

# PLANÈTE TERRE : STRUCTURE, HISTOIRE ET ÉVOLUTION

MICHEL CARA  
*Président de la section  
et Rapporteur*

Rolando Armijo  
Jean-Luc Bouchez  
Patrick De Wever  
Max Deynoux  
Bernard Dupré  
Jean-François Karczewski  
Jacques Malod  
Eustratios Manoussis  
Jean Marcoux  
Georges Mascle  
René Maury  
Olivier Monod  
Christian Moreau  
Michel Moullade  
Hervé Perroud  
Christian Ravenne  
Jean-Patrick Respaut  
Bernard Reynier  
Etienne Ruellan  
Michel Villeneuve

Le regard et la compréhension que nous avons de la Terre se sont profondément modifiés au cours des vingt dernières années avec d'une part l'émergence d'un modèle global de la dynamique actuelle, et d'autre part le développement d'un modèle de formation et d'évolution de la Terre depuis 4,5 milliards d'années. Parallèlement à l'apparition de ces modèles globaux, de très importants progrès méthodologiques et instrumentaux ont été réalisés au niveau des différentes disciplines des Sciences de la Terre.

Cette vision globale du fonctionnement de notre planète, de même que la mise en évidence des très nombreux couplages entre les différents réservoirs et enveloppes, ont profondément modifié les méthodes des Sciences de la Terre. Les études multidisciplinaires se sont généralisées, et le fait d'insérer systématiquement un objet d'étude dans un cadre interprétatif global est devenu la règle.

A cette phase de développement, sans doute sans précédent dans l'histoire des Sciences de la Terre, succède une phase où la société sollicite de plus en plus la communauté des chercheurs. Celle-ci se doit de redéfinir certains de ses champs d'investigation, notamment dans le domaine de l'environnement avec les risques naturels et les pollutions d'origine anthropique. Par ailleurs, le savoir-faire des chercheurs en Sciences de la Terre les conduit naturellement à participer activement aux recherches en planétologie.

C'est dans ce contexte général, une semaine après le colloque en prospective en Sciences de la Terre organisé à Poitiers par l'INSU, que la section 11 a entrepris son analyse de conjoncture et esquissé quelques éléments de prospective. Ce travail a été accompli en essayant de :

- cerner des champs d'actions porteurs pour les années à venir ;
- redéfinir une partie du champ d'activité de nos disciplines ;
- insister sur le fait qu'il n'y a pas de recherche valable sans une excellente maîtrise des outils propres à chaque discipline, tant sur le plan instrumental que méthodologique.

Les "champs de recherche porteurs" font l'objet de la première partie du rapport. Nous définissons ceux-ci comme étant actuellement au centre de préoccupations majeures de la communauté scientifique internationale avec déjà une forte participation des équipes françaises. Une deuxième partie est consacrée aux "champs de recherche à affirmer". Il s'agit là de domaines d'actualité, à impacts socio-économiques certains, où les laboratoires en Sciences de la Terre disposent d'atouts considérables, mais qui n'ont jusqu'à présent donné lieu qu'à des investissements modestes des équipes de recherche. Une troisième partie du rapport concerne les développements méthodologiques et instrumentaux indispensables au développement de la recherche.

Une quatrième partie du rapport enfin est un constat : les développements à venir reposeront avant tout sur la qualité et la compétence des personnels engagés dans l'effort de recherche. La section 11 du Comité National est très préoccupée par les sérieux risques de pertes de compétence, notamment en géologie de terrain, voire de disparition de "métiers", dans certains domaines des Sciences de la Terre. Réussir la gestion des ressources humaines, tant en matière d'emplois de chercheurs que d'ingénieurs, est un enjeu majeur des années à venir.

Pour clore cette introduction, risquons une remarque sur le problème de la préservation du patrimoine scientifique en Sciences de la Terre : si ce problème concerne bon nombre de données géologiques, géophysiques ou géochimiques, il est particulièrement sensible pour certaines collections

géologiques anciennes. Or, outre la mémoire de notre communauté, ces collections constituent une référence essentielle pour de nombreux axes de recherche actuels et futurs. Leurs conditions de préservation et d'accès sont souvent déplorables. Il faut – hors préoccupations muséologiques – dégager des moyens afin de préserver et de rendre accessible ce patrimoine scientifique irremplaçable.

## **1 - CHAMPS DE RECHERCHE PORTEURS**

### **1. 1 CYCLES INTERNES ET STRUCTURE DE LA PLANÈTE**

#### **Dynamique interne de la planète, du noyau à la lithosphère**

La "Terre profonde", depuis la base de la lithosphère jusqu'au centre de la Terre, est un vaste champ d'investigation en géosciences. Les résultats obtenus dans ce domaine conditionnent par bien des aspects notre compréhension des processus actifs au niveau de la lithosphère et à sa surface. Si, dans leurs grandes lignes, la structure interne de la planète, de même que la composition chimique et l'état physique des matériaux profonds, sont relativement bien connus, la dynamique interne du noyau et du manteau, les paramètres physiques qui les conditionnent, les échelles de temps en jeu et les processus de couplages entre les grandes enveloppes à travers les discontinuités chimiques ou les zones de transition de phase physique restent l'objet d'intenses spéculations. Toute nouvelle information, que ce soit en matière d'imagerie géophysique, de physique H.P./H.T. des matériaux profonds, de données thermo-barométriques sur les xénolithes du manteau ou de chronologie fine des inversions du champ magnétique, pose ou repose de grandes questions sur la dynamique des profondeurs de la Terre.

Mais d'abord, plus près de la surface, sait-on bien définir la lithosphère sous les continents ? Contrairement aux océans, la zone de moindre vitesse sismique y est floue. L'épaisseur "élastique" de la lithosphère ainsi que sa signification y est moins évidente que sous les océans. En fait, l'analyse conjointe de données pétrologiques, gravimétriques et sismiques n'a pas permis, jusqu'à présent, de définir de façon précise la lithosphère continentale. Bien des questions, touchant par exemple à la compréhension de la topographie des régions continentales, restent des énigmes. Les approches intégrées, toujours difficiles, sont trop rares en géophysique. Dans ce domaine, comme dans d'autres en Sciences de la Terre, des approches globales tenant compte de l'ensemble des informations disponibles sont indispensables.

La liste des problèmes non résolus en matière de structure et de dynamique de la Terre profonde est longue. On peut, à titre d'exemple, reprendre une énumération de questions soulevées au cours du récent colloque de prospective de Poitiers (rapport de V. Courtillot) :

*“ La graine solide joue-t-elle un rôle dans la géométrie du champ magnétique et le déroulement des inversions ? Le fer liquide du noyau pénètre-t-il la couche D” du manteau inférieur, cette couche apparemment si hétérogène qu'elle serait une sorte de miroir de la lithosphère à la géométrie mouvante et complexe ? Quelle est donc la viscosité du manteau ? La convection s'y déroule-t-elle à une ou deux couches, est-elle intermittente ? Les profondes racines de la lithosphère continentale isolent-elles de vastes régions du manteau inférieur géochimiquement distinctes ? Quelle est la profondeur exacte des racines sous les continents ? Comment se font les échanges entre les réservoirs mantelliques subocéaniques ? Ceci met aussi en relief l'importance de la zone de transition et des couplages qui s'exercent depuis le fond du manteau jusqu'en surface. La dynamique globale du manteau met en compétition le rôle majeur des plaques plongeantes, injection vers le bas de matière froide à deux dimensions, et celui des panaches, injection vers le haut de matière chaude à une dimension. Ces derniers sont-ils le “retour” des zones de subduction ? Y en a-t-il plusieurs types en provenance de profondeurs différentes ? L'échelle de temps et l'éventuelle intermittence de ces phéno-*

*mènes dynamiques ne sont-elles pas très différentes ? ”.* Répondre à ces questions nécessite, outre des progrès en matière de moyens de modélisation numérique, un effort accru en matière d'observatoires géophysiques de qualité bien répartis à la surface de la planète – objet d'une intense coopération internationale. Dans ce domaine, il reste un grand problème non résolu : celui de l'observation géophysique permanente au fond des océans.

## **Déformations actuelles et forces dans la lithosphère continentale**

Grâce aux observations de terrain couplées avec les nouvelles techniques d'observation spatiales (en particulier SPOT, GPS, SLR), on peut maintenant étudier dans le détail les structures, en particulier les failles, et la cinématique de la déformation continentale. Un problème important à résoudre est de déterminer le degré et les modalités de localisation de la déformation à l'échelle de la croûte et de la lithosphère sous-crustale, afin de comprendre le fonctionnement et la croissance des failles et des réseaux. Un exemple est la propagation, sur des centaines ou des milliers de kilomètres et pendant des millions d'années, des failles lithosphériques. A cette échelle, on peut désormais mieux contraindre la mécanique des processus et caractériser comment sont absorbées les composantes récupérables (élastiques) et permanentes (plastiques) de la déformation. On peut aussi quantifier les différentes forces en jeu (forces de volume, forces aux frontières) et générer des modèles mécaniques raisonnables. Un autre aspect du problème est l'étagement de la déformation en profondeur. Il est crucial de déterminer la rhéologie et le rôle de la croûte inférieure, son degré de couplage avec les niveaux plus résistants de la croûte supérieure et du manteau lithosphérique. Cet étagement intervient probablement dans la formation des réseaux de failles. Il intervient aussi dans la formation des reliefs et leur compensation isostatique, en particulier des hauts plateaux

## **Histoire et évolution de la lithosphère**

Les Sciences de la Terre se préoccupent naturellement de l'histoire de la lithosphère. Il s'agit sur-

tout, mais pas exclusivement, de la lithosphère continentale. L'aspect chronologique met en œuvre les datations relatives et les techniques de datations isotopiques. Dans ce domaine, on sait (mais on oublie parfois) que la date n'est pas nécessairement l'âge, et l'âge de quoi ? Il y a encore des progrès à accomplir en méthodologie, mais à l'inverse, certaines techniques robustes permettent maintenant d'étudier l'évolution dans le temps d'un phénomène bien repéré dans l'espace (progression d'un magmatisme, d'une onde de chaleur...), en liaison avec une tectonique. Celle-ci, même vieille de plusieurs centaines de millions d'années, devient vivante, et peut être décodée grâce à l'exemple actuel de la tectonique des plaques. Ainsi, reconstituer l'histoire de la lithosphère nécessite plus de datations, et des dates mieux comprises.

Ces datations permettent de s'attaquer, non seulement à la reconstitution historique des orogènes récents, encore visibles (Alpes, Himalaya, Sierra Nevada...), mais aussi aux plus anciens, en particulier l'immense chaîne panafricaine, du Brésil au Hoggar et de l'Antarctique à l'Inde en passant par Madagascar et le Mozambique, scellant le supercontinent d'il y a 600 Ma. Mais aussi le Protérozoïque moyen et inférieur, bien représenté en Afrique, et le mythique Archéen (> 2,7 Ga), dont le comportement rhéologique est loin d'être compris, sans parler de la Terre Primitive de 4,6 à 3,8 Ga. La reconstitution historique, mais aussi géométrique, cinématique et dynamique, des terrains de la planète entre dans le domaine traditionnel de la section 11. L'application de concepts renouvelés, et d'outils toujours plus fins et sophistiqués, font que la communauté française dans ce domaine vivant est à un niveau d'excellence sur le plan international. Compte tenu des implications économiques pour l'avenir, en liaison avec les pays potentiellement producteurs de ressources minérales, la présence de nos équipes sur le terrain se doit d'être maintenue sinon renforcée.

Étudier l'évolution de la lithosphère, c'est-à-dire de la couche terrestre rigide, nécessite de mieux maîtriser les aspects thermo-mécaniques et leur évolution dans le temps et dans l'espace. Les thermo-baromètres et l'âge des couples (P, T) déterminés aboutissent à modéliser non seulement la distribution et l'évolution des isothermes de la litho-

sphère, et donc encore son histoire, mais aussi sa rhéologie. Les comportements mécaniques des ensembles rocheux de haute température, anhydres et relativement rigides au niveau des contraintes lithosphériques existantes, ou au contraire affaiblis mécaniquement en présence de fluides, souvent en liaison avec une fusion partielle, méritent d'être mieux connus. En particulier, les études sur les structures internes de ces ensembles (microstructures et anisotropies cristallines), sur le rôle des fluides dans leur déformation et/ou transformation, l'expérimentation de leur comportement, continuent à être d'actualité.

Des questions comme la localisation de la déformation lithosphérique, la nature stratifiée ou dynamiquement litée de la croûte continentale inférieure, les mécanismes et les vitesses d'exhumation des roches profondes, et la topographie du Moho à la base de cette croûte, restent ouvertes et fortement disputées internationalement. Les modèles thermomécaniques et dynamiques à appliquer aux matériaux lithosphériques seront alors mieux contraints, et les orogènes mieux compris.

Les approches précédentes, qu'il faut renforcer, doivent avancer en tandem avec les études géochimiques en roches (traces et isotopes) déjà largement développées. Ces dernières, en distinguant des sources et fournissant un classement génétique, apportent des arguments décisifs sur les recyclages et les contextes géodynamiques concernés.

## Transferts magmatiques

Le magmatisme joue un rôle majeur dans les transferts de matière et d'énergie à l'échelle planétaire, du manteau à la croûte, mais aussi à l'atmosphère (émissions de gaz et de cendres volcaniques) et à l'hydrosphère (hydrothermalisme océanique). La définition et la caractérisation pétrologique et géochimique des séries magmatiques et de leurs processus d'évolution ont beaucoup progressé au cours des dix dernières années ; il paraît maintenant nécessaire de mettre l'accent sur le contrôle temporel des phénomènes pétrogénétiques, en particulier en couplant l'acquisition des données géochimiques (éléments majeurs et en traces, isotopes) et structurales (microstructures,

anisotropies) avec celle de données géochronologiques de qualité.

Par ailleurs, un effort considérable demeure à faire pour contraindre la nature et la composition des sources mantelliques ou crustales des magmas, préalable indispensable à l'évaluation quantitative des transferts de matière dus au magmatisme actuel et passé, dans le processus de croissance continentale par exemple. La connaissance des sources mantelliques des magmas océaniques doit, quant à elle, évoluer de la mise en évidence de pôles isotopiques extrêmes à celle de la caractérisation des matériaux correspondants et de leur(s) échelle(s) d'hétérogénéité. De même, les modalités des transferts de matière des plaques océaniques au manteau des zones de subduction, longtemps considérées comme reflétant la mobilité de fluides hydratés, doivent être réexaminées dans l'optique de la migration de magmas issus de la fusion de la croûte océanique. Enfin, on manque cruellement de données sur la composition et l'hétérogénéité de la croûte continentale inférieure, dont le rôle de source possible de magmas ou de contaminant des magmas mantelliques s'avère de plus en plus évident. Toutes ces directions de recherches devraient conduire à des progrès considérables par une approche conjointe de cas naturels (menées en particulier à l'aide des techniques d'analyse géochimiques *in situ* en cours de développement), de travaux expérimentaux et de modélisation thermodynamique des interactions solides-liquides.

## 1. 2 CYCLES EXTERNES ET ÉVOLUTION DE LA SURFACE DE LA PLANÈTE

### Le message sédimentaire

Le message sédimentaire constitue :

- le seul enregistrement détaillé de l'histoire du système Terre depuis 600 Ma et au-delà ;
- le témoin de nombreux processus physico-chimiques actifs dans les enveloppes externes ;
- le seul enregistrement de la biodiversité ;
- le support principal des activités anthropogéniques.

Pendant plus de 100 ans, le message sédimentaire s'est limité aux aspects essentiellement descriptifs de la sédimentologie et de la stratigraphie. Dans les années 70, avec le développement de la sédimentologie de faciès et la modélisation des environnements de dépôt, les recherches se sont orientées davantage vers les processus qualitatifs, voire quantitatifs. Mais ce n'est qu'avec les années 80-90, grâce à l'émergence des concepts de la stratigraphie séquentielle, paradigme unificateur en sciences de la Terre, que sont apparus la notion de fonctions forçantes et le début de l'élaboration des lois de modélisation marquant le véritable passage du qualitatif au quantitatif.

La stratigraphie séquentielle est un outil de corrélation dont le pouvoir de résolution est bien supérieur à ce que l'on pouvait atteindre jusque-là. Elle fournit les cadres chronostratigraphiques et paléoenvironnementaux ainsi qu'un modèle d'enchaînement de cycles superposés ou emboîtés selon des longueurs d'onde variables. Le message sédimentaire, une fois décrypté, est le seul capable de fournir les éléments indispensables à l'évolution des disciplines travaillant avec le support sédimentaire. Ces cadres et ce modèle sont l'ébauche incontournable des résultats attendus par les études pluridisciplinaires.

Dans le contexte international, la communauté française, nombreuse mais dispersée, occupe une position honorable dans le développement des méthodes de déchiffrement du message sédimentaire. Elle a intégré, utilisé et développé, les nouveaux concepts. Elle fait preuve depuis quelques années d'un dynamisme exprimé par quelques nouveaux recrutements (tant académiques qu'industriels), des collaborations internationales de plus en plus suivies, et par un effort d'animation scientifique (ASF, ateliers, écoles d'été, publications, etc.).

Le but de l'étude du message sédimentaire est de fournir les bases nécessaires à la reconstitution de l'histoire sédimentaire des enveloppes externes de la Terre, de son évolution, voire de son futur. Pour cela il faut :

- déchiffrer le message sédimentaire du plus simple vers le plus complexe par :

- l'étude des enveloppes (surfaces) et du contenu des unités individuelles (corps sédimentaires) ;
- le décryptage des différents signaux de nature sédimentologique, tectonique, géochimique, minéralogique, paléontologique, géomorphologique et de leur cause tectonique, eustatique, climatique... en tenant compte des effets de filtre les affectant (fonctions de transferts) ;
- l'étude du couplage et de l'interaction des différents signaux (tectonique-sédimentation / climat-sédimentation / interne-externe / biologie-sédimentologie, ...) aux différentes échelles de temps et d'espace (différentes longueurs d'ondes, "cycles" – fonction continue, "accidents" – fonction discontinue) ;

- obtenir les lois (déterministes, prédictives) qualitatives et quantitatives régissant l'enregistrement sédimentaire avec modélisations qualitatives et quantitatives 3D et 4D, utilisant les fonctions individuelles et leurs interactions.

Une bonne lecture du message sédimentaire passe donc obligatoirement par une itération pluridisciplinaire qui réponde aux besoins essentiels, à savoir :

- l'analyse tridimensionnelle et multi-échelle des sédiments ;
- la mesure du temps ;
- l'évaluation des paléoaltitudes et des paléobathymétries ;
- la compréhension et l'utilisation des traceurs biologiques ou géochimiques.

S'agissant de la compréhension de l'enveloppe terrestre en tant que support de la vie, l'impact du message sédimentaire dans ces aspects qualitatifs et quantitatifs est évident sur :

- la protection de l'environnement ;
- la compréhension et la prévision des risques naturels ;
- la gestion/prédiction des ressources en eau et des ressources minérales par une meilleure connaissance des potentialités réservoirs (circulations fluides dans les bassins, minéralogie et compaction, diagenèse).

## **Couplage interne-externe, tectonique et sédimentation**

Un des enjeux majeurs est l'étude des interactions entre les mouvements d'origine profonde – aux diverses longueurs d'onde – et les formations de surface (formation, déformation et remplissage des bassins sédimentaires). Ce couplage interne-externe se manifeste par des processus continus et discontinus dont il convient d'établir les enchaînements et évolutions aux diverses échelles de temps et d'espace. Pour cela, il faut préciser et décrypter les relations entre la dynamique des enveloppes externes et la sédimentation, et conjointement celles existant entre les enveloppes externes et la géodynamique interne. Il faut aussi mesurer les délais de réponse du message sédimentaire aux différentes causes, et réciproquement le délai de réponse de la lithosphère/asthénosphère aux modifications de l'environnement sédimentaire (dépôt/érosion).

Cette démarche se retrouve dans les thèmes suivants qui constituent autant de sujets de recherche porteurs :

- Évaluation des vitesses de déformation, notamment sur des bases stratigraphiques, connexions interne-externe – relations entre processus continus et discontinus.
- Bilans érosion/transport/dépôt (flux) – restauration des épaisseurs érodées.
- Relations entre morphologie et facteurs climatiques ou tectoniques (morphodynamique).

## **La mesure du temps, cycles et crises**

Les sédiments enregistrent les effets de diverses fonctions forçantes (tectonique, eustatisme, climat, ...) dont certaines sont continues et d'autres discontinues, sur différentes échelles de temps.

L'enregistrement sédimentaire est discontinu (formation des séquences sédimentaires, migration dans l'espace, condensation, érosion des dépôts). Ainsi le temps, continu par nature, ne peut être appréhendé que de façon discontinue puisque le temps physiquement enregistré reste le seul accessible. Chaque fonction forçante intervient à des échelles temps différentes : de 100 ans à 800 ka pour les effets climatiques (Milankovitch), de n

années à  $n \times 10$  Ma pour la tectonique. Certaines fonctions (eustatisme-climat, tectonique pour partie), se présentent sous forme de cycles de différentes amplitudes et longueurs d'onde, interrompus par des accidents qui modifient l'enregistrement et peuvent lui donner un aspect chaotique.

Si les séquences "classiques" correspondant aux étages et sous-étages sont bien connues, la stratigraphie à haute résolution permet de différencier des séquences de durée moindre (quelques  $10^2$  à  $10^5$  ans). La déconvolution des signaux contenus dans le message sédimentaire permet de séparer ce qui est du ressort de phénomènes cycliques de ce qui dépend de phénomènes accidentels (ruptures/crises versus évolution continue). Elle requiert une mesure très précise du temps, tant absolue que relative. Elle nécessite donc le développement des méthodes radiochronologiques et un raffinement des biozones. Seule cette mesure très précise du temps fera avancer la connaissance de l'évolution et des crises qui marquent la planète et la biosphère.

## La biodiversité

La connaissance de la biodiversité – avec son corollaire historique, la paléobiodiversité – est une question d'actualité depuis le congrès des hommes d'États de Rio de Janeiro (1992). Les archives fossiles montrent que l'histoire de la biosphère apparaît comme une succession de biodiversités qui se sont relayées, réagissant aux changements de la géosphère. Le terme de "biodiversité" recouvre un véritable renouveau conceptuel et méthodologique de l'approche du phénomène "évolution".

Cette connaissance de la biodiversité passe par une reconstitution des phylogénèses, en établissant notamment les relations de parentés indépendamment des processus qui les ont sous-tendues (démarche dite "cladistique"). Elle passe aussi par l'identification des phénomènes qui participent à la régulation à grande échelle des biodiversités. Les rythmes d'apparition et d'extinction des taxons doivent être analysés au travers des périodes de crises et des phases de reconquête ayant affecté la biosphère. La recherche des contraintes de l'environnement qui, enregistrées dans les séquences sédimentaires, régissent la dynamique de l'évolution,

demeure un complément nécessaire pour intégrer les changements de biodiversité au remodelage des couches externes du globe.

## 2 - CHAMPS DE RECHERCHE À AFFIRMER EN GÉOSCIENCES

### Géomorphologie et risques naturels

Si, de longue date, une partie importante des recherches sur les risques naturels concerne la communauté des Sciences de la "Terre solide" (risques volcaniques et sismiques), cela n'a été que marginalement le cas pour les risques dits "géomorphologiques" comme les glissements de terrain. En France, la "Géomorphologie" est généralement considérée comme une discipline transversale dont l'objectif est de décrire et expliquer, sous tous ses aspects, la forme des paysages. Avec cette définition, un grand nombre de spécialités, y compris les Sciences Humaines, sont évidemment concernées.

En fait, hormis les effets liés à l'activité anthropique, la morphologie de la surface de la Terre est façonnée par la dynamique interne de la planète (tectonique, volcanisme, eustatisme d'origine interne – relevant de la section 11 du Comité National) et sa dynamique externe (érosion, climats – relevant de la section 12). Toute recherche géomorphologique nécessite également une prise en compte correcte des échelles de temps et d'espace. Les Sciences de la Terre ont un rôle central à jouer dans ce domaine. Sont concernées : la sédimentologie (cf. "le message sédimentaire"); la géochimie (datations, processus d'altération et interactions eau-roches) ; la volcanologie ; la tectonique et la sismotectonique ; la géodésie, avec notamment les apports récents des techniques spatiales ; et enfin la gravimétrie. Au plan international, les recherches en géomorphologie sont à un tournant avec la généralisation de l'approche quantitative et le développement de modèles intégrant l'ensemble des fonctions forçantes. Pour les Sciences de la Terre,

un signal morphologique bien interprété peut devenir à son tour une donnée fondamentale pour étudier des processus d'origine interne, comme la déformation crustale et la genèse des reliefs. Une meilleure prise en compte des problématiques de géomorphologie par la communauté française des Sciences de la Terre est indispensable dans les années à venir.

Concernant les études de terrain, les chercheurs en Sciences de la Terre disposent d'une expérience précieuse. Depuis plusieurs années, une démarche clef pour l'étude des risques volcaniques et sismiques consiste à étudier, de façon systématique, des sites choisis au plan mondial non seulement pour leur intérêt scientifique propre, mais aussi pour leur fort potentiel de risque. Il s'agit là d'une démarche essentielle pour mieux comprendre les mécanismes fondamentaux de déclenchement des catastrophes naturelles et contribuer à en amoindrir les effets. Ces recherches concernent le Programme National sur les Risques Naturels pour lequel les chercheurs rattachés aux sections 11, 12 et 13 du Comité National jouent un rôle clef.

## **Environnement et risques de nature anthropique**

Parmi les risques de nature anthropique, les problèmes de stockage de déchets est l'un des problèmes majeurs de la fin du siècle pour lequel les laboratoires de recherche en Sciences de la Terre sont de plus en plus sollicités.

Le stockage des déchets radioactifs en formations géologiques profondes ouvre un vaste champ de recherches qui concerne directement de nombreux laboratoires en Géosciences. L'entreposage en surface ou en subsurface et la recherche de nouvelles matrices de confinement intéresse également plusieurs laboratoires en Géosciences pour les aspects "nouvelles matrices" (obsidiennes, apatite, monazite, néphéline, sphène, zirconolite, zircon, etc.).

Par ailleurs, les problèmes environnementaux liés au stockage souterrain de tous les types de déchets industriels, aux injections de fluides, et, d'une façon générale, à l'exploitation des réservoirs d'hydrocarbures, sont des domaines où de nom-

breux laboratoires en Sciences de la Terre sont amenés à investir dans les années à venir.

## **Planétologie**

Ce n'est pas trop s'éloigner de la Terre que de dire que la communauté des chercheurs relevant de la section 11 est également partie prenante dans la Planétologie comparée. Avec les données qui affluent déjà de la Lune (Clémentine), et qui vont affluer de Mars (Mars 96, MGS96), trop peu de laboratoires des Sciences de la Terre appliquent encore leur savoir-faire en géophysique au domaine de la planétologie. Plusieurs d'entre eux pourraient apporter beaucoup, dans le domaine de l'analyse spectrale par exemple. En matière de géomorphologie comparées, une autre richesse d'investigation s'ouvre sur les processus façonnant la forme de la surface des planètes. Enfin, en matière de formation et d'évolution de la Terre primitive, les équipes de géochimie disposent d'une expérience irremplaçable pour conduire certaines recherches en planétologie.

## **3 - DÉVELOPPEMENTS MÉTHODOLOGIQUES ET INSTRUMENTAUX**

Il n'y a pas de bonne science sans parfaite maîtrise des outils utilisés et participation des chercheurs à leur développement. Que ce soit sur le plan instrumental ou méthodologique, l'histoire des vingt dernières années montre que l'essentiel des progrès accomplis sur la connaissance de notre planète a été lié au développement et à l'utilisation pertinente de nouveaux outils. Comme, d'une part, il n'y a pas de bonne mesure sans compréhension profonde de la physique de la mesure et que, d'autre part, une mesure se doit d'être conçue dans le cadre d'une problématique précise (tests de modèles, recherche de données décisives pour comprendre le fonctionnement d'un système...), ce serait une grave erreur que de restreindre certaines sous-disciplines des Sciences de la Terre au simple rôle de pourvoyeur de données.



Parmi les différents champs d'investigations méthodologiques et instrumentales, les exemples qui suivent sont potentiellement porteurs d'importantes percées sur notre compréhension du système "Terre".

## Géochimie

Des développements significatifs sont attendus des machines permettant des analyses *in situ* ponctuelles dans les minéraux : sondes ioniques, ICP-MS à ablation laser, ceci à des fins :

- de datation U-Pb sur minéraux accessoires (zircons, monazites, sphènes, etc.) de plus en plus jeunes (alpin) ;

- d'analyse des éléments en trace dans les micro-inclusions vitreuses ou minérales ;

- d'étude de géochimie isotopique de l'oxygène (une place à part doit par exemple être réservée à la sonde nucléaire du Laboratoire Pierre Sue dont l'ouverture vers l'ensemble des disciplines intéressées des Sciences de la Terre est désormais effective).

Un autre volet décisif concerne les méthodes utilisant les cosmonucléides (méthode au  $Be^{10}$ , par exemple) dont les mesures sont effectuées sur Tandetron, avec la mise en place proposée de machines spécifiques (basse énergie) dédiées aux problèmes des Sciences de la Terre, afin de passer au stade de la routine avec des précisions accrues.

## Biochronologie

De nouveaux concepts influent sur les méthodes de biochronologie, soit directement parce que celles-ci sont issues de recherches méthodologiques (approche déterministe des Associations Unitaires ou approche probabiliste des RASC - Ranking & Scaling), soit indirectement lorsqu'elles sont issues de nouvelles conceptions de l'évolution des agencements des corps sédimentaires (stratigraphie séquentielle). En outre, les approches intégrées sont aujourd'hui prioritaires, par couplages entre divers groupes taxinomiques, entre un groupe fossile et des données physico-chimiques, entre un

groupe et les données de la stratigraphie séquentielle, ou encore entre plusieurs de ces composantes.

## Géophysique

Outre les avancées prévisibles liées à l'évolution des moyens informatiques, des équipements de laboratoire en physique des roches (notamment dans le domaine HP-HT), de la qualité de l'instrumentation géophysiques des observatoires et de la densification des réseaux de capteurs pour accroître la fiabilité et la résolution de l'imagerie géophysique profonde, d'importants progrès méthodologiques sont à attendre dans le domaine de la géophysique d'exploration, et peut-être surtout en géophysique de subsurface (*i.e.* des sols aux quelques centaines de mètres de profondeur). Ces développements concernent l'imagerie radar, la sismique haute résolution, la prospection électrique et microgravimétrique. Les enjeux de ces derniers développements peuvent être considérables : développement d'une stratigraphie fine, caractérisation des milieux poreux et fracturés, détermination des flux superficiels de fluides, repérage de failles actives cachées...

Dans le domaine profond, l'imagerie géophysique multiparamètres, avec l'interprétation conjointe de données géophysiques variées (sismiques, sismologiques, gravimétriques, électromagnétiques, magnétique), reste un objectif ambitieux. Le développement de ce type d'approche, qui passe nécessairement par le support de modèles de représentation physique du milieu, devrait apporter des contraintes déterminantes sur la structure et la dynamique des différentes enveloppes profondes de la Terre, de la base de la croûte au noyau.

## Imagerie spatiale et déformation

Une forte volonté apparaît dans ce domaine pour fédérer les recherches centrées en France sur les "Applications géophysiques de l'interférométrie radar". Cette révolution technologique toute récente intéresse une population débordant largement celle de la section 11. Sont concernés les tectoniciens et sismotectoniciens, les volcanologues, les glaciologues, les hydrologues, les atmosphéristes, les spé-

cialistes des mouvements des sols... Transférer les connaissances, faciliter l'accès aux interférogrammes, à leur traitement et à leur interprétation, modéliser les erreurs sont autant d'actions à entreprendre de façon concertée.

Le positionnement précis par satellite (GPS...) pour la mesure de la tectonique active doit par ailleurs être encouragé, et une politique à long terme est nécessaire pour garantir la répétition des mesures, la modernisation du parc de récepteurs, l'archivage et la mise à disposition des données, ainsi que leur traitement en facilitant l'usage des grands logiciels (négociation de marchés). L'accès à la couverture topographique numérique MNT, passage obligé de toute étude de déformation ou de géomorphologie, doit être facilité. L'IGN est l'interlocuteur privilégié pour la couverture existante en France. Il est indispensable de faciliter l'acquisition de couples stéréoscopiques pour le calcul des MNT par la communauté des chercheurs en Sciences de la Terre. Enfin, la haute résolution spatiale de l'imagerie SPOT continue à être importante en géoscience (cartographie, néotectonique) et la très haute résolution spatiale (5 m) est attendue avec impatience.

### **Modélisation numérique et analogique**

L'effort de développement des méthodes de modélisation doit être poursuivi, tant dans le domaine de la modélisation physique (analogique) que dans celui de la modélisation numérique. Tous les domaines des Sciences de la Terre sont concernés, que ce soit par les aspects chimiques (modélisation des transferts et de la thermodynamique des interactions solides/liquides) ou par les aspects physiques (modélisation thermomécanique et dynamique des enveloppes internes, modélisation du système érosion/sédimentation, méthodes d'équilibres 3D intégrant les données géométriques, cinématiques et mécaniques).

## **4 - LES MOYENS HUMAINS**

C'est un truisme d'affirmer que la qualité de la recherche est avant tout fonction de la qualité des chercheurs. Elle dépend aussi énormément de l'environnement immédiat du chercheur, le laboratoire, et de notre capacité à réunir les compétences complémentaires nécessaires à l'échelle nationale ou internationale autour d'un programme. Par ailleurs, le rôle de l'ingénieur n'est pas assez mis en avant comme facteur clef de la réussite d'une action de recherche. Ce rôle est pourtant fondamental au sein d'un laboratoire. La recherche comporte une part importante de mise au point de méthodes instrumentales, et la distinction entre ingénieur et chercheur n'est pas toujours évidente. Inversement, faute de support suffisant en personnel technique, les chercheurs sont parfois amenés à consacrer un temps considérable à des tâches techniques de mesure, et doivent assurer de plus en plus souvent le fonctionnement de routine des instruments d'analyse, sans parler de la maintenance informatique du laboratoire.

La priorité est couramment mise sur le recrutement de jeunes chercheurs : cela est naturel mais ne doit pas masquer une vision plus générale de l'ensemble des ressources humaines du laboratoire. Outre la dégradation, ou la pauvreté endémique dans certains cas, de l'environnement technique et administratif de nombreux laboratoires, les équipes de recherche performantes au plan international comptent beaucoup sur l'apport des chercheurs post-doctorants, ceux-ci étant à une phase de leur carrière où leur créativité scientifique est en général excellente. Mais il s'avère que dans le dispositif de recherche de nos laboratoires, le nombre de post-doctorants est comparativement plus faible en France que dans la plupart des laboratoires étrangers. Par ailleurs, les jeunes enseignants-chercheurs nouvellement recrutés se voient trop souvent confier de lourdes tâches d'enseignement et d'administration qui ne sont pas favorables à la poursuite d'une recherche de qualité. Ceci constitue un handicap certain au dynamisme de nombre d'équipes de recherche.

Parler de recrutement de jeunes chercheurs pose inévitablement le problème de leur formation. Les équipes de Sciences de la Terre forment un cadre de formation original à cet égard. Étudiant un système naturel complexe, il est fondamental que les chercheurs soient avant tout bien formés aux disciplines de base, incluant une formation solide en physique, chimie et mathématiques. Le sens du “système étudié” est long à acquérir. Le contact avec le “terrain”, les Écoles d’été, les colloques sur des thèmes spécialisés en pointe sont indispensables pour cet apprentissage. L’hyperspécialisation

sur une technique est par ailleurs une tendance générale dans la compétition internationale de la recherche. Elle peut être néfaste à une bonne insertion des chercheurs dans une problématique “Sciences de la Terre” si les méthodologies ou les techniques analytiques deviennent des motivations propres, peu en rapport avec l’objet étudié. Habituer les jeunes chercheurs à l’approche pluridisciplinaire, tout en leur demandant d’être pointus dans leur propre domaine, fait partie des grands enjeux d’une formation réussie en Sciences de la Terre.