'année 1979 a, je crois, balayé ces vœux aussi optimistes qu'irréels. La part des MPM & E dépasse nettement les 10 % du produit national brut mondial (entre 11 et 12 %) et cette situation ne peut que s'aggraver pendant les deux prochaines décennies.

Importance passée et présente des matières premières minérales et énergétiques

La possession des richesses minérales a toujours été un facteur important de la puissance d'un pays ou de l'évolution des relations internationales. Les mines du Laurium, source des tétradrachmes athéniennes, ont permis le développement de la romanité en stoppant les idéologies orientales à Salamine ; les richesses minières de l'Espagne ont suscité les guerres puniques et la conquête romaine ; l'or et l'argent des Amériques, après avoir apporté la puissance à l'empire de Charles Quint, ont causé le déclin de l'Espagne. L'utilisation de la force de la vapeur amena le développement explosif de l'industrie charbonnière, ce qui affermit au XIXe siècle les temps modernes déjà bien commencés à la fin du XVIIIe.

La domination politique des grandes puissances industrielles dans la seconde moitié du XIXe siècle s'est établie en partie sur la nécessité pour ces pays de s'assurer des sources d'approvisionnement sûres et économiques. L'origine de la première guerre mondiale est due en partie au partage inégal du « monde colonial » favorisant la France et l'Angleterre aux dépens de l'Allemagne. Il en a été de même de l'offensive militaire du Japon en 1941. La décolonisation a assuré la prépondérance des Etats « continents ». Cependant, l'appétit des Etats-Unis pour les matières premières ne leur permet pas une politique autarcique, alors que le bas niveau de vie de l'URSS lui assure une relative indépendance vis-à-vis des sources extérieures de matières premières avec par contre la nécessité d'importer les produits agro-alimentaires et les technologies occidentales plus performantes.

Notre civilisation « modèle », néo-keynésienne, est basée sur la croissance de la consommation en biens matériels, seule façon d'éteindre le « paupérisme ». La croissance est le bien suprême qui permet d'éviter les crises du capitalisme ou du néo-capitalisme d'Etat.

Pour faire croître indéfiniment la consommation, il faut disposer de beaucoup de ressources naturelles, mais depuis un siècle, exceptionnels sont les économistes ou les scientifiques qui se sont penchés sur l'éventualité d'une raréfaction ou d'une limitation des matières premières. Certes, on savait que la Terre est un espace fini, mais on considérait comme dans les ouvrages populaires de science-fiction les possibilités du système solaire et même des étoiles qui devaient permettre la panspermie humaine, l'hymne infini à la croissance (encore récemment, un « savant » américain proposait d'aller extraire le ferronickel des astéroïdes).

Quelle place tenaient les matières premières dans ce modèle classique ?

Les matières premières étaient à la disposition des pays intéressés (c'est-à-dire des pays nantis) qui pillaient allègrement leurs propres ressources et celles de leur « clientèle » ; au besoin pour des nations pauvres, libres et récalcitrantes, la politique de la canonnière était l'argument décisif. Bon marché, les matières premières ne posaient pas de problème d'approvisionnement et ne jouaient qu'un rôle mineur dans le prix de revient des objets manufacturés ; pour ceux-ci, on utilisait le juste prix qui ne tient compte que des coûts primaires, laissant à la communauté les coûts indirects (coûts sociaux, déchets, pollution, aide au tiers monde...).

Fruit vénéneux de ce modèle, le taux d'actualisation, taux d'imprévoyance

□ Claude Guillemin est inspecteur général du Bureau de recherches géologiques et minières et vice-président du Comité consultatif de la recherche scientifique et technique.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

interdit toute vision à long terme, toute réelle planification de notre avenir. De toute façon, nous avons un postulat rassurant et simple : nos descendants feront suffisamment de découvertes scientifiques pour pouvoir se passer de tout ce qui nous était indispensable !

Mais voilà, entre juin 1973 et janvier 1974, le prix du pétrole quadruple ; le 17 octobre 1973, date historique, les pays arabes utilisent le pétrole comme arme stratégique. Du coup, le bateau de notre civilisation faisant déjà eau de toute part, taraudé par les exponentielles, se met à sombrer.

Début février 1979, on pouvait encore trouver des « spécialistes de l'énergie » prêts à parier que le prix du pétrole ne dépasserait pas à court terme (un ou deux ans) 25 dollars le baril environ (en janvier, il était encore de 14,5 dollars le baril), maintenant (janvier 1980) personne ne sait plus combien vaut exactement le pétrole de « référence », sans doute entre 27 et 30 dollars le baril, soit en moins d'un an de 80 à 100 % d'augmentation (de 70 à 80 % en francs constants), et encore faudrait-il parler du marché noir qui s'est installé pour de nombreuses variétés de pétroles à des prix nettement supérieurs à 30 dollars, des phénomènes de stockage, de spéculation. C'est l'anarchie la plus complète pour des combustibles qui représentent près de 60 % de notre consommation énergétique, et qui sont importés à 98 %, d'où déjà en 1978, avant cette anarchie un déficit de notre balance des paiements de cinquante-cinq milliards de francs, montant à plus de soixante-dix en 1979 et autour de cent dix milliards de francs en 1980.

Or, ce coma pétrolier était prévisible si on avait voulu ou osé y réfléchir depuis 1970, début de la destabilisation islamique, de l'augmentation du prix du pétrole et du renforcement de son aspect stratégique, crise simplement révélée par le coup de tonnerre d'octobre 1973 ; en effet, énergie plus chère, signifie crise dans les pays développés, pauvreté croissante pour les trois quart des pays en voie de développement obligés d'importer de l'énergie très chère, d'où des tensions internationales toujours croissantes.

Les matières premières minérales et énergétiques sont-elles rares ?

Je rappellerai d'abord ce qu'est un minerai (1) :

Un minerai est normalement une roche dont on peut, dans les conditions économiques présentes et avec la technologie existante, extraire avec profit un ou plusieurs métaux ou matériaux.

Les conditions politiques ou économiques peuvent modifier cette notion pour des pays à économie planifiée ou vivant plus ou moins en autarcie ; on peut exploiter des minerais rigoureusement inexploitables pour combler un manque, se procurer ou économiser des devises. En temps de grave pénurie ou de conflits, de nombreuses mines sont remises en exploitation sans considération des conditions de marché.

On doit distinguer ressources et réserves.

Les réserves sont des gîtes connus de minerais, alors que les ressources comprennent non seulement les réserves mais aussi d'autres concentrations minérales qui peuvent devenir exploitables ; ce peuvent être des gisements ou des anomalies de teneur de l'écorce terrestre, qui ne sont pas actuellement exploitables économiquement ou technologiquement, ou bien des dépôts encore inconnus, mais dont l'existence est rendue vraisemblable par nos connaissances présentes en géologie.

Par exemple, les fameux nodules polymétalliques sous-marins ne sont encore que des ressources même si l'on considère tout ce qui se dit depuis quinze ans sur leur exploitation dans les cinq ou dix années qui viennent.

C'est la confusion entre réserves et ressources, l'importance de « ressources » calculées en fonction de la masse de l'écorce terrestre et le fait que dans les dernières décennies, la production métallique a crû avec l'abaissement des teneurs exploitables qui ont créé le mythe du recours aux basses teneurs. Ce mythe a permis, encore en 1974, de proposer des systèmes économiques basés sur le développement d'une exploitation totale des éléments contenus dans les roches granitiques (rock mining system).

La crise actuelle a conduit à regarder de plus près ces minerais à basse teneur. En particulier, on commence à s'intéresser aux coûts énergétiques totaux, de l'extraction à la production du métal, en tenant compte des coûts énergétiques annexes : infrastructures, transports, protection de l'environnement...

Les travaux de Chapman montrent que toute baisse de teneur d'un minerai augmente le coût énergétique du métal extrait, l'obtention d'une même tonne de celui-ci exigeant l'abattage et le traitement d'une masse accrue de minerai ; l'accroissement du coût énergétique étant intégralement supporté par les secteurs miniers et par la préparation des concentrés. Par exemple : pour le cuivre extrait des gisements porphyriques, le coût énergétique d'une tonne de métal dans le concentré à partir d'un minerai à 1 % est d'environ 14 000 kWht (2), ce qui représente l'extraction, le concassage, le broyage et la flottation, alors que fusion et raffinage ne représentent que 7 500 kWht, soit au total 21 500 kWht la tonne de métal.

Pour un minerai à 0,5 % avec le même taux de récupération en métal, il faut 43 000 kWht par tonne de cuivre et pour un minerai à 0,3 %, 90 000 kWht dont toujours 7 500 kWht pour la métallurgie. Une étude récente montre d'ailleurs qu'aux Etats-Unis la teneur de coupure pour les mines de cuivre du type porphyries est passée de 0,4 % environ en 1973 à 0,8 % fin 1979 et ce pour des mines déjà en exploitation !

Les coûts énergétiques arrêtent donc l'accès aux basses teneurs sauf si dans l'avenir le prix de l'énergie diminue ou si des méthodes d'exploitation encore peu connues ou inconnues (fracturation et lixiviation en place peut-être ?) et des procédés métallurgiques beaucoup moins coûteux en énergie, peuvent être mis au point.

Risquons-nous alors de manquer de métaux ?

D'un point de vue global, c'est-à-dire en considérant l'ensemble du monde comme un tout, disponible à chacun ; si les efforts nécessaires de prospection sont accomplis dès maintenant, et surtout si l'on exploite mieux les gisements et utilise mieux les métaux qui en seront extraits, il n'y a aucun problème de ressources en métaux et en matériaux pour les siècles à venir ; la vraie limitation à court terme (au sens géologique : 100 à 1 000 ans) ce sont les matières premières énergétiques.

Il est évident qu'une part plus importante jouée par les énergies nouvelles ou par des économies conduit rapidement à des durées plus importantes des énergies fossiles.

Bien d'autres raisons militent en faveur du développement des sources d'énergies renouvelables. Il est ridicule de consommer hâtivement des combustibles fossiles pour produire de la cha-

(1) Toutes les définitions ci-après s'appliquent évidemment aux énergies fossiles.

(2) 1 tonne de houille = 1 Tec ; 1 tonne de produit pétrolier = 1,5 Tec ; 1 tonne de gaz naturel = 1,33 Tec (750 m³, gaz = 1 Tec) ; 1 000 kWh électrique = 0,125 Tec. 1 kWh thermique (kWht) fournit 0,3 à 0,35 kWh électrique (kWhe).

Les anglo-saxons utilisent (hélas !) la British thermal unit : 1 Tec = $27,3.10^6$ BTU et comme unité de production de pétrole, le barrel de 42 gallons équivalent à 0,159 m³ (7 barrels à la tonne de pétrole) 1 barrel = 0,19 Tec.

Dans les études globales, énergétiques, on utilise l'unité Q = 10^{18} BTU (Q = 40.10^9 Tec ou 40 G. Tec).

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

	CONSOMMATION TOTALE (1)	CHARBON	PETROLE	GAZ NATUREL	ELECTRICITE	NUCLEAIRE	ENERGIES NOUVELLES
1975 (EN GtEC)	8	2,6	3,5	1,7	0,2		–
(EN %)	–	32,5 %	44 %	21 %	2,4 %	0,1 %	–
2010 (EN %)	–	30 %	30 %	15 %	5 %	10 %	10 %
(EN GtEC)	16	4,8	4,8	2,4	0,8	1,6	1,6
CUMULEE 1975-2010 (EN GtEC)	–	130	150	70	–	30	–
2050 (EN %)	–	35 %	15 %	5 %	10 %	15 %	20 %
(EN GtEC)	24	8,4	3,6	1,2	2,4	3,6	4,8
CUMULEE 2010-2050 (EN GtEC)	–	270	170	70	–	100	–
CUMULEE 1975-2050 (EN GtEC)	–	400	320	140	–	130	–

(1) y compris les usages non énergétiques qui pour les pétroles représentent environ 8 % – (1 GtEC = 10^9 tEC)

Tableau 1 – Scénario d'utilisation d'ici l'année 2050 des matières premières énergétiques, en le comparant aux différentes estimations de réserve (scénario repris de publications antérieures développant sa construction).

ESTIMATION DES RESSOURCES (en GtEC)	PESSIMISTE	RAISONNABLE	TRES OU TROP OPTIMISTE
CHARBON	–	8 000	18 000
(MOINS CONSOMMATION 1975-2050)	–	(7 600)	(17 600)
PETROLE	270	450	2 700
(MOINS CONSOMMATION 1975-2050)	(EPUISES VERS 2040)	(130)	(2 380)
PETROLE + PETROLE NON CONVENTIONNEL	440	950	3 500
(MOINS CONSOMMATION 1975-2050)	(120)	(630)	(2 180)
GAZ NATUREL	70	180	800
(MOINS CONSOMMATION 1975-2050)	(EPUISE VERS 2010)	(40)	(660)
URANIUM SANS SURREGENERATEURS	350	–	–
(MOINS CONSOMMATION 1975-2050)	(220)	–	–

Tableau 2 – Ce tableau montre bien que les dangers de disette apparaissent surtout pour le gaz (les chiffres des « réserves » provenant d'URSS devant être traités avec une extrême prudence), puis pour le pétrole conventionnel. Bien que les hypothèses soient plus fragiles, le nucléaire sans surrégénérateurs s'apparente au pétrole. Le charbon reste donc bien la ressource ultime parmi les énergies fossiles.

leur, alors qu'il s'agit de carbone et de composés carbonés hautement différenciés et indispensables à la carbochimie et à la pétrochimie. Les coûts de recherche et d'exploitation augmentent considérablement, presque exponentiellement avec les consommations cumulées ; ces énergies fossiles sont éprouvantes pour l'environnement et cela ne peut que s'accentuer dans l'avenir avec la baisse des teneurs et la nécessité d'exploiter des produits comme les schistes bitumineux ou les charbons pauvres et de développer l'énergie nucléaire. La raison la plus élémentaire nous conduit donc à favoriser rapidement le développement de l'hydroélectricité, des autres énergies renouvelables essentiellement d'origine solaire : en particulier, le bois perdu à 75 % lors de son utilisation comme matériau, et de la géothermie. Ce sont des énergies beaucoup plus écologiques, mieux réparties à la surface du globe, d'où un approvisionnement meilleur et plus sûr pour les divers Etats.

Il semble donc que pour les matières premières, même énergétiques, nous ayons encore du temps devant nous : des siècles pour devenir plus sages ou plus performants ; mais c'est oublier le principal danger de tous mes beaux raisonnements : la globalisation.

En effet, je considère globalement les ressources de notre planète. Cela doit être considérablement corrigé par la répartition géographique de ces ressources qui est très loin d'être uniforme, la géologie n'ayant aucun sens égalitaire ! La production minière, reflet des conditions géologiques, est très inégalement répartie.

C'est ainsi que moins de 1 400 millions d'habitants situés dans les pays industrialisés et dans les « nouveaux riches » du tiers-monde produisent pour environ 4 000 milliards de francs de matières premières minérales et énergétiques (sans les matériaux de carrière) alors que les 2 600 millions d'habitants du tiers ou du quart-monde n'en retirent que 500 milliards environ.

D'ailleurs entre 1973 et 1978, 1 200 millions d'habitants des pays développés ont connu une augmentation de 7 à 8 % du produit national brut, moins de 150 millions des « nouveaux riches », de 50 à 250 % ! et les 2 600 millions restant, une diminution globale de 2 % due à l'augmentation du prix des carburants, des engrais, des produits manufacturés...

Il convient de souligner la différence de poids stratégique entre les producteurs de pétrole organisés, politisés et

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

disposant de ressources monétaires considérables et les pays en voie de développement produisant des métaux dont le marché est loin d'être organisé et dont les prix, après une flambée éphémère en 1974, sont retombés souvent en-dessous de leur valeur avant la crise. Ces pays n'ont pas de réserves monétaires dont ils peuvent jouer. Un simple exemple, en additionnant les budgets du Congo, de la République Centre-Africaine, du Tchad, du Niger, de la Haute Volta, du Bénin, on obtient le chiffre d'affaires des Galeries Lafayette !

Et pour la France, et l'Europe (CEE) ? Eh bien, la situation actuelle n'est pas brillante, en ce qui concerne l'énergie, c'est la suivante (voir tableau ci-dessus).

Pour les matières premières minérales, on peut grossièrement estimer que la CEE en importe environ 60 %, (près de 80 % pour la France).

Cependant, il ne faut pas oublier qu'en densité de minéralisation métallique, l'Europe soutient favorablement la comparaison avec le reste du globe ; si on exprime la production minière en dollars par kilomètre carré, l'Europe occidentale produit 710 $/km² pour une moyenne mondiale de 277 (543 pour les Etats-Unis). Mais l'Europe occidentale ne représente que 3 % des terres émergées et donc ne produit actuellement que 7,6 % du minerai non énergétique mondial.

Nous verrons cependant qu'elle dispose encore de sérieux atouts si elle se décide à les utiliser, et cela rapidement.

Quels peuvent être les remèdes devant la crise de l'énergie et des matières premières ?

La réflexion. Ce n'est pas une boutade, le premier acte de la crise en 1974 a provoqué une débauche d'écrits, de proclamations, de congrès sur l'énergie et les matières premières (entre 1945 et 1973, on compte dans le monde moins de cent ouvrages ou publications consacrés à l'avenir des MPM & E, depuis 1973 il en paraît plusieurs centaines par an dont heureusement à peine 10 % valent la peine d'être lu).

Mais, qu'a-t-on fait jusqu'en 1979 ? Presque rien, que des mots et des slogans télévisés ; la plupart des responsables ne croyaient pas vraiment à la crise.

Certes, on a créé des organismes chargés de reformer les habitudes de consommation, de promouvoir énergies nouvelles, économies, etc... mais avec le minimum de moyens face aux tout puissants bastions de l'énergie traditionnelle. La majorité des français

	CONSOMMATION	PRODUCTION	%
ENERGIE (EN MTep)*			
CEE	967	432	44,8
dont France	182	47	26,0

* Chiffres 1978

Région parisienne (Pompadour). Photo Maret, BRGM.

Mine de Copper mountain, Colombie britannique. Canada. Agard. BRGM.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

n'établissaient pas de liens entre la guerre de l'énergie et la crise – et ce encore en 1979 ! –. Combien savent qu'un milliard de francs de devises dépensées à l'extérieur pour acheter du pétrole, gaspillé à 25 ou 30 %, cela représente 20 000 chômeurs de plus !

Depuis le début de 1979, un nombre grandissant de politiques ont compris que notre civilisation « scientoindustrielle » basée sur une course absurde à la croissance était frappée à mort, qu'énergie et matières premières représentaient un patrimoine précieux qu'il convenait de « gérer » pour assurer notre avenir. Les décisions prises actuellement sont bonnes (heureusement pour la France, la décision nucléaire avait été prise bien avant !) mais aurons-nous le temps et les moyens budgétaires suffisants ?

La recherche. Cet article n'ayant pas pour sujet les géosciences, je ne ferai que citer certains axes de recherche qui peuvent nous permettre de découvrir et non pas de rencontrer des gisements en rénovant ainsi les possibilités minières de nos vieux pays, de mieux utiliser les matières premières minérales et énergétiques, d'augmenter nos productions nationales et notre pourcentage d'autarcie.

Pour rechercher les gisements cachés (actuellement les méthodes de prospection des mines métalliques sont très aléatoires à partir d'une centaine de mètres de profondeur), il vaut mieux connaître la typologie, la marque des concentrations minérales dans le « paysage » géologique, disposer de méthodes géophysiques et géochimiques plus performantes, augmenter la rentabilité des sondages en développant les diagraphies.

Intensifier les recherches sur la fissuration à toutes les échelles, recherches qui jouent sur des disciplines aussi diverses que la valorisation des minerais, la construction des grands ouvrages, le stockage des déchets radioactifs, les possibilités qui révolutionneraient notre avenir énergétique de réaliser la gazéification profonde des charbons, la distillation des schistes pétroliers, l'utilisation de la chaleur des roches sèches.

Repenser l'exploitation minière, en favorisant l'exploitation de « petites mines à haute teneur » encore très nombreuses en Europe et pour cela mettre au point des méthodes métriques de diagnose des corps minéralisés, des méthodes d'abattage et d'avancement sélectives (et peu coûteuses en énergie), des procédés intégrés de valorisation des minerais utilisables par un « collectif de petites mines ».

Utiliser au maximum les possibilités ignorées ; appliquer les recherches effectuées dans d'autres domaines, la chimie par exemple pour l'hydrométallurgie, discipline qui doit connaître un grand développement car elle est peu coûteuse en énergie et donc susceptible de concentrer des minerais pauvres, valoriser les minerais complexes, et recycler économiquement nombre de métaux. C'est aussi la chimie qui jouera un rôle déterminant dans la récupération assitée des pétroles, dans la possibilité d'utiliser les pétroles non conventionnels.

Une des tâches essentielles, c'est la nécessité de promouvoir une conscience de l'économie, de la géopolitique, du contrat social chez les chercheurs. Il y a encore trop de thébaïdes scientifiques où l'on a simplement accroché l'écriteau « applications », trop de modèles déductifs incapables de soutenir le choc du réel. Nous devons considérer comme une priorité urgente les contacts fréquents et les travaux communs entre chercheurs, ingénieurs, économistes, planificateurs.

Réétudier les intéractions entre les différents thèmes de la recherche, savoir réserver – même dans le soi-disant court terme – la part de recherche qui servira au moyen sinon au long terme.

Enfin, il faut souligner l'importance des banques de données dès que l'on veut améliorer la gestion des ressources terrestres. Cela paraît évident : comment utiliser des ressources si on ne les connaît pas ? Et pourtant, le dernier forage fait en France pour la recherche du charbon date de 1958 ! La diminution régulière des activités de collecte de renseignements sur le sol et le sous-sol risque de nous amener à ne pouvoir affronter des événements demandant des solutions à court terme, comme par exemple la grande sécheresse de 1976. La géothermie basse température ne doit son avenir brillant en France qu'à la possibilité que nous avons eu d'utiliser les données géologiques récoltées lors des forages pétroliers – données heureusement conservées et valorisées ces quinze dernières années –.

Pour finir, soulignons l'importance de la décision prise par la France en 1975 de procéder à un inventaire exhaustif des ressources minérales du territoire – inventaire qui donne des résultats très intéressants et dont l'idée est reprise maintenant au niveau européen –.

Les économies d'énergie et de matières premières minérales. Qui parle de gestion, parle d'économie ou d'économies... Les économies d'énergie (et de matières premières), c'est l'arme absolue à tous termes. Economiser 1,2 millions de Tep, c'est économiser 1 milliard de devises soit environ 20 000 chômeurs. Or dans le monde actuel, 10 % de l'humanité gaspille totalement, c'est-à-dire jette sans en avoir rien utilisé, de 25 à 30 % des productions de notre planète. Des évaluations récentes permettent d'estimer que les Etats-Unis gaspillent 50 % de leur énergie (25 à 30 % pour la France). Un exemple simple, le budget des cartes de vœux aux Etats-Unis est supérieur au budget de la recherche biologique et médicale.

Pendant longtemps, notre civilisation a été basée sur le grenier dans lequel on mettait tout ce qui ne servait plus mais qui pouvait ensuite rentrer à nouveau dans le cycle de la vie. Les cinquante dernières années ont vu au contraire une nouvelle civilisation basée sur le dépôt d'ordures dans lequel on jette, on brûle, on détruit. C'est là peut-être un symbole absolu de notre époque.

Il est probable qu'une de nos chances, c'est de revenir à une civilisation recyclable. Tout doit être fait pour favoriser la réutilisation, la rénovation, le recyclage. Ce sont des propositions bien connues et je n'insisterai que sur l'économie d'énergie que le recyclage permet de réaliser. Le recyclage de l'aluminium à partir des déchets consomme moins de 5 % de l'énergie nécessaire pour l'extraire de la bauxite. La récupération du fer à partir des ferrailles permet d'économiser 55 % de l'énergie, 90 % pour le cuivre de récupération !

Mais pour cela, il serait bon d'étudier complètement les cycles d'utilisation des MPM, les quantifier, en distinguant les ruptures, les pertes, les possibilités de mieux fermer les cycles. Cela nous conduit à l'importance des substitutions.

On a longtemps considéré que la substitution d'un métal par un autre était irréversible (d'où une limitation aux possibilités de substitution). Ce n'est plus le cas maintenant avec des machines capables d'usiner des matériaux de caractéristiques variables (aluminium, plastique, acier, dans l'industrie automobile). Donc l'utilisateur peut plus facilement choisir en fonction des prix et plus encore actuellement, en fonction des sécurités d'approvisionnement ; le nombre des métaux stratégiques ou irremplaçables va en se réduisant. Les substitutions peuvent d'ailleurs permettre de réduire l'emprise de la production des métaux sur l'environnement et des choix en fonc-

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

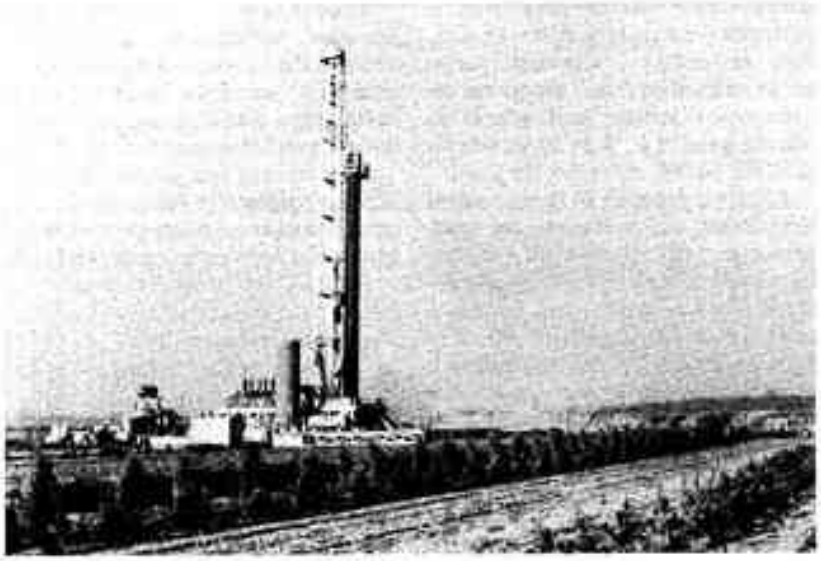
tion des coûts énergétiques, d'où l'intérêt de chercher à utiliser les métaux présents en forte quantité dans l'écorce terrestre. Une tonne de fer ou d'aluminium représente de 3 à 5 tonnes de déblais, pour 250 à 300 tonnes pour une tonne de cuivre !

Influence de la crise sur notre politique d'investissements et d'achats à l'étranger et particulièrement dans le tiers-monde. La recherche minière est une industrie où la recherche et l'exploitation exigent des capitaux importants face à des durées d'amortissement et de rentabilité particulièrement élevées et donc très sensibles à la sécurité des investissements d'autant plus qu'actuellement, ce sont toujours les gros gisements à faible teneur qui servent de modèles économiques !

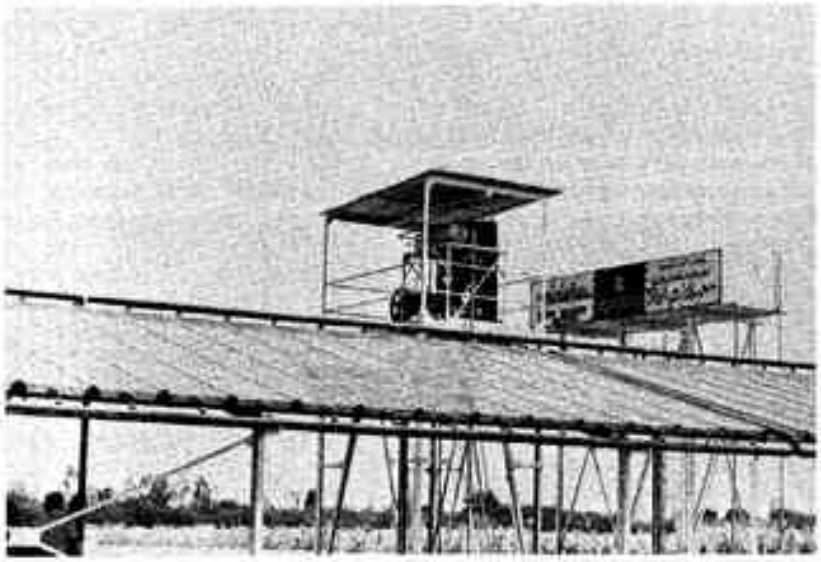
De la découverte de l'indice à l'exploitation, il faut aujourd'hui dix à quatorze ans pour une mine importante et ensuite huit à dix ans au minimum, mais souvent quinze ou même vingt ans pour la période nécessaire au remboursement des sommes investies. Donc, penser l'aventure minière « style pré-crise », c'est prévoir vingt-cinq ou trente ans, d'où un rôle accru de l'Etat dans ce domaine.

Or, depuis 1970 et l'essor des nationalismes agressifs, la participation des capitaux privés aux investissements miniers dans les pays en voie de développement ralentit considérablement au profit de ceux effectués dans les pays développés d'où un rôle accru des Etats pour assurer la relève des intérêts privés.

Il faut distinguer parmi les pays en voie de développement, ceux qui sont riches en matières premières, les aider à transformer leurs ressources en réserves exploitables et ensuite les orienter vers une intensification des échanges contre des techniques et du bien-être. Pour ceux, pauvres en ressources et souvent hélas trop riches en hommes, nous devons les aider à compléter la connaissance de leurs sol et sous-sol avec la formation concomittante de cadres, y compris de techniciens ; concentrer nos efforts sur des modèles alternatifs de développement et ne pas craindre de favoriser des technologies complètement différentes des nôtres (« small mining system » à basse technologie par exemple). Il paraît essentiel, surtout pour les pays en voie de développement souvent situés dans les zones d'ensoleillement ou de précipitations maximales, de développer l'hydro-électricité et les énergies nouvelles : solaires, thermique des mers, éoliennes, etc... d'autant plus que



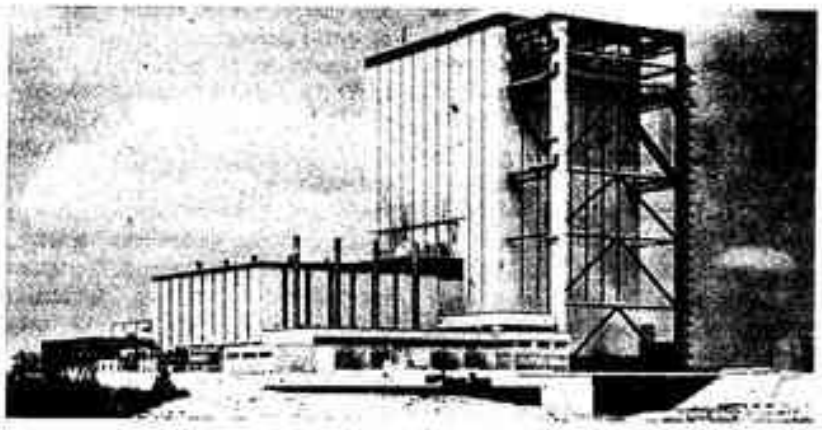
Tour de forage de Melleray (près d'Orléans).



Pompe solaire. Khartoum (sept. 71).

Nodules manganésifères. Pacifique. BRGM.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf



Centrale nucléaire du Bugey – EDF.

ces pays sont heureusement dépourvus des techno-structures dont la puissance réside dans l'hypercentralisation et la dilution bureaucratique des responsabilités. En outre, le développement de ces techniques aura des effets rétroactifs importants sur la fiabilité et la rentabilité de ces équipements et donc sur leur vulgarisation dans nos propres pays.

Il est certain qu'en dehors des accords de produits de plus en plus difficiles à réaliser (du type, accord sur l'étain) les pays développés doivent favoriser la réalisation d'accords bilatéraux ou régionaux associés à des actions de coopération.

Depuis l'échec quasiment total des négociations CNUCED à Manille en 1979 et surtout depuis les derniers événements internationaux, le Nouvel ordre économique (NOE) semble touché à mort. Il convient d'ailleurs de pourfendre un cliché éculé, celui de la théorie du pillage des pays en voie de développement. La crise de l'énergie et des matières premières vient d'une attitude de gaspillage des ressources, d'un véritable esprit colonialiste envers notre planète. Contrairement à ce que l'on dit chaque jour, on ne pille pas seulement les pays du tiers-monde, on pille et surtout on a pillé indifféremment, exactement de la même façon, nos pays occidentaux et les autres, et si on exploite actuellement les autres, c'est parce qu'on a trop pillé les nôtres. C'est d'ailleurs le pillage de notre propre sous-sol qui a permis le développement de la technologie occidentale !

Enfin, il est évident que devant l'incertitude des approvisionnements, les pays développés doivent constituer des stocks, stocks qui ont en outre un rôle plus ou moins régulateur sur les marchés. La France de plus, commence à établir des plans matières : plan cuivre, plan uranium, couvrant le cycle de production depuis la mine jusqu'à l'usage final.

Nous disposons de peu de temps, peut-être deux ou trois décennies, en l'absence de conflits armés mondiaux, pour créer un nouveau mode de vie faisant disparaître, ou pour le moins, atténuant significativement les causes de la crise qui vient de se développer, causes, hélas, plus politiques que naturelles. Mais pour cela, il faut une véritable mobilisation des moyens de recherche et d'innovation, refuser les mythes des ultras de la croissance, mythes qui seront balayés par les coûts énergétiques : gaz de géopression, exploitation de mines sous-marines à grande profondeur, énergie des volcans, etc... et refuser aussi le mythe du retour au « bon vieux temps » de la mortalité infantile et des vieillards de quarante ans.

Nous avons des chances : les économies possibles, l'énergie nucléaire qui pourrait être plus « socialement » contrôlée (pourquoi ne créerait-on pas des comités d'utilisation mêlant producteurs et consommateurs), le développement de l'hydro-électricité repensée, du charbon avec des méthodes nouvelles d'exploitation, le recours aux énergies dites nouvelles, le bois en particulier.

Ces énergies nouvelles et l'hydro-électricité basse puissance pouvant amener une véritable décentralisation et donc une repersonnalisation de l'énergie, avec une nouvelle trame énergétique et sociale pour l'aménagement de notre pays :

- énergies dispersées pour les utilisations dispersées ou peu concentrées : habitat (fermes, villages et villes moyennes, agriculture et industries agricoles, artisanat, certaines PMI) ;
- énergies concentrées pour obéir à la loi d'échelle et pour une plus grande sécurité, mais énergies trop coûteuses à distribuer sur de longues distances qui alimenteraient les grandes villes et les grosses industries regroupées.

Pour les mines métalliques du temps du gaspillage-roi, on recherchait les meilleures mines avec les meilleurs minerais, quel que soit l'environnement géographique, social et politique ; maintenant et peut-être pour longtemps, on développera des gisements nationaux grâce à différentes incitations ou on réalisera des investissements miniers à l'étranger, fonction de la stabilité prévisible des pays hôtes, et portant sans doute sur des gîtes moins monstrueux.

Il est certain que rien ne sera plus comme avant. Nous avons vécu de cueillette et de gaspillage, avec un peu de chance nos petits enfants connaîtront une humanité de récolte et de recyclage ; c'est notre devoir de chercheurs d'aider à construire cette nouvelle société.

En espérant que l'espèce humaine saura, dans un avenir proche, faire sa seule mutation importante, celle de ses valeurs morales : peut-être faut-il, p[illegible] trouver un peu de temps, se tourner vers les « scientifiques » qui, s'ils sont « par delà le Bien et le Mal », se révèlent cependant seuls capables de mettre de l'ordre dans ce qu'ils ont créé et créent chaque jour.

BIBLIOGRAPHIE

A time to choose. America's energy future. Energy policy prospect of the Ford foundation. – Ballinger Pub. Co., 1974, 511 p.

M. Bégairy. – *L'exploitation des océans. Paris, PUF, 1976, 159 p.*

P. Bourreller, F. Callot, R. Diethrich, J.P. Hugon. – *Matières premières minérales et relations internationales. In : « Annales des mines », janvier 1975, pp. 7-71.*

F. Callot. – *Production et consommation mondiale des minerais en 1975. In : « Annales des mines », décembre 1975, pp. 7-134.*

P.F. Chapman. – *Coût énergétique de la production primaire d'aluminium et de cuivre. In : « Cuivre, laitons, alliages », n° 130, vol. 3, 1974, pp. 2-11.*

R. Dumont. – *La croissance de la famine. Paris, éd. du Seuil, 1975, 191 p.*

J.C. Erskine. – *The effect on ore reserves of rising costs and falling prices. In : « Australian min. ind. quaterly », n° 31, 1978, pp. 53-66.*

C. Guillemin. – *L'avenir des matières premières minérales et énergétiques. In : « Géologues », n° 48, avril 1979, 29 p.*

C. Guillemin. – *Géopolitique des ressources. In : « Futuribles », n° 20, février 1979, pp. 31-41.*

Ledent. – *La gazéification du charbon à grande profondeur. In : « Techniques de l'énergie », décembre 1976, pp. 7-13.*

Les limites de l'approvisionnement pétrolier mondial. (Résumé de l'étude préparée pour la XIème conférence mondiale de l'énergie – Istanbul, 19-23 septembre 1977 – par Pierre Desprairies...). In : « L'hydrocarbure », n° 137, 4ème trim., 1977, pp. 3-22.

W. Malenbaum. – *Metals for man's survival. In : « Mining congress journal », vol. 61, n° 2, février 1975, pp. 46-50.*

Politique énergétique nationale : présentation d'un dossier préalable. In : « Journal officiel », Sénat, séance du 29 novembre 1977, pp. 3 263-3 275.

Resources and Man. National Academy of sciences, National research council. New-York, Freeman, 1969, 259 p.

D. Singer, D. Cox, L. Drew. – *Grade and tonnage relationships among copper deposits. Note pour la conférence « un plan d'ensemble pour l'humanité », Institut de la vie, septembre 1974, 35 p.*

B.J. Skinner. – A second iron age ahead. In : « Amer. Scientist », n° 5, vol. 64, mai-juin 1976, pp. 258-269.

C.E. Steinhart, J.S. Steinhart. – *Energy, sources, use and role in human affairs. North scituate (Mass.), Duxbury press, 1974, 562 p.*

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

Pour en savoir plus

Ou trouver la documentation sur la Terre

Le fichier documentaire PASCAL actuellement disponible en ligne sur les réseaux de transmission de données contient plus de 300 000 signalements de documents intéressant la terrre, accumulés depuis 1973 (45 000 signalements nouveaux chaque année). La plus grande partie de ces signalements « PASCAL-GEODE » est réalisée en commun entre le CNRS et le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). Elle comprend 250 000 références (35 000 par an) traitant des secteurs géologiques et miniers. Elle peut être aisément complétée par des documents plus anciens provenant du fichier GEODE du BRGM. De nombreux organismes français et étrangers coopèrent à PASCAL-GEODE, parmi lesquels on peut citer le Bureau de documentation minière, le Bundesanstalt für Gewissenschaften und Rohstoffe, l'Institut géologique espagnol ENADIMSA-IGME, etc. L'indexation est bilingue et un accord de coopération et d'échange est prévu pour 1981 avec l'American geological institute. Cet échange est rendu possible par l'adoption de normes communes par tous les coopérants.

Une autre partie de PASCAL réunit les documents traitant de géophysique au nombre d'environ 60 000 (8 000 par an). Les autres documents intéressant la terre sont répartis dans les diverses autres sections de PASCAL (pollution, sols, océanologie, travaux publics, chimie, sciences de la vie, la planète Terre, etc.). En 1981, grâce à la coopération avec l'American geological institute, plus de 50 000 signalements viendront enrichir le fichier.

Les réponses aux questions posées et en particulier aux sujets d'actualité peuvent être obtenues soit par interrogation directe du fichier en ligne à partir d'un petit terminal, soit par abonnement à un service de diffusion sélective selon un profil d'intérêt précis. Par exemple, une interrogation rapide montre que le fichier contient environ 400 documents sur les méthodes de prospection de pétrole en mer. La plupart sont écrits en langue anglaise mais 8 % d'entre eux sont en français et 8 % en russe. Sur les aurores polaires, nous avons eu environ 159 réponses pour la seule année 1979 dont 11 % en langue russe et 3 % seulement en français. Sur les paléoclimats qui est un sujet très actuel, nous trouvons en 1979, 461 documents dont 60 en allemand et 81 en français.

Pour la prévision des tremblements de terre, on ne trouve qu'un seul document en langue française sur les 129 entrés dans le fichier l'an dernier. Sur la prévision des éruptions volcaniques et sur les orages magnétiques, notre langue n'est guère mieux représentée. Par contre, le français domine en matière de karstologie et d'hydrologie en zone karstique, le nombre des documents en français représentant plus du tiers des 427 documents du fichier en 1979. Sur les modules polymétalliques, on trouve en 1979, 128 documents dont 15 en français et 18 en allemand. Mais il y en a 184 sur la prospection du charbon qui redevient un sujet d'actualité. La géothermie est un des sujets sur lesquels on publie le plus puisque pour une seule année on trouve 1 284 documents. Il en est de même des nappes phréatiques et des eaux souterraines pour lesquelles on trouve 1 141 réponses sur un an.

Tous ces signalements sont répertoriés dans les bulletins signalétiques qui comportent huit sections pour la partie PASCAL-GEODE, et une section groupée avec l'astronomie pour la partie géophysique. Toutefois, des sujets tels que les foraminifères, la diagenèse de la matière organique, la télédétection, la photogrammétrie, la pollution marine, la recherche des composants mineurs dans les roches et dans les eaux, la stabilité des sols, etc. font appel à l'ensemble du fichier PASCAL qui compte en tout 3 500 000 documents depuis 1973.

Une fois les documents sélectionnés et repérés, le CNRS a la possibilité d'aider les utilisateurs à se procurer les textes originaux. Enfin, grâce à une technique récemment mise au point, le Centre de documentation scientifique et technique édite actuellement des microfiches en couleur des cartes géologiques.

Les éditions du CNRS : quelques ouvrages récents

M. Arnould, R. Pelet. Géochimie des sédiments marins profonds. Orgon III. Mauritanie, Sénégal, Iles du Cap-Vert. – 190,00 F.

J.M.L. Bertrand. Evolution polycyclique des gneiss précambriens de

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

l'aleksod (Hoggar central, Sahara algérien). Aspects structuraux, pétrologiques, géochimiques et géochronologiques. 1975, 380 p. ill. 21 x 27. (Publ. centre rech. zones arides 19). – 96,00 F.

Janine Bertrand-Sarfati. Stromatolites columnaires du Précambrien supérieur (Sahara nord-occidental). Inventaire, morphologie et microstructure des laminations, corrélations stratigraphiques. 1975, 296 p. ill. 21 x 27. (Publ. centre rech. zones arides 14). – 48,00 F.

Pierre Bordet, M. Colchen, Patrick Le Fort. Recherches géologiques dans l'Himalaya du Népal, région de Nyi-Shang. 1976, 140 p. ill. 21 x 29. (Cahiers népalais). – 198,00 F.

R. Busnardo, J.P. Thieuloy et M. Moullade. Les stratotypes français. Dernier paru : Hypostratotype mésogéen de l'étage valangénien. – 75,00 F.

J. Cogne. La Chaine varisque d'Europe moyenne et occidentale. Rennes, 25 septembre-6 octobre 1974. 1977, 660 p. ill. 21 x 29. (Colloques 243). – 215,00 F.

Colloque Himalaya. Himalaya, 2. Sciences de la terre, éd. bil. français-anglais. 1977, 560 p. 21 x 27. (Colloques 268). – 184,00 F.

Olivier Dollfus, P. Usselmann. Recherches géomorphologiques dans le centre-ouest du Népal. 1972, 58 p. ill. 21 x 27. (Cahiers népalais). – 20,00 F.

Pierre Ducos, P. Delannoy, D. Helmer, Tell-Mureybet (Syrie 9ème-7ème millénaires), 1. Etude archéo-zoologique et problèmes d'écologie humaine. Les niveaux 1-17 (fouilles Van Foon) et la phase 4 (fouilles Cauvin). 1978, 145 p. ill. 21 x 29,5. – 61,00 F.

La génèse des nodules de manganèse. Colloque n° 289. – 300,00 F.

La géologie des régions égéennes. Communication. 5ème colloque, Orsay (1-3 février 1975). 1976, 365 p. ill. (Colloques 244). – 132,00.

Carla Gruas-Cavagnetto. Etude polynologique du Paléogène du Sud de l'Angleterre. 1976, 72 p. ill. 21 x 27. (Cahiers micropaléont. 1). – 24,00 F.

Lexique stratigraphique international – 120 tomes parus.

Lexique international de pétrographie des charbons. Dernier paru : 2ème supplément à la 2ème édition. – 15,00 F.

B.Y. Mafart. Paléographie de l'homme fossile. Dernier paru : Abbaye St Victor de Marseille (IV°-VI° siècles). – 180,00 F.

J. Magné. Etudes microstratigraphiques sur le Néogène de la Méditerranée Nord-Occidentale – les bassins néogènes catalans. 504 p. 21 x 29,7, br. – 150,00 F.

M. Magny. La dynamique des dépôts lacustres et les stations littorales du grand lac de Clairvaux (Jura). 1979, 244 p. ill. 21 x 29. – 55,00 F.

M. Mainguet, Y. Callot. L'Erg de Fachi-Bilma (Tchad-Niger). Contribution à la connaissance de la dynamique des ergs et des dunes des zones arides chaudes. 1979, 184 p. ill. 21 x 27. (Centre recherches cartograph.). – 120,00 F.

Les métaux en milieu marin phosphore et dérivé phosphoré (Actualité de biochimie marine. Vol. 2). – 95,00 F.

A. Moreau-Benoit. Les cahiers de micropaléontologie (4 numéros/an). Derniers parus : les spores du Dévonien de Libye (I et II). – 45,00 F.

Phénomènes karstiques II, 2. 1975, 396 p. ill. 28 x 22. (Centre recherches cartograph. 15). – 170,00 F.

Processus de formation des eaux océaniques profondes en particulier en Méditerranée occidentale. Paris, octobre 1972. 1974, 282 p. ill. 21 x 29. (Colloques 215). – 126,00 F.

Philippe Taquet. Géologie et paléontologie du gisement de Gadoufaoua (Aptiendu Niger). 1976, 239 p. ill. 21 x 27. (Cahiers de paléontologie). – 150,00 F.

J. Varet. Carte géologique de l'Afar central et méridional (Ethiopie et République de Djibouti). 1979, 16 x 25. – 184,00 F.

Publication de la direction des relations extérieures

Annuaire des sciences de la terre, de l'océan, de l'atmosphère et de l'espace. Présentation des thèmes de recherche des laboratoires soutenus par le CNRS travaillant dans les domaines suivants : astronomie et environnement planétaire ; géophysique et géologie interne, minéralogie ; géologie sédimentaire et paléontologie ; océanographie et physique de l'atmosphère. En vente à la librairie du CNRS – 15, quai Anatole France, 75700 Paris (100 F).

1978. Images des sciences de la terre, de l'océan et de l'espace – Supplément au Courrier du CNRS (12 F).

Recherches géologiques en Afrique, n° 4 (20 F) – N° 5 à paraître en septembre.

Le CNRS et l'énergie (10 F).

Laboratoire d'information et de documentation en géographie

Le laboratoire « Intergéo » (191, rue Saint-Jacques, 75005 Paris, tél. 633.74.31 et 329.79.93), est spécialisé dans la documentation et l'information en géographie. Comme tel, il accorde une grande place, dans ses activités, aux sciences de la terre, dans la mesure même où les géographes s'y intéressent.

Les principales branches de la recherche concernent donc surtout la géomorphologie avec toutes ses connexions : tectonique, quaternaire, pédologie, hydrologie, biogéographie, climatologie, etc..., et bien entendu les actions anthropiques, l'érosion des sols ; la télédétection a pris récemment une grande place dans les publications.

Intergéo réalise et publie la « Bibliographie géographique internationale », patronnée par l'UNESCO, qui recense 6 000 à 7 000 nouvelles références par an (ouvrages et revues du monde entier). La bibliographie est automatisée depuis 1977, ce qui permet, outre l'édition de fascicules trimestriels avec de nombreux index, la diffusion sélective de bibliographies spécialisées, et l'interrogation en conversationnel (système FRANCIS). La géographie physique y représente environ le tiers de l'information, soit plusieurs centaines de références chaque trimestre. Plusieurs thésaurus ont été édités, dont un est consacré à la géomorphologie.

Intergéo assure d'autre part l'information générale sur l'activité des équipes de recherche françaises, universitaires et du CNRS, en géographie, ainsi que des enquêtes sur les sources et moyens de la recherche dans son autre périodique trimestriel « Intergéo-bulletin » et dans sa « Lettre d'Intergéo » (huit numéros par an) : plusieurs inventaires sur les photothèques, cartothèques, périodiques, etc..., intéressent les sciences de la terre. Le laboratoire publie et tient à jour également un fichier automatisé des chercheurs (Répertoire des géographes francophones). Son service de traduction du russe a réalisé plusieurs travaux intéressant directement les sciences de la terre.

Intergéo dispose d'une cartothèque spécialisée dans les pays étrangers (cartes topographiques, géologiques, pédologiques, etc., atlas) et d'une photothèque comportant de nombreuses diapositives et plaques concernant la géomorphologie. L'ensemble des collections est consultable sur place, rue Saint-Jacques.

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

Les Editions du C.N.R.S.

Favoriser la publication des résultats des recherches scientifiques est une des missions fondamentales du C.N.R.S. (Centre national de recherche scientifique).

Les Editions du C.N.R.S. couvrent toutes les disciplines scientifiques. Les supports qu'elles emploient pour faire connaître et valoriser la recherche sont divers :

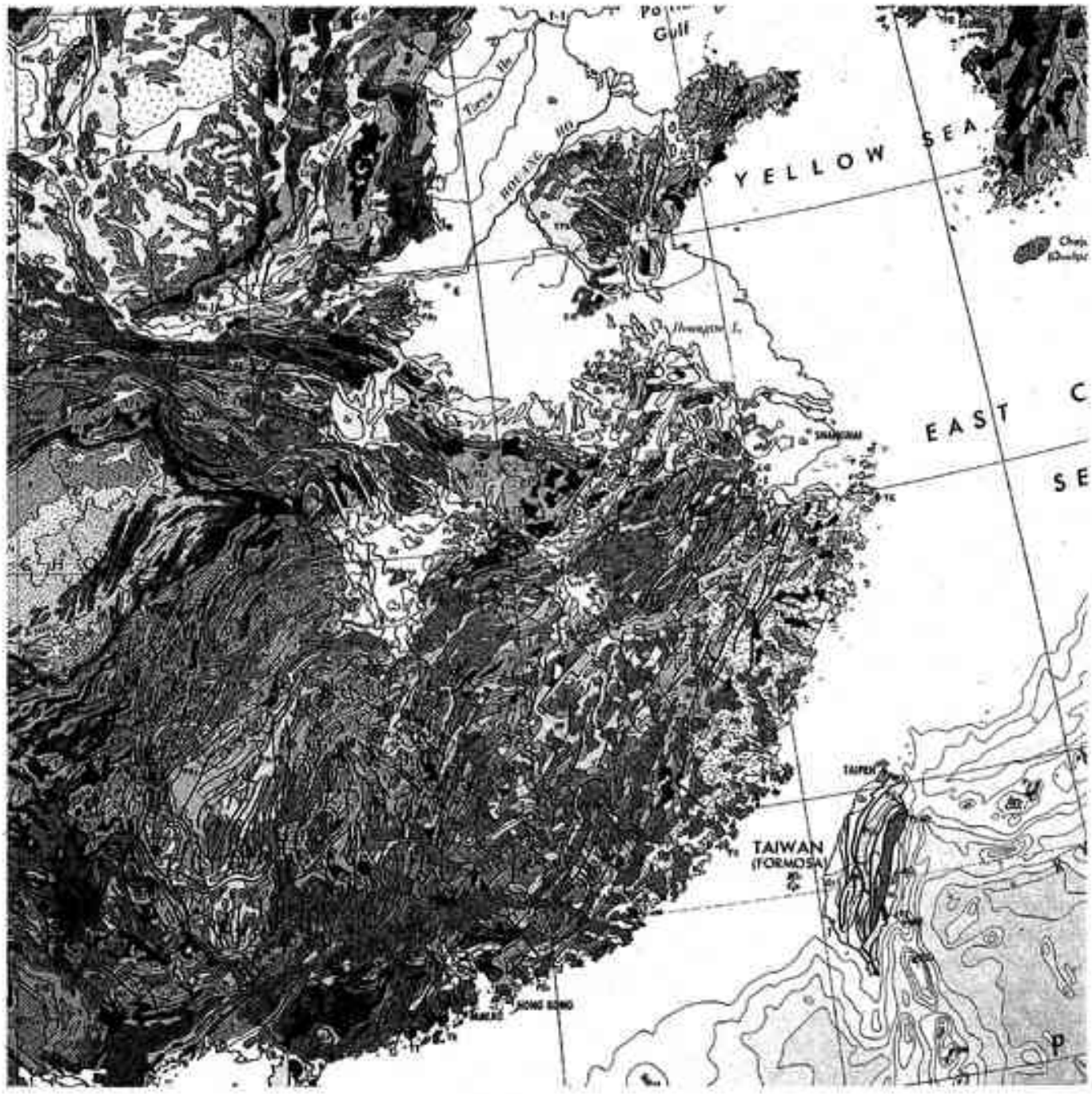
- des revues, parmi lesquelles il faut citer, dans le domaine des sciences exactes : Annales de géophysique, Annales de la nutrition et de l'alimentation; dans le domaine des sciences humaines : Revue française de sociologie, Economie de l'énergie, Revue d'études comparative Est-Ouest.
- des séries périodiques, telles pour l'archéologie : Gallia et Gallia-préhistoire et leurs suppléments, dont : Lascaux inconnu, Antiquités africaines, Paléorient, Archaeonautica, ou pour l'étude des manuscrits : Revue d'histoire des textes.

  Ces séries peuvent faire l'objet d'un abonnement, de même que les publications annuelles : Annuaire français de droit international, Annuaire de législation française et étrangère, Annuaire de l'Afrique du nord, Bibliographie annuelle de l'histoire de France, etc.
- des collections où paraissent les résultats des travaux des équipes de chercheurs : Cahiers et monographies du Séminaire d'économétrie, monographies françaises de psychologie, actions thématiques programmées, monographies du centre d'hémotypologie, documents des cahiers népalais, énergie et société, etc.
- les actes des colloques nationaux ou internationaux du C.N.R.S. : quelque 400 volumes déjà parus constituent une collection prestigieuse. On citera en sciences exactes : Acides nucléiques et synthèse des protéines chez les végétaux. Les transitions métal non-métal, Origine et expression de la diversité des anticorps, Les méthodes mathématiques de la théorie quantique des champs; et en sciences humaines : Les relations franco-allemandes (1933-1939). Les arabes par leur archives (XVI-XXe siècles), Les aspects économiques de la croissance démographique, Pierre Abélard et Pierre le vénérable.
- des ouvrages de référence, indispensables instruments de travail. En sciences exactes : Molécules diatomiques, biographie, critique de données spectroscopiques, tables internationales de constantes et en sciences humaines, des bibliographies de la littérature française, des atlas linguistiques et ethnographiques, des inventaires répertoires et catalogues de manuscrits, etc.
- des outils de travail, sous forme de dictionnaires comme / Lexique étymologique de l'Irlandais ancien, Dictionnaire de Béarnais et du Gascon modernes, ou : Trésor de la langue française, la plus remarquable de ces entreprises, un dictionnaire de la langue du XIXe et du XXe siècles réalisé à l'aide de l'ordinateur par dépouillement de 90 millions de textes.
- des œuvres complètes, celles des plus éminents auteurs scientifiques ou philosophiques : Borel, Delsarte, Gevrey, Hadamard, Painlevé, Cotton, Langevin, Perrin, Piccard, Malebranche, Mersenne ou Descartes.
- des livres de prestige d'une présentation qui renforce la signification du texte : Cahiers de Paul Valéry, première et seule publication complète, ou : Œuvres de Copernic, en collaboration avec l'Académie des sciences de Varsovie. Plus récemment, dans les domaines historique : le Conseil d'Etat (1799-1974) ou littéraire : la correspondance de Zola (Tomes I et II) sans oublier : Karnak d'Egypte, domaine du divin, de J. Lauffray.
- des cartes géographiques, dont celles de la végétation au 1/200 000ème, réalisées par le Service de la carte de la végétation de Toulouse. Des atlas, notamment ceux des départements français d'outre-mer.

Documentation gratuite sur simple demande.
Editions du C.N.R.S. 15 quai Anatole France
75700 PARIS

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf

Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf



Fichier issu d'une page EMAN : http://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/265?context=pdf