

Le courrier du CNRS 76

Auteur(s) : CNRS

Les folios

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

124 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 76, 1990-07

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

Consulté le 24/12/2025 sur la plate-forme EMAN :

<https://eman-archives.org/ComiteHistoireCNRS/items/show/165>

Présentation

Date(s)1990-07

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

Description & Analyse

Nombre de pages51

Notice créée par [Valérie Burgos](#) Notice créée le 05/10/2023 Dernière modification le 12/12/2024

LE COURRIER DU CNRS

DOSSIERS SCIENTIFIQUES

LA TERRE

DE L'OBSERVATION

À LA COMPRÉHENSION

LA TERRE EN MOUVEMENT

LA TERRE EN ÉVOLUTION

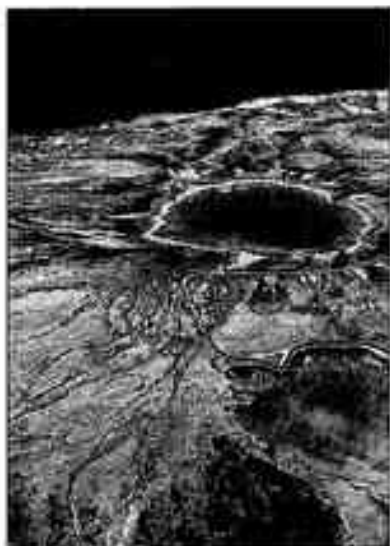
UNE PLANÈTE EN ÉVOLUTION

L'ENVIRONNEMENT GÉOLOGIQUE

LA TERRE EN LABORATOIRE

PLANÈTES ET MÉTÉORITES

N° 70 - 50 F - JUIN 1985



COUVERTURE

Yellowstone National Park, Wyoming, USA. L'activité volcanique de cette région se manifeste encore par des solfatares, des geysers et de nombreuses sources chaudes dont celle-ci - « Grand Prismatic » - qui jaillit à 67°C, alimentant un petit lac de 100 m de diamètre. La coloration des eaux plus froides du lac sur ses bords est due à des algues monocellulaires. (© Krafft/Explorer).

En 4 de couverture

Vue satellitaire de la faille de l'Altyn Tagh, bordant le plateau du Tibet au Nord-Ouest (1 cm représente 1,15 km sur le terrain). En rose, les zones humides. Ce document est le résultat de la combinaison d'une image SPOT panchromatique et d'une image LANDSAT-Thematic mapper, toutes deux réalisées en 1987. (Voir l'article de P. Tapponnier).

LE COURRIER DU CNRS

DOSSIERS SCIENTIFIQUES

Directeur de la publication :
Goëry Delacôte

RÉALISATION :

CNRS - Atelier de l'Écrit
Groupement des Unités de
la Communication du CNRS
1, place Aristide-Briand
92195 Meudon Cedex

Direction : Bernard Hagene

Rédacteur en chef : Sylvie Langlois

Rédaction : Pierrette Massonnet

Diffusion : Christine Girard

Secrétariat : Muriel Hourlier

COMITÉ SCIENTIFIQUE :

Coordinateur
Jacques Bourgois

Eric Buffetaut

Amy Cazenave

Bernard Dupré

Bertrand Fritz

Yves Guéguen

Philippe Huchon

Yves Lagabrielle

Xavier Le Pichon

Jean-Paul Montagner

Hervé Pertout

Michel Pichavant

Philippe Vidal

Edith Vincent

COMITÉ DE LECTURE :

Georges Chapouthier

Christiane Grappin

James Hiéblot

Ce numéro du *Courrier du CNRS* a été préparé sous la direction du département scientifique Terre Océan Atmosphère Espace et de l'Institut National des Sciences de l'Univers du CNRS.

Prix : 50 francs. **Diffusion :** Presses du CNRS, 20-22, rue Saint-Amand, 75015 Paris - Tél. : 45 33 16 00.

Vente au numéro : Librairie du CNRS, 295, rue Saint-Jacques, 75005 Paris - Tél. : 46 34 79 09

Le *Courrier du CNRS* remercie les auteurs et les organismes qui ont participé à ce dossier. Les titres, les chapeaux introductifs et les résumés ont été rédigés par la rédaction. Les textes peuvent être reproduits sous réserve de l'autorisation du directeur de la publication.

Coordination de la fabrication :

J.O. - Communication,
10, avenue Bourgain,
92130 Issy-les-Moulineaux
Direction artistique : Top Cemeil,
18, rue Volary,
75002 Paris - Tél. : 42 96 14 58.

Impression : Roto-France-Impression, boulevard de Beaubourg, Emerainville, 77200 Torcy
Tél. : 60 06 60 00.

Commission paritaire :
AD 303 ISSN: 0-153-985-X
ISBN: 2-222-04473-1.

© Centre National de la Recherche Scientifique

ÉDITORIAL

CNRS
Délégation : Siège
Service juridique
Dépôt des archives : Bâtiment 19
1, avenue de la Terrasse
91191 Evry-sur-Seine
Tél : 01 69 82 39 17

*Salle consultation
Archives CNRS
Candinet*



André Berroir
Directeur du département scientifique
Terre Océan Atmosphère Espace
et de l'Institut National des Sciences
de l'Univers du CNRS.

Ce dossier a été réalisé à l'initiative du Conseil de Département TOAE à la suite de l'enquête approfondie menée par les sections du Comité National auprès des laboratoires de la discipline pour l'analyse de la conjoncture ; la photographie de « l'état des lieux » établie à cette occasion montre très clairement que nos équipes prennent une part très significative dans l'évolution des idées et la progression des connaissances.

Cette analyse fait apparaître aussi l'apport essentiel dû à la mise en œuvre des techniques les plus avancées, dans des domaines aussi divers que l'analyse chimique des traces, le traitement du signal, la tomographie, le traitement d'images, la modélisation analogique et numérique, la génétique moléculaire...

La révolution apportée dans les idées par la théorie de la tectonique des pla-

ques, les inquiétudes sur les évolutions futures de la planète en raison des activités humaines, les besoins croissants de prévision et de contrôle des risques naturels ont attiré l'attention sur quelques aspects « phares » des Sciences de la Terre. Mais, sans doute, connaît-on moins les progrès extraordinaires réali-

sés depuis une trentaine d'années dans la connaissance approfondie de notre planète, de sa création, de son histoire et des processus qui conditionnent son évolution.

Les contributions rassemblées pour cet ouvrage ont l'ambition de brosser un panorama assez large de l'état de l'art sur le front des connaissances. Jacques Bourgois, directeur de recherche au CNRS et chargé de mission au département TOAE, a assuré la coordination nécessaire avec l'aide d'un comité de rédaction que je remercie pour son travail efficace.

SOMMAIRE

Avant-propos

Un regard global sur notre planète 6
A global view on our planet.
 Xavier Le Pichon
 Philippe Vidal

La Terre profonde

Introduction 9
 Anny Cazenave,
 Jean-Paul Montagner

Le champ magnétique terrestre 11
The Earth's magnetic field
 Jean-Louis Le Mouél

Le noyau vu par la sismologie 12
The Earth's core as seen by seismology
 Annie Souriau-Thévenard

La tomographie sismique, scanner de la Terre 13
Seismic tomography, scanner of the Earth
 Jean-Paul Montagner
 Barbara Romanowicz

Le géoïde terrestre 15
The terrestrial geoid
 Anny Cazenave

Modéliser la machine thermique Terre 16
Modelling the Earth heat engine
 Henri-Claude Nataf

La convection dans le manteau supérieur 18
Convection in the upper mantle
 Jacques Kornprobst

Sous les plaques, des « points chauds » 19
Hot spots under the plates
 Luc Fleitout
 Christophe Moriceau

Les hétérogénéités isotopiques du manteau 21
Isotopic heterogeneity of the mantle
 Claude Dupuy
 Philippe Vidal

L'écorce du globe

Introduction 22
 Yves Lagabrielle
 Philippe Huchon

Les forages océaniques profonds 24
Deep ocean drilling
 Yves Lancelot

L'hydrothermalisme à l'axe des dorsales océaniques 26
Hydrothermal activity along ocean ridges
 Thierry Juteau
 Yves Lagabrielle

Les ophiolites, clé des dorsales océaniques 27
Ophiolites: an insight on oceanic ridges
 Adolphe Nicolas

La rupture d'un continent 29
The break-up of a continent
 Gilbert Boillot

A travers les Pyrénées, le profil ECORS 30
The ECORS seismographic section of the Pyrenees
 Pierre Choukroune

Quand la lithosphère retourne au manteau 31
When the lithosphere returns to the mantle
 Jacques Bourgois
 Philippe Huchon

La croûte continentale profonde: nature et évolution 33
The deep continental crust: its nature and evolution
 Daniel Vielzeuf
 Christian Chopin

Les grands forages continentaux 34
Deep continental drilling
 Michel Cuney
 Claude Magnien

Comment la lithosphère continentale s'amincit 36
How the continental lithosphere becomes thinner
 Jean-Pierre Brun

La chimie des eaux interstitielles 37
The chemistry of interstitial waters
 Gérard Blanc
 Jacques Boulégué

Une planète en évolution

Introduction 39
 Hervé Perraud
 Eric Buffetaut

La tectonique des continents 41
Continental tectonics
 Paul Tapponnier

Les Alpes: une vision nouvelle 43
History and deep structure of the Alps: new data
 Marcel Lemoine
 Marc Tardy

La géodésie spatiale 45
Space geodesy
 Jean-Claude Ruegg

Les Andes centrales: surrection et déformation 46
The central Andes: uplifting and deformation
 Jacques-Louis Mercier

Les bassins sédimentaires 47
Sedimentary basins
 Michel Séguret
 Guy Vasseur

La formation des combustibles fossiles 48
Formation of fossil fuels
 Norbert Clauer

Les anciens océans 50
Ancient oceans
 Francis Albarède

Vertébrés fossiles et collisions continentales: l'exemple de l'Inde 51
Fossil vertebrates and continental collisions: India example
 Eric Buffetaut
 Jean-Claude Rage

Le visage de la Terre au Paléozoïque 52
The face of the Earth in the Paleozoic
 Hervé Perraud
 Michel Robardet

La reconstruction d'un océan disparu: la Téthys 54
The reconstruction of a vanished ocean: the Tethys
 Jean Dercourt
 Luc-Emmanuel Ricou

L'activité volcanique à l'origine de l'extinction des espèces? 56
The volcanic activity, the origin of species extinctions?
 Vincent Courtillot

L'évolution des grands réservoirs 58
géochimiques

Evolution of geochemical reservoirs

Bernard Dupré

Eric Lewin

La croûte continentale archéenne 59

The Archaean continental crust

Hervé Martin

Le manteau archéen 60

The Archaean mantle

Gérard Gruau

Les fossiles et l'horloge 61

moléculaire

Fossils and molecular clock

Jean-Jacques Jaeger

L'évolution des communautés 63

biologiques

Biological communities evolution

Serge Legendre

La diversification de la vie 64

Life diversification

Jean Chaline

L'environnement géologique

Introduction

Edith Vincent

Bertrand Fritz

Risques naturels : prévision et
prévention

*Natural hazards: prediction and
prevention*

Pierre-Yves Bard

Georges Poupinat

A la recherche de signaux 70

précurseurs

In search of forerunner signals

Denis Hatzfeld

La prévision de l'activité 71

volcanique

Forecasting volcanic activity

Jean-François Lénat

Les observatoires géophysiques 73

Geophysical observatories

Jacques Dubois

Les eaux souterraines 74

Groundwaters

Ghislain de Marsily

Les fleuves et le cycle géologique 75

externe

Rivers and the external geological

cycle

Michel Meybeck

Erosion continentale et 76

tectonique : l'échelle planétaire

*Continental erosion and tectonics:
the planetary scale*

Marc Souriau

Sur la trace des nitrates 78

On the track of nitrates

André Mariotti

Des continents aux océans, via 79

l'atmosphère

*From the continent to the ocean via
the atmosphere*

Alain Salot

Les latérites 80

Laterite soils

Daniel Nahon

La pédologie, ou l'interaction 81

entre le vivant et le minéral

*Pedology, or the interaction between
the living and mineral worlds*

Adrien Herbillon

Paléolacs et paléoclimats 82

Ancient lakes and past climates

Jean-Charles Fontes

Françoise Gasse

Archives glaciaires : climats du 83

passé et effet de serre

The historical record in glaciers: past

climates and the greenhouse effect

Claude Lorius

L'océan profond au cours de la 85

dernière glaciation

*Deep ocean circulation during the
last glaciation*

Jean-Claude Duplessy

La Terre au laboratoire

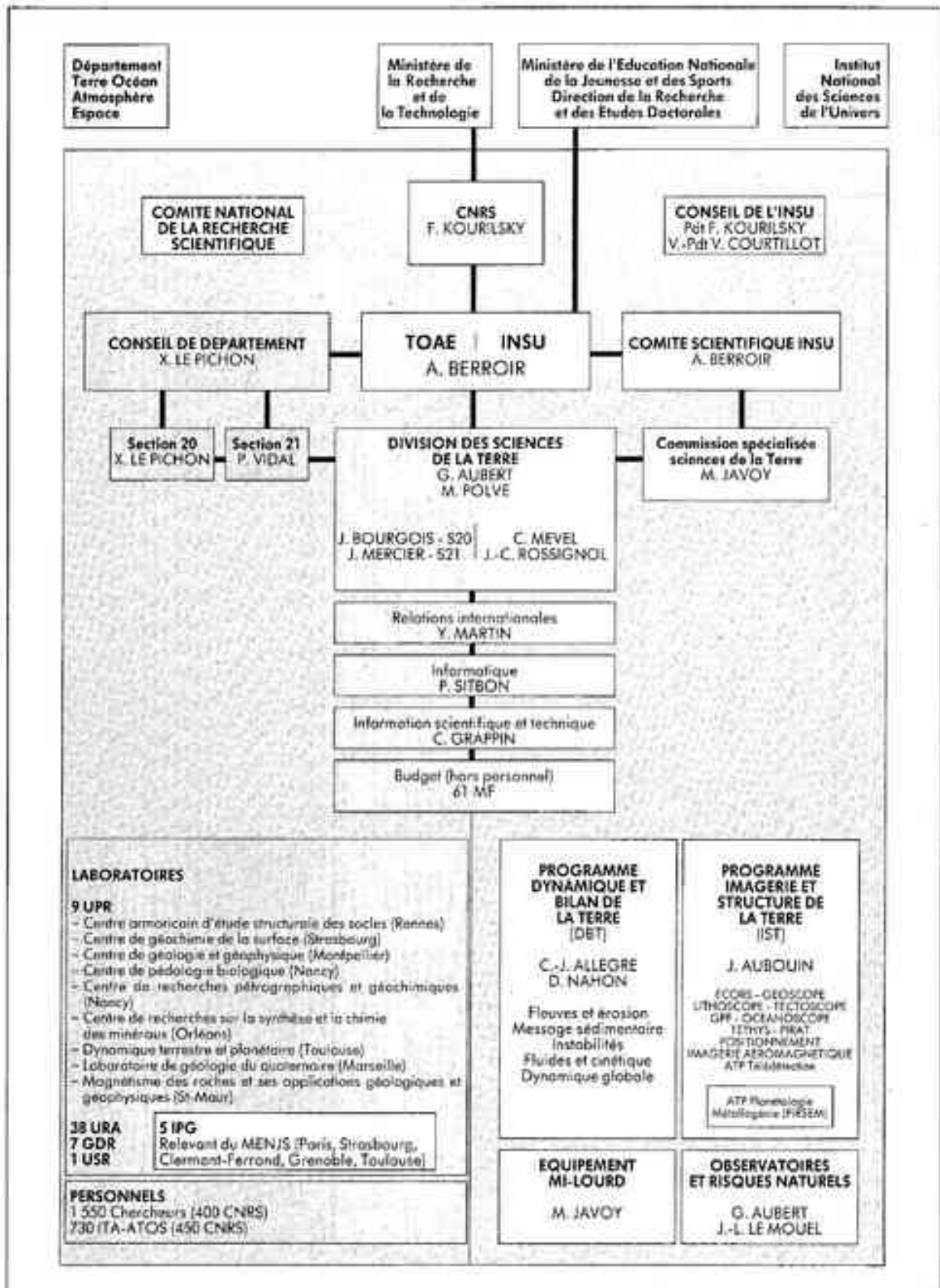
Introduction Michel Pichavant Yves Guéguen	87
Une fenêtre sur l'intérieur de la Terre <i>The diamond anvil cell: a window on the center of the Earth</i> Philippe Gillet Michel Madon	89
La diffusion atomique des éléments majeurs dans les minéraux <i>Atomic diffusion of major elements in minerals</i> Olivier Jaoul	90
Le rôle des microstructures dans les minéraux <i>The role of microstructures in minerals</i> Jean-Claude Doukhan William L. Brown	91
Un milieu poreux : les roches <i>Rocks: a porous medium</i> Yves Guéguen Michel Darot	92

La modélisation des déformations <i>Modelling of deformations</i> Peter Cobbold	93
Quantifier la déformation d'une roche <i>Quantifying rock deformation</i> Michel Champenois	95
La dynamique des chambres magmatiques <i>The dynamics of magma chambers</i> Claude Jaupart	95
Chronologie fine dans les magmas <i>Dating of magmas</i> Michel Condomines	96
La physique des magmas <i>The physics of magmas</i> Pascal Richet Yan Bottinga	98
De l'eau dans les magmas <i>Water in magmas</i> Michel Pichavant	99
Solutions et croissance hydrothermales <i>Hydrothermal solutions and crystallization</i> Jacques Roux Alain Baronnet	99
L'uranium, un traceur dans les magmas et les fluides aqueux <i>Uranium: a tracer in magmas and aqueous fluids</i> Georges Calas Jean Dubessy Chinh Nguyen-Trung Jean-Pierre Muller	101
A la surface des solides mal cristallisés <i>At the surface of poorly crystallized solids</i> Jean-Maurice Cases Alain Manceau Jean-Yves Bottero	102
Modéliser les transferts de masse <i>Modelling mass transfer</i> Jacques Schott	103
A la découverte des gisements cachés <i>In search of hidden deposits</i> Maurice Pagel François Ruhlmann	105

Planètes et météorites

Introduction Bernard Dupré	108
Les étoiles présolaires <i>Pre-solar stars</i> Jean-Louis Birox	110
L'exploration géologique des planètes <i>Geological exploration of the planets</i> Pierre Thomas	111
Les nouvelles micrométéorites polaires <i>Newly discovered polar micrometeorites</i> Michel Maurette Claus Hammer Michel Pourchet	114
Les prochaines missions planétaires <i>The next planetary missions</i> Philippe Masson Georges Balmino	115
Les molécules organiques interstellaires <i>Interstellar organic molecules</i> François Robert	118

LES SCIENCES DE LA TERRE AU CNRS : DEPARTEMENT TOAE ET INSU



Un regard global sur notre planète

Xavier Le Pichon,
Philippe Vidal

En cette fin de siècle, l'homme a pris conscience de la fragilité et de l'exiguïté de son environnement : la Terre. Il a découvert que cette Terre est un système complexe, allant de l'atmosphère au noyau, et qui évolue en régime transitoire avec des phénomènes dont la constante de temps va de la seconde au milliard d'années. Enfin, il vient de comprendre que sa présence même contribue à déplacer de manière significative les équilibres naturels. La connaissance de la Terre est donc plus que jamais un enjeu prioritaire.

Comme un être vivant, notre planète présente une extraordinaire complexité de structure et de fonctionnement. Après deux siècles de patientes observations et d'accumulation de données, qualitatives pour l'essentiel, le développement très rapide de la quantification en géologie, géophysique et géochimie, ainsi que le regard global porté sur la planète, ont conduit à une connaissance approfondie de la dynamique actuelle et passée de la Terre ; la révolution de la tectonique des plaques, à la fin des années soixante, en est l'illustration la plus spectaculaire. Après la phase de consolidation et d'assimilation des nouveaux concepts qui a suivi, on assiste maintenant à une nouvelle mise en perspective sous l'effet de deux facteurs principaux : les résultats de l'exploration spatiale et la mise en évidence des couplages entre les grands réservoirs terrestres, et à cet égard les incidences sur l'environnement ne sont pas le moindre stimulant.

Les Sciences de la Terre de notre pays ont joué un rôle considérable dans ce mouvement ; l'audit international réalisé au cours de l'année 1989 auprès d'une cinquantaine d'experts étrangers a d'ailleurs permis de révéler la qualité des

recherches menées dans les formations relevant du CNRS. Aussi, dans cette période charnière, a-t-il paru intéressant de présenter dans ces colonnes les avancées les plus récentes en Sciences de la Terre et d'y montrer le rôle souvent moteur joué par les équipes françaises.

Les différentes facettes de ces recherches sont présentées en six chapitres. Les deux premiers, « La Terre profonde » et « L'écorce du globe » explorent à l'aide des outils modernes la structure et l'état de notre planète, depuis le noyau jusqu'aux enveloppes les plus extérieures. « Une planète en évolution » concerne les mécanismes de production, de croissance et de comportement des masses continentales, ainsi que les nouveautés sur le plan de l'évolution du vivant. La taille du chapitre consacré à « L'environnement géologique » témoigne des compétences des spécialistes des Sciences de la Terre dans ce domaine ; si cela va de soi pour les risques naturels, l'expérience théorique et pratique acquise dans la chimie des eaux ou des sols est certainement moins connue. Le chapitre « La Terre au laboratoire » concerne l'étude des processus et de l'expérimentation ; comme toute science expérimentale, les Sciences de la Terre modernes avancent par des aller et retour incessants entre la formulation d'hypothèses et de modèles, et leur confrontation avec l'observation de terrain et l'expérimentation analogique et numérique en laboratoire. Enfin, les progrès récents en Planétologie, qui amènent à considérer notre Terre comme une planète parmi d'autres, clôturent ce numéro : les prodigieuses découvertes qui résultent de l'exploration spatiale interrogent en effet les spécialistes et engendrent l'élaboration de concepts nouveaux (qui aurait pu prévoir le gigantesque volcanisme d'Io ou le volcanisme de glace ?). Ces progrès

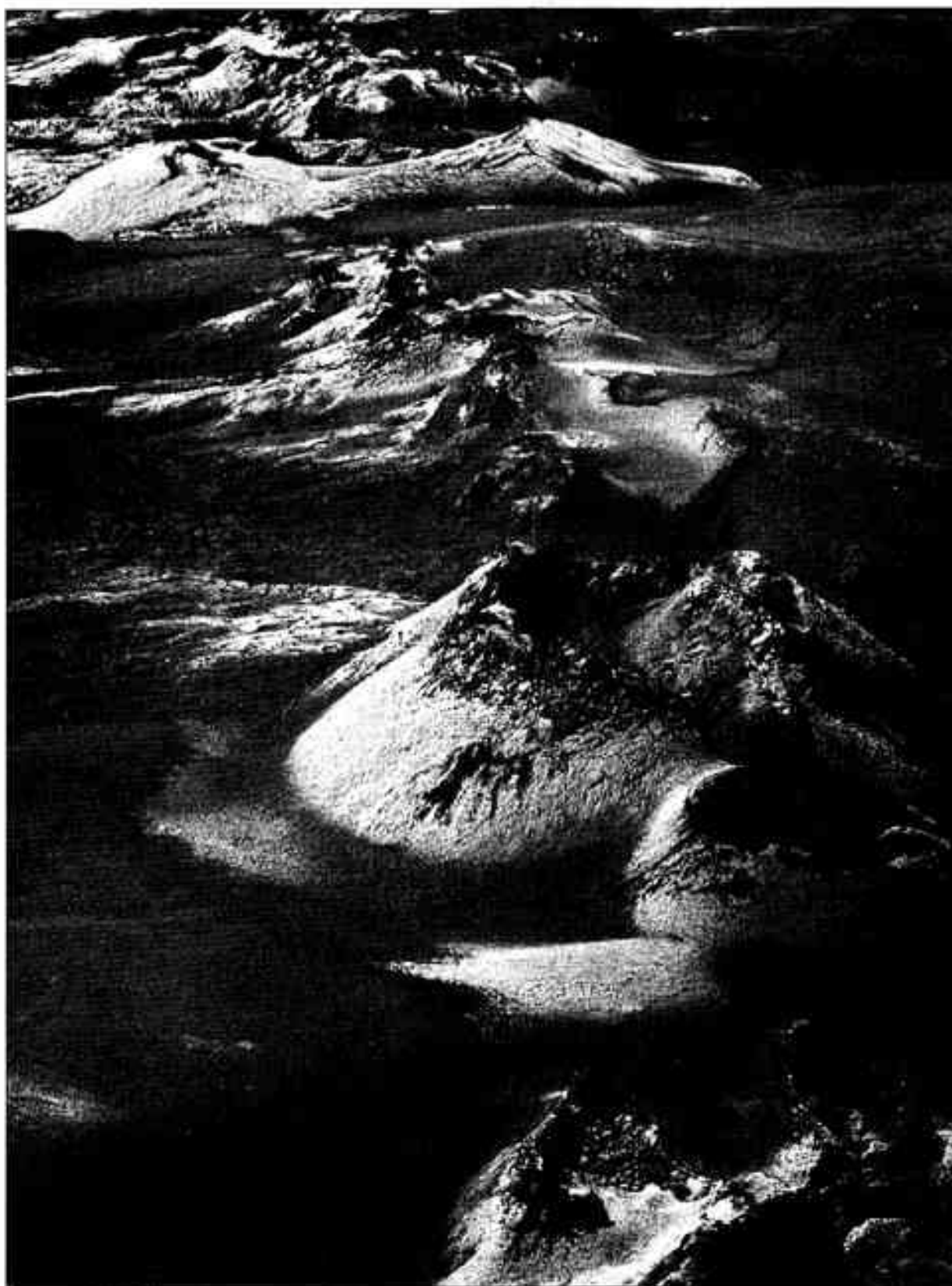
nous permettent surtout d'aborder de manière entièrement nouvelle l'origine du système solaire et de la Terre.

La prise de conscience de la globalité du système Terre est récente. Des couplages aussi étroits qu'inattendus sont reconnus entre les grands réservoirs terrestres : ainsi de soudains changements climatiques et donc faunistiques pourraient trouver leur cause, via des éruptions volcaniques cataclysmiques, dans des modifications des relations noyau-manteau. Ceci justifie pleinement qu'à l'heure où l'homme se préoccupe plus que jamais de l'avenir de sa planète et du rôle croissant qu'il joue sur son façonnage, l'étude de l'ensemble des processus qui gouvernent ses dynamiques interne et externe doit être intensifiée.

Enfin, il est temps que le vaste laboratoire naturel qu'est la Terre attire des chercheurs limités jusqu'ici à l'étude de systèmes simples. Ainsi par exemple, les spécialistes des instabilités devraient trouver dans notre planète un immense champ d'application à l'étude de processus qui jouent un rôle capital dans son fonctionnement et son évolution. Ceci n'est pas le sacrifice rituel au dieu de l'interdisciplinarité, mais la certitude que la maîtrise de la nef que l'homme est appelé à piloter nécessite plus que jamais le concours de l'ensemble des disciplines scientifiques.

Xavier Le Pichon, professeur au Collège de France, président de la section « Géologie de surface : continents et océans » du Comité national de la recherche scientifique.

Philippe Vidal, directeur de recherche au CNRS, président de la section « Terre : physique, chimie et dynamique interne » du Comité national de la recherche scientifique.



■ Chaîne de volcans de Lakagígir en Islande. (© Kraftt, Explorer).

DEUX BASES DE DONNEES A LA DISPOSITION DU PUBLIC

INTERGEO

Laboratoire de communication et de documentation en Géographie

Informatisée en 1976, la Bibliographie Géographique Internationale (BGI) compte actuellement 90 000 notices bibliographiques. Elle se caractérise par une information mondiale, clairement présentée, des analyses en deux langues, des références précises, plusieurs index et un prix d'abonnement abordable.

Oeuvre collective, placée sous le patronage de l'UGI, elle bénéficie d'un apport émanant d'un réseau de correspondants français et étrangers. Ouverte aux travaux pluridisciplinaires, la base comprend, outre l'état des recherches dans différentes branches de la géographie, de nombreuses références de disciplines dont les problématiques sont voisines ; elle veut être le témoignage des débats, évolutions, aspects multiples de ce qu'on reconnaît être la géographie, de ses objets, et de ses méthodes.

Alimentée par un laboratoire propre du CNRS au service de la géographie, la base de données est produite par l'INIST du CNRS avec l'ensemble des bases en sciences sociales et humaines, la banque FRANCIS (plus d'un million de références) ; celle-ci est implantée principalement sur le serveur TELESYSTEMES-QUESTEL.

Intergéo publie également des outils d'assistance à l'interrogation des bases.

PASCAL-GEODE

Un outil bibliographique d'information scientifique

Le géologue qui effectue des recherches bibliographiques peut facilement accéder à la Base de données PASCAL, multidisciplinaire et multilingue (français, anglais, espagnol) produite et développée par l'INIST.

Il peut consulter les références concernant les différents domaines des Sciences de la Terre en interrogeant la Base à l'aide du lexique spécifique à ces disciplines scientifiques et contenant environ 10 000 termes.

Il atteint ainsi le sous-ensemble thématique de PASCAL nommé PASCAL-GEODE comportant actuellement 850 000 références (accrues au rythme de 35 000 par an) provenant de l'indexation de 2 000 périodiques, de thèses françaises, de congrès et de rapports.

L'INIST coproduit PASCAL-GEODE depuis 1972 avec le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) et échange des références avec des bases d'autres pays (RFA, Espagne, USA, Italie, Tchécoslovaquie, Pologne, Roumanie, Hongrie). La base PASCAL est implantée sur trois serveurs : TELESYSTEMES-QUESTEL, ESA-IRS, et DIALOG. L'INIST édite également des outils d'aide à l'interrogation.

Depuis 1987, la base PASCAL a été transférée sur CD-ROM ; il existe un CD-ROM par an avec une mise à jour.

Où et comment interroger ces bases ?

- par l'intermédiaire d'un serveur qui fournit un mot de passe à chaque utilisateur (sur terminal, micro-ordinateur ou minitel) ;
- en accès direct sans abonnement ni formation, grâce à des menus guidés, par l'intermédiaire du kiosque professionnel 36.29.36.01 (sur Minitel).

L'accès est également possible par le réseau Télex.

On peut interroger le domaine Géographie ou Géode seul, ou conjointement avec les autres bases de FRANCIS et PASCAL.

On peut ensuite commander à l'INIST les photocopies des articles pertinents en ligne, par téléphone, télécopie ou courrier.

INTERGEO, 191, rue Saint-Jacques 75005 Paris - Tél. : (1) 46 33 74 31

Institut de l'Information Scientifique et Technique (INIST) - Service Formation et Assistance Technique de la Base PASCAL, 2, allée du Parc de Brabois - 54514 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex - Tél. : 83 50 46 05

LA TERRE PROFONDE

Depuis la formulation, il y a un peu plus de vingt ans, de la théorie de la tectonique des plaques, il est unanimement admis que le manteau terrestre est animé de mouvements de convection. Les déplacements à grande échelle des plaques lithosphériques à la surface terrestre sont les premiers témoins de la circulation convective interne. Les courants de convection provoquent des contrastes de température, donc de densité, probablement responsables des variations à grande échelle du champ de gravité de la Terre. Ces dernières années, la tomographie sismique a clairement établi l'existence de régions chaudes et froides dans le manteau, cor- ▶



Météorite : « Eagle Station » (Kentucky, USA), sa taille est de 7 cm environ. (Cliché MNHN, Service photo-cinéma).

Cette météorite appartient à la classe très rare des pallasites et permet de faire des hypothèses sur la structure profonde de la Terre à l'interface noyau-manteau. Elle proviendrait des régions centrales d'un astéroïde suffisamment gros pour avoir subi une fusion complète suivie d'une recristallisation : une phase métallique liquide (fer + nickel) a envahi une phase rocheuse constituée d'olivine.

LA TERRE PROFONDE

► répondant vraisemblablement aux courants convectifs ascendants et descendants. C'est enfin la convection qui crée le caractère hétérogène et la variabilité de composition des roches mantelliques tels que le révèle l'observation isotopique des basaltes provenant du manteau.

Cependant, de nombreuses questions restent posées sur la nature précise de cette circulation dans le manteau. Y a-t-il une convection de l'ensemble du manteau ou plusieurs étages de convection ? Quelle est la géométrie et l'extension des courants de matière ? La convection est-elle stable ou chaotique ? Quelle est l'origine des points chauds et leur relation avec la circulation convective ? Quels sont les rôles respectifs de la zone de transition entre manteau supérieur et manteau inférieur et de la mystérieuse couche D" située à la base du manteau inférieur ? Y a-t-il un couplage entre la circulation du manteau et celle du noyau ? etc.

La convection dans la Terre est un phénomène dynamique d'une grande complexité dans lequel les différents systèmes : lithosphère, manteau et noyau interagissent. Pour tenter de comprendre ces couplages et leur répercussion sur la circulation convective, les chercheurs disposent d'observations géophysiques et géochimiques tels les champs élastiques émis par les tremblements de terre, le champ de gravité, le champ magnétique, la topographie de surface, la composition chimique des roches issues du manteau, etc. En parallèle, ils développent des

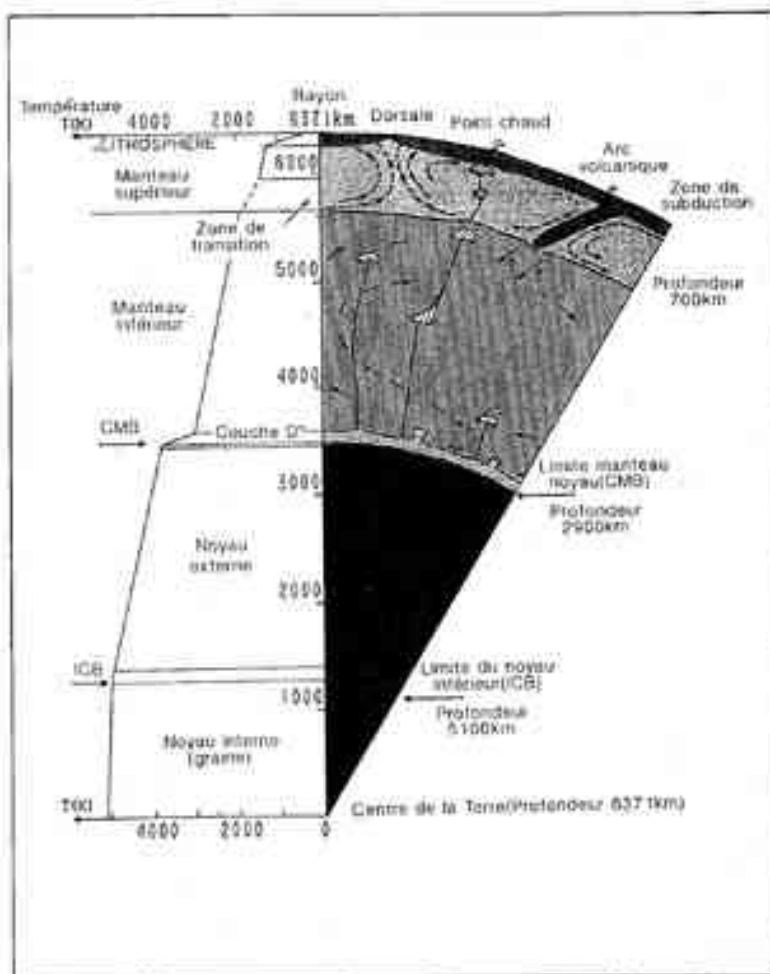
modèles mathématiques de convection et des expériences de laboratoire, rendant compte de manière simplifiée des conditions physiques et chimiques internes. Les progrès réalisés ces dernières années dans la compréhension des phénomènes dynamiques affectant le manteau et le noyau proviennent d'une part du caractère plus global des observations recueillies, d'autre part du début de prise en compte dans les modèles des interactions existant entre les grandes unités terrestres. Ce dernier aspect est essentiel et

ne peut se développer que dans un contexte interdisciplinaire.

La suite d'articles proposés montre les différentes approches développées pour étudier la dynamique terrestre interne où ressort ce besoin de pluridisciplinarité qui en fait sa spécificité et aussi sa richesse.

Anny Cazenave
Ingénieur au Centre national
d'études spatiales

Jean-Paul Montagnier
Professeur à l'Université Paris VII



Coupe schématique de la Terre montrant le déclenchement de panaches convectifs dans la couche de transition entre noyau et manteau. (Dessin V. Courtillot, voir article p. 58).

Le champ magnétique terrestre

Ce sont des courants électriques circulant dans le noyau qui engendrent la quasi-totalité du champ magnétique terrestre.

Jean-Louis Le Mouél

Le champ magnétique terrestre est, pour sa partie principale, engendré par des courants électriques circulant dans le noyau fluide métallique de notre planète. Mais le mécanisme de la "géodynamo", interaction entre les mouvements du fluide conducteur et le champ magnétique qui maintient courants électriques et champ magnétique contre la dissipation ohmique, souffre toujours d'une description incomplète.

Deux voies ont été empruntées, depuis plusieurs décennies, pour tenter d'améliorer cette description de l'organisation des mouvements dans le noyau. D'une part la théorie pure, œuvre de spécialistes de magnétohydrodynamique, d'autre part l'analyse, par l'observation, de l'évolution temporelle du champ géomagnétique, à des échelles de temps très variables : c'est l'œuvre des géomagnéticiens. Et il semble bien qu'aujourd'hui l'observation de la variation séculaire, c'est-à-dire de la variation du champ sur des durées de quelques dizaines d'années, permet de dégager quelques propriétés globales de ces mouvements. En effet, les observations donnent à penser que les mouvements du fluide à la surface du noyau ne sont pas, pour la plus grande partie, des mouvements turbulents de petite échelle, mais présentent au contraire une organisation planétaire qu'il est alors possible d'esquisser.

D'inattendues propriétés de symétrie

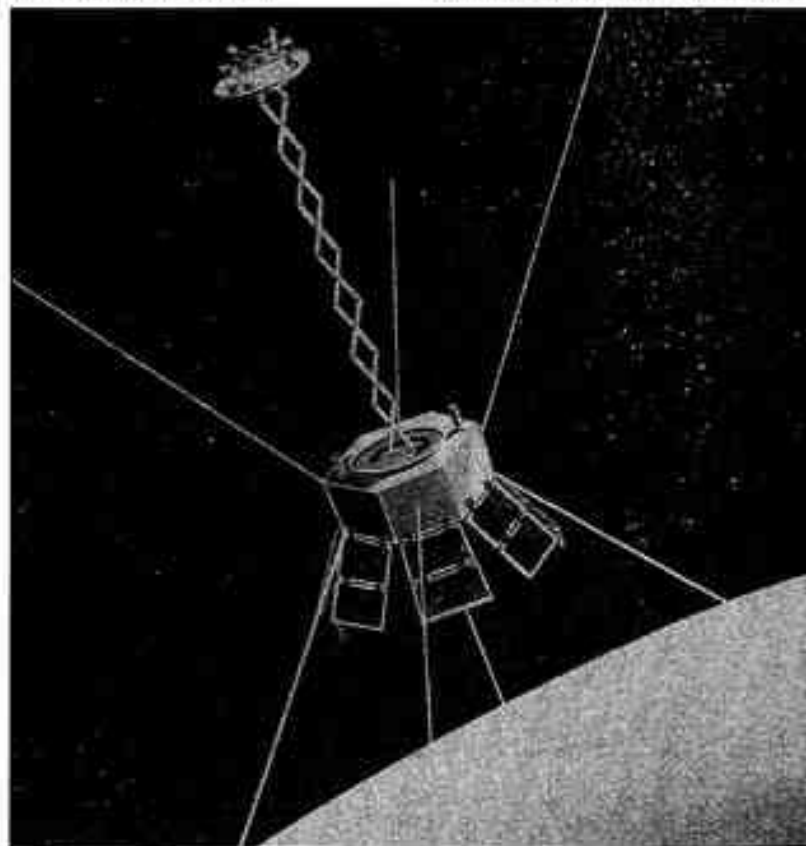
La connaissance, même supposée parfaite, du champ de variation sécu-

laire à la surface du globe ne suffit pas au calcul du mouvement du fluide à la surface du noyau. Il est en effet nécessaire de faire une hypothèse supplémentaire sur la nature du mouvement. La plus plausible consiste à supposer que celui-ci est tangentiellement géostrophique, c'est-à-dire qu'il y a équilibre entre les composantes horizontales de deux forces mises en jeu : la force de Coriolis et le gradient de pression. Une fois posée, cette hypothèse permet de calculer un mouvement qui, agissant sur le champ magnétique, crée le champ de variation séculaire observé. Le mouvement ainsi calculé présente, compte tenu de l'incertitude sur sa détermination, d'inattendues propriétés de symétrie : les vecteurs vitesse sont égaux en deux points antipodaux et aussi symétriques par rapport au plan de l'Equateur.

Le couplage noyau-manteau

Seuls peuvent être calculés les mouvements à la surface du noyau ; mais ils sont vraisemblablement l'expression de mouvements intéressant le corps même de celui-ci. Sans discuter la validité de ce type de prolongement, disons simplement que, contrairement à ce que l'on pensait jusqu'à présent, ces mouvements en profondeur pourraient bien présenter aussi une organisation simple et globale. Par ailleurs, les mêmes calculs permettent d'expliquer les mécanismes qui couplent noyau et manteau ; ces derniers permettent à leur tour d'interpréter certaines composantes des irrégularités de la vitesse de rotation de la Terre et du mouvement du pôle (c'est-à-dire du mouvement de la trace de l'axe de rotation sur la surface du globe).

En définitive, il est probable que dans les années à venir les efforts conjugués des théoriciens et des observateurs feront faire de rapides progrès à la compréhension de l'origine du champ magnétique terrestre. Mais pour cela des données plus nombreuses, plus homogènes, mieux distribuées à la surface de la planète sont nécessaires. Un projet de



Le satellite franco-américain MAGNOLIA/MFE : il doit recueillir des données nombreuses, homogènes et bien distribuées à la surface de la planète, qui permettront une meilleure compréhension de l'origine du champ magnétique terrestre. (Cliché CNES/NASA).

The Earth's magnetic field - The "geodynamo" mechanism of the Earth's magnetic field is still incompletely described. However, secular change of the magnetic field indicates that movements of metallic fluid on the surface of the core (responsible for the field) are organized on a global scale, and have unexpected properties of symmetry. Movements within the body of the core could also be organized on a simple and global scale.

Le satellite franco-américain, MAGNOLIA/MFE (voir figure), est à l'étude au Centre national d'études spatiales français et à la NASA. Un important programme international d'observatoires magnétiques au sol, automatiques et re-

liés par satellite à des centres de traitement de données, est aussi lancé, dans lequel la France est appelée à jouer un premier rôle grâce au soutien de l'Institut national des sciences de l'univers du CNRS.

Jean-Louis Le Mouél, physicien à l'Institut de physique du globe de Paris, directeur du Laboratoire de géomagnétisme et paléomagnétisme (URA 729 CNRS), Université Paris VI, IPG, Tour 24-25, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

Le noyau vu par la sismologie

La surface du noyau liquide présente de larges ondulations de quelques kilomètres d'amplitude, révélées par les anomalies de temps de propagation des ondes sismiques. Le noyau interne solide semble présenter une structure anisotrope.

Annie Souriau-Thévenard

Les études sismologiques du noyau ont bénéficié, pendant la dernière décennie, de deux facteurs importants. Le premier est la disponibilité d'un grand nombre d'informations sur les temps d'arrivée des ondes sismiques, collectées par les observatoires mon-

diaux. Le deuxième est le développement des réseaux sismologiques à très basses fréquences, qui permettent d'observer les vibrations propres de la Terre, c'est-à-dire ses résonances à la suite d'un gros séisme. Ces deux types de données — temps de propagation des ondes et périodes des vibrations propres — ont permis de modifier l'image première d'un noyau liquide sphérique, avec en son centre un noyau interne ou

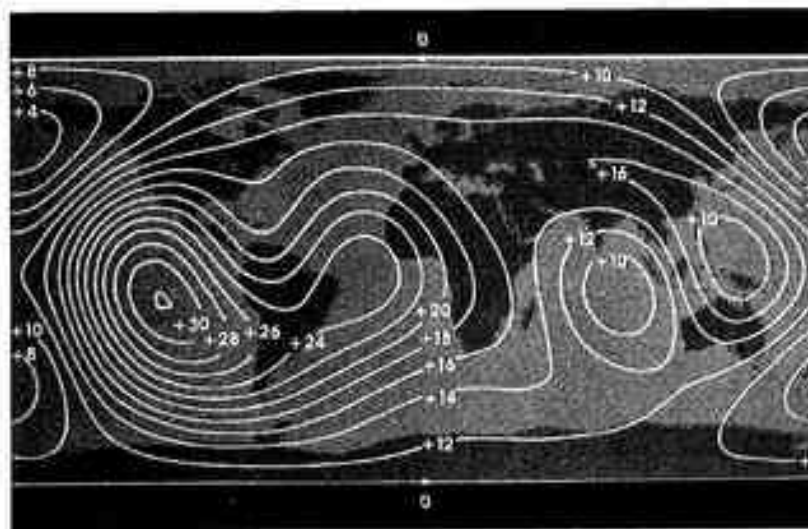
graine, solide et également à symétrie sphérique.

Une discontinuité brutale

La frontière entre noyau et manteau est, du point de vue sismologique, la discontinuité la plus brutale de la Terre. L'étude des ondes qui sont soit réfléchies, soit transmises par cette discontinuité, a révélé que la surface du noyau présente de larges ondulations, de longueurs d'ondes 2 500 à 5 000 km et d'amplitudes atteignant 5 km. Cette topographie, qui résulte vraisemblablement des poussées dues aux courants de convection dans le manteau inférieur, impose un couplage mécanique entre le manteau et la partie extérieure du noyau liquide : les irrégularités de la rotation de la Terre et les mouvements à l'intérieur du noyau liquide interagissent entre eux.

Les structures de part et d'autre de la discontinuité noyau-manteau sont mal connues. Du côté extérieur de la discontinuité, à la base du manteau inférieur, se trouve une couche d'environ 200 km d'épaisseur, fortement hétérogène et probablement d'épaisseur variable, appelée D". De nombreux chercheurs pensent qu'elle est chimiquement différente du reste du manteau : elle recueillerait certains résidus de la désintégration des plaques plongeant au niveau des zones de subduction, et peut-être aussi du fer en provenance du noyau liquide.

Le noyau liquide apparaît pour les on-



Les temps de parcours des ondes sismiques ayant traversé la graine sont comparés aux temps théoriques pour un modèle de Terre sphérique. La différence entre les deux donne, après correction des perturbations dues aux hétérogénéités du manteau, des renseignements sur la forme et la structure interne de la graine. Ce schéma montre une variation avec la latitude de ces temps différentiels (exprimés ici en dixièmes de secondes), suggérant la présence d'anisotropie dans la graine. (D'après Poupinet, Pilet et Souriau, 1983).

The Earth's core as seen by seismology. - Anomalies in the propagation times of seismic waves have shown that the surface of the liquid core has large undulations with an amplitude of several kilometres, with at the base of the mantle a very heterogeneous layer known as the D'' layer. In the centre of the liquid core is an internal solid core which is approximately spherical but seems to show a strong anisotropy, symmetric about the Earth's axis.

des sismiques comme un milieu très transparent : les ondes s'y propagent sur de longues distances sans être atténuées ni déviées, si ce n'est lorsqu'elle rencontrent la discontinuité noyau-manteau. Le noyau liquide se présente donc comme un milieu très homogène, cette homogénéité résultant sans doute d'un brassage vigoureux par des courants de convection.

Le noyau interne : une structure surprenante

La graine a apporté les résultats les plus surprenants de cette dernière décennie. L'analyse des temps de propagation des ondes a révélé que les ondes ayant traversé la graine suivant un axe nord-sud sont en avance par rapport à celles qui la traversent dans le plan équatorial. Ceci implique soit que la graine est allongée suivant l'axe des pôles, soit qu'elle est anisotrope, avec des vitesses de propagation plus élevées suivant l'axe des pôles. L'étude d'ondes réfléchies à la surface de la graine à différentes latitudes a permis de rejeter la première hypothèse. Par ailleurs, certaines particularités des vibrations propres de la Terre favorisent l'hypothèse de l'anisotropie. Celle-ci pourrait être liée à l'existence de courants de convection axisymétriques dans la graine, qui orienteraient les cristaux de fer.

La sismologie apporte aussi des informations permettant de préciser la nature chimique de la graine. On sait que le noyau liquide est constitué principalement de fer fondu, avec une faible proportion d'éléments légers : oxygène, soufre ou silicium. Par contre, la nature chimique de la graine est mal connue, le problème étant de savoir si les éléments légers cristallisent avec le fer. On a pu montrer que l'amplitude des ondes réfléchies à la surface de la graine permet de connaître le contraste de densité entre noyau liquide et noyau solide. Ce contraste, interprété à l'aide des résultats de la physique des alliages à hautes pressions, a permis de conclure que la graine est presque du fer pur.

La tomographie sismique, scanner de la Terre

La tomographie des zones anormales de l'intérieur de la Terre : une cartographie de plus en plus précise des cellules de convection et des mouvements en leur sein.

Jean-Paul Montagner,
Barbara Romanowicz

La tectonique des plaques n'est que la manifestation de surface de phénomènes de convection plus profonds qu'aucun modèle physique n'est encore capable d'expliquer complètement. La façon la plus efficace de les étudier consiste à visualiser les zones anormales qui sont les écarts à une Terre de référence à symétrie sphérique, en pelures d'oignon. Pour traquer ces anomalies, le géophysicien dispose de plusieurs champs physiques mesurables, parmi lesquels les champs associés aux ondes sismiques émises par les tremblements de terre sont les plus riches mais aussi les plus complexes. Parmi les nombreux types d'ondes se propageant dans la Terre, les ondes de surface, dont la sensibilité en profondeur dépend de la période, sont bien adaptées à l'étude du manteau supérieur. Elles permettent d'échantillonner des régions dépourvues de stations sismiques et de tremblements de terre. Au contraire, les ondes de volume sensibles à des profondeurs plus grandes sont utilisées pour les études du manteau inférieur et du noyau.

Quand une onde sismique traverse une zone anormale, sa vitesse de propagation change. Si cette zone est chaude, la vitesse a tendance à diminuer, et inversement si elle est froide. On va donc

observer des temps courts ou longs selon la nature du milieu traversé. Avec un très grand nombre de trajets, on peut obtenir une localisation des anomalies d'autant plus précise que la densité de trajets est grande. Ce genre de technique est communément appelé tomographie. L'augmentation de la puissance des ordinateurs et l'amélioration des stations sismiques ont permis l'obtention d'images tridimensionnelles. On signalera l'effort accompli en France sous les auspices de l'INSU pour développer un réseau mondial de qualité, GEO-SCOPE.

Une Terre anisotrope et anélastique

La vitesse des ondes S à 100 km de profondeur (Fig. 1) est en parfait accord avec une prédiction basée sur la tectonique de surface. Les dorsales médio-océaniques (là où les plaques océaniques se séparent) présentent des vitesses lentes (matériau chaud) et les zones de subduction (plongement des plaques océaniques) des vitesses rapides (matériau froid). On peut également voir un accroissement progressif de la vitesse avec l'âge des fonds océaniques correspondant au refroidissement progressif de la plaque. Les boucliers continentaux dont l'âge se compte en milliards d'années ont également des vitesses élevées. Cette corrélation entre structure superficielle et vitesses sismiques reste bonne jusqu'à 300 km de profondeur. A plus grande profondeur, domine un comportement plus simple avec deux zones de flux de matière montant, et deux zones de flux descendant.

Ces images nous renseignent sur la forme des cellules de convection et sur l'aspect chaotique de celles-ci, mais pour obtenir le sens d'écoulement de la matière, on a dû mettre au point une technique qui tient compte des propriétés d'anisotropie des matériaux terrestres. Dans une cellule de convection, les axes cristallographiques s'orientent par rapport à la déformation dans des directions préférentielles. L'anisotropie per-

Seismic tomography, scanner of the Earth - Different tomographic techniques have been designed by seismologists to investigate the deep structure of the Earth. They stem from the interpretation of the delay time or amplitude anomalies of seismic waves travelling inside the Earth. They make it possible to map, at the same time, the temperature anomalies and the flow directions associated with the convection process in the Earth mantle.

Annie Souriau-Thévenard, directeur de recherche au CNRS, Unité « dynamique terrestre et planétaire » (UPR 234 CNRS), Centre national d'études spatiales, Groupe de recherches de géodésie spatiale, 18, avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse Cedex.

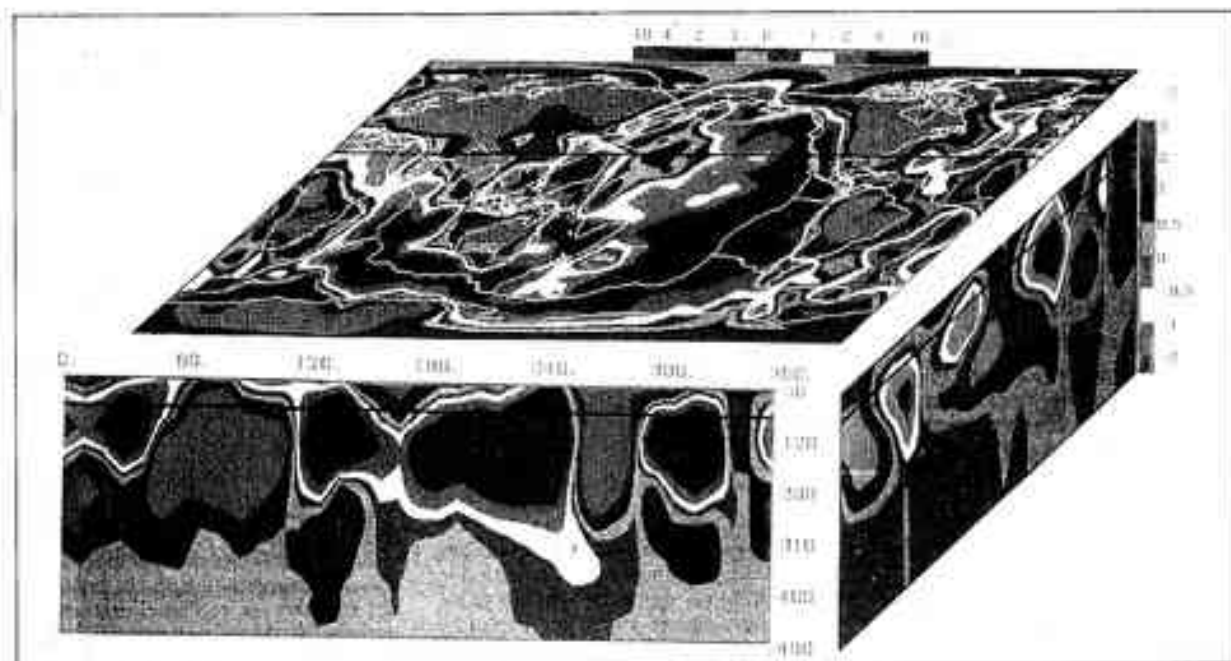


Fig. 1. Tomographie des ondes S : seules sont dessinées les anomalies par rapport à un modèle moyen de Terre. Les anomalies allant du vert au rouge correspondent à des vitesses lentes, donc généralement à des températures élevées. Inversement, les anomalies bleu-vert sont associées à des matériaux froids. Trois coupes sont représentées (attention aux échelles différentes sur la coupe horizontale et les coupes verticales) : carte horizontale à 100 km de profondeur, coupe est-ouest à 30 degrés de latitude nord, coupe nord-sud à 0 degré de longitude. On notera le changement de comportement en dessous de 300 km de profondeur.

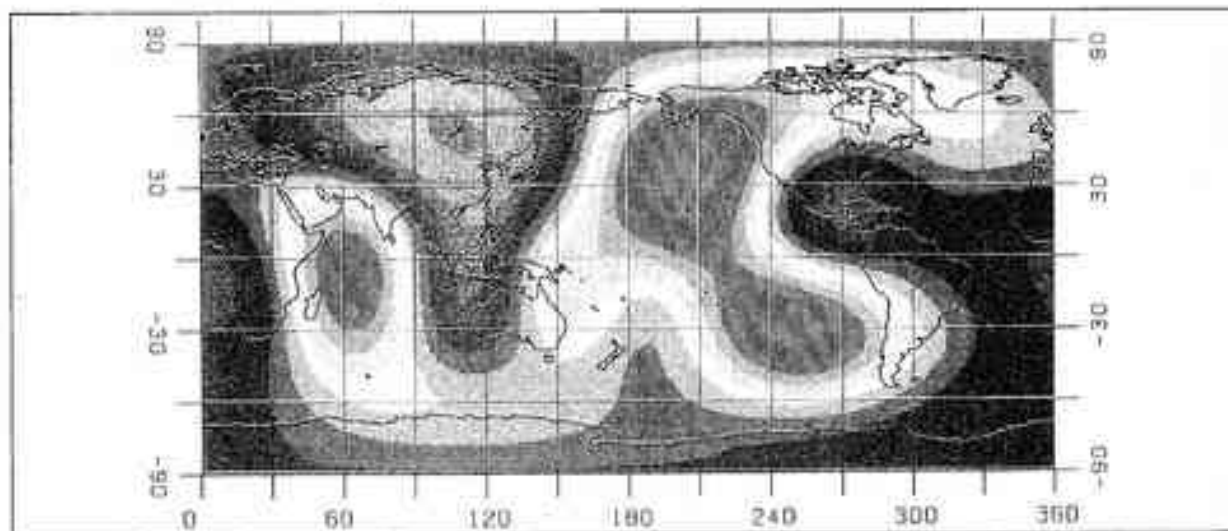


Fig. 2. Atténuation des ondes du manteau à 200 s de période (300-500 km de profondeur). Les zones d'atténuation forte sont en rouge, celles d'atténuation faible en bleu et vert. On remarque une correspondance à grande échelle entre les zones d'atténuation forte et celles de vitesses lentes de la figure 1. Les variations maximales d'atténuation sont de l'ordre de $\pm 50\%$.

met donc de cartographier les courants de convection. Enfin, le dernier progrès en cours concerne la détermination de la distribution tridimensionnelle de l'atténuation. La figure 2 montre le premier modèle d'atténuation à 200 s de période soit entre 300 et 500 km de profondeur. Il apporte des informations complémen-

taires sur les anomalies thermiques, la fusion partielle et la viscosité.

Les ingrédients théoriques et expérimentaux, qui ont permis de développer toute une panoplie de tomographies, sont désormais en place pour apporter une réponse définitive aux problèmes de convection dans le manteau.

Jean-Paul Montagner, professeur à l'Université Paris VII, Laboratoire de sismologie (URA 195 CNRS).

Barbara Romanowicz, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de sismologie (URA 195 CNRS), Institut de physique du globe, Tour 14-24, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

Le géoïde terrestre

Contrairement à une idée très répandue, la surface des mers n'est pas plane. Elle présente des creux et des bosses traduisant les variations géographiques du champ de gravité de la Terre.

■ Anny Cazenave

Les variations géographiques de la gravité de la surface de la Terre reflètent la distribution hétérogène de la matière dans les différentes couches de l'intérieur du globe (croûte, manteau, noyau). Ces variations de gravité sont visualisées par les ondulations du géoïde, l'équipotentielle du champ de gravité qui coïncide avec le niveau moyen des mers. Le géoïde est donc la forme qu'aurait la Terre si elle était complètement recouverte d'océans. Comme la plupart des objets suffisamment massifs de l'univers, la Terre est presque sphérique. Toutefois des écarts notables à la sphéricité existent. Ceux-ci

résultent des nombreux phénomènes dynamiques affectant la planète. Le phénomène majeur est la rotation diurne qui produit une déformation permanente de la Terre : le rayon équatorial est supérieur de 21 km au rayon polaire. C'est à cause de cet aplatissement des pôles que le globe terrestre a, en première approximation, la forme d'un sphéroïde. Il est habituel de repérer les ondulations du géoïde par rapport à ce sphéroïde. Ces ondulations présentent des dénivellées qui à grande échelle spatiale peuvent atteindre jusqu'à 200 m.

Les ondulations du géoïde

Les plus importantes résultent de l'ellipticité équatoriale du globe terrestre produisant deux grands bombements

diamétralement opposés, l'un sur le Pacifique de l'Ouest, l'autre sur l'Atlantique. Ces bombements résultent de la répartition interne de matière causée par les phénomènes dynamiques profonds qui affectent le manteau terrestre, c'est-à-dire la convection thermique. Des ondulations de longueurs d'ondes plus courtes se superposent à ceux-ci, créant un spectre quasi continu d'énergie gravitationnelle. Il en résulte une figure complexe du géoïde terrestre (Fig. 1). Aux courtes échelles spatiales, les ondulations du géoïde proviennent essentiellement de la répartition hétérogène de la matière dans les couches superficielles de la Terre, en particulier dans les plaques lithosphériques (Fig. 2). Ainsi, le géoïde permet de « cartographier » les grandes unités lithosphériques de la tectonique des plaques : dorsales, zones de subduction, zones de fracture, chaînes de montagnes et chaînes volcaniques sous-marines, etc., grâce à la signature gravitationnelle que ces structures produisent. Cette signature gravitationnelle résulte en réalité de deux effets qui s'opposent mutuellement : d'une part l'excès ou le déficit de masse causé par le relief topographique, d'autre part l'anomalie de masse interne résultant de la réponse physique (mécanique ou thermique) de la partie du manteau terrestre qui supporte le relief. Ce phénomène est connu sous le nom de compensation isostatique. Il reflète l'état des contraintes mécaniques dans le manteau. Les anomalies du géoïde observées en surface apportent donc des informations précieuses sur les paramètres décrivant le comportement mécanique du manteau, en particulier sur sa viscosité. Ces paramètres dépendent en partie de la structure thermique du manteau, qui elle-même gouverne la dynamique interne de la Terre.

L'outil spatial

Pendant près de deux siècles, le champ de gravité terrestre a été mesuré à l'aide de gravimètres déposés sur le sol ou embarqués sur des navires. Cepen-

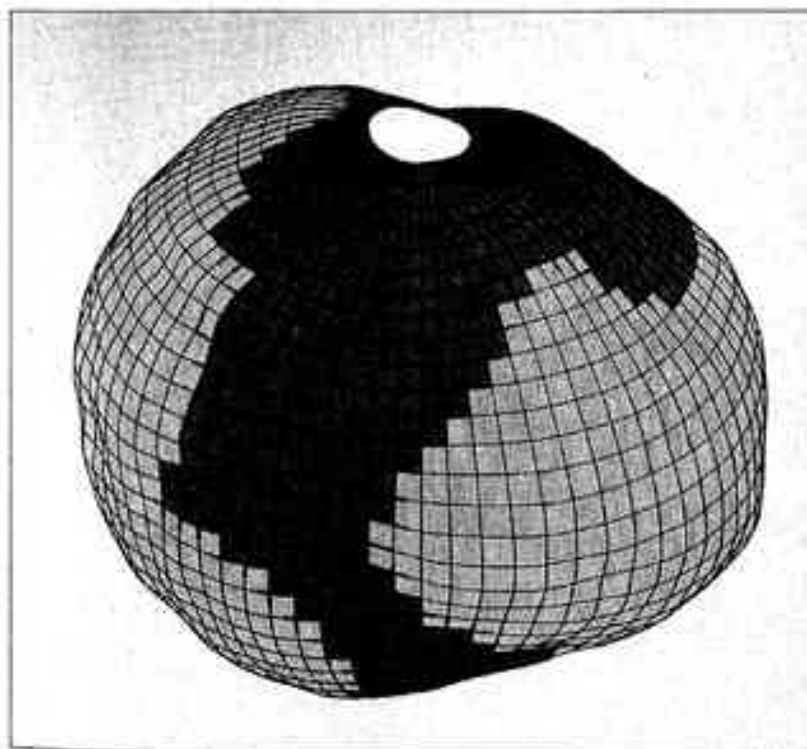


Fig. 1. La forme de la Terre : ondulations à grande échelle spatiale du géoïde terrestre, surface équipotentielle du champ de gravité qui coïncide, au-dessus des océans, avec le niveau moyen des mers. L'amplitude des ondulations est exagérée d'un facteur 10^4 par rapport au rayon de la Terre.

The terrestrial geoid - Undulations in the geoid, equipotential surface of the Earth gravity field, are the result of the heterogeneous distribution of matter in the Earth. At a large scale (>1000 km), they mainly reflect convection phenomena in the mantle. On a smaller scale (<1000 km) the geoid is dominated by the gravitational effect of the lithosphere elements making up tectonic plates, and provides a faithful image of the seabed.

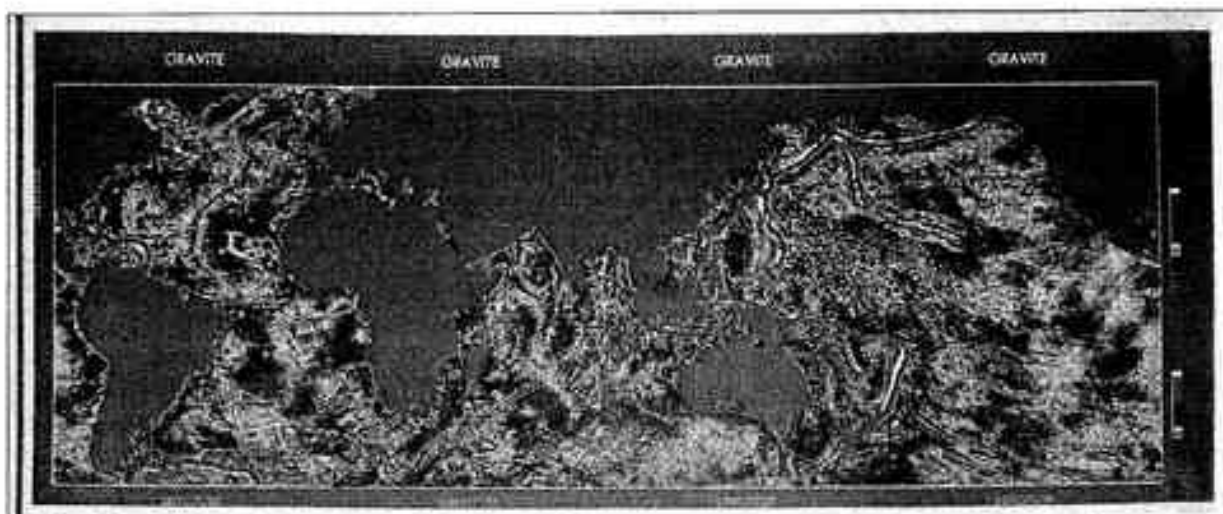


Fig. 2. Les variations à courtes échelles spatiales du champ de gravité terrestre : carte représentant les anomalies de gravité à courtes longueurs d'onde, déduites de la mesure des ondulations de la surface de la mer par les satellites altimétriques. Cette carte, véritable image des fonds sous-marins, représente la signature gravitationnelle des grandes unités lithosphériques de la tectonique des plaques : dorsales, chaînes volcaniques sous-marines, zones de fracture et zones de subduction, etc.

■ dant, la couverture de ces mesures est restée très inhomogène à cause des vastes étendues inaccessibles (déserts, montagnes, océans de l'hémisphère sud) ou pour des raisons de classification. Ce sont les satellites artificiels qui ont offert la première vision globale du champ de gravité terrestre. Depuis trois décennies, les variations à grande échelle du champ de gravité sont déterminées à partir de la mesure des pertur-

bations créées par ce champ sur les trajectoires des satellites. Depuis une dizaine d'années, une nouvelle technique a été développée : c'est l'altimétrie spatiale qui permet, au moyen d'un radar embarqué sur le satellite, de cartographier directement les ondulations à courtes longueurs d'onde de la surface de la mer, donc du géoïde. Cette technique cependant ne donne pas accès au champ de gravité sur les continents.

Bien qu'historiquement les variations de la gravité aient été mesurées d'abord sur les continents, c'est là qu'à présent elles demeurent le plus mal connues.

■ Anny Cazenave, ingénieur au Centre national d'études spatiales, Unité « dynamique terrestre et planétaire » (UPR 234 CNRS), 18, avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse Cedex.

Modéliser la machine thermique Terre

La modélisation numérique prend peu à peu le relais de l'expérimentation dans l'étude de la convection dans le manteau.

■ Henri-Claude Nataf

Qu'est-ce qui pousse les plaques, dont les dimensions dépassent parfois 10 000 km, à se déplacer à des vitesses de plusieurs centimètres par an à la surface de la Terre ? Il est maintenant bien établi que ces mouvements, qui façonnent le visage de notre planète, sont une des mani-

festations de la convection du manteau terrestre. Pour évacuer la chaleur produite en son sein par les éléments radioactifs (U, Th, K), la Terre s'organise en cellules convectives, constituées de courants ascendants chauds et descendants froids, qui transportent la chaleur avec une efficacité 10 à 30 fois plus grande que la conduction thermique seule. Dans ce manteau, dont la viscosité est plus d'un million de fois celle de la glace,

les mouvements sont très lents mais suffisent à évacuer quelque 40 TW ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$). Les plaques apparaissent alors comme la couche limite thermique supérieure du manteau en convection : le matériau chaud monte jusqu'à la surface aux dorsales océaniques, s'en éloigne et se refroidit lentement, formant une plaque qui s'épaissit avec l'âge. Après un voyage de quelque 100 millions d'années, il redescend dans le manteau aux zones de subduction.

La complémentarité des approches

Bien que proposée dès les années 1930, l'hypothèse de la convection du manteau terrestre ne s'est imposée que dans les années 1960 en apportant un cadre dynamique à la « tectonique des plaques » alors en plein essor. Les modèles convectifs du manteau permettent

de rendre compte de phénomènes aussi variés que l'approfondissement des fonds marins avec l'âge de la plaque, la distribution du flux de chaleur, les anomalies du géoïde, l'homogénéité isotopique des basaltes océaniques, etc. Et pourtant d'énormes points d'interrogation demeurent. Quelle est la géométrie de la convection à l'intérieur du manteau ? Y a-t-il deux couches superposées convectant séparément comme le proposent certains géochimistes, ou bien les plaques plongent-elles jusqu'au noyau comme le pensent certains sismologues ? Quelles relations existent entre les « points chauds » et la circulation convective ? On devine à travers ces questions que l'étude de la convection terrestre est une discipline avant tout à l'écoute des autres branches des Sciences de la Terre : géologie, géochimie, géophysique. Elle a néanmoins ses propres techniques, numériques, théoriques et expérimentales.

L'importance de la rhéologie

Prenons l'exemple de la rhéologie : la viscosité des silicates qui constituent le manteau terrestre dépend fortement de la température, de la pression... Il était donc important de connaître les conséquences de ces variations, qui sont souvent de plusieurs ordres de grandeur, sur l'organisation de la convection. L'influence de la variation de viscosité avec la température se prête bien à la modélisation expérimentale. On voit ci-contre (Fig. 1) le champ de gradient de température observé en laboratoire dans un liquide en convection lorsque la viscosité en haut (froid) est environ 1 000 fois plus grande qu'en bas (chaud). La structure obtenue est très différente de celle observée dans un liquide dont la viscosité est constante. On note la formation d'une sorte de couvercle épais et très visqueux en haut, analogue de la lithosphère qui forme les plaques. La variation de viscosité avec la température affecte aussi grandement l'évolution du système convectif. Elle joue le rôle de régulateur de température, ce qui explique que la température du manteau terrestre n'ait décliné que de 200 à 300°C en 4 milliards d'années, alors que la production thermique radiogénique chutait d'un facteur quatre. ▶

Modelling the Earth heat engine - Thermal convection is responsible for the slow movement of tectonic plates over the surface of the Earth. Numerical and experimental studies have demonstrated the primordial role of rheology. Numerous question marks however remain, particularly on the stratification of convection and on the role of chemical heterogeneities.

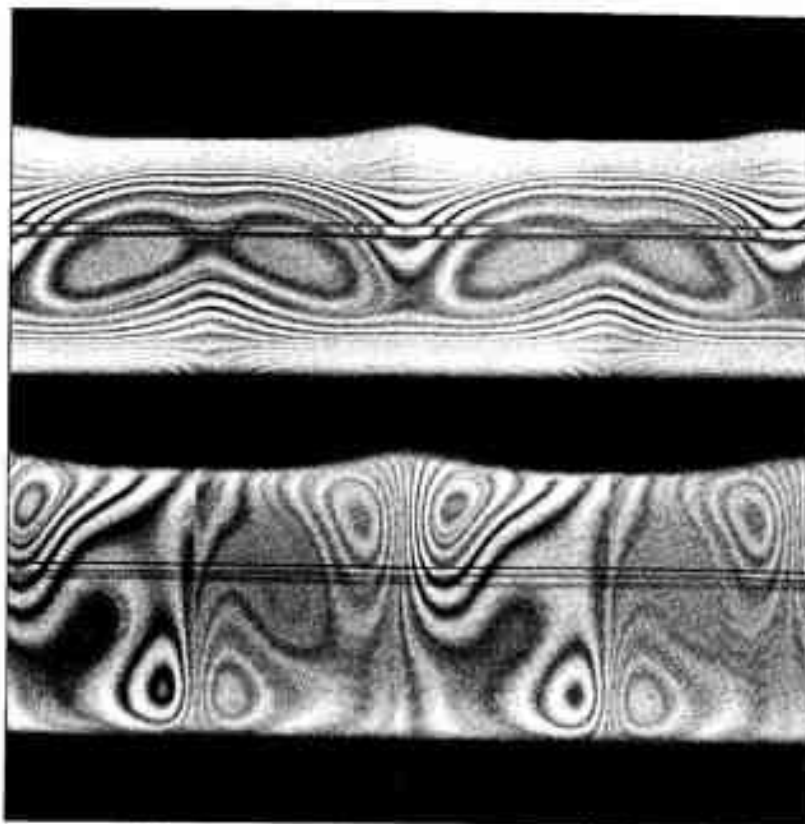


Fig. 1. Image de la convection dans un liquide dont la viscosité diminue très fortement avec la température. Le rapport de viscosité atteint 1 000 entre le haut (porté à -16°C) et le bas (66°C). Les lignes d'égal gradient de température sont visualisées dans un plan vertical grâce à une technique interférométrique (gradient vertical en haut, horizontal en bas). Expérience réalisée par Franck Richter (Chicago) et l'auteur.

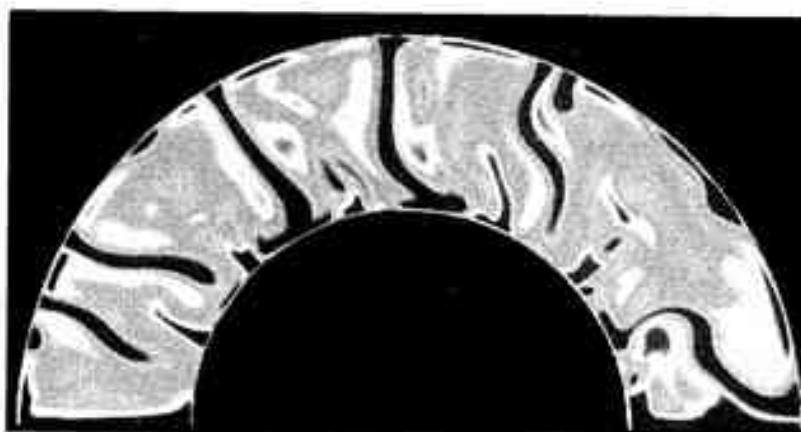


Fig. 2. Hétérogénéités latérales de température dans une coque sphérique. Les variations de température ont été traduites en variations de vitesses sismiques, afin de les comparer aux images tomographiques du manteau. L'inclusion de la compressibilité et du chauffage interne permet d'obtenir des amplitudes de variation de + ou -5 %, en bon accord avec les observations. Calcul effectué par Philippe Machetel (GRGS, Toulouse) et David Yuen (Minneapolis).

Et pourtant, la Terre est ronde...

Grâce au développement des gros ordinateurs, la modélisation numérique est maintenant possible en tenant compte de la sphéricité de la Terre. On voit ci-contre (Fig. 2) le champ de température calculé dans une coque sphérique, en tenant compte de la compressibilité et de la présence de chauffage interne. Les

modèles ainsi calculés sont comparés aux images tomographiques du manteau. Un des atouts essentiels de la modélisation en sphérique est en effet de permettre une comparaison directe entre les prédictions et les diverses observables: géoïde, tomographie, vitesses des plaques, etc.

On n'aura abordé ici que quelques exemples des progrès récents dans la compréhension de la dynamique du

manteau terrestre. Il reste beaucoup de chemin à parcourir avant d'arriver à un modèle qui réconcilie les vues, souvent fort contrastées, des spécialistes des différentes disciplines des Sciences de la Terre.

Henri-Claude Nataf, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de géologie (URA 1316 CNRS), Ecole normale supérieure, 24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05.

La convection dans le manteau supérieur

Les matériaux qui constituent le manteau supérieur du globe ont enregistré dans leurs assemblages minéralogiques les principales étapes de la circulation convective dans l'asthénosphère.

Jacques Kornprobst

Le manteau supérieur du globe terrestre est situé sous la croûte continentale et sous la croûte océanique. Il peut cependant apparaître en surface: en enclaves dans des basaltes, ou sous forme de massifs (1 à 10³ km³) aux limites des plaques lithosphériques. Il est essentiellement constitué de péridotites (olivine + pyroxènes), riches en magnésium et en silicium, avec des proportions réduites de fer, calcium et aluminium.

La composition minéralogique du manteau supérieur varie selon la profondeur: une pression croissante impose des structures de plus en plus compactes et des assemblages minéralogiques de plus en plus denses. A des pressions inférieures à 1 giga pascal (GPa) (moins de 30 km de profondeur), le manteau est composé de péridotites à plagioclase; entre 1 et 2 GPa, il est formé de péridotites à spinelle, et de péridotites à

grenat au-delà de 2 GPa. Sous des pressions élevées (10 GPa), l'olivine acquiert un réseau cristallin cubique comparable à celui du spinelle. Dans ces conditions, les pyroxènes développent des structures compactes du type pérovskite ou grenat: la nature minéralogique du manteau n'a plus rien de comparable à ce qu'il est possible d'observer en surface. Sous des pressions plus modérées (5 GPa), un élément rare mais

présent dans le manteau supérieur, le carbone, subit une transformation de phase caractéristique: graphite → diamant.

La mémoire du manteau supérieur

Impliqués dans la dynamique convective de la tectonique des plaques, les matériaux qui constituent le manteau supérieur subissent au cours du temps d'importantes variations de pression et de température qui sont la cause de diverses transitions de phase. Celles de ces transitions dont la cinétique est suffisamment lente peuvent être observées dans les affleurements du manteau supérieur, et permettent de caractériser différentes étapes de l'évolution géodynamique de cette unité.

Il est fréquent d'observer la transition péridotite à spinelle → péridotite à grenat (Fig. 1). Ce comportement « pro-

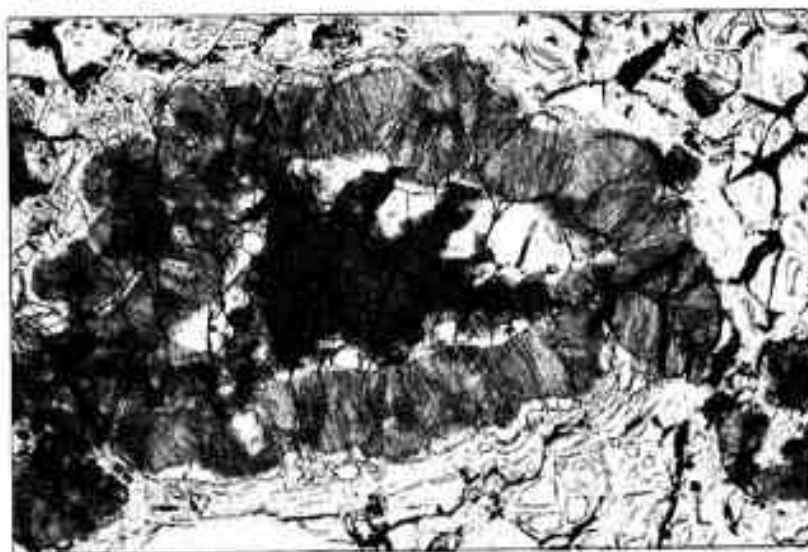


Fig. 1. La transition prograde péridotite à spinelle → péridotite à grenat. En réponse à une augmentation de pression, le spinelle chromifère rouge est corrodé et remplacé par un grenat incolore. Longueur de la photo: 2 mm. (Cliché V. Gardien).

Convection in the upper mantle - Phase transitions observed in peridotites from the upper mantle of the Earth show the existence of prograde (increase in pressure) or retrograde (decreases in pressure and temperature) changes in time. These transitions demonstrate the effects of subduction or lithospheric thinning, and are in agreement with models of mantle convection.



Fig. 2. Démixtion d'un pyroxène de haute température. Une phase initiale homogène calcomagnésienne, stable vers 1 350 °C, est maintenant remplacée par l'association intime d'une phase calcique jaune (diopside) et d'une phase magnésienne grise (enstatite), stable vers 800 °C. Longueur de la photo : 5 mm. (Cliché J. Kornprobst).

grade» (dans le sens d'une augmentation de la pression) traduit l'enfouissement des péridotites lithosphériques le long des zones de subduction. Dans d'autres cas, c'est une évolution « rétrograde » (dans le sens d'une diminution de pression et de température) qui peut être observée : la transition diamant → graphite, ou la transition péridotite à spinelle → péridotite à plagioclase, montrent l'importance de la décompression subie par certains matériaux mantelliques. Des phénomènes de démixtion (Fig. 2) sont observés dans certains pyroxènes, démontrant des variations importantes de température au cours du temps. Ce type d'évolution rétrograde correspond à la remontée vers la surface de portions du manteau supérieur au cours des processus d'amincissement lithosphérique qui précèdent ou accompagnent la formation des océans.

Ces observations pétrologiques sont en accord avec les données de la tomographie sismique et de la géochimie isotopique et soutiennent l'hypothèse d'une circulation convective dans le manteau supérieur.

Jacques Kornprobst, professeur à l'Université Blaise Pascal, directeur de l'Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand, Unité « origine, évolution et dynamique des magmas » (URA 10 CNRS), OPGC, Département Terre, 5, rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand Cedex.

Sous les plaques, des « points chauds »

Les volcans océaniques sont les témoins de courants ascendants de matière chaude venant des profondeurs de la Terre.

Luce Fleitout
Christophe Moriceau

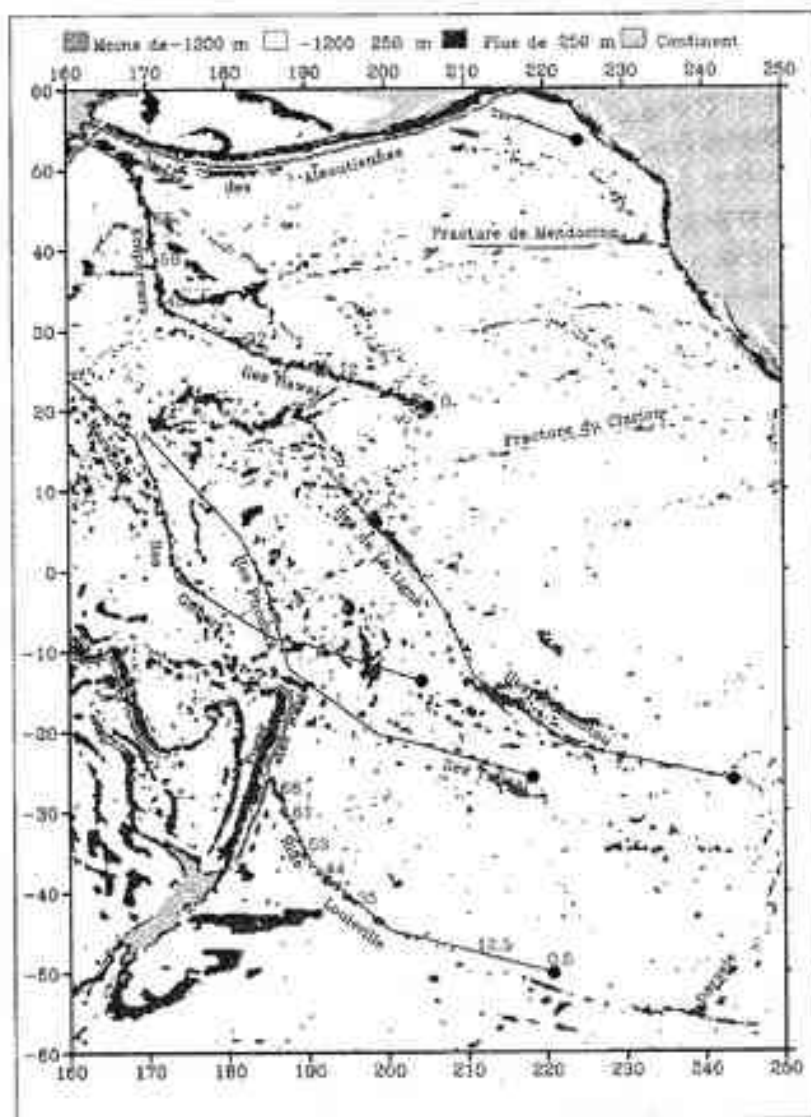
On peut s'interroger sur la structure profonde du système convectif dont les plaques constituent la partie superficielle. Les

datations des îles et monts sous-marins, déjà utilisées depuis une vingtaine d'années, et les récentes données satellitaires sur le champ gravimétrique terrestre démontrent qu'il existe sous les plaques des panaches de matière chaude, de longue durée de vie, étonnamment fixes les uns par rapport aux autres.

L'âge des chaînes d'îles volcaniques

Des alignements de monts sous-marins et de nombreuses îles (La Réunion, Hawaï, Polynésie, Bermudes, Canaries...) ont été formés par volcanisme.

Hot spots under the plates - Plate-tectonics constitute the obvious sign of convection in the Earth's mantle. What are the other manifestations of this convection? Dating of islands and seamounts, already in use for twenty years, and recent satellite data on the Earth's gravity field have shown that long-lasting plumes of hot material exist under the plates. Astonishingly, there is no relative motion between these plumes.



Sur cette carte topographique filtrée de l'océan Pacifique, apparaissent les principales chaînes de monts sous-marins répertoriées. L'âge, en millions d'années pour les chaînes Hawaï et Louisville, indiqué en vert en face des monts sous-marins datés, croît du SE vers le NO. Ce volcanisme a été formé lors du passage de la plaque Pacifique au-dessus de « points chauds » fixes, actuellement situés sous l'extrémité Est des chaînes. Les lignes noires représentent les trajectoires sur la plaque Pacifique de quelques points chauds situés actuellement au centre des points noirs. Les chaînes volcaniques sont situées sur la trajectoire du point chaud qui les a formées.

loin de toute frontière de plaque. Sur une même plaque, les chaînes récentes ont toutes la même direction et l'âge du volcanisme augmente de manière monotone le long de ces chaînes. A titre d'exemple, les âges des monts sous-marins des chaînes Hawaï et Louisville sont reportés sur la figure. Ils augmentent du SE vers le NO. Ceci indique que les chaînes Hawaï et Louisville ont été formées lors du passage de la plaque Pacifique au-dessus de deux « points chauds »

fixes actuellement situés à l'extrémité Est des chaînes. Les structures convectives à l'origine du volcanisme intraplaque sont donc vraisemblablement des panaches chauds de longue durée de vie, fixes les uns par rapport aux autres, au-dessus desquels se déplacent les plaques ; la plaque Pacifique se déplace ainsi depuis 40 millions d'années dans une direction O-NO à une vitesse d'environ 10 cm par an. Avec les îles et gros monts sous-marins connus grâce aux relevés

bathymétriques, on a jusqu'à présent dénombré une cinquantaine de points chauds sur la Terre.

La bathymétrie est mal connue sur de vastes régions des océans. Les anomalies de géoïde (potentiel de gravité) sont par contre mesurées avec précision sur la grille serrée que forment les traces de satellites. Elles sont sensibles aux anomalies de densité et sont donc un outil de choix pour étudier la structure de la convection sous les plaques. La densité exacte de points chauds sur la Terre est pour le moment mal connue, et à côté des points chauds super-actifs tels Hawaï, il pourrait exister de nombreux points chauds malingres, associés à des anomalies linéaires du géoïde.

Les points chauds, leur vie, leur œuvre...

On ne sait pas trop où et comment naissent les points chauds. Le fait qu'ils soient fixes les uns par rapport aux autres, donc peu sensibles au mouvement des plaques, ainsi que leur géochimie particulière, indiquent une origine profonde : la limite noyau-manteau vers 3 000 km de profondeur, ou la limite manteau supérieur-manteau inférieur vers 650 km de profondeur. On les accuse d'avoir été des enfants terribles : ainsi le point chaud de la Réunion aurait, au moment de sa naissance, il y a 65 Ma, déposé sur le continent indien les immenses coulées basaltiques des traps du Deccan et entraîné la mort des dinosaures qui peuplaient la Terre à cette époque (voir l'article de V. Courtillot).

Les points chauds ne sont pas tous situés sous les océans. Le volcanisme de Yellow-Stone aux Etats-Unis, ou le bombement du Hoggar, sont également dus à des points chauds. Cependant, sur les continents, à cause de la tectonique (la déformation des plaques), il est plus difficile d'identifier les points chauds.


Enfin, les points chauds modifient considérablement le relief de notre planète : la matière chaude et peu dense apportée par les points chauds vers 100 km de profondeur soulève les plaques. C'est ainsi que se sont formés les vastes bombements topographiques d'environ 1 000 km de diamètre et 1 km de hauteur autour de Hawaï, du Cap-Vert, des Bermudes ou du Hoggar.

Lucie Fleitout, chargée de recherche au CNRS, Laboratoire de géologie (URA 1316 CNRS).

Christophe Moréau, Laboratoire de géologie (URA 1316 CNRS), Ecole normale supérieure, 24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05.

Les hétérogénéités isotopiques du manteau

La connaissance des hétérogénéités chimiques du manteau est d'une importance capitale pour la compréhension de la dynamique interne de la Terre.

 Claude Dupuy,
Philippe Vidal

Le manteau terrestre, siège de mouvements de matière et de transferts de chaleur, est à l'origine de la plupart des événements importants qui se produisent à la surface de la Terre. L'identification des processus intramantelliques est donc essentielle et, à cet égard, la géochimie joue un rôle de premier plan, comparable à celui de la géophysique.

Les témoins directs du manteau sont les péridotites que l'on rencontre en massifs dans les chaînes de montagne créées par collision, ou dans les laves sous forme de nodules attachés au manteau. Les témoins indirects sont représentés par les basaltes qui en sont des produits de fusion partielle.

Les apports de la géochimie isotopique

L'hétérogénéité du manteau est attestée par la variabilité des rapports isotopiques des éléments concernés par la radioactivité naturelle. Elle révèle des domaines bien distincts dont les rapports isotopiques spécifiques reflètent les rapports de concentration des éléments père-fils propres à chaque système isotopique (par exemple $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$

pour Rb/Sr). Ces données permettent de calculer pour ces réservoirs une durée de vie de 1 à 2 milliards d'années. Si la raison de leur disparition, la convection, est connue, leur nature, leur dimension et leur origine demeurent problématiques.

La combinaison de deux à deux des principaux systèmes isotopiques, associée à l'utilisation de méthodes stochastiques, a conduit à individualiser quatre réservoirs principaux :


- le premier, identifiable dans les segments de dorsales océaniques éloignés des « points chauds », serait le résidu réfractaire du manteau supérieur après extraction de la croûte continentale ;
- le deuxième serait l'empreinte de matériaux continentaux recyclés ; il pourrait être aussi parfois le résultat de circulations de fluides intramantelliques ;
- le troisième représenterait une ancienne croûte océanique aliénée dont les éléments mobiles auraient été partiellement extraits durant la subduction, mais il existe d'autres hypothèses et le débat reste ouvert ;
- le quatrième, assez énigmatique également, pourrait représenter le manteau primitif indifférencié. Ce concept de manteau primitif repose surtout sur les rapports $^3\text{He}/^4\text{He}$ de certains basaltes océaniques. Mais existe-t-il vraiment une portion du manteau qui aurait échappé depuis l'origine de la Terre aux multiples épisodes de différenciation ainsi qu'au brassage causé par la convection ?


Il est remarquable enfin que la géochimie isotopique, puissant marqueur des processus géodynamiques, mais à l'échelle des temps géologiques, interagisse maintenant avec la sismologie, limitée par essence à l'étude de l'état actuel de la matière. Ainsi, à l'aplomb de fortes concentrations en « points chauds » dont les caractéristiques isotopiques révèlent des sources enrichies en éléments radioactifs (c'est le cas de la Polynésie française), on constate des anomalies négatives de propagation des ondes sismiques dans le manteau profond, qui sont à mettre en rapport avec des anomalies thermiques.



Les volcans fournissent des informations de première main sur les rapports isotopiques des régions du manteau qui les alimentent ; en effet, ces rapports ne sont pas modifiés par la fusion partielle et la cristallisation fractionnée, à la différence des concentrations d'éléments majeurs et en traces. (Cliché G. Camus).

Isotopic heterogeneity of the mantle - Knowledge of the Earth's mantle and of movements of material and transfer of heat is essential for understanding phenomena that manifest themselves at the surface of the globe. Geochemistry, by studying the heterogeneity of the mantle through variation in the isotopic abundance of its constituents, provides a better understanding of the internal dynamics of the planet.

 Claude Dupuy, directeur de recherche au CNRS, Centre géologique et géophysique de Montpellier (UPR 361 CNRS), Université des sciences et techniques du Languedoc, place Eugène Bataillon, 34060 Montpellier Cedex.

 Philippe Vidal, directeur de recherche au CNRS, directeur de l'Unité « origine, évolution et dynamique des magmas » (URA 10 CNRS), Université Blaise-Pascal, 5, rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand Cedex.

L'ECORCE DU GLOBE

Durant la période qui a vu la formulation de la théorie de la tectonique des plaques, les travaux en Sciences de la Terre ont surtout eu pour but de décrire soit des mouvements de l'écorce terrestre (c'est la cinématique), soit les conséquences de ces mouvements (chaînes de montagnes dans les zones de collision, volcanisme associé aux zones de subduction, etc.). Actuellement, les recherches consacrées à la dynamique de l'écorce terrestre s'orientent de plus en plus vers la compréhension des mécanismes et des moteurs des mouvements.

On peut considérer que l'on peut localiser avec certitude les secteurs actuels où s'expriment en surface les grands processus responsables de la dynamique de la lithosphère ; on sait en effet où se produit la création de nouvelle lithosphère océanique, où elle retourne au manteau, on sait également où les plaques s'affrontent et même où, dans le passé, elles se sont affrontées. De ce fait, un certain nombre de bases fondamentales sont posées. Il reste

à comprendre les mécanismes et à savoir dans quelle mesure ces expressions de surface sont représentatives des processus profonds.

Nous avons choisi d'illustrer dans les articles suivants quelques grands problèmes relatifs à la dynamique de la lithosphère en montrant comment, dans le cadre incontournable de la tectonique des plaques, il y a encore place pour un nombre impressionnant d'interrogations, de modèles et d'hypothèses.

Que se passe-t-il réellement à l'axe des dorsales océaniques, sachant qu'on ne peut plus proposer un modèle unique et simple pour l'accrétion océanique ? Quel rôle y jouent les fluides ? Comment s'effectue l'amincissement de la croûte continentale jusqu'à sa disparition au droit des océans naissants ? Quel est le régime des contraintes déterminé par les forces agissant sur les plaques dans les zones de subduction ? La subduction longtemps considérée comme uniquement applicable à la lithosphère océanique est-elle responsable aussi de l'enfouissement de la croûte continentale jusqu'à des profondeurs

considérables, comme en témoignent des associations minérales découvertes récemment, etc. ?

Il apparaîtra finalement que la théorie de la tectonique des plaques n'est pas un coup de balai sur les acquis antérieurs : au contraire, toutes les recherches actuelles ont un ancrage profond dans les méthodes classiques de la géologie de terrain et de laboratoire. Mais les grands problèmes nécessitent la mise en œuvre de méthodes adaptées, à leur mesure, développées le plus souvent dans le cadre de programmes internationaux coûteux. Ainsi, pour ausculter les lithosphères océaniques et continentales, l'imagerie sismique et les forages sont nécessaires (programme ECORS, programme GPF - Géologie Profonde de la France - et programme ODP - Ocean Drilling Project).

Yves Lagabrielle
Chargé de recherche au CNRS

Philippe Huchon
Chargé de recherche au CNRS



Les ophiolites du Mont Viso (Alpes italiennes). (Cliché Y. Lagabrielle). Les ophiolites, ces fragments de lithosphère océanique incorporés à la croûte continentale lors de la collision, permettent d'étudier à « pied sec » les processus responsables de la création de la croûte océanique. L'étude des ophiolites des Alpes occidentales, dont les termes crustaux sont réduits, voire absents, a conduit à réviser les modèles classiques d'expansion des fonds océaniques (voir l'article de A. Nicolas). Ces résultats ont en retour un impact sur la recherche océanographique. Ainsi, les processus responsables de la formation du paléo-océan alpin sont probablement actifs aujourd'hui le long de certaines portions de dorsales océaniques à taux d'expansion lente (voisins de 3 cm par an). Ils s'accompagnent d'une mise à nu des termes crustaux profonds et du manteau.

Les forages océaniques profonds

Depuis plus de vingt ans, un navire de forage scientifique sillonne toutes les mers du globe afin d'étudier la dynamique de la Terre.

■ Yves Lancelot

Pendant les vingt ans qui ont suivi la deuxième guerre mondiale, notre connaissance du sous-sol océanique a fait des progrès si considérables qu'elle a littéralement révolutionné les Sciences de la Terre. Ce sont d'abord les études géophysiques qui ont permis, par des méthodes d'investigation indirectes (géomagnétisme et sismique tout particulièrement), de reconnaître aux grands fonds océaniques une importance capitale dans la dynamique de l'écorce terrestre. C'est ainsi que sont apparus, au cours des années soixante, la théorie de l'« expansion des fonds océaniques » et le concept de la « tectonique des plaques ».

Un grand programme de forages

Dès 1968 la « vérité terrain », nécessaire pour vérifier le bien-fondé de ces théories, devenait possible grâce au lancement d'un grand programme de forages océaniques ouvrant pour la première fois l'accès aux couches sédimentaires qui tapissent le fond des grands océans ainsi qu'aux roches de la croûte océanique sous-jacente.

Ce programme, initialement prévu pour dix-huit mois, mais renouvelé régulièrement et étendu dans ses objectifs comme dans ses possibilités techniques, dure maintenant depuis vingt et un ans presque sans interruption. Américain au départ, sous le nom de « Deep Sea Drilling Project » (DSDP), puis international depuis 1975 sous le nom de « International Phase of Ocean Drilling of the DSDP » (IPOD/DSDP), il s'est longtemps appuyé sur les campagnes du célèbre navire de forage *Glomar Challenger* qui a sillonné toutes les mers du globe, sauf l'Arctique, pendant quinze ans sans discontinuer. Forant un total de 1 092 puits, ce navire allait donner à la géologie des océans une dimension sans précédent.

Non seulement la tectonique des plaques devenait une réalité, mais de plus les campagnes du *Glomar Challenger* montraient sur le « terrain » ce que les

disciplines des Sciences de la Terre avaient de réellement complémentaire. Géophysiciens, géochimistes, stratigraphes, sédimentologues, pétrologues, se retrouvaient désormais sur le navire pour aborder ensemble des problèmes majeurs. Un renouvellement sensible des idées et des méthodes venait de créer une nouvelle communauté. Très rapidement le programme allait se focaliser sur l'étude des processus, et particulièrement sur la dynamique de la lithosphère océanique et ses conséquences sur l'évolution des marges continentales comme sur l'évolution physique et chimique de l'océan mondial. Les études régionales se trouvaient désormais nécessairement replacées dans leur contexte global.

Un nouveau navire de forage plus moderne et plus grand, le *Joides Resolution* (voir photo), a remplacé en 1985 le *Glomar Challenger* et le programme est alors entré dans sa troisième phase, internationale elle aussi, sous le nom de « Ocean Drilling Program » (ODP).

Le programme ODP est centré sur l'outil unique que constitue le navire. Les campagnes à la mer se succèdent sans interruption. Les équipes scientifiques embarquées comportent chacune entre vingt-cinq et trente chercheurs et une douzaine de techniciens en plus de l'équipe de forage et de l'équipage du navire.

Le programme scientifique est déterminé par une large communauté représentée par l'organisation internationale JOIDES (Joint Oceanographic Institutions for Deep Earth Sampling) qui regroupe la plupart des grands laboratoires océanographiques américains et les organismes spécialisés du Japon, de la France, de la RFA et du Royaume-Uni, ainsi que deux consortiums, l'un unissant le Canada et l'Australie, l'autre un ensemble de douze pays européens. L'organisation JOIDES établit le programme des campagnes de forage à partir de propositions émanant de l'ensemble de la communauté scientifique internationale concernée.

Long de 143 mètres, le *Joides Resolution* (appartenant à la Société Sedco-Forax, filiale de Schlumberger) est un navire de forage de 16 800 tonnes à positionnement dynamique, c'est-à-dire

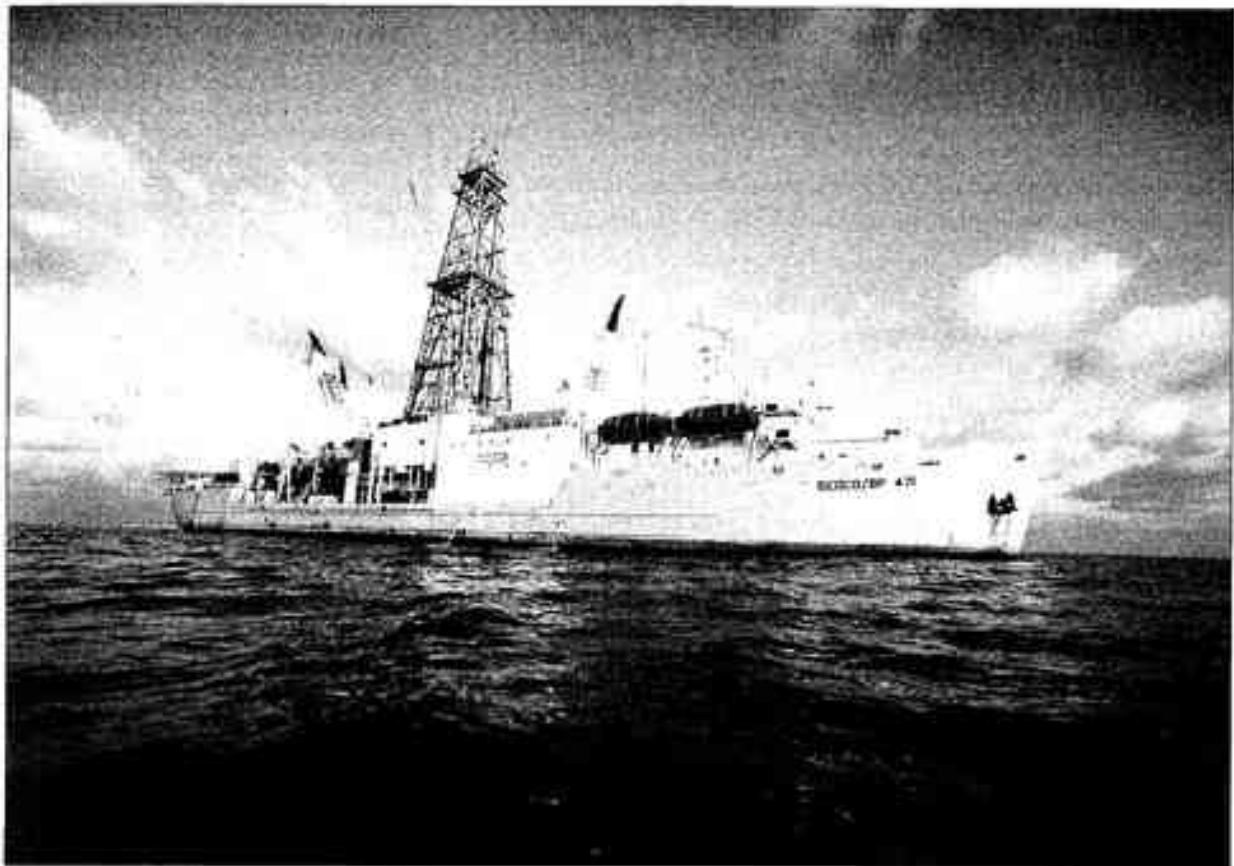
qu'il peut maintenir sa position à quelques mètres ou quelques dizaines de mètres près sans autre lien avec le fond que le signal d'une balise acoustique. Il dispose d'un train de tiges de 9 kilomètres de long et d'un système de ré-entrée lui permettant de réoccuper un puits après changement de trépan. Le navire peut forer par des profondeurs d'eau atteignant environ 7 000 mètres. Sa capacité de forage moyenne est d'environ 1 000 à 1 500 mètres, avec un maximum de l'ordre de 1 800 mètres dans les roches sédimentaires. Elle peut atteindre des profondeurs dépassant 1 000 mètres dans les roches volcaniques très dures. C'est ainsi qu'un puits, situé au voisinage du rift des Galapagos, a été réoccupé à plusieurs reprises, au cours de diverses campagnes du DSDP et d'ODP étalées sur plusieurs années, pour atteindre la profondeur record de 1 288 mètres dans la croûte océanique.

Des techniques toujours améliorées

Au fil des années, des améliorations techniques très importantes ont permis des progrès scientifiques majeurs. En particulier, l'invention du carottier à piston hydraulique est à l'origine du développement spectaculaire de la paléocéanographie. Ce système permet en effet un échantillonnage quasi continu des premiers 250 à 300 mètres de la couverture sédimentaire où se trouvent enregistrés environ 30 millions d'années d'histoire océanographique et climatique de la planète. La mise au point d'un système de guidage du train de tiges, ancré solidement sur les fonds très durs non recouverts de sédiments, a ouvert la possibilité de forer sur les parties les plus jeunes des dorsales océaniques. Enfin, un effort particulier a été entrepris récemment pour réaliser un système de carottier à diamant, de faible diamètre, qui devrait permettre d'atteindre des pénétrations de plusieurs kilomètres dans la croûte océanique.

Un très important programme de mesures et d'expérimentation en fond de puits s'est développé autour du programme de forage. Ce programme non

Deep ocean drilling - Twenty-five years ago, geophysicists suggested that earthquakes and volcanic belts, as well as mountain ranges, resulted from the incessant motion of large crustal plates. The "plate tectonics" concept was later tested by drilling holes in the bottom of the major oceans. This continuing program represents an unprecedented advance in our understanding of the dynamics of the Earth.



Le navire de forage *Joides Resolution* qui a remplacé en 1985 le *Glomar Challenger*. Il permet la réalisation du programme ODP (Ocean Drilling Program). (Cliché ODP).

seulement fait appel aux techniques de diagraphe semblables à celles utilisées par l'industrie pétrolière, mais constitue également un banc d'essai pour des outils nouveaux adaptés à des objectifs de recherche fondamentale. En particulier, les techniques modernes d'acquisition et de traitement d'image sont appliquées directement à l'analyse à haute définition des parois des puits et de leur géométrie précise, apportant ainsi des données fondamentales sur l'agencement des couches sédimentaires, la fracturation des roches, l'état des contraintes dans la lithosphère, etc.

Une large part de l'analyse des carottes est effectuée à bord du navire qui est doté de laboratoires remarquablement bien équipés. Les résultats de chaque campagne sont publiés dans une série de volumes qui constituent une référence unique sur la géologie des océans. Les carottes sont ensuite disponibles pour l'ensemble de la communauté scientifique un an après chaque campagne, et les échantillons sont distribués dans le monde entier.

L'avenir du programme de forage pour les dix années à venir est envisagé selon deux orientations principales. La première représente un défi technologique important. Il s'agit de forer profondément dans la croûte océanique, jusqu'aux environs de 5 000 mètres; de forer profondément dans les couches sédimentaires instables et peu consolidées des prismes d'accrétion; de forer les dorsales actives recouvertes de sédiments et d'échantillonner les fluides chauds et corrosifs qu'ils renferment; et de forer les édifices volcaniques intra-plaques correspondant aux « points chauds ». Ces quatre orientations nécessitent la mise au point de nouvelles techniques de forage et peut-être même l'utilisation d'un navire plus performant que le *Joides Resolution*.

Le deuxième volet du programme proposé couvre trois séries d'objectifs qui sont l'évolution des organismes et les extinctions biologiques globales; le « monitoring » des grands fonds océaniques au moyen de laboratoires enregistreurs de longue durée installés sur et

sous le fond de la mer (stress, déformation, sismométrie, géochimie, température, flux, circulation des fluides, etc.); et les changements climatiques globaux, en liaison avec l'ensemble des grands programmes cherchant à comprendre le fonctionnement du « système Terre » ("Global Change"). Ce second volet correspond pour l'essentiel aux bases scientifiques du projet d'un second navire, actuellement à l'étude par les Européens, sous le nom de projet NE-REIS.

Yves Lancelot, directeur de recherche au CNRS, responsable de l'Unité « histoire de l'océan » (URA 368 CNRS), Université Pierre et Marie Curie, Département de géologie dynamique, 4, place Jussieu, tour 2b, 75252 Paris Cedex 05.

L'hydrothermalisme à l'axe des dorsales océaniques

A l'axe des dorsales océaniques, des sources chaudes, riches en éléments chimiques, permettent de comprendre la formation de certains gisements métallifères.

Thierry Juteau,
Yves Lagabriele

L'activité hydrothermale des grands fonds sous-marins a été découverte il y a un peu plus de dix ans à l'axe des dorsales océaniques. L'impact de ce processus est si important qu'il a imposé une révision radicale de tous les modèles géochimiques de bilans globaux. Ce phénomène était prévisible : il existe en effet un écart connu depuis longtemps entre les valeurs de flux thermique calculées à partir de modèles de conduction pure et celles mesurées à l'axe des dorsales. Ces différences, qui disparaissent lorsque l'on s'éloigne de l'axe, ne s'expliquent qu'en faisant appel à la convection hydrothermale.

Il apparaît, à mesure que les investigations progressent, que le phénomène hydrothermal est très répandu. Il a été découvert, observé et étudié le long de tous les types de centres d'accrétion océaniques : dorsales rapides, dorsales lentes et bassins d'arrière arc. Cette omniprésence se comprend si l'on retient que les conditions nécessaires à la mise en place d'une circulation de type hydrothermal sont toujours réunies dans les centres d'expansion actifs. Il faut en effet : un fluide (l'eau de mer) ; une source de chaleur (l'asthénosphère proche et éventuellement une chambre magmatique) ; un milieu poreux ou convenablement fracturé permettant au fluide de circuler (c'est le cas de la croûte océanique juvénile de la dorsale). Une cellule hydrothermale résulte de la mise en convection de l'eau de mer sous l'effet du gradient thermique très élevé existant à l'axe des dorsales. Au cours

de la convection, le fluide se charge ou se décharge en éléments chimiques empruntés aux divers milieux traversés.

L'Alvin découvre les fumeurs noirs

Les manifestations directes de l'hydrothermalisme sont toujours les plus spectaculaires. Ce sont d'abord les célèbres cheminées — les fumeurs noirs — « crachant » un fluide riche en particules à des températures pouvant dépasser 350 °C et précipitant des sulfures et des oxydes polymétalliques. Mais des eaux moirées, émises par des fissures dans les basaltes, des concentrations anormales de certaines espèces animales, des sédiments de couleur peu habituelle sont aussi des manifestations reliques ou actuelles de la convection hydrothermale.

Les submersibles habités ont joué un

rôle fondamental dans la découverte et l'étude du phénomène. Les premiers fumeurs noirs ont été observés en 1979, sur la dorsale Pacifique lors des plongées de l'Alvin après un travail de reconnaissance photographique et thermique d'un engin remorqué. Depuis, parce qu'ils permettent des échantillonnages directs d'eaux émises et de dépôts minéralisés, les submersibles habités sont devenus indispensables aux études de sites.

Des sites actifs liés au volcanisme

D'autres manifestations chimiques ou thermiques de l'hydrothermalisme sont plus discrètes et ont nécessité pour leur étude le développement d'une technologie adaptée originale. Une bouche hydrothermale se comporte comme une source d'éléments chimiques et de chaleur, un panache, diffusant vers l'ensemble de la masse d'eau sus-jacente. Les anomalies géochimiques (CH_4 , Mn, ^3He ...) et thermiques de la colonne d'eau peuvent être étudiées à partir de la surface à l'aide de palanques statiques ou dynamiques, systèmes de prélèvement d'eau automatique selon une maille fixée. Ces outils permettent de réaliser la cartographie verticale et horizontale des paramètres physiques et chimiques des eaux au-dessus des dorsales.



La « dame blanche », cheminée constituée d'anhydrite émettant un fluide moins transparent, découverte en juin 1989 sur la dorsale du bassin Nord fidjien, au cœur d'un vaste site hydrothermal, lors de la campagne Starmer I du submersible Nautile. (Cliché IFREMER, J.M. Auzende, chef de mission).

Hydrothermal activity along oceanic ridges. The chemical composition, temperature and location of hydrothermal activity occurring along oceanic ridges has been studied. The results provide evidence of links with volcanic and tectonic activity and furnish an explanatory model for the formation of certain metalliferous oceanic deposits.

Ils renseignent ainsi sur la localisation des sites actifs. Ces cartes sont comparées aux données morphologiques et structurales concernant les dorsales, et éventuellement aux données obtenues *in situ* par submersible, relatives à la taille et à la nature des dépôts hydrothermaux. Ceci permet, d'une part, d'établir des liens entre le volcanisme récent, la tectonique et l'évolution de l'activité hydrothermale (on montre notamment la relation étroite existant entre les discontinuités structurales visibles le long de l'axe et les variations des panaches), et, d'autre part, de proposer des comparaisons entre les systèmes propres à chaque domaine océanique.

Un modèle expliquant les gisements métallifères

L'étude des dépôts hydrothermaux et des fluides émis par les bouches nous renseigne sur les éléments lessivés et empruntés aux roches de la croûte et du manteau océaniques. Les métaux (Fe, Cu, Zn, Mn, ...) sont ainsi concentrés, soit directement sur les sites hydrother-

maux, soit loin des lieux d'émission dans les sédiments abyssaux métallifères, dans les encroûtements de manganèse, dans des nodules polymétalliques, etc.

L'hydrothermalisme des dorsales fournit donc un modèle actuel pour expliquer les gisements de sulfures de cuivre, zinc et fer connus et exploités à terre, dans les ophiolites (Chypre, Oman, Terre Neuve...), ces écaïles de lithosphère océanique fossile incorporées aux chaînes de montagne.

Inversement, l'étude des transformations minéralogiques subies en profondeur par les roches soumises aux circulations hydrothermales renseigne sur les apports en éléments fournis par l'eau de mer et sur le pouvoir « fixant » des roches. Un enrichissement local en Mg, Na, Ca, Cl, etc., et le développement de paragenèses minérales néoformées hydratées (épidotes, chlorites, amphiboles, etc.) sont des indices de l'hydrothermalisme. On trouve ces minéraux dans les basaltes mais aussi dans les gabbros, ce qui indique que les fluides circulent jusqu'au toit des chambres magmatiques.

En France, un programme pluridisciplinaire, le PNEHO (Programme National d'Études sur l'Hydrothermalisme Océanique), créé par l'IFREMER et l'INSU du CNRS a été mis en place en 1985 pour fédérer et encourager les recherches sur l'hydrothermalisme. Les grands thèmes développés comprennent : la modélisation physique et chimique des panaches et de la convection hydrothermale dans la croûte océanique, la réalisation de bilans géochimiques globaux, le contrôle structural de l'activité et sa place par rapport au cycle volcano-tectonique rythmant la vie des dorsales, les études sur la durée de vie du phénomène, la biologie des communautés hydrothermales, etc.

Thierry Juteau, professeur à l'université de Bretagne occidentale, directeur de l'Unité « genèse et évolution des domaines océaniques (GEDO) » (URA 1278 CNRS) et du Groupement de recherche « GEDO » (GDR 910 CNRS).

Yves Lagabrie, chargé de recherche au CNRS, Unité « genèse et évolution des domaines océaniques (GEDO) » (URA 1278 CNRS), 6, avenue Le Gorgeu, 29287 Brest Cedex.

Les ophiolites, clé des dorsales océaniques

Fragments de croûte et de manteau océaniques échoués sur la marge d'un continent, les ophiolites apportent une vue nouvelle sur le fonctionnement des dorsales océaniques

Adolphe Nicolas

Les ophiolites sont des fragments de croûte et de manteau océaniques échoués sur la marge d'un continent, avant d'être écrasés par la collision entre cette marge et une autre plaque continentale ou un arc insulaire. Elles offrent donc une opportunité unique pour étudier, à pied sec, la lithosphère océanique.

Objets d'intérêt d'un cénacle de spécialistes jusque dans les années soixante, les ophiolites sont passées sur le devant de la scène avec l'avènement de la tectonique des plaques, elle-même fille des océans. Une question a hypothéqué leur étude : les ophiolites sont-elles représentatives de la lithosphère océanique

« normale » ? Ce débat semble dépassé. D'un côté, les études récentes de géophysique marine accréditent de plus en plus le modèle ophiolitique, avec par exemple la mise en évidence de chambre magmatique sous la dorsale Est Pacifique ; de l'autre, les progrès dans l'étude des ophiolites montrent qu'il en existe une grande variété reflétant probablement une variété égale de situations océaniques. Résumons en notant que la vitesse d'ouverture qui semble responsable de la grande différence entre la dorsale Atlantique (2 cm/an) et la dorsale Pacifique (5-18 cm/an), pourrait se refléter dans deux types contrastés d'ophiolites.

Nous allons nous servir maintenant de nos acquis sur la plus belle ophiolite du monde, celle de l'Oman située le long

de la marge arabe de l'océan Indien, pour préciser le fonctionnement des dorsales rapides.

Des diapirs sous la dorsale d'Oman

La découverte de structures circulaires dans le manteau, attribuées à de petits diapirs d'asthénosphère montant sous les dorsales, fut d'abord effectuée dans les ophiolites avant d'être prescrite le long des dorsales océaniques. L'étude fine de terrain et la modélisation numérique montrent qu'il s'agit de jets de manteau chargé de liquide basaltique, propulsés par leur densité plus faible que le manteau adjacent et montant à l'intérieur d'une zone elliptique

Ophiolites: an insight on oceanic ridges. Structural studies in ophiolites emphasize the role of small mantle diapirs in focusing mantle flow and melt delivery below ridges. Their spacing in ophiolites suggests that the 50-100 km segmentation distance of oceanic ridges is caused by the spacing of such diapirs. In slow spreading ridges, the crust can be missing locally with sediments deposited directly on the mantle layer.

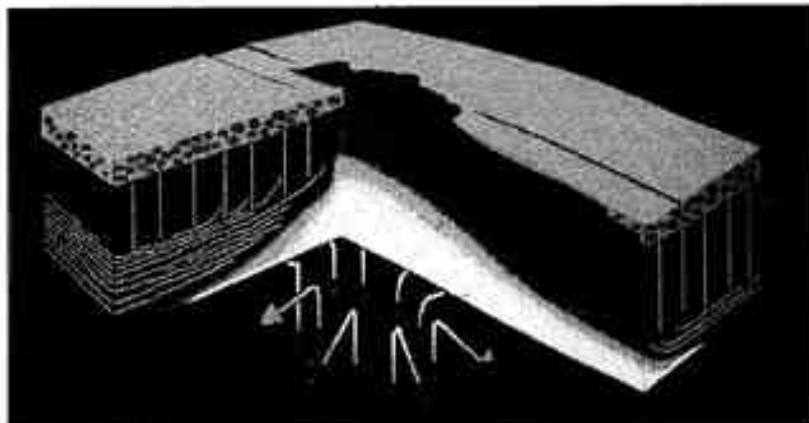


Fig. 1 - Modèle de dorsale rapide inspiré des données océanographiques et géologiques dans l'ophiolite d'Oman. Le bloc-diagramme représente la croûte à la dorsale, à l'aplomb d'un diapir de manteau. Le liquide basaltique extrait de celui-ci entretient une chambre magmatique, cathédrale de feu haute de 3 km et probablement plus large que 20 km à sa base. Au-dessus, le liquide basaltique s'injecte le long de l'axe, formant un filon du complexe filonien et nourrissant les coulées du plancher de la dorsale. (Cliché E. Ball, URA 1370 CNRS).

► d'axe 10-15 km. Ce flux de matière se casse au niveau du Moho (discontinuité de Mohorovičić, limite croûte-manteau) sous la dorsale et diverge dans toutes les directions. La cassure du flux est possible car une zone gorgée de magma, localement liquéfiée, s'est formée à 200-300 m sous le Moho : ce sera, une fois asséchée et fossilisée dans une ophiolite, la « zone de transition » riche en dunités et en chromite. Au-dessus du diapir, il y a une chambre magmatique dont le plancher est chaud et mouvant. La cristallisation des gabbros s'opère le long de la paroi supérieure, qui coïncide à peu près avec l'isotherme 1 000°C. Les gabbros, encore peu consolidés, sont entraînés par le flux du manteau sous-jacent à une vitesse d'un ordre de grandeur supérieur à celle de la dérive de la plaque. C'est alors qu'ils acquièrent leur litage caractéristique, en relation avec leur intense déformation visqueuse (Fig. 2).

La question la plus difficile posée par le fonctionnement des dorsales est celle consistant à comprendre comment, partant d'une montée de manteau sous la dorsale liée à la circulation convective globale qui s'étend sur une centaine de kilomètres, l'activité magmatique et tectonique parvient en surface à se focaliser dans une bande n'excédant pas quelques kilomètres de part et d'autre de l'axe. Le diapirisme explique une première focalisation au niveau du Moho, encore accentuée plus près de la surface par la forme d'entonnoir renversé de la chambre magmatique.

La cartographie structurale du manteau en Oman montre un espacement de 70 km entre deux diapirs adjacents. On est évidemment tenté de comparer cette

distance à celle de la segmentation des dorsales rapides, qui est de 50-100 km, ou de celle des dorsales lentes par les failles transformantes qui est de l'ordre de 50 km. On propose donc que la segmentation des dorsales, à cette échelle, reflète l'espacement des diapirs dans le manteau.

Le Moho à fleur de peau, mais quel Moho ?

La grande découverte de ces dernières années sur les dorsales lentes, comme la dorsale Atlantique, fut celle

du manteau affleurant à la dorsale. Ainsi, localement, la dorsale ne créerait pas de croûte. Cette hypothèse est confirmée par la découverte, dans les ophiolites des Alpes, d'affleurements de lherzolites constituant directement le plancher de l'océan. Pour dénuder le manteau, on envisage que l'alimentation en basalte pourrait être discontinue. Alors que l'extension océanique serait continue, l'apport magmatique serait cyclique : à un épisode magmatique créant une croûte normale, avec chambre magmatique temporaire, succéderait un épisode « sec » pendant lequel la croûte nouvellement formée serait de plus en plus étirée jusqu'à sa dénudation complète.

Dernière question : comment expliquer l'existence reconnue par la sismique marine d'une croûte océanique et d'un Moho à 6 km sous celle-ci, si le manteau affleure directement à la dorsale ? Cette croûte « géophysique » serait alors de la péridotite hydratée en serpentine dont les propriétés physiques ne sont pas très différentes de celles de la croûte basaltique. On sait en effet, expérimentalement, que les fissures permettant la circulation de l'eau de mer et la serpentinisation, se ferment lorsque la pression excède 0,2 mega pascal pour des températures de 300°C, c'est-à-dire pour une profondeur de 6 km dans la lithosphère océanique.

Adolphe Nicolas, professeur à l'Université des sciences et techniques du Languedoc, directeur du Laboratoire de tectonophysique (URA 1370 CNRS), place Eugène Bataillon, 34060 Montpellier Cedex.



Fig. 2 - Litage plissé des gabbros, induit par l'écoulement magmatique le long des ailes de la chambre (Wadi Samail, ophiolite d'Oman). (Cliché A. Nicolas).

La rupture d'un continent

A la frontière continent-océan, les marges continentales passives gardent la mémoire géologique des processus qui gouvernent la rupture d'un continent et la naissance d'un océan.

■ Gilbert Boillot

Aux marges actives, on oppose généralement les marges passives, ou stables, qui sont des régions calmes, sans manifestation géodynamique perceptible. Mais ces marges n'ont pas toujours été aussi tranquilles. Elles sont situées sur l'ancienne déchirure (en anglais : rift) qui séparait deux continents au tout début de leur séparation, avant que naisse entre eux un nouvel océan.

Marges de coulissement / marges de divergence

Cette déchirure, qui utilise en général d'anciennes zones de faiblesse de la lithosphère, suit rarement une ligne droite. Certains segments sont parallèles à la direction du mouvement des continents ; ce sont des « failles transformantes », le long desquelles coulisent les deux plaques en présence.

D'autres segments sont obliques ou perpendiculaires à ce mouvement ; ce sont les rifts continentaux proprement dits, dont les deux lèvres s'écartent progressivement. Dans les deux cas cependant, le destin des failles transformantes ou des rifts intracontinentaux est de border un nouvel océan, du moins si la divergence des plaques dure assez longtemps. Il existe donc deux sortes de marges continentales passives : les marges de coulissement (les anciennes failles transformantes intracontinentales) et les marges de divergence ou d'arrachement (les anciens rifts continentaux). Mais l'une et l'autre, de par leur situation à la frontière continent-océan, gardent la mémoire géologique des processus qui gouvernent la rupture d'un continent et la naissance d'un océan.

The break-up of a continent - Passive continental margins, by their situation at the boundary between the continent and the ocean, keep a geological memory of the processes which control the break-up of a continent and the birth of an ocean. The horizontal stretching of the lithosphere before its break-up can lead to the complete removing of the continental crust and exposure of the Earth's mantle along the axis of the continental rift.

L'étirement de la lithosphère

Les marges passives les mieux connues sont les marges de divergence. Sous un rift continental, la lithosphère est étirée et amincie par le début d'écartement des deux plaques, avant d'être complètement brisée par la naissance du jeune océan. A chaque rift continental correspondent ainsi deux marges « conjuguées » autrefois jointives, maintenant séparées par un espace océanique. Ainsi s'explique la nature continentale de la croûte sous la marge, et son amincissement de la côte (30 à 35 km d'épaisseur) jusqu'à la frontière avec le domaine océanique néoformé (10 à 7 km). Ainsi s'explique aussi la structure superficielle de cette croûte, enfouie sous d'épais sédiments, mais où la sismique met en évidence les anciennes failles et les blocs crustaux affaissés

et basculés, qui sont des structures d'extension héritées du rift continental initial.

Jusqu'à une période récente, l'amincissement crustal observé sous les marges d'arrachement était expliqué par un modèle simple, la lithosphère étant comparée à une pâte qui se déforme de façon homogène quand on l'étire. Au fur et à mesure du progrès des connaissances, on découvre cependant que les rifts continentaux sont des structures géologiques très complexes. En réalité, la lithosphère n'est probablement pas étirée de façon homogène au début de la divergence des plaques. Son comportement dépend de la température et de la pression, mais aussi de la composition minéralogique des roches. Par exemple le quartz et le feldspath, qui prédominent dans la croûte continentale, n'ont pas les mêmes propriétés physiques que l'olivine du manteau supérieur. On peut donc prévoir, à différents niveaux de la lithosphère, l'apparition de discontinuités mécaniques entre des milieux réagissant de manière différente à l'étirement horizontal. En outre, la lithosphère recèle des discontinuités héritées de son histoire géologique, par exemple des fractures ou d'anciennes limites de plaques, qui restent des zones de faiblesse



Affleurement du manteau supérieur au pied de la marge continentale de la Galice. Les péridotites du manteau, transformées en serpentinite, montrent une « foliation » inclinée vers la droite de la photographie. Profondeur : 5 100 m. Echelle : le champ vertical du document mesure environ 2 m. (Cliché IFREMER-GEMCO, J. Girardeau).

► facilement remobilisées lorsque s'exercent des contraintes tectoniques. L'existence de ces discontinuités naturelles explique pourquoi la déformation des roches au début de la divergence de deux plaques a tendance à se concentrer dans des plans de cisaillement horizontaux ou peu inclinés, nommés « failles de détachement » par les géologues anglosaxons (voir l'article de J.-P. Brun).

Un exemple : la marge de la Galice

La marge de la Galice, à l'ouest de l'Espagne, offre un bel exemple des problèmes posés par cette rupture entre deux plaques. Il s'agit d'une marge passive « maigre », c'est-à-dire enfouie sous une mince couche sédimentaire. Pour cette raison, elle a été très étudiée au cours des dix dernières années.

En 1985, une campagne de forages de l'Océan Drilling Program, puis en 1986 une campagne de plongée à bord du sous-marin le *Nautilus* (la campagne *Gallinaute*) lui ont été consacrées. On sait aujourd'hui que la marge a été créée par extension de la lithosphère (« rifting ») au crétacé inférieur, entre -140 et -114 millions d'années, juste avant que l'Atlantique ne s'ouvre entre l'Ibérie et Terre-Neuve. A la frontière entre la croûte continentale amincie de la marge à l'est, et la croûte océanique de l'Atlantique à l'ouest, à l'endroit occupé par l'axe du rift continental il y a 120 millions d'années, s'étend aujourd'hui une bande continue de terrains constitués de roches directement issues du manteau supérieur, des péridotites transformées en serpentinites au contact avec l'eau de mer (voir la figure). L'étude pétrologique et structurale de ces péridotites a

montré qu'elles avaient subi une fusion partielle au début de leur évolution, puis un étirement et une déformation plastique, enfin qu'elles s'étaient mises en place sur le fond sous-marin, tous ces événements s'étant produits pendant le « rifting » de la marge. L'étirement horizontal de la lithosphère avant sa rupture et l'ouverture océanique proprement dite peuvent donc aboutir non seulement à l'amincissement de la croûte continentale mais aussi à sa disparition complète et à la dénudation du manteau supérieur à l'axe du rift continental.

■ Gilbert Boillot, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, Groupe d'étude de la marge continentale (URA 718 CNRS), Laboratoire de géodynamique sous-marine, BP 48, 06230 Villefranche-sur-Mer.

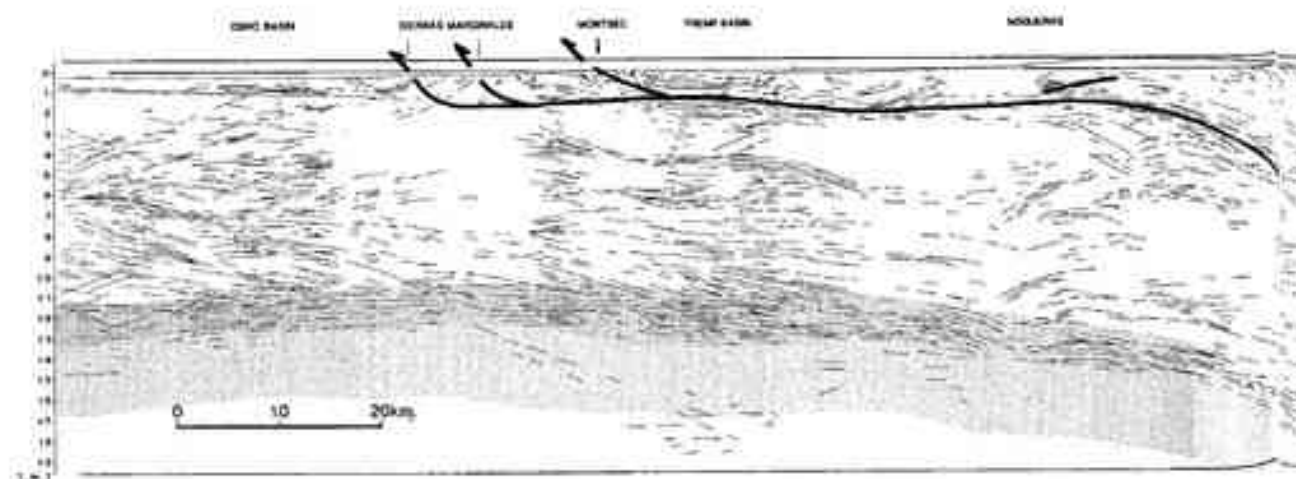
A travers les Pyrénées, le profil ECORS

■ Pierre Choukroun

Le programme ECORS (CNRS-INSU, IFP, SNEA(P)) a pour objectif d'obtenir une série d'images sismiques de la croûte terrestre. Le profil présenté ici a été réalisé sur 250 km de part et d'autre des Pyrénées.

Dans les parties sud et nord du profil, sous les bassins de l'Ebre et d'Aquitaine, la croûte continentale non engagée dans les déformations pyrénéennes est restée horizontale. On y reconnaît les trois grandes unités caractéristiques de la croûte de l'Europe : la couverture sédimentaire mésozoïque (en jaune) ; la croûte supérieure constituée de ter-

raines d'âge précambrien à carbonifère dont la structure a été façonnée essentiellement durant les événements hercyniens il y a 400 à 310 millions d'années (en blanc) ; la croûte inférieure qui présente un litage traduisant la présence de roches énergiquement réfléchissantes : les granulites et les intrusions basiques associées (en orange). La



Quand la lithosphère retourne au manteau

Séismes, tsunamis, éruptions volcaniques: autant de manifestations de la subduction de la lithosphère océanique dont l'étude est un enjeu, non seulement scientifique, mais humain et économique.

Jacques Bourgois,
Philippe Huchon

L'augmentation de la surface de la lithosphère océanique par sa production continue à l'axe des dorsales (voir l'article d'A. Nicolas) est compensée par un mécanisme mis en évidence par les sismologues dans les

années 1960: la subduction. Marquée généralement par une fosse océanique profonde, la subduction d'une plaque océanique s'effectue soit sous une plaque continentale (au large du Pérou et du Chili, par exemple), soit sous une autre plaque océanique (Mariannes, Nouvelles Hébrides, Tonga...). Dans tous les cas, la subduction s'accompagne d'une intense activité géologique dont

les séismes, les tsunamis et le volcanisme explosif sont les manifestations les plus dangereuses. On parle souvent de «marges actives», en opposition aux marges passives décrites dans l'article de G. Boillot. La prévision et la prévention de ces risques naturels majeurs passent par une analyse fine des processus de la déformation et des flux de matière associés à la subduction, objet de programmes nationaux et internationaux.

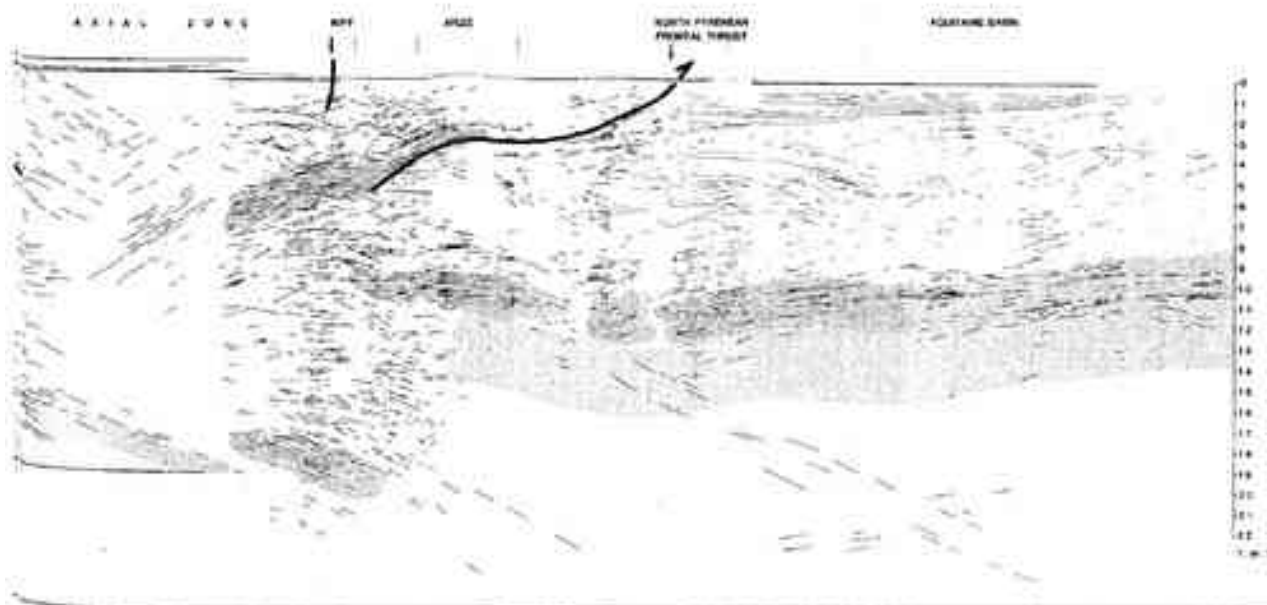
When the lithosphere returns to the mantle • The subduction of oceanic lithosphere under a continental plate or another oceanic plate results either in compression of the oceanic sediments at the margin and in the formation of "a tectonic accretion wedge" or on the contrary to crustal stretching accompanied by subsidence.

discontinuité basale, le "Moho", représente la limite entre la croûte et le manteau (en vert). Dans la chaîne pyrénéenne proprement dite, au centre du profil, la croûte est déformée. Des réflecteurs en éventail apparaissent représentant des cassures majeures (en rouge) le long desquelles se sont effectués des déplacements de volumes rocheux

considérables. On peut calculer à partir de ce profil que le raccourcissement crustal est de l'ordre de 80 km.

Pierre Choukroune, professeur à l'université de Rennes I, directeur du Centre armoricain d'étude structurale des roches (UPR 4661 CNRS), Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex.

The ECORS seismographic section of the Pyrenees • A seismographic section, 250 km long, has been carried out across the Pyrenees. The main units characteristic of the crust in Europe and the major breaks along which displacements of considerable volumes of rock have taken place can be recognized.





Le submersible français *Nautilus* peut plonger à moins 6000 m avec trois personnes à bord (deux pilotes et un scientifique). Il est équipé de plusieurs caméras photo et vidéo, et ses deux bras articulés permettent de prélever des échantillons stockés dans un panier rétractable et de manipuler des instruments sur le fond. (Cliché IFREMER).

► Le prisme d'accrétion

La notion de subduction, impliquant celle de convergence entre deux plaques - celle qui reste en surface et celle qui est subduite -, est longtemps restée associée à l'existence d'une déformation compressive de la marge. Par exemple, dans le modèle du « prisme d'accrétion », les sédiments accumulés sur la plaque océanique sont « raclés » par la plaque chevauchante qui agit à la manière d'un bulldozer et voit s'accumuler à son front une série d'« écaillés » tectoniques séparées par des chevauchements. Cependant, une série d'études menées depuis une dizaine d'années a montré que ce phénomène n'est pas systématique. Ces résultats ont d'abord conduit à une dissociation des concepts de convergence et de compression, clairement publiée pour la première fois par des équipes

françaises, et à la définition de deux types de marges actives : convergentes en compression, avec prisme d'accrétion comme dans les fosses de Nankai au Japon et de la Barbade à l'est des Antilles ; convergentes en extension, sans prisme d'accrétion, mais caractérisées par une subsidence massive, comme en Amérique centrale, au Japon et au Pérou.

Chacun de ces deux types de marges actives est l'objet de programmes de recherche dont les développements récents s'attachent plus particulièrement au rôle des fluides dans la déformation (voir l'article de G. Blanc et J. Boulègue), à la prévision sismique et au bilan des flux de matière. Dans ces programmes, l'utilisation de technologies modernes, telles que les forages profonds du programme ODP (voir article d'Y. Lancelot), l'imagerie acoustique à l'aide

de sonars latéraux, ou encore les submersibles habités, a été déterminante.

Les découvertes du *Nautilus*

Ainsi le modèle du « prisme d'accrétion » a-t-il été confirmé par l'observation, en particulier grâce aux forages du programme ODP. Parallèlement, les plongées du submersible *Nautilus* lors de la campagne franco-japonaise KAICO au large du Japon en 1985 ont permis de découvrir des oasis de vie très différents de ceux qui étaient connus sur les dorsales océaniques (voir l'article de T. Juteau et Y. Lagabrielle). Ces oasis de vie sont localisées dans les zones où sortent du sédiment des fluides froids mais enrichis en méthane. Ils permettent un repérage aisé de ces émissions de fluides liées généralement à des failles profondes. Les premiers essais d'instrumentation (mesure de température, de débit des fluides) ont été effectués l'été dernier lors de la campagne franco-japonaise KAICO-NANKAI avec le submersible *Nautilus*. Destiné en particulier à la prévision sismique, le principe des mesures repose sur l'hypothèse d'une liaison entre la mise sous contrainte des fluides dans la zone sismogène profonde et l'évolution du débit en surface de ces fluides.

Le deuxième type de marge active se caractérise par la présence de failles en extension et d'une subsidence massive. Lors de la campagne SEAPERC au Pérou en 1986, nous avons découvert un bloc d'environ 2 100 km³ (30 × 10 × 7 km) basculé de 5 degrés. Un tel glissement catastrophique est probablement générateur de tsunamis. Il est dû à une forte instabilité de la marge, que l'on attribue soit à un retrait vers le large de la plaque océanique plongeante, provoquant une sorte d'appel au vide - c'est probablement le cas dans la fosse des Bonins -, soit à une érosion tectonique (ou abrasion) à la base de la plaque chevauchante. Au Pérou, le volume total de matériel qui est retourné dans le manteau dans les trois derniers millions d'années correspondrait approximativement au volume actuel des Andes. C'est dire qu'il s'agit d'un processus majeur dont les conséquences sur le volcanisme et la surrection des Andes ne sont pas encore totalement évaluées.

■ Jacques Bourgois, directeur de recherche au CNRS, Unité « tectonique et stratigraphie » (URA 1315 CNRS), Département de géotectonique, Université Pierre et Marie Curie, 4, place Jussieu, tour 26-00, 75252 Paris Cedex 05.

■ Philippe Huchon, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de géologie (URA 1316 CNRS), Ecole normale supérieure, 24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05.

La croûte continentale profonde : nature et évolution

Divers éléments conduisent à envisager un phénomène de subduction pour des portions de continent. Les conséquences géochimiques en sont énormes.

■ Daniel Vielzeuf
Christian Chopin

La Terre est la seule planète interne du système solaire à posséder une hydrosphère. Cette singularité en amène une seconde, l'existence de continents. Sans eau il n'y aurait pas de granites, et sans granites il n'y aurait pas de continents.

Pour des raisons gravitaires, le manteau terrestre ne peut supporter une croûte de densité élevée que pour de courtes périodes à l'échelle géologique. Ainsi reconnaît-on deux types de croûte : une croûte océanique dense et instable formée de basaltes, et une croûte légère et stable formée de granites et sédiments : la croûte continentale.

Granites, granulites et différenciation intracontinentale

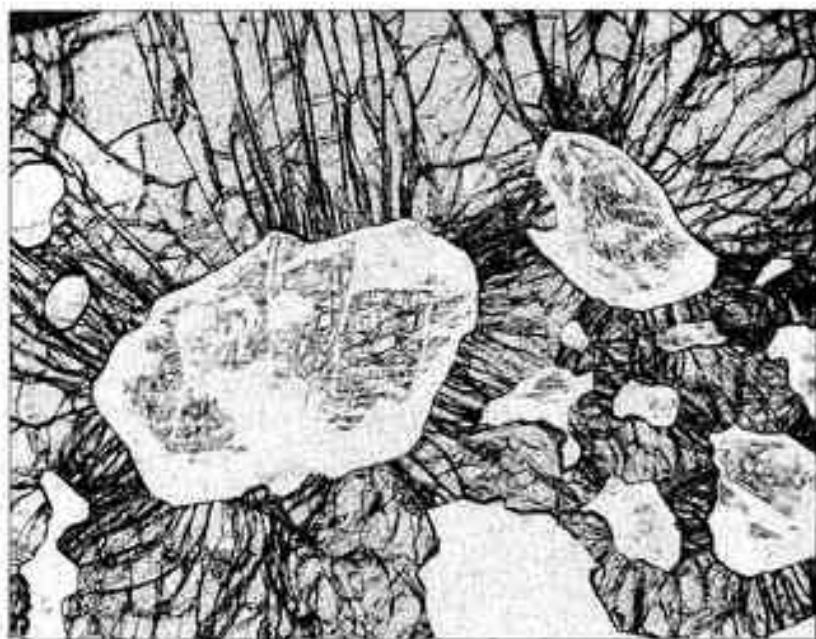
L'étude des différentes sections de croûte dont on dispose montre un zonage vertical. La partie inférieure est le plus souvent constituée de granulites (roches métamorphiques de haute température) acides associées à d'abondantes roches basiques. Dans la croûte moyenne et supérieure, les roches basiques (pauvres en silice) sont de moins en moins abondantes et la proportion de granites augmente significativement. La nature plus basique de la croûte inférieure, son degré élevé de métamorphisme, l'enrichissement de la croûte moyenne et supérieure en composants granitiques peuvent être reliés à un phénomène de différenciation intracontinentale. La formation de granulites en base de croûte témoigne de températures de l'ordre de 850 °C que ne per-

mettent pas d'atteindre les gradients géothermiques continentaux normaux (≈ 20 °C/km). Il faut donc trouver une source de chaleur, moteur de la différenciation. Une des hypothèses le plus souvent évoquées envisage la mise en place de magmas basiques dans une zone critique à l'interface croûte-manteau.

Les intrusions basiques mises en place dans la croûte inférieure évoluent sous la forme de complexes stratifiés donnant les granulites basiques. En raison de leur étalement horizontal et de leur structure interne, ces intrusions pourraient être en partie responsables des

litages que l'on observe dans les grands profils sismiques. En réponse à cette anomalie thermique, une proportion importante de roches crustales (sédiments métamorphisés) peut fondre pour donner d'une part un liquide de composition granitique s.l. et des minéraux réfractaires. Si la proportion de liquide est suffisante, la ségrégation et la migration du liquide silicaté vers les niveaux superficiels de la croûte deviennent possibles. Le liquide granitique laisse derrière lui un résidu de fusion qui constitue les granulites silico-alumineuses. Ainsi, la croûte inférieure devient-elle de plus en plus basique, d'une part, en raison de l'adjonction de magmas basiques et, d'autre part, du soutirage d'un composant granitique. Il en résulte une augmentation progressive de la densité de la croûte inférieure. D'autres questions se posent alors. Quelle est la nature de la transition entre la croûte et le manteau ? Cette transition évolue-t-elle avec le temps ? Une partie de la croûte inférieure pourrait-elle s'incorporer progressivement dans le manteau ?

Ce mécanisme de différenciation a ▶



Inclusions de coésite (fort relief, gris moyen) pour l'essentiel transformée en quartz (faible relief, gris très pâle) dans un cristal de grenat (fort relief, gris sombre). Microphotographie de lame mince de roche. Longueur du cliché 2 mm. Échantillon découvert en 1982, dans les Alpes occidentales. Remarquer autour des inclusions la présence de fentes radiales dans le grenat, dues à l'augmentation de volume lors de la transformation de coésite en quartz. La coésite (SiO_2) est un des polymorphes de haute pression du quartz, stable à des pressions supérieures à 25-30 kbar. Sa préservation dans une roche remontée à la surface est due, d'une part, à son inclusion dans un minéral rigide (le grenat, capable de résister à une importante différence de pression entre les inclusions et le milieu extérieur) et, d'autre part, à une température relativement faible lors de la remontée vers la surface (si la température avait été élevée lors de la rupture du grenat, la transformation de coésite en quartz aurait été immédiate et complète). (Cliché C. Chopin).

The deep continental crust: its nature and evolution - The discovery, in continental crust formations, of mineral associations implying pressures of 20 to 30 kbar suggests that portions of the continental crust have been subducted. The geochemical consequences are important: transfers of continental crust to the mantle have to be taken into account.

► des implications géodynamiques. Dans une région donnée, la majorité des granites se forme lors de la première anomalie thermique qui affecte une croûte continentale fertile (donc hydratée lors d'un cycle érosion-sédimentation). Dans la chaîne hercynienne par exemple, la majorité des granites se sont formés dans un intervalle de temps relativement court (340-280 millions d'années) indiquant que la croûte n'avait pas subi de différenciation significative avant cette période. Les chaînes de montagne qui reprennent des domaines crustaux déjà différenciés comme les Alpes ou les Pyrénées, n'amènent pas la formation de quantités importantes de granites.

Les transformations minérales témoins de l'enfouissement des continents

L'existence d'associations minérales impliquant des pressions supérieures à 10 kbar (comme quartz + pyroxène sodique jadéite) puis à 20 kbar (pyroxène

jadéite + disthène SiAl_2O_6) ne posait pas de problème tant qu'elle était limitée à des unités crustales océaniques, dont l'enfouissement dans le manteau est le destin normal. Leur découverte, ainsi que celle de coésite, polymorphe de haute pression du quartz (voir figure), dans des unités continentales des Alpes occidentales et de la chaîne Caledonienne de Norvège, a démontré que des pressions dépassant 25 à 30 kbar avaient été atteintes par ces roches, et donc des profondeurs d'au moins 100 km.

Les conséquences sont de plusieurs ordres. Le schéma d'une croûte continentale flottant indéfiniment sur le manteau — au contraire de la croûte océanique sans cesse renouvelée — laisse place à celui d'une subduction également possible pour des portions de continent. Certains résultats de la sismologie, sous l'Hindû Kûch par exemple, commencent à l'attester. Une fois ce matériel enfoui, les forces gravitaires auront tendance à le ramener vers la surface, dans la mesure où il peut être désolidarisé du manteau sous-continental. En même temps, l'équilibre thermique avec le

manteau environnant plus chaud tend à se réaliser. De la vitesse relative de ces deux processus dépend le devenir de la croûte enfouie. Si elle remonte plus vite que les isothermes, elle peut échapper à la fusion et revenir à la surface par des mécanismes tectoniques encore conjecturaux mais évidemment liés à la collision continentale. Si l'échauffement est plus rapide, l'essentiel de ce matériel fond et forme des magmas qui interagissent avec le manteau environnant et le modifient. Les conséquences géochimiques sont énormes puisqu'il faut maintenant envisager aussi des transferts de la croûte continentale vers le manteau.

■ Daniel Vielzeuf, chargé de recherche au CNRS, Unité « origine, évolution et dynamique des magmas » (URA 10 CNRS), Département de géologie, 5, rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand Cedex.

■ Christian Chopin, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de géologie (URA 1316 CNRS), Ecole normale supérieure, 24, rue Lhomond, 75231 Paris Cedex 05.

Les grands forages continentaux

Pour tester les modèles élaborés par les géologues et les géophysiciens, on ne peut se passer du regard direct sur la structure de la croûte continentale qu'apportent les forages.

■ Michel Cuney,
Claude Mégnien

Les programmes de forages scientifiques profonds ont été rendus nécessaires pour accéder, par des observations et des mesures directes sur les carottes extraites ou dans le trou de sondage, à la nature, aux propriétés physiques et chimiques, à la distribution et à la structure des formations géologiques en profondeur. Auparavant ces données ne pouvaient être obtenues qu'indirectement à partir de l'interprétation de la cartographie géologique et des mesures géophysiques.

Le développement récent de grands

programmes internationaux de géophysique (GEOTRAVERSE, ECORS..., voir l'article de P. Choukroune) ont permis de proposer de nouveaux modèles de la structure de la croûte terrestre.

Seuls les forages permettent de tester ces modèles par l'observation directe et de fournir les données sur les propriétés physiques des roches en profondeur nécessaires à la modélisation. Les plus profonds, réalisés pour la prospection pétrolière, dépassent une dizaine de kilomètres, mais ne concernent que les bassins sédimentaires. Dans les socles cristallins, les forages entrepris pour la prospection minière dépassent exceptionnellement quelques centaines de mètres.

Un projet ambitieux en URSS

Depuis une dizaine d'années, des programmes de sondages profonds à but scientifique ont été lancés dans plusieurs pays.

C'est l'URSS qui a le programme le plus ambitieux, avec onze forages super profonds programmés. Le sondage de la péninsule de Kola a atteint 13 000 m. La première discontinuité géophysique importante de la croûte continentale, celle de Conrad, devait être traversée; en fait le sondage a montré qu'il ne s'agissait que de zones différemment comprimées. Des résultats importants ont été obtenus sur la nature et la dynamique des circulations de fluides à grande profondeur.

La RFA, avec le projet KTB (Kontinental Tief Bohrung), se propose de traverser, sur 10 km, l'empilement de nappes qui constitue le soubassement de l'Europe édifié il y a plus de 300 millions d'années. Un forage pilote de 4 000 m a déjà été réalisé. Deux résultats inattendus: la très forte pente des structures géologiques non identifiée par la sismique préalable au sondage, et l'augmen-

tation très rapide du gradient géothermique ont déjà conduit à une révision sérieuse des modèles proposés antérieurement.

Trois programmes réalisés en France

Avec le programme Géologie Profonde de la France (GPF), lancé en 1982, la communauté géologique nationale a préféré sélectionner des cibles successives, de profondeur moins importante, qui portent sur des sites représentatifs de grands problèmes scientifiques, plutôt que de réaliser un forage unique hyper profond. Trois programmes ont déjà été réalisés : Echassières, Cézallier et Sancerre-Couy.

— Echassières (nord du Massif Central), qui malgré sa profondeur modeste (900 m), a permis de découvrir la puissance exceptionnelle d'une coupole granitique très riche en métaux rares (Sn, Li, Ta, Nb, Be...) et de montrer que les mécanismes de concentration de ces métaux, auparavant très controversés, sont essentiellement magmatiques.

— Cézallier (centre du Massif Central) où un groupe de forages a exploré jusqu'à 1 500 m de profondeur les racines d'un système thermo-minéral actif. Il a montré que les émergences carbogazeuses étaient liées à des zones de fracturation en distension active.

— Sancerre-Couy où un forage de 3 500 m a été réalisé pour reconnaître l'origine d'une des anomalies magnétiques les plus importantes d'Europe, située au sud du bassin de Paris. Les mesures paléomagnétiques réalisées sur le premier millier de mètres constitué de sédiments, ont permis d'établir la succession des inversions de polarité du champ magnétique terrestre. Bien qu'aucun corps magnétique particulier n'ait été traversé, les nombreuses passées d'un sulfure de fer magnétique rencontrées à partir de 3 000 m donnent aux roches une aimantation située entre 10 et 20 % de la valeur recherchée d'après les modélisations. Les résultats apportés par le sondage ont permis le développement de nouvelles méthodes d'interprétation des données sismiques dans les socles cristallins.

La prochaine cible de GPF se situe en Ardèche. Son objectif est de suivre la transformation de sédiments sous l'effet

de la température, de la pression et de leurs interactions avec les fluides anciens et actuels. Deux forages seront réalisés à 1 800 et 2 800 m. Des retombées importantes sont attendues pour la prospection pétrolière.

Si ces forages sont indispensables pour développer notre compréhension des grands processus géologiques, ils induisent également le développement d'équipements technologiques nouveaux permettant d'acquérir des données précises sur les propriétés physiques des roches en profondeur.

Tous les grands programmes de forages continentaux ont, pour le moment,

été financés au niveau national. L'avenir des forages super profonds, en raison de leur coût élevé, est dans une coopération internationale, comme c'est déjà le cas pour les forages océaniques.

■ Michel Cuney, directeur de recherche au CNRS, Centre de recherche sur la géologie de l'uranium (GDR 77 CNRS-CREGU), BP 23, 54501 Vandœuvre-les-Nancy Cedex.

■ Claude Mégmien, directeur du programme GPF, BRGM, BP 6009, 45060 Orléans Cedex.



Une installation de forage (Echassières) et les carottes qui ont été prélevées.

Deep continental drilling - Direct observations and measurements performed on drill cores and in the drill hole during deep drilling programs developed for scientific research enable the nature, the structure, and the physical and chemical properties of the rocks in the continental crust to be determined.

Comment la lithosphère continentale s'amincit

L'extension extrême de modèles réduits de lithosphère produit des structures comparables à celles des marges continentales passives et permet de comprendre la remontée en surface du manteau ductile.

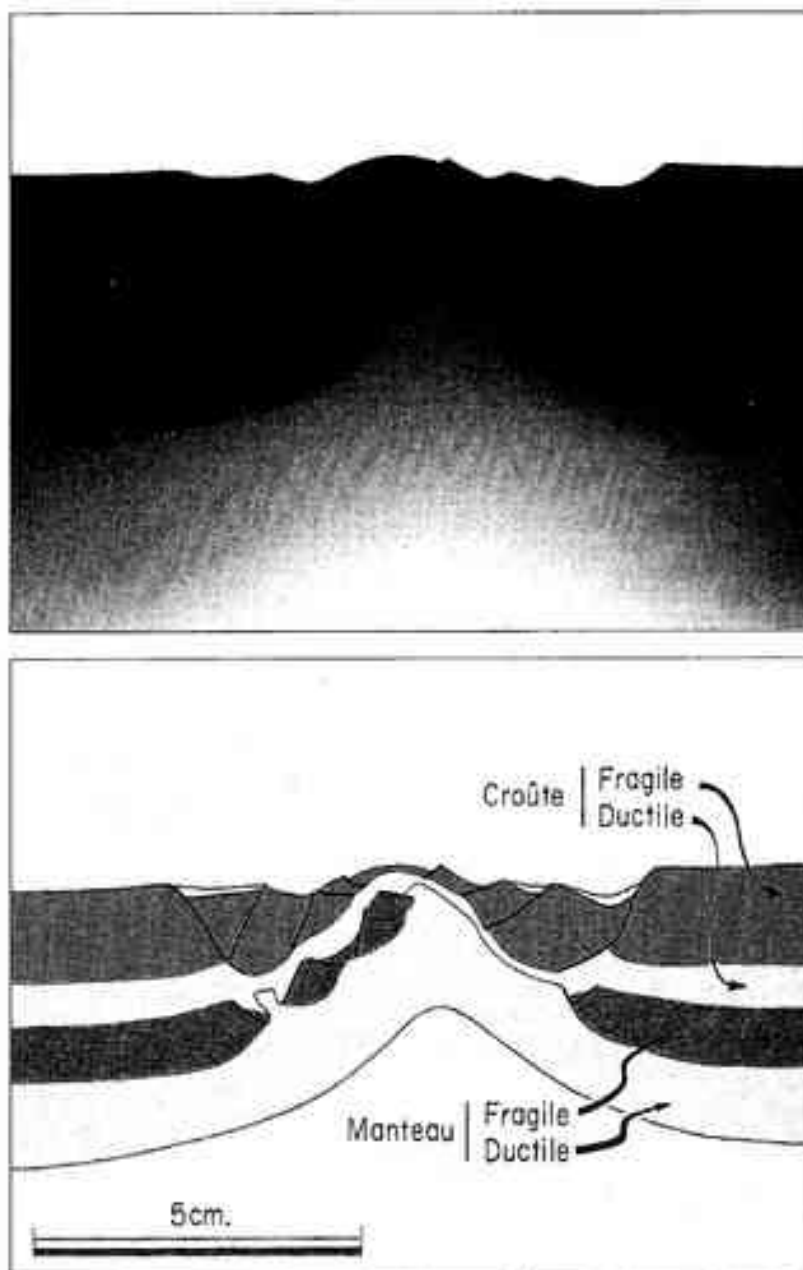
■ Jean-Pierre Brun

Sil l'analyse et la compréhension des domaines crustaux amincis comme les marges continentales a récemment beaucoup progressé, des questions fondamentales restent posées quant aux processus mécaniques de l'amincissement de la lithosphère qui accompagnent la rupture des continents. Deux modèles ont joué un rôle décisif. L'hypothèse d'un étirement symétrique et homogène de la lithosphère, proposée par Dan McKenzie, a permis d'expliquer et de quantifier la subsidence bimodale-tectonique, puis thermique, des marges passives. L'hypothèse d'un étirement asymétrique contrôlé par une discontinuité majeure recoupant l'ensemble de la lithosphère, proposée par B. Wernicke, s'accordait cependant mieux au caractère asymétrique de la déformation constaté en surface.

L'importance de la structure rhéologique de la lithosphère

Des progrès récents ont cependant pu être réalisés grâce aux études théoriques et à la modélisation. Ainsi l'analyse sur modèle réduit de l'amincissement localisé, en gravité normale, d'une maquette multicouche fragile-ductile, analogue au premier ordre à la stratification rhéologique de la lithosphère, apporte des solutions originales. La figure montre un exemple de ce type. Des structures très comparables à celles observées dans les marges passives ne sont obtenues que lorsqu'il existe une couche très résistante à la partie supérieure du manteau lithosphérique et une couche à faible résistance à la base de la croûte. Dans une telle configuration, lors d'un étirement localisé, la partie supérieure du manteau se segmente en boudins.

How the continental lithosphere becomes thinner - Experiments on small scale models show that severe thinning of a multilayered lithosphere depends greatly on its rheological structure, and therefore on its initial thermal state.



Expérience sur modèle réduit, d'amincissement d'une lithosphère quadricouche fragile-ductile flottant sur une asthénosphère. (Expérience Beslier et Brun). En haut : allure générale de la morphologie de l'interface lithosphère (noir) - asthénosphère (orange) pendant l'expérience. En bas : coupe de la partie lithosphérique du modèle montrant la géométrie des systèmes de failles se développant dans les couches fragiles à forte résistance (sable) et les couches ductiles à faible résistance (silicone).

Cette déformation hétérogène est transmise à la croûte supérieure cassante par la croûte inférieure ductile dont le rôle découplant est déterminant. Lorsque la déformation s'intensifie, une concentration de l'éirement intervient entre deux des boudins du manteau résistant, permettant une remontée du manteau ductile sous-jacent. On montre ainsi que l'amincissement extrême d'une lithosphère multicouche dépend très fortement de sa structure rhéologique et donc de son état thermique initial. L'amincissement qui en résulte est quasi symétrique même si sa structure inter-

ne, processus de déformation évoqué plus haut, tend à s'amplifier de manière asymétrique. Ces expériences prennent en compte un état thermique initial, mais aucune modification thermique en cours de processus. Le fait, malgré cette limitation, que les structures produites soient très comparables à celles observées dans la nature, tend à montrer la prééminence des paramètres mécaniques dans le développement des structures majeures à l'échelle de la croûte et de la lithosphère.

Enfin, il est intéressant de noter que ces résultats expérimentaux permettent

d'expliquer la remontée du manteau observée à l'extrémité de marge passive (voir l'article de G. Boillot) sans qu'il soit nécessaire d'invoquer l'existence d'une faille normale à l'échelle de la lithosphère.

■ Jean-Pierre Brun, professeur à l'Université de Rennes I, Centre armoricain d'étude structurale des socles (UPR 4661 CNRS), directeur du Laboratoire de tectonique, Institut de géologie, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex.

La chimie des eaux interstitielles

Un outil indispensable à la compréhension des différents phénomènes qui se produisent le long des zones de subduction.

■ Gérard Blanc,
Jacques Boulègue

En zone de subduction, la convergence lithosphérique provoque la superposition de deux plaques, l'une « chevauchante » qui reste à la surface du globe, l'autre « plongeante » qui s'enfonce dans le manteau supérieur. Dans le cas des Petites Antilles, la plaque plongeante est la plaque atlantique et la plaque chevauchante est la plaque caraïbe.

La plaque plongeante océanique transporte une couverture sédimentaire qu'elle conduit peu à peu jusque dans la zone de subduction. Une partie des sédiments est entraînée avec la croûte océanique vers le manteau supérieur, mais la majorité des sédiments reste en surface et participe à la construction d'un « prisme d'accrétion tectonique » en avant de la marge continentale active (l'arc insulaire volcanique dans le cas des Petites Antilles).

Le prisme d'accrétion constitue une surcharge sédimentaire importante qui pèse sur les zones profondes du prisme et en particulier sur les séries sédimentaires océaniques subduites. En réponse à cette surcharge, la pression de fluide à l'intérieur de ces séries augmente, l'eau piégée originellement lors de la

sédimentation a tendance à migrer. Ce phénomène d'expulsion d'eau se traduit par un transfert de fluide d'un milieu originel vers un autre. L'étude de la chimie des eaux interstitielles dans une colonne sédimentaire permet la mise en évidence de ces transferts de fluides. En effet, un profil de concentration élémentaire dans les eaux interstitielles en fonction de la profondeur est contrôlé par trois paramètres :

- le coefficient de diffusion spécifique de chaque élément pour un milieu donné,
- la vitesse des déplacements latéraux et/ou verticaux de l'eau interstitielle (advection) dans la colonne sédimentaire,
- le taux de réaction décrivant les réactions chimiques possibles entre l'eau interstitielle et certains minéraux constituant le sédiment.

L'interprétation des variations de

The chemistry of interstitial waters in subduction zones, the chemistry of interstitial waters appears to be a very effective tool for investigating the relationship between structural, hydrological, biological, diagenetic and dewatering processes at the base of an accretionary complex.

concentrations élémentaires passera donc par des investigations sur l'influence relative de ces divers facteurs.

Pour illustrer l'intérêt de l'étude géochimique des eaux interstitielles, nous présentons ici une partie des résultats acquis sur les eaux interstitielles contenues dans les sédiments forés dans une portion frontale du prisme d'accrétion de la Barbade, au cours de la campagne océanographique Leg 110 du programme international ODP. Au cours de cette campagne, nous avons réussi une première mondiale : la traversée du plan de décollement séparant les séries sédimentaires accrétées constituant le prisme d'accrétion des séries sédimentaires subduites, entraînées en profondeur avec la croûte océanique. Les études antérieures avaient suggéré son existence, l'étude des eaux interstitielles a permis de le caractériser.

L'origine du méthane

Les profils de la concentration en méthane dissous dans les eaux interstitielles, en fonction de la profondeur le long des colonnes sédimentaires forées, montrent que les maxima de concentration en méthane coïncident avec le plan de décollement et avec les failles majeures caractérisant le front de chevauchement. Les enregistrements géophysiques montrent que l'image de la structure d'un prisme d'accrétion dans sa partie terminale est celle d'un empilement d'écailles plates, séparées par des accidents structuraux très proches de l'horizontale. Pour comprendre la signification de cette relation entre les maxima de concentration en méthane et les failles majeures, il est nécessaire de définir l'origine du méthane.



Calyptogena, mollusque bivalve présent dans les aires d'émission de fluides au niveau des zones de subduction. (© Hessler/Scripps Institution).

► Le méthane est produit dans la nature par dégradation microbiologique ou thermique de la matière organique. Les fortes concentrations en sulfates, mesurées au niveau des zones enrichies en méthane, sont incompatibles avec une production biologique du méthane. En effet, les travaux expérimentaux montrent que la présence de soufre bloque le développement des bactéries méthano-gènes au profit des bactéries sulfato-réductrices. De plus, une dégradation bactérienne de la matière organique dans un environnement anaérobie produit du méthane enrichi en ^{13}C (isotope léger du carbone) par rapport au méthane produit thermogéniquement. L'analyse de la composition isotopique (rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) du méthane peut être utilisée pour faire la distinction entre un méthane biogénique et un méthane thermogénique. Un autre moyen de discrimination est de mesurer le rapport de concentration (C_1) méthane sur (C_2) éthane plus (C_3) propane ($r = \text{C}_1/\text{C}_2 + \text{C}_3$). Un rapport élevé ($r > 1000$) suggère une origine biogénique, alors qu'un rapport faible ($r < 100$) suggère une origine thermogénique. En effet, les processus de dégradation biochimique libèrent

nettement moins de composés bi- et tri-carbonés par rapport à la dégradation thermique. Ces indicateurs suggèrent ici une origine thermogénique pour le méthane dissous dans les eaux interstitielles analysées.

Un modèle de circulation de fluide

La production thermogénique d'hydrocarbures légers ne peut débiter que lorsque la température dans la série sédimentaire atteint une valeur de l'ordre de 60 °C. Or, les mesures de température effectuées à l'aide d'une sonde thermique dans les trous de forages montrent qu'une telle température n'est pas atteinte. Il s'avère donc que le méthane dissous est produit dans des zones plus profondes. Ces données, en accord avec d'autres données de la chimie des eaux interstitielles (éléments majeurs et traces), suggèrent que le méthane est transporté latéralement par advection de fluide le long de zones ayant une importante perméabilité de fracture correspondant ici au plan de décollement et aux accidents structuraux associés.

Ces données géochimiques ont donc permis de proposer pour la première fois un modèle de circulation de fluide, en relation avec le développement d'un prisme d'accrétion au front d'une marge active. Ces circulations de fluides impliquent que, dans les drains d'exutoire, il existe des pressions de fluide anormalement élevées qui jouent certainement un rôle primordial dans l'initiation et le développement des accidents structuraux à l'origine de la croissance d'un prisme d'accrétion. La géochimie des eaux interstitielles apparaît donc comme un outil indispensable à la compréhension des phénomènes récents de structuration au niveau des marges tectoniquement actives.

La biologie est aussi concernée

Ces manifestations hydrogéochimiques au niveau des zones de subduction ont aussi un impact biologique. En effet, les résultats de chimie des fluides acquis au cours des missions de plongée du submersible *Nautille* ont montré qu'aux exutoires de ces fluides, sont associées des communautés de mollusques bivalves de type *Calyptogena* (voir photo). Des études biogéochimiques et hydrogéochimiques montrent que ces mollusques utilisent comme facteurs nutritifs des composés inorganiques comme le méthane, l'hydrogène sulfuré, le dioxyde de carbone et l'azote dissous dans les fluides advectés.

Enfin, les résultats comparables acquis sur les fluides des zones de subduction des Caraïbes, du Japon, du Pérou et de l'Orégon concordent pour affirmer que ces phénomènes d'expulsion de fluide vers l'océan sont généralisables à l'ensemble des zones de subduction de la Terre. En conséquence, ces expulsions de fluide constituent une source élémentaire non négligeable qui doit être prise en compte au niveau des bilans géochimiques globaux.

■ Gérard Blanc, maître de conférences à l'Université Louis Pasteur, Centre de géochimie de la surface (UPR 6251 CNRS), Institut de géologie, 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex.

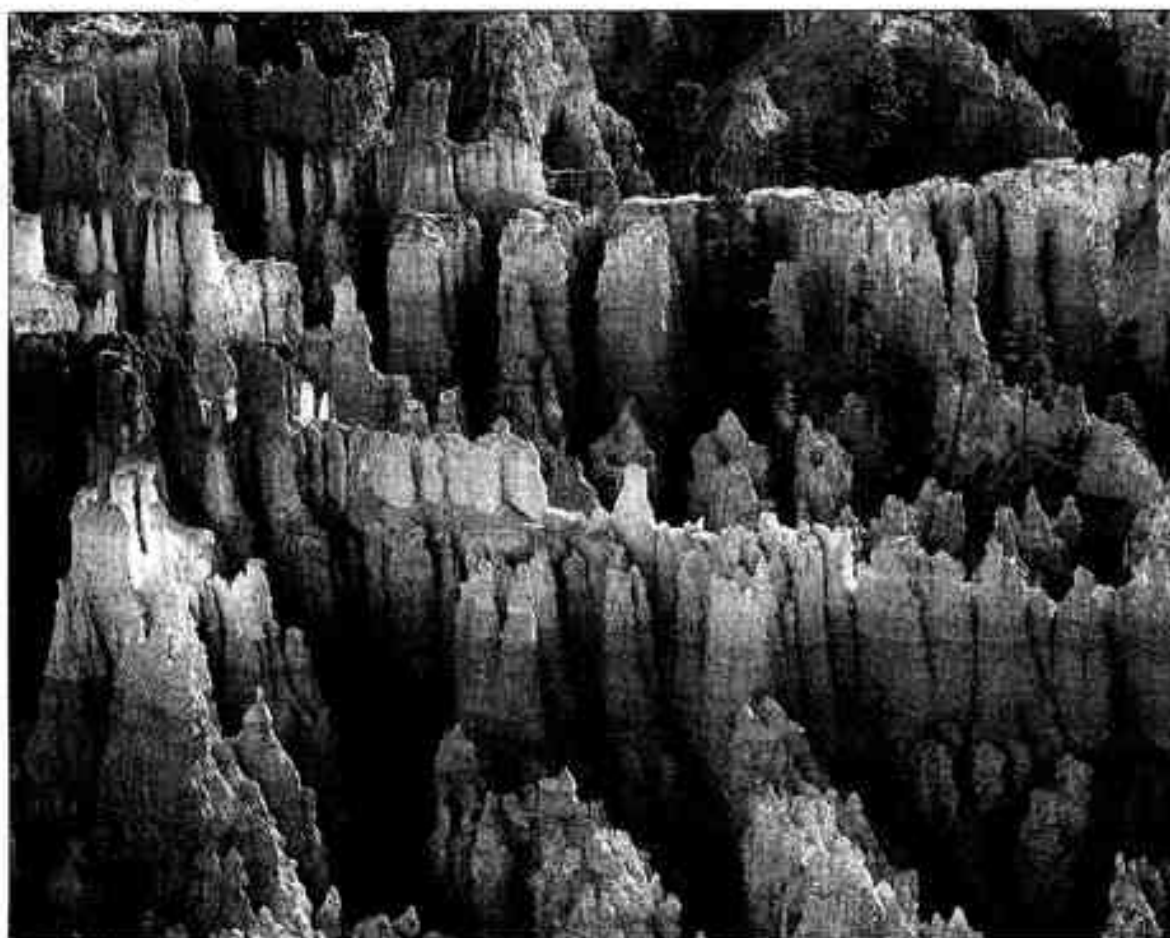
■ Jacques Bouffé, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, directeur du Laboratoire de géochimie et métallogénie (URA 196 CNRS), 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

UNE PLANETE EN EVOLUTION

La géologie, science classique et traditionnelle, cède aujourd'hui la place aux Sciences de la Terre. Ce changement de terminologie n'est pas simplement un problème de vocabulaire. Il correspond à la fois à

une «évolution» des concepts (introduction dans les années soixante de la tectonique des plaques, théorie unifiant les diverses disciplines géologiques) et à une «révolution» des techniques : d'une science essentiellement descriptive, à

finalité souvent économique, nous sommes passés au cours de la deuxième moitié de ce siècle à une science analytique, permettant de s'attaquer aux questions fondamentales du fonctionnement du système Terre. En effet, les mé-



Bryce Canyon (Utah, Etats-Unis). (© Cliché A. Thomas, Explorer).



Les sédiments sont apportés par les fleuves et s'accumulent dans les bassins. La cyclicité du remplissage sédimentaire enregistre les événements successifs, d'origine tectonique ou climatique, survenant pendant le développement du bassin. Dans ce bassin d'âge dévonien, en Norvège, la répétition de cycles sédimentaires représente l'activité sans cesse renouvelée d'une faille normale bordant le bassin. (Cliché M. Seranne).

» thodes modernes d'analyses physico-chimiques des roches et de leurs constituants ont mis en lumière l'infinie richesse de l'information qu'elles ont mémorisée depuis leur formation. Le décryptage minutieux en laboratoire de ces enregistrements permet de reconstituer des événements qui se sont produits il y a des millions, voire des milliards d'années. Les articles présentés dans ce chapitre illustrent la mise en œuvre de telles techniques. Une première série montre ce qu'elles appor-

tent pour comprendre l'origine des grandes structures géologiques qui façonnent le visage, passé ou présent, de la Terre, ou pour identifier et interpréter les grands événements (catastrophes) qui ont marqué son évolution. Un deuxième groupe d'articles est consacré à l'évolution des matériaux qui constituent la planète, dont l'histoire est intimement liée à celle des structures. Enfin, c'est à l'évolution des êtres vivants qu'est consacré le dernier ensemble de contributions. La

paléontologie n'est pas restée à l'écart des développements récents dans les Sciences de la Terre, et les interprétations modernes des fossiles permettent de replacer l'histoire des êtres vivants dans le cadre plus vaste de l'évolution des structures et des matériaux terrestres.

Hervé Perroud
Chargé de recherche au CNRS

Eric Buffetaut
Directeur de recherche au CNRS

La tectonique des continents

Le comportement mécanique de la lithosphère continentale s'explique par l'alternance entre une déformation continue et un coulisage localisé à la frontière de blocs.

Paul Tapponnier

Le succès rapide, à la fin des années soixante, de la théorie de la tectonique des plaques (dont l'un des fondements est l'existence, au sein

des océans, de frontières sismiques et volcaniques étroites limitant de grandes plaques lithosphériques rigides) devait, pour un temps, changer radicalement la vision antérieure d'une déformation plastique de la croûte continentale dans

tout son volume. Comme la lithosphère globale, les continents devaient eux aussi se diviser en plaques de plus petite taille. En Méditerranée par exemple, l'existence de nombreuses microplaques permettait d'expliquer la multiplicité des zones sismiques, des bassins océaniques et des chaînes plissées. Depuis 1975 l'évidence croissante, issue de l'accumulation des enregistrements par les réseaux sismiques mondiaux, d'une sismicité diffuse dans des régions telles que le Tibet et l'Égée, a replacé la déformation continue sur le devant de la scène. Mais les modèles qui en dérivent ne rendent pas compte de la localisation des

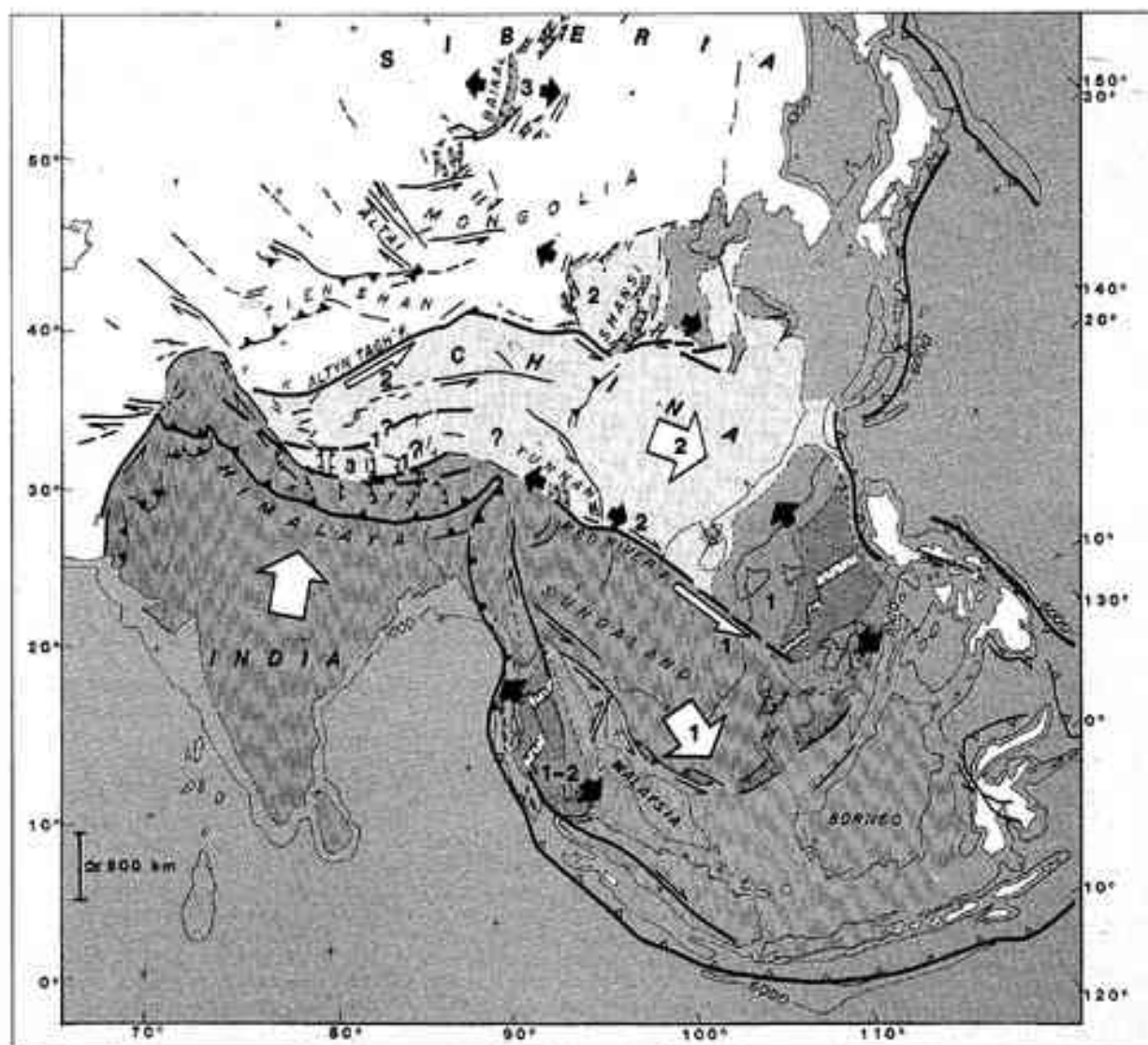


Fig. 1 - Tectonique récente de l'Asie (d'environ -50 Ma à l'actuel). ——— Fautes principales; Nature des failles: ——— décrochements, ——— failles normales des rifts, ▲ △ chevauchement ou subduction, 0: mouvements des principaux blocs continentaux (les rotations ne sont pas précisées), ● ● extension résultant des coulisages horizontaux. Les chiffres se réfèrent aux principales phases d'expulsion: 1: -35 à -15 Ma, 2: -15 Ma à l'actuel, 3: zones d'extension encore peu développées.

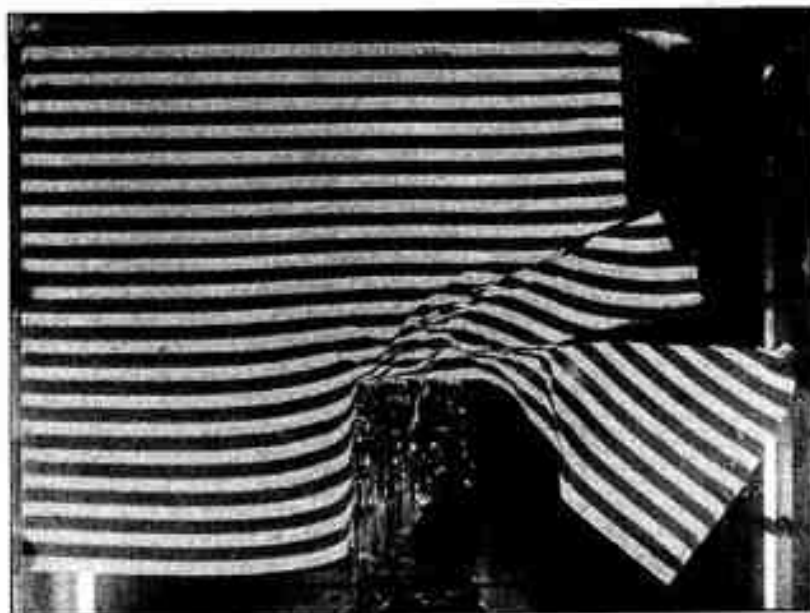


Fig. 2 - Pénétration d'un poinçon rigide (représentant l'Inde) dans un bloc de plastiline dont le bord droit est laissé libre (représentant l'Asie). Le front du poinçon (5 cm) représente la longueur de l'Himalaya (2 000 km). Cette expérience de déformation plane ne nous renseigne que sur les couissements horizontaux, qui se produisent dans la nature sur les failles de décrochement. Une pénétration d'environ 6 cm (2 500 km) produit la formation de deux grands décrochements sénestres qui guident successivement l'expulsion de deux blocs de plastiline, analogues à l'Indochine et à l'ensemble Tibet-Chine du Sud. Les zones d'ouverture entre ces blocs sont semblables aux zones de rifts et aux bassins d'extension tertiaires qui se sont formés à l'extrémité des grands décrochements asiatiques (Shansi et plaines de Chine du Nord, mer de Chine méridionale, mer d'Andaman).

» déplacements les plus rapides et les plus grands sur des zones de failles étroites dont la longueur dépasse souvent 1 000 km.

La collision Inde-Asie

Qu'en est-il au juste ? C'est l'étude de la collision de l'Inde avec l'Asie, engendrant depuis 50 millions d'années les déformations les plus grandes et les plus variées, qui a permis de faire progresser rapidement les idées et les modèles dans le domaine de la tectonique continentale. Plusieurs équipes françaises ont pris une part essentielle à ce progrès, à la fois

Continental tectonics - It was the study of the collision of India with Asia which enabled great progress to be made in forming ideas and models in the field of continental tectonics, the most spectacular advances being linked with satellite observations. The deformation of the Asian continent is characterized by the alternation between two extreme phenomena: continuous deformation and local slippage at the boundary between blocks that are not or only slightly deformed.

au laboratoire et depuis dix ans sur le terrain, par l'intermédiaire de grands programmes de coopération scientifique entre le CNRS et divers organismes et instituts de la République Populaire de Chine. Outre l'écoute permanente des séismes et la détermination de leurs mécanismes, donc des mouvements locaux de la croûte, qui nous informe au rythme lent, sporadique du fonctionnement actuel de la planète, c'est l'observation satellitaire de la surface continentale qui a permis les avancées les plus décisives.

Le satellite permet en effet de « voir » le continent et de poser les problèmes à l'échelle appropriée : plusieurs centaines de kilomètres. Dans un premier temps, les images des satellites Landsat ont autorisé une cartographie précise et homogène de la géométrie et de la nature des failles récentes qui taillent la croûte du continent asiatique. Elles ont permis de déchiffrer la hiérarchie de ces systèmes de failles et de les relier mécaniquement les uns avec les autres (Fig. 1). Dans un deuxième temps, le satellite SPOT, qui offre une vision stéréoscopique avec une résolution au sol de dix mètres (près de dix fois supé-

rieure à celle des premiers Landsat) a rendu possible la mesure des décalages récents de la morphologie par les failles les plus rapides au nord de l'Himalaya. Le réchauffement holocène qui, il y a 10 000 ans environ, consacre la fin de la période glaciaire du Würm, s'est en effet produit de manière si rapide qu'il a laissé des marques morphologiques et des dépôts contemporains corrélables sur de grandes étendues. L'analyse systématique de décalages de moraines, de lignes de rivages et de cônes de déjection (Fig. 3) vieux d'environ 10 000 ans, a donc permis d'établir un bilan des vitesses de mouvement actuelles en Asie. Ce bilan révèle que la pénétration de l'Inde dans l'Asie à environ 5 cm/an raccourcit la croûte d'environ 2 cm/an dans l'Himalaya et dans les montagnes de l'Asie centrale (Tien Shan et Altai) et qu'elle expulse le plateau du Tibet vers l'E-SE de 2 à 3 cm/an (Fig. 1). Le couissement horizontal sur de grands décrochements tels que la faille de l'Altyn Tagh au bord nord du Tibet (Fig. 3) absorbe donc environ 30 % de la convergence entre les deux continents. L'épaississement de la croûte par chevauchement imbriqué dans les chaînes de montagnes rend compte du reste. A l'exception du Tibet, où la croûte profonde épaissit, donc réchauffe et ramollit, se déforme de façon lente et diffuse, les mouvements sont localisés aux frontières de grands blocs continentaux relativement isomiques, donc actuellement rigides (Inde, Tarim, Chine du sud). Là, les mouvements sont rapides. Une partie du déplacement du Tibet est transmise au bloc de Chine du sud, qui se sépare ainsi de la Mongolie, donnant naissance aux rifts de Chine du nord (Fig. 1), et couisse par rapport à l'Indochine le long de la faille du Fleuve Rouge.

La déformation de l'Asie modélisée

Mais il faut se garder d'extrapoler simplement le champ des déplacements actuels au passé. Des expériences de laboratoire, où l'on poinçonne un bloc de plastiline déformable dont l'une des bordures est laissée libre (Fig. 2) imitant le bord Sud-Est du continent asiatique peu maintenu par les zones de subduction qui le bordent (Fig. 1), suggèrent deux phases d'expulsion successives, dont l'existence est confirmée par les résultats de campagnes de terrain récentes, et par la reconstruction de l'ouverture de la mer de Chine Méridionale. Poussée vers le Sud-Est par l'Inde de -35 à -15 millions d'années environ, l'Indochine a coulé de près de 600 km par rapport à la Chine du sud le long de la faille du Fleuve Rouge, donnant nais-



Fig. 3 - Image SPOT de la trace de la faille de l'Altyn Tagh dans la vallée de la rivière Karakax (Kun Lun, limite N.-O. du Tibet). Cônes alluviaux et terrasses sont décalés d'environ 200 m par cette faille à coulissage horizontal sénestre (le compartiment sud s'est déplacé vers la droite par rapport au compartiment nord). C'est sur cette faille, longue de 2 000 km, que s'effectue le glissement vers l'est du plateau tibétain, chassé par la poussée de l'Inde.

sance à une étroite ceinture de roches métamorphiques déformées en sens inverse du glissement actuellement observé sur cette faille, et aux granites les plus jeunes d'Asie (23 millions d'années) en dehors de l'Himalaya. Cette première expulsion a produit l'ouverture de la mer de Chine méridionale et la séparation de l'Indonésie et de la Chine (Fig. 1) à une vitesse de 3 à 5 cm/an.

En bref, les observations actuellement disponibles indiquent que la déformation finie du continent asiatique pendant toute la durée de la collision est caractérisée par une succession discontinue de phases d'épaississement crustal, d'expulsions de « plaques », et d'ouvertures de rifts et de bassins océaniques, qui contribuent en proportion variée et à des époques diverses à absorber la pé-

nétration de près de 3 000 km de l'Inde dans l'Asie depuis 50 millions d'années.

L'alternance entre deux situations extrêmes

Il semble donc que le « va-et-vient » historique des idées concernant la déformation continentale reflète un « va-et-vient » réel, physique, du comportement mécanique de la lithosphère continentale dans le temps. L'alternance entre les deux situations extrêmes que représentent la déformation continue et le coulissage localisé à la frontière de blocs peu ou pas déformés est gouvernée d'une part par l'histoire thermique de la lithosphère continentale, source de différences et d'instabilités rhéologiques qui entraînent rigidité ou mollesse

de certaines régions et localisation des déformations dans de longues zones étroites, et d'autre part par le fait que les grands épisodes orogéniques correspondent à une redistribution, sans création ou disparition importante de volume, de la croûte continentale. La croûte océanique naît du manteau et retourne au manteau. Dorsales océaniques comme zones de subduction fonctionnent donc facilement en régime permanent pendant des centaines de millions d'années, et de très grands déplacements horizontaux peuvent être absorbés par des frontières dont la géométrie reste stable. Au sein des continents, une telle stabilité est impossible, et la géométrie des zones de déformations change sur des échelles de temps beaucoup plus courtes (de l'ordre de la dizaine de millions d'années), nécessitant la formation et la propagation de zones de déformation nouvelles. Une fois localisées sur toute l'épaisseur de la lithosphère, ces zones guident les principaux déplacements, rendant inutile pour un temps la déformation de grands volumes. Ce sont les changements et les instabilités dans le temps qui rendent la tectonique continentale si complexe et si riche.

Comprendre plus en détail les mécanismes de cette tectonique nécessite désormais la plus étroite collaboration entre géochronologistes et géologues structuraux.

Paul Tzipponier, physicien à l'Institut de physique du globe de Paris, responsable de l'Unité « tectonique, mécanique de la lithosphère » (URA 1099 CNRS), Université Paris VI, Tour 24-14, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

Les Alpes : une vision nouvelle

La comparaison avec les océans actuels et l'auscultation sismique profonde ont renouvelé la connaissance d'une chaîne étudiée depuis plus d'un siècle.

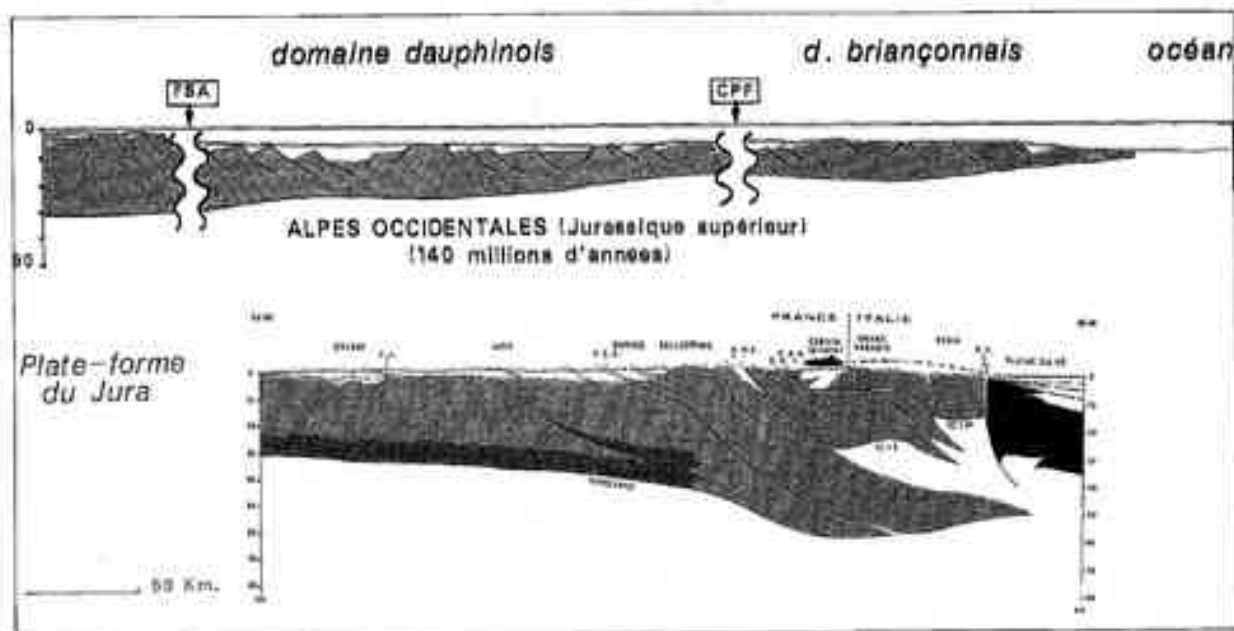
Marcel Lemoine
Marc Tardy

Étudiées depuis le XIX^e siècle, les Alpes sont l'une des chaînes de montagnes les mieux connues au monde. Situées au cœur de l'Europe occidentale, elles ont été très tôt le lieu

privilegié où s'analysèrent la genèse et la structure des chaînes de montagnes péisées. Pendant près d'un siècle, les géologues ont accumulé une masse énorme d'observations. Le premier quart de ce siècle, en particulier, a vu la découverte de la structure des Alpes en gigantesques nappes de charriage empilées les unes sur les autres. La chaîne était deve-

nue un « classique », une référence, malgré une complexité qui a pu faire dire qu'elle était la « chaîne la plus compli-

History and deep structure of the Alps: new data - A new interpretation of tectonic-stratigraphic data shows that the Alps are derived from a vanished ocean and from its continental margins; their Jurassic structure and history are closely comparable with present-day oceans. In addition, deep seismic profiling has resulted in a better understanding of the collision-induced structure of the chain. The crust and the upper mantle have been piled up in slices, hence the explanation of the thickening of the Alpine crust.



Coupe supérieure : interprétation du profil ECORS, montrant la structure actuelle de la chaîne (jaune = manteau ; rouge = croûte africaine ; orange = croûte européenne ; la croûte inférieure litée est distinguée au N.O.). Coupe inférieure : reconstitution il y a 150 Ma, un océan et sa marge continentale européenne. La comparaison des deux coupes montre que la croûte continentale a d'abord été étirée et amincie lors de la genèse de l'océan et de sa marge, tandis que la collision l'a réépaissie et découpée en grandes écailles chevauchantes. Les repères FSA et CPF permettent d'évaluer l'ampleur du raccourcissement horizontal (3 à 4 fois), compensé par l'épaississement de la croûte continentale.

« queue du monde »... peut-être seulement parce que la plus étudiée.

L'océan disparu et ses marges continentales

Au cours de la dernière décennie, l'essor récent de la géologie océanique et de la tectonique des plaques a conduit à une nouvelle vision : la chaîne est issue de l'océan Téthys (voir l'article de J. Dercourt et L.-E. Ricou), né il y a 160 millions d'années, et de ses marges continentales européenne et africaine, dont la structure ancienne et l'histoire se sont avérées identiques à celles d'océans actuels comme l'Atlantique.

Ces progrès sont d'abord dus aux comparaisons avec les océans actuels. Mais, plus accessibles que celles qui se trouvent au fond des mers actuelles, les structures paléo-océaniques des Alpes servent maintenant de termes de comparaison aux géologues marins, ainsi qu'aux pétroliers qui recherchent sous les mers le pétrole de l'après 2000 : un exemple de fécondation mutuelle entre deux disciplines des Sciences de la Terre.

Le tréfonds de la chaîne

Il y a 70 millions d'années, l'Afrique, cessant de s'éloigner de l'Europe, s'en

est rapprochée. Le vieil océan a disparu, et les deux continents sont entrés en « collision », d'où la structure en plis et vastes écailles. Cette structure était depuis longtemps connue dans ses grandes lignes, mais sur une profondeur relativement faible (quelques kilomètres).

Durant les années 1986 et 1987, le programme national ECORS (Etude de la Croûte Continentale et Océanique par Réflexion et Réfraction Sismiques), auquel se sont jointes les sociétés BP et Elf, s'est associé au programme italien CROP (Crosta Profonda) pour réaliser le premier profil à grande pénétration à travers les Alpes.

Le trajet de ce profil (365 km entre la plaine du Pô au Nord-Ouest de Turin et le Massif Central à l'Ouest de Tournus) a été choisi perpendiculaire aux structures alpines. L'interprétation, qui tient également compte des données de la géologie de surface, montre :

— à l'arrière, au Sud-Est, la croûte continentale italo-africaine. Sa position actuelle, effondrée (F.C. : faille du Canavese) ne doit pas faire illusion : des témoins du chevauchement africain (Austro-Alpin : CAA) comme le Mont Cervin, conservés quelques kilomètres au Nord du profil, sont là pour rappeler qu'elle appartient à la plaque Afrique qui recouvre et emboutit la plaque européenne déformée ;

— à l'avant, de grandes écailles, issues de l'ancienne marge européenne et reposant sur la croûte continentale européenne peu déformée mais flexurée (la profondeur du Moho passe ainsi de 27 km sous le Massif Central à 30 km sous le Jura et presque 60 km sous les Alpes). Ce sont, du Nord-Ouest au Sud-Est, et de bas en haut : 1° : Ecaille des massifs cristallins externes, qui, en chevauchant (FSA) la croûte européenne sur 25 km environ, a refoulé à son front la couverture décollée et déformée du Jura ; 2° : Ecaille moyenne limitée par le chevauchement pennique frontal (CPF), à laquelle participe le manteau (CH : Corps d'Ivrée Inférieur) ; 3° : Ecaille supérieure portant les restes de l'océan disparu, et associée au Corps d'Ivrée principal (CIP).

■ Marcel Lemoine, directeur de recherche au CNRS, Groupe d'étude de la marge continentale (URA 718 CNRS), Laboratoire de géodynamique sous-marine, BP 48, 06230 Villefranche-sur-Mer.

■ Marc Tardy, professeur à l'Université de Savoie, Unité « géologie alpine, volcanologie, pétrologie » (URA 69 CNRS), Laboratoire de géodynamique, BP 1104, 73011 Chambéry Cedex.

La géodésie spatiale

La géodésie spatiale permet maintenant la mesure des déformations à court terme de la surface de la Terre. Les applications en sont nombreuses.

Jean-Claude Ruegg

L'utilisation de la géodésie spatiale et en particulier du GPS (Global Positioning System) est en train de renouveler profondément les méthodes d'étude de la cinématique de la lithosphère. En effet, la précision de localisation impliquée par l'utilisation de récepteurs bifréquences et la relative facilité d'emploi du système permettent l'étude des déformations de la surface de la Terre sur des périodes de temps brèves, quelques années, comparées aux millions d'années sur lesquels porte la cinématique globale classique. En outre, alors que jusqu'à présent la tectonique des plaques était fondée sur l'étude de la lithosphère océanique, les méthodes de géodésie spatiale permettent d'inclure dans les modèles cinématiques la lithosphère continentale. Les premiers résultats dans ce domaine ont été obtenus essentiellement par le VLBI (interférométrie à très longue base) et par mesure laser sur satellites. Bien que très précises (10^{-8} à 10^{-9} en précision relative), ces méthodes sont lourdes et très coûteuses et peu adaptées aux études détaillées du champ de déformation qui sont requises, notamment aux frontières entre les plaques. Le GPS au contraire permet une grande souplesse d'utilisation et l'implantation de réseaux temporaires mobiles facilement réitérables, appuyés éventuellement sur des réseaux globaux.

Space geodesy - The highly precise measurement of positions and the ease of use of space geodesy (especially the GPS, Global positioning system) has meant that studies of short-term (a few years) deformations of the Earth's surface has become possible. GPS finds applications in the Earth Sciences in areas such as direct measurement of the movement of plates and the accumulation of deformations, detailed studies of seismic cycles and the setting up of a network for monitoring volcanoes.

Outre la géodésie classique (c'est-à-dire la connaissance de la forme de la Terre et l'établissement de référentiels géodésiques), les applications aux sciences de la Terre sont nombreuses :
- en géodynamique et tectonique, le GPS va permettre une mesure directe du mouvement des plaques, de l'accumulation de déformations aux frontières de plaques, et de la tectonique intraplaque à l'échelle régionale ou globale ;
- en sismologie, la répétition à intervalles réguliers de mesures sur des réseaux géodésiques locaux ou régionaux rend possible une étude détaillée du cycle sismique, c'est-à-dire du processus d'accumulation et de relâchement des contraintes tectoniques au niveau d'une zone sismique : elle permet de contri-

huer à la caractérisation de la source sismique et d'envisager l'étude de signaux précurseurs à la rupture (prévision) ;

- en volcanologie, ces techniques vont favoriser la mise en œuvre de réseaux locaux de surveillance pour l'étude des mécanismes éruptifs et l'alerte aux éruptions.

Des expérimentations GPS sont déjà menées dans ce sens dans diverses régions du monde, notamment par des équipes américaines. En France, plusieurs campagnes ont été menées depuis trois ans pour tester les potentialités de ce système par rapport à des mesures de géodésie classiques par l'IPG, l'IGN, le CEA et l'INSU, notamment à Djibouti et dans les Pyrénées (1987, 1989), à l'Etna (1988), au Mexique (1989).

Jean-Claude Ruegg, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de sismologie (URA 195 CNRS), Institut de physique du globe de Paris, Université Paris VI, tour 14-24, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.



Mesures du programme GPS et de géodésie terrestre lors de l'expérience Jajisco, en novembre 1989 au Mexique.

Les Andes centrales : surrection et déformation

La surrection des Andes résulte d'un fort épaississement de la croûte continentale. Celle-ci est soumise à des déformations compressives mais aussi extensives.

Jacques-Louis Mercier

Sous les Andes, les foyers des séismes sont localisés dans une zone qui, partant de la fosse océanique péruano-chilienne, descend sous le continent sud-américain. Ces séismes résultent de la fracturation de la lithosphère froide et cassante du fond du Pacifique (la plaque de Nazca) qui s'enfonce, subductée dit-on, à une vitesse d'environ 10 cm/an dans le manteau terrestre chaud et visqueux en dessous des Andes (la plaque sud-américaine). Mais il existe aussi une sismicité superficielle qui témoigne d'une déformation active des Andes. La chaîne andine résulte donc de la convergence d'une plaque océanique et d'une plaque continentale.

Les équipes françaises travaillent depuis de nombreuses années sur la formation des Andes, sur leurs volcans et sur leur sismicité. De nombreux problèmes s'y posent ; ici nous en examinerons plus particulièrement deux : quand et pourquoi les Andes ont-elles acquis une altitude dépassant 4 000 m ? pourquoi y trouve-t-on des déformations en raccourcissement, mais aussi en allongement, assez paradoxales dans ce contexte de convergence ?

Les Andes se soulèvent...

L'analyse des dépôts sédimentaires des Andes permet de reconstituer les étapes de leur soulèvement, lequel est essentiellement lié à l'épaississement (50 à 70 km d'épaisseur), de la croûte continentale légère reposant sur le milieu plus dense du manteau. Il se réalise en trois stades :

The central Andes : uplift and deformation - The Andes are situated in a zone of oceanic-continental convergence. Their great elevation above sea level implies major crustal thickening. They show changes in tectonic process over time, resulting from the balance between horizontal forces linked with convergence and gravitational forces resulting from their great elevation.

- entre environ 100 et 80 millions d'années (Ma), les Andes centrales ressemblent à l'actuel Arc volcanique insulaire indonésien ;

- entre 80 et 40 Ma, les Andes sont plissées et émergent progressivement ;

- enfin, entre 40 Ma et l'Actuel, la Cordillère acquiert progressivement son altitude élevée.

La meilleure approche du soulèvement récent est actuellement fournie par l'analyse des anciennes surfaces morphologiques (les Punas) qui relient la Cordillère à la côte pacifique. Sachant que la pente originelle des dépôts sur de telles surfaces est de l'ordre de 1°, la surface la plus ancienne montre que vers 17-20 Ma, les Andes avaient déjà atteint une altitude minimale de 2 000 m. Au Pérou, on observe de grandes surfaces morphologiques « emboîtées » : plus elles sont récentes, plus leur altitude est

basse, car elles ont été formées par creusement (et dépôt) dans les surfaces plus anciennes quand celles-ci se sont soulevées. La datation de ces surfaces montre que la surrection est discontinue et liée aux principales périodes de compression des Andes (≈ 17 , ≈ 10 , ≈ 7 et ≈ 2 Ma). L'essentiel du soulèvement s'est réalisé entre - 26 et - 6 Ma à un taux moyen de 0,15 mm/an, mais avec des taux réels qui ont fortement varié dans le temps.

Dans les Andes septentrionales où existent des restes d'anciennes croûtes océaniques (des ophiolites) incorporées à la chaîne, l'épaississement crustal peut résulter de la collision de microbloques continentaux avec le continent sud-américain, suivant un modèle établi pour l'épaississement crustal du Tibet. Des données paléomagnétiques sont en faveur de l'existence de tels microbloques d'origine pacifique dans les Andes septentrionales mais pas dans les Andes centrales. Là, la chronologie du soulèvement semble indiquer que l'épaississement crustal résulte d'un raccourcissement tectonique. Toutefois, les seuls plissements andins paraissent insuffisants pour rendre compte d'une épaisseur de 70 km de la croûte. On admet donc que des apports magmatiques provenant de la fusion partielle du manteau situé sous les Andes pourraient aussi contribuer à cet épaississement.



Dans la Cordillère Blanche (Pérou central), les plans de failles normales pliocènes-quaternaires forment des facettes triangulaires pouvant atteindre 1 000 m de haut. L'activité récente de ces failles produit des escarpements (triangles) de 10 à 40 m de haut dans les dépôts glaciaires âgés de moins de 50 000 ans et indique un étirement de la croûte dans les Hautes-Andes.

... et se déforment

La sismicité des Andes traduit un raccourcissement actuel de la croûte suivant une direction E-W, en gros parallèle à la convergence entre les plaques de Nazca et sud-américaine. Ce raccourcissement est localisé le long du Pacifique, au voisinage du contact des deux plaques et le long de l'Amazonie, dans les bas-pays subandins. Par contre, dans les Hautes-Andes, des failles normales quaternaires et actives (voir figure) montrent un étirement horizontal de la croûte suivant une direction N-S.

Ainsi dans les régions topographiquement basses, la croûte continentale subit un raccourcissement. Par contre, dans les Hautes-Andes, les forces de volume résultant du poids des masses rocheuses soulevées tendent à «aplatir» la croûte, donc à l'allonger. Celle-ci s'allonge suivant la direction de résistance la plus faible, c'est-à-dire en direction N-S, orthogonalement à la poussée E-W qui résulte de la convergence entre les plaques de Nazca et sud-américaine. Le taux d'allongement de la croûte sous les Hautes-Andes est cependant faible : au maximum 1 à 2 % au cours des 1 à 2 derniers Ma, l'«écoulement» de cette croûte étant difficile puisqu'il se fait approximativement dans la direction de la chaîne.

Les travaux de terrain montrent cependant que les Hautes-Andes ont été aussi soumises à un raccourcissement E-W vers - 2 Ma et aussi à un allongement E-W entre - 5 et - 2 Ma. L'altitude des Hautes-Andes et par conséquent le poids de la masse rocheuse n'ayant pas changé de façon significative au cours de cette période, c'est nécessairement la poussée de la plaque océanique sur les Andes qui a dû changer au cours du temps pour produire les différents types de déformation observés. Il est possible que de tels changements soient liés à la variation du pendage de la lithosphère océanique dans le manteau, qui a pour conséquence de modifier le couplage mécanique entre les deux lithosphères et donc la contrainte transmise à la bordure continentale andine.

Ces deux exemples, parmi bien d'autres, montrent que les Andes sont pour les chercheurs des Sciences de la Terre un extraordinaire laboratoire pour l'étude des phénomènes géodynamiques liés aux zones de subduction.

■ Jacques-Louis Mercier, professeur à l'Université Paris-Sud, directeur de l'Unité «géophysique et géodynamique interne» (URA 1369 CNRS), bdt. 509, Centre d'Orsay, 91504 Orsay.

Les bassins sédimentaires

Les bassins sédimentaires, des réacteurs thermo-chimio-structuraux où s'élaborent la totalité des charbons et hydrocarbures et une bonne partie des minerais.

■ Michel Séguret
Guy Vasseur

Si la sédimentation est le phénomène le plus apparent dans un bassin, les mécanismes de leur formation dépendent de nombreux facteurs et notamment du comportement de l'ensemble lithosphère/asthénosphère.

Ainsi, par exemple, la formation et le piégeage d'hydrocarbures dépendent 1°) des phénomènes géodynamiques créant la subsidence, c'est-à-dire l'enfoncement du substratum du bassin et la dépression comblée par les sédiments; 2°) des conditions de sédimentation qui doivent être non oxydantes, pour que la matière organique d'origine planctonique soit conservée; 3°) de l'évolution thermique au cours de l'enfouissement, le réchauffement permettant la maturation de la matière organique en huile (60 à 115 °C), puis sa transformation en gaz; 4°) des déformations des strates qui structurent les réservoirs et forment les pièges; 5°) des processus très complexes de migration dans un milieu hétérogène de fluides polyphasés (eau, saumures, huile, gaz) permettant la concentration dans des roches réservoirs.

Deux modèles géodynamiques

La recherche fondamentale s'est jusqu'à présent surtout intéressée aux mécanismes généraux de formation des bassins. Deux grands modèles géodynamiques ont été proposés.

Dans les zones de divergence de plaques lithosphériques, les bassins en extension se forment par étirement et amincissement de la lithosphère continentale: des failles d'extension affectent la partie supérieure (cassante) de la croûte, et la croûte inférieure subit un étirement ductile, tandis que la limite thermique lithosphère/asthénosphère remonte, et que l'ensemble de la lithosphère se réchauffe. Si l'étirement reste faible, le rift évolue en bassin intracontinental (bassin de Paris, mer du Nord): après la subsidence initiale et la sédimentation syn-rift de la phase d'extension, le refroidissement progressif de la lithosphère provoque sa détumescence, et une subsidence dite thermique permet le dépôt des sédiments post-rift. En

raison de l'isostasie, la surcharge sédimentaire provoque elle-même une subsidence supplémentaire qui est voisine des deux tiers de la subsidence totale. Lorsque l'étirement est important, la croûte se rompt et il se forme un rift océanique et deux marges continentales passives.

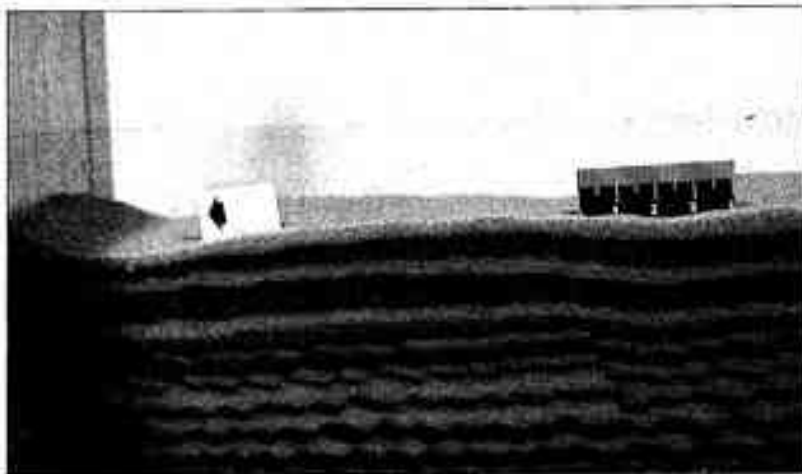
Dans les zones de convergence de plaques, les bassins d'avant-chaîne correspondent au comblement de la dépression créée en avant d'une chaîne de montagne en cours de formation. Ainsi, dans la vallée du Gange, la plaque indienne est déprimée car chargée par les Himalayas, et plusieurs kilomètres de matériel grossier provenant du démantèlement des reliefs comblent la dépression. Il en est de même dans le bassin molassique suisse au nord des Alpes et les bassins de l'Ebre ou de l'Aquitaine, de part et d'autre des Pyrénées.

La technique pétrolière adaptée à l'étude des bassins

La structure des bassins est maintenant étudiée par sismique réflexion dont la technique (pétrolière) a été adaptée par le programme ECORS pour donner une image de l'ensemble de la croûte continentale. Leur mécanisme de formation est aussi analysé par modélisation, soit analogique permettant d'étudier les géométries des failles, soit numérique permettant la prise en compte de l'évolution thermique.

La recherche pétrolière s'est évidemment axée sur des problèmes plus directement appliqués, mais, grâce aux énormes moyens technologiques mis en œuvre (sismique réflexion, mesures diagrapiques en forages), elle a révolutionné l'approche du phénomène sédimentaire. En étudiant l'architecture des corps sédimentaires observés en sismique réflexion à l'échelle de tout un bassin, P. Vail et ses collaborateurs de Exxon ont montré que cette géométrie

Sedimentary basins - Sedimentary basins are generally associated with phenomena of extension (rifting) or of compression (mountain chain front basins) of the lithosphere. The sedimentation and subsequent transformation of the sediments into rocks, coal or hydrocarbons is influenced by the climate, tectonic constraints and transfers of heat and fluids.



Dans cette expérience, réalisée à Rennes par le Centre armoricain d'études des socles, des couches de sable de couleur différente sont déposées successivement. A chaque incrément de dépôt, le modèle est étiré de 4 %. Le caoutchouc à la base du modèle assure un étirement homogène. L'extension totale est de 60 %. Les failles dont le rejet diminue vers le haut montrent une courbure résultant du synchronisme sédimentation/déformation. Des géométries identiques, fréquemment observées sur les profils de sismique réflexion, sont interprétées à l'aide de telles expériences.

» dépend des variations du niveau marin au cours du temps. La corrélation à l'échelle mondiale des courbes relatives obtenues dans les différentes régions a permis d'établir une courbe des variations de niveau de l'océan mondial au cours du temps. Les causes de ces variations sont externes (glaciations) mais surtout internes: changement de forme du fond des océans en fonction des vites-

ses d'expansion des rides océaniques, ou déformation du géoïde. Le modèle de stratigraphie séquentielle mis au point fournit un paradigme unificateur de toute la géologie sédimentaire (corrélations stratigraphiques à l'échelle mondiale, prévision des lithologies et donc des possibilités de formation et d'accumulation de substances utiles, évolution des paléobathymétries, contrôle de l'évolution

biologique).

L'une des perspectives les plus fascinantes de la recherche actuelle sur les bassins concerne la compréhension physique et la modélisation numérique des phénomènes de transport qui s'y déroulent. Les bassins sont appréhendés comme des systèmes complexes où interagissent les contraintes tectoniques (sur les roches), la pression des fluides et le transport d'éléments chimiques et de chaleur (par conduction et par convection). Les lois physiques sont relativement bien connues. Le développement récent des supercalculateurs autorise la mise au point de modèles numériques simulant une grande variété de processus physiques et chimiques; parallèlement, l'informatique moderne permet aussi le traitement et la « visualisation » d'ensembles complexes de données de terrain qui fournissent les contraintes indispensables au calage de ces modèles numériques.

■ Michel Séguet, professeur à l'Université des sciences et techniques du Languedoc, Unité « tectonique et géochronologie » (URA 1371 CNRS), Laboratoire de géologie des bassins, place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5.

■ Guy Vasseur, directeur de recherche au CNRS, Centre de géologie et de géophysique de Montpellier (UPR 361 CNRS), place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5.

La formation des combustibles fossiles

La diagenèse, un événement géologique discret aux conséquences économiques importantes.

■ Norbert Clauer

La diagenèse englobe toutes les transformations que subissent les sédiments entre le dépôt et le métamorphisme. Sujet important par son influence sur la concentration des matières utiles (gisements d'intérêt économique et ressources thermiques), elle correspond à une évolution continue de systèmes physico-chimiques complexes en déséquilibre permanent, mais dont les composants se trouvent à l'équilibre à différents moments du processus. Son

étude a été abordée à l'aide de méthodes variées: analyses minéralogiques, géochimiques et cristallographiques des minéraux, études pétrophysiques des roches, calculs des transferts de masses et des domaines de stabilité des minéraux, simulations thermodynamiques des réactions...

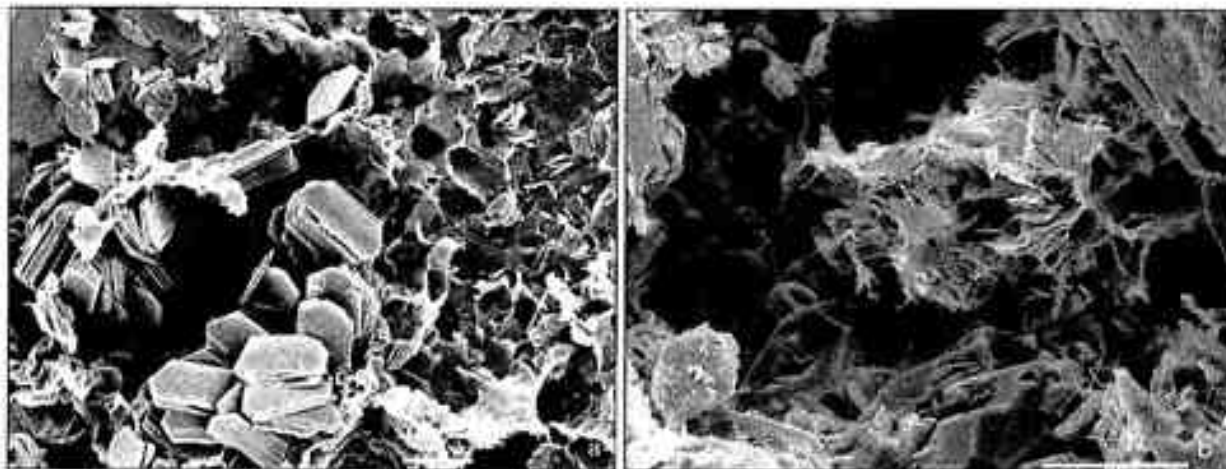
Les bassins sédimentaires constituent la réserve principale des hydrocarbures fossiles de la planète. On comprend alors que l'une des priorités dans la recherche en Sciences de la Terre a été l'étude de leur histoire diagenétique. En effet, la productivité des champs pétro-

liers dépend dans une large mesure des conditions d'enfouissement des sédiments, car elles déterminent les pressions et températures atteintes par les matières organiques, précurseurs des huiles et des gaz, et agissent sur la porosité et la perméabilité des roches réservoirs.

Parmi tous les paramètres qui conditionnent et contrôlent les réactions diagenétiques, les principaux sont la température, la pression, les fluides et la durée des réactions.

Diagenèse et température

La température est certainement le paramètre le plus important pour la maturation des matières organiques: si elle est trop faible, la conversion en huile ou en gaz ne se fait pas, et si elle est trop forte, l'huile et le gaz sont détruits. De nombreuses études ont donc été consacrées à la détermination des paléotempératures atteintes par les sédiments d'un bassin, avec des techniques diffé-



Détails d'un grès réservoir au microscope électronique à balayage. Remplissage de pores par des plaquettes (dickite, figure a) ou des fibres (illite, figure b) de minéraux argileux, avec une surcroissance de quartz dans le coin supérieur gauche. La barre dans le coin inférieur droit correspond à 10 μ m.

rentes. Des travaux récents ont montré que l'information peut différer notablement selon la méthode employée et les positions des points d'analyses, ce qui, loin d'être contradictoire, permet d'affiner les interprétations. Ainsi, par exemple, dans la zone orientale d'un champ pétrolier d'Indonésie, l'évolution de la matière organique suit la courbe des températures actuelles, ce qui implique qu'elle s'est poursuivie jusqu'à récemment. La cristallinité du minéral argileux illite-smectite suit, par contre, les repères chronostratigraphiques, ce qui suggère que son évolution s'est arrêtée plus tôt, avec la structuration du bassin. Dans la partie méridionale du même champ, l'évolution de la matière organique suit celle du minéral argileux illite-smectite, qui reste calquée sur les marqueurs chronostratigraphiques. Ici, tous les indicateurs ont été bloqués par la structuration tectonique. Ces différences, visibles à une échelle kilométrique, peuvent être provoquées par des variations de gradients thermiques et de compositions chimiques des fluides.

La durée de la diagenèse

Parmi les autres facteurs qui influencent la conversion de la matière organique en huile et gaz, il y a la durée de l'enfouissement des roches, c'est-à-dire

Formation of fossil fuels - Diagenesis includes those alterations that sediments undergo after deposition and before metamorphism. It is important from an economic standpoint, as it induces concentration of ores and geothermal resources. Temperature, pressure, timing of burial and fluids represent some of the most important factors involved.

du (des) phénomène(s) diagénétique(s). Le piégeage du pétrole dans un réservoir peut être appréhendé depuis peu par la datation isotopique des phases argileuses authigènes* qui cristallisent en même temps, préférentiellement dans les niveaux à eau associés aux niveaux à huile. Ainsi, en mer du Nord dans le champ d'Alwyn, le piégeage des huiles dans les réservoirs gréseux du Brent s'est probablement produit pendant l'Eocène moyen, il y a 40 millions d'années (Ma), à une profondeur d'environ 1 800 mètres et à une température de l'ordre de 110 °C. Des fluides chauds, générés dans des roches situées en-dessous des niveaux du Brent, ont dû migrer verticalement à cette époque le long de drains ou de fractures. La durée du phénomène diagénétique qui accompagne cette accumulation d'huile dans un réservoir peut, en première approximation, correspondre à la différence entre les âges des minéraux argileux formés dans un niveau à huile et dans le niveau à eau associé. Si tel est le cas, le piégeage des huiles dans les réservoirs du bassin des Shetlands, en mer du Nord, n'a pas excédé 2 Ma il y a 40 Ma.

La signature chimique des fluides

Les fluides représentent un autre facteur essentiel dans la conversion diagénétique de la matière organique en huile ou gaz. En fait, on ne dispose que des fluides actuels et l'analogie avec les paléofluides est souvent délicate, car des interactions avec les roches modifient différenciellement leur chimie, mais aussi les propriétés physiques des roches (voir l'article d'Y. Guéguen). C'est ainsi que la teneur et la position du matériel argileux influencent les dissolutions et

les authigénèses que peuvent subir les roches et qui sont illustrées sur la figure. De plus, la signature chimique des fluides reflète souvent plus les interactions avec les roches pendant la migration qu'après le piégeage. La combinaison de résultats pétrophysiques et géochimiques va alors permettre de retracer les chemins empruntés par les fluides, et de tester les modèles de leurs circulations dans les bassins sédimentaires, car les contraintes sont autant physiques que chimiques. En effet, les transferts de matière sont régis par des lois strictes, et beaucoup de transformations minérales ne se réalisent que dans des conditions de système chimique ouvert autorisant un large renouvellement des fluides. D'importants mouvements de fluides sont alors nécessaires à l'échelle d'un bassin entier, mais la taille de tels cycles circulatoires pose de réels problèmes géochimiques et physiques.

La recherche fondamentale a joué et continue de jouer un rôle essentiel dans l'étude de l'histoire diagénétique des bassins sédimentaires par le développement et l'application des méthodes d'analyse. Elle contribue aussi à la compréhension globale du phénomène, par une démarche qui combine des approches intégrées pour l'acquisition et le traitement de l'information analytique.

*Authigène : tout minéral qui prend naissance dans une roche est considéré comme authigène. Le mécanisme est appelé authigénèse.

■ Norbert Clauer, directeur de recherche au CNRS, Centre de géochimie de la surface (UPR 6251 CNRS), 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg Cedex.

Les anciens océans

Des changements majeurs de la température, du caractère oxydant et de la distribution des matières nutritives sont intervenus dans l'océan à la fin du Paléozoïque.

Francis Albarède

Le riche enregistrement de l'histoire des océans terrestres que nous procurent les forages océaniques disparaît très rapidement dès que l'on atteint le Crétacé inférieur et le Jurassique. En effet, la croûte océanique la plus ancienne ne dépasse pas 200 millions d'années et encore ne l'a-t-on touchée directement qu'exceptionnellement. Tous les sédiments plus anciens ont donc été soit plaqués aux continents dans les zones de « mélange », soit souvent enfouis par le phénomène de la subduction. La très large majorité des sédiments qui seraient susceptibles de nous informer sur les océans anciens sont malheureusement peu représentatifs de dépôts de mer ouverte. Ils sont plutôt des sédiments déposés sur la plateforme continentale dont on connaît les conditions particulières d'agitation, de lumière, de température, d'activité biologique, de composition chimique, souvent à l'écart des grands courants océaniques.

Si l'on tient compte de ces restrictions, on peut néanmoins essayer de comprendre comment le contrôle du fonctionnement de l'océan par la température, la salinité, les courants, les distributions de l'oxygène et des matières nutritives nécessaires à l'activité organique, etc., a pu évoluer au cours des âges géologiques. Le géologue doit donc rechercher les observations indicatives de ces divers paramètres dans les anciens océans.

Au commencement, des mers chaudes

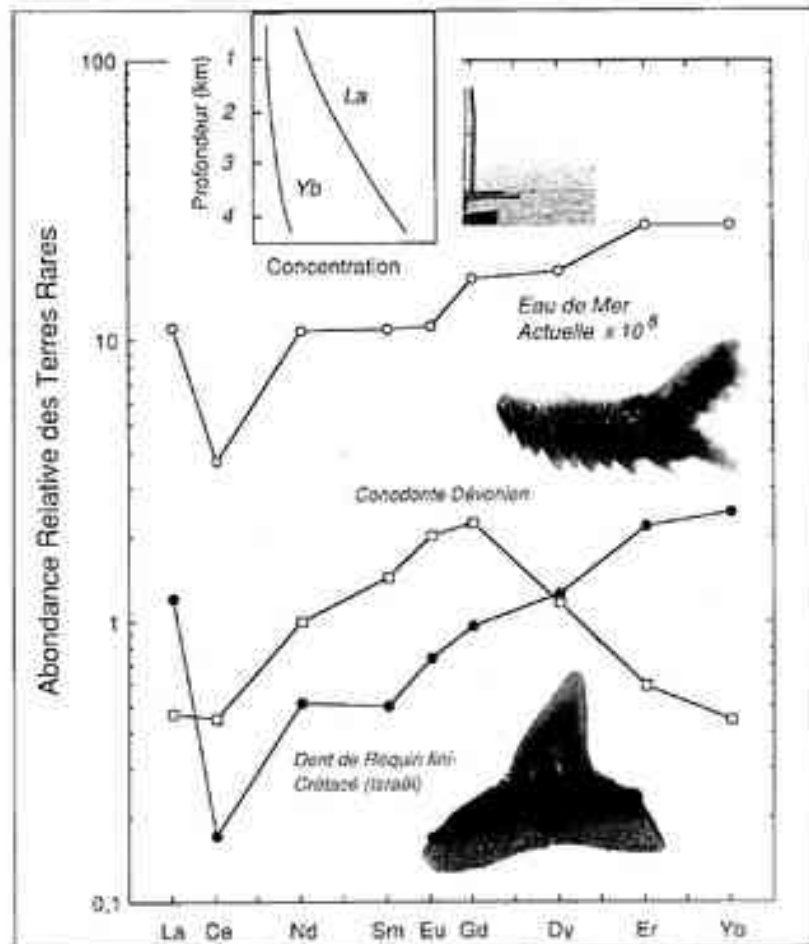
Tout d'abord, les thermomètres isotopiques, essentiellement le fractionnement de l'oxygène 18 entre phosphates biogé-

niques (apatite), silice et eau de mer, suggèrent qu'au Précambrien et au Primaire, les températures marines étaient de plusieurs dizaines de degrés supérieures aux températures actuelles. Ainsi des températures de 40 à 50 degrés ont-elles été proposées pour des conodontes (pièces buccales phosphatées de vers aujourd'hui disparus) d'âge cambrien et dévonien. L'incertitude sur

l'abondance de l'oxygène 18 dans l'eau de mer qui pourrait avoir changé au gré de l'activité interne du globe et sur la préservation des sédiments pourrait cependant tempérer cette estimation.

Des témoins : les terres rares

Les constituants chimiques qui participent au cycle biologique de l'océan tels qu'oxygène, carbonates, nitrates, phosphates, métaux lourds, ... ont subi les contrecoups de l'évolution des grands groupes vivants. Au départ de la chaîne alimentaire, le plancton n'a pas toujours existé dans sa forme actuelle, puisqu'il a occupé progressivement l'océan à partir des « niches » de plateforme : les grandes radiations du phytoplancton (diatomées, coccolithophoridés) ont lieu au



Distribution normalisée des terres rares (ordonnées par numéro atomique) dans l'eau de mer atlantique actuelle, une dent de requin fossile d'âge fini-Crétacé d'Israël et un conodonte phosphaté d'âge dévonien de la Montagne Noire. En encadré, le profil des concentrations de l'lanthane (La) et de l'ytterbium (Yb) dans la colonne d'eau montre le plus fort contrôle du cérium (Ce) par l'activité biologique de surface. Les distributions similaires dans la dent crétacée et l'eau de mer actuelle contrastent avec celle observée dans le conodont et suggèrent un contrôle inorganique compensant une activité de surface réduite au Paléozoïque. De même, le déficit relatif en cérium (Ce), moins important dans la conodont, suggère un océan beaucoup plus réducteur qu'actuellement.

Ancient oceans - The study of geochemical tracers (oxygen isotopes and rare earth elements) in phosphate sediments of biogenic origin suggests that major changes in temperature and oxygen concentrations occurred in the oceans at the end of the Paleozoic. At the same time, it is likely that a major evolutionary radiation of plankton organisms completely changed the distribution of nutrients in the water column.

Jurassique, celles du zooplancton (radiolaires, foraminifères) au Crétacé. L'enregistrement de changements notables dans la distribution verticale des sels nutritifs est clair si l'on s'adresse aux terres rares; éléments qui s'absorbent aisément sur les débris biologiques sédimentant dans l'océan. Aujourd'hui, ces éléments sont, comme les sels nutritifs, appauvris en surface (voir figure).

A l'exception du cérium (Ce), cet appauvrissement est plus important pour les éléments légers (La, Nd, Sm) que pour les lourds (Er, Yb) et il en résulte une distribution typique des océans modernes que l'on peut observer soit directement dans l'eau de mer, soit dans les débris phosphatés récents. L'enregistrement que nous en donne le phosphate des conodontes dévoniens est totalement différent, car la concavité de la distribution est opposée à celle des distributions de terres rares dans les phosphates modernes. Par analogie avec l'étude de ces éléments dans les nodules de manganèse, il semble très probable qu'un processus d'adsorption inorganique contrôlait leur concentration dans l'eau de mer pré-jurassique, ce qui confirme que la chaîne alimentaire de surface devait différer fortement de son équivalent moderne.

Une variation inexpliquée du potentiel rédox

Un changement majeur des conditions d'oxydo-réduction de l'eau de mer semble avoir accompagné cette évolution biologique et chimique de la surface de l'océan. Dans les conditions marines, le cérium offre la particularité de se partager entre deux états d'oxydation, trivalent et tétravalent. Le cérium tétravalent est virtuellement insoluble dans l'eau de mer ce qui, dans l'océan actuel, se traduit par un déficit relatif très prononcé du cérium par rapport aux autres terres rares (voir figure). Si l'on considère les conodontes paléozoïques et triasiques, ce déficit est faible ou absent: à cette époque, le cérium marin était donc largement sous sa forme trivalente, au comportement analogue à celui des autres terres rares. Un océan ancien possiblement plus réducteur que l'océan post-jurassique semble être une conséquence inévitable de ces observations. Que ce caractère réducteur soit lié à une activité biologique ou à des conditions atmosphériques différentes, ceci est une question non résolue.

Francis Albarède, professeur à l'Institut polytechnique de Lorraine, responsable du Laboratoire de géochimie isotopique du Centre de recherches pétrographiques et géochimiques (UPR 6821 CNRS), 15, rue Notre-Dame des Pauvres, BP 20, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex.

Vertébrés fossiles et collisions continentales: l'exemple de l'Inde

Grâce aux vertébrés fossiles, nous savons que la rencontre de l'Inde et de l'Eurasie remonte à la limite Crétacé-Tertiaire.

Eric Buffetaut,
Jean-Claude Rage

En ce qui concerne la distribution des êtres vivants, les déplacements continentaux donnent lieu à deux types principaux de situations: 1° la séparation de deux masses continentales divisée en deux une aire de répartition d'organismes terrestres auparavant continue (tout en établissant des connexions entre populations marines autrefois disjointes); et 2° la collision de deux blocs continentaux met en contact des groupes d'organismes terrestres auparavant séparés par une barrière marine. Le premier cas conduit à une divergence entre les faunes et flores ainsi séparées, qui évoluent indépendamment dans des directions différentes. Le second cas permet au contraire des échanges fauniques et floristiques entre deux régions peuplées au départ par des organismes ayant auparavant évolué séparément, et donc souvent très différents, ce qui conduit à une compétition entre les espèces ainsi mises en présence et généralement à des extinctions.

Quand les continents se rencontrent

Les vertébrés continentaux, dont les capacités de dispersion au travers de barrières marines sont souvent fort réduites, sont un matériel de choix pour l'étude des conséquences biogéographiques des collisions de continents. Ils livrent des données importantes sur leur chronologie, complétant les informations fournies par d'autres approches (le paléomagnétisme notamment), et parfois modifiant les conclusions tirées de celles-ci. Le principe utilisé est très simple: si l'on considère un bloc A entrant en collision avec un bloc B faisant auparavant partie d'une province biogéographique différente, la première apparition sur A d'un vertébré continental appartenant à la province de B signale l'établissement d'une connexion continentale plus ou moins continue entre les blocs A et B. Connaissant l'âge géologique du fossile en question, on obtient ainsi la date la plus récente possible pour l'établissement de la connexion. Les

faunes du bloc A ne contenant aucun élément originaire de la région B correspondent en revanche aux périodes antérieures à la collision.

Faire parler les fossiles

La collision de l'Inde avec l'Asie, qui a donné naissance à l'Himalaya, fournit un bon exemple d'une telle utilisation des vertébrés fossiles. Les premières reconstitutions réalisées dans le cadre de la tectonique des plaques suggéraient que cette collision avait débuté vers le milieu de l'Eocène, il y a quelque 45 millions d'années, au terme d'une longue dérive faisant suite à l'éclatement du supercontinent austral du Gondwana, qui avait séparé l'Inde de l'Afrique et de l'Antarctique. Dans ce modèle, l'Inde apparaissait comme un «radeau» isolé depuis sa séparation du Gondwana jusqu'à sa collision avec l'Asie. Des faunes de mammifères éocènes trouvées en Inde et au Pakistan étaient en accord avec cette hypothèse: elles révélaient la présence sur le sous-continent d'animaux connus par ailleurs en Mongolie ou en Chine, immigrants venus de l'Asie ne résultant pas d'une évolution dans le cadre de l'Inde isolée. Toutefois, des découvertes ultérieures, dans le cadre d'une collaboration franco-indienne, n'ont pas tardé à modifier cette interprétation, avec surtout les restes d'un crapaud de la famille des Pelobatidae (voir photo b) trouvés en Inde dans les intertrapps, couches remontant à la limite Crétacé-Tertiaire (environ 65 millions d'années). Cette famille n'étant connue par ailleurs que sur les continents du Nord, dits eurasiatiques, sa présence indique clairement que des connexions terrestres, suffisamment continues pour autoriser le passage d'un

Fossil vertebrates and continental collisions: the Indian example - Terrestrial fossil vertebrates can be of great help in dating continental collisions. The study of Cretaceous vertebrate faunas from India, for instance, suggests that the Indian subcontinent came in contact with Eurasia as early as the Cretaceous-Tertiary boundary, but not earlier.



Parmi les dinosaures de la Formation Lameta (Crétacé terminal de l'Inde centrale), on n'a pas rencontré certaines formes très abondantes à cette époque en Asie, comme les hadrosaures, ou « dinosaures à bec de canard » (ici, photo (a), *Tsintaosaurus*, du Shandong en Chine). Ceci suggère qu'il n'existait pas encore de connexion terrestre entre le sous-continent indien et l'Asie. En revanche, la présence, dans les intertrapps, déposés à la limite Crétacé-Tertiaire, d'un crapaud de la famille des Pelobatidae (ici, photo (b), un spécimen actuel), suggère l'établissement d'une telle connexion, car les Pelobatidae ne sont alors connus que sur les continents du Nord.

► animal ne supportant pas l'eau de mer, existaient déjà entre l'Inde et le reste de l'Asie à une époque bien antérieure à ce que l'on admettait généralement. La découverte ultérieure dans les intertrapps d'un mammifère, lui aussi d'affinités laurasiatiques, a confirmé que l'établissement d'un contact entre l'Inde et la marge méridionale du continent asiatique remonte à la limite Crétacé-Tertiaire. Les plus récentes reconstitutions paléogéographiques de l'histoire de l'océan Indien, fondées sur le paléomagnétisme, contrairement aux précédentes, sont d'ailleurs en accord, quant à la date de la collision, avec les données paléontologiques obtenues avant que le paléomagnétisme vienne leur donner raison. La paléontologie des vertébrés

permet d'ailleurs de fixer avec une précision plus grande encore la date de l'établissement d'une connexion terrestre entre l'Inde et l'Asie. En effet, on connaît en Inde, dans la Formation Lameta, une faune de dinosaures assez riche datant de la fin du Crétacé (Maastrichtien), qui a des affinités étroites avec les assemblages contemporains connus sur divers continents du Sud (Amérique du Sud, Afrique et Madagascar, notamment), mais ne comporte pas de représentants de certains groupes de dinosaures très fréquents dans le Crétacé supérieur d'Asie, comme par exemple les hadrosaures (voir photo a). Ceci permet de supposer que l'Inde, à cette époque, était encore séparée de l'Asie, et ne possédait qu'une faune héritée de

celle du Gondwana. Ces dinosaures indiens sont de peu antérieurs aux Pelobatidae et mammifères d'affinités laurasiatiques trouvés dans les intertrapps, et il est donc probable que le contact Inde/Asie s'est produit tout à fait à la fin du Crétacé, entre le dépôt de la Formation Lameta et celui des intertrapps. L'intervalle de temps ainsi proposé pour cette collision ne dépasse pas 5 millions d'années.

■ Eric Buffetaut, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de paléontologie des vertébrés (URA 720 CNRS)

■ Jean-Claude Rage, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de paléontologie des vertébrés (URA 720 CNRS), Université Paris VI, 4, place Jussieu, Tour 25-15, 75252 Paris Cedex 05

Le visage de la Terre au Paléozoïque

A partir du signal magnétique des roches et de l'observation des fossiles, on reconstitue les géographies successives des continents bordant l'Atlantique.

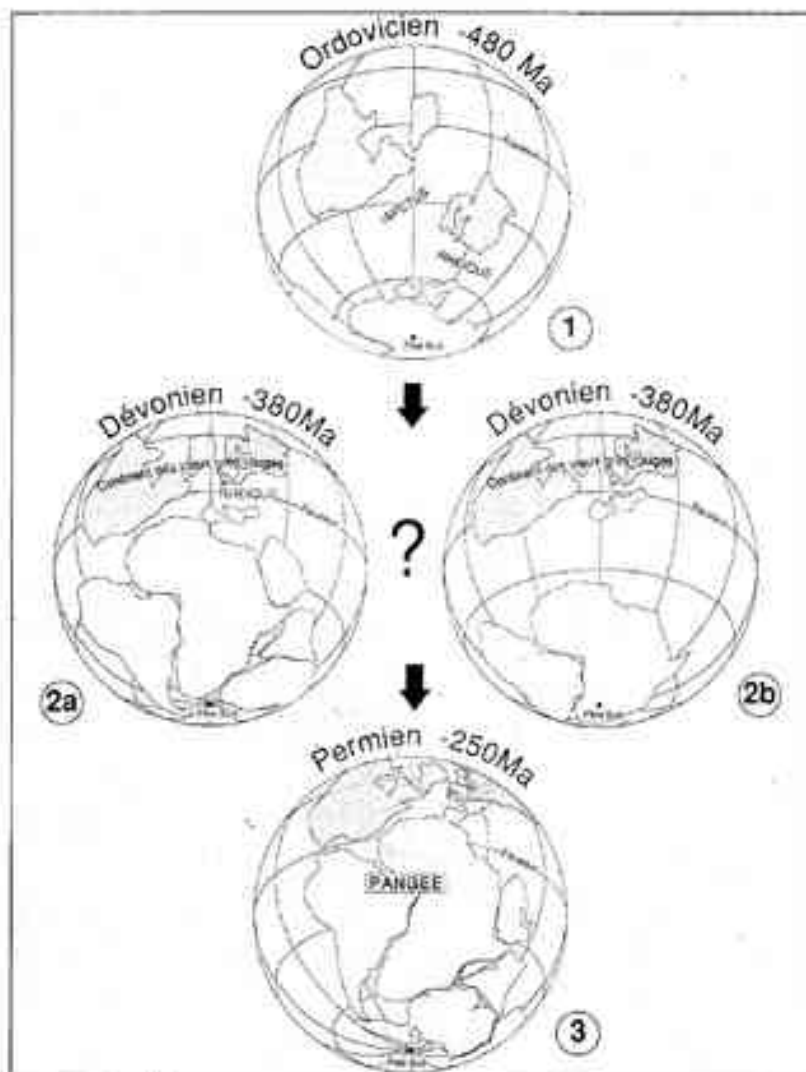
■ Hervé Perroud
Michel Robardet

La reconstitution des géographies qui se sont succédé dans le passé géologique au-delà de 200 millions d'années (Ma) présente de sérieux

difficultés. En raison de l'ancienneté des périodes considérées et des modifications qui se sont produites depuis (ouvertures et fermetures d'océans, formation de chaînes de montagnes, etc.), il est impossible de se référer à la géographie actuelle ou à la cinématique de fonds océaniques totalement disparus.

Le paléomagnétisme des roches, l'étude des sédiments et des fossiles qu'ils contiennent, permettent toutefois de définir de grandes masses continentales et de reconstituer leurs positions dans le passé (paléogéographie).

Certains minéraux ont en effet la propriété de mémoriser le champ magnétique (CMT) ambiant au moment de leur cristallisation sous la forme d'une aimantation rémanente. Par comparaison avec la géométrie actuelle du CMT, on peut déduire de la direction de cette aimantation la latitude et le Nord (effet boussole) du moment. En étudiant ainsi des roches d'âges variés, on peut donc restituer les déplacements des différentes unités qui constituent la croûte continentale.



Géographies successives au cours du Paléozoïque. Chaque unité paléogéographique est représentée par une couleur : province méditerranéenne en jaune, laurentienne en vert et balto-scandinave en bleu. Les contours actuels des continents ne correspondent pas exactement aux contours de ces provinces ; ils sont représentés pour faciliter la lecture des schémas.

Par analogie avec les milieux marins actuels, les roches sédimentaires et leurs fossiles renseignent sur les paléo-environnements. Certains sédiments, comme les carbonates, les récifs, les évaporites (sel, gypse), les dépôts glacio-marins, indiquent des conditions climatiques assez précises. D'autre part, la distribution géographique des organismes marins est déterminée par la température, la salinité et la profondeur des eaux, et par les possibilités de communication entre populations. Elle permet de définir des provinces caractérisées par des associations fauniques, dont la composition et l'évolution traduisent le degré de proximité.

La configuration actuelle des conti-

nents qui bordent l'océan Atlantique résulte de la dislocation au cours des derniers 200 Ma d'un super-continent unique dénommé Pangée (Fig. 3), formé à la fin du Paléozoïque et bien défini au Permien, il y a 250 Ma. Les recherches paléogéographiques sur le Paléozoïque

The face of the Earth in the Paleozoic - Paleogeographic reconstructions of the circum Atlantic continents during the Paleozoic era are based on the combination of paleomagnetic and biostratigraphic results. They reveal the continental mobility in the Paleozoic and give the background for the formation of the Caledonian and Hercynian mountain belts.

zoïque (- 550 à - 230 Ma) visent donc à retrouver les diverses étapes qui ont conduit à la constitution de cette Pangée. Elles sont en partie menées par des équipes françaises, tant en paléomagnétisme qu'en biostratigraphie.

A l'Ordovicien

De - 490 à - 435 Ma, la répartition des sédiments et la distribution des faunes benthiques (trilobites, brachiopodes) permettent de reconnaître plusieurs grandes provinces dont la latitude a pu être précisée par le paléomagnétisme (Fig. 1) :

- La province méditerranéenne comprenant le Nord de l'Afrique, l'Europe méridionale et centrale, le Moyen-Orient, où la sédimentation terrigène pratiquement sans carbonates et les faunes peu diversifiées témoignent d'eaux froides. La position de ces régions à des latitudes élevées est attestée par l'existence de dépôts glacio-marins associés à une calotte glaciaire sur le craton africain. Les résultats paléomagnétiques situent le pôle Sud au voisinage de l'Afrique du Nord et confirment les affinités entre l'Europe Méridionale (Espagne, Bretagne) et le craton africain.

- La province laurentienne, comprenant l'essentiel de l'Amérique du Nord, le Groënland, le Spitzberg, dont les sédiments presque entièrement carbonatés, souvent récifaux, et les faunes benthiques très diversifiées, totalement différentes des associations méditerranéennes, indiquent des eaux chaudes. Le paléomagnétisme permet de la situer de part et d'autre de l'équateur.

- La province balto-scandinave incluant la Scandinavie, le nord de la Pologne, et la plate-forme russe, dont les carbonates accompagnés de sédiments argileux et les faunes correspondent à des mers tempérées chaudes. La paléolatitude de cette province n'a pu encore être déterminée très précisément. Elle serait probablement située entre 20° et 50° Sud.

Ces provinces sont séparées par des barrières océaniques :

- l'océan Iapetus entre les provinces laurentienne et balto-scandinave, dont la fermeture ultérieure donnera naissance à la chaîne Calédonnienne (Ecosse, Scandinavie).

- l'océan Rhénique, ou Médio-Européen, dont la cicatrice mal reconnue se situerait entre le Massif Armoricain et l'Ardenne.

Au Silurien

De - 435 à - 400 Ma, la répartition géographique des faunes et des sédiments, avec les argiles noires riches en matière organique de la province médi-

Ma	Périodes	Eres
- 50		Cénozoïque (Tertiaire)
- 100	Crétacé	
- 150	Jurassique	Mésozoïque (Secondaire)
- 200	Trias	
- 250	Permien	
- 300	Carbonifère	
- 350	Dévonien	Paléozoïque (Primaire)
- 400	Silurien	
- 450	Ordovicien	
- 500	Cambrien	
- 550		
- 4 500	Temps Précambriens	

terraneenne, les carbonates et les évaporites de l'Amérique du Nord, l'existence de récifs dans les régions balto-scandinaves, semble indiquer une géographie peu différente de celle de l'Ordovicien. Malheureusement les résultats paléomagnétiques pour cette période, peu nombreux et parfois contradictoires, ne permettent pas de préciser ce schéma.

Au Dévonien

De - 400 à - 350 Ma, l'océan Iapetus est refermé et sa saturation a provoqué l'édification de la chaîne Calédo-

nienne. Un des traits majeurs est la naissance du Continent des Vieux Grès Rouges, bordé au sud par un domaine marin, du sud des Îles Britanniques à la Pologne. Les affinités étroites entre les faunes benthiques du Maroc et celles du sud de l'Europe (Péninsule Ibérique, Massif Armoricain) suggèrent que la province méditerranéenne avait conservé son unité (Fig. 2a). La sédimentation dans ces régions où les faciès carbonatés, parfois récifaux, prennent de l'importance, s'accorde avec la baisse significative de latitude mise en évidence par le paléomagnétisme. En outre, on assiste à un effacement progressif du contraste faunique entre provinces méditerranéenne et balto-scandinave, avec apparition d'espèces communes, ce qui traduit une réduction de largeur de l'océan Rhénique, et annoncerait sa fermeture et la formation de la chaîne Hercynienne, au cours du Carbonifère.

Cependant, les résultats paléomagnétiques concernant l'Afrique ne concordent pas tous avec cette reconstruction; la discussion porte essentiellement sur la latitude de la marge nord de l'Afrique, et l'existence d'une aire océanique entre Europe Méridionale et Afrique du Nord au Dévonien (Fig. 2b).

Au Carbonifère

De - 350 à - 280 Ma, les masses continentales sont en contact, mais

continuent à se déplacer les unes par rapport aux autres, provoquant de grandes déformations (chaîne Hercynienne) accompagnées de rotations de blocs révélées par le paléomagnétisme, de l'Espagne à l'Europe Centrale.

Ces reconstitutions paléogéographiques fournissent des indications importantes sur la mobilité des continents, et donc sur la tectonique globale au Paléozoïque. L'efficacité et la fiabilité de la méthodologie est renforcée par l'approche pluridisciplinaire (paléomagnétisme et biogéographie). Même s'il reste beaucoup à faire pour restituer complètement les géographies passées, les résultats acquis imposent des contraintes aux modèles géodynamiques proposés pour expliquer les grandes structures géologiques, comme les Chaînes Calédonienne et Hercynienne.

Hervé Pestroud, chargé de recherche au CNRS, responsable du Laboratoire de paléomagnétisme, Centre armoricain d'étude structurale des socles (UPR 4661 CNRS), Laboratoire de géophysique interne, Université de Rennes I, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex.

Michel Robardet, directeur de recherche au CNRS, responsable de l'Unité « paléozoïque marin gondwanien » (URA 1364 CNRS), Laboratoire de paléontologie et stratigraphie, Université de Rennes I, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex.

STRENGTHENING THE TETHYS OCEANIC CRUST

La reconstruction d'un océan disparu : la Téthys

Les principales réserves d'hydrocarbures sont accumulées autour de la Téthys, océan disparu. On tente maintenant de cartographier les étapes de son évolution.

Jean Dercourt
Luc-Emmanuel Ricou

Plus de 80% des ressources d'hydrocarbures du globe sont situées dans une bande de terrains qui s'étend d'Ouest en Est des Caraïbes au Moyen-Orient et au Sud-Est asiatique. Leur caractéristique commune est de représenter l'héritage que nous ont laissé les marges d'un océan aujourd'hui disparu par rupture d'une ancienne masse

continentale unique, la Pangée, regroupant l'ensemble des continents connus aujourd'hui. Cette rupture a créé, il y a 200 millions d'années, deux masses continentales séparées par un océan équatorial, la Téthys, dispositif qui permettait une circulation océanique et un équilibre climatique fort différents de ceux que nous connaissons actuellement, sur une planète ne possédant pas alors de calottes glaciaires.

Ultérieurement, la mobilité ininterrompue des plaques a créé de nouvelles

ruptures océaniques, au Nord entre l'Eurasie et l'Amérique du Nord, au Sud entre l'Afrique, l'Amérique du Sud, l'Inde, l'Australie et l'Antarctique. Elle a entraîné le morcellement et la disparition de l'océan téthysien par mise en collision des masses continentales nord et sud dont le témoin le plus remarquable est l'ensemble des chaînes de montagnes qui courent des Caraïbes au travers de l'ensemble alpine-himalayen jusqu'en Indonésie.

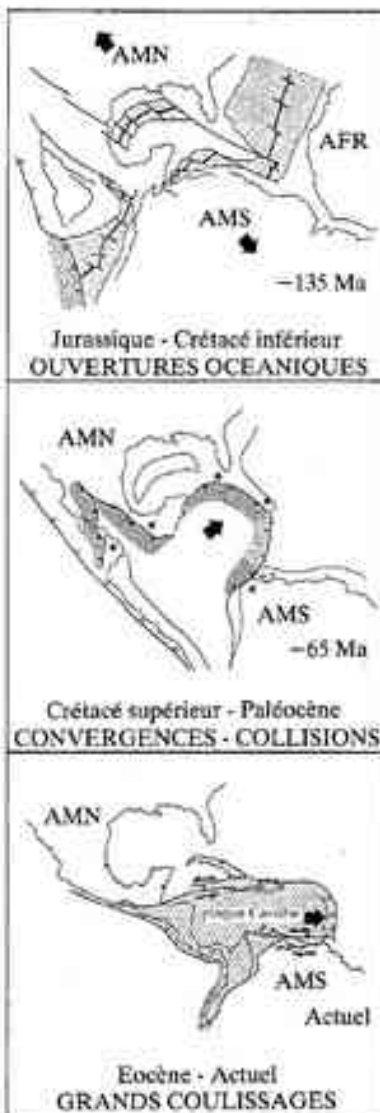
The reconstruction of a vanished ocean: the Tethys - An ocean aligned E-W separated Pangaea in two, but the opening of the Atlantic and Indian oceans gradually compressed it, forming the alpine chain stretching from the Caribbean to the Pacific. The margins of the Tethys harbour the principal hydrocarbon reserves of the world. A synthesis of how it functioned is attempted.

Les eaux de l'océan téthysien, équatoriales à tropicales, furent le siège d'une activité biologique intense. Son plancher et ses marges furent l'objet de constants remaniements, soit d'une façon assez calme et progressive sur les parties dites marges passives et comparables aux marges actuelles de l'Atlantique, soit d'une façon bien plus tourmentée sur les parties dites marges actives et comparables aux marges actuelles du Pacifique, soit encore par mise en collision des deux marges dont les exemples actuels sont justement les chaînes alpi-no-himalayennes issues de la Téthys.

Comment établir une carte

Pour établir une carte à une époque donnée, nous procédons par étapes :

- 1° - en fixant la position des principales plaques, c'est-à-dire en donnant aux océans actuels la largeur qu'ils avaient à l'époque considérée (ceci est possible car l'âge de la croûte océanique s'inscrit dans les basaltes au fur et à mesure de leur émission); apparaît alors entre les continents du Nord et ceux du Sud un espace béant que nous remplissons;
- 2° - en déployant les chaînes de montagnes faites de la superposition des bordures écrasées de la Téthys, ce qui implique des révisions sur le terrain; ainsi, en Bulgarie et en Grèce nous avons repris la structure du massif des Rhodopes avant de déplier;
- 3° - en situant les petits blocs continentaux aujourd'hui écrasés dans la chaîne alpine; ainsi en Roumanie, nous avons étudié le paléomagnétisme de vastes massifs des Monts métallifères pour déterminer les rotations que lui avaient imposées les collisions par étapes de l'Afrique et de l'Europe;
- 4° - en déterminant les biotopes des principaux groupes fossiles de part et d'autre de la Téthys, les mélanges de populations déterminant les époques de connexions; ainsi la comparaison de mammifères entre les Amériques (Nord et Sud) permet de déterminer les séparations, puis les rapprochements des continents;
- 5° - en reconnaissant la géométrie des axes d'émissions des laves qui ouvraient la Téthys. Les très rares lambeaux de la croûte océanique préservés en copeaux dans les montagnes fournissent cette di-



Trois étapes clés de la Téthys. Un océan naît, qui sépare les continents. Un fragment du Pacifique l'emboutit, puis est éjecté vers l'Ouest en raclant les bords Nord et Sud. Les flèches noires indiquent le sens de déplacement des plaques. AMN = Amérique du Nord; AMS = Amérique du Sud; AFR = Afrique. (D'après Stephan et al., 1989).

rection; ainsi les ouvertures océaniques entre l'Arabie et l'Iran ont été établies dans les fragments océaniques aujourd'hui englobés dans la chaîne du Sultanat d'Oman.

L'enquête en reconstitution du passé à partir de tels enregistrements discontinus et disparates fait largement appel à la notion de cohérence. Elle a fait un bond en avant avec la mise en œuvre des concepts de tectonique globale, décloisonnant les différentes disciplines des Sciences de la Terre, et entraînant la recherche de données pertinentes au plan de la mise en cohérence interdisciplinaire qui est le cœur même du travail du Groupement scientifique «Téthys».

Les résultats espérés, à l'exemple de travaux antérieurs de type comparable mais moins ambitieux, sont une meilleure localisation du lieu et du moment où ont été réunies les conditions favorables à la création et à la préservation des ressources naturelles que nous exploitons, le pétrole bien entendu, mais aussi les phosphates, les bauxites, l'or, etc.

Au-delà même, cet effort de synthèse, des Caraïbes au Sud-Est Asiatique, est une pierre apportée à la connaissance de la planète Terre.

Le GST (Groupement Scientifique Téthys) associe des chercheurs du CNRS et des universités à des sociétés industrielles (Elf, SNEA(P), Total-CFP) et des instituts de recherche (IFREMER, IFP).

Jean Dercourt, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, directeur du Groupement scientifique «Téthys», Laboratoire de tectonique et stratigraphie (URA 1315 CNRS).

Luc-Emmanuel Ricou, directeur de recherche au CNRS, directeur associé du Groupement «Téthys», Laboratoire de tectonique et stratigraphie (URA 1315 CNRS), Université Pierre et Marie Curie, 4, Place Jussieu, Tour 15-16, 75252 Paris Cedex 05.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place Aristote (Grenoble) 38100 Mouton Cedex

LA GÉOLOGIE DU TIBET

La 1^{re} campagne géologique franco-chinoise du Tibet a eu lieu en 1980. Son but était d'expliquer l'histoire géologique complexe de cette région et plus particulièrement la formation de l'Himalaya, à l'aide de très nombreuses cartes et animations.

Auteur: Jacques MERCIER. Réalisateur: Jacques MERCIER et Bernard DUPRE
Production: CNRS Audiovisuel 1981 - 25 minutes - Supports de diffusion: 16 mm et vidéo 3/4"

L'activité volcanique à l'origine de l'extinction des espèces ?

La cause des extinctions massives d'espèces a fait couler beaucoup d'encre. Une nouvelle hypothèse est proposée.

Vincent Courtillot

Des extinctions massives d'espèces, en apparence catastrophiques, se sont produites à la limite des ères primaire et secondaire, et plus près de nous, secondaire et tertiaire (voir figure) : ce dernier événement est connu pour marquer la fin du règne des dinosaures, mais aussi de nombreuses autres espèces tant continentales que marines. L'aspect catastrophique de ces disparitions fait l'objet de chaudes controverses : pour certains, il résulte de la mauvaise qualité d'enregistrements si anciens, pour d'autres, il y a bien eu réelle et brève catastrophe. La théorie la plus généralement admise, depuis 1980, attribue cette catastrophe à un impact d'astéroïde d'une dizaine de kilomètres de diamètre. Cette théorie repose principalement sur l'observation dans les sédiments de la limite secondaire-tertiaire (connue aussi sous le nom de Crétacé-Tertiaire ou KTB) de quantités anormales d'iridium, métal très peu abondant dans la croûte terrestre, mais présent dans les météorites.

Les épanchements de lave du Deccan

Un travail pluridisciplinaire, largement dû à des équipes françaises, a récemment permis de proposer une autre hypothèse : la catastrophe Crétacé-Tertiaire serait due à l'éruption en Inde de quantités exceptionnelles de magma. Les traps du Deccan sont des basaltes continentaux dont les restes recouvrent le quart nord-ouest de l'Inde sur plus de 500 000 km², avec parfois plus de 1500 m d'épaisseur. Leur volume original devait atteindre deux millions de km³. L'étude de la direction d'aimantation de ces laves a permis de montrer qu'elles avaient dû être mises en place en un temps très bref. Leur séquence n'a en effet enregistré que deux inversions du champ magnétique terrestre. Or ce champ se renverse très irrégulièrement, mais environ une à deux fois par million d'années (pour la période considérée). L'étude paléontologique de fossiles contenus dans des couches sédimentaires retrouvées en dessous des coulées les plus anciennes et également empi-

sonnées entre quelques-unes des premières coulées, a permis de montrer que le volcanisme avait démarré pendant la toute dernière subdivision (paléontologique) de l'ère secondaire, longue d'à peine un million d'années. Depuis quelques années, paléomagnéticiens et paléontologues ont construit une échelle de plus en plus précise des temps géologiques, basée sur l'intégration des observations des changements de polarité magnétique et d'espèces fossiles caractéristiques. La comparaison des résultats obtenus dans le Deccan avec cette échelle de référence permet de montrer que les traps ont commencé à s'épancher dans l'intervalle de polarité « normale » connu sous le nom de code de 30N, ont culminé dans l'intervalle inverse 29R (connu pour renfermer la KTB), pour s'achever dans l'intervalle normal 29N. Ceci implique une durée maximale étonnamment brève de 500 000 ans. La durée réelle des phases principales de l'éruption a pu être encore plus brève, le volcanisme étant connu pour être un phénomène très épisodique.

De nombreux échantillons des laves du Deccan ont été datés par six laboratoires différents avec la technique de datation isotopique la plus précise qui soit disponible, la méthode ⁴⁰Ar/³⁹Ar (qui utilise les isotopes de l'argon). L'âge trouvé est de 66 ± 2 millions d'années : à la précision de la méthode, l'éruption apparaît donc comme un phénomène bref. L'âge obtenu est compatible avec celui estimé jusqu'à présent pour la limite Crétacé-Tertiaire.

Il apparaît difficile d'imaginer que ce flot exceptionnel de magma (au moins 10 km³/an, taux déjà très élevé, mais peut-être même 100 km³/an sur une période encore plus brève), dont il n'existe pas d'autre exemple depuis 65 millions d'années, n'ait avec les extinctions en masse aucune relation causale.

Les chercheurs ont en fait pu montrer qu'un tel volcanisme pouvait être responsable de certaines des anomalies physiques, chimiques et isotopiques décelées dans les meilleurs enregistrements stratigraphiques de la KTB. Deux laboratoires ont mis en évidence des concentrations anormales d'iridium dans les sublimés recueillis lors d'éruptions du Mauna Loa à Hawaï et du Piton de la Fournaise à la Réunion. Ces vol-

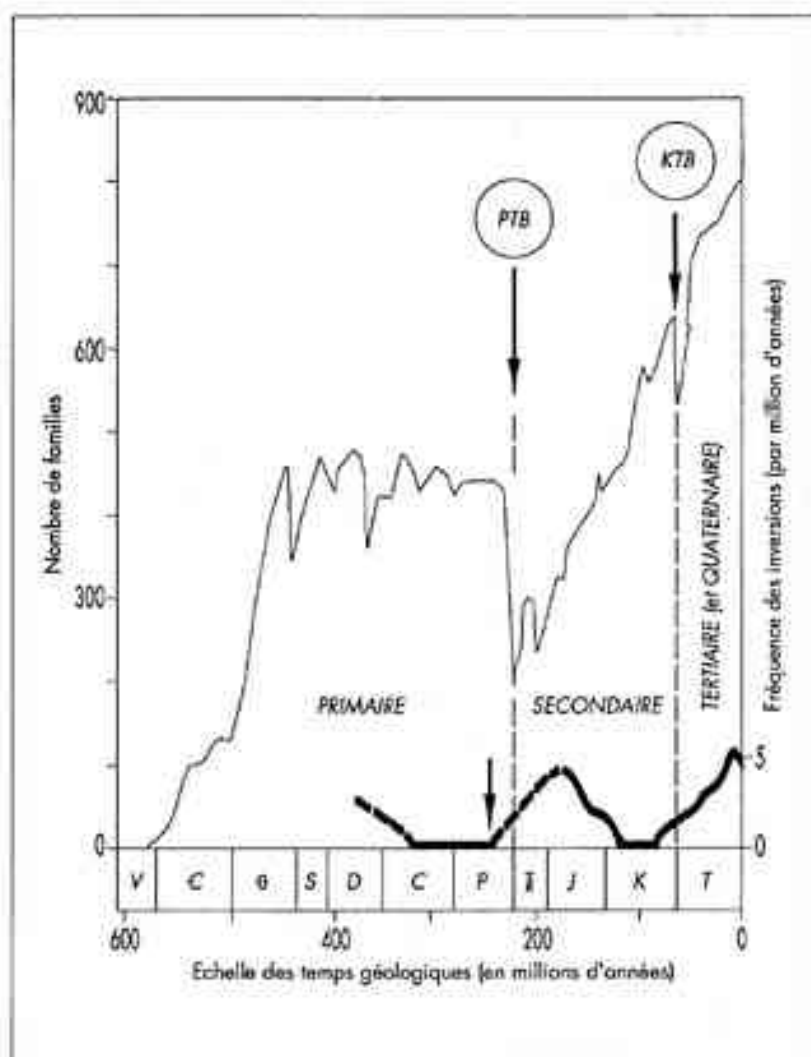
cans sont connus des géodynamiciens comme des volcans de « point chaud » dont l'origine dans le manteau terrestre, sans doute profonde, est clairement distincte de celle du volcanisme des dorsales océaniques. Une ligne de volcans sous-marins relie justement l'île de la Réunion au Deccan. Ces volcans ont été étudiés grâce à des campagnes de forages du programme international ODP (voir l'article de Y. Lancelot), auquel participe la France. La composition chimique des laves de ces volcans et la progression de leurs âges sont parfaitement compatibles avec l'idée qu'un point chaud est apparu à la surface de la Terre sous le Deccan il y a 66 millions d'années, et qu'après un démarrage d'une violence exceptionnelle, ce point chaud a continué à brûler sa trace sous les plaques indienne et africaine, pour aboutir au voisinage du Piton de la Fournaise. La phase initiale a même entraîné l'ouverture d'une partie de l'Océan Indien actuel, en détachant de l'Inde le plateau continental, aujourd'hui largement submergé, des Seychelles.

L'impact climatique du volcanisme du Deccan est sans doute lié à sa richesse en soufre (qui a pu conduire à d'abondantes pluies acides) et à l'émission de très fortes quantités de gaz carbonique (qui ont pu temporairement détruire la pompe biologique qui extrait le CO₂ de l'atmosphère pour le stocker dans les sédiments marins). Le volcanisme a même pu débiter par une phase très explosive, liée à la digestion par le magma du point chaud de la croûte continentale indienne. Ce volcanisme explosif expliquerait certaines anomalies chimiques observées, et peut-être aussi la présence de minéraux portant des traces d'onde de choc, qui restent les plus difficiles à expliquer par les tenants de l'hypothèse volcanique.

La plus grande extinction en masse est celle qui marque la fin de l'ère primaire. Bien qu'un travail aussi détaillé que celui qui a pu être mené sur les traps du Deccan ne leur ait pas encore été consacré, il est intéressant de remarquer que les gigantesques traps de Sibérie, dont l'âge est permien (fin de l'ère primaire), ont pu en être la cause. Ces deux événements catastrophiques (PTB et KTB) se trouvent suivre d'une vingtaine de millions d'années deux événements remarquables, bien connus des paléomagnéticiens, et dont la source est sans doute dans le noyau de la Terre.

Des instabilités dans le noyau

La fréquence des renversements du champ magnétique terrestre a crû assez régulièrement depuis 85 millions d'années, pour atteindre sa valeur actuelle de quatre à cinq inversions par million



Evolution de la diversité des faunes marines (courbe du haut) et de la fréquence des inversions du champ géomagnétique (courbe du bas). Les limites entre ères primaire et secondaire (PTB) et ères secondaire et tertiaires (KTB) suivent d'environ 15 millions d'années la fin des deux longs intervalles où le champ géomagnétique est resté « bloqué ».

d'années. Auparavant, la polarité du champ était restée « bloquée » pendant 35 millions d'années. En remontant plus en arrière encore, on trouve une précédente période bloquée, cette fois longue de 70 millions d'années, entre 340 et 270 millions d'années (voir figure, flèches noires). Les géophysiciens s'accordent pour penser que les inversions sont liées

à la production d'instabilités dans la partie fluide du noyau terrestre, entre 2 900 et 4 900 km de profondeur. Une corrélation entre les changements de la fréquence des inversions, la production de panaches dans le manteau et de points chauds à la surface de la lithosphère, et les extinctions en masse, indiquerait un couplage intéressant entre des instabilités qui se produisent depuis le noyau jusqu'à la biosphère. Un modèle qualitatif a été proposé (voir figure dans l'introduction du premier chapitre), dans lequel des fluctuations de quelques dizaines ou centaines de degrés à la limite entre manteau et noyau module- raient en même temps la production d'instabilités dans ce dernier (et donc la fréquence des inversions du champ géo-

magnétique) et la quantité de chaleur évacuée du noyau vers le manteau. Ce flux de chaleur contrôle l'épaisseur d'une couche limite, identifiée par les sismologues, faite de matériau très hétérogène, moins dense et moins visqueux que celui du manteau inférieur sus-jacent. Au bout d'un certain temps, la couche limite atteint une épaisseur critique, devient instable et émet un ou plusieurs panaches. Ces panaches mettent un peu plus de dix millions d'années à traverser les couches du manteau pour atteindre enfin la base de la lithosphère et déclencher fusion partielle, rupture de la lithosphère et émission d'énormes volumes de basaltes continentaux. L'apparition des points chauds à la surface de la Terre est souvent associée à la fragmentation des continents, comme on a pu le remarquer sur d'autres exemples (Islande et ouverture de l'Atlantique Nord, Tristan da Cunha et ouverture de l'Atlantique Sud).

Repenser l'évolution

Bien du travail reste à faire pour explorer les conséquences de ces divers modèles. Le travail le plus prometteur semble être l'analyse fine des profils d'anomalies chimiques dans les rares coupes qui ont enregistré de façon suffisamment complète la KTB. Ceci demande une finesse qui va au-delà des possibilités actuelles de datation ; il s'agit de décrire un événement qui a pu durer moins de 10 000 ans il y a 65 millions d'années. Les études de la KTB mettent en évidence la pluridisciplinarité des recherches en géosciences modernes. Elles nous amènent à revoir certains des concepts de l'évolution : le concept de survivance du mieux adapté ne doit-il pas être remplacé par celui de survivance du plus chanceux ? Une brutale éruption volcanique, si rare soit-elle, est peut-être le moyen par lequel la Terre solide (mais pas inerte) infléchit épisodiquement le cours de l'évolution. Après deux siècles d'uniformitarisme, les catastrophes se trouvent réhabilitées en géologie. Le fonctionnement de la Terre, probablement non linéaire, est source de chaos et d'instabilités, dont les plus importantes sont, heureusement pour nous, relativement rares.

Volcanic activity, the origin of species extinctions? • Massive species extinctions occurred at the end of the Paleozoic and Mesozoic. These could have been due to an exceptionally intense volcanic activity whose short duration is revealed by means of paleomagnetism.

Vincent Courtillot, physicien à l'Institut de physique du globe de Paris, directeur du Laboratoire de paléomagnétisme et géodynamique, Equipe de géomagnétisme interne et de paléomagnétisme (URA 729 CNRS), 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

L'évolution des grands réservoirs géochimiques

Tel un organisme vivant, la planète s'est organisée en un corps original dans lequel, continûment depuis 4,5 milliards d'années, des réservoirs chimiques se sont différenciés, véritables organes de transformation des matières terrestres.

Bernard Dupré,
Eric Lewin

L'image anatomique que nous nous faisons de la Terre a considérablement évolué au cours des années 1960 avec l'introduction du modèle géophysique de la tectonique des plaques. Outre la quantification des mouvements de la surface du globe, il a permis d'imposer l'idée que notre planète est toujours « vivante », en évolution permanente; on estime qu'il suffit de 250 Ma (millions d'années) pour transformer radicalement le visage de la planète — position, forme et relief des continents. Contemporainement, les géochimistes ont montré que notre planète s'est continûment transformée au long de son histoire vieille de 4,5 Ga (milliards d'années). Par exemple, la composition chimique de l'atmosphère, la surface des continents ont considérablement évolué au cours des temps géologiques. Une clé majeure de la géochimie planétaire est l'emploi du concept de réservoir géochimique, et le sens des recherches de ces dernières années a été de les dénombrer et de les caractériser : atmosphère, croûte continentale, lithosphère océanique et continentale, manteau inférieur et supérieur, noyau. Ces études ne sont possibles que parce que l'on dispose de marqueurs temporels. En fait, l'existence naturelle de nombreux éléments radioactifs, de périodes variées, permet d'une part de dater les roches, et d'autre part de tracer l'évolution des réservoirs terrestres.

La complémentarité des grands réservoirs

En 1976, l'utilisation d'un nouveau système radiogénique, le couple samarium-néodyme, a permis de dégager un résultat simple mais fondamental: les basaltes tholéitiques prélevés aux dorsales océaniques d'une part, et la majorité des échantillons de croûte continentale d'autre part, présentent des rapports isotopiques dont les valeurs se situent respectivement de part et d'autre de la valeur « planétaire », d'où l'idée que les deux réservoirs sources, croûte continentale et manteau supérieur, sont

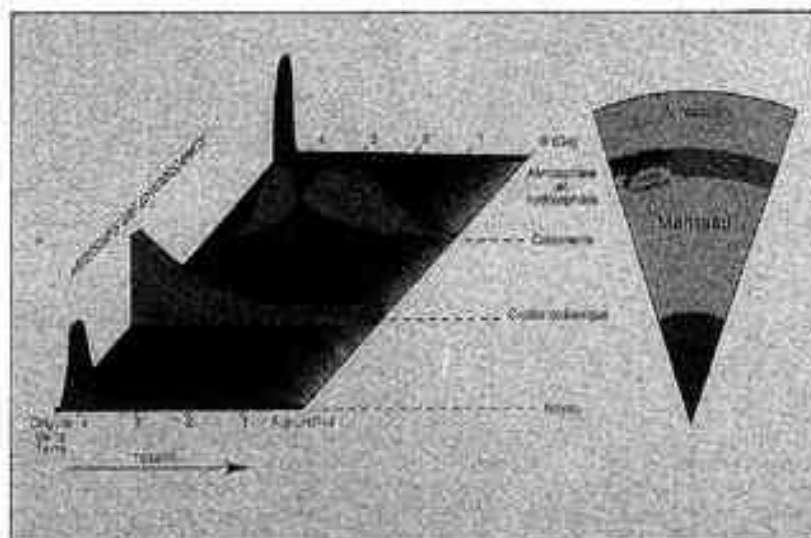
complémentaires. Le modèle se présente ainsi: une partie des éléments chimiques du manteau terrestre primitif en a été progressivement extraite pour former la croûte continentale. Cette différenciation majeure a créé un manteau

Evolution of geochemical reservoirs - The concept of an unchanging static Earth has gradually been replaced by a more dynamic vision of a complex and evolving chemical system. Just as with a living organism, the planet created from interstellar dust became organized into a unique body in which gradually over 4.5 billion years were formed different chemical reservoirs, systems for transforming the Earth's matter.

appelé résiduel ou appauvri, source des laves basaltiques des dorsales océaniques. Cette complémentarité des deux réservoirs permet de calculer par bilan la proportion du manteau résiduel de l'extraction de la croûte continentale, les estimations convergent vers un ordre de grandeur de 40 % en masse. Cette valeur est un des arguments utilisés pour proposer que le manteau terrestre actuel soit chimiquement stratifié.

Le marquage des différents réservoirs actuels

Pour avancer dans le décryptage de l'histoire géologique, les géochimistes ont entrepris l'étude de l'ensemble des témoins directs et indirects du manteau terrestre. Restreignons-nous aux laves basaltiques qui apparaissent selon quatre grands cadres géodynamiques: les tholéites des dorsales océaniques, les laves alcalines du volcanisme intra-plaque des points chauds, les basaltes du volcanisme d'arcs de subduction et les basaltes continentaux, dits basaltes de plateau. De nombreuses études ont montré l'existence de variations isotopiques au sein de ces quatre grands groupes. La compréhension de ces valeurs isotopiques et de leurs variations, ainsi



Cette figure schématise les cinétiques de formation des grands réservoirs terrestres (les échelles verticales des vitesses de croissance sont arbitraires et les tailles relatives des réservoirs ne sont pas respectées). Très rapidement après l'accrétion de la planète, l'atmosphère se dégage à partir du manteau; simultanément, se produit la ségrégation du noyau métallique. La croûte océanique se forme et se détruit à un taux en relation avec l'intensité de la convection du manteau supérieur. Selon un premier modèle, la croûte continentale s'est formée progressivement, avec un maximum de croissance entre 2,5 Ga et 2,0 Ga suivi d'un ralentissement jusqu'à aujourd'hui, où l'érosion, destructrice des continents, équilibre approximativement l'accrétion. Une hypothèse alternative considère que la croûte continentale s'est formée en totalité dans le premier milliard d'années de l'histoire terrestre, ne subissant ensuite qu'un rajeunissement permanent sous l'effet d'un cycle érosion-sédimentation-métamorphisme lié aux orogènes.

que des corrélations entre les différents systèmes isotopiques, permet de rendre compte de l'histoire des manteaux sources.

A titre d'exemple, les valeurs « appauvries » des rapports isotopiques des tholéiites de dorsales, et l'existence de faibles variations malgré un échantillonnage géographiquement très étendu, permettent de montrer que le réservoir source, le manteau supérieur, outre l'extraction de la croûte continentale précédemment mentionnée, est aussi le siège d'une intense convection qui le réhomogénéise. Toutefois, de grandes « cellules » de convection préservent des domaines aux caractéristiques isotopiques distinctes.

La mémoire chimique des témoins anciens

Les témoins anciens sont les restes préservés de matériaux anciens, témoins de leurs réservoirs sources. Ils sont rares à cause de l'intense et permanent remodelage de la croûte continen-

tales au travers des cycles d'orogénèse-érosion. D'âges allant de l'Actuel jusqu'à 3,8 Ga, ils permettent ainsi d'esquisser l'évolution des rapports isotopiques des deux réservoirs majeurs, la croûte continentale et le manteau supérieur : selon un premier modèle, les continents sont apparus il y a 3,8 à 4,0 Ga, puis ont crû continûment par extraction progressive à partir du manteau supérieur. Au temps présent, cette croissance est pour le moins faible, sinon nulle. Un modèle alternatif affirme que les continents se sont intégralement formés dans le premier milliard d'années de l'histoire terrestre, ne subissant ensuite qu'un perpétuel rajeunissement (voir la figure). Ces deux modèles diffèrent l'un de l'autre essentiellement par le taux de recyclage de la croûte dans le manteau (réinjection de sédiments), important ou bien négligeable.

Ces mêmes données d'évolution des rapports isotopiques des grands réservoirs permettent de contraindre plus complètement leurs échanges de matière. On a pu ainsi montrer que sur

l'échelle des temps géologiques, le manteau supérieur ne s'est pas seulement comporté en réservoir résiduel, mais qu'il a lui-même subi des apports extérieurs. Ces études rejoignent celles mentionnées plus haut en les étendant de l'Actuel à l'ensemble des temps géologiques. Elles se focalisent entre autres sur le débat de l'identification de la source des apports extérieurs, manteau inférieur primitif injecté par les points chauds ou entraîné sous les rides, lithosphère sous-océanique plus ou moins primitive délamainée aux zones de subduction, sédiments continentaux réinjectés à ces mêmes zones de subduction.

■ Bernard Dupré, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de géochimie et cosmochimie (URA 196 CNRS).

■ Eric Lewin, assistant des IPG, Laboratoire de géochimie et cosmochimie (URA 196 CNRS), Institut de physique du globe, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

La croûte continentale archéenne

La majeure partie de la croûte continentale a été engendrée au cours de l'Archéen. Les mécanismes de sa genèse étaient alors différents de ceux connus de nos jours.

■ Hervé Martin

La croûte continentale, c'est-à-dire les matériaux constitutifs des continents, est épaisse en moyenne d'une quarantaine de kilomètres, mais elle ne représente que les trois dixièmes de la surface de la Terre ; le reste étant constitué d'une croûte océanique mince (≈ 7 km). Si cette dernière est relativement jeune (200 millions d'années), la croûte continentale pratiquement indestructible est connue depuis au moins 3,9 milliards d'années, et par là même nous renseigne sur l'histoire ancienne de notre planète.

L'Archéen correspond à une période de temps qui s'étale depuis la formation des plus anciennes roches connues ($\approx 3,9$ Ga = $3,9 \times 10^9$ ans) jusqu'à 2,5 Ga. C'est par excellence une période de genèse et d'accrétion crustale. En effet, c'est pendant l'Archéen que près des

trois quarts de la croûte continentale se sont formés à partir du manteau terrestre ; ceci a donné naissance à des mégablocs continentaux analogues à ceux que nous connaissons actuellement. Une des questions d'actualité que se pose la géologie moderne est de savoir si les mécanismes mis en jeu au cours de l'histoire précoce de la Terre sont identiques à ceux que nous observons de nos jours. En ce qui concerne la croûte continentale, la question s'avère d'autant plus per-

The Archaean continental crust - About 75% of the continental crust was formed during the Archaean. This formation results from the melting of the mantle and is inhibited by dehydration; these two mechanisms are controlled by the thermal gradient along the subduction plane, which has varied with time.

tinente que la composition de la croûte archéenne est significativement différente de celle de son équivalent moderne.

La croûte archéenne est essentiellement constituée de roches magmatiques à composition de « TTG » c'est-à-dire de granitoïdes riches en sodium. Les études pétrogénétiques basées sur le comportement distinct et indépendant des isotopes, des éléments majeurs, et en traces, ainsi que des terres rares, ont montré qu'elle provenait de la fusion d'une croûte océanique. Dans tous les cas, il a été possible de préciser la nature des phases minérales stables pendant la fusion, et ainsi d'en fixer les conditions de pression et de température. La même démarche appliquée à la croûte continentale moderne (à composition de granitoïdes riches en potassium) a mis en évidence une origine par fusion d'un manteau enrichi en fluides.

Fusion et déshydratation en compétition

Les zones de genèse de croûte continentale sont des zones de convergence de plaques et plus particulièrement les zones de subduction, c'est-à-dire le lieu où une portion de croûte océanique plonge sous une autre plaque et s'enfonce dans le manteau. Le segment océanique subducté va être le lieu d'une compétition entre deux mécanismes : la

fusion partielle et la déshydratation. Ainsi, si la déshydratation se produit la première, elle va inhiber la fusion et la croûte océanique subductée ne pourra pas fondre. Le paramètre qui contrôlera la primauté d'un mécanisme sur l'autre sera le gradient géothermique le long du

plan de subduction, c'est-à-dire la vitesse à laquelle la température va croître avec la profondeur. Si la température augmente rapidement, la croûte océanique va fondre; si elle augmente lentement, elle va se déshydrater et ne fondra pas. Dans ce dernier cas, les fluides issus

de la déshydratation vont réhydrater et enrichir le manteau sus-jacent et y induire la fusion.

Il apparaît donc que les deux situations (Archéen: fusion de la croûte océanique, et actuelle: fusion du manteau) reflètent un changement du régime thermique de notre planète au cours de son histoire. Cette conclusion est confirmée par l'étude de situations particulières. En effet, actuellement et de façon très locale, la croûte océanique subductée peut être anormalement chaude; c'est le cas le long de la côte Sud-américaine où la ride du Chili est impliquée dans la subduction. Là, ponctuellement dans le temps et dans l'espace, la croûte engendrée possède des caractéristiques archéennes.

Ces modifications de source et de mécanismes de genèse de la croûte continentale sont une réponse « brutale » à un changement progressif de régime thermique, dû au refroidissement de notre planète.

Il faut enfin noter que ces théories, élaborées essentiellement à partir de données géochimiques, ont été le point de départ de programmes de recherche dans d'autres disciplines telles que la pétrologie expérimentale et la thermodynamique.



Aspect typique de la croûte continentale archéenne. La grande masse grise, orientée, aussi appelée TTG, correspond à une croûte juvénile telle que l'on peut l'observer dans la presqu'île de Kola, au sud de Mourmansk, en URSS. Son âge est de 2,78 milliards d'années. Ses caractéristiques minéralogiques et chimiques indiquent que, contrairement à ses équivalents actuels, elle s'est formée par fusion de croûte océanique dans un contexte de subduction. Après sa mise en place et sa cristallisation, la nouvelle croûte a pu subir une histoire complexe qui se manifeste ici par l'intrusion de filons basaltiques (noirs), puis de veines granitiques (blanches).

■ Hervé Martin, maître de conférences à l'Université de Rennes I, Laboratoire de pétrologie cristalline, Centre harmonisé d'étude structurale des solides (UPR 4661 CNRS), Institut de géologie, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex.

Le manteau archéen

La découverte de roches exceptionnelles, les komatiïtes, a permis une avancée considérable dans la connaissance du manteau archéen.

■ Gérard Gruau

Comprendre les hétérogénéités chimiques et physiques du manteau terrestre actuel nécessite la connaissance de la composition et de l'évolution du manteau ancien. Cette nécessité évidente explique pourquoi l'étude du manteau archéen, discipline de l'ancien par excellence (l'Archéen est la période de l'histoire de la Terre comprise entre sa formation il y a 4,5 milliards d'années et le début de l'ère proté-

rozoïque il y a 2,5 milliards d'années) est récemment devenue l'un des axes principaux de la recherche en Sciences de la Terre.

Déterminer la composition primitive du manteau terrestre; établir les effets physico-chimiques des processus de la différenciation planétaire précoce, comme la formation d'un océan magmatique terrestre; décrypter les hétérogénéités induites dans le manteau archéen par le bombardement météoritique et l'extraction de la croûte continentale ne sont pas des tâches simples. Entre autres difficultés, il faut prendre en compte le fait

qu'il n'existe plus aujourd'hui de témoins directs de la composition du manteau archéen. Cette évidence doit être rappelée, car elle implique l'utilisation systématique de démarches indirectes, avec à la clé toutes les incertitudes qu'une telle utilisation implique.

Des témoins vieux de trois milliards d'années

L'approche du problème de la composition et de la structure évolutive du manteau archéen a bénéficié dans la période récente de la découverte de roches exceptionnelles: les komatiïtes. Ces roches, d'origine volcanique et découvertes pour la première fois en Afrique du Sud il y a une vingtaine d'années, se distinguent des autres roches terrestres connues par le fait qu'à quelques exceptions près, toutes ont été trouvées dans des terrains archéens, les âges variant de

The Archaean mantle - The determination of the mechanisms by which the Archaean mantle became differentiated is essential before any overall models of the physico-chemical development of our planet can be constructed. Recently, considerable progress has been made in this field due to the discovery of some exceptional rocks: the komatiites.

3,9 à 2,5 milliards d'années. Plus fantasmatiques encore sont leurs compositions chimiques. Les teneurs en oxyde de magnésium des komatiites atteignent en effet 30 %, c'est-à-dire des teneurs de l'ordre de celles observées dans les péridotites mantelliques. Sur cette base, ainsi que sur d'autres données de composition (très faibles teneurs en terres rares, par exemple), il a été suggéré que les taux de fusion du manteau impliqués dans la genèse des komatiites devaient avoisiner, voire dépasser 50 %. De même, et confirmant cela, on a pu déterminer que la température d'épanchement d'une komatiite devait se situer autour de 1 600 à 1 700 °C, c'est-à-dire 400°C de plus que les laves les plus chaudes émises de nos jours. Ce serait d'ailleurs la conjugaison de ces températures très élevées et de vitesses de refroidissement très rapides qui serait à l'origine des textures spinifex si typiques des komatiites (voir la figure).

Le fait que des komatiites se rencontrent pendant pratiquement toute la période archéenne de l'histoire de la Terre, conjugué au fort taux de fusion mantellique mis en œuvre lors de leur

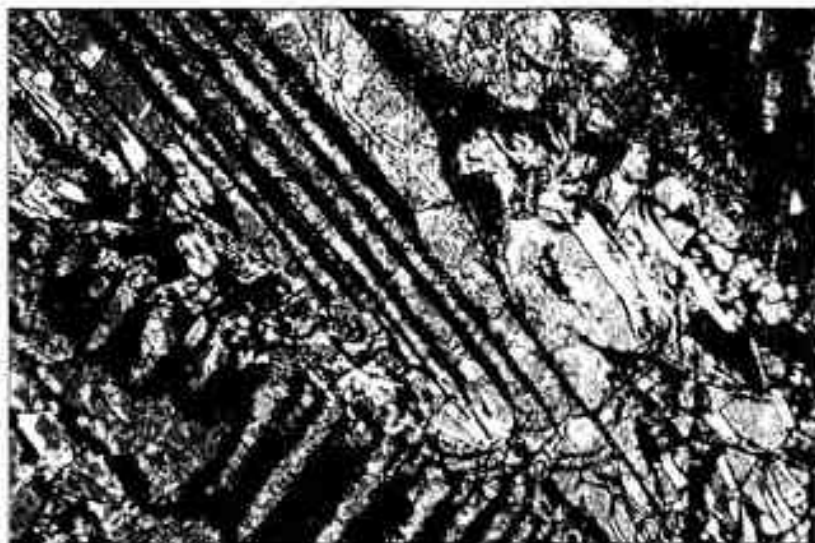


Photo d'une lame mince, vue en lumière polarisée, d'un échantillon de komatiite (grossissement 25). Texturalement, on note la présence de cristaux en aiguilles, allongés parallèlement les uns aux autres (texture spinifex), caractéristiques des komatiites. Dans la lame mince présentée, les spinifex sont constitués d'olivine, un silicate ferro-magnésien. L'échantillon provient d'une coulée komatiitique du Canada, mise en place il y a 2,7 milliards d'années.

genèse, fait de ces objets des outils très précieux pour contraindre la dynamique chimique primitive du manteau terrestre. En fait, il serait trop long d'énumérer ici toutes les avancées qu'a permises l'accumulation de données géochimiques et physiques sur des komatiites. Nous citerons simplement pour exemple la démonstration qui a été faite que dès 3,9 milliards d'années, certaines zones du manteau terrestre étaient appauvries

en éléments traces, notamment en terres rares. Cet appauvrissement précoce est généralement interprété comme le résultat de l'extraction de la croûte terrestre primitive.

■ Gérard Gruau, chargé de recherche au CNRS, Centre armoricain d'étude structurale des roches (UPR 466) CNRS, Université de Rennes I, Institut de géologie, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex.

Les fossiles et l'horloge moléculaire

L'établissement de l'arbre phylogénétique des rongeurs par des méthodes paléontologiques et moléculaires fait apparaître parfois des points de divergence : de nouvelles voies de recherche.

■ Jean-Jacques Jaeger

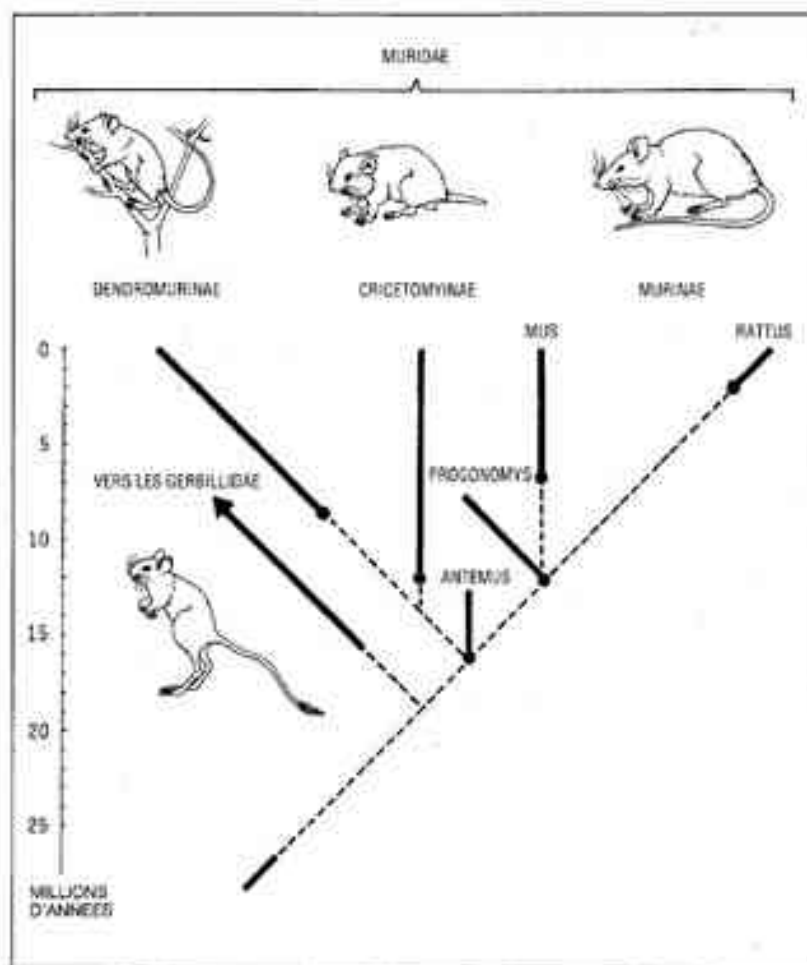
Alors que jusqu'à ces dernières décennies les paléontologistes et les morphologistes étaient seuls à établir les relations de parenté entre les différentes catégories d'êtres vivants actuels et fossiles, celles-ci peuvent être maintenant également établies à partir

des données moléculaires. De ce fait, s'il y a souvent large accord, des points de divergence fondamentaux apparaissent quelquefois, aussi bien en ce qui concerne les relations de parenté elle-même, qu'en ce qui concerne leur étalonnage. Ces divergences ouvrent de nouvelles voies de recherche associant étroitement paléontologistes et biologistes.

La construction d'arbres phylogénétiques

Certains généticiens, sous l'égide du japonais Kimura, considèrent que l'essentiel du génome évolue au cours du temps d'une manière tout à fait autonome. L'une des implications les plus remarquables de cette théorie « neutraliste » concerne la possibilité d'utiliser le degré de différence entre les gènes des différents organismes pour reconstituer

Fossils and molecular clock - Phylogenetic trees can be established from morphological comparison between fossils and actual forms, and also from molecular data. Discrepancy between the two methods for the Mus-Rattus divergence time, suggests different rates of evolution among mammals.



Phylogénie des rongeurs Muridae proposée par les paléontologistes. Les traits pleins correspondent à la documentation paléontologique existante. L'échelle des temps se trouve en ordonnée, elle est exprimée en millions d'années. (D'après Jaeger et al., 1985).

leurs relations de parenté et d'estimer les âges de divergence. Cependant, pour ce dernier point, un étalonnage paléontologique est indispensable. Du choix de cet étalon et de la qualité des données paléontologiques dépend donc la qualité de l'horloge moléculaire.

Les différences entre les génomes peuvent être mesurées à l'aide de différentes méthodes. Toutes conduisent, après un traitement mathématique des données, à l'élaboration d'arbres phylogénétiques étalonnés (s'ils incluent au moins une dichotomie documentée par des fossiles). Ces arbres phylogénétiques biochimiques présentent en général un assez bon accord avec les arbres élaborés par les paléontologistes, mais d'importantes divergences apparaissent quelquefois de manière inattendue, qui nourrissent les recherches les plus récentes. De telles divergences n'ont a priori aucune raison d'être, car les caractères morphologiques utilisés par les

paléontologistes sont en principe également le résultat de l'expression de gènes, bien que ce ne soient pas forcément les mêmes gènes !

Il est de ce fait très important d'accorder une attention particulière aux méthodes utilisées pour l'établissement des relations de parenté par les différentes disciplines.

Etalonner les horloges moléculaires

L'exemple du rat et de la souris, deux rongeurs proches parents (murinés), est significatif du type de désaccord qui peut être rencontré. Tous les paléontologistes s'accordent pour considérer que le rat et la souris partagent un ancêtre commun qui a été reconnu être la plus ancienne forme de muriné identifiée, le genre fossile *Progonomys* ou l'un de ses descendants. *Progonomys* apparaît vers

11,5 Ma simultanément en Europe, en Asie du Sud et en Afrique. Ses ancêtres immédiats ont été trouvés en Asie du Sud-Est, dans des niveaux compris entre 16-15 Ma et 12 Ma.

La paléontologie démontre donc clairement que la divergence rat-souris doit être plus récente que 11,5 Ma. Toutefois, certaines données moléculaires, notamment celles qui ont trait aux distances immunologiques entre les albumines, concluent à un âge de divergence double de celui retenu par les paléontologistes. Ceci peut également être interprété comme la conséquence d'une vitesse d'évolution moléculaire deux fois plus élevée chez les murinés que chez les autres mammifères : il n'y aurait donc pas une seule horloge moléculaire universelle, mais différentes horloges, fonctionnant à des rythmes distincts, et la paléontologie est appelée à jouer un rôle considérable pour étalonner les horloges moléculaires de chaque groupe, et, à l'intérieur de chaque groupe, celles de chacun des différents compartiments du génome. Dans ce cadre, une approche originale consiste à comparer des êtres vivants dont les aires de répartition ont été séparées au cours du temps par des barrières physiques comme des océans, des montagnes, des rifts etc., car l'âge de la séparation est alors indiqué par des données géologiques, réduisant d'autant les biais induits par les lacunes de la documentation paléontologique. C'est le domaine encore peu exploré de la paléobiogéographie moléculaire.

L'extrapolation aux premières formes de vie

Une meilleure connaissance des lois de l'évolution du génome permettra également de reconstituer dans le détail l'histoire des êtres vivants dépourvus de squelette (bactéries, unicellulaires, virus et autres parasites, etc.) pour lesquels on ne disposera jamais de documentation paléontologique adéquate. Les premiers résultats acquis dans ce domaine amènent à reconsidérer entièrement l'histoire des premiers êtres vivants, ainsi que leurs relations de parenté. Ces données conduiront à la réinterprétation de l'ensemble des documents paléontologiques relatifs aux premiers stades de la vie sur notre planète.

Jean-Jacques Jaeger, professeur à l'Université de Montpellier II, directeur adjoint de l'Institut des sciences de l'évolution (URA 327 CNRS), Laboratoire de paléontologie, place Eugène Bataillon, 34060 Montpellier Cedex.

L'évolution des communautés biologiques

La mise en évidence de certaines structures dans les communautés permet de définir une évolution des groupes vivants, dont les tendances paraissent antagonistes à celles des espèces.

■ Serge Legendre

Une espèce biologique ne vit pas isolée d'un contexte général constitué d'une part par le monde physique et d'autre part par l'ensemble des autres espèces avec lesquelles elle partage ce milieu. Cet ensemble d'espèces qui vivent suffisamment proches pour potentiellement interagir constitue une communauté.

Qu'est-ce qu'une communauté ?

Le terme de communauté désigne un groupe d'espèces rencontrées dans un endroit donné. L'aspect fonctionnel de l'ensemble ainsi défini reste un problème : s'agit-il d'un assemblage taxonomique (fondé sur la composition spécifique) ou bien une communauté (caractérisée par les rôles écologiques des espèces) ?

En paléontologie, un certain nombre d'études ont utilisé le terme de communauté. Dans le domaine terrestre, elles ont décrit les groupements observés constituant un paysage particulier ou bien une faune, tentant d'expliquer les changements de composition.

Dans les communautés de mammifères existent certaines structures ; ces ensembles peuvent donc être considérés comme des entités fonctionnelles.

Les communautés de mammifères

La méthode d'analyse est celle des cénogrammes. Ce terme, proposé en 1964 par l'écologiste espagnol Valverde, est appliqué à un diagramme qui donne la distribution du poids moyen des espèces

dans une communauté mammalienne.

L'analyse de nombreuses communautés actuelles, de différents types de milieux et continents, montre que la distribution pondérale des espèces dans une faune est liée aux paramètres de leur milieu. Ces caractéristiques se retrou-

vent sur les différents continents alors que les espèces diffèrent, montrant que la structure des communautés est indépendante de leur contenu taxonomique.

L'étude de séquences de faunes fossiles de différentes régions d'Europe occidentale (Sud de la France, de l'Allemagne et de l'Angleterre) a permis de suivre les communautés de mammifères sur plus de 15 millions d'années entre la fin de l'Eocène et l'Oligocène supérieur. Une modification importante de leur structure intervient à la transition Eocène/Oligocène : ceci reflète l'impact sur les faunes de mammifères de la crise climatique de la fin de l'Eocène. Cette crise, qui se caractérise par un refroidissement important et une aridification nette, se traduit également par une régression de la forêt. Dans les faunes d'Europe occidentale, elle correspond à



Cloup d'Aurai, Quercy. Ces poches ont été exploitées pour le phosphate à la fin du siècle dernier. Dans le sédiment encore en place, les paléontologues ont découvert depuis 1965 de riches faunes de vertébrés qui constituent des faunes locales homogènes, et qui ont été à la base des études sur l'évolution des communautés de mammifères. (Cliché S. Legendre).

Biological communities evolution - Evolution can be studied at two levels: species level, where evolution is linked to interspecific interactions (competition, predation), and community level, linked to physical environment (ecoclimatical crisis).

un changement important de composition connu sous le nom de « grande coupure ».

En dehors de cette crise éco-climatique, les communautés apparaissent stables. Durant les périodes qui la précèdent et la suivent, les conditions générales plus constantes de milieu maintiennent les communautés dans un équilibre dynamique.

Évolution des espèces et évolution des communautés

Si pendant de longues périodes les communautés ne présentent pas de changement de structure, elles sont composées d'espèces qui, elles, ne sont pas en stase, mais évoluent, en particulier vers un accroissement de taille. Cette tendance générale des espèces à augmenter de taille au cours du temps est connue depuis longtemps sous le nom de loi de Cope. De ce fait, sans mécanisme de régulation, l'éventail des poids dans une communauté se déplacerait au cours du temps. Pour expliquer la stabi-

lité des communautés, il est donc nécessaire que les renouvellements permanents au sein des communautés ne soient pas aléatoires. En d'autres termes, une disparition doit être compensée par une apparition, et de plus, pour un intervalle de taille donné, les espèces les plus grandes doivent disparaître alors que celles qui apparaissent au sein d'une communauté doivent être plus petites. On constate ainsi un caractère antagoniste entre une sélection à l'échelle des espèces favorisant les tailles plus grandes, et à l'échelle des communautés avantagant les plus petites.

Les moteurs de cette sélection semblent également différents. L'évolution des espèces est associée aux interactions qu'elles ont entre elles (facteurs biotiques), alors que l'évolution des communautés paraît être liée au milieu physique qu'elles occupent (facteurs abiotiques).

Ainsi, les changements observés dans la structure des communautés de mammifères se rattachent à des crises climatiques importantes, qui ne semblent pas augmenter les vitesses d'évolution des

lignées spécifiques qui survivent, tandis que les modifications évolutives des espèces sont la conséquence de phénomènes de compétition et prédation qui n'affectent pas la structure des communautés.

Pour résumer, les caractéristiques abiotiques de l'environnement définissent les « rôles » (par le type de structure) qui peuvent être joués dans une communauté, tandis que les éléments biotiques sélectionnent les acteurs (c'est-à-dire les espèces) qui occupent ces places parmi tous ceux qui, par leur histoire biogéographique et phylétique, constituent un réservoir, autrement dit la faune.

Serge Legendre, chargé de recherche au CNRS, Institut des sciences de l'évolution (URA 327 CNRS), Laboratoire de paléontologie, Université des sciences et techniques du Languedoc, place Eugène Bataillon, 34060 Montpellier Cedex.

La diversification de la vie

L'analyse du développement des organismes est l'une des clés de lecture des mécanismes du changement évolutif et de la diversification historique de la vie.

Jean Chalme

L'étude des relations entre l'ontogenèse (développement des organismes de l'œuf à l'état adulte) et la phylogenèse (histoire évolutive des lignées et des groupes d'organismes) permet d'aborder un problème fondamental de l'évolution des organismes : comment se réalise le changement morphologique entre les espèces d'une part, et entre les grands plans d'organisation (mollusques, vertébrés, etc.) d'autre part.

Une mécanique des changements évolutifs

L'ontogenèse est constituée par l'enchaînement des étapes du développement. Ces étapes se trouvent répétées au cours de l'histoire évolutive, mais leur déroulement peut être perturbé par des décalages chronologiques appelés

« hétérochronies ». Un développement standard ancestral peut en théorie être altéré par quatre types majeurs de décalages chronologiques (voir encadré). Ils correspondent soit à des modifications du taux de développement (ralentissement ou au contraire accélération), soit à l'apparition de la maturité sexuelle plus précoce ou plus tardive qui raccourcit ou allonge la croissance. Ces altérations du développement impliquent deux grands types d'expression phylétique, soit la rétention de caractères juvéniles ancestraux chez l'adulte descendant (paedomorphose : néoténie ou proénésie), soit l'apparition précoce chez le juvénile descendant de caractères qui ne s'exprimaient chez l'ancêtre qu'à l'état adulte (peramorphose : accélération ou hypermorphose).

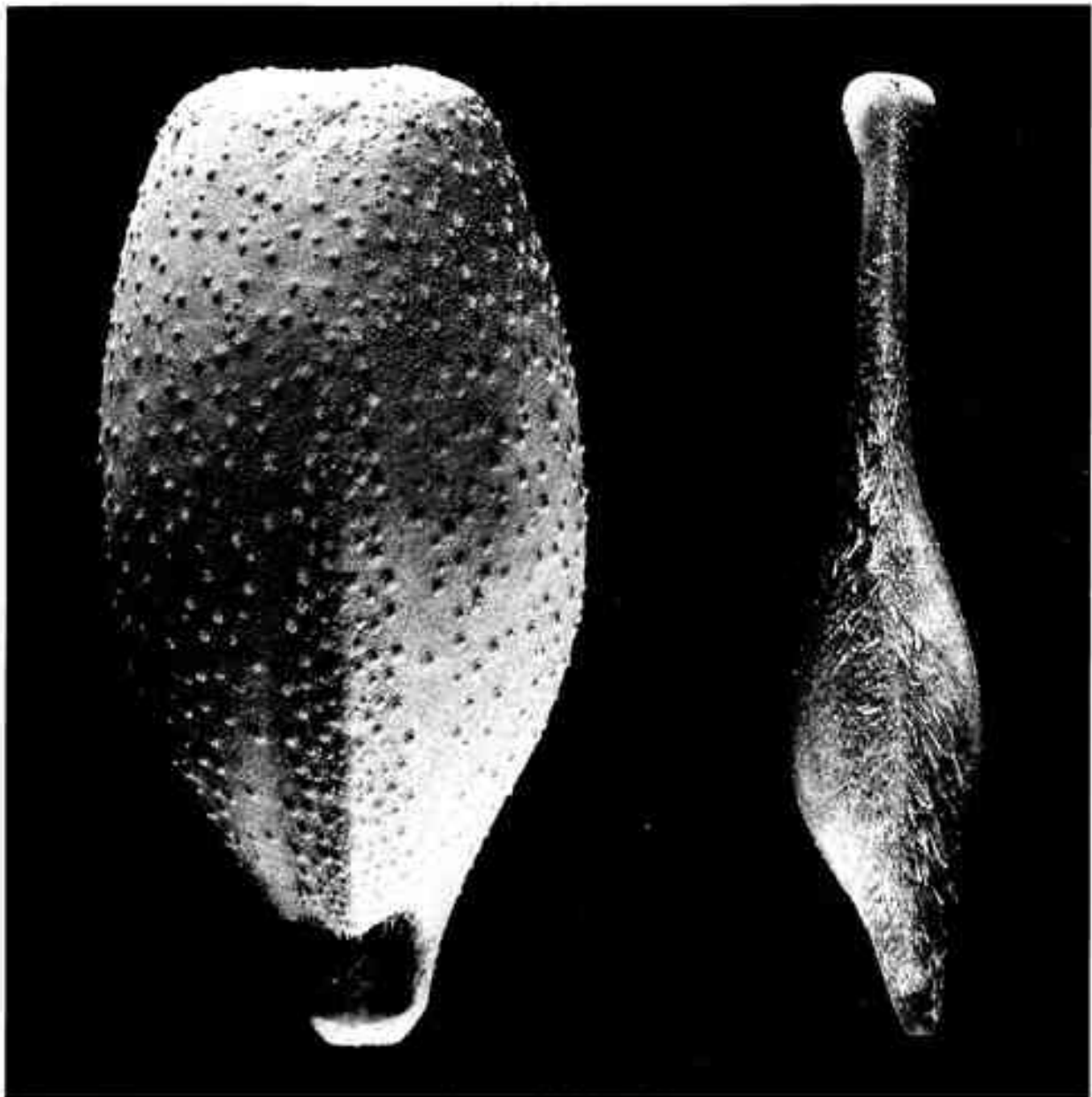
Si la paléontologie permet de déceler et d'analyser les modalités de l'extension historique et phylétique des décalages chronologiques du développement, la biologie en révèle les processus. On

sait par exemple que chez l'axolotl, la néoténie est sous la dépendance d'un gène *P* dont l'action conditionne la production d'hormone thyroïdienne, ceci sous le contrôle de la température du milieu.

Une explication de la divergence morphologique

La formation des genres s'accompagne d'une divergence morphologique. Prenons l'exemple de deux oursins abyssaux (*Pourtaletia* et *Echinostira*; voir figure) étroitement apparentés, quoique morphologiquement très différents. L'analyse de leur croissance montre que le développement des deux genres part d'un jeune identique, mais qu'*Echinostira* passe au cours de son développe-

Life diversification - The study of relationships of ontogeny and phylogeny is a key for the knowledge of morphological evolutionary changes. Chronological disturbances of development are a possible explanation for morphological divergence between species and genus. They allow the understanding of evolutive jumps or gradual morphological changes, with weak genetical differences.



Pourtalesia et *Echinostigma*, deux cousins des mers profondes, de morphologie très différente, mais étroitement apparentés. La morphologie étirée d'*Echinostigma* (à droite) peut s'expliquer, à partir d'un jeune qui est identique, par une accélération du développement qui dépasse le stade morphologique de *Pourtalesia* (à gauche). (d'après B. David ; clichés A. Godon, Centre des sciences de la Terre de Dijon)

ment par un stade qui correspond à l'état adulte de *Pourtalesia* et qu'il poursuit ensuite son développement jusqu'à l'acquisition d'une morphologie très étirée. Le développement d'*Echinostigma* apparaît donc « accéléré » par rapport à celui de *Pourtalesia*, puisqu'il acquiert une morphologie plus élaborée à un âge identique à celui de *Pourtalesia*.

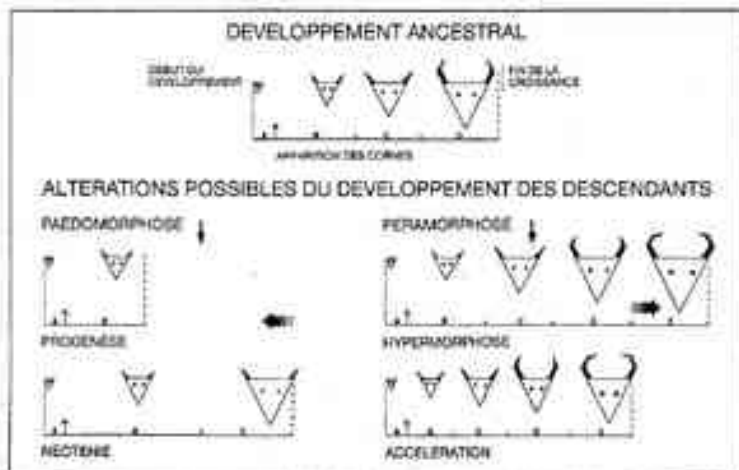
À cet égard, l'origine de l'embranchement

des vertébrés peut être citée en exemple. Ce saut sans intermédiaire peut s'expliquer par une modification du programme de développement d'une forme préexistante. Les vertébrés primitifs adultes, les agnathes, conservent en effet toute leur vie la morphologie larvaire des formes ancestrales (paedomorphose), probablement de formes sans squelette voisins d'échinodermes.

Les hétérochronies et l'adaptation.

Les retours « secondaires » à la vie aquatique de vertébrés tétrapodes terrestres non étroitement apparentés, comme les amphibiens, ichthyosaures et siréniens résulteraient d'une paedomorphose par néoténie. Ils suggèrent l'existence d'un même complexe structural

Les « loups à cornes » ou les déviations chronologiques du développement



La figure schématise en haut les étapes du développement normal d'un individu d'une espèce imaginaire « le loup à cornes » (A, première phase qui s'achève avec l'apparition des cornes; B, C et D, autres phases de développement; la fin de la phase D marque l'arrêt de la croissance après l'apparition de la maturité sexuelle). En dessous sont présentées les quatre altérations majeures possibles du développement. A gauche, les processus de pædomorphose qui assurent la persistance des caractères juvéniles chez l'adulte peu-

vent se manifester par progenesis (troncature du développement par apparition précoce de la maturité sexuelle), ou par néoténie (retardement du développement n'affectant pas la taille). A droite, les processus de pæromorphose qui permettent l'apparition de caractères nouveaux hyper-adultes, peuvent se réaliser soit par hypermorphose (allongement du développement par retard de la maturité sexuelle), soit par accélération (accélération du développement). (d'après Devillers, Chaline et Lurin, 1990).

régulateur et fonctionnel commun au programme génétique de l'ensemble des vertébrés tétrapodes pouvant être activé dans certaines conditions écologiques. Ce complexe génétique serait apparu chez les dipneustes (poissons à poumons) au cours du Primaire.

La conclusion qui se dégage de ces quelques exemples est que l'ontogenèse et ses dérèglements chronologiques constituent une mécanique possible des changements évolutifs morphologiques responsables de la phylogenèse. Ils permettent d'expliquer notamment les passages morphologiques sans intermédiaire, ou les grands changements morphologiques avec de faibles différences génétiques.

L'étude de cette mécanique et de ses processus n'en est qu'à ses débuts, extrêmement prometteurs; elle jette un pont entre la génétique et la paléontologie, et implique le développement d'une collaboration étroite entre les deux disciplines. Et elle pose enfin aux biologistes un véritable défi: comment les cellules lisent-elles le temps?

Jean Chalain, directeur de recherche au CNRS, responsable de l'Unité « géodynamique sédimentaire et évolution géobiologique » (URA 157 CNRS), Université de Dijon, Centre des sciences de la Terre, 6, boulevard Gabriel, 21000 Dijon.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place Aristide-Briand 92015 Neuilly Cedex

DJIBOUTI, NAISSANCE D'UN Océan

Reportage sur les études et travaux de recherche réalisés depuis une dizaine d'années en République de Djibouti, à l'Observatoire d'Acta, sur le géodynamisme exceptionnel du rift d'Asan. Explication du système de surveillance des volcans, et du traitement des données transmises par balises Argos.

Auteurs: Yves ZEAU et Olivier GÉRARD
Conseil scientifique: Michel TREUIL et Jean-Claude RUEGG
Réalisateur: Olivier GÉRARD
Co-production: CNRS Audiovisuel et Ardoukoba
1985 - 37 minutes - Supports de diffusion: 16 mm et vidéo 3/4"

LA FOURNAISE: VOLCAN ACTIF DE L'ILE DE LA RÉUNION

Présentation des travaux effectués par l'Observatoire volcanologique (suivi des activités sismiques et éruptives du volcan de La Fournaise de novembre 1983 à février 1984) qui permettent d'expliquer l'activité volcanique et de prévoir une éruption.

Auteur: François-Xavier LALANNE
Conseillers scientifiques: Jean-François LÉNAT et Patrick BACHELERY
Réalisateur: François CARTAULT
Co-production: CNRS Audiovisuel, Centre de Documentation et de Diffusion sur le Volcanisme, FIRPSEV et RFO Réunion
1984 - 21 minutes - Supports de diffusion: 16 mm et vidéo 3/4"

L'ENVIRONNEMENT GEOLOGIQUE

A l'interface entre la sphère solide, les roches de la croûte terrestre, et les composantes fluides de la planète, l'eau et l'atmosphère, se trouve le seul milieu favorable à la vie. Les géosciences de l'environnement visent à comprendre le fonctionnement et l'évolution de ce milieu, en étudiant l'ensemble des paramètres qui constituent les composantes du « système externe » de la planète.

La dynamique de notre planète fait courir en permanence à l'humanité des risques énormes. Eruptions volcaniques et tremblements de terre dévastateurs en sont la manifestation la plus spectaculaire. Ces phénomènes brutaux et inévitables sont maintenant bien compris, même si dans le détail ils restent très difficiles à prévoir avec précision. Plus insidieux, parce que plus lents, les changements climatiques sont depuis peu devenus l'une des préoccupations majeures des géologues, géochimistes et géophysiciens. Plus que tout autre risque naturel, le risque climatique est par nature

« global », il intéresse l'ensemble de l'humanité. Il n'est pas restreint aux ceintures sismiques et volcaniques, il ignore les frontières économiques et politiques.

A ces risques naturels s'ajoutent les changements que l'homme lui-même introduit dans l'environnement, lorsqu'il cherche à exploiter au mieux les ressources nécessaires à son développement. Même si l'influence de cette activité sur l'ensemble de la planète peut parfois sembler dérisoire par rapport aux forces considérables résultant de la dynamique naturelle de la Terre, il est maintenant démontré que lorsque certains seuils sont atteints dans les transferts physiques et chimiques entre les différents éléments du système externe, des rétroactions vont très rapidement entretenir, amplifier et accélérer des changements qui peuvent devenir catastrophiques.

Pour comprendre le fonctionnement de l'ensemble, deux axes de recherche strictement complémentaires constituent le domaine des « géosciences de l'environne-

ment ». Tout d'abord, il s'agit d'observer, voire de surveiller, l'environnement dans son état et sa dynamique actuels afin de déceler les mécanismes et interactions mis en jeu. La dynamique physique est détectée et surveillée par les observatoires, la dynamique chimique est étudiée au travers des grands programmes nationaux (Dynamique et Bilan de la Terre, de l'INSU) ou internationaux (Global Change). Cette surveillance de notre planète se fait de manière directe par l'observation et la mesure, depuis les continents (altération, fleuves et érosion) jusque dans l'océan (flux de matière solide et dissoute, réponse océanique globale aux changements climatiques). Elle fait aussi largement appel à l'observation par satellite.

Enfin, c'est l'étude du passé qui seule permet de comprendre et modéliser les conditions du « changement ». Les couches de glace des régions polaires ont emprisonné des témoins de la composition de l'atmosphère depuis des millénaires. Les couches sédimentaires dépo-



sées sur les continents, dans les lacs et dans les océans, ont enregistré les variations de l'environnement depuis des millions d'années. Ces archives, étudiées par de grands programmes de forage comme ODP (Ocean Drilling Program) et GPF (Géologie Profonde de la France) permettent d'observer l'environnement de la planète dans des

conditions très différentes de celles que nous connaissons aujourd'hui.

C'est de la confrontation des résultats de ces deux approches que peuvent naître des modèles qui permettront de saisir les interactions mises en jeu, les temps de réactions et l'importance relative des éléments les plus sensibles du

système externe de la planète, afin d'en prévoir éventuellement l'évolution, qu'elle soit naturelle ou provoquée par l'activité humaine.

Edith Vincent
Directeur de recherche au CNRS

Bertrand Fritz
Directeur de recherche au CNRS



L'Etna. (Cliché J.-L. Cheminée).

Etablissant de véritables « courts-circuits » entre les couches les plus profondes et les enveloppes externes de la Terre, les volcans modifient l'environnement de façon spectaculaire. Capables de provoquer des crises climatiques majeures en expulsant dans l'atmosphère gaz et poussières, ils montrent à quel point l'évolution de la biosphère s'intègre directement dans celle de l'ensemble du « système Terre ».

Risques naturels : prévision et prévention

Comprendre les mécanismes à l'origine des catastrophes naturelles : une étape préliminaire à toute tentative de prévision.

■ Pierre-Yves Bard
Georges Poupinet

Les catastrophes naturelles sont inévitables, car ce ne sont que des effets secondaires de phénomènes de bien plus grande ampleur sur lesquels l'homme n'a aucune prise : convection profonde, gravité, circulation atmosphérique, érosion, ... Dès lors, seuls deux types d'action sont envisageables pour en limiter au maximum les conséquences humaines et économiques : la prévision et la prévention.

La prévision à court terme des éruptions volcaniques et des glissements de terrain remporte de nombreux succès, parce que la sismicité ou l'accélération des déformations sont des précurseurs physiques qui annoncent la phase paroxysmale. Malgré quelques exceptionnels et très rares succès, la prévision à court terme des séismes est une suite d'échecs. Des progrès dans ce domaine passent par un déploiement de réseaux d'observation permanente et des études *a posteriori* de la genèse de séismes naturels ou induits artificiellement. Les articles ci-après détaillent plus longuement les capacités actuelles de prévision des séismes et des éruptions volcaniques.

Evaluer l'aléa sismique...

La prévention contre les séismes est une activité pluridisciplinaire, dans laquelle les laboratoires de Sciences de la Terre fournissent les données de base (fréquence et caractéristiques des mouvements sismiques) aux responsables du dimensionnement des ouvrages et aux planificateurs. Cette mission mobilise

des compétences très variées : géologues (tectoniciens, stratigraphes, ...), sismologues, mécaniciens des roches et des sols, numériciens.

Dans l'idéal, en effet, l'évaluation quantitative de l'aléa sismique en un lieu donné devrait comprendre les phases suivantes : en premier lieu, des investigations géologiques et sismiques conduisant à un schéma tectonique de la région considérée permettant l'estimation des principales caractéristiques (localisation, mécanisme, magnitude) des plus gros séismes probables. Des calculs de radiation et de propagation des ondes sismiques autour de la faille ainsi décrite, effectués à l'aide de modèles intégrant des données de géophysique profonde, permettent alors d'estimer les mouvements incidents sous le site considéré, où des prospections géophysiques et géotechniques sont requises pour identifier les structures géologiques susceptibles d'amplifier ou de modifier fortement les mouvements sismiques (et en particulier les formations peu rigides).

Les mouvements du sol peuvent donc être estimés en combinant ainsi les effets de source, de propagation, et de site.

Dans la pratique, les étapes de calcul de ce schéma idéal sont très souvent remplacées par l'utilisation de « lois » empiriques déduites des enregistrements de mouvements forts, même si ceux-ci ne correspondent pas au même environnement tectonique ou géologique (beaucoup de pays, dont la France, ne disposent pas des données accélérométriques nécessaires). Les codes de calcul développés pour modéliser la génération et la propagation des ondes sismiques servent donc surtout, à l'heure actuelle, à l'étude rétrospective des séismes survenus dans des zones bien instrumentées (Californie, Japon, Italie, Mexique par exemple) ; mais il est probable que leur utilisation pour la prévention se banalisera au cours de la prochaine décennie.

... et le risque de glissement de terrain

En ce qui concerne la prévention des mouvements de terrain, la contribution essentielle des Sciences de la Terre est la cartographie des secteurs les plus exposés. Ce travail de synthèse repose en grande partie sur l'inventaire des événements passés, et sur des levés géologiques fins ; il bénéficie également de modèles interprétatifs faisant simultanément appel à l'hydrogéologie, à la mécanique des sols et des roches, à la micro-climatolo-



Le Piton de la Fournaise à l'île de la Réunion, vu de la mer. Structure de glissement du flanc est du volcan, large de 8 km, limité par deux remparts se prolongeant dans la mer et par une zone de pente très forte. (Cliché J.-F. Lénat).

Natural hazards: prediction and prevention - Improvements in the prediction of natural hazards and in the mitigation of their consequences require a better understanding of the physical mechanisms controlling their genesis, triggering and effects. For that purpose, the two basic complementary tools are in situ measurements and numerical modelling.

► gie, etc. L'instrumentation et le suivi précis de quelques grands mouvements de versants en activité en France (« La Clapière » dans les Alpes-Maritimes, les « Ruines de Séchillienne » en Isère) amèneront des progrès significatifs dans la compréhension des mécanismes d'accélération ou de ralentissement de ces mouvements. Au contraire d'autres risques naturels comme les séismes, la fréquence des glissements de terrain et leur importance économique est telle en France que, depuis une vingtaine d'années, la recherche y est, pour l'essentiel, pilotée par les grands organismes techniques de l'Etat (Construction, Transports, Agriculture) ; de ce fait, le passage des résultats de recherche à l'application pratique en terme de prévention « quotidienne » est beaucoup plus aisé, et sans doute plus efficace.

La surveillance, clé de l'avenir

La décennie 1990-2000 a été proclamée « Décennie internationale pour la réduction des risques naturels ». Les Sciences de la Terre ont encore devant elles un long chemin à parcourir pour améliorer la compréhension et la prévention de ces risques. La condition *sine qua non* pour atteindre cet objectif est la multiplication, la densification et l'automatisation des réseaux de mesures de surveillance : sans cette accumulation de données de base, la prévision ne progressera pas, et les modèles numériques toujours plus sophistiqués, développés grâce à l'accroissement de puissance des super-ordinateurs, courent le risque de souvent tourner à vide. Ces progrès techniques et scientifiques doivent impérativement être accompagnés d'un gros effort de sensibilisation, sans minimisation ni dramatisation, afin de responsabiliser non seulement les acteurs politiques, économiques et industriels, mais aussi l'ensemble de la population.

■ Pierre-Yves Bard, ingénieur au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 58, boulevard Lefebvre, 75732 Paris Cedex 15 et Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique (URA 733 CNRS).

■ Georges Pôquinet, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique (URA 733 CNRS), Observatoire de Grenoble, Institut de recherches interdisciplinaires de géologie et de mécanique, BP 53 X, 38041 Grenoble Cedex.

A la recherche de signaux précurseurs

La complexité de la physique des tremblements de terre et du milieu dans lequel ils se produisent n'a pas permis pour l'instant de mettre en évidence des signes avant-coureurs fiables.

■ Denis Hatzfeld

Les tremblements de terre sont partie des catastrophes naturelles dont le bilan, tant humain que financier, est quelquefois très lourd. Depuis plusieurs décennies, les scientifiques ont tenté de proposer des méthodes pour prévoir les séismes. On sait que ceux-ci sont dus à une accumulation de contraintes, principalement dans la lithosphère, et à la « fatigue » du milieu sous cette accumulation. Une rupture catastrophique s'initie, se propage de manière complexe le long d'une faille et s'arrête. Elle s'accompagne d'une émission d'ondes acoustiques.

Dans la prévision, il faut distinguer l'identification des zones potentiellement sismiques (c'est la prévision à long terme) de la prévision d'un tremblement de terre et de ses lieu, date et magnitude (c'est la prévision à court terme).

La prévision à long terme est faite en utilisant la tectonique des plaques comme cadre, et la sismicité historique pour l'identification de lacunes sismiques (ou « gaps »). La plupart des principales lacunes sismiques sont maintenant identifiées et des séismes ont eu lieu, postérieurement, les remplissant (par exemple le séisme de Michoacan au Mexique).

Des méthodes peu fiables de prévision

La prévision à court terme (celle qui permet d'évacuer les populations) est plus délicate. Des programmes nationaux ont été mis en place dans des pays très sismiques (par exemple en URSS, aux Etats-Unis, au Japon ou en Chine). Ces programmes étaient surtout basés sur une observation continue de vastes régions sismiques et la reconnaissance de signaux précurseurs. Des méthodes ont été proposées concernant la variation de certains paramètres (étude fine de la sismicité et de ses caractéristiques, rapport de la vitesse des ondes P et des ondes S, déformation lente, champ magnétique, résistivité électrique ...) ou

l'observation de signaux anormaux (émission de radon, comportement d'animaux, lueurs...). Des prédictions ont été revendiquées dans ces différents pays, la plus célèbre concerne le séisme d'Haicheng (Chine) en 1975, et des théories pour les justifier (la théorie de la dilatance expliquait la variation du rapport V_p/V_s). Mais, par la suite, un nombre bien plus important de contre-exemples, le plus meurtrier concerne celui de Tangshan (Chine, officiellement 240 000 morts) en 1976, a montré que ces prédictions avaient été aidées par la chance, et qu'aucune méthode ne pouvait prétendre prévoir un tremblement de terre avec une probabilité raisonnable.

Priorité à la compréhension des phénomènes

Ces mêmes pays sont donc venus à une analyse plus modeste du problème et, depuis quelques années, l'effort est surtout mis sur une meilleure compréhension des phénomènes physiques associés aux tremblements de terre par des études théoriques, de laboratoire et l'instrumentation très dense d'un petit nombre de failles sismiques.

Mais toujours, sporadiquement, il est fait état de la découverte d'une nouvelle méthode enfin fiable. La dernière en date est la méthode VAN, proposée par trois scientifiques grecs, qui utilise les variations transitoires du champ électromagnétique. Cependant des défauts de procédure, une explication ne respectant pas les lois fondamentales de la physique, n'ont pas convaincu bien qu'une polémique ait été entretenue par les médias.

In search of forerunner signals - During the seventies, geophysicists believed that they could analyze the physical phenomena occurring before earthquakes and therefore predict them. A few isolated predictions have been made, but the large number of unpredicted destructive shocks proves that there is still a need to understand the physics of an earthquake.



■ Destructions provoquées par le séisme de Spitak (Arménie), le 7 décembre 1988. Ce tremblement de terre, de magnitude 6,2, a fait environ 25 000 morts. On observe ici certains édifices totalement détruits, d'autres basculés en bloc. (Cliché H. Philip).

La France n'est pas un pays très sismique et les efforts ont été modestes.

Des lacunes sismiques ont été identifiées, par exemple aux Antilles et à Djibouti.

Un réseau sismologique a été installé autour d'Arette dans les Pyrénées centrales, et des actions d'accompagnement

entreprises. Aucune prévision n'a pu être faite, mais cette action concertée a permis une réflexion et l'élaboration de méthodes qui ont ensuite été utilisées sur les volcans.

Un dispositif a été installé autour d'un barrage au remplissage saisonnier, pour étudier toute variation pouvant être cor-

rélée à une variation de contrainte. Aucune anomalie, ni aucune sismicité induite n'ont pu être observées.

Des méthodes très sophistiquées de mesure des temps de propagation d'ondes sismiques ont été élaborées; appliquées à des séismes californiens, elles n'ont pas clairement permis de montrer une importante variation des propriétés du milieu avant et après tremblement de terre.

Ce panorama peut paraître pessimiste. Pour tenter une comparaison avec la météorologie, il faut savoir que prévoir un tremblement de terre correspond à prévoir non pas le mauvais temps, mais le lieu, l'importance et le temps de l'éclair. Pour de nombreuses années encore, on peut penser que la meilleure manière de limiter le risque sismique passe par une approche faisant intervenir une meilleure connaissance de l'influence du sous-sol sur les mouvements enregistrés en surface lors de séismes de forte magnitude et par l'amélioration des constructions.

■ Denis Hatfield, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique (URA 723 CNRS). Observatoire de Grenoble, Institut de recherches interdisciplinaires de géologie et de mécanique, BP 53X, 38041 Grenoble Cedex.

La prévision de l'activité volcanique

Prévoir la date, le lieu et le caractère des éruptions volcaniques est l'un des principaux objectifs de la volcanologie : prévision basée à la fois sur le comportement passé et sur les données de surveillance.

■ Jean-François Lénat

Le volcanisme est un phénomène majeur dans l'évolution de la Terre et d'autres planètes. Une recherche fondamentale s'est donc organisée autour de ce thème. Parallèlement, le caractère parfois catastrophique des éruptions volcaniques a conduit les scientifiques à travailler sur le problème de la prévision des éruptions volcaniques, afin de contribuer à en réduire les effets destructeurs sur les personnes et les biens.

Prévoir à long et à court terme

La prévision de l'activité volcanique est appréhendée à deux échelles de temps.

La prévision à long terme est basée sur l'étude du comportement d'un volcan durant une longue période. Cette approche s'attache à caractériser l'évolution structurale de l'édifice, l'évolution des produits émis, la fréquence et le dynamisme des éruptions. Ces éléments permettent d'élaborer des modèles d'évolution future du volcan et de pro-

Forecasting volcanic activity - Forecasting volcanic activity is based on the study of the long-term behaviour of volcanoes and on visual and instrumental surveillance. Monitoring of seismic activity and deformations are now the main methods of surveillance. Other methods are under study. The study of volcanic risks must remain a major preoccupation for scientists.

poser des scénarios sur les types d'activité susceptibles de se produire.

La prévision à court terme est réalisée à partir de la surveillance instrumentale et visuelle. Une éruption volcanique est toujours précédée et/ou accompagnée du transfert de quantités importantes de magma dans la lithosphère et l'édifice (de l'ordre de 10^6 à 10^9 m³, parfois beaucoup plus). Ce déplacement interne de matière induit un ensemble de phénomènes physiques et chimiques dont quelques-uns sont perceptibles en surface dans la variation de certains paramètres.

La surveillance sismique est de loin la méthode la plus fiable et la plus utilisée. ►

► La surveillance des déformations du sol s'est progressivement imposée comme la seconde méthode opérationnelle pour la prévision (voir une illustration de ces deux méthodes sur la figure). D'autres méthodes restent, à des degrés divers, encore expérimentales, même si dans des cas spécifiques certaines peuvent être utilisées de façon sûre. Ces méthodes recouvrent la surveillance de paramètres tels que : champs magnétique, gravimétrique et électrique, température, composition ou flux des gaz ou de l'eau. Il est certain que les recherches effectuées sur ces paramètres vont progressivement aboutir à dégager de nouveaux outils fiables de prévision. Indépendamment de l'aspect prévisionnel, ces expérimentations participent à l'étude générale des processus volcaniques, et sont importantes à cet égard.

Mieux connaître pour mieux prévoir

La qualité d'une prévision dépend directement du niveau de connaissance sur le site, de la qualité et de la pertinence des données de surveillance, et de la compréhension des mécanismes mis en jeu. Sur ces deux derniers points, ce sont les travaux réalisés sur des « volcans laboratoires » qui ont apporté les progrès les plus considérables. On désigne comme « volcans laboratoires » des sites, sélectionnés sur des critères de type et de fréquence d'activité et d'accessibilité, où une approche multidisciplinaire des phénomènes volcaniques est menée de façon aussi exhaustive que possible. Ces conditions favorisent l'émergence de nouveaux concepts, apportent des contraintes précises pour les modèles développés, et conviennent à l'expérimentation de nouvelles techniques. Des volcans comme le Kilauea (Hawaï), le Mont St-Helens (USA), l'Etna (Sicile), ou le Piton de la Fournaise (Réunion) sont considérés comme des volcans laboratoires.

L'application des concepts et des méthodes élaborés sur ces sites privilégiés nécessite, en général, une adaptation pour d'autres sites, car chaque volcan présente ses propres particularités ; les méthodes et les critères de prévision s'enrichissent de la confrontation d'expériences menées sur des sites différents.

Les progrès technologiques ont contribué aux développements d'équipements de surveillance sophistiqués, et à l'usage intensif des calculateurs en acquisition, traitement et modélisation des données. Parmi les innovations les plus marquantes, il faut noter l'utilisation des techniques satellitaires, soit en imagerie (détection des anomalies thermiques, suivi des nuages éruptifs), soit



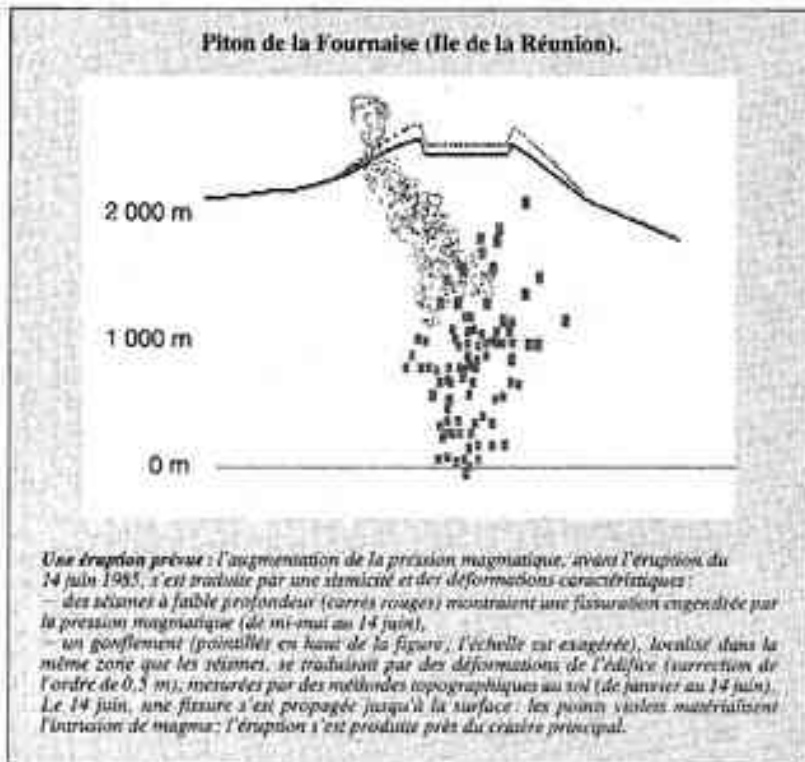
Vue du sommet du Piton de la Fournaise, à l'Ile de la Réunion. On observe la caldéra, le cône central et les cratères sommitaux. (Cliché J.-F. Lénat).

en télétransmission (Argos, Meteosat), soit, enfin, en géodésie spatiale, méthode qui devient opérationnelle pour la mesure des déformations des volcans (système GPS des USA et, prochainement le système français DORIS).

Si, sur des sites équipés de réseaux de surveillance adéquats, les crises volcaniques peuvent être en général prévues, il convient de ne pas occulter les faiblesses qui demeurent.

Sur les quelque six cents volcans actifs, ou potentiellement actifs, seule une faible proportion a fait l'objet d'études, même préliminaires, et seulement quelques dizaines sont dotés de réseaux de surveillance, ceci bien qu'on estime qu'environ 10 % de la population du

monde vivent dans des zones potentiellement menacées. D'autre part, notre compétence à prévoir le type, l'intensité, la date et la durée d'une crise volcanique est souvent limitée. Quelques exemples récents : l'explosion catastrophique du Mont St-Helens aux USA le 18 mai 1980 n'a pas pu être prévue en intensité et date ; entre 1982 et 1984, la crise des Champs Phlégréens, près de Naples en Italie, n'a pas donné lieu à une éruption, bien que le niveau de la sismicité et des déformations impliquait un état d'alerte maximum. Inversement, les risques du volcan Ruiz (Colombie) en 1985 avaient été correctement estimés sur le plan scientifique, mais c'est le manque de coordination et



de préparation des autorités civiles qui est responsable des 22 000 morts.

Beaucoup d'expérience manque encore dans le domaine de la prévision de l'activité volcanique, et en particulier dans le cas des volcans les plus violents, qui sont aussi les moins fréquemment actifs. Dans le passé géologique récent,

des éruptions gigantesques, supérieures d'un ou deux de grandeur en magnitude aux plus importantes éruptions historiques, ont été reconnues. L'impact de tels événements serait considérable pour les populations, de façon directe et indirecte (modifications climatiques transitoires, pollution).

■ Jean-François Léaut, physicien-adjoint à l'Observatoire de physique du globe, directeur du Centre de recherches volcanologiques, responsable de l'équipe Volcanologie de l'Unité « origine, évolution et dynamique des magmas » (URA 10 CNRS), Observatoire de physique du globe, 5, rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand Cedex.

Les observatoires géophysiques

L'objectif à atteindre : une couverture homogène de la Terre par des observations entièrement automatiques enregistrant des données transmises par satellites.

■ Jacques Dubois

Les observatoires géophysiques de l'INSU remplissent trois missions : la surveillance sur le territoire français métropolitain et outre-mer en matière de risque sismique et volcanique ; une mission de recherche en association étroite avec les équipes du CNRS, des universités, de l'ORSTOM, etc. ; une fonction d'accueil pour les chercheurs français et étrangers.

Les observatoires sismologiques

Plusieurs réseaux couvrent le territoire métropolitain et outre-mer. Les données sont généralement télétransmises par radio et on utilise des relais satellitaires (Argos, Meteosat, etc.). C'est le cas de Géoscope, réseau mondial longue période de vingt-cinq stations développé par les IPG de Paris et Strasbourg avec l'aide de l'ORSTOM et des TAAF, de Lithoscope, réseau mobile de courte période. Les réseaux nationaux sont coordonnés par l'IPG de Strasbourg (REINASS), celui des Antilles par l'IPGP. Après traitement, les

paramètres des séismes sont ainsi connus très rapidement.

Les observatoires géomagnétiques

Au nombre de huit, ils enregistrent les variations du champ magnétique terrestre de façon continue au sein d'un réseau mondial de deux cents observatoires environ. Le Bureau central du

magnétisme terrestre à l'IPGP centralise les données de ces observatoires gérés par les IPG de Paris et de Strasbourg (quatre stations avec l'aide des TAAF) et l'ORSTOM. Un programme d'installation de stations automatiques, l'OMP, se met en place. Il coopérera avec le programme international Intermagnet d'échange de données en temps réel.

Les observatoires volcanologiques

Gérés par l'IPGP, deux se situent aux Antilles, Guadeloupe et Martinique, un à la Réunion. Des réseaux de capteurs en sismologie, géomagnétisme, inclinométrie, géodésie, tensiométrie, des levés géodésiques, gravimétriques, des mesures de variations géochimiques des eaux, et des études géologiques permettent d'ausculter en permanence les volcans actifs et d'observer les signes précurseurs des éruptions.



Observatoire volcanologique de la Montagne Pelée (Le Morne des Cadets) en Martinique. (Cliché J.-L. Cheminée).

Geophysical observatories - The geophysical observatories of the Institut national des sciences de l'univers are responsible for monitoring in mainland France and overseas territories. Because of technological progress, a uniform coverage of the whole Earth could be envisaged in the future.

L'observatoire de demain

Compte tenu des progrès technologiques et des premiers essais en cours, on peut prévoir que le futur observatoire sera entièrement automatique avec télétransmission des données par satellites sur des Centres laboratoires de traitement. Le programme OMP, ainsi que les stations légères avec balises Argos qui équipent certains volcans isolés, en

sont des exemples. Quant à l'observatoire sous-marin pluridisciplinaire programmé, en cours d'élaboration, il permettra d'assurer une couverture homogène de la Terre dans tous les domaines de l'observation des paramètres physiques.

INSU: Institut national des sciences de l'univers.

IPG: Institut de physique du globe

IPGP: Institut de physique du globe de Paris

OMP: Observatoire mondial planétaire
ORSTOM: Office de la recherche scientifique et technique d'Outre-Mer.

TAAF: Terres Australes et Antarctiques Françaises.

Jacques Dubois, physicien à l'Institut de physique du globe de Paris, directeur du Département des observatoires. Equipe de géomagnétisme interne et de paléomagnétisme (URA 729 CNRS), IPG, Université Paris VI, tour 24-25, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

Les eaux souterraines

Les propriétés hydrauliques des roches sont si variables dans l'espace qu'il faut s'acheminer désormais vers une approche probabiliste des écoulements souterrains.

■ Ghislain de Marsily

L'hydrogéologie a pour objet l'étude de l'écoulement des eaux, tant à proximité de la surface qu'à grande profondeur, pour comprendre les circulations souterraines actuelles, mais aussi tenter de reconstituer les circulations passées, ou de prédire les circulations futures. Dans le premier cas, il s'agit de connaître l'origine des eaux, leurs relations avec la surface, leur cheminement souterrain, les réserves, les flux d'eau et de substances dissoutes, les interactions entre celles-ci et le milieu traversé. On s'intéresse à l'exploitation des ressources en eau, à la dégradation de sa qualité par les polluants, aux prélèvements par la végétation, à l'incidence des variations climatiques. Mais on touche aussi au rôle de l'eau dans les processus géologiques actuels (glissements de terrain, secousses sismiques, éruptions volcaniques...). Dans le cas des circulations passées, on s'intéresse aux épisodes climatiques du Quaternaire, pour comprendre dans quelle mesure ce que nous observons dans les nappes aujourd'hui est le résultat des circulations anciennes. Depuis peu, on cherche aussi à reconstituer les circulations souterraines dans les bassins sédimentaires depuis leur formation, pour simuler la façon dont les sédiments ont été modifiés par les

circulations anciennes, par dissolution ou précipitation de matière, transport, maturation ou accumulation de substances utiles telles que les hydrocarbures.

Les limites des mesures expérimentales

L'étude des circulations futures vise à déterminer, dans les roches très peu perméables, le transfert éventuel par les eaux des éléments toxiques dissous, issus des stockages des déchets de l'industrie chimique ou nucléaire, que l'on envisage d'enfouir dans ces roches à grande profondeur, pour un confinement que l'on souhaiterait éternel.

Dans tous les cas, l'hydrogéologie se heurte à un problème majeur, connaître en tout point de l'espace les propriétés hydrauliques des roches, en particulier leur perméabilité, qui permet de calculer la vitesse de l'écoulement quand on connaît les conditions aux limites du système. Cette perméabilité est extrêmement variable dans l'espace, du fait de la grande hétérogénéité naturelle des roches et des remaniements apportés par la diagenèse ou la fracturation.

Or les capacités de mesure dans l'espace de cette perméabilité sont extrêmement limitées, pour des raisons de coût d'accès au milieu souterrain. On procède par prise d'échantillons et essais en laboratoire, ou par interprétation d'essais d'injection ou de pompage *in situ*. Les estimations indirectes par corrélation avec des mesures géophysiques sont par ailleurs très imprécises. Pour les conditions d'écoulement passées ou futures, cette « estimation » nécessaire de la perméabilité est bien sûr encore plus aléatoire.

Une approche probabiliste de la perméabilité

On a donc été amené à considérer la perméabilité non pas comme une grandeur dont il est possible d'estimer la valeur en tout point, mais bien comme une variable aléatoire, dont on cherche à caractériser les propriétés statistiques. La mesure a donc pour but d'échantillonner d'abord cette variabilité, pour déterminer ses premiers moments (moyenne, variance, covariance), que l'on tentera ensuite de généraliser à l'espace entier par type de formation: grès, argiles, roche cristalline.

Mais que faire de cette définition stochastique de la perméabilité? Les modèles classiques d'écoulements, qui se traduisent normalement par une équation aux dérivées partielles analogue à l'équation de la chaleur, deviennent des équations aux dérivées partielles stochastiques.

Analytiquement, la voie la plus féconde pour résoudre ces équations a été la méthode spectrale, dérivée de travaux antérieurs sur la turbulence. Numériquement, l'approche la plus utilisée est la simulation au sens statistique (méthode de Monte Carlo).

Plus récemment, les modèles de marche au hasard ou les automates cellulaires ont été mis à l'essai, en rejoignant sur ces thèmes les physiciens des milieux désordonnés.

Les voies de recherches actuelles vont vers la prise en compte simultanée de toutes les informations disponibles sur les milieux et les circulations (lithologie, genèse, concentrations en traceurs environnementaux isotopiques ou non) pour conditionner davantage les simulations statistiques.

Groundwaters - The study of the flow of underground waters depends on the knowledge of the rock permeability. However, as this cannot be measured directly, researchers are turning towards a probabilistic approach.

Ghislain de Marsily, professeur à l'Université Paris VI, directeur du Laboratoire de géologie appliquée, responsable de l'Unité « circulations et transports hydriques confinés » (URA 1367 CNRS), 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

Les fleuves et le cycle géologique externe

Tous les ans, l'érosion arrache au sol jusqu'à 5 000 tonnes par kilomètre carré de matériaux qui sont véhiculés par les fleuves.

■ Michel Meybeck

Les fleuves sont au carrefour de nombreuses disciplines : hydrologie, géomorphologie, géochimie, sédimentologie et même océanographie, sans oublier l'écologie fluviale. Les matériaux transportés peuvent être étudiés selon leur source (altération chimique des roches superficielles, érosion mécanique, lessivage des sols, apports atmosphériques continentaux et marins, et pollutions multiples), leur forme de transport, enfin leur devenir ultime dans les bassins océaniques ou continentaux (production d'algues marines et lacustres, sédiments détritiques et chimiques).

Les transports fluviaux : un maillon fondamental

A la surface du globe, les transports

fluviaux se caractérisent tout d'abord par leur extrême variabilité suivant les conditions du milieu (nature des roches, climat, relief, végétation, géologie). La salinité des grands fleuves varie de 10 à 1 000 mg/l et la charge de matières en suspension (MES) de 5 à 50 000 mg/l. Si globalement les matériaux solides l'emportent sur les matériaux dissous dans les apports fluviaux aux océans (20 milliards de tonnes annuelles contre 4), les transports dissous dominent souvent dans les plaines.

L'érosion des continents est encore le plus souvent estimée par l'étude des transports fluviaux. Toutefois, des corrections nombreuses sont nécessaires. On estime que 50 à 90 % des matériaux solides libérés sur les reliefs sont ultérieurement redéposés au pied des pentes, puis dans les lacs et les plaines alluviales. Quant aux matières dissoutes, une part importante (25 à 80 % suivant les fleuves)

ne provient pas de l'altération des roches mais de deux sources atmosphériques distinctes, le recyclage des aérosols océaniques sur les continents (100 à 500 millions de tonnes par an) et l'acide carbonique d'origine atmosphérique : environ 280 millions de tonnes de carbone sont soustraits ainsi à l'atmosphère, auxquels s'ajoutent 300 millions de tonnes de carbone organique lessivé dans les sols. C'est la raison pour laquelle, pour certains chercheurs, le cycle du carbone à l'échelle des temps géologiques est régulé par les apports fluviaux.

Dans le cycle géologique externe des matériaux, les transports fluviaux constituent un maillon fondamental relativement facile à quantifier puisque six grands fleuves bien sélectionnés permettent d'établir des bilans mondiaux approchés. Les autres apports aux océans sont en général beaucoup plus

Rivers and the external geological cycle - The study of fluvial materials transport gives a better understanding of the relationships between air, soil and vegetation and an estimate of the continental input to oceans. Fluvial transport models provide estimates of past geological fluxes, of present anthropogenic impacts on the hydrosphere and of their projection into the near future.



Les interactions air - sol - végétaux peuvent être abordées par l'étude des matériaux transportés par les fleuves. Ici, le fleuve Congo en janvier 1988 : deuxième du monde par son débit (40 000 m³/s) et par la superficie de son bassin (3 820 000 km²), ce fleuve est étudié dans le cadre des programmes PIRAT et DBT auxquels participe le CNRS. (Cliché J.L. Probst).

► difficiles à quantifier et souvent inférieurs, sauf pour certains éléments pour lesquels les apports hydrothermaux du volcanisme sous-marin doivent être pris en compte. Il faut aussi noter que la zone estuarienne filtre les apports fluviaux tant dissous que particulaires.

A d'autres échelles de temps et d'espace, l'étude de petits bassins versants (1 à 10 km²), initiée il y a 25 ans au Hubbard Brook (New Hampshire) et développée partout aujourd'hui, a permis de modéliser les couplages entre les éléments (carbone, azote, phosphore, potassium etc.), et les interactions entre atmosphère-végétation-sol-nappe-nuisseau. Le suivi des exportations par les ruisseaux permet de quantifier la réponse de ces écosystèmes à des perturbations humaines rapides (coupe à blanc, reboisement), ou lentes (pluies acides).

Les perturbations humaines

L'influence des multiples activités humaines se fait déjà sentir sur les grands fleuves. Le Rhin et la Seine transportent respectivement cinquante fois plus de

NaCl et de phosphates qu'il y a 100 ans. Dans les pays occidentaux à l'agriculture intensive, la surcharge en nitrates pose déjà de graves problèmes de potabilisation et celle en phosphates induit une eutrophication générale (surproduction d'algues que le milieu aquatique ne peut « digérer ») des eaux stagnantes, courantes, et côtières. Le cycle des métaux est aussi déjà très affecté et les sédiments de certains fleuves sont enrichis dix à cent fois en plomb, mercure, cadmium etc.

Dans l'avenir, l'étude des fleuves devra combler certaines lacunes géographiques (Afrique, Asie du Sud-Est) et thématiques (de nombreux éléments en traces restent mal connus). Pour pouvoir extrapoler notre connaissance des cycles actuels aux temps géologiques, il faudra relier par des modèles les processus d'altération, érosion, transport, rétention, étudiés par le biais des fleuves, à tous les facteurs (température, écoulement des eaux, relief, géologie, etc.). A cette fin, l'utilisation de traceurs (isotopes, éléments, molécules) dans les phases dissoute et particulaire, inorganique

et organique, va encore se développer. Les modèles permettront également de comprendre comment et pourquoi la qualité des fleuves a changé sous les impacts humains multiples et de projeter son évolution dans le futur en couplant les facteurs économiques aux cycles biogéochimiques des éléments. Les études fluviales permettront alors une meilleure gestion de notre environnement depuis l'échelle locale jusqu'à l'ensemble de la planète.

■ Michel Meybeck, maître de conférences à l'Université Paris VI, Unité « circulations et transports hydriques continentaux » (URA 1367 CNRS), Laboratoire de géologie appliquée, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

Erosion continentale et tectonique : l'échelle planétaire

Deux mécanismes contraires modèlent notre planète : l'érosion qui entraîne vers la mer des masses de matière, et les mouvements tectoniques qui restaurent le relief.

■ Marc Souriau

L'érosion continentale est la réponse des agents d'altération, de transport et de sédimentation aux soulèvements d'origine interne. Des données de géodésie, de paléobotanique et de minéralogie montrent que les chaînes de montagne se soulèvent à un rythme de quelques millimètres par an, sur des échelles de temps respectives de l'année, de dix mille ans, et de plus de dix millions d'années. Il s'agit alors de la composante verticale de la tectonique globale ; la composante horizontale, détectée par la tectonique des plaques, peut atteindre plusieurs centimètres par

an. Ainsi, à l'échelle de la tectonique globale, la vitesse des mouvements horizontaux est environ dix fois plus grande que celle des mouvements verticaux.

La notion de cycle d'érosion

Le relief continental est le résultat de l'interaction entre agents externes et tectonique verticale ou horizontale. C'est pourquoi l'analyse du relief apparaît comme un outil privilégié pour détecter et quantifier la dynamique sous-jacente. L'observation à l'échelle locale d'un tour d'horizon permet d'apprécier des structures de quelques kilomètres d'envergure, mais à cette échelle le soulèvement tectonique est imperceptible. Par contre certaines failles de décrochement, liées à la composante horizontale des mouvements de tectonique globale,

peuvent avoir des vitesses de déplacement de quelques centimètres par an (faille de San Andreas en Californie, grandes failles dues à la collision Inde-Asie). Alors l'érosion n'oblitére pas la signature de la tectonique sur le relief ; cette tectonique est visible localement et peut être quantifiée dans des cas favorables.

En règle générale, au niveau descriptif, la géomorphologie traditionnelle s'appuie sur des observations de paysages pour proposer des interprétations dynamiques à grande échelle. En absence de signal évident d'origine interne, on a privilégié la notion de « cycle d'érosion » pour lequel l'entrée tectonique est rejetée vers une condition initiale instantanée et inobservable. Le « cycle » aboutit à un arasement du relief qui renait pour un nouveau cycle à partir d'une surrection brutale. On a même tenté de reconnaître plusieurs cycles dans un même paysage.

Pourtant la présence de chaînes de montagne traversant ou longeant des

Continental erosion and tectonics: the planetary scale - Two conflicting mechanisms mould the form of our planet: erosion, which carries quantities of matter towards the sea, and tectonic movements, which rebuild the mountains.



Faille de San Andreas (Californie) (© Cliché Balog/Rapho).

continents démontre qu'à l'échelle continentale, le soulèvement tectonique est actuel et présente une grande amplitude. Les grands réseaux hydrographiques, en transportant les produits de l'érosion vers une embouchure unique, font de façon naturelle le bilan de l'érosion actuelle à une échelle spatiale suffisante pour détecter une entrée tectonique. Les mesures de débit de matière des grands fleuves à l'embouchure et l'estimation des reliefs à partir d'un fichier topographique mondial ont permis l'analyse des réponses de l'ensemble des agents d'érosion à la tectonique.

Quantifier le débit des produits de l'érosion

Il existe deux modes d'érosion fluviale : la composante chimique correspondant à la masse dissoute dans l'eau et la composante mécanique correspondant aux particules en suspension. En moyenne la composante mécanique a une masse dix fois plus grande que celle de la composante chimique. Un bilan à l'échelle planétaire révèle que la composante chimique, indépendante du relief, est corrélée aux précipitations moyennes. La composante mécanique est, elle,

corrélée au relief. Sur l'ensemble des grands bassins hydrographiques, deux types de relation entre érosion mécanique et relief sont identifiées.

Les bassins originaires de chaînes à tectonique récente ont un débit de matière si important que, sans entrée tectonique, le relief serait arasé en moins de cinq millions d'années, mais en supposant un taux de soulèvement permanent de quelques millimètres par an, le relief est préservé. La concordance avec des mesures indépendantes de taux de soulèvement indiquent un équilibre dynamique, c'est-à-dire un régime où érosion et surrection s'équilibrent.

La seconde population de bassins est liée à des chaînes de montagnes anciennes ; leur débit en matière solide, modéré ou faible, est assez variable ; les temps d'arasement s'étagent entre 30 et 700 millions d'années. Nous sommes en présence de régimes transitoires à très grandes constantes de temps. Par rapport à ces temps d'arasement, la période de tectonique active apparaît relativement courte et l'on rejoint la notion de cycle. Une telle échelle de temps exclut l'observation de morphologies résiduelles plus anciennes.

Ces résultats reposent sur l'érosion fluviale au niveau de l'océan mondial. On couvre ainsi 60 % de la surface des continents. Pour les zones complémentaires à érosion fluviale sans débouché océanique, à érosion éolienne ou glaciaire, les interactions avec la tectonique seront plus difficiles à quantifier en l'absence des collecteurs naturels que sont les grands bassins hydrographiques.

La théorie actuelle de la tectonique décrit au premier ordre, avec une bonne cohérence, l'ensemble des mouvements horizontaux des plaques. La prise en compte de processus de surface telle l'érosion continentale, permet de quantifier à la fois les mouvements verticaux et les transferts de masse au sein d'une même plaque, et apparaît de ce fait comme un élément nécessaire dans le cadre d'une théorie de la tectonique des plaques au deuxième ordre. Dans le contexte de la géodynamique globale, ce domaine est encore peu exploré et ses implications géophysiques restent encore à découvrir.

■ Marc Souriau, directeur de recherche, responsable de l'Unité « dynamique terrestre et planétaire » (UPR 234), Observatoire Midi-Pyrénées, 14, avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse.

Sur la trace des nitrates

Retrouver l'origine des nitrates présents dans les eaux souterraines et suivre leur évolution : quelques pas dans la lutte contre la pollution.

■ André Mariotti

La pollution des eaux par les nitrates en zones agricoles ou urbaines est un problème prioritaire pour les gestionnaires de la qualité de l'eau. Parmi les plus importantes ressources en eau, de très nombreuses présentent toutes les qualités chimiques et microbiologiques requises pour une eau potable, à l'exclusion de leur teneur en nitrates dont la concentration, croissante, peut dépasser la norme (50 mg/l).

Outre leur influence néfaste sur les eaux de surface qu'ils contribuent à eutrophiser, ils sont toxiques chez l'homme (méthémoglobinémie, formation possible de composés cancérogènes).

L'azote 15, traceur des engrais dans le sol

L'ion nitrate est le carrefour du cycle biogéochimique de l'azote, dont l'étude a progressé grâce aux traceurs isotopiques. La première méthode fut le marquage artificiel : on introduit dans le cycle de l'élément des produits dont on veut suivre l'évolution et que l'on a enrichis par la variété isotopique ^{15}N , présente seulement à l'état de trace dans le milieu (0,366 atomes de ^{15}N pour cent) : on peut alors suivre, par exemple, le devenir d'un engrais ainsi marqué, vers la plante, vers le sol ou vers la nappe. Le traçage isotopique naturel consiste à interpréter les très faibles variations de l'abondance naturelle en ^{15}N dans différents composés du cycle de l'azote. Ces variations sont dues à des fractionnements isotopiques liés à des différences de propriétés thermodynamiques des isotopes. Au cours des réactions, les liaisons établies avec ^{15}N , isotope léger, sont brisées plus aisément que celles établies avec l'isotope lourd : les espèces chimiques contenant ^{15}N réagissent donc un peu moins vite que les légères. Ainsi, ^{15}N tend à se concentrer dans le substrat résiduel, le produit de la réaction étant, lui, enrichi en ^{15}N .

Ces fractionnements responsables des variations isotopiques naturelles sont très faibles : le rapport des vitesses de réaction des espèces isotopiques n'excède pas 1,040. Ainsi, les enrichissements isotopiques sont peu importants et ont rendu nécessaire, pour pouvoir être mesurés avec précision, la mise au point de

méthodes de mesure sur des spectromètres de masse isotopiques donnant une précision de $\pm 0,00001$ atome de ^{15}N pour cent.

La recherche de l'origine d'une pollution est la première démarche d'une lutte efficace, le traçage isotopique naturel y contribue : il permet souvent de distinguer, par leurs contenus naturels en ^{15}N , les différentes origines de pollution : nitrates produits dans les sols par la matière organique, nitrates des engrais, nitrates issus de contaminations organiques (rejets domestiques, urbains ou produits agricoles : purins, lisiers...). Le traçage isotopique joue alors le rôle d'un traceur d'origine : il identifie la provenance de molécules chimiquement identiques mais différant par leur contenu en isotopes.

La pollution, un processus réversible ?

Le traçage isotopique naturel peut aussi servir à l'identification de processus se déroulant dans le milieu naturel. De soudaines diminutions de teneur en nitrates dans des eaux souterraines, avec la profondeur ou selon le sens d'écoulement, sont fréquemment observées. Ceci peut être dû à la dénitrification (réduction biologique de l'ion nitrate NO_3^- en azote atmosphérique N_2) mais peut aussi être expliqué par la dilution de ces eaux polluées par des eaux sans nitrates.

Résoudre cette alternative est essentiel : dans le premier cas on a une dépollution, alors que dans le cas de la dilution, le bilan en nitrate est constant et l'on peut craindre une élévation de sa concentration si la pollution augmente. Si la chute de concentration est due à la dénitrification, elle s'accompagne d'un fractionnement isotopique et le nitrate résiduel s'enrichit en ^{15}N . Au contraire, la dilution n'entraîne aucune modification isotopique. Cette méthode a été appliquée à la nappe de la craie dans le

Nord. Sur des puits alignés selon le sens d'écoulement de la nappe, on observe, en quelques centaines de mètres, une brutale diminution des nitrates, corrélée à leur fort enrichissement en ^{15}N . Ce fractionnement isotopique démontre la dénitrification. L'étude bactériologique de l'aquifère révèle l'existence de nombreuses bactéries dénitrifiantes.

L'étude de zones boisées en bordure de la Garonne montre que la circulation des eaux sur quelques dizaines de mètres sous la végétation riveraine (saules, aulnaies, frênaies) peut, par dénitrification, les épurer de leur surcharge en nitrates, acquise sur les terrasses cultivées voisines.

La dégradation de la qualité des eaux par les nitrates ne peut qu'inciter à la recherche de situations où la reconquête de cette qualité s'effectue par des processus naturels. Le traçage isotopique permet la recherche de ces zones d'épuration. Il reste à déterminer si ces situations sont fréquentes, à chiffrer les potentiels de dénitrification, afin de guider la localisation des adductions d'eaux potables et promouvoir, par l'aménagement du territoire, des sites potentiellement « dépollueurs », comme les bordures humides des rivières. Les recherches sur l'environnement doivent tenir compte des apports de la biogéochimie isotopique, jeune rambeau de la géochimie.

■ André Mariotti, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, directeur du Laboratoire de biogéochimie isotopique (URA 196 CNRS-INRA), 4, place Jussieu, tour 26, 75252 Paris Cedex 05.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place André-Taziéff 92195 Maudry Cedex

GUNUNG MERAPI : UN VOLCAN A JAVA

Présentation de l'expédition de 1979 de volcanologues sous la direction d'Haroun Tazieff qui étudient et surveillent les phénomènes éruptifs du volcan Gunung Merapi à Java en procédant à des mesures et relevés. Description de la vie quotidienne des habitants de l'île.

Auteurs : Haroun TAZIEFF et Daniel CAVILLON

Réalisateur :

Daniel CAVILLON

Co-production :

CNRS Audiovisuel,

Antenne 2 et

Philippe DUSSART

1980 - 56 minutes

Supports de diffusion : 16 mm et vidéo 3/4"

On the track of nitrates - Measurement of the nitrogen-15 concentration in the nitrate ion in underground and surface waters enables its origin and fate, (especially its reduction by denitrification into molecular N_2 , a non-polluting form), to be determined in certain circumstances.

Des continents aux océans, via l'atmosphère

Des particules de taille submicronique sont transportées dans l'atmosphère sur de très longues distances. Elles contribuent largement au transport de quantités importantes de matière organique entre le continent et l'océan.

■ Alain Salot

L'étude des transferts de matière entre le continent et l'océan a révélé récemment l'importance du vecteur atmosphérique vis-à-vis du transport par les fleuves, traditionnellement mieux connu. Ceci est particulièrement vrai pour le carbone organique. En effet, des quantités importantes de composés organiques sont émises, selon des processus naturels, par les forêts (terpènes, composés des cires cuticulaires...). L'érosion mécanique des sols par les vents sert ensuite d'agent d'introduction des particules terrigènes dans l'atmosphère. Par ailleurs, d'autres particules générées lors d'émissions industrielles ou domestiques, sont également injectées dans l'atmosphère en quantités de plus en plus importantes, du fait d'une activité humaine croissante. Après un transport dont le temps, et donc la distance, seront fonction de la taille des particules émises, mais aussi de la dynamique des masses d'air et du lessivage par les pluies, une fraction de ces particules se redépose dans l'océan superficiel.

C'est ainsi que des particules anthropogéniques, de taille submicronique, parcourent des distances très longues, et contribuent de ce fait à alimenter l'océan hauturier en polluants organiques. En termes de bilan global, on peut estimer à $10\text{--}15 \times 10^6$ tonnes par an la quantité de carbone organique ainsi véhiculée des continents vers l'océan. A titre de comparaison, l'apport par les fleuves peut être estimé à $4\text{--}5 \times 10^6$ tonnes par an et le carbone organique issu de la production primaire marine par le phytoplancton à $300\text{--}500 \times 10^6$ tonnes par an.

Le transport de matière organique via l'atmosphère est donc un vecteur important d'apport à l'océan, récemment mis en évidence, et qui malgré les difficultés inhérentes au prélèvement commence à faire l'objet d'études détaillées. Deux axes de recherche sont actuellement développés :

- l'amélioration des bilans en carbone organique par la saisie de données selon un pas de temps réduit à partir d'un réseau de stations d'observations ;
- la compréhension du rôle de l'apport atmosphérique sur la géochimie de l'océan, et en particulier son impact sur la production primaire.

L'aérosol méditerranéen hauturier pollué

A titre d'exemple, les études conduites sur l'aérosol méditerranéen hauturier, prélevé dans des conditions ultra-propres à bord du navire océanographique *Le Suroît*, ont permis une description quantitative originale du contenu de l'aérosol en termes de com-

posés naturels et anthropiques à partir de traceurs organiques issus d'une part des végétaux terrestres supérieurs (n-alcanes), et d'autre part de processus de combustion de produits fossiles tels que les charbons et pétroles (hydrocarbures aromatiques polycycliques).

Les trajectographies tridimensionnelles des masses d'air, fournies par la Météorologie Nationale, ont permis de conforter un modèle de transport de l'aérosol continental : l'aérosol correspondant à l'impacteur 1 associé à une masse d'air ayant traversé l'Europe du Nord et ses pays industrialisés, prélevé en Méditerranée hauturière, révèle de fortes teneurs en composés anthropiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques) et paraffiniques (n-alcanes), en particulier dans la fraction submicronique ; l'analyse des trajectographies de l'aérosol correspondant à l'impacteur 3 indique une masse d'air ayant voyagé au dessus de l'Europe du Nord, mais cette fois-ci, à des altitudes plus élevées. L'analyse chimique de cet aérosol révèle un contenu en composés aromatiques beaucoup plus faible de celui de l'aérosol collecté par l'impacteur 1, plus chargé en polluants du fait de son voyage dans des couches plus basses de l'atmosphère, fortement contaminées.

Ces études sont actuellement poursuivies à partir de stations de prélèvement côtières, au Cap Ferrat, afin de dresser un bilan annuel d'apport de matière organique à la Méditerranée.

■ Alain Salot, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie, Unité « physique et chimie marines » (URA 353 CNRS), 4, place Jussieu, tour 24, 75252 Paris Cedex 05.



L'aérosol est collecté depuis le navire *Le Suroît*, campagne Phycamed 2, en utilisant des impacteurs à cascade placés sur des échelles fixées à l'avant du navire. Les pompes qui servent à accumuler les aérosols sur des filtres sont commandées par une girouette afin d'éviter tout risque de contamination du bateau. (Cliché A. Salot).

From the continent to the ocean via the atmosphere - Particles of submicron size are transported in the atmosphere over very long distances and effectively contribute to the transport of large amounts of organic matter between the continent and the ocean. Analysis of organic markers in these particles enables natural emissions from terrestrial plants to be distinguished from industrial emissions. Studies underway will provide an estimate of the annual budget of carbon inputs of organic matter to the Mediterranean.

Les latérites

Les latérites : des sols tropicaux formés au contact d'eaux météoriques, en équilibre fragile, menacés par l'exploitation agricole.

■ Daniel Nahon

Dans la zone tropicale, un épais manteau d'altération s'est développé aux dépens de roches éruptives, de roches métamorphiques et de roches sédimentaires, sous l'action des eaux météoriques : ce sont les latérites.

Ces latérites, par le volume qu'elles représentent, doivent être prises en compte dans l'évolution géochimique globale de notre planète. Les transformations et déséquilibres dont elles sont localement le siège ne sont que les conséquences de leur auto-développement ou des variations de conditions externes, mais les implications dans la vie des hommes peuvent être dramatiques. Il est donc nécessaire de comprendre leur genèse, leur fonctionnement, leur évolution.

Le manteau d'altération, parfois épais de plus de 100 mètres, appelé « latérite » ou « couverture latéritique », recouvre environ un tiers des terres émergées (Fig. 1) : il résulte du lessivage par les eaux météoriques des alcalins, alcalino-terreux et d'une partie de la silice évacués vers les nappes et les rivières, conduisant à la formation d'un manteau d'altération résiduel (sol et altérite) par accumulation sur place des éléments les moins mobiles, rapidement piégés dans des minéraux : argiles ou phyllosilicates à une couche de silice (kaolinites) et oxydes et oxyhydroxydes de fer, d'aluminium et de manganèse.

Vers le bas de la couverture latéritique, la transition avec la roche mère saine montre de grosses reliques de roches inaltérées baignant au sein des produits d'altération, on appelle de tels horizons des saprolites grossières. Très rapidement en quelques mètres, ces reliques s'altèrent et passent à des horizons meubles dans lesquels on reconnaît encore la structure originelle de la roche

mère préservée par les produits d'altération. L'altération est dite isovolume et de tels horizons portent le nom de saprolite fine (Fig. 2).

Une succession permanente de remaniements

Les profils latéritiques sont sans cesse visités par les solutions météoriques qui percolent, conduisant ainsi à des dissolutions des produits d'altération et à la reprécipitation de nouvelles générations de minéraux, de taille, de cristallinité et parfois de composition différentes. Ces remaniements chimiques sont réitérés au gré des saisons, des années, des milliers d'années, des centaines de milliers d'années, voire pour les plus vieux manteaux, de quelques millions d'années.

Les structures primitives sont remplacées par des structures de sols où les minéraux s'associent en agrégats microscopiques (quelques centaines de microns), et la juxtaposition de ces derniers constitue les horizons de sols (oxisols des pays tropicaux humides). Etant donné l'âge de leur différenciation, ces sols et altérites des pays tropicaux humides subissent des évolutions dont les modifications climatiques ou tectoniques sont la cause principale. Ces évolutions peuvent trouver leur origine dans le développement de la dynamique du sol lui-même : c'est dans ce cas un

auto-développement.

Ainsi peut-on expliquer que des oxisols latéritiques se transforment en podzols tropicaux (sols constitués de sables blancs) ou conduisent à des accumulations d'oxydes de fer indurées (craissures ferrugineuses).

C'est une modification de la dynamique des solutions, induite par ces transformations, qui redistribue les constituants minéraux et organiques du sol et de l'altérite. Souvent, à la dynamique verticale des solutions se substitue une dynamique latérale qui est responsable de la transformation de systèmes de sols initiaux en systèmes dérivés. De telles transformations intéressent des portions de modelé, mais parfois des paysages entiers, de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de kilomètres carrés.

Un sol fragile, un rôle primordial

Les systèmes de sols et d'altérites des zones tropicales jouent donc un rôle primordial dans la mise en valeur des pays situés dans la zone tropicale et qui sont le plus souvent des pays en voie de développement. Tout d'abord ces sols et altérites sont les supports appauvris de leur enjeu agricole. L'amendement et l'enrichissement en engrais peuvent avoir un rôle déstabilisateur des microagrégats des sols et jouer ainsi sur les vitesses d'érodabilité. Les latérites sont fragiles dans leur équilibre. Leur exploitation par l'homme en agriculture nécessite une connaissance approfondie des conséquences possibles sur leur déstructuration. Ensuite les latérites peuvent être le siège de concentrations de métaux ou de substances utiles peu mobiles qui, en s'accumulant près de la surface,

Laterite soils - Laterite soils are produced by the transformation of hardened rocks under the influence of climatic variables, in humid tropical regions. These soils play an all-important role in tropical countries since they act as a support for agriculture, a groundwater reservoir and a material in which useful substances are concentrated. Finally, laterites support the great equatorial forests.

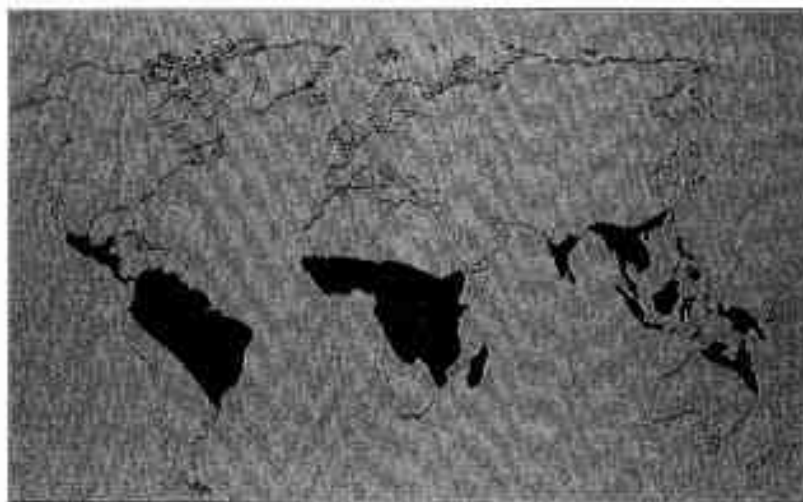


Fig. 1 - Carte de la répartition mondiale de la couverture latéritique (en brun-rouge). Ce type de sol correspond le plus souvent à des pays en voie de développement.



Fig. 2 - Coupe de la couverture latéritique où l'on peut voir l'altération de la roche mère (saprolite fine en bas de la coupe). (Cliché D. Nahon).

peuvent conduire à des gisements exploitables de manganèse, de cobalt, de nickel, de chrome, d'or, d'aluminium, etc. Enfin, les latérites sont le filtre des eaux polluantes rejetées par les mégapoles et les industries. Connaître les interactions entre minéraux et solutions permet de simuler l'évolution de ces sols et altérites. Connaître les cycles des éléments, même en truce, permet de prévoir comment un ou plusieurs éléments polluants pourraient transiter et se fixer dans ces sols et donc permet de proposer des remèdes.

■ Daniel Nahon, professeur à l'Université d'Aix-Marseille III, directeur du Laboratoire des géosciences des environnements tropicaux (URA 132 CNRS), Faculté des sciences et techniques Saint-Jérôme, 13397 Marseille Cedex 13.

La pédologie, ou l'interaction entre le vivant et le minéral

■ Adrien Herbillon

Dès que sur une roche mise à l'affleurement s'installe la vie, commence aussi la série des processus qui vont individualiser les objets dont traite la pédologie. Les sols, résultat des interactions entre les mondes biologique et minéral, sont, comme tous les organismes vivants, des individus dotés de différents niveaux d'organisation. Comme tout organisme vivant encore, ils sont en devenir : ils fonctionnent et ils évoluent.

Ce n'est qu'à la fin du XIX^e siècle qu'a émergé l'utilisation du mot « sol » avec sa connotation scientifique actuelle et que la pédologie s'est individualisée à la frontière des sciences naturelles traditionnelles et des disciplines appliquées comme la chimie agricole et l'agronomie. Les premières préoccupations

des pédologues ont été génétiques. Il s'agissait d'établir les relations entre les caractères des sols, particulièrement leur morphologie et leur constitution, et les facteurs du milieu responsables de leur différenciation. Une telle démarche nécessitait aussi que se développent des recherches en systématique des sols bien ancrées sur une connaissance de leur répartition, tant aux grandes qu'aux petites échelles.

Nous tirons aujourd'hui profit de ces recherches : les raisons justifiant de la répartition des sols, que ce soit à l'échelle d'un continent ou à celle d'un petit bassin versant, commencent à être bien connues. Les pédologues peuvent aussi raisonnablement bien identifier les grandes catégories de contraintes, biologiques, chimiques ou physiques qui limitent leur fertilité. En

d'autres mots, les inventaires de la ressource « sols », bien que non terminés, ont bien progressé.

Par contre, et parce que ce défi est d'une tout autre dimension, on sait beaucoup moins bien comment protéger et conserver cette ressource fragile, de plus en plus fréquemment soumise à des exploitations malencontreuses et aux agressions des pollutions. Conscients de ce danger, les pédologues troquent résolument leurs préoccupations génétiques d'autant contre des démarches où le fonctionnement du compartiment sols dans les écosystèmes est suivi en temps réel. De même, la pédologie expérimentale est en plein essor. Par ces deux types de démarches, la pédologie conforte son rôle de discipline-carrefour, où des scientifiques venus d'horizons parfois extrêmement différents doivent appréhender ensemble le même objet.

Pedology, or the interaction between the living and mineral worlds - Pedology is a science that appeared a century ago on the borders of geology, traditional natural sciences and applied subjects such as agricultural chemistry and the study of agricultural soils.

■ Adrien Herbillon, professeur à l'Université de Nancy, directeur du Centre de pédologie biologique (UPR 6831 CNRS), 17, rue Notre-Dame-des-Pauvres, BP 5, 54501 Vandœuvre-les-Nancy Cedex.

Paléolacs et paléoclimats

Les sédiments lacustres dans les déserts témoignent de cycles aridité/humidité. A quand un Sahara de nouveau verdoyant ?

Jean-Charles Fontes
Françoise Gasse

Les fluctuations des climats ont joué un rôle peut-être aussi important que les barrières naturelles de la topographie et des endémies dans l'émergence souvent difficile des civilisations. Comprendre les mécanismes qui induisent la variabilité des climats du passé, c'est aussi œuvrer pour la gestion du futur car on sait aujourd'hui avec certitude que les climats se répètent de façon cyclique. Les sédiments lacustres des creux de dunes sahariennes confirment les représentations de l'art pariétal des Tassilis sur le développement de faunes brouteuses dans des régions aujourd'hui hyperarides mais inégalement promises à redevenir humides et propices à la vie.

Les archives des glaces polaires et des sédiments océaniques font apparaître des échanciers climatiques à l'échelle de quelques millénaires. Les recherches se poursuivent pour décrypter les probabilités de hautes fréquences de retour en vue de la prédiction à l'échelle des générations... pour autant que les activités de l'homme n'aboutissent à des situations jusqu'ici inédites. C'est sur les étendues continentales que se posent les questions importantes pour l'avenir des sociétés, c'est de là aussi, et en premier lieu des dépôts lacustres, que doivent maintenant venir des réponses.

Les sédiments lacustres, indicateurs climatiques

Toutefois, la discontinuité spatiale des bassins et des aires biogéographiques, la grande diversité des indicateurs biologiques, les interruptions d'enregistrement imputables aux alternances en-

tre phases de sédimentation et phases d'érosion, les délais d'écoulement souterrain, sont autant de difficultés spécifiques qui ont longtemps pénalisé les études sur les paléolacs et les paléoclimats des continents. Les documents doivent en effet être dépouillés de l'influence des facteurs locaux pour qu'apparaisse le signal climatique. Grâce à des taux d'accumulation généralement élevés, les sédiments lacustres offrent alors un pouvoir séparateur potentiel plus grand que les chroniques océaniques.

En régions tropicales, les alternances humide/aride engendrent des variations, souvent considérables, des plans d'eau lacustres. A Djibouti, le lac Asal a subi voici environ 6 000 ans, une décrue de plus de 300 m en quelques siècles, transformant l'étendue d'eau douce de 1 000 km² en une saline aux saumures dix fois plus concentrées que l'eau de mer (voir figure).

De grands lacs au Sahara

L'interprétation des anciennes lignes de rivage lacustres et des sédiments de fond nécessite en premier lieu l'établissement d'un calendrier. En milieu continental, aucun calage indirect comme celui que livre la stratigraphie isotopique

des foraminifères marins ou des glaces polaires, n'est encore possible. Le temps provient avant tout des radiochronomètres. Les accélérateurs de particules spécialement conçus pour la mesure du radioc carbone permettent désormais de limiter les prises d'essai à quelques milligrammes.

Ce gain de trois ordres de grandeur est capital pour la finesse des échelles de temps et aussi pour dater des matériaux autrefois considérés comme « stériles ». Cependant, les risques demeurent d'un vieillissement excessif du carbone dans le cas des lacs alimentés par des nappes d'eau souterraine ancienne. Pour les temps plus reculés, le radiochronomètre du couple ²³⁴U/²³⁸Th, peut atteindre, au prix de certaines précautions, des âges de l'ordre de 200 000 ans sur les carbonates continentaux. Cette méthode a ainsi attribué à l'intervalle 90 000-125 000 ans, l'extension sur le Sahara de surfaces ennoyées comparables à celles des grands lacs américains.

A condition de calibrer les variables, notamment écologiques, sur des références actuelles, les sédiments détiennent des témoignages précis sur leur milieu de dépôt. On sait par exemple estimer les salinités des paléolacs à partir des restes de petits crustacés (ostracodes) ou d'algues microscopiques (diatomées). Ces variables peuvent se combiner pour accéder à certains paramètres des paléoclimats : le traitement conjoint des salinités indiquées par les diatomées et des teneurs en ¹⁸O de l'eau déduites de celles des carbonates, conduisent à des estimations de l'humidité de l'air au moins deux fois plus élevées qu'aujourd'hui sur le Nord Sahara pendant le Néolithique.



Anciennes lignes de rivage en bordure du lac Asal (République de Djibouti). La plus basse (ici la plus visible, 55 m au-dessus du lac) est datée de 4 500 ans BP. (Cliché F. Gasse).

Ancient lakes and past climates - The major fluctuations of tropical lakes are mostly in phase with the climatic events well documented from polar ice cores and deep-sea sediments. The research effort is now directed towards understanding abrupt changes in climate and climatic cycles of short duration which control life in certain sensitive and vulnerable regions like the Sahel.

Des cycles aridité/humidité

A l'issue de l'établissement de dossiers analytiques détaillés et critiqués, les termes des paléobilans hydrologiques peuvent être évalués. Ainsi, estime-t-on des hauteurs de précipitations supérieures d'au moins 30-40 % à celles de l'actuel sur les bassins du lac Naivasha au Kenya, ou du lac Sambhar, aux Indes, il y a environ 9 000 ans. Certains grands déterminismes des changements climatiques se dégagent d'ores et déjà pour les 20 000 dernières années. Les pulsations majeures des lacs tropicaux de l'hémisphère nord depuis la dernière période glaciaire, voici 18 000 ans, sont sensiblement en phase avec les variations de flux d'énergie solaire reçue par

cet hémisphère telles que la mécanique astronomique permet de les calculer. Cependant, ici comme dans l'océan et dans les glaces, le caractère abrupt des changements hydrologiques contraste avec l'évolution progressive prévue par la théorie orbitale des climats et implique d'autres contraintes, océaniques et peut-être atmosphériques. La concordance de phase entre oscillations du lac Tanganyika, changements du niveau des océans et du volume des glaces depuis environ 26 000 ans ne doit pas plus au hasard que la bonne concomitance qui vient d'être relevée entre les pulsations de la dernière déglaciation en mer et les étapes de la transition aride/humide voilà 15 000 à 7 000 ans au Sahara.

Sur fond de ballet climatique apparemment bien réglé à l'échelle du millénaire,

voire du siècle, se profilent toutefois des anomalies dont il faut maintenant rendre compte. Et tout d'abord, quel est le véritable moteur des infimes variations de flux entre les différents compartiments de l'hydrosphère qui se traduisent *in fine*, pour l'homme du Sahel, par deux décennies successives de sécheresse ?

■ Jean-Charles Fontes, professeur à l'Université Paris-Sud, directeur du Laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique (URA 723 CNRS).

■ Françoise Gasse, directrice de recherche au CNRS, Laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique (URA 723 CNRS), Université Paris-Sud, Bât 504, 91405 Orsay Cedex.

Archives glaciaires : climats du passé et effet de serre

Les variations des températures passées, mesurées dans les glaces polaires, sont fortement liées aux teneurs de l'atmosphère en gaz à effet de serre : un impact important des activités humaines sur le climat est ainsi prévisible.

■ Claude Lorius

La mesure de l'abondance relative des isotopes lourds (deutérium et oxygène 18) dans les molécules H_2O qui constituent la glace permet de déterminer la température de l'atmosphère au moment où s'est formée la précipitation, sous forme de neige, qui alimente les calottes glaciaires. Cette neige, en se transformant peu à peu en glace, emprisonne des bulles d'air ; leur analyse permet de déterminer la composition de l'atmosphère dans le passé.

L'un des problèmes majeurs qui se pose dans le domaine de l'environnement est d'estimer l'impact climatique de l'augmentation des concentrations dans l'atmosphère des gaz à effet de serre. Il est commode pour cela de se référer à un doublement des teneurs en CO_2 qui se produirait au cours du siècle à venir. On sait calculer le réchauffement attendu des seules modifications du bilan radiatif dû à ce changement de composition de l'atmosphère ; il est d'environ $1,2^\circ C$. Mais il faut aussi prendre en compte les effets amplificateurs (tels

que ceux liés à la fusion de la glace de mer des régions polaires) et le rôle des nuages particulièrement mal connus. Les modèles de simulation du climat prévoient un réchauffement de trois $\pm 1,5^\circ C$ pour un doublement des teneurs en CO_2 , les valeurs les plus récentes étant voisines de $4^\circ C$. L'effet purement radiatif est ainsi multiplié par trois ; le problème est de valider ce coefficient qui exprime la sensibilité du climat à une modification du forçage lié aux teneurs de l'atmosphère en gaz à effet de serre.

The historical record in glaciers: past climates and the greenhouse effect - Analyses of ice cores from the Antarctic show that the concentrations of atmospheric CO_2 and CH_4 are correlated with the major climatic changes that have occurred over the last 150 000 years, and that they have contributed to the observed variation in temperature. The future impact of human activities on the climate can therefore tentatively be estimated.



Fig. 1 - Station mobile de carottage dans la glace : région côtière de Terre Adélie. (© CNRS Cliché LGGE Antarctique)

Les glaces, témoins de 150 000 ans

Dans ce domaine, l'étude du passé est susceptible de fournir de riches informations. C'est ainsi qu'un carottage profond de 2 200 m réalisé dans les régions centrales de l'Antarctique a permis, dans le cadre d'une collaboration franco-soviétique, d'obtenir une séquence couvrant les 150 000 dernières années. Durant cette période on observe de larges variations de la température. Il faut remonter à plus de 100 000 ans en arrière pour retrouver un climat interglaciaire (donc chaud) semblable à celui que nous connaissons aujourd'hui, tandis que l'on observe dans l'intervalle des températures beaucoup plus basses notamment lors du dernier maximum glaciaire qui a culminé il y a environ 18 000 ans. L'analyse spectrale de la courbe de température met en évidence, outre un signal interglaciaire d'environ 100 000 ans, des périodicités de 20 et 40 000 ans. ▶

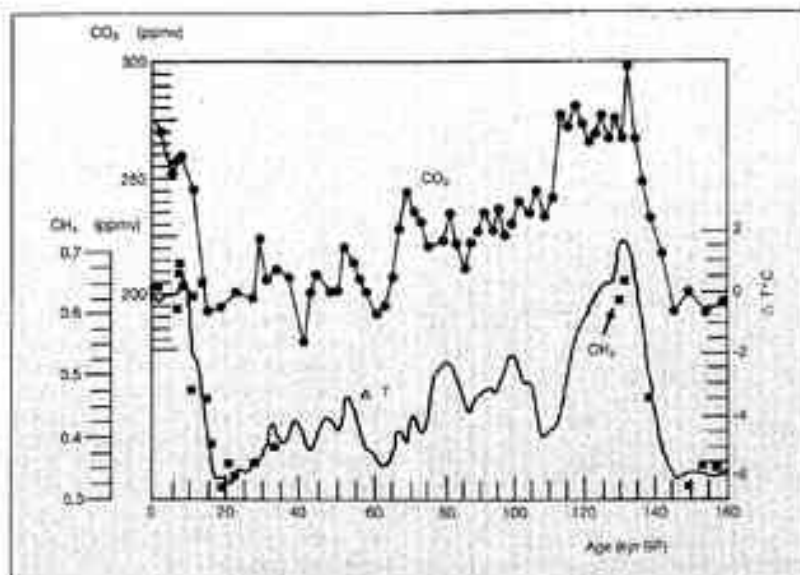


Fig. 2 - Données provenant de la carotte de Vostok (Antarctique) :
- Variation de la température (Δ , °C) déduite de la composition isotopique de la glace.
- Teneur de l'atmosphère en CO₂ et CH₄ déterminée à partir de l'analyse des bulles d'air contenues dans la glace. L'échelle des temps portée en abscisse couvre les derniers 150 000 ans.



Fig. 3 - Glace de mer, icebergs. En arrière plan, la calotte glaciaire de l'Antarctique. (© CNRS Cliché LGGE Antarctique).

► Ce résultat conforte la théorie astronomique des cycles climatiques : les variations d'insolation à la surface de la terre, liées aux caractéristiques de l'orbite de la Terre autour du Soleil, amplifiées par le développement et la disparition des calottes polaires sur les continents de l'hémisphère Nord, permettent d'expliquer la succession des cycles glaciaire-interglaciaire.

Gaz à effet de serre et température

Les résultats obtenus tout récemment à partir de la carotte de Vostok apportent dans ce domaine un éclairage nouveau avec la mise en évidence d'une très forte corrélation entre les variations de la température et celles des teneurs de l'atmosphère en gaz à effet de serre (Fig. 2). C'est ainsi que pendant les minima glaciaires, les teneurs en CO₂ et CH₄ étaient respectivement inférieures de 25 et 50 % à celles observées durant les interglaciaires, et notamment avant le début de l'ère industrielle. La comparaison statistique de la courbe des températures avec différents forçages indique que les variations de température sur l'ensemble du cycle glaciaire-interglaciaire seraient dues essentiellement, et dans des proportions équivalentes, au forçage astronomique et à la variation des teneurs de l'atmosphère en CO₂ et CH₄.

En moyenne sur le globe, cette variation est de l'ordre de 4°C (donc sensiblement comparable à celle attendue d'un doublement des teneurs en CO₂) ; les changements de concentration de ces gaz à effet de serre pourraient ainsi expliquer une variation de la température d'environ 2°C. Comme l'effet purement radiatif est de l'ordre de 0,7°C, ce résultat suggère un facteur d'amplification de l'ordre de trois, traduisant la sensibilité du climat au forçage lié aux concentrations en gaz à effet de serre. Cette valeur correspond en fait à celle obtenue dans les modèles de simulation du climat futur. Ainsi, de façon indépendante, les données du passé et les simulations conduisent à des estimations cohérentes. Toutes deux se rejoignent pour estimer que l'impact climatique des activités humaines pourrait être considérable.

■ Claude Lohin, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement (UPR 5151 CNRS), BP 96, 38402 Saint-Martin d'Hères Cedex.

L'océan profond au cours de la dernière glaciation

Les fossiles présents dans les sédiments marins gardent en mémoire la température et l'histoire des mouvements de l'eau dans l'océan.

Jean-Claude Duplessy

Les sédiments marins contiennent de nombreux fossiles et en particulier les coquilles calcaires des foraminifères benthiques, animaux qui ont vécu à la surface du sédiment. Leur composition isotopique reflète les caractéristiques du milieu dans lequel ces animaux ont vécu : celle de l'oxygène (rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) permet d'estimer la température tandis que celle du carbone (rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) reflète la composition isotopique du CO_2 dissous dans l'océan. Or le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ du gaz carbonique dissous dans les eaux profondes diminue au fur et à mesure que celles-ci s'éloignent de la zone où elles ont plongé, parce que l'oxydation des matières organiques, qui tombent sous forme de particules depuis la surface, relâche du gaz carbonique pauvre en ^{13}C . Cette méthode géochimique constitue les bases de la paléo-océanographie. Au cours des dernières années, elle a été intensi-

vement appliquée à la reconstitution des conditions qui régnaient il y a environ 18 000 ans, au moment du paroxysme de la dernière glaciation.

Un refroidissement des eaux profondes

L'analyse de carottes prélevées dans la plupart des bassins profonds de l'océan mondial témoigne d'un refroidissement de 1 à 3°C des eaux en dessous de 2 000 m tandis qu'entre 1 000 et 2 000 m, les températures étaient restées voisines de celles d'aujourd'hui. La séparation entre les eaux intermédiaires et profondes était marquée par une variation brutale qui n'a aucun équivalent dans les conditions actuelles (Fig. 3).

Le schéma de circulation générale était aussi sensiblement différent de celui d'aujourd'hui. Actuellement, on observe la présence dans l'océan Atlantique de deux masses d'eau, l'une ayant plongé au nord et l'autre au voisinage du

Deep ocean circulation during the last glaciation - Oceanic circulation patterns can be reconstructed from fluctuations in the oxygen and carbon isotopic composition of fossil foraminifers present in deep-sea sediments.

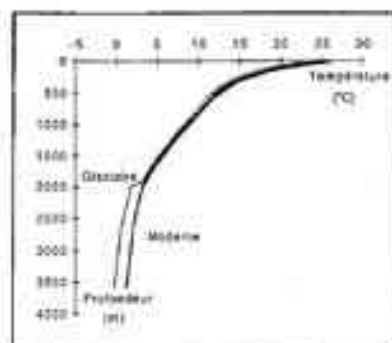


Fig. 3 - Variations de la température des eaux de l'océan Indien Nord en fonction de la profondeur dans les conditions actuelles (mesures effectuées par les océanographes) et pendant le dernier maximum glaciaire datant de 18 000 ans (reconstituées par les méthodes isotopiques).

continent Antarctique (Fig. 1). Pendant le dernier maximum glaciaire, l'eau d'origine antarctique avait envahi l'essentiel du bassin profond de l'océan Atlantique et l'extension de l'eau profonde formée dans l'Atlantique Nord était considérablement réduite (Fig. 2).

Tous les bassins océaniques étaient ainsi envahis par l'eau dense formée au voisinage de l'Antarctique. Le radiocarbone permet d'estimer la vitesse avec laquelle cette eau était renouvelée. En effet, dans une même couche de sédiment, la différence d'âge ^{14}C entre les coquilles de foraminifères planctoniques (qui ont vécu dans les eaux superficielles) et benthiques (qui ont vécu au fond) mesure le temps qui s'est écoulé depuis que les eaux ont plongé. Il est en moyenne de 1 500 ans dans les conditions actuelles, mais il était voisin de 2 000 ans pendant la glaciation.

La circulation océanique globale est donc extrêmement variable. Les sédiments en témoignent et l'apparente brutalité avec laquelle les changements apparaissent suggère que le passage d'un mode de circulation à un autre pourrait être rapide. L'océan n'a pas encore fini de nous étonner !

Jean-Claude Duplessy, directeur de recherche au CNRS, directeur du Centre des faibles radioactivités (UPR 2101 CNRS, Laboratoire mixte CNRS-CEA), avenue de la Terrasse, 91198 Gif-sur-Yvette Cedex.

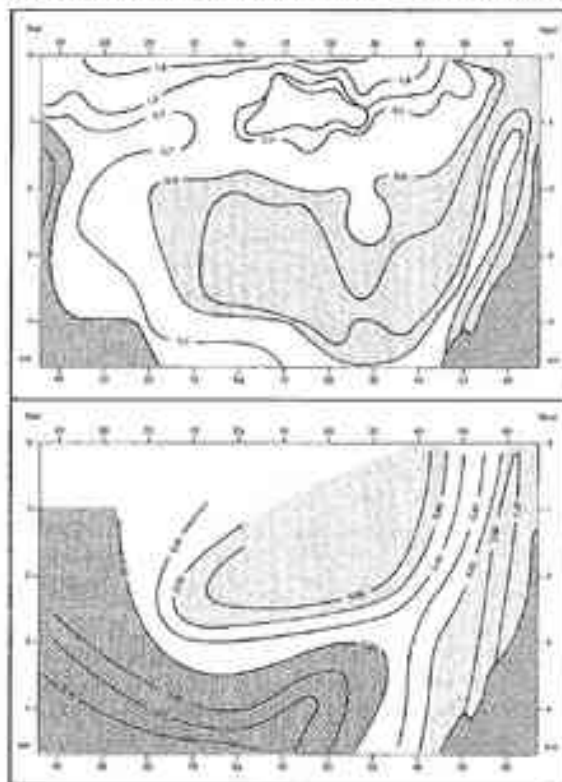


Fig. 1 - Époque actuelle : variations de la composition isotopique du carbone du gaz carbonique total dissous, mesurées au cours des campagnes Gêosecs dans l'océan Atlantique.

Fig. 2 - Dernier maximum glaciaire : variations de la composition isotopique du carbone du gaz carbonique total dissous. La reconstitution a été obtenue par l'analyse du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ des foraminifères benthiques dans diverses carottes de sédiments océaniques.



A l'initiative de l'UREF
UNIVERSITÉ DE LA FRANCOPHONIE
opérateur privilégié du Sommet de Dakar
pour l'enseignement supérieur et la recherche
a été créée la revue

SCIENCE ET CHANGEMENTS PLANETAIRES SECHERESSE

Son ambition :

Faciliter la communication entre spécialistes de disciplines très variées d'une part, et entre spécialistes et agents de terrain d'autre part, pour accroître la prise de conscience et la coopération sur un sujet d'importance planétaire.

Pour cela, une double attention :

- la rigueur, pour satisfaire les fondamentalistes les plus exigeants
- la clarté, pour s'attacher les hommes de terrain les plus pragmatiques

Dans les premiers numéros :

Les fausses conceptions de la sécheresse

Les débits d'irrigation en France

Physiologie de la résistance des plantes

Les ressources en eau des zones arides

Les cycles climatiques et la désertification

Les conditions favorisant la sécheresse

Le droit des interventions sur le climat

Les parasites animaux des climats arides

L'homme face à la chaleur

La bilharziose est-elle le prix à payer pour l'irrigation en pays tropical ?

L'économie dans la lutte contre la sécheresse

Évaluation des dégâts de la sécheresse

La barrière verte contre la désertification

Le paysan face à la sécheresse

Télédétection et irrigation

Guider les troupeaux par satellite

Souscrivez dès maintenant : 4 numéros par an
Les abonnements peuvent être souscrits à l'adresse ci-dessous :

John Libbey Eurotext 6 rue Blanche 92120 MONTRouGE - Tél : 47 35 85 32 - Téléfax : 46 57 10 09

SCIENCE ET CHANGEMENTS PLANETAIRES SECHERESSE

BULLETIN D'ABONNEMENT 4 numéros par an

Je souhaite m'abonner à SECHERESSE.

Tarif : Particuliers ☐ Institutions ☐ Étudiants* ☐
280 F 480 F 200 F

(50% de remise : Afrique, Asie, Amérique du Sud, Haïti)

Nom : _____

Fonction : _____

Adresse Complète : _____

* Joindre une photocopie R/V* de la carte d'étudiant.

Je joins : ☐ un chèque postal
☐ un chèque bancaire

A l'ordre de :
JOHN LIBBEY EUROTEXT
6, rue Blanche - 92120 MONTRouGE

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place Aristide-Briand 92195 MAISON CEDEX

« CHALAIN, MÉMOIRES DE L'EAU » - CHRONIQUES D'ARCHÉOLOGIE LACUSTRE

Le lac de Chalain, situé dans le Jura est un gisement archéologique remarquable. Mises à jour en 1904, des cités lacustres originaires du néolithique ont été préservées hors des atteintes de l'air et des variations climatiques.

Le film retrace un été de recherches et d'expérimentations : les fouilles, leur traitement et leur analyse ont permis la reconstitution historique d'un village.

Auteur-réalisateur :

Jean-Luc BOUVRET

Direction scientifique :

Pierre et Anne-Marie

PÉTREQUIN

Co-production : CNRS Audiovisuel
et « Pour voir »

1989 - 35 minutes - Supports de
diffusion : 16 mm et vidéo 3/4"

ELLE TOURNE, ELLE VIT

Une mise en spectacle de la métaphore « Terre, organisme vivant » permet de présenter le LERTS (Laboratoire d'Études et de Recherches en Télédétection Spatiale) dont le rôle est de comprendre la dynamique du fonctionnement terrestre, de prédire son évolution et les conséquences sur le développement végétal. L'attention est surtout portée sur les nouveaux moyens d'investigation des satellites SPOT, NOAA et METEOSAT.

Auteur-réalisateur : Luc ESPIÉ

(sur une idée

d'Aline CHABREUIL et Gilbert SAINT)

Co-production : CNRS Audiovisuel,
CNES et IFREMER

Producteur délégué :

Les Films de la Maîtrise

1987 - 23 minutes - Supports de
diffusion : 16 mm et vidéo 3/4"

L'ERTA-ALE

Observation du lac de lave en fusion de l'Ert'a-Ale, en Éthiopie orientale, par les volcanologues pour étudier les mécanismes de l'activité éruptive.

Auteur-réalisateur

Haroun TAZIEFF

Co-production : CNRS Audiovisuel
et Ciné-documents TAZIEFF

1973 - 22 minutes

Support de diffusion : 16 mm
et vidéo 3/4"

LA TERRE AU LABORATOIRE

A l'origine essentiellement descriptives, les Sciences de la Terre ont progressivement conquis au cours des dernières dizaines d'années un statut de science exacte. Cette mutation, moins spectaculaire que la tectonique des plaques, n'en constitue pas moins un changement radical. Le développement des outils analytiques et expérimentaux, les emprunts théoriques faits aux physiciens et chimistes ainsi que les possibilités modernes de calcul ont permis, par des études de laboratoire, une caractérisation précise des principaux matériaux terrestres (minéraux et roches d'abord, mais également fluides et liquides silicatés) et l'élaboration de modèles à différentes échelles ayant valeur prédictive.

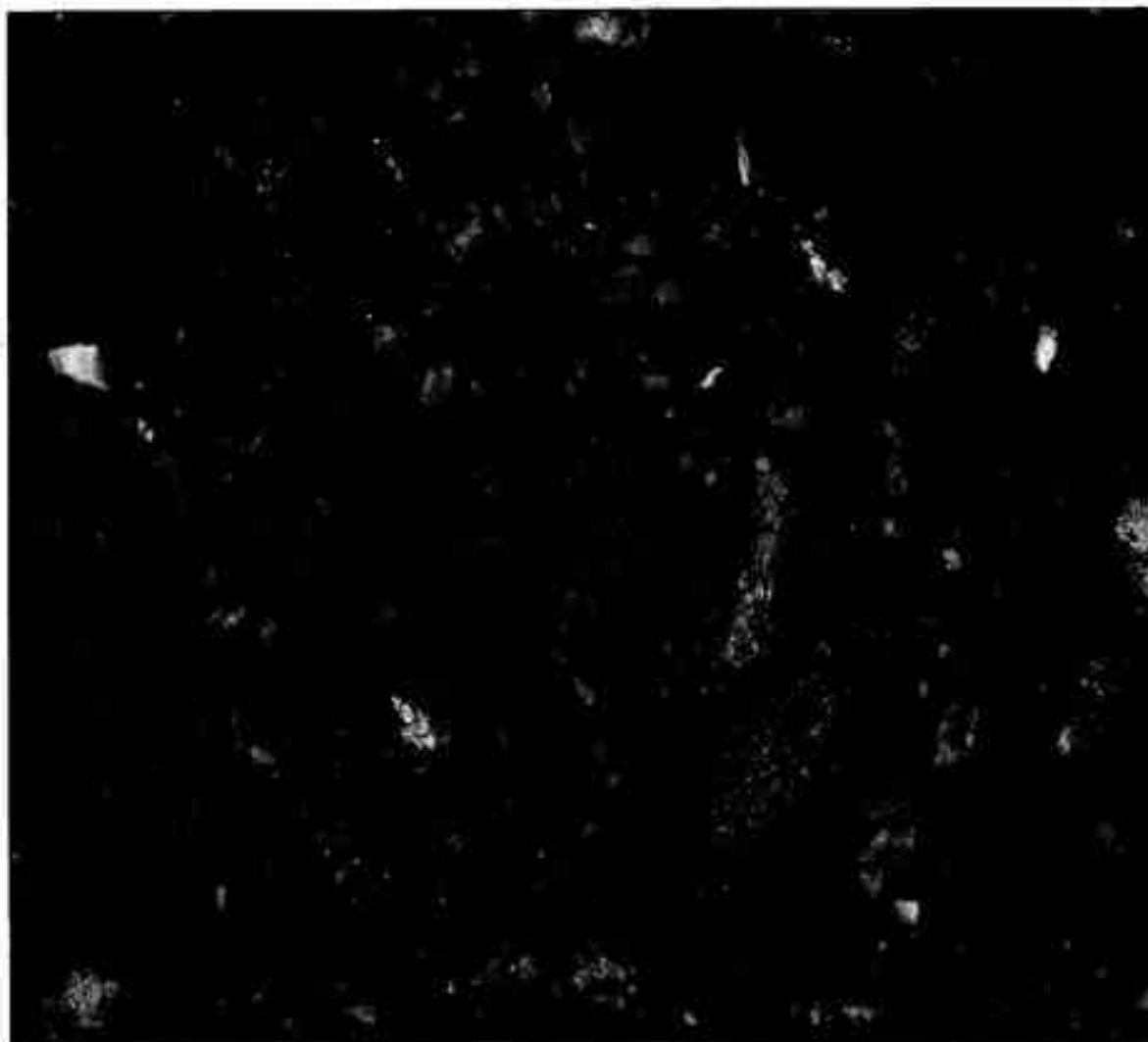
La Terre au laboratoire c'est l'étude des *matériaux terrestres*, laquelle n'est d'ailleurs guère dissociable de celle des *processus terrestres*, puisque les premiers sont continuellement produits, déformés, transformés et recyclés sous l'action des seconds. Matériaux et pro-

cessus recouvrent ainsi deux vastes domaines de recherche intimement liés dans lesquels on peut trouver aussi bien les substances vitales pour l'homme contemporain (l'eau, les hydrocarbures ou bien les minerais), que les phénomènes géologiques catastrophiques (les tremblements de terre, les volcans), sans oublier certaines applications industrielles.

La tendance actuelle dans le domaine de la *caractérisation* des matériaux terrestres va vers une utilisation systématique et de plus en plus sophistiquée d'outils analytiques et de concepts issus des sciences physiques et chimiques. Aux techniques et raisonnements classiques de la minéralogie et de la cristallographie sont venus s'ajouter les méthodes microscopiques, largement empruntées aux métallurgistes, tout l'arsenal des spectroscopies et une vision plus physique des assemblages minéraux que sont les roches. Il s'opère ainsi une convergence entre les approches utilisées aussi bien pour l'étude des matériaux dits

avancés que pour celle des matériaux terrestres. L'étude de la physico-chimie des surfaces et des minéraux imparfaitement cristallisés est à cet égard exemplaire car située au carrefour de nombreuses disciplines. L'utilisation des traceurs isotopiques, de tradition plus établie dans le domaine des Sciences de la Terre, connaît des développements récents avec la mesure des déséquilibres radioactifs.

Cependant, les matériaux terrestres possèdent des propriétés spécifiques et ils évoluent dans les conditions physico-chimiques très particulières. Par exemple, en conditions supercritiques, la chimie des fluides est très différente de celle connue dans les conditions ambiantes. Dans la gamme de températures du manteau supérieur et de la croûte, les cinétiques de diffusion atomique dans les silicates sont particulièrement lentes. La présence d'eau dissoute dans les silicates liquides qui composent les magmas a une influence déterminante sur leurs propriétés. *L'expérimentation en conditions*



Genèse des magmas par fusion partielle contrôlée au laboratoire. Cette photo montre des cristaux et des inclusions fluides dans un liquide de composition granitique (X 170). (Cliché CRPG, Nancy).

►réelles s'avère donc nécessaire, d'abord pour reconnaître les principaux paramètres, et ensuite pour fournir les données de base indispensables à l'élaboration des modèles. On sait maintenant atteindre (et contrôler) au laboratoire les conditions de pression et de température régnant au centre de la Terre et des planètes.

L'introduction dans les années soixante du formalisme thermodynamique a ouvert la voie aux *modélisations* qui se

développent actuellement de façon très florissante, dans des domaines et à des échelles aussi différents que la dynamique des chambres magmatiques, la thermodynamique des silicates liquides, les transferts de masse liés aux circulations fluides et la formation des gisements métalliques. Certaines modélisations analogiques permettent l'observation et la simulation des mécanismes-clés, comme c'est le cas pour la déformation des roches. Dans le domaine des ap-

proches numériques, beaucoup de modèles, à l'origine strictement empiriques, sont maintenant bâtis sur des justifications physiques et chimiques, ce qui leur confère une meilleure valeur prédictive.

Michel Pichavant
Directeur de recherche au CNRS

Yves Guéguen
Professeur à l'Ecole et Observatoire
de physique du globe de Strasbourg

Une fenêtre sur l'intérieur de la Terre

En comprimant les minéraux entre deux diamants gemmes, on étudie leurs propriétés dans les conditions de pression qui règnent au cœur de la Terre.

Philippe Gillet,
Michel Madon

A l'intérieur de la Terre, la pression et la température augmentent avec la profondeur pour atteindre en son centre près de 4 millions d'atmosphères (400 gigapascals) et 5 000 °C. Il est donc essentiel pour comprendre la structure et la dynamique de la Terre d'avoir une connaissance détaillée de la minéralogie du manteau (composition chimique, changements de phase et variations de densité) en fonction de la pression (donc de la profondeur) et de la température. Un échantillonnage naturel du manteau jusqu'à 250 km est fourni par les nodules de péridotites remontés par certaines laves. Ces échantillons sont composés principalement d'olivine ($(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ (60 % en volume). Au-delà de 250 km, l'interprétation des temps de propagation des ondes sismiques dans le manteau donne les variations des paramètres élastiques, de la densité des roches avec la profondeur et montre l'existence de discontinuités de vitesse, sans pour autant préciser la nature minéralogique des matériaux profonds.

Jusqu'à 500 gigapascals

Les techniques de synthèses à très hautes pressions et, en particulier, les cellules à enclumes de diamant (CED) ont permis de passer de conjectures à des modèles de structure et de minéralogie du manteau. En soumettant les silicates stables jusqu'à 250 km de profondeur (10 GPa) à des conditions de pressions et températures croissantes, on peut suivre leurs transitions de phase.

The diamond anvil cell: a window on the center of the Earth - The diamond anvil cell enables the pressure conditions occurring in the interior of the Earth to be produced in the laboratory in order to study physical properties of minerals in situ. The data obtained are essential for setting limits on models of the structure of our planet and its mineralogical composition.

ses et mesurer diverses propriétés physiques (vitesse de propagation du son, densité, compressibilité...). Ainsi l'olivine ($(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$) se transforme en spinelle ($(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ plus dense à 12 GPa (400 km) qui lui-même se décompose en magnésio-wustite ($(\text{Mg}, \text{Fe})\text{O}$) et pérovskite ($(\text{Mg}, \text{Fe})\text{SiO}_3$) à 25 GPa (700 km). Chacune de ces transformations s'accompagne d'une variation de densité importante. C'est ainsi que l'on a corrélié ces deux transitions importantes aux deux sauts de vitesse de propagation des ondes sismiques observés aux profondeurs 400 et 700 km.

Avant l'avènement des CED, les

techniques de hautes pressions (HP) ne pouvaient simuler que les conditions de pression et de température régnant jusqu'à 400 km de profondeur. Les CED, dont le principe est détaillé sur la figure 1, permettent d'atteindre 500 GPa pour un encombrement des plus minimes (elles tiennent dans la main !). L'échantillon, de petite taille (quelques dizaines de microns), est porté à haute pression par simple compression entre deux diamants gemmes. On peut aussi chauffer l'échantillon jusqu'à 1000 °C en entourant les diamants d'un microfour, et jusqu'à 4000 °C en focalisant un faisceau laser sur l'échantillon au travers des diamants.

Une fois l'échantillon pressurisé, la transparence du diamant à différents rayonnements est utilisée pour étudier les minéraux *in situ* à haute pression. La diffraction des rayons X permet d'identifier les phases produites dans leur domaine de stabilité, de préciser leurs structures, leurs densités, leurs modules d'incompressibilité et la variation de ces derniers avec la pression. Ces données sont essentielles pour interpréter minéralogiquement les données fournies par

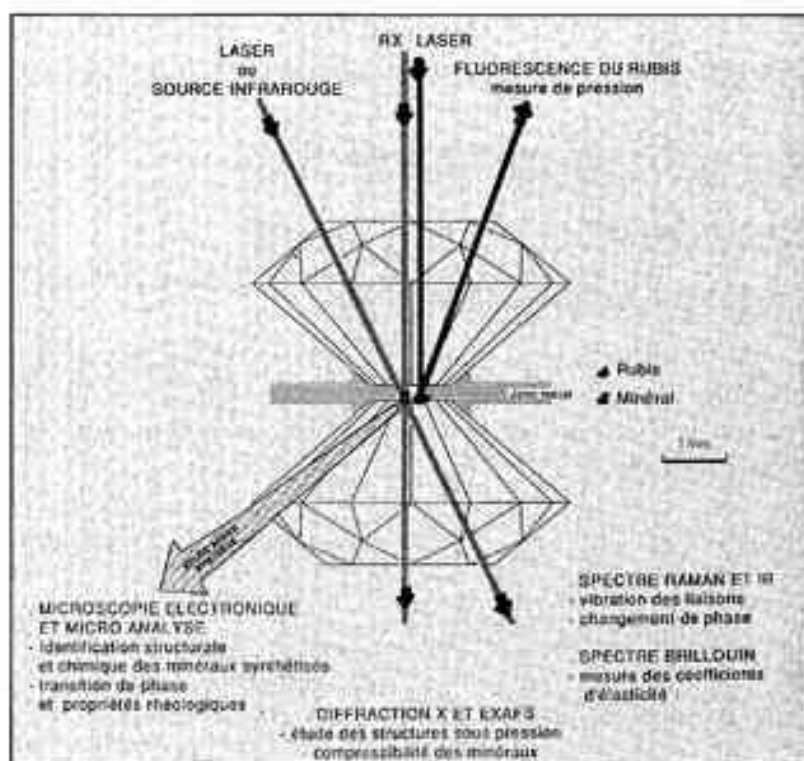


Fig. 1 - Principe et utilisation de la cellule à enclumes de diamant. Le minéral à étudier sous pression est placé en même temps qu'un fluide transmetteur de pression dans un trou de 200 microns percé dans une feuille de métal. La pression est générée en comprimant l'ensemble entre deux diamants dont la résistance et la petite surface permettent d'atteindre plusieurs millions d'atmosphères. L'étude sous pression du minéral et la mesure de pression sont possibles grâce à la transparence du diamant à différents rayonnements.

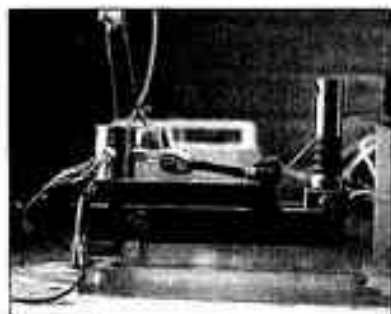


Fig. 2 - Appareillage de la cellule à enclumes de diamant.

► la sismologie. L'utilisation plus récente du rayonnement synchrotron pour la diffraction X ou la spectroscopie d'absorption X (EXAFS) *in situ* en CED fournit, pour des temps d'exposition courts, des informations fines sur les changements de structure (eg. changement de coordination du silicium dans les silicates) et donnent l'opportunité d'étudier d'éventuelles cinétiques de transformation.

On peut aussi réaliser des expériences de spectroscopie infrarouge, Raman ou Brillouin ; on obtient ainsi sous pression

des informations sur les fréquences de vibration des liaisons interatomiques et sur les constantes élastiques. Ces données sont utilisées pour prédire les propriétés thermochimiques et élastiques des matériaux dans les conditions extrêmes auxquelles ils sont soumis.

Etudes à pression ambiante

Une deuxième méthode consiste à étudier à la pression ambiante les échantillons, petits et polycristallins, synthétisés à haute pression, soit par diffraction X, soit par microscopie électronique à transmission (MET) couplée à une microanalyse X. La MET permet d'identifier des microphases non détectables par les techniques traditionnelles. Il a été ainsi montré qu'à des pressions de l'ordre de 50 GPa, le calcium est insoluble dans la structure pérovskite et qu'en présence d'aluminium, on observe la formation d'une phase aluminocalcique ayant une structure cristallographique originale (hollandite). Cette phase pourrait être un constituant important du manteau inférieur. On a aussi montré que le fer s'incorpore préférentiellement dans la magnésio-wustite à la tran-

sition spinelle-pérovskite + magnésio-wustite. Ce type de données est important car les vitesses sismiques calculées à partir des modèles minéralogiques, et qui sont comparées aux vitesses déduites des données sismiques, sont fortement dépendantes de la teneur en fer des différentes phases minérales.

En conclusion, on notera que l'expérimentation de haute pression amène des éléments de réponse et de réflexion à des problèmes géophysiques aussi divers que la composition de la Terre, la convection dans le manteau, l'origine du champ magnétique ou des tremblements de terre profonds.

Philippe Gillet, professeur à l'Université de Rennes I, Centre armoricain d'étude structurale des solides (UPR 4661 CNRS), Laboratoire de minéralogie physique, Université de Rennes I, 35042 Rennes Cedex.

Michel Madon, physicien adjoint à l'Institut de physique du globe, Département des géomatériaux, 4, place Jussieu, Tour 14, 75231 Paris Cedex 05.

La diffusion atomique des éléments majeurs dans les minéraux

Mesurer le temps qu'a duré une réaction inachevée dans une roche : une perspective ouverte grâce aux développements récents de la micro-analyse nucléaire.

Olivier Jaoul

Connaître la cinétique réactionnelle de la formation de silicates à partir d'autres oxydes ou silicates, celle de la déformation plastique à haute température, celle du frittage ou de la recristallisation est tout aussi fondamentale pour l'élaboration de céramiques industrielles que pour comprendre l'évolution mécanique et chimique de la croûte et du manteau terrestre qui sont essentiellement composés de ces matériaux. En particulier l'olivine ($(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$) est un constituant majeur du manteau supérieur, et les py-

roxènes $\text{XX}'\text{Si}_2\text{O}_6$ ($\text{X}, \text{X}' = \text{Cu}, \text{Al}, \text{Na}, \text{Mg}, \text{Fe}, \dots$) sont présents dans la croûte inférieure et le manteau.

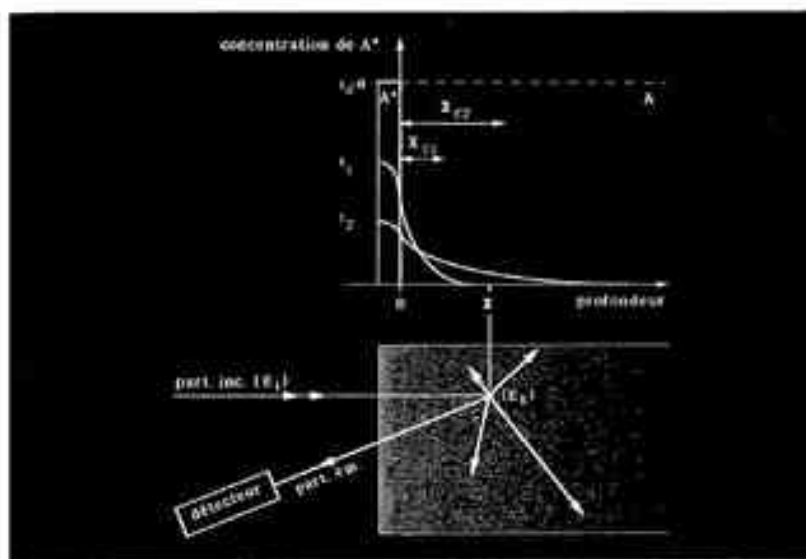
Vitesse de réaction et mobilité des atomes

On dispose cependant de peu de données car ces cinétiques sont lentes, particulièrement dans la gamme de températures de la croûte et du manteau supérieur de la Terre, qui est relativement faible par rapport à la température de fusion de ces silicates. Une façon indirecte d'accéder à la connaissance de ces vitesses de réaction est de mesurer la mobilité des atomes les plus lents qui contrôlent la cinétique en question.

Ceci a été rendu possible grâce à l'effort fourni depuis une dizaine d'années, particulièrement en France, pour développer des techniques d'analyse nucléaire capables de déterminer des profils de diffusion (pénétration) d'atomes sur des distances aussi courtes que 500 angströms (Å) en arrière de la surface des échantillons sur laquelle ils avaient été préalablement déposés. Cette distance caractéristique $x_0 = 2\sqrt{Dt}$ (voir figure) correspond par exemple à un coefficient de diffusion $D = 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ pour un recuit ayant duré $t = 1$ semaine à haute température.

On utilise, pour ces expériences, des accélérateurs de particules légers de quelques MeV. La détermination des profils de concentration des éléments diffusés dans le minéral se fait soit par des techniques de rebond élastique (ex :

Atomic diffusion of major elements in minerals - Recent developments in nuclear micro-analysis have enabled the velocity of migration of the slowest atoms in silicates to be measured at the scale of 50 to 2000 atomic distances. This provides a measurement of the rate of transformation of rocks following a change in the physical or chemical environment.



Profil de concentration de l'isotope A^* déposé en couche mince sur le minéral A après des recuits pendant t_1 et $t_2 > t_1$. La forme du profil et sa longueur caractéristique x_c donnent accès au coefficient D de diffusion, $x_c = 2\sqrt{Dt}$. La micro-analyse nucléaire est adaptée à des x_c entre 300 et 10 000 Å. Dans le cas d'une réaction « résonante » (comme ici), les particules incidentes d'énergie E_i perdent de l'énergie jusqu'à la profondeur x où elles ont juste l'énergie E_R nécessaire pour réagir avec les noyaux A^* . Les particules réémises sont la signature de la présence de noyaux de A^* échantillonnés en x .

rétrodiffusion Rutherford : « RBS »), soit par l'analyse de réactions nucléaires induites sur des noyaux légers : on dose comme cela des éléments jusqu'à la masse 40, c'est-à-dire l'essentiel des éléments majeurs des silicates (O, Mg, Al,

Si...), et même l'hydrogène. Ainsi ont été mesurés récemment les coefficients de diffusion extrêmement bas de Si et O dans l'olivine entre 1100 et 1600 °C et de Al dans les pyroxènes entre 1000 et 1300 °C.

Connaissant alors l'ensemble des coefficients « d'autodiffusion » des éléments majeurs constitutifs d'un silicate, il devient possible de déterminer la vitesse des réactions métamorphiques donnant naissance à ce silicate (réactions entre solides) ou la vitesse de déformation plastique (quand celle-ci est contrôlée par la diffusion). Ceci se fait à l'aide de modèles simples prenant en compte les couplages qui existent nécessairement quand des ions de nature différente ont à migrer simultanément.

Connaître la vitesse de diffusion de Al dans les pyroxènes permet, par exemple, de contraindre l'évolution temporelle des trajectoires de ces minéraux dans l'espace P, T (enfouissements, remontées). Les données de diffusion des éléments légers (Si, O) dans l'olivine permettent, quant à elles, de préciser la rhéologie du manteau supérieur, et en particulier sa sensibilité à la pression, puisqu'il n'est pas très compliqué de mesurer des coefficients de diffusion sous pression, alors que la technologie actuelle ne permet pas encore de déterminer de façon fiable des lois de déformation sous très haute pression.

Olivier Jaoul, professeur à l'Université de Paris-Sud-Orsay, responsable de l'Equipe « physique des matériaux géologiques » au Laboratoire de géophysique et géodynamique interne (URA 1369 CNRS), Bât. 510, 91405 Orsay.

Le rôle des microstructures dans les minéraux

Les microstructures de déformation, de transformation de phase ou d'exsolution modifient le comportement des minéraux. Elles permettent d'élucider leur histoire géologique.

Jean-Claude Doukhan,
William L. Brown

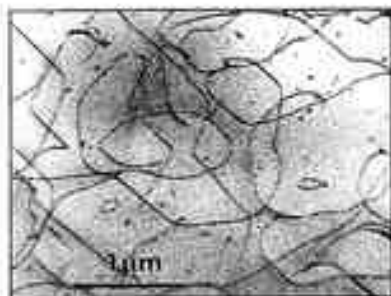
Tous les minéraux contiennent des défauts. Leur étude permet de mieux cerner les conditions de formation de ces minéraux et leur comportement mécanique. Les défauts considérés ici sont linéaires (dislocations), produits par les contraintes externes, et étendus (microstructures de transformation de phase et d'exsolution), produits lors d'un refroidissement

ou d'un recuit. Ils peuvent réagir entre eux et avec ceux formés lors de la croissance du cristal. L'observation des défauts se fait au microscope électronique à transmission, mais leur interprétation nécessite une compréhension de la physique du solide et de la pétrologie.

La déformation ductile des minéraux est due au mouvement des dislocations sous l'action des contraintes tectoniques. La structure cristalline des silicates est souvent de basse symétrie et les systèmes de glissement sont en nombre restreint. Le disthène triclinique

Al_2SiO_5 possède un seul système de glissement facile, il ne présente donc pas le phénomène de durcissement par enchevêtrement de dislocations et accommode les déformations imposées par maclage et/ou pliage (« kinking »). Nombre de silicates nominalelement anhydres, comme le quartz ou l'olivine, contiennent en fait de faibles quantités « d'eau » : ceci peut induire un effet adoucissant spectaculaire en favorisant le mouvement des dislocations ; c'est ce

The role of microstructures in minerals - The microstructures in minerals induced by external stresses (plastic deformation) or internal processes (phase transformations or exsolution) can be characterized by transmission electron microscopy. These microstructures modify the subsequent behaviour of the minerals and can be used to elucidate the geological history of the rock.



Quartz déformé : dislocations (lignes noires) observées par microscopie électronique à transmission.

► mécanisme qui permet la grande ductilité du quartz dans les roches crustales à des conditions modérées de métamorphisme. De même, dans le manteau supérieur, l'olivine est probablement rendue plus ductile par de faibles concentrations en eau.

Un vaste domaine à explorer

Lors du refroidissement ou du recuit, des modifications naturelles de la structure cristalline d'un minéral peuvent s'exprimer par le développement de microstructures (macles ou domaines d'antiphase) associées à des transformations de phase. A cause de la complexité de leurs structures, les minéraux peuvent se transformer de plusieurs façons. Ainsi les transformations différentes pour les trois pôles des feldspaths produisent des microstructures très distinctes. Dans le cas des solutions solides des feldspaths, l'interaction entre transformations, exolutions et modulations a donné naissance à des minéraux d'une telle complexité que des décennies d'étude n'ont pas réussi à les élucider. Des structures complexes existent aussi à un moindre degré pour d'autres groupes de minéraux, tels les pyroxènes et les amphiboles. Le domaine qui reste à explorer est vaste : l'eau par exemple joue non seulement un rôle dans l'adoucissement du quartz (rôle qui reste à élucider), mais aussi dans la cinétique de formation des microstructures de minéraux réputés anhydres tels les feldspaths.

■ Jean-Claude Doukhan, professeur à l'Université de Lille I, directeur du Laboratoire de structure et propriétés de l'état solide (URA 254 CNRS), 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex.

■ William L. Brown, directeur de recherche au CNRS, Centre de recherches pétrographiques et géochimiques (UPR 6821 CNRS), 15, rue Notre-Dame-des-Pauvres, BP 20, 54501 Vandœuvre-les-Nancy Cedex.

Un milieu poreux : les roches

Les propriétés des roches, matériaux complexes, poreux et hétérogènes, obéissent-elles à des lois simples ?

■ Yves Guéguen,
Michel Darot

Modules élastiques, résistance mécanique, perméabilité, conductivité..., toutes les propriétés physiques des roches sont déterminées par deux facteurs : composition et microstructure. Aux profondeurs visées par les forages (0-15 km), le second facteur est essentiel. L'importance prédominante de la microstructure tient principalement à l'existence d'une porosité : fissures fragilisant le milieu, modifiant la propagation des ondes acoustiques, créant des chemins d'écoulement possibles pour les flux électriques et hydrauliques.

La porosité est quantifiée par une grandeur sans dimension, Φ = volume des pores/volume de roche. La microstructure de porosité est trop complexe, cependant, pour être décrite par un seul paramètre. Un second paramètre im-

portant est le facteur de forme des pores Λ . Comme le montre la figure 1, des pores aplatis peuvent être assimilés à des ellipsoïdes de facteur de forme $\Lambda = a/b$. Il est possible de montrer (à partir de la théorie de la percolation) que la probabilité de connexion entre pores aplatis est $p \approx \Phi/\Lambda$. Comme les propriétés physiques sont des fonctions de p , on observe des lois de variation du module élastique du type $M = f(\Phi/\Lambda)$. Une faible porosité de pores aplatis a le même effet qu'une forte porosité de pores sphériques. En sélectionnant les paramètres adéquats, on voit que l'image de la porosité, complexe en réalité, peut être simplifiée et conduire à une prédiction quantitative des propriétés. Un second exemple de ce type de schématisation est donné en figure 2 avec la perméabilité. Le réseau des pores connectés, assimilés à des tubes de longueur l et rayon r , a une perméabilité déterminée par les deux paramètres l et r . D'autres paramètres encore, la rugo-

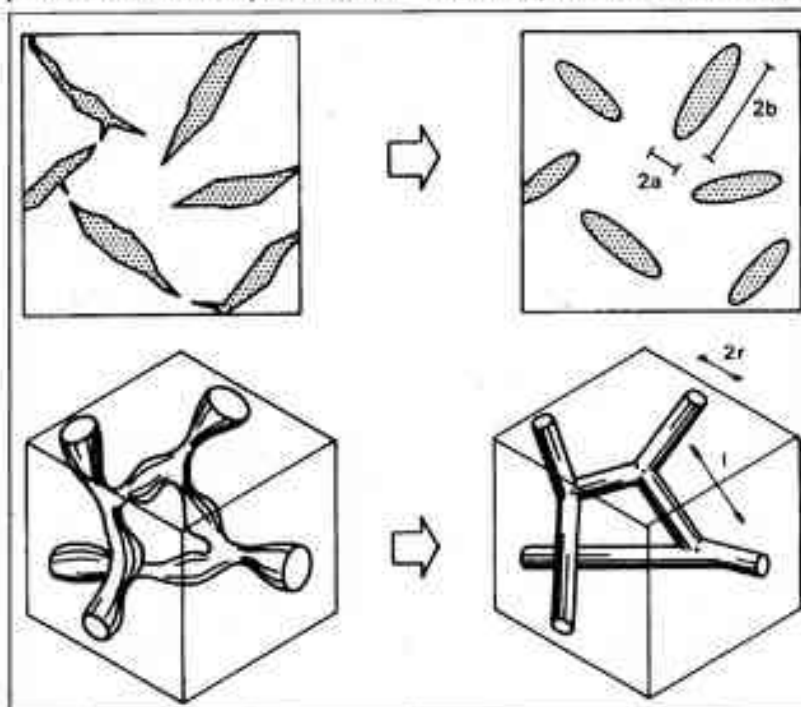


Fig. 1 - Pores aplatis non connectés (en haut). La porosité réelle (à gauche) est décrite par un schéma simplifié à deux paramètres (à droite). Le module élastique de la roche M varie avec Φ/Λ selon la loi $M = M_0 (1 - c \Phi/\Lambda)$.

Fig. 2 - Pores tubulaires connectés (en bas). La porosité réelle (à gauche) est décrite par un schéma simplifié à deux paramètres (à droite). La perméabilité de la roche est $k = r^2/l^2$.

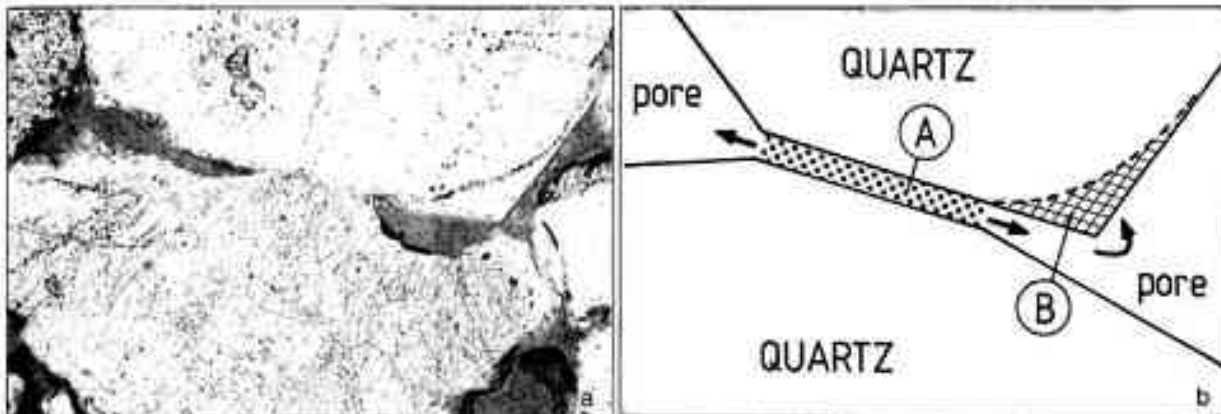


Fig. 3 - a) exemple de dissolution (au contact en A) et de recrystallisation (nouvelle limite du grain en B) dans un grès de Fontainebleau. (Cliché D. Jeannette). b) schéma explicatif du cliché : le matériau dissous dans la zone sous contrainte (A) est recrystallisé dans la zone libre (B). La forme rectiligne de la nouvelle limite du grain de quartz témoigne du contrôle cristallographique. L'ancienne limite du grain est soulignée par un chapelet de bulles.

Rocks: a porous medium - The properties of rocks are mainly determined by the geometry of porosity. The three main stages required to understand these properties and their long-term changes are the analysis of the microstructure, modelling of the pore network and studies in the laboratory.

sité par exemple, jouent un rôle important.

La porosité évolue au cours du temps

sous l'action de la température, de la pression, des contraintes. Un processus particulièrement important d'évolution est la dissolution-recrystallisation sous contrainte (Fig. 3). La connaissance des différents processus possibles, jointe à la modélisation décrite ci-dessus, ouvre des perspectives nouvelles de recherche : comment évoluent les propriétés physiques lors de processus naturels (diagenèse et réservoirs pétroliers) ou artificiels (stockages souterrains) ? La confrontation des observations (microstructures), des modèles et des résultats expérimentaux montre que la prédiction

des évolutions est possible dans certains cas simples.

■ Yves Guéguen, professeur à l'Ecole et Observatoire de physique du globe, Université Louis Pasteur, Unité « sismologie et physique de la Terre » (URA 1358 CNRS), directeur du Laboratoire de physique des matériaux de l'Institut de physique du globe de Strasbourg.

■ Michel Darot, chargé de recherche au CNRS, Unité « sismologie physique de la Terre » (URA 1358 CNRS), Institut de physique du globe, Laboratoire de physique des matériaux, 5, rue René Descartes, 67084 Strasbourg Cedex.

La modélisation des déformations

Sur modèles réduits ou sur ordinateur, les nouvelles méthodes de simulation permettent de mieux cerner la cinématique des phénomènes tectoniques.

■ Peter Cobbold

Les phénomènes tectoniques sont d'une lenteur incomparable. Il faut, par exemple, un million d'années pour qu'un continent se déplace d'une dizaine de kilomètres, un an pour qu'il bouge d'un seul centimètre. Si

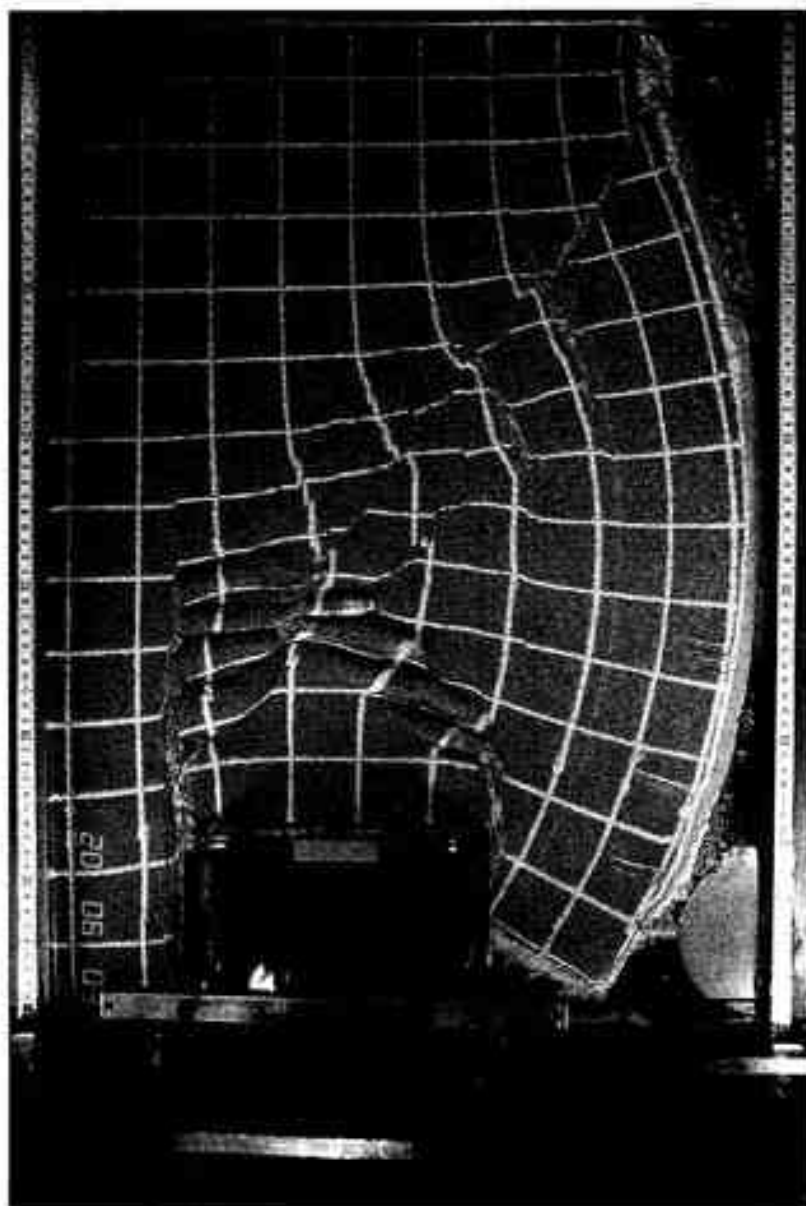
l'observation en direct de ces mouvements est désormais possible grâce à la télémétrie spatiale, les conditions au sol ne sont que rarement favorables. Encore plus difficile est le travail du géologue qui cherche à reconstituer ces mouvements à travers les périodes tectoniques. On comprend donc l'intérêt de la modélisation. Partant d'hypothèses raisonnables concernant les proprié-

tés mécaniques des matériaux terrestres et les conditions aux limites des systèmes, la modélisation aboutit à une gamme très réduite de solutions possibles.

Modélisation analogique et modélisation numérique

En tectonique, il existe deux méthodes de modélisation à la fois concurrentielles et complémentaires : les expériences sur modèles réduits, et les calculs sur ordinateur.

Historiquement la plus ancienne, la première méthode, dite modélisation analogique, ne trouve qu'aujourd'hui son véritable essor. Au siècle dernier, on manquait de précisions concernant les propriétés mécaniques des roches. Le choix de matériaux modèles était donc assez arbitraire. Cependant on ▶



Poinçonnement d'un continent modèle (expérience réalisée au CAESS, Rennes). Ce modèle analogue est à comparer avec la collision de l'Inde avec l'Asie. Le poinçon, rigide et rectangulaire (en bas), pénètre dans le continent déformable (en bleu). Celui-ci est composé de trois couches lithosphériques (deux visqueuses en profondeur et une fragile en surface), flottant sur une épaisse couche asthénosphérique. La marge orientale du continent est libre (à droite). Le poinçonnement a engendré un réseau de failles, chevauchantes près du poinçon, décrochantes plus loin vers le nord (en haut). Les forces compressives sont responsables d'un flambage mécanique de la lithosphère tout entière, qui se manifeste par des ondulations de surface près du poinçon.

► avait compris, grâce à l'analyse dimensionnelle, l'importance relative des forces de surface (contraintes) et de volume (gravité). Pour les reproduire dans leurs justes proportions sur modèles ré-

duits, il fallait soit diminuer la résistance des matériaux, soit augmenter la part des forces de volume. Certains ont adopté la première solution, à l'aide de matériaux mous : sables, plâtres, cires et

Modelling of deformations - Techniques are currently available for analogue modelling of three-dimensional deformations at all scales, using both viscous and brittle materials. Sedimentation and erosion can be included. Such techniques are of major interest to the oil industry. Numerical modelling is potentially more versatile, but three dimensional problems require supercomputers.

argiles. D'autres, plus tard, ont préféré les centrifugeuses puissantes, remplaçant ainsi les forces gravitaires par les forces d'inertie. Cependant, ces machines sont coûteuses, d'une capacité limitée et d'une technologie complexe. Leur mise en œuvre est difficile. La tendance actuelle est donc de revenir à des matériaux modèles peu résistants, hors centrifugeuse. On arrive ainsi à reproduire les phénomènes tectoniques en trois dimensions et à toutes les échelles. Il est possible d'incorporer les processus de sédimentation et d'érosion, ainsi que la formation des failles. Dans ces conditions, il n'est pas surprenant que les compagnies pétrolières fassent souvent appel à la modélisation analogue pour mieux cibler les structures pièges de pétrole.

Quant à la modélisation numérique, elle est en principe beaucoup plus simple à mettre en œuvre : nul besoin de rechercher des matériaux particuliers, ni d'avoir recours à l'expérimentation en laboratoire. La méthode permet de résoudre des problèmes complexes (évolutions thermomécaniques, rhéologie non-linéaire). Dans ces conditions cependant, le nombre d'équations tend à devenir très grand, nécessitant un super-ordinateur à grande capacité de mémoire et à vitesse de calcul importante. De ce fait, très peu de problèmes tridimensionnels ont été étudiés jusqu'à présent. Parmi les problèmes d'avenir, citons aussi la modélisation des failles à partir de la mécanique de la fracture, qui n'en est qu'à ses débuts.

■ Peter Cobbold, directeur de recherche au CNRS, directeur du Laboratoire de tectonophysique, Centre armoricain d'étude structurale des socles (UPR 4661 CNRS), Université de Rennes I, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes Cedex.

Quantifier la déformation d'une roche

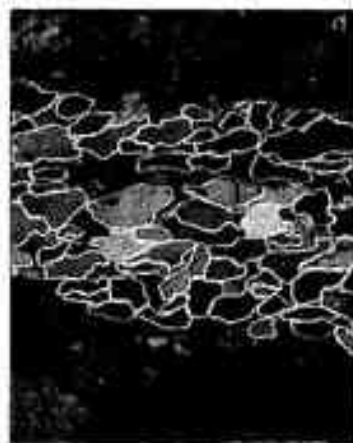
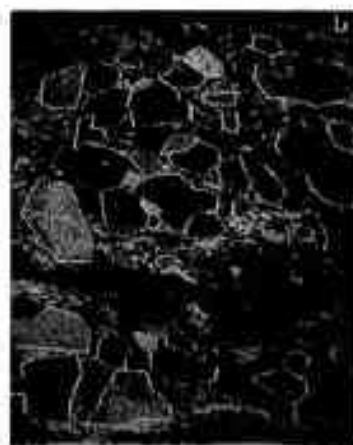
■ Michel Champenois

Le système interactif d'analyse d'images apporte, à un domaine tel que la géologie structurale, la possibilité de quantifier les phénomènes de déformation, et de les approcher à l'échelle régionale. Le système vidéographique interactif permet au manipulateur de sélectionner, sur l'image vidéo, les marqueurs qu'il juge intéressants dans la roche. Par l'intermédiaire d'une tablette à numériser et d'un module d'incrustation, l'utilisateur caractérise les objets par le(s) paramètre(s) utile(s) à la méthode de traitement envisagée. Nous présentons, ici, quatre techniques de numérisation d'objets à partir de lames minces de roches, donnant accès à quatre méthodes de quantification de la déformation finie. Chacune de ces méthodes dépend de paramètres différents : rapport axial et orienta-

Quantifying rock deformation - Description of an interactive video graphic display system that can be used for the quantification of deformation phenomena by the size, form, anisotropy, etc., of rock structure.



tion du grand axe (a), côtés d'un polygone approchant la forme du marqueur (b), dispersion des centroïdes (c) et diamètres de Férét à partir du contour des particules (d).



■ Michel Champenois, ingénieur d'études au CNRS, Centre de recherches pétrographiques et géochimiques (UPR 6821 CNRS), 15, rue Notre-Dame-des-Pauvres, BP 20, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex.

La dynamique des chambres magmatiques

La cristallisation des liquides silicatés d'une chambre magmatique s'accompagne de phénomènes physiques complexes qu'on peut simuler en laboratoire.

■ Claude Jaupart

Les magmas sont des liquides silicatés à plusieurs composants et aux diagrammes de phase complexes. Ils s'accumulent souvent au sein de l'écorce terrestre dans des réservoirs de dimensions pluri-kilométriques que l'on nomme chambres magmatiques. Ils s'y refroidissent préférentiellement

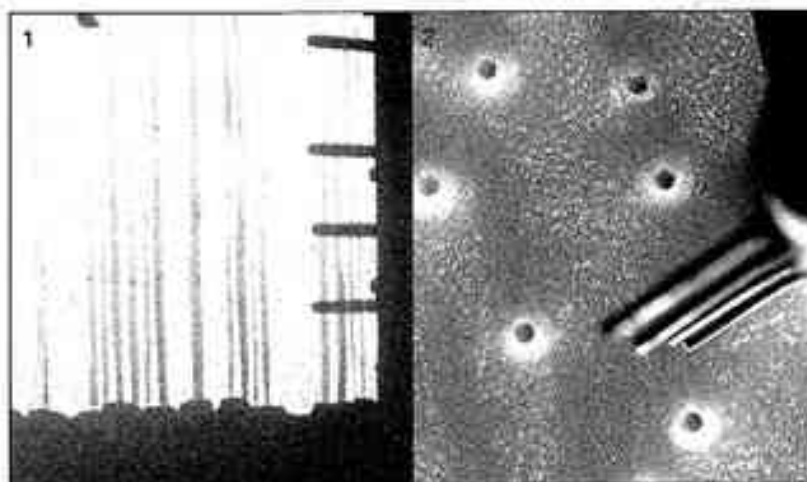
dans les couches limites froides se développant à leur périphérie, au contact des roches encaissantes. La cristallisation qui en résulte produit des liquides résiduels, de composition chimique différente de celle du liquide initial. Grâce à l'érosion, on retrouve à la surface de la Terre des chambres magmatiques fossiles anciennes, appelées *plutons*. Elles permettent d'examiner un enregistre-

ment des phénomènes qui s'y sont déroulés lorsqu'elles étaient à l'état liquide.

Des réserves de platine dans les plutons

De nombreux phénomènes géologiques très importants sont conditionnés par l'existence et l'évolution des chambres magmatiques. C'est en leur sein ▶

The dynamics of magma chambers - During the crystallization of liquids in a magma chamber, gradients of chemical composition bring about convection currents. Laboratory simulation systems have demonstrated the coupling between the different phenomena which develop.



Expérience de laboratoire avec une solution de $(\text{NH}_4\text{Cl} + \text{eau})$: la solution est refroidie par sa surface inférieure et la cristallisation se développe au bas de la cuve dans une couche d'épaisseur grandissante.
1) Vue de face. Forme évoluée de convection solutale : des jets de liquide sont émis par des « cheminées » qui se sont formées dans la couche de cristaux et qui canalisent l'écoulement. La surface supérieure de la couche de cristaux est irrégulière, avec de petits monticules qui entourent les bouches des cheminées. (Sur le bord droit de la photographie est visible en partie une canne de thermocouples pour la mesure du profil de température).
2) Vue du dessus. Surface supérieure de la couche de cristallisation montrant les orifices des cheminées. Ces structures se sont développées à partir d'une couche parfaitement régulière (mais poreuse) de cristaux.

► que se créent les conditions nécessaires aux éruptions volcaniques lorsque les volatils dissous dans les magmas s'expriment sous forme d'une phase gazeuse séparée. C'est aussi grâce à elles que se produit la différenciation chimique dans le globe terrestre, c'est-à-dire la production de volumes importants de roches de compositions chimiques variées. Pour prendre un exemple extrême, presque toutes les réserves de platine du monde se trouvent dans des horizons particu-

liers de certains grands complexes plutoniques anciens.

Dans une chambre magmatique, au fur et à mesure de la séquence de cristallisation, des gradients de composition chimique, et donc de densité, se développent et engendrent des mouvements de convection naturelle. Trois phases distinctes peuvent être impliquées : liquide (le magma), solide (les cristaux qui se forment) et gazeuse (les volatils qui exsolvent une fois le seuil de solubili-

té atteint). La physique de ces systèmes est extraordinairement variée et met en jeu des couplages multiples entre divers phénomènes. Leur étude s'est considérablement développée depuis une dizaine d'années, à l'aide d'expériences analogiques faites en laboratoire, qui mettent en évidence les divers effets possibles. Les progrès théoriques sont plus lents à cause de la diversité des phénomènes et du nombre élevé de variables. Je ne décrirai ici qu'un seul effet (voir figure).

Lorsqu'un magma basaltique refroidit au plancher d'un réservoir, la cristallisation fractionnée engendre des liquides résiduels plus légers dans une couche où solide et liquide coexistent selon les contraintes imposées par le diagramme de phase. Cette couche s'épaissit progressivement. En son sein, le profil de densité du liquide n'est pas stable et conduit à des mouvements de convection « solutale ». Au bout d'un certain temps, on peut observer la formation de « cheminées ». Ces cheminées sont des cylindres verticaux où il n'y a plus aucun cristal, par lesquels le liquide résiduel s'écoule rapidement sous la forme de jets et vient se mélanger au reste de la chambre. A la surface supérieure de la couche limite de cristallisation, elles apparaissent comme de véritables volcans miniatures qui percent la couche de cristaux.

■ Claude Jauport, professeur à l'Université Paris VII, Laboratoire de dynamique des systèmes géologiques, Université Paris VII et Institut de physique du globe, 4, place Jussieu, 75251 Paris Cedex 05.

Chronologie fine dans les magmas

L'utilisation des nuclides courte période des chaînes radioactives naturelles permet d'estimer les temps de transfert des magmas du manteau à la surface.

■ Michel Condomines

Entre le moment où un magma est créé par fusion partielle dans le manteau (cas des basaltes) ou dans la croûte continentale (cas de la

plupart des magmas granitiques), et son éventuelle émission à la surface lors d'une éruption volcanique, il subit en général des transformations physiques et chimiques. Celles-ci seront d'autant plus importantes que le temps de séjour du magma en profondeur sera long. Il

est donc essentiel d'essayer d'estimer le temps mis par un magma pour parvenir à la surface.

Ce problème peut être abordé grâce à l'utilisation de traceurs radioactifs naturels de courte période. Ceux-ci se trouvent dans les trois chaînes de désintégration naturelles de l'uranium 238,

Dating of magmas - Measurements of radioactive disequilibria between short-lived nuclides of the natural decay series (^{238}Th , ^{234}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Ra , ...) allow estimates to be made of the timescale of magma transfer from its source to the surface. These transfer times are often in the range 10^3 – 10^4 years.

uranium 235, et du thorium 232. L'uranium et le thorium sont présents dans les roches volcaniques, en quantité très faible (0,01 à 10 ppm U, deux à cinq fois plus de Th), mais mesurable par les techniques de spectrométrie nucléaire ou spectrométrie de masse.

Chacune des trois chaînes radioactives est issue d'un nucléide de très longue période dont la quantité ne va pratiquement pas varier à l'échelle de temps considérée. En milieu clos, une telle chaîne radioactive va atteindre rapidement un état d'équilibre séculaire dans lequel les activités de tous les nucléides sont égales (l'activité $[A]$ d'un nucléide A est le produit de sa constante radioactive λ_A par le nombre d'atomes de A : $N_A \lambda_A = \ln 2 / T_A$, où T_A est la période radioactive de A). Un déséquilibre sera créé lors d'un fractionnement entre deux nucléides de la chaîne appartenant à deux éléments chimiques différents. Si, à la suite de ce fractionnement, le système évolue en milieu clos, l'équilibre entre les deux nucléides père et fils (P et F) sera rétabli au bout d'environ cinq fois la période du nucléide fils. Cela fixe le domaine d'application des différents couples utilisables dans ces méthodes dites des déséquilibres radioactifs.

La remontée des magmas datée par les isotopes

Le principe d'application de ces méthodes à l'étude du temps de transfert des magmas est relativement simple. La fusion partielle du manteau en équilibre radioactif provoque des fractionnements entre les différents nucléides, et le magma basaltique formé montrera des déséquilibres radioactifs. Le rapport de déséquilibre $[F]/[P]$ évoluera en fonction du temps de séjour du magma en profondeur. En suivant les variations des rapports initiaux $[F]/[P]$ (au moment de l'éruption) au cours de l'histoire d'un volcan, et en utilisant différents couples P-F, il est possible de fixer des limites pour les temps de transfert des magmas. Les nucléides les plus utilisés sont le ^{232}Th ($T=14,05$ ans), le ^{238}U ($T=4,47$ ans), le ^{235}U ($T=704$ ans), le ^{230}Th ($T=75,3$ ans), le ^{226}Ra ($T=1,6$ ans), le ^{222}Rn ($T=3,8$ jours), le ^{210}Pb ($T=138$ jours), le ^{210}Po ($T=138$ jours), le ^{214}Pb ($T=27$ minutes), le ^{214}Bi ($T=20$ minutes), le ^{214}Po ($T=164$ microsecondes), le ^{214}Pb ($T=27$ minutes), le ^{214}Bi ($T=20$ minutes), le ^{214}Po ($T=164$ microsecondes), le ^{214}Pb ($T=27$ minutes), le ^{214}Bi ($T=20$ minutes), le ^{214}Po ($T=164$ microsecondes).

Ces études montrent que, dans plusieurs volcans d'îles océaniques (La Réunion, Hawaï), et probablement sur les rides océaniques, les temps de transfert des magmas sont inférieurs à quelques milliers d'années.

Dans beaucoup de volcans de zones de subduction, le temps de transfert est compris entre 110 et 8000 ans. C'est aussi vrai pour l'Etna en Sicile (Fig. 1 et 2). Un cas remarquable est celui de l'Oldoinyo Lengai, en Tanzanie, qui a la particularité d'émettre des carbonatites (laves riches en carbonates). Là, on a pu



Fig. 1 - Coulees de lave de l'éruption de 1971 à l'Etna. (Cliché J.C. Tanguy).

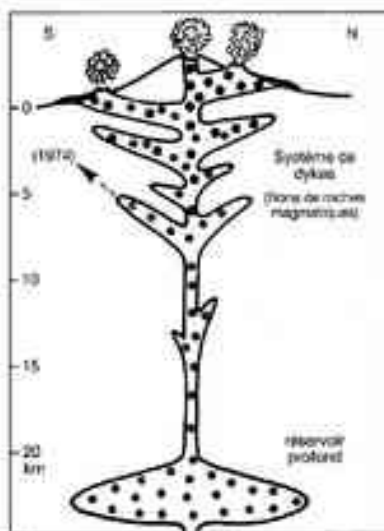


Fig. 2 - Un modèle de la dynamique des magmas dans l'Etna. Les déséquilibres $^{238}\text{Ra} - ^{230}\text{Th}$ mettent en évidence un mélange entre un magma basique profond (points bleus), et un magma plus différencié (points rouges). L'éruption excentrique de 1974 a prélevé directement le magma profond.

dater avec précision le moment où le magma carbonatitique s'est formé par exsolution à partir d'un magma silicaté, sept ans avant l'éruption.

On peut également utiliser les nucléides à période encore plus courte comme le ^{210}Po et le ^{210}Pb pour étudier les phénomènes de dégazage du magma près de la surface et leur constante de temps, qui est de l'ordre de quelques jours dans le cas de l'Etna.

L'utilisation des déséquilibres radioactifs pour l'étude de la cinétique de transfert des magmas est relativement récente (un peu plus de dix ans) et ce domaine est actuellement en pleine expansion. Couplées avec les modélisations géophysiques de l'évolution des chambres magmatiques, nul doute que ces méthodes permettront dans quelques années de mieux connaître le comportement des magmas dans la croûte terrestre.

Michel Condomines, physicien à l'Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand, Unité « origine, évolution et dynamique des magmas » (URA 10 CNRS), Université Blaise Pascal, Département de géologie, 5, rue Kessler, 63038 Clermont-Ferrand Cedex.

La physique des magmas

La cinétique de remontée des magmas dépend étroitement de la composition des silicates fondus dont ils sont constitués.

■ **Pascal Richet,**
Yan Bottinga

Les manifestations volcaniques sont l'illustration spectaculaire du rôle de la fusion des roches dans la formation et l'évolution de notre planète. Les magmas sont en fait constitués principalement de silicates fondus charriant des minéraux qui cristallisent pendant la remontée, et de bulles de gaz qui accroissent la force ascensionnelle du magma en réduisant sa densité.

Des diverses propriétés physico-chimiques d'un magma, les plus importantes sont donc la densité et la viscosité qui déterminent la cinétique de la remontée, et les propriétés thermodynamiques qui président à l'exsolution des bulles et à la cristallisation des minéraux, lesquels influent en retour sur la densité et la viscosité. La célèbre différence entre les paisibles laves d'Hawaï et les terribles productions de la montagne Pelée montre clairement que les propriétés des magmas dépendent fortement de la composition chimique.

La richesse en silice conditionne la structure

Les produits les plus visqueux sont les plus riches en silice (SiO_2). Dans tous les cas, l'unité structurale de base des silicates fondus sont des tétraèdres SiO_4^{4-} , autour desquels se disposent les cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} ...). Quand la teneur en silice augmente, ces tétraèdres, isolés les uns des autres pour des teneurs inférieures à 33 moles pour cent, commencent à se condenser pour former des chaînes, des anneaux, des feuillets, et en fin de compte des réseaux tridimensionnels. En même temps, les liaisons perdent progressivement leur caractère essentiellement ionique pour acquérir un caractère covalent marqué.

The physics of magmas - The structure and properties of silicate melts strongly depend on composition. This has far-reaching consequences concerning the way magmatic processes take place in view of the role played by properties of melts such as the density, viscosity and thermodynamic properties.

La viscosité peut augmenter d'une dizaine d'ordres de grandeur avec l'augmentation de taille des polyèdres. Ceux-ci s'ordonnent plus difficilement, d'où la tendance à former des verres pour les compositions riches en silice.

Par ailleurs, la formation d'un réseau tridimensionnel laisse des vides importants conduisant à une densité assez faible et à une compressibilité élevée. Quand la charpente de tétraèdres se brise, la densité augmente et la compressibilité diminue.

Les propriétés thermodynamiques aussi dépendent de la structure. Une caractéristique de l'état liquide est l'existence d'une capacité calorifique de configuration. C'est la chaleur requise, non pas pour augmenter la température, mais pour changer la structure du liquide dont les atomes vont occuper des positions d'énergie potentielle de plus en plus élevée quand la température augmente. Quand la teneur en SiO_2 diminue, cette capacité calorifique de configuration augmente fortement. L'entropie de configuration augmente alors plus rapidement avec la température. On explique ainsi quantitativement la chute de la viscosité avec l'accroissement de la température.

La teneur en silice n'est évidemment pas le seul facteur important. Certains éléments comme l'aluminium ou le fer (ferrique) jouent un double rôle, de formateur (comme le silicium), ou de modificateur de réseau (comme les alcalins ou les alcalino-terreux). Beaucoup d'efforts sont faits actuellement pour relier composition, structure et propriétés physiques des magmas. L'ordre à courte distance, caractérisé par la première sphère de coordination, peut être déterminé par les techniques classiques. Mais il ne permet d'expliquer au mieux que les grandes lignes du comportement des magmas. L'ordre au-delà des premiers voisins semble jouer un rôle important. Sa caractérisation, bien plus difficile, repose principalement sur des études comparatives de séries de liquides avec des techniques comme la résonance magnétique nucléaire.

■ **Pascal Richet**, physicien à l'Institut de physique du globe, Unité « physique des géomatériaux » (URA 734 CNRS).

■ **Yan Bottinga**, directeur de recherche au CNRS, Institut de physique du globe, Unité « physique des géomatériaux » (URA 734 CNRS), Universités de Paris VI et Paris VII, 4, place Jussieu, tour 14-15, 75252 Paris Cedex 05.



Vue de la partie centrale de la Chaîne des Puys. La coexistence à une même époque (8 à 10 000 ans) d'un volcanisme strombolien à coulées de laves basaltiques (Le Pariou), et d'un dôme de trachite (Le Puy de Dôme), illustre deux types de dynamisme découlant de viscosités très contrastées. (Cliché G. Kieffer).

De l'eau dans les magmas

On peut préciser, en laboratoire, les mécanismes de dissolution des gaz et la structure des liquides magmatiques.

■ Michel Pichavant

On connaît, depuis plusieurs dizaines d'années, l'importance des gaz dissous, notamment l'eau, sur les propriétés chimiques (ex. : température de cristallisation) et physiques (ex. : viscosité) des magmas. En absence d'eau, les granites seraient beaucoup moins abondants sur Terre car leur température de fusion serait très élevée. Pour modéliser correctement la dissolution d'eau (et d'autres gaz) dans

un liquide silicaté, il manque une information importante : la connaissance précise de la nature des espèces silicatées dissoutes formées à haute température et haute pression. Pour ce faire, l'expérimentation directe au laboratoire est indispensable. L'appareillage nécessaire pour atteindre des températures de plus de 1 000 °C, pour des pressions de 10 kbar ou plus, tout en contrôlant précisément les autres paramètres, tels que le potentiel redox du milieu, est évidemment spécifique et contraignant. On peut ainsi mesurer les limites de solubilité des gaz, déterminer les relations de phases et reconstituer l'ordre de cristallisation (ou de fusion) des magmas naturels ou simplifiés, et en déduire indirectement la nature des espèces dissoutes. L'étape suivante, la détermination directe, au moyen des techniques spectroscopiques, des espèces silicatées à haute température et haute pression, est probablement la voie d'avenir, malgré les difficultés techniques.

Water in magmas - Water and other volatile components critically influence the properties of magmas. Laboratory experiments allow the determination of volatile solubility limits and phase relations and place constraints on the mechanisms of gas dissolution and on the structure of silicate melts.



Autoclave à chauffage externe, à trempe rapide, permettant d'atteindre des températures de 850 °C pour des pressions de 4 000 bar (Centre de recherches pétrographiques et géochimiques, Vandœuvre-les-Nancy).

■ Michel Pichavant, directeur de recherche au CNRS, directeur du Centre de recherches sur la synthèse et la chimie des minéraux (UPR 4201 CNRS), 1A, rue de la Fésolérie, 45071 Orléans Cedex 2.

Solutions et croissance hydrothermales

En assurant des transports de matière sélectifs dans la croûte terrestre, le milieu hydrothermal joue un rôle essentiel dans la formation de la plupart des gîtes minéraux.

■ Jacques Roux,
Alain Baronnet

Agents efficaces de transport de matière entre solides, les fluides hydrothermaux, solutions aqueuses à haute température et haute pression, permettent des échanges rapides d'éléments entre les minéraux, et donc l'approche de l'équilibre thermodynamique local, dans les roches comme au laboratoire. Ceci a permis la réalisation expérimentale d'équilibres entre

silicates et oxydes dans le but de déterminer leurs conditions de stabilité, les lois de distributions des éléments et, d'une façon générale, les propriétés thermodynamiques de ces minéraux.

Un milieu mal connu en conditions extrêmes

Toutefois, la chimie des solutions complexes supercritiques ($T > 374$ °C, $P > 216$ bar) est encore très mal connue. Dans ces conditions particulières, les propriétés physico-chimiques de ces fluides sont très différentes de celles que

l'on connaît à l'ambiante, leur conférant un pouvoir de solvant exceptionnel des matériaux terrestres. Le développement de modèles prédictifs de ces propriétés est freiné par la rareté des données expérimentales inhérente aux difficultés techniques d'observation *in situ* et de mesures sous conditions de pression et température extrêmes. En permettant une approche indirecte de la spéciation en solution, les études expérimentales d'équilibre entre minéraux, solutions supercritiques et magmas comblent partiellement cette lacune.

Les études de dynamique de cristallisation et de résorption cristalline en

Hydrothermal solutions and crystallization - Hydrothermal fluids are powerful agents for the transport of matter and for the catalysis of reactions in the Earth's crust. It also occupies an important place in the arsenal of crystallization environments for materials with technological uses.

► conditions hydrothermales sont récentes en France. Au plan géologique, elles visent à évaluer l'activité des puits et des sources de matière lorsqu'un système chimique, déstabilisé par des événements géologiques, tend à retrouver son équilibre. Les stigmates de non-équilibre ultime sont fréquents dans les minéraux de certains systèmes hydrothermaux (zonation chimique, transformations de phases inachevées, faciès dynamique des cristaux, textures), ce

qui permet potentiellement de reconstituer l'histoire de cristallisation des gîtes hydrothermaux. Actuellement, l'accent est mis sur la recherche de la nature des mécanismes et de mesures de vitesses de croissance ou de dissolution des silicates en présence d'écarts à l'équilibre contrôlés. Au vu des premiers résultats obtenus dans ces domaines, il semble que les lois gouvernant ces cinétiques au-delà du point critique de l'eau ne s'écartent pas significativement de celles

connues pour les cristaux en solution aqueuse ordinaire.

La croissance des gemmes synthétiques

Au plan de l'élaboration de matériaux, le fluide hydrothermal constitue un milieu de croissance favorable, et souvent exclusif lorsqu'il est comparé à d'autres milieux (bain fondu, fondant, état solide). Favorable, car il permet souvent la croissance à plus basse température que ses rivaux, et donc minimise les contraintes thermiques résiduelles dans le matériau et les défauts qui résultent du refroidissement (ex. : quartz et rubis synthétiques). Ce milieu est exclusif pour les matériaux hydroxylés et/ou hydratés, pour lesquels le maintien d'une forte pression d'eau sur le système est requise (zéolites pour applications catalytiques) et même pour certains cristaux anhydres uniquement stables sous ces conditions (ex. : poudres calibrées d'oxyde de chrome Cr_2O_3 des bandes magnétiques modernes). Néanmoins, cette méthode ne permet pas un dopage chimique très homogène des cristaux durant leur croissance, ce qui lui a valu d'être progressivement abandonnée pour la cristallisation de certaines gemmes synthétiques (émeraude, rubis dopés au Cr_2O_3) au profit du bain fondu et de la technique du flux.

Somme toute, les fluides aqueux constituent le milieu naturel dominant de cristallisation dans la croûte terrestre sous formes massive, interstitielle ou dissoute, et sont à eux seuls le moteur de la génération de certains magmas. Cette importance requiert que l'on approfondisse au plus vite leur connaissance expérimentale à hautes température et pression, par couplage des techniques spectroscopiques aux enceintes pressurisées. De même, il est nécessaire d'encourager les études de cinétique de cristallisation des minéraux dans ce milieu hydrothermal, ne serait-ce que pour enfin répondre à cette sempiternelle question : « mais à quelles vitesses poussent les cristaux des roches ? »

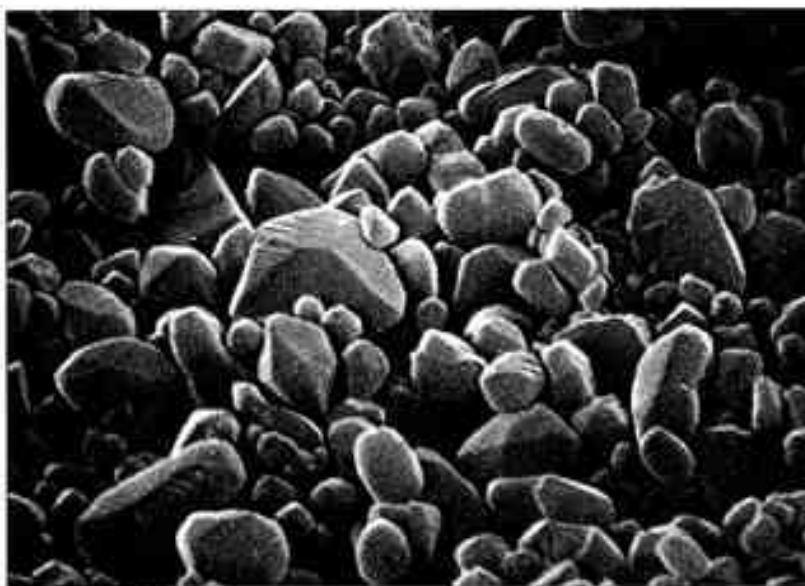


Fig. 1 - Quartz micro-cristallin de très grande pureté et de très grande surface spécifique vu au microscope électronique à balayage. (Cliché CNRS-SOCI, CNRS-SCM Orléans). Matériel réalisé en condition hydrothermale pour l'étude des propriétés physiques de surface du quartz et de son caractère pathogène (e.g. silicose des mineurs), dans le cadre du GERP (regroupant le CNRS, l'INSERM, et le CERCHAR).

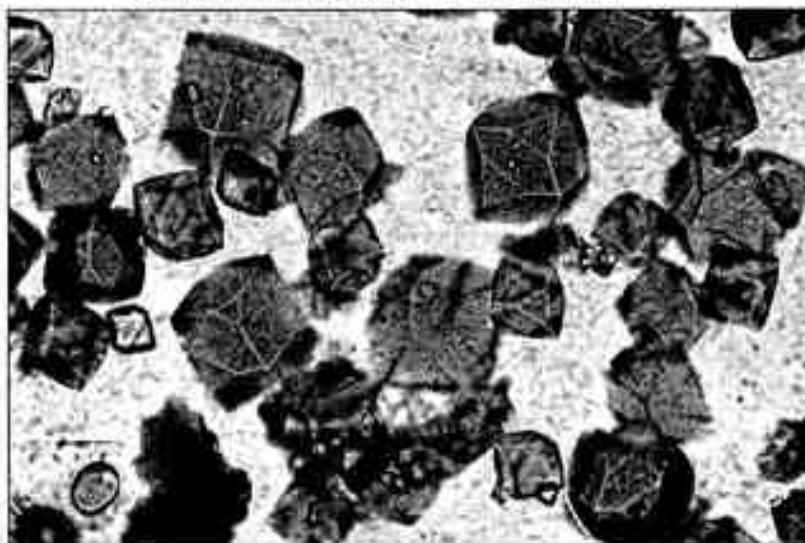


Fig. 2 - Synthèse hydrothermale de spinelle NiAl_2O_4 (700 °C, 2 kbar).

■ Jacques Roux, chargé de recherche au CNRS, Centre de recherche sur la synthèse et la chimie des minéraux (UPR 4201 CNRS), 1A, rue de la Férollerie, 45071 Orléans Cedex 2.

■ Alain Barnaud, professeur à l'Université d'Aix-Marseille III, Centre de recherche sur les mécanismes de la croissance cristalline (UPR 7251 CNRS), Campus Luminy, case 913, 13288 Marseille Cedex 9.

L'uranium, un traceur dans les magmas et les fluides aqueux

L'uranium est un traceur exemplaire pour comprendre le comportement d'un élément dans les magmas et les fluides aqueux.

■ Georges Calas, Jean Dubessy,
Chinh Nguyen-Trung,
Jean-Pierre Muller

Les minéraux se forment en présence d'une phase fondue (liquide silicaté magmatique), ou de phases fluides aqueuses : ces milieux de formation des minéraux qui constituent les roches et les gisements métalliques sont les principaux vecteurs de transfert d'éléments dans les niveaux externes de la Terre. Ils sont cependant fugaces dans le temps et dans l'espace et ne sont que rarement préservés dans les inclusions contenues dans les minéraux. Contrairement aux phases solides, il est donc difficile d'avoir une approche directe de leur structure et composition, et seules des données indirectes peuvent être obtenues, soit au travers des reliques contenues dans les inclusions liquides et vitreuses, soit grâce à des matériaux synthétisés en laboratoire. Dans le cas des liquides magmatiques, une approximation souvent admise consiste à utiliser les verres comme une image instantanée de la structure dynamique des liquides silicatés. Au contraire, la nature des constituants des phases fluides n'est accessible que par des méthodes d'étude *in situ* des inclusions fluides, témoins actuels des paléo-fluides. Dans tous ces composés amorphes, c'est-à-dire dépourvus d'ordre cristallin à grande distance, seules les diverses méthodes spectroscopiques permettent d'obtenir des données structurales : spectroscopie d'absorption X sur rayonnement synchrotron, spectroscopie d'absorption optique, effet Raman, résonance paramagnétique électronique. Nous présentons ici l'exemple d'un élé-

ment traceur, l'uranium, traceur privilégié des processus de différenciation magmatique, qui illustre bien les mécanismes de concentration géochimique dans les niveaux crustaux.

L'uranium dans les verres et les fluides

Les verres contenant de l'uranium montrent des couleurs qui varient en fonction des conditions de synthèse : vert, puis brun et jaune lorsque l'atmosphère de synthèse est de plus en plus oxydante et que le degré d'oxydation de l'uranium passe de +4 à +6. Les modifications de l'environnement local des différentes espèces d'uranium en fonction de la composition du verre permettent d'expliquer les déplacements des équilibres redox avec la composition des magmas silicatés. L'existence de sites originaux dans les verres explique d'autre part la forte affinité de cet élément pour les phases fondues par opposition aux phases minérales, ce qui amène l'uranium à se concentrer préférentiellement dans les magmas crustaux différenciés (phase de pré-concentration au stade magmatique). Enfin, les distances

uranium-oxygène mesurées dans les verres synthétisés en environnement oxydant, correspondent à un groupe uranyle très différent de celui trouvé dans les solutions. Il est ainsi possible de caractériser les sites occupés par l'uranium lors de l'altération d'un verre, par exemple dans le cas des verres de stockage de déchets radioactifs.

La spectrométrie Raman est un outil qui permet de caractériser les espèces chimiques, quelle que soit la nature de la phase à laquelle elles appartiennent. Par exemple, il est possible de mettre en évidence différentes espèces dont la concentration varie en fonction de l'acidité de la solution aqueuse et qui ne peuvent pas être prédites à l'aide des données thermodynamiques. La connaissance de ces espèces permet ensuite de prévoir les équilibres entre solution et phases solides et donc les conditions de mobilité de l'uranium.

Dégâts causés par la radioactivité de l'uranium

Différents types de dégâts d'irradiation sont créés par la radioactivité naturelle dans les minéraux. Ils sont fortement amplifiés si l'interface minéral-solution est importante et peuvent être dosés par résonance paramagnétique électronique, par exemple dans les kaolinites. On peut ainsi calculer la dose d'irradiation reçue par le minéral. Dans le cas de tufs volcaniques acides pris comme analogue naturel du site de stockage de déchets radioactifs de haute activité du Nevada, les défauts dans les kaolinites ont ainsi pu être utilisés pour reconstituer la circulation des radionucléides lors des processus d'altération, il y a environ 30 millions d'années.



Zone altérée en kaolinites et smectites (en couleur rose au centre du cliché) au contact d'une zone minéralisée en uranium (à gauche). Au fond, les séries ignimbriques non altérées (Sierra de Peña Blanca, Mexique). Les kaolinites de la zone altérée ont gardé la mémoire du transit des radionucléides lors de l'altération du tuf volcanique.

Uranium: a tracer in magmas and aqueous fluids - The development of spectroscopic techniques has provided informations on the environment in which elements occur in magmas and fluids. The movement of uranium through crustal magma and radioactively altered fluids is described to illustrate the type of informations that can be obtained.



Microphotographie d'une inclusion fluide à température ambiante. La plus grande dimension est 30 µm. On distingue une phase aqueuse salée et une phase vapeur qui peut contenir un ou plusieurs des gaz suivants : CO₂, CH₄, H₂S, N₂, CO, H₂, O₂.

► La radioactivité peut aussi provoquer une décomposition radiolytique de l'eau par les particules α, avec formation de H₂ et O₂. Ces deux gaz ont été identifiés dans des inclusions fluides associées à un gisement à haute teneur en uranium. La radiolyse conjointe de l'eau et de la matière organique conduit à la formation quasi-exclusive d'hydrogène et à l'oxydation de la matière organique, comme cela a été montré dans certaines zones du réacteur naturel du gisement d'Oklo.

L'étude des espèces chimiques de l'uranium dans les différents milieux de formation – fluides et magmas – ainsi que la possibilité de tracer indirectement cet élément par les défauts induits par irradiation permettent de mieux connaître son transfert dans la lithosphère, en particulier pendant les interactions fluides-croûte. La mise en évidence de la radiolyse liée à la désintégration de l'uranium a montré l'influence de cet élément sur son milieu de transport. De nouvelles perspectives s'ouvrent actuellement en relation avec le stockage des déchets radioactifs. Les interfaces minéral-solution jouent alors un rôle important dans la mobilité des éléments, l'uranium constituant également dans ce cas un bon exemple.

■ Georges Calas, professeur à l'Université Paris VII, Laboratoire de minéralogie et de cristallographie (URA 9 CNRS).

■ Jean-Pierre Muller, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de minéralogie et cristallographie (URA 9 CNRS), 4, place Jussieu, tour 16, 75251 Paris Cedex 05.

■ Jean Dubessy, chargé de recherche à l'ORSTOM, Centre de recherche sur la géologie de l'uranium (GDR 77 CNRS-CREGU).

■ Chinh Nguyen-Trung, ingénieur au CNRS, Centre de recherche sur la géologie de l'uranium (GDR 77 CNRS-CREGU), 3, rue du Bois de la Champelle, BP 23, 54501 Vandœuvre-les-Nancy Cedex.

A la surface des solides mal cristallisés

Jouant un rôle essentiel dans le transport et l'immobilisation des éléments chimiques, les solides mal cristallisés constituent la « partie vivante » du monde inorganique ; ils ont des applications importantes dans l'environnement et l'industrie.

■ Jean-Maurice Cases,
Alain Manceau,
Jean-Yves Bottero

La physicochimie des interfaces porte sur la caractérisation, l'analyse, la modélisation des phénomènes qui se manifestent aux limites entre phases. De ce fait, son champ scientifique englobe aussi bien les conditions de genèse des phases minéralisées, de leur équilibre avec le milieu ambiant, que la séparation et l'utilisation des minéraux naturels. L'analyse des propriétés des interfaces et des phénomènes liés à la dimensionnalité réduite font nécessairement appel à la pluridisciplinarité.

La cristallographie des substances finement divisées est, en particulier, un thème de recherche en émergence. L'utilisation de la microsonde électronique et de la microscopie électronique haute résolution révèle la nature hétérogène des argiles, que ce soit au niveau du feuillet élémentaire, du cristallite, ou de l'agrégat. L'utilisation de différentes spectroscopies (RPE, Mössbauer, EXAFS) permet par exemple de découvrir les différentes formes sous lesquelles est engagé le fer dans les kaolins, les relations éventuelles avec la cristallographie de l'argile, l'influence du fer sur la taille des cristallites, et donc les conditions de genèse, les possibilités de blanchiment.

De par leurs propriétés physiques et réactivités chimiques, et leur grande importance naturelle, les matériaux mal cristallisés (oxydes hydratés microdivisés...) jouent un rôle essentiel dans le transport et l'immobilisation des éléments chimiques à la surface de la terre : ils constituent en quelque sorte la « partie vivante » du monde inorganique. L'importance de ces produits dépasse le cadre strictement géologique et s'étend au domaine économique : concentrations métalliques, sols pour l'agriculture, purification des eaux naturelles, stockage des déchets nucléaires... Par exemple, il a été montré qu'en milieu estuarien le plomb est à plus de 70 % immobilisé par les oxydes hydratés de

manganèse. L'étude de la structure des oxydes mal cristallisés a été rendue possible grâce à l'avènement du rayonnement synchrotron et de la RMN. Ces études peuvent être classées en trois catégories :

Les phases pures

Longtemps considérés comme « amorphes », les oxydes hydratés d'Al, Mn et Fe se sont révélés être ordonnés à l'échelle de la dizaine d'angströms. De plus, ceux-ci possèdent une structure locale distincte qui rend compte, dans une certaine mesure, des différences d'affinités des éléments chimiques pour chacune d'entre elles. Il est désormais possible de faire le lien entre la structure et les propriétés physico-chimiques des oxydes hydratés, ce qui offre des perspectives d'application dans le domaine de l'environnement, de la catalyse, et surtout du traitement des eaux.

Les oxydes hydratés naturels

Les produits naturels sont le plus souvent multicomposants en ce sens qu'ils contiennent à la fois du fer, de l'aluminium, du manganèse et de la silice à des teneurs bien supérieures au pour-cent. Leur réactivité chimique dépend, pour une large part, de leur structure réelle, c'est-à-dire selon que ces éléments réalisent une véritable solution solide ou sont ségrégés en domaine. Par exemple, il a été montré que les gels hydratés à composition chimique Fe-Mn sont des intercroissances des pôles purs FeOOH, n H₂O et MnO₂, n H₂O. On comprend dès lors beaucoup mieux l'aptitude de ces phases à piéger toute une variété d'éléments chimiques puisque cette véritable structure composite allie les propriétés de chacun des deux pôles.

At the surface of poorly crystallized solids - The study of surface of minerals and of poorly crystallized solids heavily borrows from physics and chemistry and has important implications for environment and industry.



Usine de production d'eau potable pour l'agglomération nancéenne et d'expérimentation pour le NANCIE. (Cliché G. Luspot).

Le piégeage des éléments traces

Il est désormais possible de différencier trois mécanismes élémentaires d'immobilisation d'un élément trace :

substitution au sein du réseau de la phase porteuse, adsorption à l'interface solide-solution et formation de phases discrètes intimement associées. Du fait de leur grande surface spécifique (400-700 m²/g), les oxydes hydratés sont des

supports privilégiés pour l'adsorption. La rétention, par exemple, des complexes uranyles sur les gels ferriques est réalisée par un mécanisme mononucléaire bidenté, c'est-à-dire par l'établissement d'une liaison chimique U-O-Fe avec un octaèdre de fer. Le coefficient de partage solide/solution résulte d'une parfaite adéquation structurale entre l'adsorbant et l'adsorbé. La diversité des mécanismes de piégeage n'est donc pas infinie, mais dépend principalement du couple élément - phase porteuse.

■ Jean-Maurice Cases, directeur de recherche au CNRS, directeur du groupement scientifique « Traitement chimique des eaux », Laboratoire de minéralurgie (URA 235 CNRS).

■ Jean-Yves Bottero, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de minéralogie (URA 235 CNRS), Ecole nationale supérieure de géologie de Nancy, Centre de recherche sur la valorisation des minerais, BP 40, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy Cedex.

■ Alain Mancausi, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de minéralogie et cristallographie (URA 9 CNRS), Université Paris VII, tour 16, 4, place Jussieu, 75231 Paris Cedex 05.

Modéliser les transferts de masse

La circulation de fluides induit des transformations chimiques dans la lithosphère. Leur modélisation passe par un progrès dans la connaissance des cinétiques des réactions à l'interface solide-liquide.

■ Jacques Schott

S'il est connu de tous que la vie est liée à des échanges chimiques au sein de fluides en mouvement, on sait moins que nombre des paysages qui nous entourent ont été aussi façonnés durant les temps géologiques par des circulations de fluides qui dissolvent et précipitent des minéraux sur leur passage. Ces circulations sont dues à des processus de convection (mouvement d'un fluide sous l'influence de différences de température) ou à l'expulsion des fluides pendant la compaction des roches. Pour modéliser les transforma-

tions des minéraux et l'évolution des fluides, il faut connaître les propriétés de transport du fluide, les solubilités des minéraux à travers lesquels il circule, ou qu'il est susceptible de précipiter (équilibre thermodynamique) et la cinétique des réactions hétérogènes qui se produisent à la surface des minéraux en contact avec le fluide. Si ces informations sont disponibles, on peut, en résolvant les équations de conservation de la masse, prédire la distribution spatio-temporelle des différentes phases et constituants chimiques liée à la circulation du fluide.

Pendant longtemps, la diffusion a été considérée comme le processus essentiel de transport ; en fait, même dans le cas

de vitesses de circulation lentes, son rôle reste très local. Plus récemment, la circulation des fluides a été prise en compte en supposant, toutefois, une vitesse suffisamment faible pour que l'équilibre thermodynamique local soit respecté. Dans ce cas, si le milieu poreux dans lequel circule le fluide est soumis à un gradient de température (par exemple le gradient géothermique) et/ou de pression, le fluide, au cours de son trajet, dissout les différentes phases solides et fluides et s'en sépare suivant leur solubilité variable avec la température et la pression. Ce type de modèle a permis, par exemple, d'expliquer les phénomènes de transformation inorganique (silicifications, calcifications, apparition de porosité secondaire) et la formation de

Modelling mass transfer - The development of computer models, linking hydrodynamics and chemistry, is a major requirement in the study of the mass transfer between minerals and fluids in the Earth. To reach this goal, we need to have a better understanding of the kinetics of chemical reactions at the solid-solution interface.

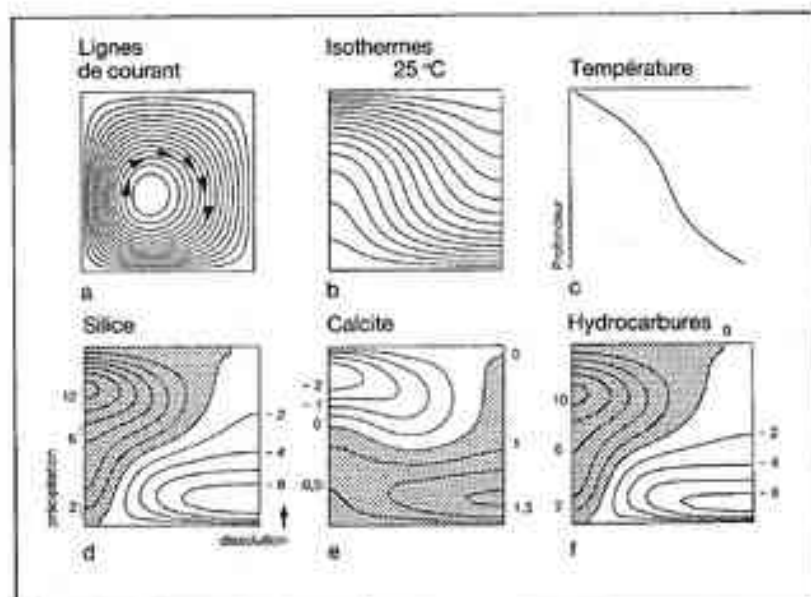


Fig. 1 - Modélisation des transformations chimiques induites par la convection thermique dans la couche de craie d'un gisement d'hydrocarbures de la mer du Nord au début de l'Eocène. Sur les schémas d, e, f, les zones grisées localisent les zones de précipitation des minéraux ou d'exsolution des hydrocarbures, et les zones laissées en blanc, les zones de dissolution. Les chiffres représentent les taux de dissolution (négatifs) ou de précipitation (positifs), exprimés en % du volume total de roche par million d'années.

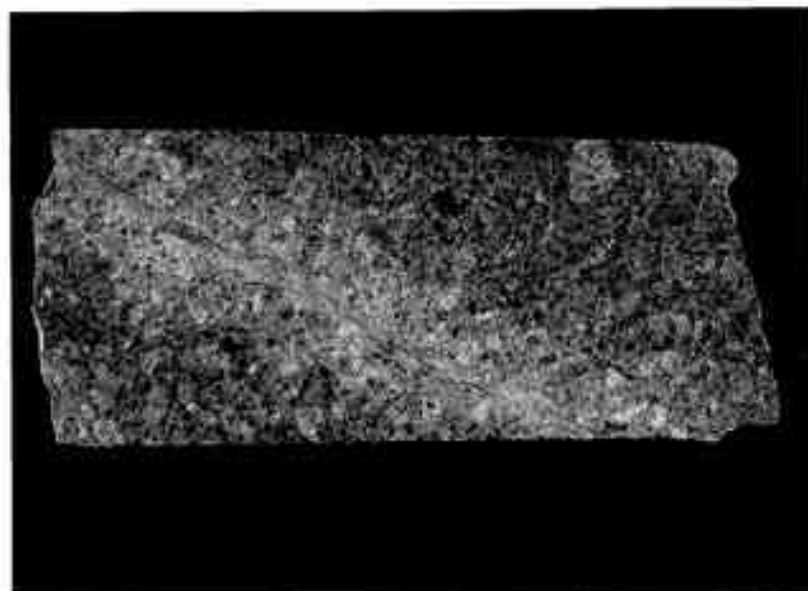


Fig. 2 - Altération hydrothermale (200 °C) dans le granite de Faoula (Montagne Noire). De part et d'autre de la fissure, on peut voir une zone jaunâtre (d'épaisseur 15 mm) dans laquelle les feldspaths plagioclases (An_{50}) et les biotites sont altérés en illites. Par contre, quartz et orthose ne sont pas transformés. Ceci illustre les vitesses différentes de dissolution de ces minéraux. L'absence de kaolinite dans les minéraux d'altération est due à la cinétique très lente de cristallisation de ce minéral en milieu acide. Le calcium libéré par la dissolution du plagioclase précipite sous forme de calcite qui colmate la fissure et stoppe ainsi le processus d'altération. (Cliché M. Munoz, URA 67 CNRS).

► gisements pétroliers observés dans certains bassins sédimentaires (réservoirs gréseux ou carbonatés).

Tenir compte des cinétiques de réaction

Cependant, lorsque les vitesses d'écoulement du fluide sont « grandes » (>1 m/an), ou encore dans le cas de systèmes complexes (roches constituées de plusieurs phases solides), l'hypothèse de l'équilibre chimique local n'est plus nécessairement vérifiée et les termes irréversibles de l'équation de conservation de la masse doivent être pris en compte. Dans les processus géochimiques, ces termes irréversibles concernent principalement la dissolution et la précipitation des phases solides. C'est la raison pour laquelle de nombreux programmes de recherche sont actuellement menés à l'échelle mondiale pour acquérir, par l'expérimentation et la modélisation (calculs *ab initio* de la dynamique moléculaire), les données nécessaires sur les cinétiques des réactions. Par exemple, des travaux récents montrent que les vitesses de cristallisation des silicates naturels sont très largement variables d'une phase à l'autre (jusqu'à dix ordres de grandeur !). Ne pas prendre en compte les cinétiques de cristallisation (ou de dissolution) peut ainsi conduire à des erreurs considérables dans la prédiction de la nature, la quantité et la chronologie des phases solides qui cristallisent ou se dissolvent lors de la circulation du fluide.

La modélisation des transferts de matière ne concerne encore que des systèmes contenant des phases solides pures. Il est certain que les prochaines années verront le développement de modèles beaucoup plus sophistiqués (prenant en compte, par exemple, les interactions des fluides avec des solutions solides) qui approcheront davantage les réalités géochimiques et qui exigeront à la fois des compétences théoriques approfondies et des moyens de calcul plus lourds.

■ Jacques Schott, directeur de recherche au CNRS, Université Paul Sabatier, Laboratoire de géochimie (URA 67 CNRS), 38, rue des 36 Ponts, 31400 Toulouse.

A la découverte des gisements cachés

La prospection de nouveaux gisements s'appuie désormais sur des modèles prédictifs établis à partir de l'étude de leur source, leur transport, leur dépôt et leur préservation.

■ Maurice Pagel,
François Ruhlmann

Depuis le début de l'utilisation des métaux par l'homme, les besoins ont considérablement augmenté et se sont diversifiés : ces deux facteurs ont amené les mineurs à modifier les techniques d'exploration et d'exploitation minières. C'est ainsi que des gratta- ges superficiels de la préhistoire et des aurifères gallo-romains, nous sommes passés au gigantisme des exploitations actuelles aussi bien en mines souterraines qu'en mines à ciel ouvert. Les mines d'or d'Afrique du Sud et des In- des ont dépassé la profondeur de 3 400

mètres. Dans les régions intensément prospectées en surface, la reconnaissance doit maintenant se porter vers les zones plus profondes, et pour cela les modèles de genèse des gisements doivent être de plus en plus perfectionnés, les reconnaissances géophysiques de plus en plus élaborées et précises afin de guider au mieux les travaux coûteux de forage.

L'exemple de l'uranium

Les modèles de gisements impliquent, pour leur élaboration, une caractérisation des principales étapes nécessaires à la genèse d'un gisement métallifère : la détermination des mi-

In search of hidden deposits - In areas where intense surface exploration has been done, it is now necessary to develop models of metallogenesis to discover hidden deposits at depth. Quantification of the physical and chemical parameters which existed at the time of ore genesis, combined with geological data, increases the predictive capability of the models. These models find equally important applications in the field of waste disposal.

lieux sources des métaux, les conditions de solubilisation et de transport, leur dépôt dans des pièges géologiques et leur préservation, en intégrant ces données dans leur cadre géologique global. Nous illustrerons cette démarche par l'exemple des gisements d'uranium liés spatialement aux discordances. Ce sont des gisements localisés de part et d'autre de l'interface entre une couverture sédimentaire précambrienne et un socle métamorphique, surtout métapélitique, et granitique présentant sous les grès une paléoolération latéritique. Ils sont connus principalement au Canada, dans le Saskatchewan, et en Australie, dans les Territoires du Nord.



Vue prise d'hélicoptère de la mine à ciel ouvert de Cluff D dans la structure de Carswell (Saskatchewan, Canada). Dans un volume de 120 × 30 × 9 m, elle contenait 4 370 tonnes d'uranium à une teneur moyenne de 3,41 % d'uranium dans le minéral. (Cliché M. Pagel).



La reconnaissance des sources est le domaine privilégié des isotopes radiogéniques. Elle peut être abordée soit par l'étude isotopique des formations régionales, soit par les caractéristiques isotopiques de certains éléments présents dans la minéralisation. Au Saskatchewan, les données isotopiques samarium (Sm)-néodyme (Nd) obtenues sur les métapélites montrent qu'elles contiennent un matériel détritique dont les roches mères, d'âge archéen, sont issues du manteau. Alors que le plomb commun est proche de la valeur crustale, les rapports $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ élevés et variables des métapélites indiquent un enrichissement en uranium des schistes noirs marins. L'étude du système U-Pb indique que ce système n'a été perturbé, après 1,77 milliards d'années, que dans certaines zones du socle (zones faillées, profil latéritique sous les grès). Les rapports isotopiques initiaux $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ de l'oxyde d'uranium, la pechblende, constituant principal du minéral, permettent de cerner l'origine possible de ces éléments: couverture sédimentaire, profil latéritique et matériel volcanique.

Pour comprendre le transport et le dépôt des métaux, de très grands progrès ont été réalisés grâce à l'utilisation des inclusions fluides et des isotopes stables et radiogéniques. Les inclusions fluides des minéraux qui accompagnent la pechblende contiennent des eaux salées, des saumures, dont les températures de piégeage sont comprises entre 150 et 250°C. Ces saumures sont comparables à celles qui sont contemporaines de la silicification des grès, le fluide minéralisateur étant issu de la couverture sédimentaire. D'après les équilibres entre minéraux et la composition des inclusions fluides, le pH est compris entre 4,5 et 5. A ces pH, les données thermodynamiques montrent que l'uranium est transporté sous forme de complexe chloruré.

L'âge du dépôt de la pechblende a été fixé entre 1,29 et 1,35 milliards d'années, à partir des données isotopiques U-Pb, Sm-Nd et K-Ar. L'uranium, très soluble dans les solutions sous forme hexavalente, se trouve immobilisé sous sa forme quadrivalente. La réduction est assurée par un environnement riche en graphite qui, altéré par les saumures, produit du méthane et d'autres hydrocarbures. Les isotopes du soufre permettent aussi d'envisager la production de H_2S par altération des sulfures abondants dans les métasédiments graphitiques. La localisation des zones de mélange entre la saumure oxydante provenant des grès et le fluide réducteur dépendent de critères paléogéomorphologiques (conservation en surface de zones riches en graphites lors de l'altéra-

tion latéritique) et tectoniques (circulation des saumures à 1,3 milliards d'années).

Des réactions nucléaires dans un gisement

La connaissance de l'altération d'un gisement est également essentielle car elle permet de déterminer les conditions de redistribution des métaux, donc d'apporter une aide significative à la prospection en hiérarchisant les indices. Elle est aussi nécessaire pour connaître le comportement à long terme des éléments toxiques dans les lieux de stockage. Le gisement de Cigar Lake, situé à 400 mètres de profondeur, avec une teneur moyenne de 8 % en uranium (150 000 tonnes d'U) est un exemple particulièrement instructif. Une remobilisation de l'uranium vers 300 millions d'années permet d'étudier la migration des éléments. C'est, avec le gisement précambrien d'Oklo, au Gabon, où se sont produites des réactions nucléaires vers deux milliards d'années, un exemple d'analogie naturelle pour le stockage des déchets radioactifs.

En conclusion, l'étude de la formation des gisements métallifères a beaucoup évolué durant ces dernières années par une quantification des paramètres physiques et chimiques qui, associés à d'autres informations géologiques, permettent d'élaborer des modèles prédictifs qui aident à la recherche de gisements entièrement cachés et à l'étude du comportement à long terme d'un stockage de déchet.

■ Maurice Pagel, directeur de recherche au CNRS, Centre de recherche sur la géologie de l'uranium (GDR 77 CNRS-CREGU), responsable de l'équipe «minéralogie, géochimie et métallurgie dans le cycle exogène», BP 23, 54501 Vandœuvre-les-Nancy Cedex.

■ François Ruhlmann, chargé de mission à la branche Uranium, Département des prospections et recherches minières, COGEMA, 2, rue Paul Dautier, 78141 Vélizy-Villacoublay Cedex.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place Aristide-Briand 92195 Nanterre Cedex

LES GLACIERS

Etude de la répartition des glaciers en surface et en volume, puis description très précise des différents types de glaciers existants: les glaciers antarctiques, les glaciers arctiques et les glaciers alpins (formation, mouvement, mesures, sondages et analyses...)

Auteur-réalisateur:

Louis PHILIPPE

Conseillers scientifiques:

Robert VIVIAN et

Paul DUVAL

Production: SERDDAV

1978 - 20 minutes

Supports de diffusion: 16 mm et vidéo 3/4"

HADAR 75 OU LES TECHNIQUES DE TERRAIN

En octobre 1975 débutait la 5^e campagne de fouilles archéologiques de l'expédition internationale de l'Afar (IARE) en Ethiopie, composée de géologues, de paléontologues et de paléanthropologues sous la direction de Maurice Taïeb, Yves Coppens et Donald Johanson en vue de rechercher des hominidés et d'essayer de reconstituer le milieu écologique du site de Hadar, où fut découverte Lucie lors de la campagne précédente en 1974.

Auteur: Maurice TAÏEB

Réalisateurs:

Daniel CAVILLON

et Bernard FAVRE

Production: SERDDAV

1976 - 32 minutes

Supports de diffusion: 16 mm et vidéo 3/4"

CENTRE DES SCIENCES DE LA TERRE

Rapport d'activité du Centre des Sciences de la Terre qui a pour vocation d'étudier la genèse et l'évolution de la croûte terrestre.

Auteur: Centre des Sciences

de la Terre

Réalisateurs:

Jean-François DARS

et Anne PAPILLAUT

Co-production: CNRS Audiovisuel

et Centre des Sciences de la Terre

Support de diffusion: vidéo 3/4"

DEJA PARUS DANS LA NOUVELLE FORMULE DU COURRIER DU CNRS



BON DE COMMANDE VALABLE JUSQU'AU 31 DECEMBRE 1990
à retourner aux Presses du CNRS 20-22, rue Saint-Amand 75015 Paris

Nom		Prénom		
Adresse				
Code postal		Commune		Pays
ISBN	TITRE DE L'OUVRAGE	PU	OTE	TOTAL
04232-1	n° 71: « La mécanique en 1988 » (été 1988)	50 F		
04340-9	n° 72: « Recherches sur l'environnement » (mai 1989)	50 F		
04364-6	n° 73: « Archéologie en France métropolitaine » (septembre 1989)	50 F		
04396-4	n° 74: « Le CNRS et les entreprises, la valorisation » (novembre 1989)	50 F		
04446-4	n° 75: « Les sciences du droit » (avril 1990)	50 F		
Port: France 15 F - Etranger 25 F			Total	
A partir de 5 numéros: franco de port			Frais de port	
			Total	
Ci-joint mon règlement de		F à l'ordre des Presses du CNRS		
Par chèque bancaire		Chèque postal		Mandat
Je vous autorise à débiter mon compte Carte Bleue Visa				
N°		Date de validité		
Date		Signature		

Code 30021

PLANETES ET METEORITES

Préserver dans ce numéro consacré aux Sciences de la Terre des articles sur des sujets « extra-terrestres » peut paraître insolite, mais en fait ce choix est logique. En effet, d'une part les techniques utilisées sont souvent identiques, mais de manière plus importante les études effectuées sur des objets extra-terrestres sont complémentaires des études terrestres. Parmi les nombreuses recherches, nous avons choisi de présenter deux aspects. Le premier correspond à l'étude isotopique de la matière extra-terrestre. Le second est l'étude de la « géologie » des autres planètes du système solaire, rendue possible par les nombreuses missions satellitaires qui ont été effectuées ces dernières années.

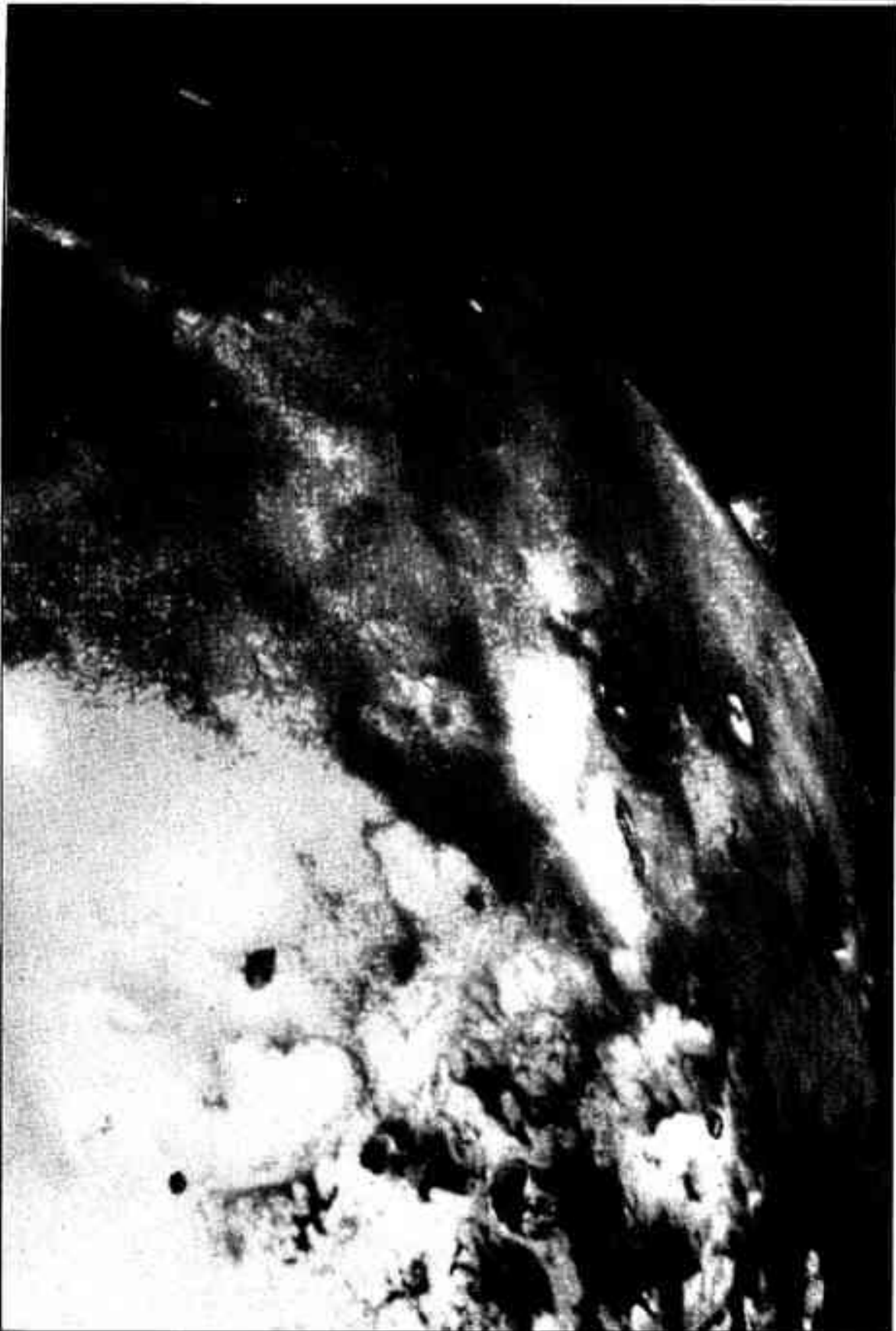
Utiliser les météorites (ou les micrométéorites, voir l'article de M. Maurette) que l'on retrouve à la surface de la Terre, c'est pouvoir remonter à l'origine de la formation de notre planète. En effet, du fait de la température élevée qui a régné à l'intérieur de la Terre et de toutes les transformations qui se sont produites depuis 4,5 milliards d'années,

aucune roche terrestre ne peut livrer d'information sur ce qui s'est produit avant l'accrétion. Par contre, certaines météorites, elles, ont gardé en mémoire la trace de ces événements passés. J.-L. Birck et F. Robert s'attachent dans leur article à montrer comment l'utilisation d'isotopes a permis de progresser dans ce domaine. Ces deux chercheurs ont participé à la mise en évidence de diverses anomalies isotopiques dans des météorites. Découverte qui, associée à d'autres anomalies mises en évidence aux Etats-Unis, a bouleversé l'image que l'on pouvait avoir du nuage de gaz qui s'est condensé pour donner le système solaire. Il a été ainsi démontré que le nuage de gaz et de poussières n'était pas homogène isotopiquement. Par la mise en évidence d'anomalies liées à des éléments de courte période, la preuve a été apportée qu'un événement nucléosynthétique s'était produit peu de temps avant le début de l'accrétion. Grâce à la découverte des anomalies des éléments du pic du fer, le lieu où ces éléments ont été formés a été précisé.

Grâce à celle d'anomalies sur les éléments légers (hydrogène), l'existence de molécules organiques présentes au cœur des météorites a été démontrée.

Utiliser l'étude des autres planètes, c'est resituer la nôtre parmi celles-ci. La première constatation, comme le décrit P. Thomas, est l'extraordinaire variété des surfaces, des compositions, des activités des différents corps planétaires qui ont pu être étudiés. Ces travaux comparatifs permettent de dégager les grands mécanismes responsables de ces observations. L'article de P. Thomas donne les résultats principaux des diverses missions récentes, alors que celui de P. Masson se tourne vers l'avenir et nous décrit les questions non résolues et le futur programme spatial dans lequel la communauté française, européenne, internationale s'est engagée pour progresser dans la compréhension de la formation et de l'évolution du système solaire.

Bernard Dupré
Directeur de recherche au CNRS



Io, l'un des quatre satellites galiléens de Jupiter, présente un volcanisme hyperactif dû aux interactions gravitationnelles avec cette planète. Ici une éruption volcanique de 250 à 280 km de haut. (Cliché Voyager/Nasa, Photothèque planétaire d'Orsay).

Les étoiles présolaires

L'injection dans la nébuleuse présolaire de matière fraîchement élaborée dans des étoiles n'a cessé qu'au moment où le Soleil et les planètes commençaient à se former.

■ Jean-Louis Birek

Les anomalies isotopiques nous offrent une fenêtre sur notre passé présolaire. Pour l'instant, ce passé apparaît extraordinairement complexe. Néanmoins, parmi les nombreux processus offerts par l'astrophysique pour la production de la matière du Soleil et de ses planètes, les résultats obtenus à partir des météorites permettent de faire un premier choix entre ceux qui ont effectivement collaboré à la fabrication du système solaire ; on y a déjà trouvé des débris de supernova et de nova, des condensats de vent stellaire d'étoile au carbone. Les météorites apportent également une information sur la chronologie des événements ayant mené au système solaire tel qu'on le connaît aujourd'hui. Dans ce but, on fait appel aux isotopes radioactifs. En effet, les réactions nucléaires qui synthétisent les éléments plus lourds que l'hydrogène produisent aussi des isotopes radioactifs. Les isotopes à courte période ($10^4 < T < 10^6$ ans) ne peuvent être détectés dans le système solaire primitif que si l'intervalle de temps entre leur production dans les étoiles et leur incorporation dans les météorites n'excède pas une dizaine de fois leur période de décroissance.

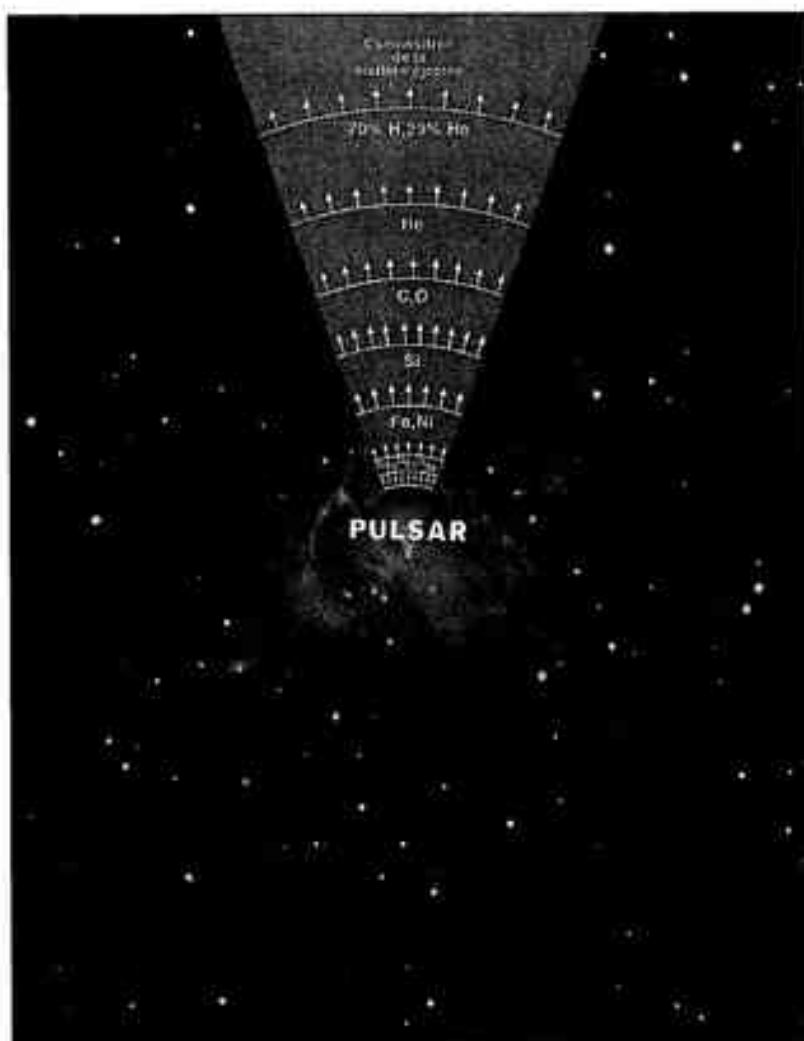
Les quelques exemples ci-dessous illustrent la recherche menée actuellement dans ces domaines :

Les éléments du groupe du Fer

Ces éléments (Ca, Ti, Cr, Fe, Ni, Zn) ont une importance particulière dans la

nucléosynthèse stellaire. En effet, ce sont les noyaux les plus stables de la classification périodique, et quand, dans les étoiles massives, la fusion aboutit à ces éléments, ce processus ne peut plus produire aucune énergie. On assiste à un effondrement de l'étoile sur elle-même. Pour une étoile très massive, on

aboutit à un trou noir. Si l'étoile l'est moins, l'onde de choc rebondit sur le cœur neutronisé et propulse les autres couches dans le milieu interstellaire : on assiste à une supernova. Dans les conditions extrêmes atteintes dans les couches internes de cette étoile avant ce cataclysme, les nucléons du groupe du fer sont synthétisés avec des compositions isotopiques extrêmement variables suivant les conditions (température, densité, pression, etc.). Dans la matière éjectée, l'astrophysique prédit un certain nombre de corrélations entre les compositions isotopiques des différents éléments, corrélations qui sont évidemment différentes suivant la nature exacte des processus nucléaires mis en jeu. En cherchant les cendres de ces



Les supernovae sont une manifestation spectaculaire de la nucléosynthèse stellaire : en l'espace de quelques dixièmes de secondes, plusieurs masses solaires de matériaux sont modifiées isotopiquement et réinjectées dans le milieu interstellaire. Cette photo de la nébuleuse du Crabe montre de tels éjectats après 900 ans d'expansion. L'insert présente la structure de l'étoile au moment même de l'explosion.

Pre-solar stars - Heavy element isotopic anomalies in meteorites provide proof of the diversity of stellar nucleosynthetic processes involved in the origin of the materials which constitute the solar system. Now-extinct short-lived nuclides were present in the early solar system and set an upper limit of three million years for the time between stellar contribution to the solar system and the formation of planetary bodies.

processus dans les météorites, on cherche la nature exacte du feu qui les a produites. Des anomalies isotopiques ont été effectivement trouvées.

Les compositions isotopiques des éléments du groupe du fer, mesurées dans les inclusions réfractaires des météorites carbonées, montrent des variations isotopiques en général de quelques dix millièmes et rarement quelques millièmes. Cette matière anormale correspond à un produit tout à fait particulier de la nucléosynthèse stellaire. Son élaboration aurait eu lieu près du cœur d'une étoile massive (entre huit et vingt masses solaires) juste à l'interface entre la future étoile à neutrons et la matière éjectée dans le milieu interstellaire par le processus supernova. Cette zone est particulièrement efficace dans la production des isotopes riches en neutrons du groupe du fer : ^{54}Fe , ^{56}Fe , ^{58}Fe , etc. On a aussi mis en évidence de la matière où ce composant est déficitaire.

Les résultats les plus récents obtenus à l'Institut de physique du globe de Paris sur les rapports isotopiques du chrome montrent que la matière qui est considérée comme normale dans le système solaire n'est pas élaborée avec des rapports isotopiques normaux, mais résulte

d'un mélange de composants aux origines stellaires diverses.

Les radionuclides à courte période

Ces nucléons, s'ils ont été présents au moment de la formation du système solaire, ont une période trop courte pour survivre plus de quelques dizaines de millions d'années. La démonstration de leur existence, à partir de la présence de leurs isotopes fils dans les météorites, apporte donc des contraintes très fortes sur le laps de temps qui s'est écoulé entre leur nucléosynthèse dans les étoiles et la formation des météorites.

À la fin des années soixante, de même qu'il était admis que la nébuleuse qui allait donner naissance au système solaire avait été bien homogénéisée, les données dont on disposait indiquaient que ce nuage de gaz et de poussières avait été isolé de toute contribution stellaire fraîche pendant 100 à 150 millions d'années avant la formation du Soleil et de ses planètes. La démonstration de l'existence de ^{26}Al et ^{53}Mn dans les inclusions et dans d'autres météorites primitives a changé radicalement cette façon de voir. La période de ces isotopes est si

courte (0,7 Ma pour ^{26}Al et 3,7 Ma pour ^{53}Mn) que s'ils ont été présents, ils n'ont pas pu être créés plus de 3 à 5 millions d'années avant la formation des météorites. Cette observation est capitale car elle montre que l'injection dans la nébuleuse solaire de matière fraîchement élaborée dans des étoiles n'a cessé quasiment qu'au moment même où le Soleil et les planètes commençaient à se former. En regroupant les résultats des différents éléments, on est amené à conclure que seulement des quantités extrêmement faibles de ces radionuclides étaient présentes dans la nébuleuse. On peut conclure que le dernier apport de matière fraîchement nucléosynthétisée dans une ou plusieurs étoiles n'était que de l'ordre du dix millième de la masse de la nébuleuse présolaire.

■ Jean-Louis Bick, directeur de recherche au CNRS, Laboratoire de géochimie et cosmochimie (URA 196 CNRS), Institut de physique du globe, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

L'exploration géologique des planètes

Trente années d'exploration ont montré que chaque planète ou satellite est unique en son genre. Tous sont pourtant nés en même temps et de la même manière.

■ Pierre Thomas

Si plus d'un siècle sépare la découverte de l'Amérique par Christophe Colomb de l'exploration de l'Australie par les Hollandais, trente ans ont suffi pour passer du survol de la face cachée de la Lune (1959) à celui de Neptune (1989) et pour explorer ainsi tout le système solaire, à l'exception de Pluton.

Quels furent les résultats de cette exploration ? On a étudié *in situ* la Lune, Mars et Vénus. De nouvelles méthodes d'études spectrales infra-rouge, menées

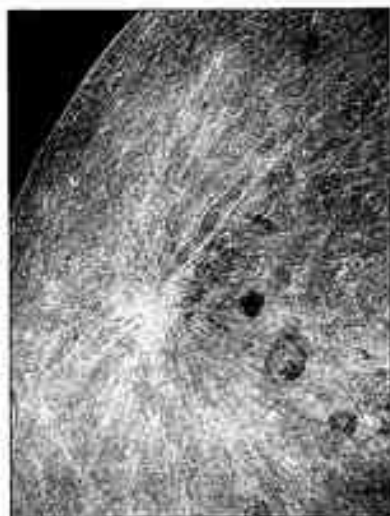
très récemment depuis la Terre (observatoire du Pic du Midi), ou depuis des sondes en orbite planétaire, permettent de déterminer la composition minéralogique de la surface des planètes proches. Et surtout, on connaît maintenant avec une bonne résolution la surface de vingt-cinq corps solides, sans compter la nuageuse Titan, les quatre planètes gazeuses géantes et une comète (Halley).

La grande leçon de cette exploration est que chaque planète ou satellite est unique en son genre, et qu'en particulier l'évolution géologique « à la manière de la Terre » n'est qu'une possibilité, parmi d'autres, pour une planète de vivre sa

vie. Pourquoi cette complexité, alors que tous ces corps sont nés en même temps (il y a 4,6 milliards d'années) et de la même manière (accrétion de poussières) ? Parce que certains sont gros et d'autres petits ; parce que certains sont surtout constitués de silicates et d'autres de glaces ; parce que certains ne disposent que de la radioactivité naturelle comme source d'énergie, et que d'autres ont, en plus, de l'énergie « marémotrice » ; parce que certains ont pu retenir une atmosphère et d'autres pas...

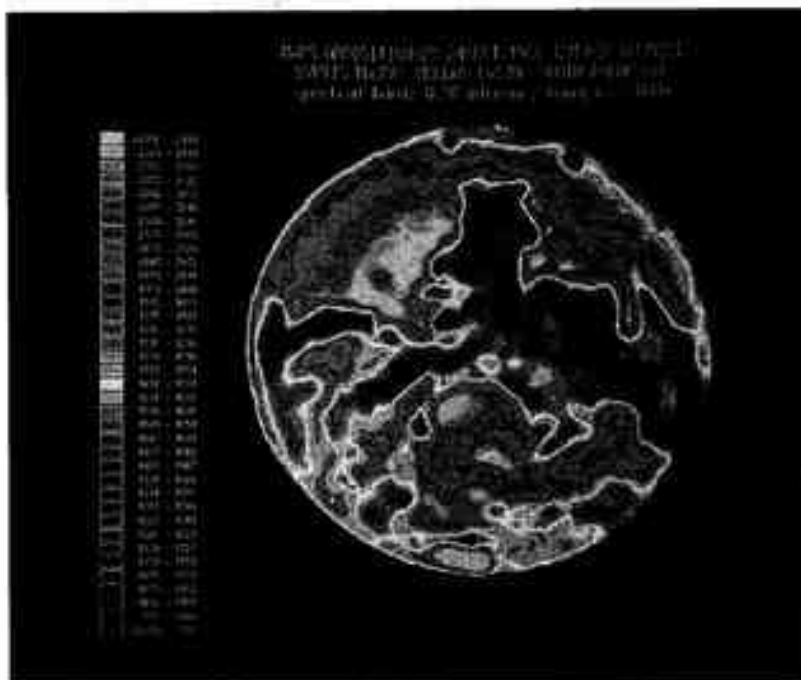
C'est cette diversité qu'illustrent les photographies que nous présentons. Toutes les images NASA proviennent de la Photothèque planétaire de l'Université d'Orsay.

Geological exploration of the planets. Thirty years of exploration have shown that each planet or satellite is unique of its type. All were, however, born at the same time and in the same manner. The Earth's manner of evolving is just one of many possible planetary life-history scenarios.



La Lune Δ

La morphologie lunaire est largement dominée par les cratères d'impact, preuve d'une très faible activité géologique depuis 3,5 milliards d'années. Ici, le très jeune cratère Giordano Bruno. (Cliché Apollo/Nasa).



Composition minéralogique de Mars Δ

Cette image, obtenue par spectroscopie IR, depuis l'observatoire du Pic du Midi, montre la teneur en Fe^{2+} du disque martien (centré sur 100°W). Les zones sombres, absorbant fortement l'IR entre 900 et 1020 nm , sont riches en pyroxène et olivine. (Cliché Observatoire du Pic du Midi).

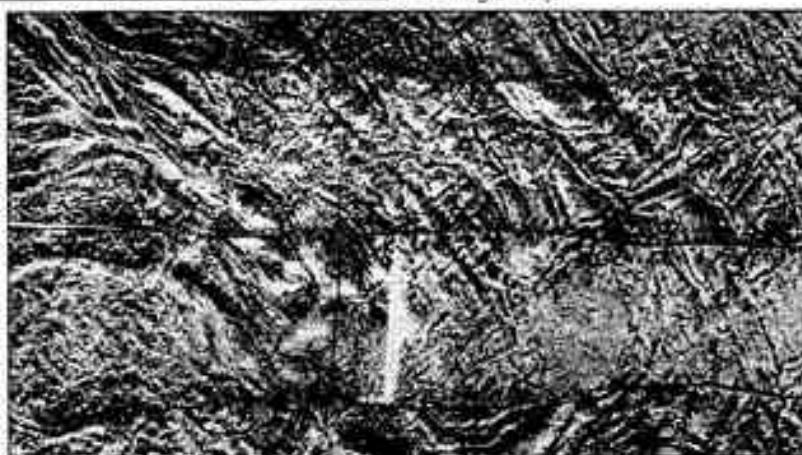


Mars <

Mars possède une activité intermédiaire : les deux-tiers de sa surface montrent des traces de bombardement primitif, alors que le tiers restant présente des manifestations évidentes d'activité géologique « récente » (environ un milliard d'années). Ici le volcan Olympus Mons (600 km de diamètre, 26 km de haut) qui dépasse des nuages. (Cliché Viking/Nasa).

Vénus >

Cette image radar d'une partie de l'hémisphère Nord couvre une surface de $500 \times 800 \text{ km}$. Cette morphologie extrêmement tourmentée, et inexpliquée pour l'instant, révèle une extraordinaire activité géologique. On constate ainsi une activité très faible pour la Lune, moyenne pour Mars, et importante pour Vénus et la Terre. L'activité géologique est, en fait, directement liée à la masse de la planète, c'est-à-dire à la quantité de radioactivité naturelle présente : les petites planètes n'ont eu qu'une activité très faible et sont actuellement des astres « morts », alors qu'à l'opposé les corps très massifs sont encore actifs. (Cliché Venera 15/16).



Europe ♀

Ce satellite de Jupiter est entièrement recouvert d'une croûte de glace de 70 km d'épaisseur, qui a donc signification d'un « océan gelé ». La surface de cet océan est remarquablement lisse et brillante, et est affectée de tout un réseau de fractures d'origine encore énigmatique, bien qu'il soit probable que les « marées » y jouent un grand rôle. (Cliché Voyager/Nasa).



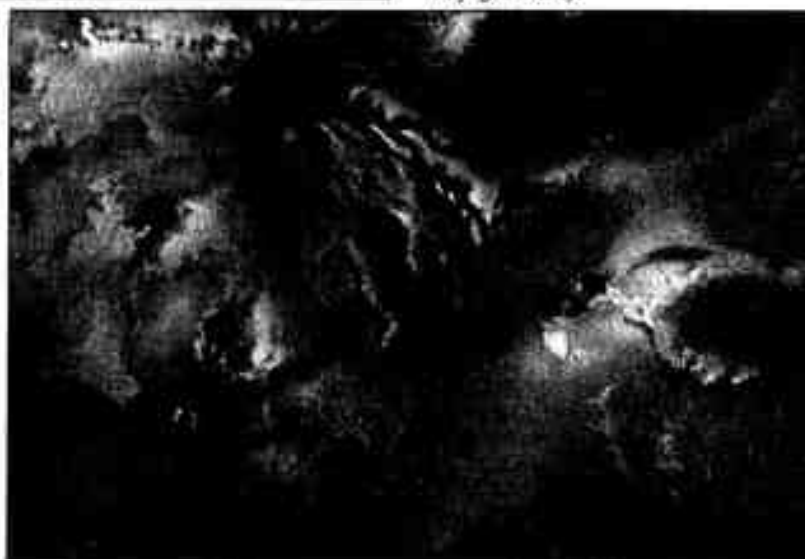
Mimas ♀

Petit satellite de Saturne (diamètre 390 km), c'est l'exemple typique d'un corps où il ne s'est rien passé, si ce n'est la chute de météorites, parfois très grosses, comme celle qui a formé le cratère Herschel visible près du terminateur. (Cliché Voyager/Nasa).



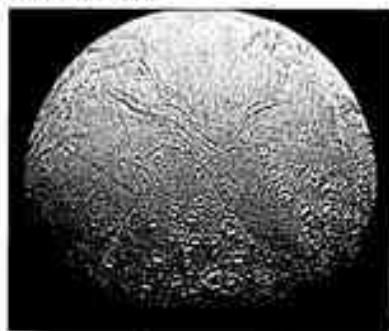
Io ♀

D'une masse voisine de celle de la Lune, Io devrait avoir une activité géologique aussi faible. Mais les interactions gravitationnelles avec Jupiter entraînent des « marées » et des déformations internes, sources de frictions et de chaleur, d'où un volcanisme hyperactif, très riche en produits soufrés, avec volcans géants, panaches éruptifs de plus de 200 km de haut. Ici, le volcan Ra patera. (Cliché Voyager/Nasa).



Encelade ♀

De même taille que Mimas, Encelade est pourtant complètement différent : il possède des terrains sans cratères, donc très jeunes, et des manifestations évidentes d'activités géologiques dont la source d'énergie et les modalités exactes restent encore à découvrir. (Cliché Voyager/Nasa).



► Ganymède ►

Cette vue du pôle Sud montre la morphologie très spéciale de nombreux satellites de glace, avec, en particulier, rides et sillons s'entrecroisant. Le mécanisme de formation de ces structures, inconnu, est un des objectifs de la mission Galileo. (Cliché Voyager/Nasa).

■ Pierre Thomas, professeur à l'École normale supérieure de Lyon, Unité « planétologie et pétrologie structurales » (URA 726 CNRS), Département des sciences de la Terre, 46, allée d'Italie, 69364 Lyon Cedex 07.

CNRS - AUDIOVISUEL

1, place Aristide Briand 92108 Meudon Cedex

MESURES SUR UN VOLCAN TRANQUILLE

Détermination de nombreuses caractéristiques géométriques et physiques sur le volcan du Piton de la Fournaise en septembre-octobre 1981.

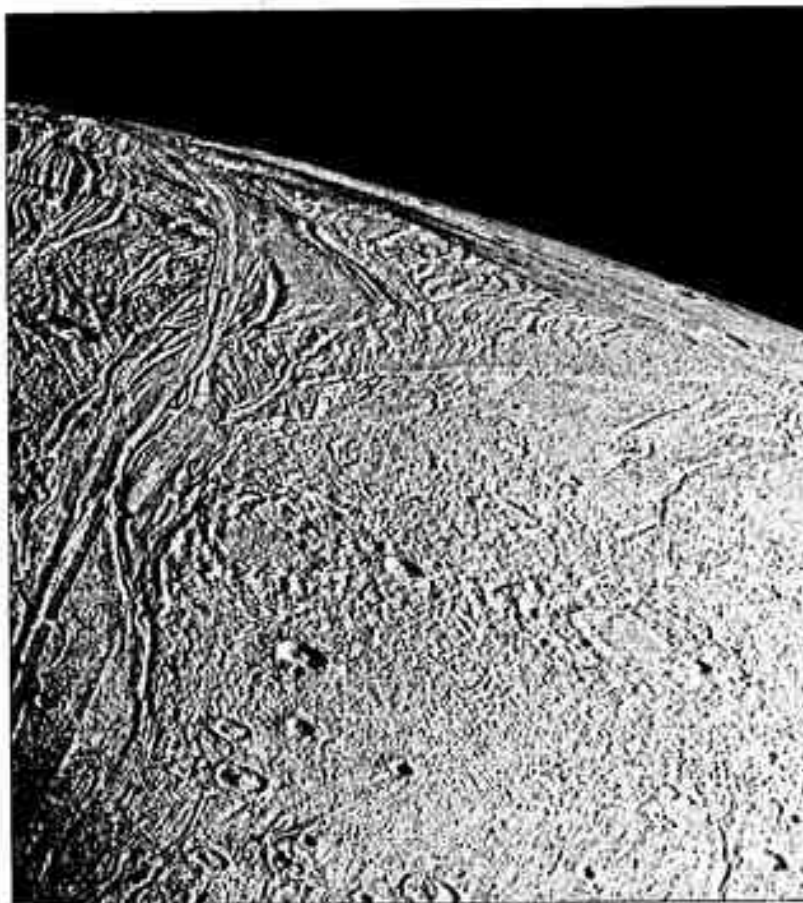
Auteur: Pierre-Antoine BLUM

Réalisateur: Jacques BRISSOT

Production: CNRS Audiovisuel

1981 - 30 minutes

Support: de diffusion: 16 mm
et vidéo 3/4"



Les nouvelles micrométéorites polaires

C'est dans la glace des calottes polaires que se trouvent les gisements les plus riches et les mieux préservés en micrométéorites non fondues, témoins des débuts du système solaire.

■ Michel Maurette, Claus Hammer, Michel Pourchet

Dès 1982, nous avons fait le pari de recueillir une nouvelle collection de poussières cosmiques qui n'auraient pas été fondues comme les sphérules lors de leur capture par la Terre, préservant ainsi certaines de leur caractéristiques primordiales essentielles pour reconstituer leur « fabrique » pri-

mitive dans le système solaire. Comme collecteur géant, nous avons choisi les glaces des grandes calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique qui présentent les avantages uniques d'être ultratropes et de préserver tout grain par congélation.

Trois expéditions (1984-1988) nous ont permis de montrer que les glaces polaires sont les mines de poussières cosmiques non fondues les plus riches et les mieux préservées actuellement connues. En

fondant 100 tonnes de glace antarctique, nous avons extrait 2 g de sédiments glaciaires de plus de 50 µm. Dans chaque milligramme de la fraction 50-100 µm, qui correspond au pic de la distribution en masse du flux de micrométéorites dans le milieu interplanétaire, on trouve près de cinquante grains cosmiques non fondus: cinq cents fois plus, par rapport au nombre de sphérules fondues, que dans les meilleures collectes antérieures de poussières cosmiques.

Seconde découverte: ces poussières

Newly discovered polar micrometeorites - Micrometeorites from polar regions represent a new and very diverse population of objects from the solar system. They are different from meteorites, very difficult to study, requiring sophisticated automated methods of analysis and new geochemical concepts.



Fig. 1 - Cette micrométéorite antarctique, de deux dixièmes de millimètre, est un agrégat composé de millions de grains minéraux. Un fragment de ce grain a montré de fortes concentrations en néon, dont la composition isotopique est très proche de celle du vent solaire.

cosmiques non fondues sont de vraies micrométéorites, et non pas des débris arrachés aux météorites lors de l'impact avec l'atmosphère terrestre.

On a comparé les nouvelles micrométéorites polaires aux vingt mille fragments de météorites déjà recueillis et au millier de micrométéorites très petites (dimensions voisines de 10 µm) collectées dans la stratosphère depuis 1975. On s'aperçoit qu'elles sont constituées d'un nouveau matériau de composition « chondritique » très difficile à caractériser, et qu'elles sont extraordinairement variées. Cette extrême diversité donne

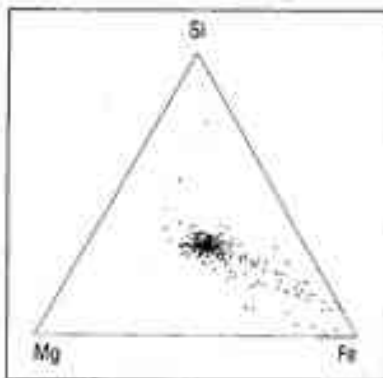


Fig. 2 - Une coupe ultramince de ce fragment de grain a été analysée par J. Bradley, avec un microscope analytique de 250 kV. Chaque point de ce diagramme correspond à l'analyse en mode automatique des concentrations en silicium, magnésium et fer dans un très petit volume (un millième de micron cube). La dispersion de 200 analyses donne une empreinte digitale très caractéristique du grain, qui permet de le comparer aux météorites et aux micrométéorites stratosphériques.

l'espoir de trouver de nouveaux objets du système solaire, tels que de nombreux grains de sable noir cométaire, très primitifs.

Peu de laboratoires disposent de techniques suffisamment sensibles pour

l'analyse de ces micrométéorites, qui doit s'effectuer dans un cadre international. Il est urgent de développer une automatisation très poussée (en collaboration avec G. Kurat) des techniques de caractérisation avant toute distribution de micrométéorites pour une analyse destructive.

En 1991-1992, nous effectuerons de nouvelles collectes en Antarctique. En particulier nous étudierons avec l'équipe de W. Cassidy le champ de glace bleue de « Lewis Clift » où l'on a observé une forte concentration de météorites. Nous vérifierons s'il y existe une couche superficielle de glace deux mille fois plus riche en micrométéorites non fondues que la glace de Cap-Pradhomme. On aurait alors trouvé une mine inépuisable de micrométéorites, facile à exploiter.

■ Michel Maurette, directeur de recherche au CNRS, Centre de spectrométrie nucléaire et de spectrométrie de masse du CNRS, (IN2P3 12), Bât. 108, 91406 Orsay.

■ Claus Hammer, professeur à l'Institut of Geophysics, University of Copenhagen, Høvelsgade 6, DK 2200 Copenhagen.

■ Michel Pourchat, ingénieur d'études au CNRS, Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement (UPR 5151 CNRS), Domaine universitaire, BP 96, 38402 St-Martin d'Hères Cedex.

Les prochaines missions planétaires

Un premier bilan de la géologie des planètes étant dressé, les efforts se concentrent maintenant sur l'exploration systématique de certaines d'entre elles.

■ Philippe Masson,
Georges Balmino

La phase de reconnaissance du système solaire est pratiquement terminée. Au cours de ces vingt-cinq années d'exploration presque systématique avec des sondes spatiales, l'homme a « découvert » les aspects inattendus des objets qui l'entourent. Seuls les astéroïdes et Pluton, la plus lointaine des planètes externes, n'ont encore fait l'objet d'aucune mission.

Maintenant commence une nouvelle phase, celle de l'exploration systématique de certaines planètes.

Les spécialistes des géosciences (géochimistes, géologues, géomorphologues, géophysiciens, etc.), qui ont participé au dépouillement des données des diverses expériences spatiales américaines et soviétiques, sont désormais en mesure de dresser un bilan provisoire de la géologie des planètes internes et de certains satellites des planètes externes. Ce bilan fait apparaître que la plupart des corps solides du système solaire ont

connu après leur formation une période de différenciation et une activité interne qui ont produit en surface des déformations structurales et des manifestations volcaniques. Cette évolution a eu une importance très variable selon les corps, et aujourd'hui, à l'exception de la Terre et de Io, aucun autre corps solide du système solaire ayant été observé par les missions spatiales ne semble être géologiquement actif, sauf peut-être Vénus.

Des questions encore nombreuses

Mais ce bilan est bien sûr très incomplet et soulève un grand nombre de questions relatives notamment à l'âge et à la composition des différentes roches formant les planètes internes, à la structure interne de ces planètes, aux mécanismes ayant engendré les structures tectoniques et le volcanisme (convection ?), à l'influence de la taille et de la place de chaque planète ou satellite dans le système solaire sur son évolution géologique, aux relations entre les proces- ▶

►sus de dégazages et la formation d'atmosphère planétaire, aux échanges entre la surface et l'atmosphère, au rôle de l'eau à la surface d'une planète telle que Mars et aux causes de sa disparition, à l'importance du bombardement météoritique dans l'évolution géologique primitive des planètes, etc. Apporter des réponses à ces questions permettra non seulement de mieux comprendre l'histoire de chaque objet du système solaire, mais aussi de compléter la connaissance de notre propre planète dont l'histoire primitive est à peu près inconnue. C'est pourquoi il faut aujourd'hui viser non plus à visiter systématiquement tous les objets du système solaire, mais à en explorer certains en détail.

Mieux connaître Mars et Vénus

L'exploration de Mars et Vénus promet d'être particulièrement fructueuse pour les géosciences. En effet, ces deux planètes présentent un certain nombre de similitudes géologiques avec la Terre : volcanisme, tectonique, processus d'érosion, présence possible d'eau dans le sous-sol martien.

Vénus, en raison des structures tectoniques importantes qui affectent sa surface, représente un objet privilégié pour les études comparées avec la tectonique terrestre.

La mission Magellan (NASA) accomplira à partir du mois d'août 1990 une « couverture » radar presque complète de sa surface qui permettra non seulement une étude systématique de la géomorphologie, mais aussi de la topographie, conduisant ainsi à contraindre les modèles de structure interne.

La mission Mars-Phobos (URSS, dix expériences françaises) aura, malgré sa fin prématurée, permis pour la première fois de cartographier par spectrométrie IR (expérience française ISM) certaines régions de la planète Mars et de caractériser ainsi la composition chimique des formations géologiques. En 1992, la mission américaine Mars-Observer permettra une étude systématique de la surface martienne par spectrométrie IR (expé-

The next planetary missions - Over the next twenty years, exploration of the solar system will concentrate on the study of the planet Mars. It should culminate in the return of samples at the end of this century or the beginning of the next, and the launching of a manned mission towards 2010-2020. In the meanwhile, other missions will have studied the geology of Venus and of the satellites of Jupiter and Saturn.

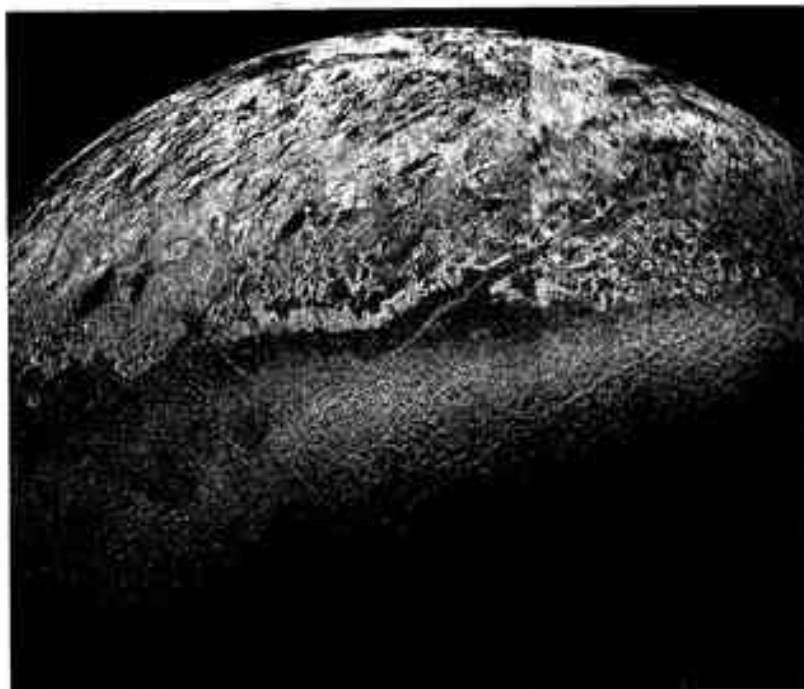


Fig. 1 - Photomontage de Triton, le plus gros satellite de Neptune, obtenue par la sonde Voyager II en août 1989 (Image NASA-JPL, collection Photothèque planétaire d'Orsay). Cette photomontage révèle le contraste qui existe entre les formations de l'hémisphère sud et le reste de la surface. Ce contraste peut être dû à des dépôts superficiels, à des projections localisées, (volcanisme actif ?) et au renouvellement de la glace de surface par des mécanismes convectifs (?). Les structures rectilignes qui affectent les terrains les plus sombres pourraient correspondre à des « ritts » (largeur moyenne 35 km).



Fig. 2 - Photomontage de Mars (image Viking, NASA-JPL, collection Photothèque planétaire d'Orsay). Cette photomontage présente quelques traits caractéristiques de la géomorphologie martienne, tels que les volcans géants (à gauche), et le canyon équatorial (au centre).



Fig. 3 - Dessin d'artiste montrant le concept d'un véhicule automatique se déplaçant à la surface de Mars.

rience franco-américaine OMEGA-VIMS), par imagerie à très haute résolution et par altimétrie laser. Cette mission sera le prélude à une campagne d'exploration de la surface qui sera d'abord réalisée par des ballons français (CNES) embarqués à bord de la mission Mars 94 (URSS), puis par un ou des véhicules automatiques (mission Mars 98). Les expériences faites au cours de ces missions auront pour but d'analyser sur place la composition des roches, d'étudier le champ magnétique, l'atmosphère, la structure interne, de rechercher la présence d'eau dans le sous-sol, et de préparer le retour ultérieur d'échantillons sur Terre. L'étude de la structure interne pourra être réalisée à l'aide de stations géophysiques formant un réseau à la surface de la planète.

L'exploration de la planète Mars devrait se poursuivre en 1998 avec une nouvelle mission soviétique, et aboutir à un retour d'échantillons sur Terre (vers les années 2000-2002) et, peut-être, à l'envoi d'une mission habitée sur cette planète (vers les années 2010-2020). Un programme aussi ambitieux (et coûteux) nécessitera sans aucun doute une coopération internationale qui s'est déjà instaurée entre la France (CNES) et l'URSS à l'occasion des missions vers Vénus (Véga) et vers Mars (Mars-Phobos et Mars 94), et qui se traduit également par la présence d'un certain nombre de chercheurs français dans les équipes américaines participant aux projets Magellan, Mars Observer, Galileo et Cassini.

La mission Galileo, lancée en octobre 1989 par la NASA, n'atteindra le système jovien qu'en 1995. Au cours de cette

mission qui devrait durer vingt mois, l'observation systématique de Jupiter et de ses satellites galiléens sera réalisée. Parmi ces satellites, dont les missions Voyager I et II ont révélé certains aspects particulièrement spectaculaires, tels que le volcanisme de Io et la tectonique des satellites de glace, Europe et Ganymède retiendront particulièrement l'attention des spécialistes des géosciences.

La mission Cassini est un projet commun ESA-NASA. A l'instar de la mission Galileo, elle devra réaliser une observation systématique de la planète Saturne et de ses satellites, en particulier Titan, dont l'état de surface est actuellement inconnu. Cette mission comportera notamment un radar qui permettra l'observation de la surface de Titan, et elle emportera également une sonde

européenne (Huygens) qui pénétrera dans l'atmosphère de ce dernier pour en atteindre la surface.

Ainsi l'exploration future du système solaire, à laquelle l'Europe et la France en particulier seront associées au travers de l'ESA et du CNES, promet d'être particulièrement riche en enseignements et en découvertes pour les géosciences.

Philippe Masson, professeur à l'Université Paris-Sud-Orsay, Unité « géophysique et géodynamique interne » (URA 1369 CNRS), Laboratoire de géologie dynamique interne, Bât. 509, 91405 Orsay Cedex.

Georges Balmino, chef de département de Géodésie terrestre et planétaire au Centre national d'études spatiales, Unité « dynamique terrestre et planétaire » (UPR 234 CNRS), Groupement de recherche en géodésie spatiale, Observatoire Midi-Pyrénées, 14, avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse Cedex.

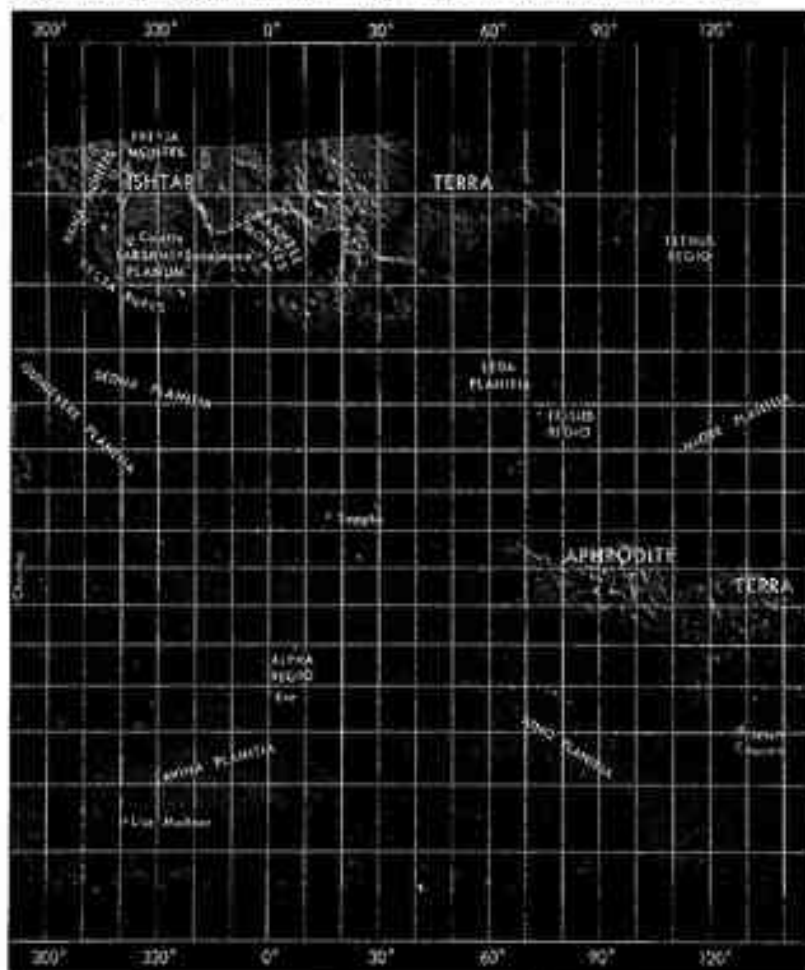


Fig. 4 - Extrait du planisphère topographique de Vénus établi d'après les données altimétriques de la sonde Pioneer Venus (document NASA-AMES, collection Photothèque planétaire d'Orsay). Sur cette carte, les zones hautes (quelques kilomètres au-dessus du niveau moyen de référence de la planète) sont représentées en teintes claires (vert, jaune) : elles correspondent à deux plateaux (Ishtar Terra, au nord ; Aphrodite Terra, à l'équateur). Le plateau d'Ishtar Terra supporte d'importants reliefs et est entouré par des structures tectoniques importantes.

Les molécules organiques interstellaires

Intimement mélangé aux argiles des météorites carbonées, un polymère organique enrichi en deutérium : est-il le fossile d'une molécule interstellaire ?

■ François Robert

Commencée il y a vingt ans, l'étude précise des compositions isotopiques des éléments légers (H, C, N, O) a fait naître l'espoir qu'il serait rapidement possible de comprendre les mécanismes essentiels de la formation du système solaire. Malheureusement les résultats de ces analyses débordent largement les prédictions scientifiques, même les plus fantaisistes, des années soixante. Les comportements de ces compositions isotopiques ne répondent à aucune loi connue dans les systèmes physiques ou chimiques, naturels ou expérimentaux. Il n'existe

aucune théorie satisfaisante qui puisse les unifier. Les sciences sont traditionnellement friandes de ces individus anormaux qui font échec à nos connaissances. Mais, dans le cas des météorites, c'est une véritable galerie de monstres qui a pris forme et, chaque année, la littérature scientifique nous apporte ses nouvelles mesures, toujours plus incompréhensibles. Dans cette ténébreuse isotopie, des progrès ont néanmoins été réalisés et font l'objet d'un consensus scientifique.

A partir de deux exemples classiques, l'hydrogène et l'oxygène, nous retracerons ces progrès et ces impasses, ces espoirs et ces déceptions.

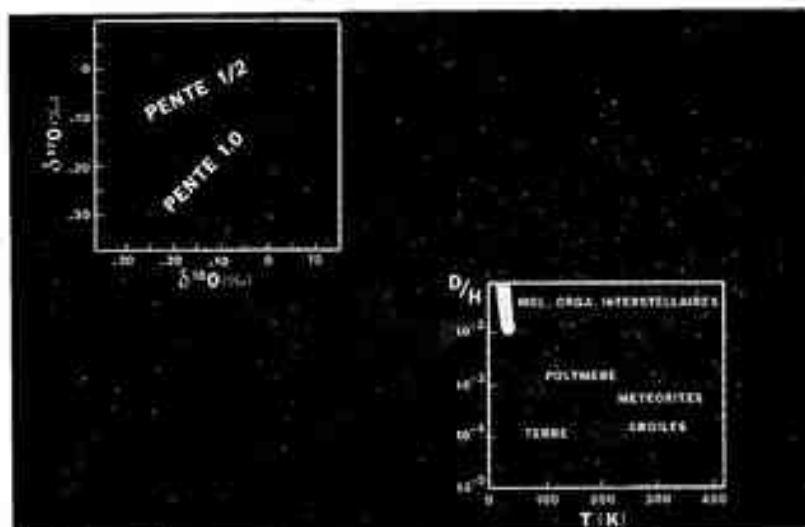


Fig. 1 - Deux exemples d'anomalie isotopique dans les météorites, sur fond de nuages interstellaires dans la galaxie.

1°) En haut à gauche, l'anomalie de l'oxygène : les variations des rapports $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ et $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ sont rapportées en pour mille (unités ‰) par rapport à une composition isotopique prise comme référence. Dans un tel diagramme, toutes les variations associées aux mécanismes physico-chimiques définissent une droite de pente 1/2. Cette anomalie a donc été interprétée comme une injection d'oxygène 16 , en provenance d'une supernova, dans le gaz où se condensent les planètes. Cette interprétation est aujourd'hui de plus en plus contestée.

2°) En bas à droite, l'anomalie en deutérium de l'hydrogène organique des météorites. La variation du rapport isotopique D/H est rapportée en fonction de la température des réactions ions-molécules. Ces réactions conduisent à la formation de molécules organiques dans les nuages interstellaires de la Galaxie dont on retrouve les vestiges dans le polymère des météorites carbonées. La valeur intermédiaire du rapport D/H sur Terre semble résulter de l'addition de molécules interstellaires.

L'hydrogène

Quelques éléments chimiques échappent à la nucléosynthèse stellaire. C'est le cas du deutérium (D), l'isotope lourd de l'hydrogène. Les conditions de synthèse de ce noyau ne sont jamais atteintes dans une étoile, et cet élément est engendré au moment de la formation de l'Univers (le big-bang). Depuis cette époque, le deutérium n'a cessé d'être brûlé dans les étoiles naissantes par la réaction $\text{D} + \text{H} \rightarrow {}^3\text{He}$. Au moment de la formation de notre système solaire, la composition isotopique (notée D/H) du gaz était voisine de celle du milieu interstellaire ($\text{D}/\text{H} = 2.10^{-5}$). Les planètes géantes, qui n'ont pas perdu leur atmosphère primitive, témoignent de cette abondance primordiale avec des rapports D/H dans leur haute atmosphère tout à fait comparables à ceux du milieu interstellaire.

Par contre, la matière organique contenue dans les météorites (chondrites) carbonées présente des rapports D/H voisins de 2.10^{-4} , soit un enrichissement d'un facteur 100 par rapport au milieu interstellaire. Or il existe aujourd'hui dans la galaxie des nuages moléculaires denses (Fig. 1), véritables pépinières d'étoiles où se déroule une organo-synthèse massive. Les molécules organiques s'y développent grâce aux réactions ions-molécules à basse température (100 K). A ces températures, les vitesses des réactions entre espèces isotopiques sont très différentes et ces molécules sont, tout comme leurs consœurs dans les météorites, enrichies en deutérium par des facteurs 100 à 1000. Cette synthèse organique interstellaire est le seul système connu qui puisse engendrer de tels enrichissements isotopiques. Le système solaire, à son origine, était donc lui aussi un nuage dense, riche en molécules organiques. Ce sont ces molécules qui ont été préservées dans les météorites.

Elles sont en association étroite avec des argiles qui peuvent représenter jusqu'à 60% des chondrites carbonées. Ces argiles, riches en eau, sont aussi

Interstellar organic molecules - Within galaxies are found clouds where the synthesis of organic molecules takes place on a massive scale. The solar system was formed from such a cloud, as the enrichment in deutérium of carbonaceous chondrites attests. On the other hand, the interpretation given to oxygen isotope anomalies in meteorites has been called into question by experimental observations, raising serious question marks.

enrichies en deutérium mais systématiquement moins que le polymère organique qu'elles contiennent. Dans le spectre des compositions isotopiques en hydrogène, la Terre occupe une place privilégiée : la composition isotopique de ses océans, le principal réservoir d'hydrogène de la planète, est plus riche en deutérium que les argiles des météorites, mais plus pauvre que le polymère insoluble des météorites. Faut-il en conclure que la Terre a été contaminée au cours de son histoire par une ou plusieurs injections de constituants organiques interstellaires ? C'est, jusqu'à présent, notre meilleure image de l'origine du rapport isotopique de l'hydrogène sur notre planète (Fig. 2).

L'oxygène

La détermination des deux rapports isotopiques de l'oxygène ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$) est à l'origine du concept d'« anomalie isotopique » (Fig. 1). Cet élément chimique, le plus abondant des planètes rocheuses du système solaire, n'est pas isotopiquement homogène : les variations en oxygène 16 dans les minéraux des météorites ne peuvent pas s'expliquer par des réactions physico-chimiques. Cet oxygène 16 aurait donc été injecté dans le système solaire en formation par une étoile dont l'explosion a contaminé le gaz solaire. L'anomalie de l'oxygène est souvent utilisée comme un traceur de l'origine du matériel extraterrestre. Par exemple, le polymère riche en deutérium renferme des compositions isotopiques « normales » en oxygène : il s'est donc synthétisé dans le gaz où se sont formés le Soleil et les planètes.

D'autres anomalies furent découvertes plus tard dans d'autres éléments chimiques comme celle du chrome (voir l'article de J.-L. Birek), mais celle de l'oxygène est restée l'argument central du modèle d'injection des produits nucléosynthétiques. Malheureusement, cette interprétation se porte de plus en plus mal : des effets isotopiques similaires ont été obtenus au cours de la synthèse de l'ozone dans un plasma d'oxygène moléculaire. L'origine physique de cet effet expérimental demeure une énigme pour la communauté scientifique tout entière. Certains y ont vu une limitation de la théorie canonique du fractionnement isotopique, élaborée il y a cinquante ans. Si c'est le cas, ce sont toutes les autres anomalies isotopiques qu'il faudra réexaminer à la lumière de cette violation théorique. Certaines de ces anomalies isotopiques ont-elles pu s'élaborer dans le système solaire en formation ? Quel est cet état de la matière que nous ne savons pas (encore) reproduire en laboratoire et qui

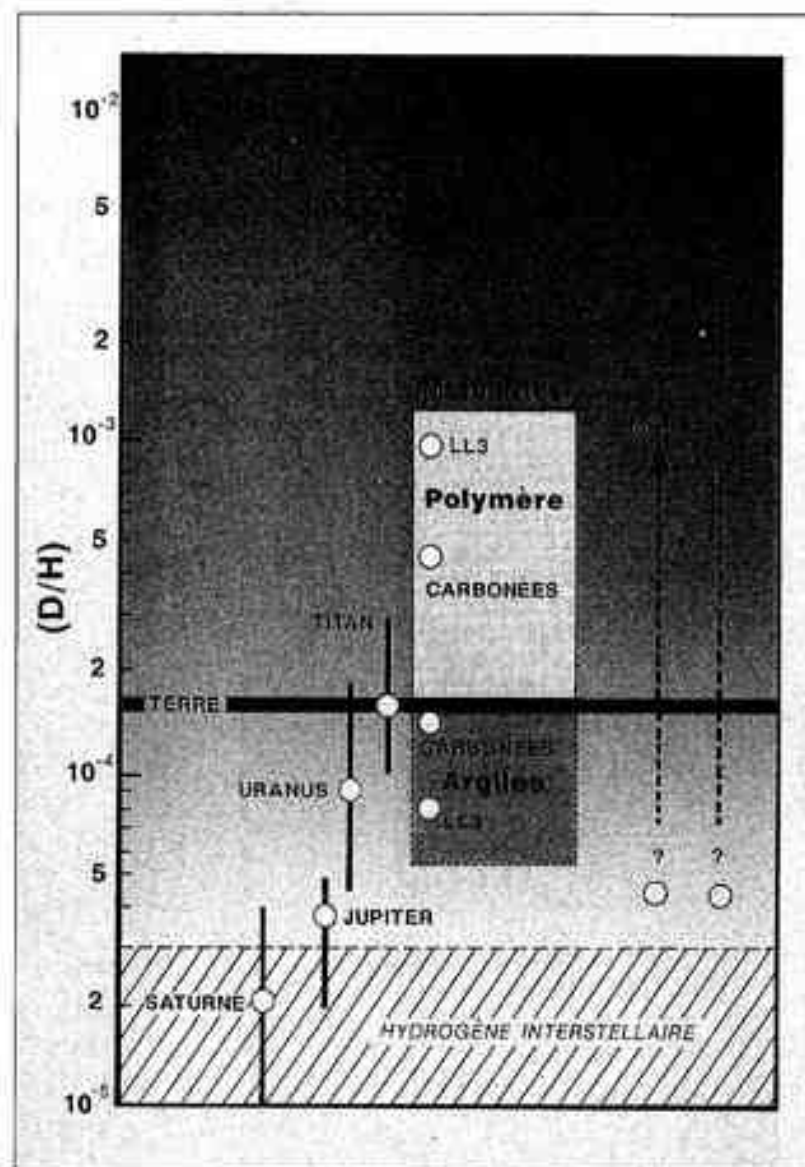


Fig. 2 - Si l'on dresse un bilan des rapports deutérium/hydrogène (D/H) dans le système solaire, on observe la position intermédiaire de la Terre : systématiquement plus riche en deutérium que les argiles des météorites mais plus pauvre que le polymère organique associé à ces argiles. La Terre a donc hérité de ces molécules organiques qui l'ont enrichie en deutérium. Le lien avec les conditions physico-chimiques dans les grands nuages de la Galaxie semble établi puisque de tels enrichissements isotopiques sont aussi observés dans les molécules organiques interstellaires (partie supérieure de la figure). Les planètes géantes (Jupiter et Saturne) qui n'ont pas perdu leur atmosphère primitive, conservent un rapport isotopique semblable à celui du milieu interstellaire moyen. Les compositions isotopiques initiales des planètes Vénus et Mars ne sont pas connues car leurs rapports D/H ont évolué au cours du temps par perte préférentielle dans l'espace (à partir de leur haute atmosphère) de H vis-à-vis de D. Titan (un satellite de Saturne) et Uranus, tous deux riches en eau, sont eux aussi enrichis en deutérium. (Dessin J. Dyon).

engendre des anomalies isotopiques ? A quoi finalement ressemblait le gaz où se condensaient les planètes rocheuses ? C'est un champ expérimental et théorique immense qui s'ouvre devant nous.

François Robert, chargé de recherche au CNRS, Laboratoire de géochimie et cosmochimie (URA 196 CNRS), Institut de Physique du globe, Université Paris VII, 2, place Jussieu, Tour 54-64, 1^{er} ét., 75251 Paris Cedex 05.

INDEX DES AUTEURS

Alharède Francis	50	Fleutot Luc	19	Meybeck Michel	75
Balmino Georges	115	Fontes Jean-Charles	82	Montagner Jean-Paul	9-13
Bard Pierre-Yves	69	Fritz Bertrand	67	Moriceau Christophe	19
Baronnet Alain	99	Gasse Françoise	82	Muller Jean-Pierre	101
Birck Jean-Louis	110	Gillet Philippe	89	Nahon Daniel	80
Blanc Gérard	37	Gruau Gérard	60	Nataf Henri-Claude	16
Boillot Gilbert	29	Guéguen Yves	87-92	Nguyen-Trung Chinh	101
Bottero Jean-Yves	102	Hammer Claus	114	Nicolas Adolphe	27
Bottings Yan	98	Hatzfeld Denis	70	Pagel Maurice	105
Boulègue Jacques	37	Herbillon Adrien	81	Perroud Hervé	39-52
Bourgeois Jacques	31	Huchon Philippe	22-31	Pichavant Michel	87-99
Brown William L.	91	Jaeger Jean-Jacques	61	Poupinet Georges	69
Brian Jean-Pierre	36	Jaoul Olivier	90	Pourchet Michel	114
Buffetaut Eric	39-51	Jaupart Claude	95	Rage Jean-Claude	51
Calas Georges	101	Juteau Thierry	26	Richet Pascal	98
Cases Jean-Maurice	102	Kornprobst Jacques	18	Ricou Luc-Emmanuel	54
Cazenave Anny	9-15	Lagabrielle Yves	22-26	Robardet Michel	52
Chaline Jean	64	Lancelot Yves	24	Robert François	118
Champenois Michel	95	Le Mouél Jean-Louis	11	Romanowicz Barbara	13
Chopin Christian	33	Le Pichon Xavier	6	Roux Jacques	99
Choukroune Pierre	30	Legendre Serge	63	Ruegg Jean-Claude	45
Clauer Norbert	48	Lemoine Marcel	43	Ruhlmann François	105
Cobbold Peter	93	Lénat Jean-François	71	Saïot Alain	79
Condomines Michel	96	Lewin Eric	58	Schott Jacques	103
Courtillot Vincent	56	Lorius Claude	83	Séguret Michel	47
Cuney Michel	34	Madon Michel	89	Souriau Marc	76
Darot Michel	92	Manceau Alain	102	Souriau-Thévenard Annie	12
Dercourt Jean	54	Mariotti André	78	Taponnier Paul	41
Doukhan Jean-Claude	91	Marsily (de) Ghislain	74	Tardy Marc	43
Dubessy Jean	101	Martin Hervé	59	Thomas Pierre	111
Dubois Jacques	73	Masson Philippe	115	Vasseur Guy	47
Duplessy Jean-Claude	85	Masarette Michel	114	Vidal Philippe	6-21
Dupré Bernard	58-108	Megnier Claude	34	Vielzeuf Daniel	33
Dupuy Claude	21	Mercier Jacques-Louis	46	Vincent Edith	67



AUX PRESSES DU CNRS

Quand la Terre tremble...

El Asnam, Mexico, Arménie, San Francisco...

Où se produisent les séismes et pourquoi ? A quel processus physique est-on confronté ? Qu'apportent les observations instrumentales et celles sur le terrain ? Les populations sont-elles objectivement informées ? Prévoir et prévenir les séismes, est-ce possible ?

Raoul Madariaga, Directeur du Laboratoire de sismologie de l'Institut de physique du Globe et **Guy Perrier**, Directeur du Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique de Grenoble répondent à toutes ces questions dans :

Tremblements de terre

Collection CNRS PLUS

16 x 24 - Ill. - 120 F



AUX EDITIONS DU CNRS

L'Erosion

sur les hautes terres du Lings

Mémoires et documents de géographie

Par Tatiana Muxart, Claude Cosandrey, Armelle Billard.

21 x 27 - 160 p. Ill. - 210 F

Variations des paléomilieus et peuplement préhistorique

Cahiers du quaternaire

Dir. Henri Laville

21 x 30 - 224 p. - 190 F

BON DE COMMANDE				
à retourner aux Presses du CNRS 20-22, rue Saint-Amand 75015 Paris				
Nom		Prénom		
Adresse				
Code postal		Commune		Pays
ISBN	TITRE DE L'OUVRAGE	PU	QTE	TOTAL
2-87682-049-8	Tremblements de terre	120 F		
2-222-04380-8	L'Erosion sur les hautes terres du Lings	210 F		
2-222-04263-1	Variations des paléomilieus et peuplement préhistorique	190 F		
Frais de port			Total	
pour un ouvrage : France 15 F - Etranger 25 F			Port	
ouvrages suivants : France 10 F - Etranger 20 F			Total	
Vous trouverez ci-joint mon règlement de F à l'ordre des Presses du CNRS				

Code 3042

