

Sciences de la Terre

2002-2006



Sommaire

Introduction : Rapport de synthèse pour une prospective en sciences de la Terre et de l'Univers

A – *Première partie* : " Observer, comprendre, modéliser le système Terre les planètes"

A.1 - *Planétologie*

A.2 - *Dynamique et évolution de la Terre interne*

A.3 - *Dynamique et évolution de la surface terrestre*

* *Reliefs de la Terre*

* *Paléoenvironnement*

B – *Deuxième partie* : " Aspects anthropiques du Système Terre "

B.1 - *Risques naturels et observations*

B.2 - *Gestion des déchets*

B.3 - *Energie et séquestration géologique du CO₂*

B.4 - *Géomatériaux*

C – *Troisième partie* : " Actions et moyens" .

C.1 - *Chantiers*

C.2 - *Instrumentation - calculs*

observation

Introduction

Rapport de
synthèse pour une
prospective en
sciences de la Terre
et de l'Univers

équipements

- *Remarques générales*
- *Instruments et équipements nationaux*
- *Missions d'observations en sciences de la Terre et de l'Univers*
- *Suggestions et commentaires par champs disciplinaires*
- *Suggestions d'actions scientifiques*

panaches

géodynamique

• Rapport de synthèse



Le rapport de synthèse pour une prospective en sciences de la Terre et de l'Univers résulte d'une consultation générale de notre communauté, engagée au colloque de Prospective de Vulcania (septembre 2002). Il nous a semblé fondamental de consulter les acteurs de la recherche en sciences de l'Univers afin de bien cerner les objectifs, les intentions, mais aussi les problèmes de notre communauté scientifique. Entre septembre 2002 et septembre 2003, de nombreuses réunions ont été organisées pour cela. De plus une opération a été menée via le courrier électronique et coordonnée par J.-M. Lardeaux, Président de la CSST. 38 textes représentant les avis de 53 chercheurs (certaines contributions ont été collectives), ont ainsi été recueillis. Il est clair que ce compte-rendu ne reflète que les commentaires et suggestions de celles et ceux qui ont bien voulu intervenir dans cet exercice de prospective. Ainsi, seules certaines équipes ont-elles fait entendre leur voix et seuls certains champs disciplinaires ont-ils fait connaître leurs suggestions et leurs problèmes. Enfin, ce document doit se lire et se comprendre en parallèle et en complément du document de Perspective 2002 présenté par l'INSU au colloque de Vulcania.

Jean-Marc Lardeaux

*et les membres de la Commission
Spécialisée Sciences de la Terre
de l'INSU :*

*Nicolas Arnaud, Etienne Deloule,
Denis Hatzfeld, Patrick Landais,
Thierry Reuschle, François Guyot,
Claude Jaupart, Michel Ganet,
Pierre Tricart, Luc Beaufort,
Pierre Cochonat, Nadine Ellouz,
Jérôme Gaillardet, Bruno Goffé,
Patrick Ledru, Christophe Sotin,
Pascal Tarits, Pascale Ulte-
Guerard, Elisabeth Verges*

Remarques générales

Les débats et le colloque menés à l'occasion de la prospective de l'INSU en sciences de la Terre et de l'Univers (STU) ont été riches et appréciés par une grande majorité de collègues.

■ Dans son ensemble, notre communauté soutient l'évolution de l'INSU dans sa " conquête " des sciences de l'environnement, et donc l'évolution vers un INSU-E. Cependant il est impératif de veiller à ne pas transformer l'INSU-E en une agence de services, notre mission première étant la recherche fondamentale. En conséquence, les moyens humains et financiers de la recherche doivent être consacrés, y compris dans les domaines des sciences de l'environnement, aux problèmes scientifiques les plus fondamentaux.

■ L'évolution de l'INSU vers l'INSU-E et le développement de nouvelles thématiques (surfaces et interfaces continentales, déchets...) ne peuvent

pas être réalisés à moyens financiers constants. Une telle évolution de la politique scientifique impose en effet la mise en place de budgets spécifiques. L'adjonction de l'environnement ne devrait surtout pas se traduire par un affaiblissement des programmes STU.

■ Si la programmation de la recherche est une nécessité bien comprise, il faut cependant souligner que trop de programmation risque de " tuer " la programmation. Pour beaucoup de collègues, notre système est trop rigide, trop lourd. Il est souvent suggéré de laisser plus d'autonomie aux équipes de recherches par l'attribution de crédits non fléchés et l'évaluation des politiques scientifiques des équipes à 4 ans.

■ Il serait probablement utile d'évaluer les programmes *a posteriori* en tenant compte de l'impact des résultats obtenus, des publications affairantes mais aussi des thèses réalisées autour de ces programmes ainsi que du devenir des thésards.

Instrumentation et équipements nationaux

Un effort important a été réalisé ces dernières années en matière de politique de développement d'instruments à vocation nationale en géochimie et géophysique en particulier. Cette politique doit être soutenue et confortée.

■ En géophysique, la communauté est maintenant fortement structurée et la politique d'équipement est bien établie. L'instrumentation sismologique nationale portable est maintenant structurée en 6 parcs. Parmi ces parcs, 2 sont en construction (OBS et IHR) dont les montages et le développement doivent être soutenus. De nouveaux défis se situent au fond des océans et sur les planètes telluriques. Il semble important de développer des observatoires en fond de mer (OFM).

■ En géochimie, la mise en place d'équipements analytiques de très haute résolution à vocation nationale doit être fortement soutenue. En parallèle, la mise en place de comités scientifiques autour de ces grands instruments doit être confortée afin de garantir la vocation nationale de ces équipements. Pour autant, une politique " régionale " de mise en place et de gestion de moyens analytiques plus " standards " doit être soutenue.

■ Modélisation et simulation numériques : de nombreux pays lancent des programmes ambitieux dans ces domaines (Japon, USA). Une politique d'équipement en ordinateurs performants (voir Earth Simulator au Japon) est importante et devrait être soutenue aussi en France.

Missions d'observation en sciences de la Terre et de l'Univers

Les observations permanentes de phénomènes naturels constituent une part déterminante des données nécessaires à la compréhension des processus géologiques. Ces observations sont assurées par les Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU) qui ont un grand savoir faire dans ce domaine. Il est alors indispensable de donner une bonne lisibilité de ces OSU. Ils permettent en effet de promouvoir une meilleure synergie entre recherches sur les processus internes et externes et donc d'aller vers une analyse globale à l'échelle de la planète Terre. Ils offrent en outre une meilleure lisibilité des pôles STU vis-à-vis des régions et des collectivités locales d'une part et le moyen d'atteindre des tailles critiques pour la mutualisation de certains équipements d'autre part. Il faudrait ainsi envisager un élargissement (limité) du nombre des OSU en France et outremer.

■ Il est nécessaire de reconnaître et d'accompagner l'élargissement des missions d'observations vers les questions de l'environnement (climatologie, pollutions, risques...). Il est par contre indispensable de bien différencier les OSU des ORE (Observatoires de Recherche en Environnement). Ces derniers n'ont pas les mêmes fonctions et ne disposeront ni des mêmes budgets, ni des mêmes personnels.

■ Pour les sciences de la Terre, le défi est de réaliser une observation dense et de qualité dans diverses conditions environnementales : de l'observation sur des durées longues (+ 10 ans) aux campagnes éclairs de quelques jours, en passant par des missions d'une durée d'environ 1 an ; toutes les configurations doivent être envisagées. L'effort sans précédent des moyens de communication permet d'aborder à l'heure actuelle cette phase critique de densification. Cet effort observationnel doit être

combiné à des efforts d'analyse et d'interprétation. Les techniques artisanales de haute qualité que certaines communautés pouvaient se permettre, doivent être associées à des techniques plus automatiques permettant des tris préalables, si ce n'est un traitement automatique ou semi-automatique.

■ Il est important de souligner que l'observation doit se faire sous tous les angles, de l'espace aux forages océaniques. Ne défendre qu'un des segments d'observation conduirait au risque fort d'être aveugle sur certains phénomènes physiques importants. Ainsi, les observatoires de recherche en environnement sont un pendant indispensable aux efforts d'observation de l'espace à condition que des moyens en proportion soient attribués à de telles missions. Il faut retenir, comme l'expérience l'a montré, que les développements technologiques pour l'espace, par exemple, n'ont pas vraiment de retombées terrestres tant il est vrai qu'il est difficile de convertir un processus de création à quelques unités en un processus de fabrication à un grand nombre d'unités. Des savoir-faire communs peuvent être développés mais chaque développement technologique est seul devant sa page blanche.

■ Le segment des études spatiales s'est structuré dans le monde et en Europe et peut donc promouvoir les propositions d'observation de la Terre de l'espace. Il n'existe pas de structure permettant de promouvoir avec le même impact des propositions terrestres.

■ Toute politique ambitieuse pour les OSU doit poser la question du personnel spécifique nécessaire aux missions d'observation (CNAP). Il serait peut-être souhaitable que son recrutement soit en harmonie avec la politique nationale du CNRS

Suggestions et commentaires par champs disciplinaires

Il est clair que l'interdisciplinarité est essentielle à la réalisation de progrès scientifiques significatifs en sciences de la Terre et de l'Univers. Cependant, les compétences disciplinaires (nos "métiers") doivent être garanties et renouvelées.

Géophysique

■ La gravimétrie de terrain n'existe plus en France et la gravimétrie aéroportée survit difficilement alors qu'elle est réclamée dans divers chantiers de recherches (il faut souvent aller chercher cette compétence dans certains pays à l'est de l'Europe). Les mesures magnétiques dans les observatoires sont en grand danger car, dans l'état actuel des technologies, il faut du personnel pour maintenir cette observation. Les mesures sismologiques ne se font plus dans la gamme 100-10 000sec car le capteur STSI permettant cette prouesse n'est plus construit et que ceux en place ne sont maintenus qu'en utilisant un cannibalisme de récupération. Peut-on construire un magnétomètre robuste dont la dérive soit parfaitement connue, soit contrôlée ? Si oui, certains observatoires pourraient revenir à l'idée d'enregistrer l'évolution du champ magnétique terrestre dans des points sensibles. La géophysique "pure" a eu son heure de gloire en France dans les années 50-60 avec une forte composante de géophysique expérimentale. L'élaboration des concepts de la "tectonique des plaques" a conduit dans les années 70-80-90 à renforcer la géophysique "géologique" en exportant dans les entreprises privées le savoir-faire de la géophysique expérimentale qui a donc disparu des milieux académiques. Malheureusement, il faut constater qu'il n'est pas possible de maintenir un secteur expérimental fort dans le privé, faute de débouchés économiques. Il faut donc rapatrier le volet expérimental dans le milieu académique ou dans des structures adéquates. Il faut aussi redonner ses lettres de noblesse à la métrologie en tant que telle : construire un capteur pour mesurer un phénomène physique en sciences de la Terre est un objectif scientifique de même niveau que la tomographie sismologique, l'étude des jerks magnétiques ou

encore la définition des réservoirs géochimiques dans le manteau terrestre. Par ailleurs, des campagnes d'acquisition des données sismologiques et l'équipement des parcs nationaux ont été soutenus ces dernières années et ont amené des résultats de premier ordre pour la dynamique interne de la Terre. La communauté des sismologues et des tectoniciens insiste pour que cet effort soit poursuivi.

Géochronologie

■ C'est une discipline absolument nécessaire et trop peu développée en France. Un effort méthodologique important doit être mené pour dater les périodes récentes de l'histoire de la Terre ainsi que l'histoire des surfaces continentales. Le devenir des laboratoires de datation par traces de fission doit être pris en compte car la situation actuelle est alarmante. Pour les périodes récentes, il est indispensable de développer des méthodes d'analyse géochimiques non destructives pour datation directe de spécimens précieux. Pour les périodes de temps pour lesquelles les techniques de datation existent, il est clair que les moyens disponibles sont très faibles par rapport aux demandes des scientifiques. Il est urgent de faire un état des lieux de l'existant, de son utilisation et des besoins des équipes de recherches.

Minéralogie

■ Cette discipline est fortement dépendante des développements instrumentaux qui doivent être soutenus. Ces nouveaux instruments permettront d'aborder les questions fondamentales sur les processus minéralogiques comme la nucléation, la diffusion ou la croissance cristalline. Le défi réside dans l'approche de la cinétique de ces processus. Il est urgent de structurer un axe de recherches sur les poussières et les matériaux finement divisés (nanomatériaux naturels). Les poussières incluent les poussières cosmiques et atmosphériques et les nanomatériaux incluent les minéraux argileux qui sont les meilleurs témoins des interactions entre atmosphère, hydrosphère et biosphère à la surface du globe. A l'heure actuelle, les moyens et les équipes sont "squelettiques". Or, ces différents matériaux naturels, très spécifiques par leur taille et

• Rapport de synthèse

leur réactivité par rapport à leur environnement immédiat, ont une grande importance dans les domaines appliqués. Les progrès réalisables en minéralogie sont ainsi liés aux compétences instrumentales et à l'interdisciplinarité entre sciences de la Terre et sciences physiques et chimiques des matériaux.

■ Pétrologie

■ Le paysage scientifique et technologique a beaucoup évolué ces dernières années. Il devient urgent d'assurer le renouvellement, et donc la survie, de l'expertise dans cette discipline au niveau national. Cette discipline est en effet proche d'être sinistrée. Ceci est d'autant plus dommageable que les progrès technologiques sont tels que certaines études qui semblaient utopiques il y a dix ans, deviennent possible aujourd'hui. Ainsi la détermination ponctuelle *in situ* de concentrations d'éléments traces ou de rapports isotopiques, là où traditionnellement les géochimistes ont analysé des roches totales ou, au mieux, des minéraux séparés, est de plus en plus précise et rapide. Il devient alors possible de replacer une donnée géochimique dans son environnement pétrologique (paragenèses, zonations, relations texturales, ...). Le lien entre pétrologues et géochimistes est donc en train de se renouer. Par ailleurs, les moyens expérimentaux ont beaucoup évolué et nos bases de données de propriétés thermodynamiques ne cessent de croître. Les extrapolations aux conditions extrêmes, caractérisant l'intérieur de la Terre, sont donc de moins en moins dangereuses. De plus, un afflux récent de données spectrales et de géochimie orbitale concernant la Lune, Mars et certains astéroïdes, relance l'engouement pour la planétologie comparée. Le cocktail d'éléments chimiques mesurés par satellite n'inclut pas tous les éléments traditionnellement utilisés par les pétrologues pour reconstituer les conditions de genèse d'une roche, les marges

d'erreurs n'ayant ni la même ampleur, ni la même signification. Interpréter la fantastique masse de données des surfaces planétaires en termes de processus pétrologiques implique donc, au delà des traitements automatisés, un effort conceptuel important pour lequel les pétrologues devraient avoir un rôle moteur. Enfin, il faut souligner l'urgence absolue de traiter le problème de la métallogénie (pétrologie des minerais) en France. Ce champ d'expertise est en effet en voie de disparition, il est indispensable qu'une réflexion soit menée par l'INSU, probablement en partenariat avec le BRGM, afin d'établir une politique claire à ce sujet.

■ Tectonique et géodynamique

■ Il s'agit d'un champ disciplinaire dans lequel la communauté française a joué, durant ces vingt dernières années, un rôle de premier ordre au plan international. Nombre de scientifiques continuent à s'intéresser, avec un fort impact international, à ce qui relève des déformations de la Terre. Il est fondamental de maintenir vivante, c'est-à-dire avec des moyens et des postes, cette communauté qui est reconnue. En tectonique et déformation de la Terre, les progrès scientifiques sont en grande partie limités par notre méconnaissance des vitesses de déformation et de la cinétique des processus. Une priorité scientifique serait la mise au point de méthodes d'évaluation de la durée des déformations naturelles (asismiques ou sismiques cumulées). Par ailleurs, il semble aujourd'hui déterminant de développer une approche intégrée (tectonique, pétrologie géophysique) de la structure et de la déformation de la lithosphère terrestre dans son ensemble. Enfin, il est urgent de souligner que nos efforts en matière de géodésie sont beaucoup trop limités en particulier en regard de ce qui est fait dans d'autres pays. La progression du parc GPS est insuffisante, ce qui rend difficile le développement de la tectonique active.

Suggestions d'actions scientifiques

Paléoenvironnements terrestres

■ Il semble fondamental de maintenir et développer les collaborations pluridisciplinaires

amorcées dans des programmes comme ECLIPSE. Les interactions entre paléontologie, biologie et génétique doivent se renforcer. Le développement et la calibration de "proxies" sont essentiels. Les marqueurs des changements climatiques doivent être quantifiés et il faut de façon urgente mettre en place

des bases de données permettant d'aborder les variations climatiques globales ou les variations de la biodiversité. De nouveaux outils de datation adaptés à l'étude des paléoenvironnements doivent être développés. Enfin, la question des grands cycles, cycle global du carbone par exemple, doit être posée à l'échelle géologique.

Jeune Terre

■ Cette proposition comporte trois sous-thèmes :

- la formation et l'état initial de la Terre,
- le mode de fonctionnement de la Terre archéenne,
- les paléoenvironnements archéens.

■ La formation de la Terre traite des processus et du timing de l'accrétion et de la différenciation initiale de la planète. Ce thème doit fédérer planétologues, modélisateurs et géochimistes capables de dater l'accrétion et la différenciation. Le mode de fonctionnement de la Terre archéenne doit aborder des problèmes tels que le mécanisme et le timing de la croissance de la croûte continentale, la composition et les caractéristiques physiques de la croûte océanique, ou bien encore la nature et l'évolution du manteau lithosphérique sous-continental qui s'est stabilisé durant l'archéen. La façon dont cette lithosphère, une fois formée, a survécu aux ravages de la convection dans le manteau est un problème scientifique majeur. Les paléoenvironnements archéens doivent fédérer géologues de terrain, sédimentologues, géochimistes des fluides et de l'atmosphère, modélisateurs du climat, paléontologues, microbiologistes et planétologues. Une attention particulière devrait être prêtée à la composition et à la température des océans archéens et à leurs interactions avec la croûte océanique. Par ailleurs, l'étude des systèmes hydrothermaux archéens est cruciale pour l'origine et l'évolution de la vie. Enfin, il serait déterminant, pour contraindre la nature de l'atmosphère archéenne, d'étudier les rares exemples de roches déposées sur la surface des continents archéens, en particulier les paléosols connus dans quelques séquences volcaniques.

Géosciences marines

■ Il semble fondamental de permettre le développement d'une observation à long terme des processus sous-marins. A ce titre, le projet MOMAR, initié par les communautés des géologues et biologistes marins est déterminant afin d'étudier les interactions entre processus magmatiques,

hydrothermalisme et biosphère. Le chantier MOMAR, d'étude de la dorsale médio-Atlantique au sud des Açores a déjà été sélectionné par le programme InterRidge pour installer, à moyen terme, un observatoire. Il est par ailleurs souhaitable d'initier de nouvelles recherches sur les fluides, les hydrates de gaz, les cycles de la matière organique et du carbone au niveau des marges continentales passives. De plus, l'ouverture d'opérations de recherches aux marges actives doit être encouragée et soutenue. Enfin, il faut souligner qu'il n'existe pas de politique nationale de conservation des échantillons prélevés lors des campagnes océanographiques. Or ces échantillons ont une valeur inestimable compte tenu du coût des moyens mis en œuvre pour leur collecte. Les techniques d'analyse progressent sans cesse et le retour à ces échantillons anciens apporte de nouvelles données très importantes. Il est donc essentiel qu'une solution soit mise en œuvre rapidement au niveau national.

Géomorphologie et reliefs de la Terre

■ Cette thématique scientifique est susceptible de fédérer les communautés travaillant sur les géodynamiques externes et internes de la Terre. Les ambitions sont le développement d'une géomorphologie quantitative, la compréhension de la signification et de l'évolution des reliefs terrestres et l'étude des couplages entre dynamique interne et formes de la Terre. L'évolution des processus qui régissent l'évolution des formes des surfaces continentales devant bien sûr intégrer le trait de côte et les plates-formes immergées.

La subduction des Antilles

■ Il s'agit d'une opération scientifique fédératrice et donc structurante pour la communauté des géosciences. Le système subduction concerne en effet un mécanisme fondamental de transfert de matériel entre réservoirs profonds et superficiels permettant d'étudier à la fois les problèmes académiques et de tectonique active à fort impact sociétal. Il est essentiel de développer une action intégrée permettant d'imager et de contraindre les processus de subduction. Des observations et mesures géophysiques en mer et à terre deviennent indispensables pour contraindre l'évolution de la marge active des Antilles. Bien sûr cette étude ne doit pas se restreindre aux Antilles Françaises, mais doit s'étendre à l'ensemble de cette marge

• Rapport de synthèse

convergente et combiner les investigations géophysiques avec des études tectoniques, sédimentologiques, géochimiques et pétrologiques de cette zone de subduction. Enfin, cette opération offre une unique opportunité d'aborder d'une part les problèmes d'aléas et risques naturels (volcaniques, gravitaires, sismiques) et d'autre part de ressources énergétique (géothermie) dans un contexte géodynamique bien contraint.

■ Etude des panaches

■ Durant ces dernières années, le thème "panaches" a permis de structurer une communauté scientifique de très haut niveau autour du programme Corne de l'Afrique. Il serait dommage qu'un tel effort très interdisciplinaire ne soit pas poursuivi sur d'autres chantiers (La Réunion, Pacific Superswell).

■ Nature, structure et rhéologie de la lithosphère continentale

■ La question de la structure et de la rhéologie de la lithosphère n'admet bien sûr pas de réponse unique, mais y répondre en fonction des contextes thermiques et des types de croûtes permettrait d'avancer grandement sur la compréhension de la tectonique continentale. Le même raisonnement peut être tenu pour la lithosphère océanique dans

les zones de subduction ou dans les dorsales. Nous vivons aujourd'hui avec deux types d'approche : soit la lithosphère continentale est "ultralocalisante", soit elle est considérée comme "molle" et modélisée comme un fluide. Cette situation n'a guère évolué au cours des vingt dernières années bien que l'on sache que la réalité est bien plus complexe. Nombre de faits de terrain ou de données sismologiques montrent que la transition fragile/ductile est souvent associée à des décollements à faible pendage alors que les enveloppes rhéologiques classiques en arbre de Noël suggèrent qu'il s'agit de la zone de résistance maximale. De même, l'hétérogénéité des croûtes supérieures et inférieures (stratification, changements de phases, discontinuités héritées, chenaux de fluides...) leur confère une rhéologie moyenne très différente des modèles classiques et qui n'a encore jamais été prise en compte de façon satisfaisante. Par ailleurs, le rôle du manteau lithosphérique reste très peu contraint dans tous les modèles de tectonique continentale. De plus, il est urgent de mettre au point des méthodes de quantification de la durée des déformations continentales et ainsi d'aborder sans complexe la cinétique et la complexité des déformations naturelles. Enfin, il est fondamental de souligner qu'il existe en France une communauté jeune et riche aux interfaces entre tectonique, pétrologie, géophysique et modélisation qui peut apporter des progrès décisifs à cette problématique scientifique.

venus

Première partie

Observer, comprendre, modéliser
le système Terre et les planètes

A.1-Planétologie

pnp titan
rosetta

- *Enjeux de la recherche*

- *Bilan des connaissances*

- *Les axes prioritaires*

mars

stardust

express

• Planétologie



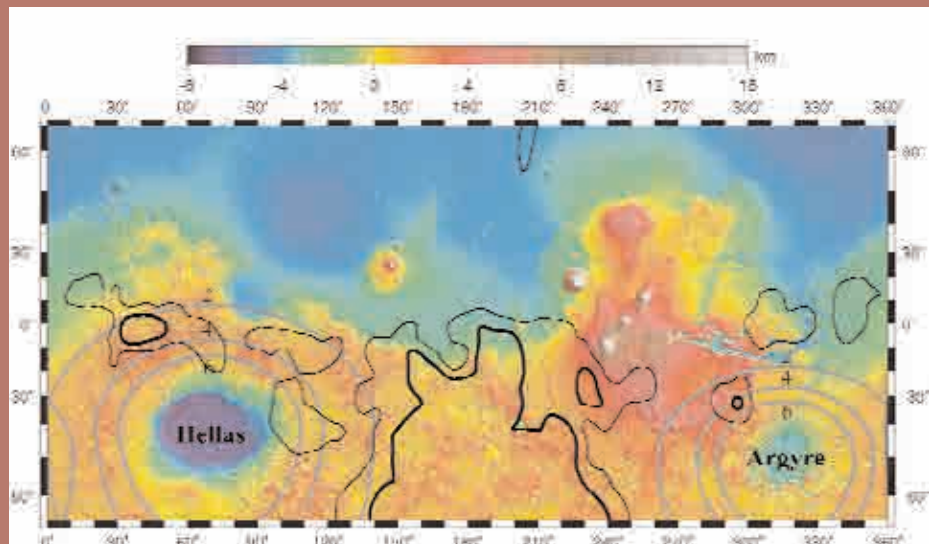
ette thématique est totalement prise en compte par le Programme National de Planétologie (PNP) créé en 1991 et financé pour 1/3 par le CNES et 2/3 par l'INSU. Programme fédératif, il concerne les trois divisions de l'INSU, avec une emphase particulière de la division Astronomie-Astrophysique (AA) et une montée en puissance de la division Sciences de la Terre (ST). Comme son prédécesseur l'ATP Planétologie des années 80, mais aujourd'hui sous une forme très élargie, sa finalité répond à deux fonctions :

- d'une part promouvoir, fédérer, et soutenir les recherches sur l'origine et de l'évolution du système solaire, des systèmes planétaires extra-solaires et de leurs planètes ;
- d'autre part soutenir les actions de recherche dans ce domaine liées aux grands programmes spatiaux nationaux et internationaux et/ou visant à une exploitation optimale des grands moyens d'observation au sol, nationaux ou internationaux.

Christophe Sotin

et le comité scientifique du programme national de planétologie :

Bernard Marty, Bruno Bézard, Fabienne Casoli, Eric Chassefière, Sylvie Derenne, Anna Dutrey, François Forget, Matthieu Gounelle, Laurent Jorda, Yves Langevin, Emanuel Lelouche, Guy Libourel, Philippe Lognonné, John Ludden, Nicolas Mangold, Sylvestre Maurice, Alessandro Morbidelli, Patrick Pinet, Danièle Pinti, Pascal Ranou, François Robert, Francis Rocard, Philippe Zarca



Topographie de Mars. Autour de Hellas et Argyre sont représentés les pics de pressions en GPa (traits gris) dus aux impacts. (V. Chevrier d'après Hood et al.)

Enjeux de la planétologie

Les actions scientifiques ont pour but :

- une meilleure connaissance de l'origine et de l'évolution des systèmes planétaires,
- une promotion et un soutien scientifique à l'exploration spatiale du système solaire et à la détection et l'observation à distance des autres systèmes planétaires.

La programmation spatiale

Les recherches poursuivies par la communauté dans le domaine des comètes visent à la caractérisation du matériau cométaire et de son environnement pour une meilleure compréhension de l'origine des comètes et du Système Solaire. Si certains programmes sont directement liés à ROSETTA, beaucoup en sont très complémentaires.

Du point de vue observationnel, les recherches cométaires bénéficient des progrès actuels en matière d'instrumentation. Dans les années à venir, on peut s'attendre à d'importantes avancées grâce aux nouveaux moyens disponibles tels que, par exemple, la nouvelle instrumentation du VLT en infrarouge (VIZIR, CRIRES), l'observatoire spatial Herschel dans le domaine submillimétrique et IR lointain, ALMA dans les domaines millimétriques et submillimétriques, le programme américain SIRTF. Ces instruments, grâce à leur sensibilité, permettront d'aborder les comètes dans leur diversité et dans leur ensemble. Il sera ainsi possible d'étudier plus en détail les comètes périodiques formées dans la ceinture de Kuiper. La comparaison de la composition chimique et isotopique de ces comètes avec celle des comètes du nuage de Oort compte ainsi parmi les enjeux les plus importants de la science cométaire. Par ailleurs, plusieurs missions spatiales américaines (CONTOUR, STARDUST, DEEP IMPACT) sont programmées pour un survol cométaire avant la rencontre de ROSETTA avec la comète Wirtanen. Ainsi, des avancées dans tous les domaines de la physique cométaire sont attendues pour la prochaine décennie et fourniront des mesures tout à fait complémentaires de celles qui seront obtenues par ROSETTA.

ROSETTA est une mission ambitieuse, faisant appel à des techniques d'analyse et des développements théoriques et expérimentaux variés. Dans ce contexte, le fléchage de la thématique des comètes au niveau du PNP devra être ré-envisagé afin de souder la communauté, motiver de nouvelles équipes, et soutenir financièrement les programmes qui seront proposés pour préparer l'exploitation scientifique des données acquises par ROSETTA.

Fin 1998, le CNES, avec le soutien total de la communauté planétologique française, avait mis en place une nouvelle stratégie dans le domaine de l'exploration de Mars. Le séminaire de prospective d'Arcachon (Mars 1998) avait confirmé l'approche en trois étapes définie lors des séminaires précédents :

- observation globale de la planète par télédétection,
- études *in situ* par des stations ou des véhicules,
- retour d'échantillons.

La mission de retour d'échantillons martiens a subi un sérieux coup d'arrêt à la suite des deux échecs successifs des missions NASA Mars Polar Lander puis Mars Climatology Orbiter, en août et octobre 1999. Ces deux échecs ont conduit la NASA à privilégier une approche beaucoup plus prudente au niveau des calendriers de développement, des phases de validation des technologies critiques et, par voie de conséquence, des budgets par mission (augmentation de près d'un facteur deux). La NASA a donc reporté le retour d'échantillons au mieux en 2011-2013, programmant en 2005 un orbiteur avec une très haute résolution spatiale (Mars Reconnaissance Orbiter) et préparant pour 2009 une mission très ambitieuse d'étude *in situ* (" Smart Lander 2009 ").

Le CNES, qui devait fournir l'orbiteur martien, a été obligé de redéfinir complètement son programme. Ce processus a abouti au programme PREMIER, avec une mission lancée en 2007 associant la mise en place du réseau " Netlanders ", un test de la capture en orbite d'une capsule d'échantillons et quelques expériences de science orbitale. En parallèle, le CNES a affiché sa volonté de contribuer significativement à la mission " Smart Lander ", et continuait à se placer dans la perspective d'une participation à la mission de

• Planétologie

retour d'échantillons lorsqu'elle serait programmée par la NASA.

■ Au cours de l'été 2002, les difficultés budgétaires liées à de nombreux facteurs (changements politiques, crise de l'industrie aérospatiale française et européenne, évolution du coût du programme) ont conduit la direction du CNES à remettre en cause le programme PREMIER, envisageant une redéfinition sur une base budgétaire réduite d'un facteur cinq. Dans le cadre du programme national, le CNES ne fournirait plus que les atterrisseurs Netlanders, l'emport et le relais de ces atterrisseurs devant se situer dans le contexte d'un programme Européen ("Aurora") qui reste à définir.

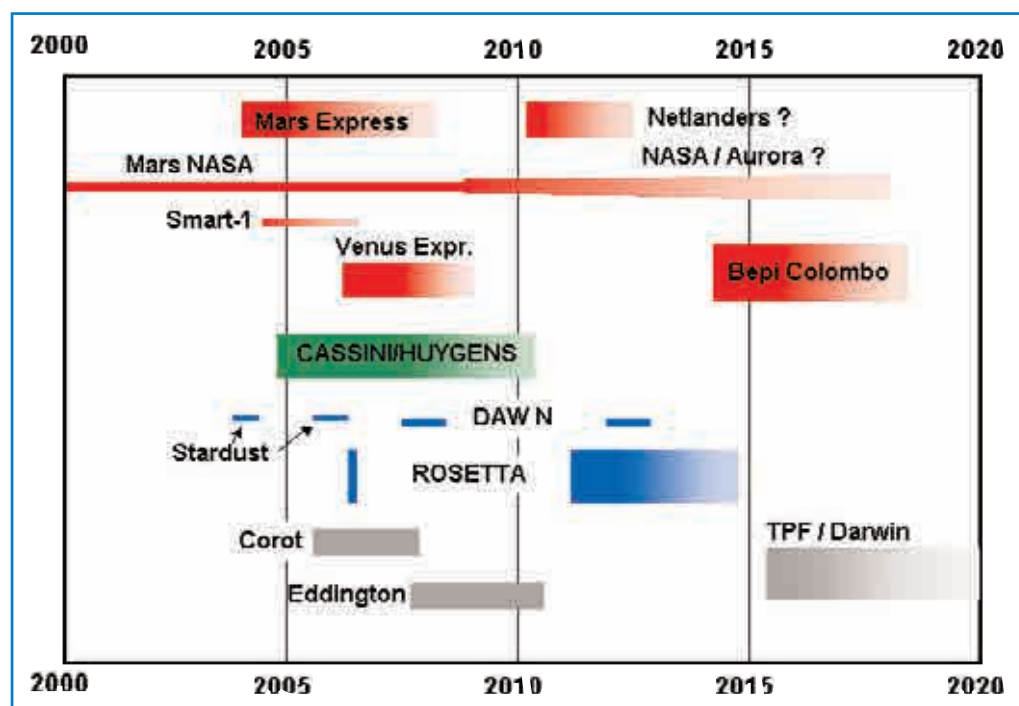
La détection et la caractérisation des planètes extrasolaires

■ La période 1998-2002 a permis de stabiliser les perspectives pour l'étude des planètes extrasolaires. La mission COROT, dédiée à l'astérosismologie et la détection des planètes par occultation de l'étoile centrale, est la première petite mission du CNES dans le domaine des sciences de l'Univers. Après une période de turbulences, elle est maintenant en phase C-D pour un lancement début 2005. Elle permettra d'observer pendant des périodes de plusieurs mois des milliers d'étoiles, et constituera ainsi une expérience pionnière dans ce domaine, avec la possibilité de détecter des planètes deux à trois fois

plus grosses que la Terre. La préparation, puis l'accompagnement du programme COROT devra constituer l'une des priorités du PNP lors du prochain mandat.

■ En 2001-2002, deux missions de deuxième génération de recherche de planètes par occultation de l'étoile centrale ont été approuvées : Kepler (NASA) et Eddington (ESA). Contrairement à Kepler, Eddington comporte comme Corot des objectifs d'astérosismologie. Les performances pour les planètes extrasolaires de ces deux missions sont comparables, améliorant d'un facteur supérieur à 10 celles de Corot tant pour la magnitude limite que pour le nombre d'étoiles observées ou la durée d'observation par champ. Les deux lancements sont prévus en 2007-2008. La mission GAIA, lancée en 2011-2012, a déjà été mentionnée. Elle permettra d'obtenir une statistique très étendue sur la proportion de systèmes stellaires comprenant des planètes géantes.

■ Un programme très ambitieux d'observation directe par interférométrie est en cours de définition dans le cadre d'une collaboration entre la NASA et l'ESA (TPF / Darwin). De nombreuses validations technologiques sont indispensables. Un test du vol en formation est prévu en 2006-2007 avec la mission "SMART-2" de l'ESA. En laboratoire, il faut valider les méthodes de réjection de la lumière de l'étoile centrale qui permettront d'observer les planètes de type tellurique. L'un des atouts majeurs de TPF-Darwin sera la possibilité de caractériser par spectroscopie les



planètes observées (présence d'une atmosphère). La réalisation de cette mission ambitieuse se situe après 2012, mais on peut s'attendre à des activités préparatoires impliquant le PNP dès le prochain mandat.

Evolution souhaitée

Malgré un contexte spatial mouvant, le PNP a montré sa faculté à répondre à un besoin fort de recherche dans le domaine de l'histoire et de l'évolution du système solaire. Quelques unes des grandes questions scientifiques qui vont vraisemblablement agiter le siècle qui commence pourront trouver des éléments thématiques dans l'orientation future du PNP. Ce programme est par ailleurs en phase avec les questions primordiales soulevées par des instances scientifiques d'autres grands pays industrialisés, et une réflexion de monter une initiative européenne devrait s'établir rapidement. Mars représente dans ce contexte la *Terra Incognita* a priori la plus accessible, et de grandes découvertes vont sans nul doute émerger de l'exploration des

satellites de Jupiter et de Titan.

Les aléas de la programmation scientifique du CNES concernant l'exploration de Mars auraient pu avoir un effet dramatique sur la mobilisation très récente des sciences de la Terre autour de l'exploration des planètes telluriques et de l'étude des objets extraterrestres. Il est encore trop tôt pour connaître la pérennité de l'implication des sciences de la Terre, d'autre part très sollicitées par les questionnements de société et la direction du CNRS pour s'investir plus dans les problèmes scientifiques environnementaux. Il est cependant encourageant de constater que la pression de proposition dans les sujets fléchés concernés (2, 3, 5, 7) s'est continuellement accrue durant ce mandat. Le récent colloque de Vulcania est venu conforter l'intérêt des sciences de la Terre dans la planétologie. D'autre part, certaines équipes françaises sont maintenant très compétitives au niveau international, notamment dans le domaine de la micro-analyse, et sont d'ores et déjà partie prenante des prochains retours d'échantillons planétaires (missions NASA Stardust, Genesis).

Bilan des connaissances

Le PNP fédère selon des axes de recherche prioritaires liés aux missions spatiales ou à la connaissance fondamentale les actions de recherche d'environ 240 chercheurs appartenant à 45 laboratoires.

L'organisation du PNP durant le dernier mandat (1998-2002) a compris deux co-présidents (un ST et un AA), un conseil scientifique de 12 membres, et 2 x 7 animateurs de sujets fléchés. Les sujets fléchés lors de l'appel d'offres 2002 étaient :

- SF1 : recherche et modélisation des systèmes planétaires extra-solaires,
- SF2 : évolution interne de Mars et des autres corps différenciés,
- SF3 : interactions surface-atmosphère-hydrosphère de Mars,
- SF4 : physico-chimie des atmosphères denses,
- SF5 : origine et irradiation de la matière primitive dans le système solaire,
- SF6 : hautes atmosphères, interaction avec le plasma et le rayonnement,
- SF7 : origine et évolution précoce du Système Solaire et de la nébuleuse primitive.

Le calendrier prévu pour le retour scientifique des missions dans lesquelles la communauté planétologique française est impliquée est indiqué ci-contre. La hauteur du rectangle indique d'une manière qualitative l'importance de cette contribution (rouge : planètes telluriques ; vert : planètes géantes ; bleu : petits corps ; gris : planètes extrasolaires). Cette figure illustre graphiquement l'importance du retour scientifique prévu entre 2004 et 2010, avec Mars Express, Smart-1, Venus Express, Cassini-Huygens, les survols d'astéroïdes par ROSETTA, le rendez-vous de DAWN avec l'astéroïde 4 Vesta, Corot et Eddington. De ce point de vue, la période 2003-2004 représente une phase critique pour l'avenir de la communauté planétologique, avec les lancements de ROSETTA, Mars Express et Smart 1, puis la mise en orbite de Mars Express autour de Mars, celle de Cassini autour de Saturne et la phase de descente de la sonde Huygens.

• Planétologie

Evolution du programme

Le premier mandat du PNP (1991-1994) comportait 3 thèmes, qui accompagnaient les missions programmées ou envisagées (marquées en gras) et se trouvait donc fortement lié aux priorités du programme spatial :

- Mars (et les planètes telluriques), **Programme Mars** ;
- Saturne et Titan (et les systèmes des planètes géantes), **Cassini/Huygens** ;
- Origine du système solaire, **Rosetta**.

Le second mandat (1995-1998) a été marqué par l'apparition du thème exoplanètes à partir de 1995, sous la forme d'une action spécifique **Planètes Extrasolaires**.

Le troisième mandat (1999-2002) a vu :

- la forte mobilisation des sciences de la Terre induite par l'émergence du programme Mars Premier et la co-direction du programme par les divisions Astronomie–Astrophysique et sciences de la Terre de l'INSU ;

- la structuration de l'exobiologie par un GDR en concertation avec le PNP.

Publications et thèses

Du point de vue de son bilan scientifique, le Programme National de Planétologie a démontré sa capacité à générer des actions scientifiques innovantes. Le nombre total de publications A depuis 1999 est de 563, ce qui correspond environ à 1 publication par an et par chercheur en moyenne soutenue par le PNP. Le nombre total de thèses soutenues ou en cours durant cette période, qui est de 103, traduit bien la vitalité du programme.

Les axes prioritaires

Le conseil scientifique sortant du PNP propose de mettre en avant trois thèmes fédérateurs, chacun ayant un objet ou système de référence qui lui semble particulièrement important à l'aube du siècle commençant.

Formation des systèmes planétaires

objet de référence : le système solaire

Ce premier thème est destiné à mieux comprendre comment, à partir d'une nébuleuse primitive, les corps primitifs (météorites non différenciées, comètes, IDPs) ont pu se former et évoluer vers des corps planétaires.

Cet axe devrait s'intéresser spécifiquement à la composition de la nébuleuse proto-solaire, dont les héritages nucléosynthétiques, aux processus précoces (irradiation, condensation), ainsi qu'à la dimension géochronologique de ces processus telle qu'elle peut être abordée par les radioactivités éteintes ou non.

Le système solaire est encore mal connu et il est important de poursuivre des efforts d'inventaire pour les corps mal caractérisés (par exemple, Troyens) notamment dans le système solaire lointain. L'observation et la caractérisation physique, chimique et si possible minéralogique des corps cométaires, des planètes géantes et de leurs satellites va apporter des informations uniques et indispensables à notre connaissance du système solaire et de sa formation.

Une réflexion particulière devra être faite sur la détection et la caractérisation des NEOs (Near Earth Objects), du fait du danger potentiel qu'ils représentent.

Cet axe devrait intégrer un aspect essentiel de modélisation numérique de la formation des planètes, de leurs antécédents, et de leur dynamique lors de la formation. Un rapprochement avec la communauté cosmochimique est fortement souhaitable afin de pouvoir utiliser des traceurs cosmochimiques (par exemple, rapports isotopiques) comme paramètres de calage des modèles.

■ Une partie importante de ce thème sera également consacrée à la poursuite de la caractérisation des exoplanètes et des processus de formation et d'évolution des exoplanètes (atmosphères, champ magnétique etc.).

Processus planétaires, structure et évolution

objet de référence : Mars et Titan

■ Ce thème a pour objet la compréhension de l'évolution des corps planétaires après leur formation et de leur structure présent.

■ Les couplages dynamique atmosphérique et chimie d'une part, et dynamique atmosphérique-magnétosphère-rayonnement et les problèmes d'échappement sont centraux dans la compréhension des atmosphères des planètes géantes et de Titan, et dans celle de l'évolution de l'atmosphère de Mars.

■ Deux paramètres sont essentiels pour comprendre l'évolution interne des corps planétaires : la dimension chronologique, essentielle à la compréhension de la formation des planètes telluriques et des astéroïdes et la dimension thermique, moteur de la différenciation et de la convection.

■ La dynamique des dynamos planétaires, des magnétosphères et l'existence de magnétosphères de planètes extra-solaires sont des champs disciplinaires de grand intérêt dans la prochaine décennie.

■ Les avancées extraordinaires dans la géomorphologie de Mars et de ses relations avec d'une part la tectonique et d'autre part l'existence d'eau ne sont qu'à leur début. Il est fortement souhaitable de continuer ces efforts grâce à la récolte des prochaines données satellitaires de Mars d'une part, et de la modélisation numérique et analogique d'autre part.

Environnements planétaires primitifs, conditions d'émergence de la vie

objet de référence : Terre primitive et Mars

■ Explorer et comprendre les environnements favorables au développement d'une activité biologique sont des enjeux considérables du développement de la connaissance humaine au 21^{ème} siècle.

■ Il est essentiel d'explorer les paramètres externes de ces environnements : flux de matière extraterrestre au cours du temps, apports exotiques en éléments volatils et en matière organique, protection des surfaces planétaires par les atmosphères et les magnétosphères.

■ Les conditions environnementales qui prévalaient sur la Terre Primitive, essentiellement durant l'Hadéen et l'Archéen, et qui règnent peut être encore sur d'autres corps planétaires, dont tout naturellement Mars, doivent être mieux comprises. Il importe de comprendre la différenciation terrestre, la formation et l'évolution précoce des atmosphères et océans des planètes telluriques, le message pétrologique et sédimentaire issu de l'Hadéen (par exemple, analyse de zircons et sédiments terrestres), et toute analyse et expérimentation permettant de comprendre le fonctionnement de la Terre durant l'Hadéen.

■ L'axe de recherche développé au sein du PNP devrait être clairement distinct de ceux englobés par l'exobiologie. Par exemple, il ne devrait pas s'impliquer dans les problèmes de vie extrême, d'archéobiologie, mais plutôt se focaliser sur les conditions physico-chimiques ayant rendu le développement de la vie possible, c'est-à-dire l'origine moléculaire de la vie.

■ Il sera nécessaire, au terme de discussions croisées entre les représentants du PNP, la CSA et la CSST, d'établir une frontière entre ces nouveaux axes rentrant dans le PNP et d'autres axes spécifiquement ST. Cette distinction pourrait se faire tant sur la méthode que sur l'objet.

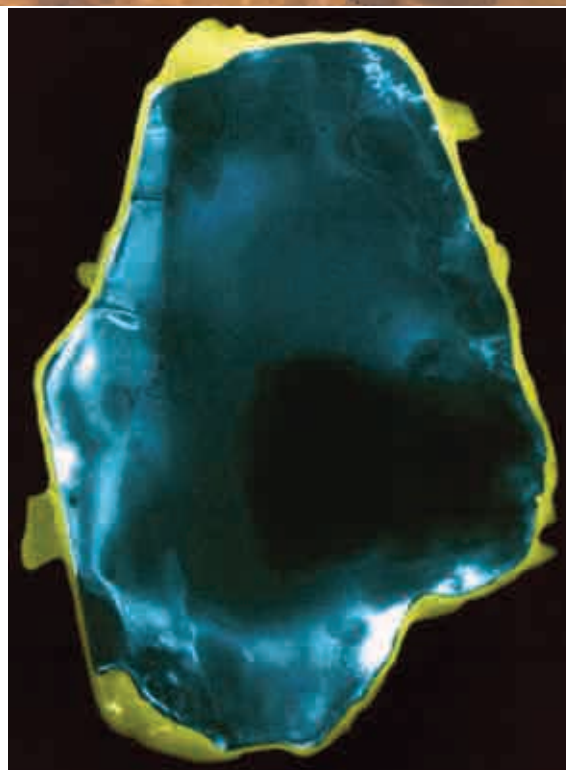


La surface de Mars vue par Mars Express HRSC-14 janvier 2004. Résolution 12 mètres par pixel.

© ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum)

Grain du sol lunaire recouvert d'une pellicule amorphe d'une épaisseur inférieure à 500 nanomètres (en jaune) dans laquelle sont implantés des ions issus du Soleil.

© CNRS-CRPG



Lithosph

Première partie

Observer, comprendre, modéliser le
système Terre et les planètes

A . 2-Dynamique
et évolution de la
Terre interne

noya
manteau
conver
• Bilan des connaissances

• Axes prioritaires

subduction

panaches

• Dynamique et évolution de la Terre interne



ette thématique a déjà fait l'objet d'un programme de recherche de l'INSU : "Intérieur de la Terre" (IT) qui a pris fin en décembre 2002.

Enjeux de la Recherche

Cette thématique recouvre un champ de recherche très large qui va des études sur le noyau terrestre à celles sur les déformations de la lithosphère et intéresse donc une vaste population de chercheurs en Sciences de la Terre.

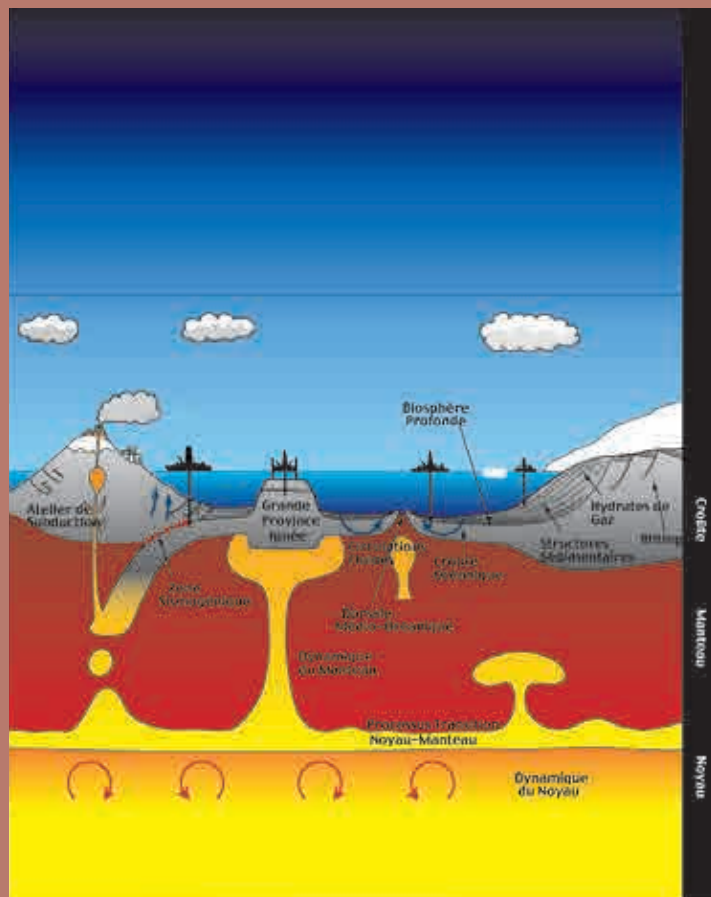
Indépendamment du nécessaire achèvement des projets initiés dans le cadre du programme IT, l'accent sera mis dans les années à venir sur les interactions entre enveloppes internes et externes et sur la nécessité de fédérer au sein d'une même étude les observations de terrain, les modélisations analogiques et/ou numériques et l'expérimentation en laboratoire.

Représentation schématique des composantes, couplages et mécanismes régissant le fonctionnement de notre planète

© d'après Asahiko Taira, Université de Tokyo

Christophe Sotin

Gautier Hulot, Philippe Cardin, Bertrand Meyer, Jean Chery, Anne Davaille, Georges Ceuleneer, Catherine Chauvel, Joseph Martinod.



Bilan des connaissances

Le précédent programme de l'INSU "IT" avait focalisé les recherches sur 5 thèmes.

■ Le noyau, dynamique propre et couplage avec les autres enveloppes terrestres

Le noyau de la Terre est le siège de nombreux phénomènes dynamiques qui sont potentiellement affectés par la façon dont les autres enveloppes (graine, manteau) définissent les conditions aux limites vues par le noyau. En retour le noyau joue un rôle important dans l'évolution globale du système Terre, en contrôlant la croissance de la graine, en influençant la dynamique du manteau et même en définissant les conditions dans lesquelles les enveloppes externes (ionosphère, magnétosphère) réagissent aux flux solaires.

■ Panaches

Les points chauds et leurs panaches constituent l'un des plus beaux objets naturels pour étudier les interactions entre l'intérieur et la surface de la Terre. Un point chaud cible avait été choisi dans le programme IT pour progresser dans la compréhension de ces interactions : il s'agit du point chaud de l'Afar (Corne de l'Afrique) situé dans la plus jeune région émergée au monde. Un atelier sera prochainement organisé afin de faire le bilan des travaux réalisés dans cette région et de faire ressortir les axes prioritaires qui pourront être pris en compte à partir de 2004.

■ Dynamique de la convergence continentale

Les études ont jusqu'ici été ciblées sur les zones de collision les plus actives (Iran, Himalaya/Tibet). La communauté française a acquis une bonne expérience dans ce domaine mais il reste encore beaucoup à faire en favorisant les travaux pluridisciplinaires (géophysique et géologie-géochimie quantitative).

■ Modélisation de la dynamique du manteau

Le domaine de la convection mantellique a fait de très rapides progrès grâce aux interactions avec d'autres disciplines (minéralogie, géochimie, sismologie, tectonique...). De même, le progrès des techniques numériques ainsi que celui des ordinateurs ont changé notre capacité à simuler la dynamique du manteau et de la lithosphère. Grâce à l'imagerie sismique, une relation directe entre la structure actuelle, l'évolution paléotectonique et les simulations numériques peut être établie. De même, des progrès dans le domaine de la modélisation nous ont permis de comprendre certains des ingrédients des lois rhéologiques de la lithosphère qui sont responsables de sa fracturation en plaques tectoniques.

■ Mouvements verticaux rapides

Les travaux entrepris ont montré que ces mouvements donnent non seulement des informations sur la dynamique interne du globe, mais aussi qu'ils portent en eux un signal exogène lié au fort couplage entre enveloppes internes et externe à travers l'édification des reliefs, l'érosion et la subsidence des bassins accompagnant souvent ces mouvements.

Axes prioritaires

■ Le noyau, dynamique propre et couplage avec les autres enveloppes terrestres

C'était un thème déjà fléché dans le précédent programme. Les développements associant différentes méthodes d'investigation devront plus particulièrement être encouragés.

- l'exploitation des données magnétiques historiques et spatiales ;

- le développement de l'archéomagnétisme et du paléomagnétisme pour préciser la dynamique du noyau au cours des dernières dizaines, voire centaines de milliers d'années et au cours des inversions ;

• Dynamique et évolution de la Terre interne

- l'amélioration des méthodes de simulation numériques ;
- l'analyse comparée des observations, des résultats expérimentaux et des résultats de simulation numérique du comportement dynamique du noyau ;
- l'étude des instabilités du noyau ;
- l'influence du noyau et du système Terre en général, sur la croissance et la structure de la graine ;
- le comportement mécanique global du système graine-noyau-manteau (notamment dans le contexte de la géodynamo) ;
- l'influence du manteau sur le comportement au très long terme de la géodynamo (fréquences d'inversion, paléovariations séculaires) ;
- les conditions inhabituelles imposées par le noyau sur l'ionosphère et la magnétosphère par le passé (faibles intensités, inversions, excursions).

■ Localisation de la déformation lithosphérique.

Le comportement mécanique et la rhéologie de la lithosphère soit continentale, soit océanique, suscitent de nombreux débats et font l'objet d'approches et de modélisations très diverses. De nombreuses questions se posent :

- contributions respectives de la croûte et du manteau lithosphérique dans la résistance de la lithosphère et conséquences sur la déformation géologique ;
- comportement mécanique moyen de la lithosphère à court et long terme ;
- caractérisation de la résistance des zones de déformation localisée de façon absolue et comparaison avec celle de zones non déformées ;

- comment établir des relations entre les échelles de temps et d'espace des phénomènes transitoires impliqués dans la déformation lithosphérique et les propriétés rhéologiques de la lithosphère ;
- comment contraindre la résistance de la lithosphère à partir des observations et modélisations pétrophysiques.

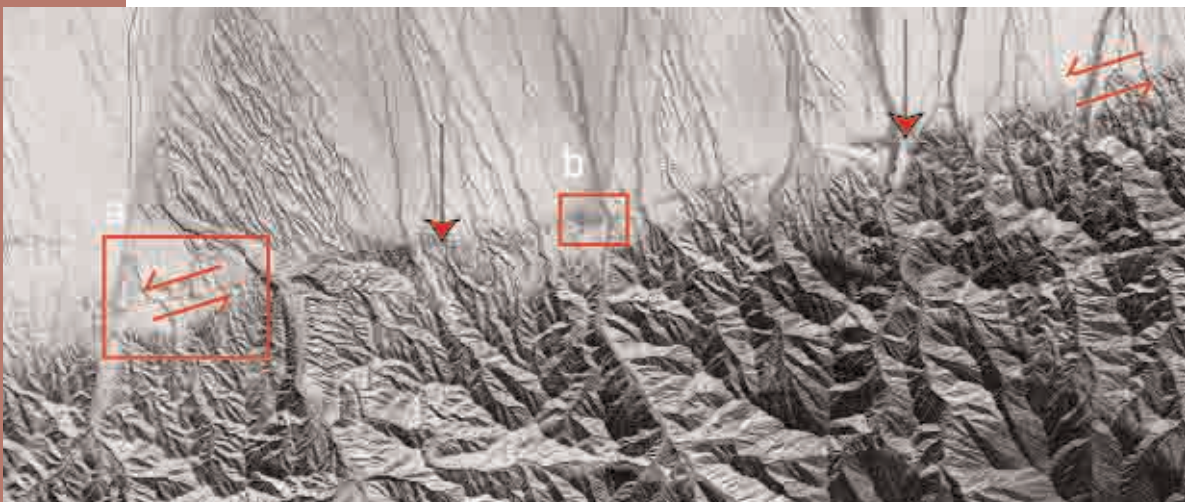
L'objectif général de cette thématique est d'aborder ces questions en associant observations de terrain en mer et sur terre et des modélisations numériques ou analogiques.

■ Traceurs de la convection mantellaire

Etudier la dynamique et l'évolution du manteau terrestre nécessite d'identifier et de caractériser des phénomènes physico-chimiques opérant à des échelles allant de la Terre globale (convection, ...) au minéral (fluage, changement de phase, fusion partielle, ...). En effet, les caractéristiques de la convection dépendent fortement des conditions thermiques (chauffage interne, limite noyau/manteau, limite surface/manteau), des hétérogénéités de densité liées aux hétérogénéités de composition et aux changements de phases et, enfin, de la rhéologie des roches mantelliques (dépendance en température, composition, pression, "mémoire", ...). Les modélisations, qu'elles soient numériques ou analogiques, ont montré une grande diversité de comportement en fonction de ces différents paramètres. Etudier les comportements terrestres à grande échelle nécessite donc de contraindre les modélisations à l'aide de grandeurs (densité, viscosité,...) déterminées expérimentalement.

Image Corona d'une portion de la faille Altyn Tagh (près d'Aksay, Gansu - Chine-). La faille décale tous les cônes et terrasses alluviales (par exemple a, b). La vitesse moyenne déduite des mesures de ces décalages est de 2cm/an depuis 10 000 ans.

© Tectonique et mécanique de la lithosphère/ipgp-cnrs



talement (diagrammes de phases,...) et/ou dérivées d'observation (vitesses sismiques, composition chimique, ...) et donc d'identifier les mécanismes physiques à petite échelle permettant de relier ces grandeurs aux observations. Les recherches devront être plus particulièrement focalisées sur :

- la convection en présence de plaques tectoniques ;
- les interactions manteau/noyau et manteau convectif/lithosphère ;
- l'effet sur la dynamique fine de la convection des transitions de phase à très hautes pressions et températures mises en évidence par la physique du solide ;
- les relations entre vitesse sismique, anisotropie, minéralogie, composition et température, et entre modèles tomographiques et géométrie convective ;
- les processus pétrologiques et géophysiques à l'origine des réservoirs géochimiques terrestres et gouvernant leur évolution.

■ Subduction.

Les zones de subduction jouent un rôle fondamental dans la géodynamique globale de la Terre puisqu'elles sont le lieu de formation et de destruction de vastes volumes de croûte terrestre et le lieu d'activités sismiques et volcaniques intenses. Cependant, elles restent mal comprises du fait de l'énorme complexité des phénomènes mis en jeu. Les progrès que nous pouvons réaliser dans la compréhension des mécanismes agissant dans les zones de subduction, et dans l'établissement des bilans de masse qui en résultent, passent par une approche multidisciplinaire associant

géodynamiciens, tectoniciens, numériciens, pétrologues, géochimistes, expérimentateurs, sismologues. Cela passe aussi par l'observation et la comparaison concernant les témoins fossiles et les différents modèles théoriques suggérés par les numériciens. Compte-tenu de l'expérience acquise par la communauté française sur le sujet, il est proposé de fédérer les recherches autour de quelques questions fondamentales :

- importance et rôle de la friction apparente sur le plan de subduction et cycle sismique ;
- détermination de la distribution des isothermes dans le coin mantellique, effets sur l'hydratation et l'érosion ou accréation sub-lithosphérique, couplages visqueux slab/manteau ;
- détermination des temps caractéristiques de transfert d'éléments, relation entre mécanisme de transfert des éléments chimiques et structure thermique du coin mantellique, contraintes quantitatives de la pétrologie expérimentale sur les mécanismes de fusion et déshydratation et sur les partages d'éléments traces lors de ces processus ;
- quantification des flux entrée/sortie, détermination des bilans de masse en résultant. Effets à long terme du recyclage de croûte dans le manteau ;
- contrôle de la plaque plongeante sur le régime tectonique de la plaque supérieure, relation entre paramètres caractéristique (pendage, âge, cinématique, ...) ;
- dynamique du manteau au voisinage des subductions et assimilation des plaques plongeantes ;
- convection à grande échelle.

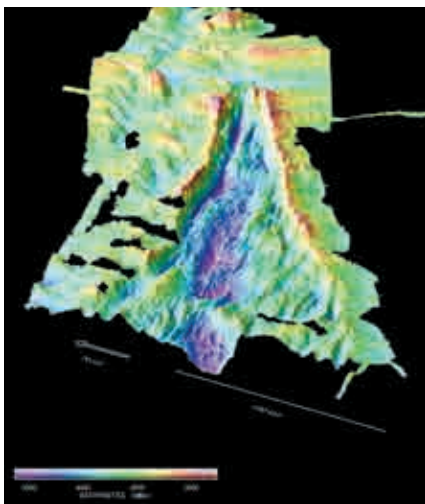
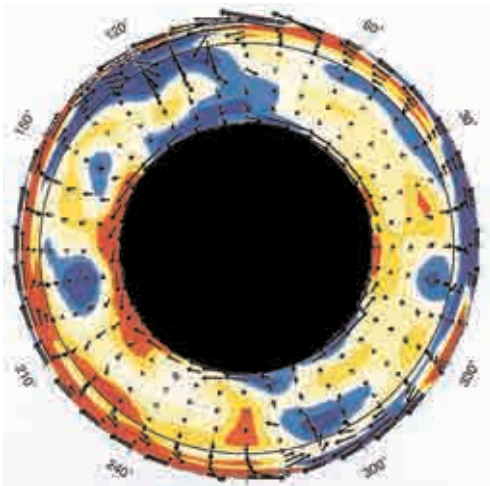
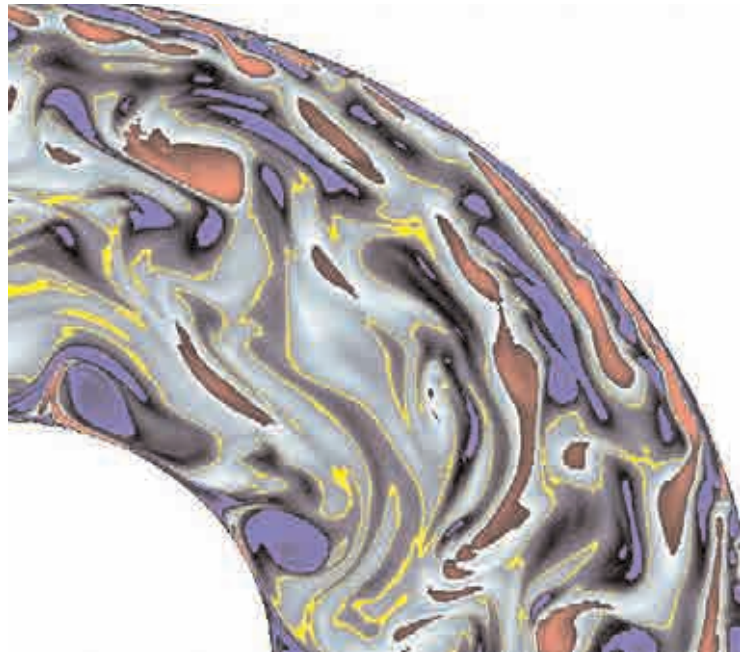


Image bathymétrique du point triple de Rodriguez vu dans l'alignement de la dorsale sud-ouest indienne. Les escarpements de sa vallée axiale sont hauts de 3000 mètres. © east-cnrs

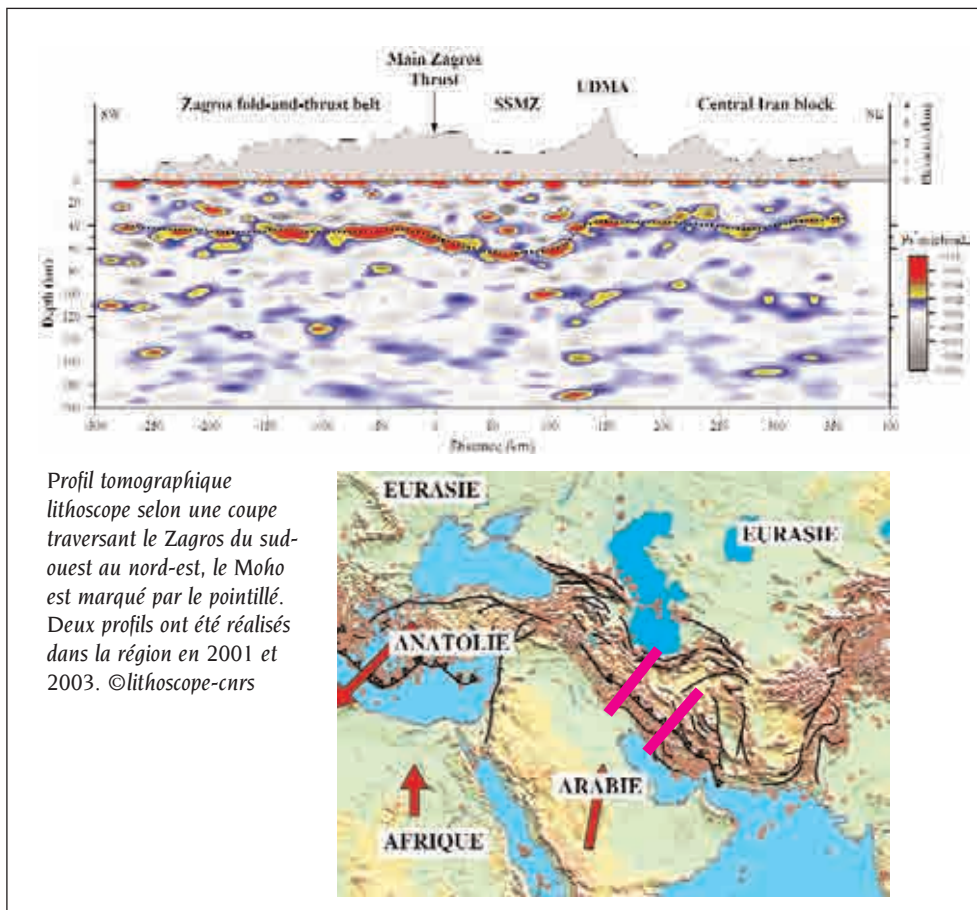
Ecosystème hydrothermal se la zone Lucky Strike, dorsale atlantique. © Ifremer, campagne atos



Modèle tomographique reliant vitesses sismiques, anisotropie et dynamique du manteau dans le plan équatorial (en rouge les zones chaudes et moins denses, en bleu les zones froides et plus denses). © Département de sismologie/ipgp-cnrs



Expérience numérique montrant l'aspect tourbillonnaire de l'écoulement dans le plan équatorial du noyau liquide. Le fluide tourne dans le sens horaire dans les régions bleues et dans le sens antihoraire dans les régions rouges. Cet écoulement se prolonge par des tubes au-dessus et en-dessous du plan équatorial. © Igit-cnrs



Profil tomographique lithoscope selon une coupe traversant le Zagros du sud-ouest au nord-est, le Moho est marqué par le pointillé. Deux profils ont été réalisés dans la région en 2001 et 2003. © lithoscope-cnrs

érosion

Première partie

*Observer, comprendre, modéliser
le système Terre et les planètes*

A .3a -Dynamique
et évolution de la
surface terrestre
- Reliefs de la
Terre

• *Reliefs de la Terre*

• *Enjeux de la recherche* • *Bilan des*

connaissances et place de la communauté

française • *Axes prioritaires*

• *Aux frontières de cette prospective*

relief
climat
transp
flux
topographie

• Dynamique et évolution de la surface terrestre

Le relief est une interface entre la Terre interne, l'hydrosphère, et l'atmosphère, par laquelle transitent d'énormes flux hydrologiques, sédimentaires et chimiques. Cette interface est donc, par certains côtés, unique et représentative de la diversité des processus géologiques, qu'ils soient climatiques, tectoniques ou même hydrologiques, qu'ils soient continentaux ou océaniques. Le relief est aussi un paramètre de la dynamique de ces processus, dans ce qu'on appelle classiquement des rétroactions. L'hydrologie de surface, les circulations océaniques, le climat et évidemment la tectonique ont une dynamique où le paramètre "relief" joue un rôle important même à grande échelle. La contribution de l'érosion et des flux sédimentaires au cycle du carbone est un autre grand enjeu des études sur les reliefs de la Terre qui participe à une compréhension globale des processus régulant une partie de la chimie des océans et le climat à long terme.

La surface de la Terre n'est pas un objet géologique comme les autres. C'est avant tout le lieu d'habitat de l'homme ce qui lui confère un degré de fascination particulier, quasi atavique, en fait un élément fondamental de l'histoire de l'humanité, et lui donne une accessibilité unique. A ce titre, la dynamique des reliefs devrait être l'un des processus géologiques les plus contraints. S'il ne l'est pas et s'il reste encore beaucoup à faire au niveau de la compréhension des processus élémentaires, physiques, chimiques et biologiques, c'est sans doute parce que la dynamique des reliefs cumule le désavantage d'une évolution moyenne lente, avec toutes les difficultés inhérentes en termes de mesure, sous l'effet de forçages dont certains sont extrêmement rapides et variables dans le temps et l'espace. Enfin, l'étude des reliefs est un excellent exemple de collaborations multidisciplinaires où interviennent à la fois les tectoniciens, géomorphologues, sédimentologues, hydrologues, géochimistes, climatologues. Les exemples de collaborations initiées ces dernières années dans des programmes français comme le Programme National sur les Sols et l'Erosion ou ECLIPSE ont été, sous certains aspects, exemplaires des futures collaborations scientifiques qui se mettront en place dans le cadre des études sur l'environnement.

Dans la suite de cette prospective, seront développées les thématiques centrales à la dynamique des reliefs qui concernent la quantification des flux de matière qui circulent sur cette interface, et les implications de ces transferts sur la dynamique interne – tectonique principalement mais pas seulement –, et externe – l'évolution du climat notamment – de la Terre. Le terme "érosion", forcément central dans cette thématique, sera pris dans son acceptation la plus large, et la plus encyclopédique, c'est-à-dire le transport de sédiments et d'éléments dissous sur le relief terrestre de la mise en mouvement au dépôt. Ce parti pris est restrictif par rapport au strict intitulé de cette prospective ; il existe un champ très large de thèmes de recherche, en tectonique, hydrologie, océanographie, biologie, sciences humaines (le risque, l'aménagement des territoires, ...) ou dans des sciences très fondamentales (théorie du chaos, physique statistique, ...) , où le relief joue un rôle comme résultante d'une dynamique ou comme paramètre de contrôle, qui ne sont pas abordés in extenso dans ce chapitre. Pour ces questions, nous renvoyons à d'autres éléments de la prospective.

Philippe Davy

Christian France-Lanord

Jean-Philippe Avouac,

Nadine Elliouz,

Jérôme Gaillardet,

Yves Goddérès,

François Guillocheau,

Yves Lagabrielle,

Jérôme Lavé,

François Métivier,

Patrick Pinet

A-Reliefs de la Terre

Bilan des connaissances et place de la communauté française

■ Les études sur la géomorphologie en lien avec les variations climatiques ou la dynamique lithosphérique ont pris depuis une dizaine d'années une place très importante dans les sciences de la Terre. Le nombre croissant de sessions consacrées à la dynamique des reliefs, ou aux grands cycles biogéochimiques, dans les grands congrès de l'AGU, de l'EUG ou de l'EGS est là pour en témoigner. La décision récente de l'AGU de créer un nouveau journal entièrement dévolu à la surface de la Terre (JGR Earth Surface)¹ démontre que cette thématique a acquis le statut de "discipline" au sein des sciences de l'Univers.

■ Le dynamisme de cette "discipline" rend difficile un recensement exhaustif des connaissances et même des thématiques abordées. Nous avons déjà mentionné les liens naturellement forts avec de nombreuses disciplines connexes qui font que les centres d'intérêt de la communauté sont multiples et peuvent rapidement évoluer. Dans les dix dernières années, les questions scientifiques majeures étroitement reliées à l'érosion et à la dynamique des reliefs se sont focalisées autour de quatre grands thèmes :

- les mécanismes physiques de l'érosion et du transport, et leur expression dans la topographie ;
- les cycles biogéochimiques, notamment à l'échelle globale ;
- les couplages entre tectonique et érosion ;
- les couplages entre l'érosion, le relief et le climat, cycle du carbone et rétroaction climat-tectonique.

■ Sur ces thématiques, le poids des équipes américaines, même en relatif, est extrêmement important sans doute parce que la communauté des sciences de la Terre a su massivement s'orienter vers ces questions, et aussi parce qu'elle a su naturellement établir des ponts avec la recherche en génie civil sur les mécanismes de l'érosion, et avec les

géographes qui, dans les années 40-50, ont été les pionniers dans la construction d'une géomorphologie quantitative.

■ Il faut aussi souligner l'originalité et l'activité de la communauté française qui a obtenu des résultats reconnus dans de nombreux domaines, de l'échelle du minéral à l'échelle globale, sous les aspects physiques aussi bien que chimiques. Cette mobilisation des chercheurs en sciences de la Terre, plutôt exceptionnelle si on se réfère aux autres pays de l'union européenne, date de plus de 10 ans avec la création du programme DBT "Fleuve et érosion" par l'INSU. Ce programme, relayé ensuite par le Programme National sur les Sols et l'Erosion a structuré une communauté de géochimistes et de géophysiciens sur plusieurs problématiques (bilans géochimiques, modélisation de l'érosion, relations climat-tectonique et climat-relief...) et sur quelques chantiers emblématiques (les grands fleuves, l'Amazonie, l'Himalaya, ...). Ces thématiques touchent également d'autres programmes comme ECLIPSE pour les aspects forçage tectonique du climat passé, le Programme National de Recherche en Hydrologie pour les aspects dynamique des rivières et plus marginalement le programme "Intérieur de la Terre", le GdR Marges et le programme de Planétologie. Notons qu'il existe une longue tradition française d'étude de l'érosion, notamment à l'échelle globale (ex. Fournier, 1960, Climats et érosion), qui a sans doute été un élément important dans ce développement récent. Enfin, l'implication de l'IRD sur plusieurs chantiers "grands fleuves" en Afrique et Amérique latine a été un point fort de la recherche française dans un domaine où l'acquisition de données sur le long terme est fondamentale.

■ Sans être exhaustif, le bilan des actions et des compétences développées en France fait apparaître quelques résultats remarquables :

■ *Les bilans d'érosion sur des bassins fluviaux sélectionnés pour leur importance globale ou leurs caractéristiques particulières ont permis de mieux comprendre l'importance des divers paramètres de contrôle de l'érosion (écoulement, température, tectonique, lithologie...). Ainsi, la connaissance des relations entre flux d'altération des silicates, température, relief*

¹ Extrait du site web de l'AGU concernant le "JGR Earth Surface": "This new section will focus on surficial processes; in particular, the physical, chemical, and biological processes that affect the form and function of the surface of the solid Earth over all temporal and spatial scales."

• Dynamique et évolution de la surface terrestre

et érosion physiques a significativement progressé, et nous commençons désormais à posséder des lois quantitatives gouvernant les flux d'altération chimique ou de consommation de CO₂ par l'altération des roches. Ces lois permettent de mieux comprendre les grands rétrocontrôles dont la surface de la Terre est le siège, en particulier le lien entre climat et érosion. L'incorporation de ces lois dans les premiers modèles couplant l'évolution séculaire de l'altération, de l'érosion, de la quantité de CO₂ atmosphérique et du climat a permis de montrer l'extrême importance de l'altération sur l'évolution du climat de la Terre. Par exemple, la connaissance de l'érosion des formations basaltiques et son rôle en tant que puits du carbone atmosphérique est maintenant bien quantifiée. La relation entre les flux d'altération et les flux d'érosion physique, observée à différentes échelles et sur la plupart des grands bassins versants, montre un véritable couplage entre processus physiques et chimiques encore largement inexpliqué. Les bilans chimiques et isotopiques effectués en outre dans les bassins versants permettent d'apporter des contraintes sur les modalités et les flux du transport physique, comme par exemple, le transport des charges de fond de rivière. Enfin, sur les bassins marqués par un fort transport sédimentaire, le flux de carbone organique particulière apparaît comparable à celui de l'alcalinité dissoute dérivée des roches silicatées, soulignant ainsi un autre processus lié à l'érosion et agissant sur le cycle du carbone.

■ **Les bilans sédimentaires** réalisés notamment dans les bassins sédimentaires dans et autour de l'ensemble Himalaya-Tibet ont permis de reconstruire la dynamique de l'érosion et de poser concrètement la question des influences respectives du climat et de la tectonique. Sur l'ensemble Himalaya-Tibet, ces bilans montrent une diachronie importante entre la collision et l'initiation de la sédimentation. L'étude sédimentologique et géochimique des archives sédimentaires, interprétées à la lumière de la connaissance des systèmes actuels, a permis de reconstituer les principaux mécanismes d'érosion, les sources et les conditions environnementales de l'altération.

■ **La modélisation numérique et expérimentale**, inclus analogique, des processus d'érosion et de transfert sédimentaire a bénéficié d'un programme important d'investissement de l'INSU, notamment via le soutien à l'acquisition de moyens mi-lourds. Au moins 3 équipes françaises (Rennes, Paris, Grenoble) ont développé des laboratoires expérimentaux plutôt dédiés à une modélisation analogique des processus érosifs et de transport sédimentaire. Plusieurs codes de calcul ont aussi été développés (EROS à Rennes, CASCADE à Grenoble) qui complètent parfaitement le travail expérimental et de terrain mené par les chercheurs. Bien que jeune et peu nombreuse, cette communauté commence à avoir une place reconnue internationalement

■ **La quantification des vitesses locales d'érosion** –

pour elles-mêmes ou comme proxy de surrection tectonique – a été réalisée par plusieurs équipes en France (Paris, Orsay, Grenoble, Marseille, Nancy) avec des méthodes différentes et complémentaires. La principale méthode, qui consiste à utiliser des objets géomorphologiques continus (terrasses fluviales et marine, cônes alluviaux ...) comme des marqueurs passifs de la déformation, a bénéficié depuis une quinzaine d'années de deux avancées techniques majeures : à la fois de nouvelles méthodes de datations (¹⁴C en AMS, isotopes cosmogéniques, OSL) des objets géomorphologiques, et des outils performants de mesure de la déformation enregistrée par ces objets (MNT, théodolite et distance-mètre laser, GPS cinématique). Alternativement, et bien que d'utilisation plus délicate, les marqueurs dynamiques de la déformation (profils de diffusion au travers de bord de terrasses, profils de rivière au travers d'une structure active ou d'une chaîne de montagnes) offrent un potentiel important notamment pour caractériser des vitesses de soulèvement relatives sur une large échelle spatiale. Ces deux méthodes ne permettent néanmoins d'accéder qu'à des vitesses d'incision sensu stricto (traduite en terme de soulèvement moyennant l'hypothèse que la structure active étudiée est en équilibre dynamique). La caractérisation du soulèvement passe par la mise au point de paléo-altimètres, domaine encore en développement mais dans lequel la communauté française se montre active.

■ **La compréhension de la dynamique des reliefs sous-marins** liés à tous les grands systèmes géodynamiques (accrétion, subduction, marges passives, points chauds) a beaucoup progressé en 10 ans. Les mécanismes tectono-volcaniques créateurs de reliefs pour chacun des systèmes ont été analysés ; les rôles respectifs de la production magmatique et des taux d'accrétion (vitesse des plaques) ont été démontrés, et évalués dans le cas des dorsales rapides, lentes et ultra-lentes et dans les interactions dorsales-points chauds. La compréhension des mécanismes de transferts sédimentaires des fleuves aux deltas côtiers et sous-marins et le rôle des instabilités des pentes sous-marines a fortement progressé, grâce à un effort pluriorganisme (Rhône-Méditerranée, Nil, Zaïre, Angola,...). L'étude des marges actives, notamment l'Amérique du Sud et la Nouvelle-Zélande, a mis en évidence une érosion sous-marine très active et un fort couplage érosion/dépôt/déformation. Il a été confirmé que les marges convergentes permettent le retour vers le manteau d'un stock de matériaux issus de l'érosion qui peut être considérable.

■ **Les relations relief-érosion-climat** ont été abordées sous différents angles. Sur les bassins actuels, en particulier en Himalaya, le traçage direct et la modélisation de la distribution de l'érosion mettent en lumière l'importance des facteurs climatiques et topographiques dans le contrôle de l'érosion physique. La maîtrise de ces relations permet d'utiliser les flux d'érosion déduits des dépôts (volume des cônes alluviaux, terrasses fluviales, moraines glaciaires, ...) pour reconstituer la

paléo-hydrologie d'un bassin. Enfin, le contrôle à long terme du climat à travers le cycle du carbone est une motivation centrale de l'étude de l'altération des grands bassins déjà mentionnée. Les travaux français ont notamment mis en lumière le rôle de l'altération des reliefs volcaniques et l'importance de l'enfouissement de la matière organique associé à l'érosion des grands reliefs.

■ Dans ce domaine des sciences, comme dans beaucoup d'autres, les développements techniques et méthodologiques sont souvent au cœur des grandes découvertes. Les mesures de la topographie, des vitesses d'érosion, et maintenant des paléoreliefs comme l'utilisation des traceurs géochimiques pour estimer les flux d'érosion chimique et physique sont au centre des recherches menées dans les dernières années. Les équipes françaises ont ainsi participé à de nombreux développements méthodologiques ou techniques qui ont permis d'élargir grandement les champs d'action des projets.

■ **Développement d'outils géochimiques d'étude du relief et de l'érosion.** Les équipes françaises ont contribué à une meilleure compréhension des traceurs isotopiques dont le bilan océanique est dominé par l'apport des fleuves, tels que le B, C, Os, Sr ou encore U. Grâce à ces études, l'utilisation de ces traceurs globaux pour reconstituer les flux d'érosion passés est mieux maîtrisée et permettra une meilleure approche par modélisation. Les équipes françaises se sont aussi investies pour développer des outils de datation des processus et objets géomorphologiques, des traceurs des temps d'exposition (^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^3He , ^{21}Ne , OSL), des marqueurs thermochronologiques de basse température (U–Th/He, traces de

fission, ...), ainsi que des traceurs de temps de transfert (chaîne isotopique de l'uranium). Ces outils sont essentiels pour comprendre et quantifier l'évolution temporelle des reliefs.

■ **Obtenir une meilleure résolution de la topographie terrestre** a, par exemple, prévalu lors de la définition des spécifications techniques du satellite Spot 5 lancé en 2002. L'action combinée du CNES – et de sa filiale Spot Image – et de la NASA, permettra à la communauté scientifique de disposer d'un Modèle Numérique de Terrain (topographie digitalisée) à peu près complet du globe, avec une résolution horizontale de 10 à 30 m, et une précision verticale décimétrique. En domaine océanique, les cartes de bathymétrie prédite (couplage sondes bathymétriques et altimétrie satellitaire) permettent d'obtenir une carte mondiale du relief (Toulouse, LEGOS, IRD, INSU, CNES GRGS) et ainsi d'en comprendre les grands structures. Des progrès considérables ont aussi été accomplis pour produire localement une bathymétrie de très haute résolution. Le développement de la géodésie, c'est-à-dire de la mesure des vitesses actuelles, horizontales et verticales, du relief a aussi constitué une avancée pour la quantification des processus ; la géodésie fond de mer est en voie de développement par l'INSU et l'IFREMER. Dans le domaine côtier, les progrès les plus spectaculaires sont réalisés grâce à l'obtention de données bathymétriques très précises par sondeur multifaisceaux de petits fonds qui permettent de visualiser à haute résolution, les corps sédimentaires, les arrachements, les glissements, les failles actives et les terrasses des anciens stades glaciaires.

■ **Notons enfin les programmes planétaires** où le relief constitue pour des raisons évidentes un sujet d'étude privilégié. L'étude des très médiatiques structures d'érosion sur Mars est un domaine où la communauté française joue un rôle important.

Les axes prioritaires

L'exercice présenté vise à définir les axes prioritaires qui pourraient faire l'objet d'une programmation spécifique de l'INSU. Il se place dans le cadre d'une prospective en Sciences de la Terre, et concerne évidemment au plus haut point la division SIC de l'INSU.

■ Plusieurs programmes actuels de l'INSU sont concernés de près ou de loin, soit via leurs objets d'étude (le GdR MARGES ou le PNP par exemple), soit par des liens plus systémiques (le climat et

l'environnement géologique pour ECLIPSE ; la dynamique interne pour DyETI). La mise en place d'un programme spécifique sur l'étude des reliefs et des transferts de matière à la surface de la Terre se justifie par la nécessité de focaliser sur la compréhension des mécanismes physiques et chimiques, et sur la quantification des flux. Il se positionne en complément des programmes existants.

■ Ce rapport tient compte de l'appréciation des différents membres du comité de rédaction ; il en a la richesse et les limites.

• Dynamique et évolution de la surface terrestre

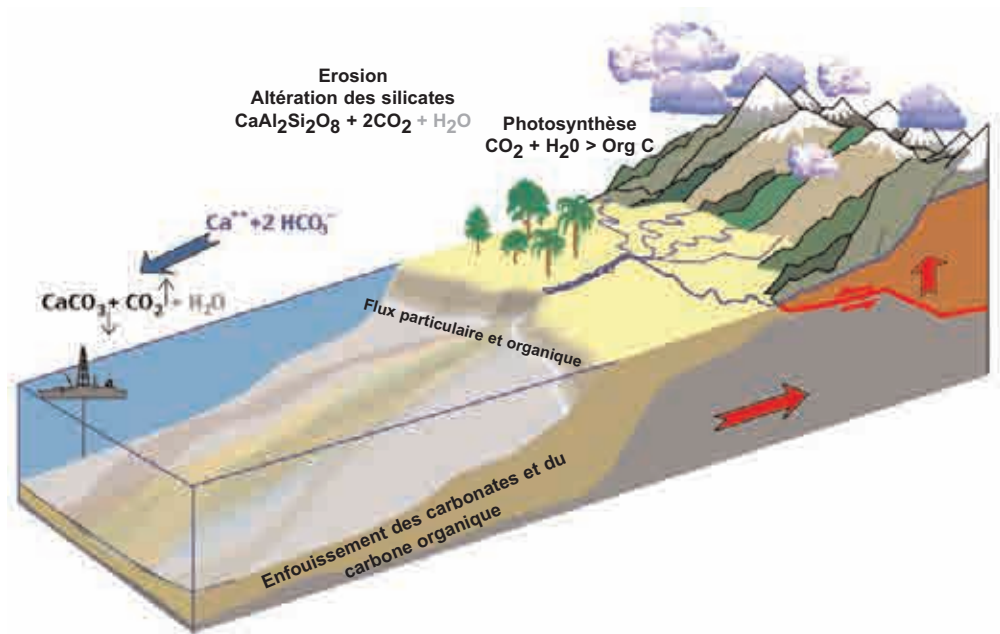
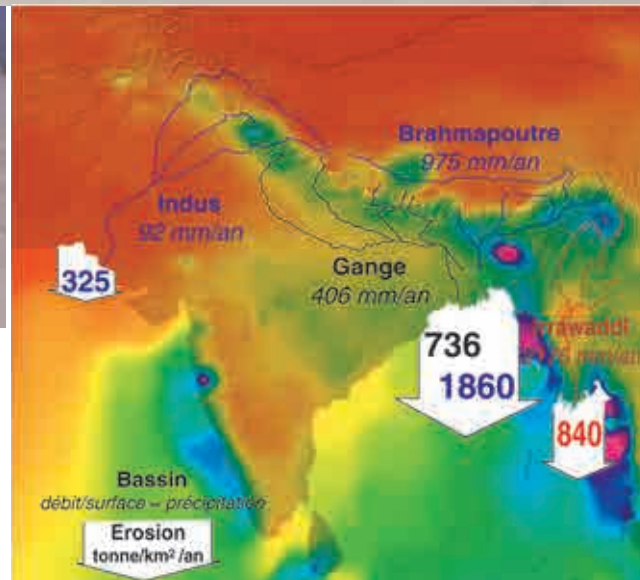


Schéma du forçage
tectonique du cycle du
carbone

Expérience
d'écoulement-érosion
© iggp-cnrs

Représentation 3D du
bassin de Paris
© Géosciences Rennes
- cnrs



Exemple d'érosion active en milieu aride. (nord-est du plateau tibétain) © cnrs

Expérience analogique d'érosion
© Géosciences Rennes - cnrs

Flux d'érosion total des principaux fleuves himalayen et précipitations annuelles. A l'exutoire de chaque fleuve, on indique les précipitations annuelles moyennes sur l'ensemble du bassin drainé, ainsi que l'érosion annuelle moyenne exprimée en tonne/km²
© crpg-cnrs

• Dynamique et évolution de la surface terrestre

Les processus élémentaires de l'érosion

La compréhension des processus qui font l'érosion, dans son acception large i.e. y inclut le transfert de sédiment et son dépôt, est évidemment au cœur de la thématique "relief". La recherche afférente est sous-tendue par plusieurs questions fondamentales ou points méthodologiques :

- **la connaissance des processus élémentaires**, des échelles pertinentes, des paramètres de contrôle, et des conditions d'existence de processus concurrents (à l'instar du transport fluvial granulaire) ;
- **la modélisation de ces processus**, expérimentale ou numérique, et le problème du transfert d'échelle ;
- **la détermination des éléments de dynamique** (temps ou échelles caractéristiques, non-linéarités et effets de seuil, régimes permanents et transitoires, instabilités propres, ...)
- **la quantification des flux d'érosion** actuels et passés à partir des archives sédimentaires et de traceurs géochimiques ;
- **le choix de laboratoires naturels pertinents** – à l'instar du GPS ou de la sismicité, la notion d'observatoire pourrait être étendue à la géomorphologie avec une réflexion sur la définition des sites, sur l'instrumentation, sur la fréquence et la durée.

Cette réflexion doit bien évidemment prendre en compte la forte variabilité des systèmes naturels, climatiques ou tectoniques, et l'impact sur les processus d'érosion et sur les flux. La quantification de la contribution des événements climatiques extrêmes, les conséquences des alternances climatiques ou les variations "haute fréquence" de la tectonique sont autant de problématiques qui méritent d'être traitées en tant que telles. Nombre de modèles simples ont été proposés jusqu'à aujourd'hui pour décrire les lois d'érosion ; mais ils peinent à rendre compte de tous les phénomènes en jeu tant au niveau de la sensibilité au caractère stochastique des flux que de l'importance relative des différents processus physiques élémentaires. La communauté se trouve de fait confrontée à un paradoxe majeur : prendre en compte la complexité et la variabilité des phénomènes, tout en débouchant sur une loi "d'utilisation universelle", c'est-à-dire sans le recours à un nombre important de paramètres d'ajustement locaux. La démarche expérimentation / modélisation / quantification doit être généralisée pour prendre en compte cette spécificité inhérente à beaucoup de

phénomènes naturels.

Parmi les processus sur lesquels un effort important de recherche doit être mené, on peut citer :

L'érosion mécanique

Les phénomènes liés à l'érosion mécanique sont sans doute les mécanismes les plus étudiés du fait de leur importance sociale et économique (érosion des terres agricoles, ...) et de leurs liens forts avec plusieurs risques naturels (crues, inondations, glissements de terrain). L'érosion mécanique représente la plus forte proportion des flux terrigènes actuellement exportés vers l'océan mondial. Ses mécanismes sont en fait multiples, et vont des processus de versants – e.g. l'érosion des sols, les glissements de terrain, la gélifraction, etc. – jusqu'au transport alluvial et à l'abrasion fluviale.

Les processus de versants ont fait l'objet de nombreuses études tant qualitatives que quantitatives. Des lois phénoménologiques ont en particulier été recherchées pour quantifier le ruissellement et l'érosion des sols, même si l'intégration de la variabilité spatiale et temporelle reste très discutée. Dans les zones à faible érosion ou à érosion modérée (<0.1 mm/an), l'érosion est en général étroitement couplée à la dynamique du sol, qui joue un rôle déterminant par sa capacité à transformer le substrat rocheux en matériau aisément mobilisable. La caractérisation et la quantification de ces couplages entre processus mécaniques, chimiques ou biologiques sont un enjeu des futures recherches. Dans les zones montagneuses soumises à des vitesses d'érosion fortes (>0.5 mm/an), l'évolution des versants est en grande partie contrôlée par les glissements et mouvements de terrain et, pour les zones d'altitude, par l'érosion glaciaire. L'étude de ces mécanismes relève autant des problématiques "risque naturel" que géomorphologiques (lien avec la fracturation et l'altération, conséquences sur l'incision fluviale et sur l'évolution du réseau hydrographique, ...).

Le transport fluvial a été surtout étudié par la communauté des ingénieurs en hydraulique et hydrodynamique. Malgré de très nombreuses études, plusieurs aspects des lois du transport, *a fortiori* dans leurs conditions naturelles et géologiques, échappent encore à ces efforts de conceptualisation. Trois axes sont actuellement poursuivis par la communauté française :

- l'utilisation d'expériences, modèles simples mais

bien instrumentées qui permettent des mesures exhaustives des paramètres susceptibles d'entrer en jeu ;

- l'intégration des lois de transport couplées aux processus de versant dans des modèles numériques d'évolution du paysage afin notamment de tester les réponses complexes aux forçages tectoniques ou climatiques du réseau hydrographique ;

- et la mesure simultanée des flux de sédiments (suspension et charge de fond) et des débits sur des rivières naturelles qui, en complément des deux approches précédentes, doit permettre une validation des modèles proposés. La mesure des flux de charge de fond sur les grands fleuves reste un défi métrologique.

■ L'érosion chimique

L'érosion chimique, encore plus que l'érosion physique souffre d'une absence de formalisme permettant le développement d'une approche prédictive de son importance. Si le rôle qualitatif de la température commence à être bien appréhendé, aucune loi cinétique n'est réellement satisfaisante et nous comprenons encore mal le rôle de certains paramètres. C'est typiquement le cas de la biomasse dont la productivité peut agir positivement (via l'action des bactéries du sol) ou négativement (via la rétention des sols) sur l'altération des roches. Faute de traceurs biogéochimiques adéquats, cette indétermination ne peut être levée.

■ A l'instar du rôle de la végétation, les modalités du couplage entre érosion physique et altération/érosion chimique restent à élucider. Par sa capacité à renouveler et augmenter les surfaces soumises à l'altération, l'érosion physique est un des facteurs qui contrôlent l'érosion chimique, les autres étant associés aux écoulements dans le milieu poreux. A l'inverse une exposition prolongée à l'altération fragilise la roche ou les fragments de roches et facilite d'autant des phénomènes tels que l'abrasion. Une quantification de ces interactions est clairement un objectif fondamental.

■ L'érosion glaciaire

Dans le couplage entre érosion et climat, l'érosion glaciaire est un processus de premier ordre, dont le rôle n'a pas encore été suffisamment élucidé. La mécanique d'écoulement des glaciers, bien que complexe, a fait l'objet de nombreuses études. Par contre la quantification de la mécanique de l'abrasion sous-glaciaire reste essentiellement schématique, voire mal connue, car dépendant de nombreuses

variables : température du glacier, pente, taux d'adhérence de la glace. Pourtant cette abrasion a un rôle déterminant durant les périodes glaciaires évidemment mais aussi après car l'évacuation des produits de l'érosion sous-glaciaire a une incidence forte sur les transferts dans le réseau hydrographique même loin en aval des glaciers. L'alternance dans une même vallée de phases englacées et de phases " fluviales " et la manière (et les temps de réponse associés) dont la vallée répond et se rééquilibre sont des questions fondamentales pour comprendre la dynamique des reliefs des chaînes récentes (Alpes, Andes, Himalaya).

■ D'une manière générale, l'érosion glaciaire souffre d'une très grande faiblesse de mesures *in situ* ; le développement de nouvelles techniques permettant une mesure directe de l'abrasion des glaciers serait le bienvenu. L'étude de l'incision glaciaire sur le long terme peut permettre d'apporter des éléments de réponse, en particulier en confrontant mesures géomorphologiques (topographie et datations cosmogéniques) avec des modélisations numériques d'évolution des paysages intégrant la dynamique et l'érosion glaciaire.

L'absence de modélisation expérimentale rend aussi le travail de conceptualisation assez difficile ; les recherches sur l'abrasion de façon générale doivent absolument être encouragées, et ceci pour toutes les échelles de temps.

■ L'érosion éolienne

Au même titre que l'érosion fluviale et glaciaire, l'érosion éolienne mérite d'être étudiée pour ses conséquences sur la dynamique de certains systèmes remarquables (déserts, dunes, dépôts loessiques, ...), et pour sa spécificité physique qui associe la mécanique des fluides avec celle des milieux granulaires. C'est aussi le mécanisme d'érosion des planètes sans phase liquide ce qui donne une fois de plus à ces perspectives une extension évidente vers la planétologie.

■ La physique du transport éolien et de l'abrasion connaît un regain d'activité notamment de la part de la communauté des physiciens. Des jeunes équipes mènent des travaux très intéressants sur la dynamique des champs de dunes et le transport du sable, avec une approche à la fois expérimentale, numérique et théorique. Ces travaux méritent d'être poursuivis en développant les associations avec les équipes de géologie, sédimentologie, géophysique, voire avec les

• Dynamique et évolution de la surface terrestre

biologistes pour les interactions dunes-végétation.

■ Le transport éolien représente aussi un flux de matière important qui doit être mieux quantifié notamment d'un point de vue géochimique. de dépôts de loess en termes de dépôts et d'évolution de sol, concernant " l'exo-géomorphologie " pour ce qui est des planètes sans phases liquides à leur surface.

■ L'érosion littorale et sous-marine

La contribution de l'érosion à la création du relief sous-marin est en général considérée comme faible devant celle des processus géodynamiques internes. Mais cette assertion mérite d'être réexaminée ; le littoral, les deltas et les canyons sous-marins représentent par exemple des environnements où de toute évidence les processus d'érosion et de transport sédimentaire ont un impact fort sur les formes du relief et leur évolution.

■ Le littoral pris au sens large comme une interface entre le milieu marin et le domaine émergé est le siège à la fois d'importants transferts de matière (y inclus mais pas seulement l'apport des fleuves continentaux) et d'une érosion très efficace liée à la dynamique océanographique sensu lato. Cela se traduit par une forte variabilité du trait de côte, une érosion active du plateau continental et des structures côtières émergées, etc. La formulation du problème du transport et les questions scientifiques afférentes sont proches de celles formulées pour l'érosion mécanique avec comme particularité le couplage entre les mouvements hydrodynamiques énergétiques (marée, déferlement, etc.) et le transport sédimentaire. Si cette problématique intéresse de nombreuses équipes et organismes, la recherche n'apparaît pas toujours suffisamment intégrée et il subsiste encore de fortes barrières disciplinaires et institutionnelles. Il apparaît donc essentiel de réussir un meilleur lien entre les systèmes continentaux, côtiers et océanographiques, et de pouvoir mobiliser l'ensemble de la communauté et des moyens afférents en dépassant les clivages interdisciplinaires.

■ Le milieu estuarien et deltaïque est aussi un formidable réacteur chimique où les flux d'érosion (dissous, particuliers et organiques) réagissent en se mélangeant au milieu marin – par exemple une très large partie de flux organique terrigène semble être oxydé avant d'atteindre les dépôts sédimentaires. Les processus impliqués modifient l'impact global de l'érosion sur l'océan, mais ils restent encore mal maîtrisés. L'étude expérimentale de mécanismes et le

suivi des flux à travers l'interface littorale est donc nécessaire pour quantifier l'impact de l'érosion sur la chimie des océans.

■ En domaine profond, les mécanismes d'érosion sont encore très mal compris et modélisés. La dynamique turbiditique et la formation des canyons sous-marins, le transfert des sédiments en grande profondeur, le couplage avec l'hydrodynamique océanographique et avec la tectonique, sont autant de questions qui méritent d'être étudiées. La démarche d'expérimentation et de modélisation qui a été commencée par quelques équipes françaises mérite d'être poursuivie en complément d'études géophysiques et sédimentologiques.

■ Les couplages

■ En termes de dynamique, le relief apparaît l'élément central d'un certain nombre de couplages. Les travaux récents montrent la grande imbrication des phénomènes tectoniques et climatiques dont il est nécessaire, à terme, d'avoir une approche globale. Mais l'importance relative des différents couplages, et les centres d'intérêt des communautés scientifiques impliquées, font que le problème a été à juste titre subdivisé en plusieurs questions. Nous aborderons la question spécifique des couplages entre érosion et tectonique, et érosion et climat. Nous traiterons spécifiquement du couplage érosion/climat à l'échelle globale qui, à ces échelles de temps, est très fortement relié au cycle du carbone.

■ Le couplage érosion-tectonique

La surface terrestre représentant la condition aux limites supérieure du système tectonique, l'érosion et le transfert de flux sédimentaires sont évidemment des composantes à part entière de la mécanique de la lithosphère. La distribution des vitesses d'exhumation dans la lithosphère, celle des températures et donc du métamorphisme, sont autant de paramètres qui dépendent directement des vitesses d'érosion. Pourtant on est encore qu'au début de l'évaluation de l'impact réel de la dynamique géomorphologique sur la tectonique, en particulier parce que l'érosion et le flux sédimentaires sont souvent modélisés de façon caricaturale, voire sous-estimés, dans les modèles thermo-mécaniques de lithosphère.

■ La localisation de la déformation est une conséquence attendue de couplage, dont le mécanisme – l'érosion et le transfert sédimentaire

agissent directement sur la redistribution des masses à la surface de la Terre et donc sur la répartition des contraintes gravitaires – a été mis en évidence par plusieurs études numériques et théoriques. Mais des questions importantes restent en suspens qui concernent les échelles de ce couplage (faille, chaîne de montagnes, continent, ...) et la caractérisation de la compétition qui existe entre deux dynamiques – géomorphologique et tectonique – qui n'ont ni les mêmes constantes de temps, ni les mêmes géométries. A ce titre, la dynamique 3D du réseau de drainage mériterait d'être mieux étudiée et prise en compte pour ses conséquences sur les flux et sur l'évolution des chemins d'exportation des sédiments ; la capture des grands systèmes endoréiques observés sur la plupart des plateaux continentaux peut considérablement augmenter l'exportation des flux sédimentaires hors du système tectonique.

Le couplage érosion / tectonique a aussi une composante climatique qu'il faut prendre en compte. Les phénomènes orographiques représentent l'illustration la plus évidente de ces rétroactions ; leurs impacts sur la tectonique et l'érosion méritent d'être quantifiés et modélisés.

■ Le rôle de l'érosion sur le climat et le cycle du carbone.

Si le rôle de l'altération chimique des silicates, et le puits de CO₂ qu'il génère, est reconnu classiquement comme un facteur essentiel de l'évolution long terme du climat, la manière dont cette altération est contrôlée par différents facteurs endogènes ou exogènes reste un enjeu important tant qualitatif que quantitatif. Le couplage érosion mécanique / altération, longtemps négligé par la communauté scientifique, peut en particulier jouer un rôle important sur la régulation du cycle du carbone. L'impact de la biosphère sur l'altération, et d'une manière plus large les rétroactions climat-altérations, restent encore mal maîtrisés dans les modèles. Enfin le rôle de l'érosion sur la partie "organique" du cycle du carbone, qui est importante dans les systèmes à fort transport particulaire, doit faire l'objet d'une meilleure quantification.

■ Il est donc nécessaire de poursuivre cette compréhension mécanistique des relations érosion / altération / cycle du CO₂ atmosphérique à l'échelle des temps géologiques. L'obtention de données pertinentes sur des systèmes significatifs à l'échelle globale, ou sur des bassins versants bien échantillonnés, est évidemment un élément de

quantification indispensable. A ce titre, il faut encourager la mise au point de nouveaux traceurs géochimiques capables d'évaluer les flux d'éléments à l'échelle géologique. Le développement de la modélisation couplée physique / biogéochimique est aussi un élément indispensable de compréhension par sa capacité à extrapoler des données locales et à proposer des scénarii d'évolution.

■ Les bilans et enregistrements géologiques

■ Contrôle tectonique et climatique des flux de sédiments

S'il est évident et notoire que l'érosion et le climat sont des contrôles de l'érosion et des flux sédimentaires, la manière dont s'opère ce contrôle reste encore fortement discutée. Le débat récent sur l'origine des flux sédimentaires quaternaires, apparemment anormalement élevés, pose la question d'une éventuelle non-linéarité de la réponse climat-érosion avec une possible amplification de l'activité géomorphologique en régime climatique oscillant. Dans le même ordre d'idée, les bilans sédimentaires actuels réalisés sur différentes ceintures climatiques ne montrent pas de relations simples avec les paramètres climatiques moyens, sans doute parce que ces derniers ne sont pas représentatifs des interactions climat/érosion. Le rôle des événements climatiques extrêmes est en particulier à réapprécier tant sur la génération des flux sédimentaires que sur leur propre occurrence.

■ Des questions similaires se posent pour le forçage tectonique ; on est encore loin de mesurer la manière dont ses caractéristiques (vitesse, géométrie des déformations, ...) contrôlent les flux.

■ Ces questions fondamentales sur l'origine des flux sédimentaires doivent être abordées à plusieurs échelles de temps et d'espace, pour réellement arriver à comprendre, à quantifier et à modéliser, les relations entre forçages et flux.

■ Dynamique sédimentaire et enregistrement des flux d'érosion ("De la source au puits")

Entre l'érosion d'un sédiment et son dépôt en domaine marin, il existe toute une histoire sédimentaire faite de transits, de stockages intermédiaires, de dispersion, et d'échanges avec le milieu sous-jacents. Cette dynamique, encore très mal connue, va s'enregistrer dans les dépôts sédimentaires

• Dynamique et évolution de la surface terrestre

au même titre que les forçages climatiques ou tectoniques qui contrôlent la production de sédiments. Caractériser la dynamique des systèmes sédimentaires de leur source à leur puits est évidemment un objectif à part entière qui vise à mieux connaître les flux de matière qui transitent des continents vers les océans. C'est aussi une nécessité pour pouvoir interpréter le signal sédimentaire en termes de fluctuations tectoniques ou climatiques.

■ Cette thématique est au cœur de plusieurs programmes internationaux centrés pour la plupart sur l'étude des marges continentales et de leurs enregistrements sédimentaires. Ces structures géologiques représentant en effet le principal lieu d'accumulation des sédiments sur le globe. Le programme européen EUROMARGIN, financé par l'ESF, les programmes américains MARGINS ou STRATAFORM ont affiché ce thème – "From Source to Sink", de la source au puits – comme un de leurs axes de recherche privilégiés.

■ L'histoire du relief de la Terre et des planètes.

Au premier ordre, la topographie de la Terre est directement contrôlée par le mouvement des plaques lithosphériques entre deux stades supercontinents (le " cycle de Wilson " de durée comprise entre 200 et 300 Ma) qui contrôle à la fois les mouvements verticaux et les variations eustatiques à long terme. La superficie et l'altitude maximale du domaine continental sont atteintes en fin de régime de convergence des plaques, elles sont minimales en fin de phase de fragmentation, de divergence maximale des plaques. Ces faits, s'ils procèdent du bon sens, n'ont pas été réellement démontrés et quantifiés malgré les tentatives de reconstitutions globales de la paléogéographie de la Terre (projets Téthys et Péri-Téthys en France). Cette idée de changement global de la topographie de la Terre, outre sa connaissance intrinsèque, est fondamentale pour comprendre les grands changements climatiques, les bilans d'érosion et leurs effets sur les grands cycles géochimiques, les paléocirculations océaniques,...

■ La connaissance de l'histoire du relief de la Terre et des planètes peut également nous apporter une somme importante d'informations sur le comportement de la croûte en réponse à l'épaississement, ou sur les phénomènes plus profonds liés à la convection mantellique.

■ Pourvoir mesurer des paléo-altitudes est

évidemment un élément de quantification fondamental pour mener à bien ces recherches. Les méthodes actuelles, basées sur l'étude des paléoflores avec tous ses raffinements " iso-enthalpiques ", sur la mesure du fractionnement du $\delta^{18}\text{O}$, sur la mesure du gradient des diamètres de bulles de gaz dans les laves, ou sur les isotopes cosmogéniques, ont toutes des limites intrinsèques qu'il faudrait pouvoir dépasser. Un travail considérable mais ô combien déterminant reste par conséquent à mener pour améliorer la précision des techniques existantes.

■ Chantiers

■ S'il est évident qu'un programme d'études des RELIEFS doit promouvoir les études de terrain, la définition des cibles dépend pour l'essentiel des objectifs poursuivis. Il est donc illusoire de vouloir donner *a priori* des chantiers prioritaires. Nous avons seulement voulu mettre en avant quelques systèmes géologiques qui pour diverses raisons sont potentiellement des cibles intéressantes pour la communauté scientifique française.

■ Tout d'abord, un programme d'étude des RELIEFS doit être élargi à l'ensemble des planètes du système solaire. La diversité des agents d'érosion et des tectoniques permet en effet d'avoir une démarche globale et comparée. Une attention toute particulière devrait être portée à la planète Mars dont l'étude est une des priorités de la recherche française ; la dynamique de l'érosion et l'évolution paléoclimatique de la planète sont en particulier des thématiques qui rentrent tout à fait dans le cadre d'un tel programme.

■ Parmi les systèmes géologiques remarquables, l'Himalaya-Tibet et les Andes sont deux chantiers exemplaires en termes d'investissement de la communauté scientifique française et de résultats déjà acquis. Les études françaises menées en Himalaya et au Tibet, à la fois sur les flux de matière, sur l'histoire de la surrection ou sur les couplages tectonique-érosion-climat sont clairement de niveau international et méritent d'être poursuivies. Les Andes, dont la structure géologique est rigoureusement transverse aux zonations climatiques, représentent un chantier idéal pour étudier l'impact du climat sur l'érosion et la tectonique. Ce chantier bénéficie d'autre part du travail de longue durée menée par les équipes de l'IRD tant sur la partie occidentale que dans le bassin Amazonien. En domaine sous-marin voire même côtier, les recherches sont conditionnées par la capacité à mobiliser les

moyens à la mer. La définition des cibles doit donc se faire en étroite collaboration avec les programmes qui gèrent ces moyens.

■ Sans faire d'exclusive, la France doit aussi représenter une cible privilégiée des programmes de l'INSU, ne serait-ce que pour l'avantage que procure la proximité des infrastructures de recherche. Parmi les objets géologiques remarquables pour étudier les relations érosion-tectonique-climat, on peut citer bien évidemment les Alpes et les Pyrénées, le pourtour de la Méditerranée (histoire Messinienne, delta du Rhône, lien continent-/sous-marin), les Antilles, voire l'ensemble du territoire métropolitain qui subit une forte reprise de l'érosion depuis le quaternaire.

Les développements techniques et méthodologiques

■ Les développements méthodologiques doivent faire partie intégrante des recherches menées sur ces processus.

■ La communauté française bénéficiera évidemment de la mise à disposition de nouvelles données topographiques avec une résolution inégalée (Spot 5 du CNES/Spot Images ou données DRTM de la NASA-DLR-ASI). La capacité de nos moyens à la mer de fournir une bathymétrie précise doit aussi être encouragée en favorisant les études intégrées terre-mer.

■ Le développement d'outils de modélisation et d'expérimentation est un axe fort des recherches menées par la communauté française. Il faut clairement poursuivre cet effort en encourageant une utilisation plus large de ces moyens.

■ Enfin les méthodes géochimiques ont joué un rôle clé dans le développement de la géomorphologie quantitative. Il faut poursuivre ces recherches méthodologiques pour améliorer les chronomètres utilisables, la mesure des temps de résidence des sédiments, la mesure des paléo-altitudes, la datation des minéraux d'altération, etc.

Aux frontières de cette prospective

■ Cette prospective centrée sur le relief de la Terre touche un large éventail de thématiques de recherches pour lesquelles elle peut apporter des outils et une

connaissance nécessaire ou bien au contraire dont les développements sont essentiels pour comprendre le relief de la Terre.

■ Séquestration de CO₂. Cycle du carbone biogénique et marin. Si les flux de carbone mis en jeu par l'érosion sont une centaine de fois moins élevés que les flux anthropiques de CO₂, il n'en demeure pas moins qu'ils sont un élément important de toute prédiction du cycle du carbone surtout lorsque l'on considère des échelles de temps dépassant le millier d'années. Les liens entre cycle du carbone long terme et court terme doivent être approfondis surtout au niveau des couplages avec la biosphère.

■ Le rôle de la biosphère, végétation et micro-organismes. Un enjeu important sur l'étude de l'altération et de l'érosion est le rôle de la biosphère et des processus pédologiques. Ces processus géomicrobiologiques sont également des thèmes fondamentaux pour l'étude des surfaces et interfaces continentales et de l'environnement actuel.

■ Climats du passé. La paléotopographie et les flux d'érosion du passé sont des éléments clés de la compréhension de l'environnement ancien de la Terre. Les enjeux développés dans cette prospective, tant sur l'altération et le cycle du carbone que sur la compréhension des mécanismes élémentaires d'érosion et de transport des flux sédimentaires sont nécessaires pour mieux interpréter et modéliser les environnements aux échelles de temps géologiques.

■ Tectonique, métamorphisme et relief. La tectonique est le principal moteur de création du relief, et à ce titre, la dynamique de la Terre interne et les contraintes qu'elle exerce sur la surrection sont essentielles pour l'ensemble des enjeux envisagés.

■ Vulnérabilité anthropique. Il existe clairement une problématique "risque naturel" associée à la thématique RELIEFS via, par exemple, les flux catastrophiques (glissements de terrain, coulées de boue, ...), le contrôle des inondations par le relief, ou le transport polluants par les sédiments.

érosion

Première partie

*Observer, comprendre, modéliser
le système Terre et les planètes*

A .3a -Dynamique
et évolution de la
surface terrestre
- Reliefs de la
Terre

• *Reliefs de la Terre*

• *Enjeux de la recherche* • *Bilan des*

connaissances et place de la communauté

française • *Axes prioritaires*

• *Aux frontières de cette prospective*

relief
climat
transp
flux
topographie

• Dynamique et évolution de la surface terrestre

Le relief est une interface entre la Terre interne, l'hydrosphère, et l'atmosphère, par laquelle transitent d'énormes flux hydrologiques, sédimentaires et chimiques. Cette interface est donc, par certains côtés, unique et représentative de la diversité des processus géologiques, qu'ils soient climatiques, tectoniques ou même hydrologiques, qu'ils soient continentaux ou océaniques. Le relief est aussi un paramètre de la dynamique de ces processus, dans ce qu'on appelle classiquement des rétroactions. L'hydrologie de surface, les circulations océaniques, le climat et évidemment la tectonique ont une dynamique où le paramètre "relief" joue un rôle important même à grande échelle. La contribution de l'érosion et des flux sédimentaires au cycle du carbone est un autre grand enjeu des études sur les reliefs de la Terre qui participe à une compréhension globale des processus régulant une partie de la chimie des océans et le climat à long terme.

La surface de la Terre n'est pas un objet géologique comme les autres. C'est avant tout le lieu d'habitat de l'homme ce qui lui confère un degré de fascination particulier, quasi atavique, en fait un élément fondamental de l'histoire de l'humanité, et lui donne une accessibilité unique. A ce titre, la dynamique des reliefs devrait être l'un des processus géologiques les plus contraints. S'il ne l'est pas et s'il reste encore beaucoup à faire au niveau de la compréhension des processus élémentaires, physiques, chimiques et biologiques, c'est sans doute parce que la dynamique des reliefs cumule le désavantage d'une évolution moyenne lente, avec toutes les difficultés inhérentes en termes de mesure, sous l'effet de forçages dont certains sont extrêmement rapides et variables dans le temps et l'espace. Enfin, l'étude des reliefs est un excellent exemple de collaborations multidisciplinaires où interviennent à la fois les tectoniciens, géomorphologues, sédimentologues, hydrologues, géochimistes, climatologues. Les exemples de collaborations initiées ces dernières années dans des programmes français comme le Programme National sur les Sols et l'Erosion ou ECLIPSE ont été, sous certains aspects, exemplaires des futures collaborations scientifiques qui se mettront en place dans le cadre des études sur l'environnement.

Dans la suite de cette prospective, seront développées les thématiques centrales à la dynamique des reliefs qui concernent la quantification des flux de matière qui circulent sur cette interface, et les implications de ces transferts sur la dynamique interne – tectonique principalement mais pas seulement –, et externe – l'évolution du climat notamment – de la Terre. Le terme "érosion", forcément central dans cette thématique, sera pris dans son acceptation la plus large, et la plus encyclopédique, c'est-à-dire le transport de sédiments et d'éléments dissous sur le relief terrestre de la mise en mouvement au dépôt. Ce parti pris est restrictif par rapport au strict intitulé de cette prospective ; il existe un champ très large de thèmes de recherche, en tectonique, hydrologie, océanographie, biologie, sciences humaines (le risque, l'aménagement des territoires, ...) ou dans des sciences très fondamentales (théorie du chaos, physique statistique, ...) , où le relief joue un rôle comme résultante d'une dynamique ou comme paramètre de contrôle, qui ne sont pas abordés in extenso dans ce chapitre. Pour ces questions, nous renvoyons à d'autres éléments de la prospective.

Philippe Davy

Christian France-Lanord

Jean-Philippe Avouac,

Nadine Elliouz,

Jérôme Gaillardet,

Yves Goddérès,

François Guillocheau,

Yves Lagabrielle,

Jérôme Lavé,

François Métivier,

Patrick Pinet

A-Reliefs de la Terre

Bilan des connaissances et place de la communauté française

■ Les études sur la géomorphologie en lien avec les variations climatiques ou la dynamique lithosphérique ont pris depuis une dizaine d'années une place très importante dans les sciences de la Terre. Le nombre croissant de sessions consacrées à la dynamique des reliefs, ou aux grands cycles biogéochimiques, dans les grands congrès de l'AGU, de l'EUG ou de l'EGS est là pour en témoigner. La décision récente de l'AGU de créer un nouveau journal entièrement dévolu à la surface de la Terre (JGR Earth Surface)¹ démontre que cette thématique a acquis le statut de "discipline" au sein des sciences de l'Univers.

■ Le dynamisme de cette "discipline" rend difficile un recensement exhaustif des connaissances et même des thématiques abordées. Nous avons déjà mentionné les liens naturellement forts avec de nombreuses disciplines connexes qui font que les centres d'intérêt de la communauté sont multiples et peuvent rapidement évoluer. Dans les dix dernières années, les questions scientifiques majeures étroitement reliées à l'érosion et à la dynamique des reliefs se sont focalisées autour de quatre grands thèmes :

- les mécanismes physiques de l'érosion et du transport, et leur expression dans la topographie ;
- les cycles biogéochimiques, notamment à l'échelle globale ;
- les couplages entre tectonique et érosion ;
- les couplages entre l'érosion, le relief et le climat, cycle du carbone et rétroaction climat-tectonique.

■ Sur ces thématiques, le poids des équipes américaines, même en relatif, est extrêmement important sans doute parce que la communauté des sciences de la Terre a su massivement s'orienter vers ces questions, et aussi parce qu'elle a su naturellement établir des ponts avec la recherche en génie civil sur les mécanismes de l'érosion, et avec les

géographes qui, dans les années 40-50, ont été les pionniers dans la construction d'une géomorphologie quantitative.

■ Il faut aussi souligner l'originalité et l'activité de la communauté française qui a obtenu des résultats reconnus dans de nombreux domaines, de l'échelle du minéral à l'échelle globale, sous les aspects physiques aussi bien que chimiques. Cette mobilisation des chercheurs en sciences de la Terre, plutôt exceptionnelle si on se réfère aux autres pays de l'union européenne, date de plus de 10 ans avec la création du programme DBT "Fleuve et érosion" par l'INSU. Ce programme, relayé ensuite par le Programme National sur les Sols et l'Erosion a structuré une communauté de géochimistes et de géophysiciens sur plusieurs problématiques (bilans géochimiques, modélisation de l'érosion, relations climat-tectonique et climat-relief...) et sur quelques chantiers emblématiques (les grands fleuves, l'Amazonie, l'Himalaya, ...). Ces thématiques touchent également d'autres programmes comme ECLIPSE pour les aspects forçage tectonique du climat passé, le Programme National de Recherche en Hydrologie pour les aspects dynamique des rivières et plus marginalement le programme "Intérieur de la Terre", le GdR Marges et le programme de Planétologie. Notons qu'il existe une longue tradition française d'étude de l'érosion, notamment à l'échelle globale (ex. Fournier, 1960, Climats et érosion), qui a sans doute été un élément important dans ce développement récent. Enfin, l'implication de l'IRD sur plusieurs chantiers "grands fleuves" en Afrique et Amérique latine à été un point fort de la recherche française dans un domaine où l'acquisition de données sur le long terme est fondamental.

■ Sans être exhaustif, le bilan des actions et des compétences développées en France fait apparaître quelques résultats remarquables :

■ *Les bilans d'érosion sur des bassins fluviaux sélectionnés pour leur importance globale ou leurs caractéristiques particulières ont permis de mieux comprendre l'importance des divers paramètres de contrôle de l'érosion (écoulement, température, tectonique, lithologie...). Ainsi, la connaissance des relations entre flux d'altération des silicates, température, relief*

¹ Extrait du site web de l'AGU concernant le "JGR Earth Surface": "This new section will focus on surficial processes; in particular, the physical, chemical, and biological processes that affect the form and function of the surface of the solid Earth over all temporal and spatial scales."

• Dynamique et évolution de la surface terrestre

et érosion physiques a significativement progressé, et nous commençons désormais à posséder des lois quantitatives gouvernant les flux d'altération chimique ou de consommation de CO₂ par l'altération des roches. Ces lois permettent de mieux comprendre les grands rétrocontrôles dont la surface de la Terre est le siège, en particulier le lien entre climat et érosion. L'incorporation de ces lois dans les premiers modèles couplant l'évolution séculaire de l'altération, de l'érosion, de la quantité de CO₂ atmosphérique et du climat a permis de montrer l'extrême importance de l'altération sur l'évolution du climat de la Terre. Par exemple, la connaissance de l'érosion des formations basaltiques et son rôle en tant que puits du carbone atmosphérique est maintenant bien quantifiée. La relation entre les flux d'altération et les flux d'érosion physique, observée à différentes échelles et sur la plupart des grands bassins versants, montre un véritable couplage entre processus physiques et chimiques encore largement inexpliqué. Les bilans chimiques et isotopiques effectués en outre dans les bassins versants permettent d'apporter des contraintes sur les modalités et les flux du transport physique, comme par exemple, le transport des charges de fond de rivière. Enfin, sur les bassins marqués par un fort transport sédimentaire, le flux de carbone organique particulière apparaît comparable à celui de l'alcalinité dissoute dérivée des roches silicatées, soulignant ainsi un autre processus lié à l'érosion et agissant sur le cycle du carbone.

■ **Les bilans sédimentaires** réalisés notamment dans les bassins sédimentaires dans et autour de l'ensemble Himalaya-Tibet ont permis de reconstruire la dynamique de l'érosion et de poser concrètement la question des influences respectives du climat et de la tectonique. Sur l'ensemble Himalaya-Tibet, ces bilans montrent une diachronie importante entre la collision et l'initiation de la sédimentation. L'étude sédimentologique et géochimique des archives sédimentaires, interprétées à la lumière de la connaissance des systèmes actuels, a permis de reconstituer les principaux mécanismes d'érosion, les sources et les conditions environnementales de l'altération.

■ **La modélisation numérique et expérimentale**, inclus analogique, des processus d'érosion et de transfert sédimentaire a bénéficié d'un programme important d'investissement de l'INSU, notamment via le soutien à l'acquisition de moyens mi-lourds. Au moins 3 équipes françaises (Rennes, Paris, Grenoble) ont développé des laboratoires expérimentaux plutôt dédiés à une modélisation analogique des processus érosifs et de transport sédimentaire. Plusieurs codes de calcul ont aussi été développés (EROS à Rennes, CASCADE à Grenoble) qui complètent parfaitement le travail expérimental et de terrain mené par les chercheurs. Bien que jeune et peu nombreuse, cette communauté commence à avoir une place reconnue internationalement

■ **La quantification des vitesses locales d'érosion** –

pour elles-mêmes ou comme proxy de surrection tectonique – a été réalisée par plusieurs équipes en France (Paris, Orsay, Grenoble, Marseille, Nancy) avec des méthodes différentes et complémentaires. La principale méthode, qui consiste à utiliser des objets géomorphologiques continus (terrasses fluviales et marine, cônes alluviaux ...) comme des marqueurs passifs de la déformation, a bénéficié depuis une quinzaine d'années de deux avancées techniques majeures : à la fois de nouvelles méthodes de datations (¹⁴C en AMS, isotopes cosmogéniques, OSL) des objets géomorphologiques, et des outils performants de mesure de la déformation enregistrée par ces objets (MNT, théodolite et distance-mètre laser, GPS cinématique). Alternativement, et bien que d'utilisation plus délicate, les marqueurs dynamiques de la déformation (profils de diffusion au travers de bord de terrasses, profils de rivière au travers d'une structure active ou d'une chaîne de montagnes) offrent un potentiel important notamment pour caractériser des vitesses de soulèvement relatives sur une large échelle spatiale. Ces deux méthodes ne permettent néanmoins d'accéder qu'à des vitesses d'incision sensu stricto (traduite en terme de soulèvement moyennant l'hypothèse que la structure active étudiée est en équilibre dynamique). La caractérisation du soulèvement passe par la mise au point de paléo-altimètres, domaine encore en développement mais dans lequel la communauté française se montre active.

■ **La compréhension de la dynamique des reliefs sous-marins** liés à tous les grands systèmes géodynamiques (accrétion, subduction, marges passives, points chauds) a beaucoup progressé en 10 ans. Les mécanismes tectono-volcaniques créateurs de reliefs pour chacun des systèmes ont été analysés ; les rôles respectifs de la production magmatique et des taux d'accrétion (vitesse des plaques) ont été démontrés, et évalués dans le cas des dorsales rapides, lentes et ultra-lentes et dans les interactions dorsales-points chauds. La compréhension des mécanismes de transferts sédimentaires des fleuves aux deltas côtiers et sous-marins et le rôle des instabilités des pentes sous-marines a fortement progressé, grâce à un effort pluriorganisme (Rhône-Méditerranée, Nil, Zaïre, Angola,...). L'étude des marges actives, notamment l'Amérique du Sud et la Nouvelle-Zélande, a mis en évidence une érosion sous-marine très active et un fort couplage érosion/dépôt/déformation. Il a été confirmé que les marges convergentes permettent le retour vers le manteau d'un stock de matériaux issus de l'érosion qui peut être considérable.

■ **Les relations relief-érosion-climat** ont été abordées sous différents angles. Sur les bassins actuels, en particulier en Himalaya, le traçage direct et la modélisation de la distribution de l'érosion mettent en lumière l'importance des facteurs climatiques et topographiques dans le contrôle de l'érosion physique. La maîtrise de ces relations permet d'utiliser les flux d'érosion déduits des dépôts (volume des cônes alluviaux, terrasses fluviales, moraines glaciaires, ...) pour reconstituer la

paléo-hydrologie d'un bassin. Enfin, le contrôle à long terme du climat à travers le cycle du carbone est une motivation centrale de l'étude de l'altération des grands bassins déjà mentionnée. Les travaux français ont notamment mis en lumière le rôle de l'altération des reliefs volcaniques et l'importance de l'enfouissement de la matière organique associé à l'érosion des grands reliefs.

■ Dans ce domaine des sciences, comme dans beaucoup d'autres, les développements techniques et méthodologiques sont souvent au cœur des grandes découvertes. Les mesures de la topographie, des vitesses d'érosion, et maintenant des paléoreliefs comme l'utilisation des traceurs géochimiques pour estimer les flux d'érosion chimique et physique sont au centre des recherches menées dans les dernières années. Les équipes françaises ont ainsi participé à de nombreux développements méthodologiques ou techniques qui ont permis d'élargir grandement les champs d'action des projets.

■ **Développement d'outils géochimiques d'étude du relief et de l'érosion.** Les équipes françaises ont contribué à une meilleure compréhension des traceurs isotopiques dont le bilan océanique est dominé par l'apport des fleuves, tels que le B, C, Os, Sr ou encore U. Grâce à ces études, l'utilisation de ces traceurs globaux pour reconstituer les flux d'érosion passés est mieux maîtrisée et permettra une meilleure approche par modélisation. Les équipes françaises se sont aussi investies pour développer des outils de datation des processus et objets géomorphologiques, des traceurs des temps d'exposition (^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^3He , ^{21}Ne , OSL), des marqueurs thermochronologiques de basse température (U-Th/He, traces de

fission, ...), ainsi que des traceurs de temps de transfert (chaîne isotopique de l'uranium). Ces outils sont essentiels pour comprendre et quantifier l'évolution temporelle des reliefs.

■ **Obtenir une meilleure résolution de la topographie terrestre** a, par exemple, prévalu lors de la définition des spécifications techniques du satellite Spot 5 lancé en 2002. L'action combinée du CNES – et de sa filiale Spot Image – et de la NASA, permettra à la communauté scientifique de disposer d'un Modèle Numérique de Terrain (topographie digitalisée) à peu près complet du globe, avec une résolution horizontale de 10 à 30 m, et une précision verticale décimétrique. En domaine océanique, les cartes de bathymétrie prédite (couplage sondes bathymétriques et altimétrie satellitaire) permettent d'obtenir une carte mondiale du relief (Toulouse, LEGOS, IRD, INSU, CNES GRGS) et ainsi d'en comprendre les grands structures. Des progrès considérables ont aussi été accomplis pour produire localement une bathymétrie de très haute résolution. Le développement de la géodésie, c'est-à-dire de la mesure des vitesses actuelles, horizontales et verticales, du relief a aussi constitué une avancée pour la quantification des processus ; la géodésie fond de mer est en voie de développement par l'INSU et l'IFREMER. Dans le domaine côtier, les progrès les plus spectaculaires sont réalisés grâce à l'obtention de données bathymétriques très précises par sondeur multifaisceaux de petits fonds qui permettent de visualiser à haute résolution, les corps sédimentaires, les arrachements, les glissements, les failles actives et les terrasses des anciens stades glaciaires.

■ **Notons enfin les programmes planétaires** où le relief constitue pour des raisons évidentes un sujet d'étude privilégié. L'étude des très médiatiques structures d'érosion sur Mars est un domaine où la communauté française joue un rôle important.

Les axes prioritaires

L'exercice présenté vise à définir les axes prioritaires qui pourraient faire l'objet d'une programmation spécifique de l'INSU. Il se place dans le cadre d'une prospective en Sciences de la Terre, et concerne évidemment au plus haut point la division SIC de l'INSU.

■ Plusieurs programmes actuels de l'INSU sont concernés de près ou de loin, soit via leurs objets d'étude (le GdR MARGES ou le PNP par exemple), soit par des liens plus systémiques (le climat et

l'environnement géologique pour ECLIPSE ; la dynamique interne pour DyETI). La mise en place d'un programme spécifique sur l'étude des reliefs et des transferts de matière à la surface de la Terre se justifie par la nécessité de focaliser sur la compréhension des mécanismes physiques et chimiques, et sur la quantification des flux. Il se positionne en complément des programmes existants.

■ Ce rapport tient compte de l'appréciation des différents membres du comité de rédaction ; il en a la richesse et les limites.

• Dynamique et évolution de la surface terrestre

Les processus élémentaires de l'érosion

La compréhension des processus qui font l'érosion, dans son acceptation large i.e. y inclut le transfert de sédiment et son dépôt, est évidemment au cœur de la thématique "relief". La recherche afférente est sous-tendue par plusieurs questions fondamentales ou points méthodologiques :

- **la connaissance des processus élémentaires**, des échelles pertinentes, des paramètres de contrôle, et des conditions d'existence de processus concurrents (à l'instar du transport fluvial granulaire) ;
- **la modélisation de ces processus**, expérimentale ou numérique, et le problème du transfert d'échelle ;
- **la détermination des éléments de dynamique** (temps ou échelles caractéristiques, non-linéarités et effets de seuil, régimes permanents et transitoires, instabilités propres, ...)
- **la quantification des flux d'érosion** actuels et passés à partir des archives sédimentaires et de traceurs géochimiques ;
- **le choix de laboratoires naturels pertinents** – à l'instar du GPS ou de la sismicité, la notion d'observatoire pourrait être étendue à la géomorphologie avec une réflexion sur la définition des sites, sur l'instrumentation, sur la fréquence et la durée.

Cette réflexion doit bien évidemment prendre en compte la forte variabilité des systèmes naturels, climatiques ou tectoniques, et l'impact sur les processus d'érosion et sur les flux. La quantification de la contribution des événements climatiques extrêmes, les conséquences des alternances climatiques ou les variations "haute fréquence" de la tectonique sont autant de problématiques qui méritent d'être traitées en tant que telles. Nombre de modèles simples ont été proposés jusqu'à aujourd'hui pour décrire les lois d'érosion ; mais ils peinent à rendre compte de tous les phénomènes en jeu tant au niveau de la sensibilité au caractère stochastique des flux que de l'importance relative des différents processus physiques élémentaires. La communauté se trouve de fait confrontée à un paradoxe majeur : prendre en compte la complexité et la variabilité des phénomènes, tout en débouchant sur une loi "d'utilisation universelle", c'est-à-dire sans le recours à un nombre important de paramètres d'ajustement locaux. La démarche expérimentation / modélisation / quantification doit être généralisée pour prendre en compte cette spécificité inhérente à beaucoup de

phénomènes naturels.

Parmi les processus sur lesquels un effort important de recherche doit être mené, on peut citer :

L'érosion mécanique

Les phénomènes liés à l'érosion mécanique sont sans doute les mécanismes les plus étudiés du fait de leur importance sociale et économique (érosion des terres agricoles, ...) et de leurs liens forts avec plusieurs risques naturels (crues, inondations, glissements de terrain). L'érosion mécanique représente la plus forte proportion des flux terrigènes actuellement exportés vers l'océan mondial. Ses mécanismes sont en fait multiples, et vont des processus de versants – e.g. l'érosion des sols, les glissements de terrain, la gélifraction, etc. – jusqu'au transport alluvial et à l'abrasion fluviale.

Les processus de versants ont fait l'objet de nombreuses études tant qualitatives que quantitatives. Des lois phénoménologiques ont en particulier été recherchées pour quantifier le ruissellement et l'érosion des sols, même si l'intégration de la variabilité spatiale et temporelle reste très discutée. Dans les zones à faible érosion ou à érosion modérée (<0.1 mm/an), l'érosion est en général étroitement couplée à la dynamique du sol, qui joue un rôle déterminant par sa capacité à transformer le substrat rocheux en matériau aisément mobilisable. La caractérisation et la quantification de ces couplages entre processus mécaniques, chimiques ou biologiques sont un enjeu des futures recherches. Dans les zones montagneuses soumises à des vitesses d'érosion fortes (>0.5 mm/an), l'évolution des versants est en grande partie contrôlée par les glissements et mouvements de terrain et, pour les zones d'altitude, par l'érosion glaciaire. L'étude de ces mécanismes relève autant des problématiques "risque naturel" que géomorphologiques (lien avec la fracturation et l'altération, conséquences sur l'incision fluviale et sur l'évolution du réseau hydrographique, ...).

Le transport fluvial a été surtout étudié par la communauté des ingénieurs en hydraulique et hydrodynamique. Malgré de très nombreuses études, plusieurs aspects des lois du transport, *a fortiori* dans leurs conditions naturelles et géologiques, échappent encore à ces efforts de conceptualisation. Trois axes sont actuellement poursuivis par la communauté française :

- l'utilisation d'expériences, modèles simples mais

bien instrumentées qui permettent des mesures exhaustives des paramètres susceptibles d'entrer en jeu ;

- l'intégration des lois de transport couplées aux processus de versant dans des modèles numériques d'évolution du paysage afin notamment de tester les réponses complexes aux forçages tectoniques ou climatiques du réseau hydrographique ;

- et la mesure simultanée des flux de sédiments (suspension et charge de fond) et des débits sur des rivières naturelles qui, en complément des deux approches précédentes, doit permettre une validation des modèles proposés. La mesure des flux de charge de fond sur les grands fleuves reste un défi métrologique.

■ L'érosion chimique

L'érosion chimique, encore plus que l'érosion physique souffre d'une absence de formalisme permettant le développement d'une approche prédictive de son importance. Si le rôle qualitatif de la température commence à être bien appréhendé, aucune loi cinétique n'est réellement satisfaisante et nous comprenons encore mal le rôle de certains paramètres. C'est typiquement le cas de la biomasse dont la productivité peut agir positivement (via l'action des bactéries du sol) ou négativement (via la rétention des sols) sur l'altération des roches. Faute de traceurs biogéochimiques adéquats, cette indétermination ne peut être levée.

■ A l'instar du rôle de la végétation, les modalités du couplage entre érosion physique et altération/érosion chimique restent à élucider. Par sa capacité à renouveler et augmenter les surfaces soumises à l'altération, l'érosion physique est un des facteurs qui contrôlent l'érosion chimique, les autres étant associés aux écoulements dans le milieu poreux. A l'inverse une exposition prolongée à l'altération fragilise la roche ou les fragments de roches et facilite d'autant des phénomènes tels que l'abrasion. Une quantification de ces interactions est clairement un objectif fondamental.

■ L'érosion glaciaire

Dans le couplage entre érosion et climat, l'érosion glaciaire est un processus de premier ordre, dont le rôle n'a pas encore été suffisamment élucidé. La mécanique d'écoulement des glaciers, bien que complexe, a fait l'objet de nombreuses études. Par contre la quantification de la mécanique de l'abrasion sous-glaciaire reste essentiellement schématique, voire mal connue, car dépendant de nombreuses

variables : température du glacier, pente, taux d'adhérence de la glace. Pourtant cette abrasion a un rôle déterminant durant les périodes glaciaires évidemment mais aussi après car l'évacuation des produits de l'érosion sous-glaciaire a une incidence forte sur les transferts dans le réseau hydrographique même loin en aval des glaciers. L'alternance dans une même vallée de phases englacées et de phases " fluviales " et la manière (et les temps de réponse associés) dont la vallée répond et se rééquilibre sont des questions fondamentales pour comprendre la dynamique des reliefs des chaînes récentes (Alpes, Andes, Himalaya).

■ D'une manière générale, l'érosion glaciaire souffre d'une très grande faiblesse de mesures *in situ* ; le développement de nouvelles techniques permettant une mesure directe de l'abrasion des glaciers serait le bienvenu. L'étude de l'incision glaciaire sur le long terme peut permettre d'apporter des éléments de réponse, en particulier en confrontant mesures géomorphologiques (topographie et datations cosmogéniques) avec des modélisations numériques d'évolution des paysages intégrant la dynamique et l'érosion glaciaire.

L'absence de modélisation expérimentale rend aussi le travail de conceptualisation assez difficile ; les recherches sur l'abrasion de façon générale doivent absolument être encouragées, et ceci pour toutes les échelles de temps.

■ L'érosion éolienne

Au même titre que l'érosion fluviale et glaciaire, l'érosion éolienne mérite d'être étudiée pour ses conséquences sur la dynamique de certains systèmes remarquables (déserts, dunes, dépôts loessiques, ...), et pour sa spécificité physique qui associe la mécanique des fluides avec celle des milieux granulaires. C'est aussi le mécanisme d'érosion des planètes sans phase liquide ce qui donne une fois de plus à ces perspectives une extension évidente vers la planétologie.

■ La physique du transport éolien et de l'abrasion connaît un regain d'activité notamment de la part de la communauté des physiciens. Des jeunes équipes mènent des travaux très intéressants sur la dynamique des champs de dunes et le transport du sable, avec une approche à la fois expérimentale, numérique et théorique. Ces travaux méritent d'être poursuivis en développant les associations avec les équipes de géologie, sédimentologie, géophysique, voire avec les

• *Dynamique et évolution de la surface terrestre*

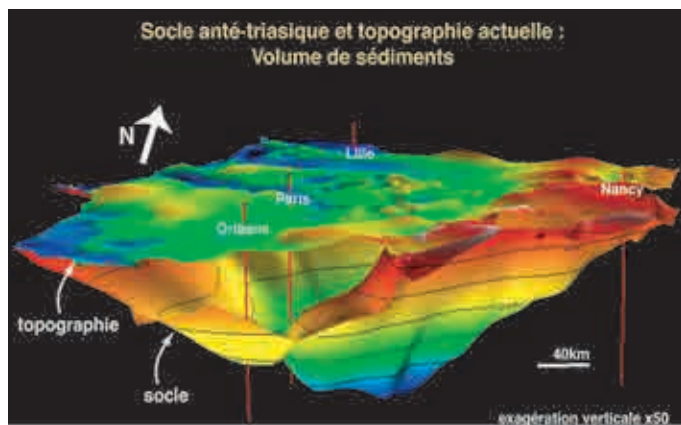
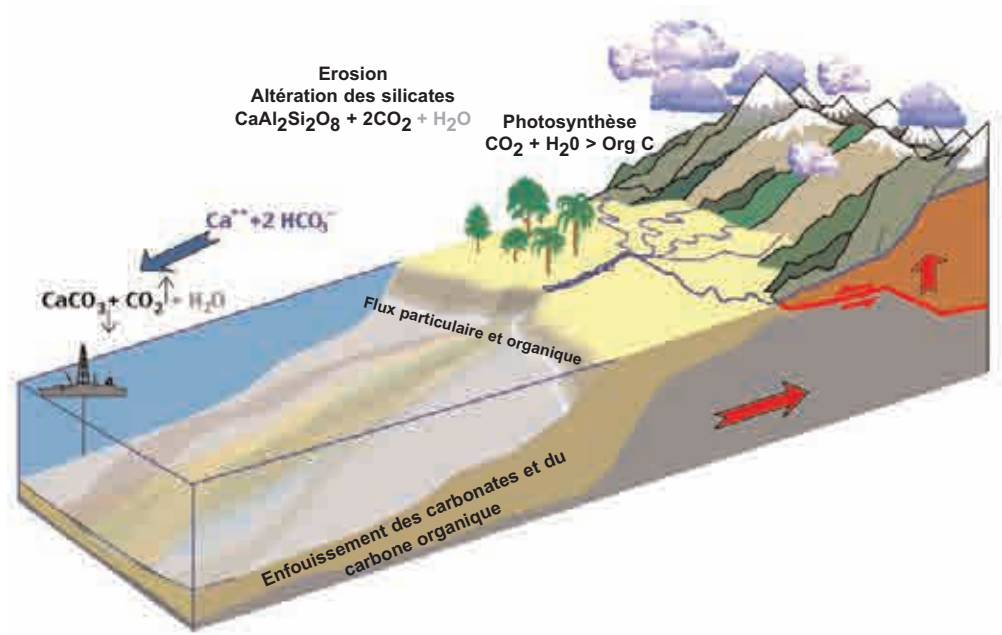
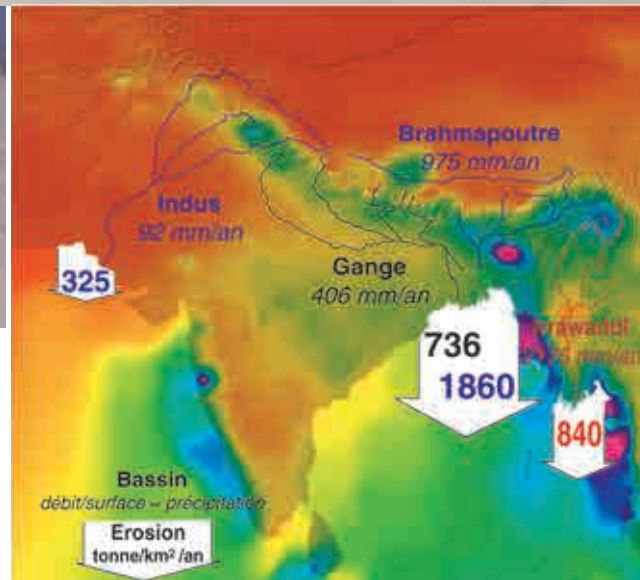


Schéma du forçage tectonique du cycle du carbone
© crpg-cnrs

Expérience d'écoulement-érosion
© ipgp-cnrs

Représentation 3D du bassin de Paris, socle anté-triasique et topographie actuelle : volume de sédiments
© Géosciences Rennes - cnrs



Exemple d'érosion active en milieu aride. (nord-est du plateau tibétain) © cnrs

Expérience analogique d'érosion
© Géosciences Rennes - cnrs

Flux d'érosion total des principaux fleuves himalayen et précipitations annuelles. A l'exutoire de chaque fleuve, on indique les précipitations annuelles moyennes sur l'ensemble du bassin drainé, ainsi que l'érosion annuelle moyenne exprimée en tonne/km²
© crpg-cnrs

• Dynamique et évolution de la surface terrestre

biologistes pour les interactions dunes-végétation.

■ Le transport éolien représente aussi un flux de matière important qui doit être mieux quantifié notamment d'un point de vue géochimique. de dépôts de loess en termes de dépôts et d'évolution de sol, concernant " l'exo-géomorphologie " pour ce qui est des planètes sans phases liquides à leur surface.

■ L'érosion littorale et sous-marine

La contribution de l'érosion à la création du relief sous-marin est en général considérée comme faible devant celle des processus géodynamiques internes. Mais cette assertion mérite d'être réexaminée ; le littoral, les deltas et les canyons sous-marins représentent par exemple des environnements où de toute évidence les processus d'érosion et de transport sédimentaire ont un impact fort sur les formes du relief et leur évolution.

■ Le littoral pris au sens large comme une interface entre le milieu marin et le domaine émergé est le siège à la fois d'importants transferts de matière (y inclus mais pas seulement l'apport des fleuves continentaux) et d'une érosion très efficace liée à la dynamique océanographique sensu lato. Cela se traduit par une forte variabilité du trait de côte, une érosion active du plateau continental et des structures côtières émergées, etc. La formulation du problème du transport et les questions scientifiques afférentes sont proches de celles formulées pour l'érosion mécanique avec comme particularité le couplage entre les mouvements hydrodynamiques énergétiques (marée, déferlement, etc.) et le transport sédimentaire. Si cette problématique intéresse de nombreuses équipes et organismes, la recherche n'apparaît pas toujours suffisamment intégrée et il subsiste encore de fortes barrières disciplinaires et institutionnelles. Il apparaît donc essentiel de réussir un meilleur lien entre les systèmes continentaux, côtiers et océanographiques, et de pouvoir mobiliser l'ensemble de la communauté et des moyens afférents en dépassant les clivages interdisciplinaires.

■ Le milieu estuarien et deltaïque est aussi un formidable réacteur chimique où les flux d'érosion (dissous, particuliers et organiques) réagissent en se mélangeant au milieu marin – par exemple une très large partie de flux organique terrigène semble être oxydé avant d'atteindre les dépôts sédimentaires. Les processus impliqués modifient l'impact global de l'érosion sur l'océan, mais ils restent encore mal maîtrisés. L'étude expérimentale de mécanismes et le

suivi des flux à travers l'interface littorale est donc nécessaire pour quantifier l'impact de l'érosion sur la chimie des océans.

■ En domaine profond, les mécanismes d'érosion sont encore très mal compris et modélisés. La dynamique turbiditique et la formation des canyons sous-marins, le transfert des sédiments en grande profondeur, le couplage avec l'hydrodynamique océanographique et avec la tectonique, sont autant de questions qui méritent d'être étudiées. La démarche d'expérimentation et de modélisation qui a été commencée par quelques équipes françaises mérite d'être poursuivie en complément d'études géophysiques et sédimentologiques.

■ Les couplages

■ En termes de dynamique, le relief apparaît l'élément central d'un certain nombre de couplages. Les travaux récents montrent la grande imbrication des phénomènes tectoniques et climatiques dont il est nécessaire, à terme, d'avoir une approche globale. Mais l'importance relative des différents couplages, et les centres d'intérêt des communautés scientifiques impliquées, font que le problème a été à juste titre subdivisé en plusieurs questions. Nous aborderons la question spécifique des couplages entre érosion et tectonique, et érosion et climat. Nous traiterons spécifiquement du couplage érosion/climat à l'échelle globale qui, à ces échelles de temps, est très fortement relié au cycle du carbone.

■ Le couplage érosion-tectonique

La surface terrestre représentant la condition aux limites supérieure du système tectonique, l'érosion et le transfert de flux sédimentaires sont évidemment des composantes à part entière de la mécanique de la lithosphère. La distribution des vitesses d'exhumation dans la lithosphère, celle des températures et donc du métamorphisme, sont autant de paramètres qui dépendent directement des vitesses d'érosion. Pourtant on est encore qu'au début de l'évaluation de l'impact réel de la dynamique géomorphologique sur la tectonique, en particulier parce que l'érosion et le flux sédimentaires sont souvent modélisés de façon caricaturale, voire sous-estimés, dans les modèles thermo-mécaniques de lithosphère.

■ La localisation de la déformation est une conséquence attendue de couplage, dont le mécanisme – l'érosion et le transfert sédimentaire

agissent directement sur la redistribution des masses à la surface de la Terre et donc sur la répartition des contraintes gravitaires – a été mis en évidence par plusieurs études numériques et théoriques. Mais des questions importantes restent en suspens qui concernent les échelles de ce couplage (faille, chaîne de montagnes, continent, ...) et la caractérisation de la compétition qui existe entre deux dynamiques – géomorphologique et tectonique – qui n'ont ni les mêmes constantes de temps, ni les mêmes géométries. A ce titre, la dynamique 3D du réseau de drainage mériterait d'être mieux étudiée et prise en compte pour ses conséquences sur les flux et sur l'évolution des chemins d'exportation des sédiments ; la capture des grands systèmes endoréiques observés sur la plupart des plateaux continentaux peut considérablement augmenter l'exportation des flux sédimentaires hors du système tectonique.

Le couplage érosion / tectonique a aussi une composante climatique qu'il faut prendre en compte. Les phénomènes orographiques représentent l'illustration la plus évidente de ces rétroactions ; leurs impacts sur la tectonique et l'érosion méritent d'être quantifiés et modélisés.

■ Le rôle de l'érosion sur le climat et le cycle du carbone.

Si le rôle de l'altération chimique des silicates, et le puits de CO₂ qu'il génère, est reconnu classiquement comme un facteur essentiel de l'évolution long terme du climat, la manière dont cette altération est contrôlée par différents facteurs endogènes ou exogènes reste un enjeu important tant qualitatif que quantitatif. Le couplage érosion mécanique / altération, longtemps négligé par la communauté scientifique, peut en particulier jouer un rôle important sur la régulation du cycle du carbone. L'impact de la biosphère sur l'altération, et d'une manière plus large les rétroactions climat-altérations, restent encore mal maîtrisés dans les modèles. Enfin le rôle de l'érosion sur la partie "organique" du cycle du carbone, qui est importante dans les systèmes à fort transport particulaire, doit faire l'objet d'une meilleure quantification.

■ Il est donc nécessaire de poursuivre cette compréhension mécanistique des relations érosion / altération / cycle du CO₂ atmosphérique à l'échelle des temps géologiques. L'obtention de données pertinentes sur des systèmes significatifs à l'échelle globale, ou sur des bassins versants bien échantillonnés, est évidemment un élément de

quantification indispensable. A ce titre, il faut encourager la mise au point de nouveaux traceurs géochimiques capables d'évaluer les flux d'éléments à l'échelle géologique. Le développement de la modélisation couplée physique / biogéochimique est aussi un élément indispensable de compréhension par sa capacité à extrapoler des données locales et à proposer des scénarii d'évolution.

■ Les bilans et enregistrements géologiques

■ Contrôle tectonique et climatique des flux de sédiments

S'il est évident et notoire que l'érosion et le climat sont des contrôles de l'érosion et des flux sédimentaires, la manière dont s'opère ce contrôle reste encore fortement discutée. Le débat récent sur l'origine des flux sédimentaires quaternaires, apparemment anormalement élevés, pose la question d'une éventuelle non-linéarité de la réponse climat-érosion avec une possible amplification de l'activité géomorphologique en régime climatique oscillant. Dans le même ordre d'idée, les bilans sédimentaires actuels réalisés sur différentes ceintures climatiques ne montrent pas de relations simples avec les paramètres climatiques moyens, sans doute parce que ces derniers ne sont pas représentatifs des interactions climat/érosion. Le rôle des événements climatiques extrêmes est en particulier à réapprécier tant sur la génération des flux sédimentaires que sur leur propre occurrence.

■ Des questions similaires se posent pour le forçage tectonique ; on est encore loin de mesurer la manière dont ses caractéristiques (vitesse, géométrie des déformations, ...) contrôlent les flux.

■ Ces questions fondamentales sur l'origine des flux sédimentaires doivent être abordées à plusieurs échelles de temps et d'espace, pour réellement arriver à comprendre, à quantifier et à modéliser, les relations entre forçages et flux.

■ Dynamique sédimentaire et enregistrement des flux d'érosion ("De la source au puits")

Entre l'érosion d'un sédiment et son dépôt en domaine marin, il existe toute une histoire sédimentaire faite de transits, de stockages intermédiaires, de dispersion, et d'échanges avec le milieu sous-jacents. Cette dynamique, encore très mal connue, va s'enregistrer dans les dépôts sédimentaires

• Dynamique et évolution de la surface terrestre

au même titre que les forçages climatiques ou tectoniques qui contrôlent la production de sédiments. Caractériser la dynamique des systèmes sédimentaires de leur source à leur puits est évidemment un objectif à part entière qui vise à mieux connaître les flux de matière qui transitent des continents vers les océans. C'est aussi une nécessité pour pouvoir interpréter le signal sédimentaire en termes de fluctuations tectoniques ou climatiques.

■ Cette thématique est au cœur de plusieurs programmes internationaux centrés pour la plupart sur l'étude des marges continentales et de leurs enregistrements sédimentaires. Ces structures géologiques représentant en effet le principal lieu d'accumulation des sédiments sur le globe. Le programme européen EUROMARGIN, financé par l'ESF, les programmes américains MARGINS ou STRATAFORM ont affiché ce thème – "From Source to Sink", de la source au puits – comme un de leurs axes de recherche privilégiés.

■ L'histoire du relief de la Terre et des planètes.

Au premier ordre, la topographie de la Terre est directement contrôlée par le mouvement des plaques lithosphériques entre deux stades supercontinents (le " cycle de Wilson " de durée comprise entre 200 et 300 Ma) qui contrôle à la fois les mouvements verticaux et les variations eustatiques à long terme. La superficie et l'altitude maximale du domaine continental sont atteintes en fin de régime de convergence des plaques, elles sont minimales en fin de phase de fragmentation, de divergence maximale des plaques. Ces faits, s'ils procèdent du bon sens, n'ont pas été réellement démontrés et quantifiés malgré les tentatives de reconstitutions globales de la paléogéographie de la Terre (projets Téthys et Péri-Téthys en France). Cette idée de changement global de la topographie de la Terre, outre sa connaissance intrinsèque, est fondamentale pour comprendre les grands changements climatiques, les bilans d'érosion et leurs effets sur les grands cycles géochimiques, les paléocirculations océaniques,...

■ La connaissance de l'histoire du relief de la Terre et des planètes peut également nous apporter une somme importante d'informations sur le comportement de la croûte en réponse à l'épaississement, ou sur les phénomènes plus profonds liés à la convection mantellique.

■ Pourvoir mesurer des paléo-altitudes est

évidemment un élément de quantification fondamental pour mener à bien ces recherches. Les méthodes actuelles, basées sur l'étude des paléoflores avec tous ses raffinements " iso-enthalpiques ", sur la mesure du fractionnement du $\delta^{18}\text{O}$, sur la mesure du gradient des diamètres de bulles de gaz dans les laves, ou sur les isotopes cosmogéniques, ont toutes des limites intrinsèques qu'il faudrait pouvoir dépasser. Un travail considérable mais ô combien déterminant reste par conséquent à mener pour améliorer la précision des techniques existantes.

■ Chantiers

■ S'il est évident qu'un programme d'études des RELIEFS doit promouvoir les études de terrain, la définition des cibles dépend pour l'essentiel des objectifs poursuivis. Il est donc illusoire de vouloir donner *a priori* des chantiers prioritaires. Nous avons seulement voulu mettre en avant quelques systèmes géologiques qui pour diverses raisons sont potentiellement des cibles intéressantes pour la communauté scientifique française.

■ Tout d'abord, un programme d'étude des RELIEFS doit être élargi à l'ensemble des planètes du système solaire. La diversité des agents d'érosion et des tectoniques permet en effet d'avoir une démarche globale et comparée. Une attention toute particulière devrait être portée à la planète Mars dont l'étude est une des priorités de la recherche française ; la dynamique de l'érosion et l'évolution paléoclimatique de la planète sont en particulier des thématiques qui rentrent tout à fait dans le cadre d'un tel programme.

■ Parmi les systèmes géologiques remarquables, l'Himalaya-Tibet et les Andes sont deux chantiers exemplaires en termes d'investissement de la communauté scientifique française et de résultats déjà acquis. Les études françaises menées en Himalaya et au Tibet, à la fois sur les flux de matière, sur l'histoire de la surrection ou sur les couplages tectonique-érosion-climat sont clairement de niveau international et méritent d'être poursuivies. Les Andes, dont la structure géologique est rigoureusement transverse aux zonations climatiques, représentent un chantier idéal pour étudier l'impact du climat sur l'érosion et la tectonique. Ce chantier bénéficie d'autre part du travail de longue durée menée par les équipes de l'IRD tant sur la partie occidentale que dans le bassin Amazonien. En domaine sous-marin voire même côtier, les recherches sont conditionnées par la capacité à mobiliser les

moyens à la mer. La définition des cibles doit donc se faire en étroite collaboration avec les programmes qui gèrent ces moyens.

■ Sans faire d'exclusive, la France doit aussi représenter une cible privilégiée des programmes de l'INSU, ne serait-ce que pour l'avantage que procure la proximité des infrastructures de recherche. Parmi les objets géologiques remarquables pour étudier les relations érosion-tectonique-climat, on peut citer bien évidemment les Alpes et les Pyrénées, le pourtour de la Méditerranée (histoire Messinienne, delta du Rhône, lien continent-/sous-marin), les Antilles, voire l'ensemble du territoire métropolitain qui subit une forte reprise de l'érosion depuis le quaternaire.

Les développements techniques et méthodologiques

■ Les développements méthodologiques doivent faire partie intégrante des recherches menées sur ces processus.

■ La communauté française bénéficiera évidemment de la mise à disposition de nouvelles données topographiques avec une résolution inégalée (Spot 5 du CNES/Spot Images ou données DRTM de la NASA-DLR-ASI). La capacité de nos moyens à la mer de fournir une bathymétrie précise doit aussi être encouragée en favorisant les études intégrées terre-mer.

■ Le développement d'outils de modélisation et d'expérimentation est un axe fort des recherches menées par la communauté française. Il faut clairement poursuivre cet effort en encourageant une utilisation plus large de ces moyens.

■ Enfin les méthodes géochimiques ont joué un rôle clé dans le développement de la géomorphologie quantitative. Il faut poursuivre ces recherches méthodologiques pour améliorer les chronomètres utilisables, la mesure des temps de résidence des sédiments, la mesure des paléo-altitudes, la datation des minéraux d'altération, etc.

Aux frontières de cette prospective

■ Cette prospective centrée sur le relief de la Terre touche un large éventail de thématiques de recherches pour lesquelles elle peut apporter des outils et une

connaissance nécessaire ou bien au contraire dont les développements sont essentiels pour comprendre le relief de la Terre.

■ Séquestration de CO₂. Cycle du carbone biogénique et marin. Si les flux de carbone mis en jeu par l'érosion sont une centaine de fois moins élevés que les flux anthropiques de CO₂, il n'en demeure pas moins qu'ils sont un élément important de toute prédiction du cycle du carbone surtout lorsque l'on considère des échelles de temps dépassant le millier d'années. Les liens entre cycle du carbone long terme et court terme doivent être approfondis surtout au niveau des couplages avec la biosphère.

■ Le rôle de la biosphère, végétation et micro-organismes. Un enjeu important sur l'étude de l'altération et de l'érosion est le rôle de la biosphère et des processus pédologiques. Ces processus géomicrobiologiques sont également des thèmes fondamentaux pour l'étude des surfaces et interfaces continentales et de l'environnement actuel.

■ Climats du passé. La paléotopographie et les flux d'érosion du passé sont des éléments clés de la compréhension de l'environnement ancien de la Terre. Les enjeux développés dans cette prospective, tant sur l'altération et le cycle du carbone que sur la compréhension des mécanismes élémentaires d'érosion et de transport des flux sédimentaires sont nécessaires pour mieux interpréter et modéliser les environnements aux échelles de temps géologiques.

■ Tectonique, métamorphisme et relief. La tectonique est le principal moteur de création du relief, et à ce titre, la dynamique de la Terre interne et les contraintes qu'elle exerce sur la surrection sont essentielles pour l'ensemble des enjeux envisagés.

■ Vulnérabilité anthropique. Il existe clairement une problématique "risque naturel" associée à la thématique RELIEFS via, par exemple, les flux catastrophiques (glissements de terrain, coulées de boue, ...), le contrôle des inondations par le relief, ou le transport polluants par les sédiments.

ECLIPSE

Première partie

Observer, comprendre, modéliser le système Terre et les planètes

A .3b -Dynamique
et évolution de la
surface terrestre
-Paléo
environnement

sur *impa*
société

- *Objectifs et attendus*
- *Communautés impliquées*
- *Descriptif du programme*
- *Développement*
- *Modes d'actions*
- *Comité scientifique*

variabilité
climatique

INTRODUCTION

- *Environnement et climat passé*

I



Anne-Marie Lézine
Gilles Ramstein

Michel Bats, Luc Beaufort, Jean Broutin, Michel Brunet, Christian France-Lanord, Henri Galinie, François Guillocheau, Jean-Jacques Hublin, Gervan Madec, Michel Magny, Catherine Ritz, Elisabeth Verges, Jean Besse, Francis Grousset, Joël Guiot, François Favory, Bernard Delay, John Ludden, Sander Van der Leeuw.

Les espaces aujourd'hui désertiques du Sahara et du Rub Al-Khali en Arabie étaient couvertes, il y a 9 000 à 6 000 ans de sédiments lacustres dont on retrouve aujourd'hui les témoins au milieu des grands espaces dunaires. © cnrs-lsce photo A-M. Lézine

Environnement et climat passé (ECLIPSE II)

Objectif central d'Eclipse I (2000-2003) était l'étude des changements de l'environnement passé à plusieurs échelles de temps, associant les différentes composantes du système Terre afin de mieux comprendre les crises géologiques majeures, d'évaluer les tendances à long terme de l'évolution, d'intégrer à la connaissance de l'environnement l'étude du comportement des êtres vivants et de leur évolution et leur adaptation aux changements, crises ou catastrophes. Si ECLIPSE I était un programme résolument " Bottom-Up " visant à identifier la communauté concernée par l'étude des paléo-milieus et la structurer de façon à faire avancer la compréhension du système global par le biais de la confrontation modèles-données, ECLIPSE II entend continuer cette action pendant les quatre années qui viennent (2004-2007) et la renforcer sur des axes spécifiques en intégrant des approches originales ou nouvelles (e.g. la biologie moléculaire, la paléogénétique, le développement de nouveaux traceurs ou encore

l'intégration des indicateurs bio-climatiques dans les modèles numériques).

■ ECLIPSE II s'appuyera sur la dynamique créée par ECLIPSE I (pluridisciplinarité, mise en place de bases de données) pour aborder les questions suivantes :

- Comment documenter la variabilité climatique et son impact sur les populations et les écosystèmes et aborder les mécanismes de dispersion et diversification des espèces ? Il s'agira de mieux intégrer les données paléoenvironnementales des domaines océaniques et continentaux, de rechercher de nouvelles archives, et de préciser la mesure du temps.

- A l'échelle géologique, quelle est la réponse du vivant aux changements climatiques et environnementaux ? Cette question sera abordée par le biais de l'étude des grandes crises de l'histoire de la Terre. Les mécanismes de rétroaction du vivant mais aussi de la tectonique et de l'érosion sur le climat, pour la modélisation des grands cycles géochimiques, feront l'objet d'une attention particulière.

Communautés impliquées

S**DU** : paléogéographie, géologie, stratigraphie, minéralogie, (micro-)paléontologie, paléobotanique, palynologie, géochimie, modélisation climatique et environnementale.

Communautés regroupées dans les sections 11, 12 et 13 du CNRS.

■ **SDV** : palynologie, paléontologie, anthropologie, paléo-génétique, communautés principalement regroupées dans la section 30

■ **SHS** : histoire, archéologie et paléontologie, géographie, reconstruction de l'environnement (faune et flore). Spécialités représentées dans la Section 31.

■ Le programme ECLIPSE II est susceptible de toucher non seulement les chercheurs et enseignant-chercheurs liés au CNRS, mais également les scientifiques d'autres communautés, notamment de l'IRD.

Descriptif du programme

L'appel d'offre ECLIPSE II (2004-2007) se structurera suivant deux grands axes qui correspondent aux thématiques évoquées ci-dessus. Un axe " blanc " permettra en outre de proposer des sujets de recherche en dehors de ces axes.

Le Climat, l'Environnement et l'Homme (SDU-SHS-SDV)

Il s'agira prioritairement d'explorer les thèmes suivants :

Documenter la variabilité et les extrêmes climatiques à l'échelle pluri-millénaire et son impact sur les sociétés humaines

Il s'agit d'étudier les stratégies de colonisation/régression et adaptation de l'environnement et des groupes humains en réponse à la variabilité climatique récente (cycles glaciaires/interglaciaires, variabilité intraholocène...). Ce thème inclut l'acquisition de données (archives historiques ou naturelles des océans, des continents et des glaces) et le développement de nouveaux indicateurs pour caractériser aussi bien les variations de grandeurs physiques (ex : température, profondeur de la thermocline...) que des traceurs moléculaires qui permettent de comprendre l'histoire des populations et des espèces quel que soit leur milieu de vie. Les processus en retour seront également analysés : par exemple, quel impact sur le climat peut avoir l'action de l'homme sur le milieu naturel depuis le Néolithique ?

Etudier les conditions d'émergence des premiers primates anthropoïdes et des hominidés

Il s'agit d'obtenir une meilleure connaissance de la chronologie et des modalités d'échanges fauniques entre les deux grandes régions clés pour la compréhension de l'évolution de l'Homme : l'Asie et l'Afrique et d'étudier les mécanismes de dispersion et diversification des pré-humains dans leur cadre

environnemental et climatique.

Une Terre qui bouge (SDV-SHS)

Ce second volet concerne spécifiquement les grandes échelles de temps (SDU-SDV). Il reprend et élargit à de nouveaux champs disciplinaires les thématiques initiées par ECLIPSE I.

Comment mieux caractériser les relations tectonique, orogénèse, volcanisme, cycle du carbone et variations climatiques.

Les interactions entre dérive latitudinale des continents, orogénèse, ouvertures de bassins, et cycle du carbone sont extrêmement importantes et nécessitent des études plus poussées. Il s'agit de comprendre l'influence de ces facteurs internes sur l'évolution à long terme du climat et cerner le rôle régulateur du cycle du carbone à l'échelle globale. Se superposant aux variations lentes, des événements rapides ou catastrophiques (volcanisme des traps, déstabilisation des stocks de méthane) peuvent provoquer des changements abrupts du climat qu'il faut aussi explorer.

Mieux comprendre les grandes crises biologiques.

L'ambition est d'étudier la réponse du milieu biologique aux grandes crises de l'environnement et du climat du passé. De fortes variations environnementales vont-elles jouer un effet bottleneck dans l'évolution des espèces ? La comparaison des crises entre elles permettra de mieux cerner les mécanismes à l'origine des différents " patterns " d'extinction.

Mieux comprendre les mécanismes de rétroaction du vivant sur le climat.

Les grandes innovations du vivant comme l'installation de la biosphère sur les continents ont-elles un effet global et durable, à travers les changements d'altération, sur la teneur en CO₂ de l'atmosphère ?

Développements

A l'intérieur de ces deux axes, trois sujets de recherche " ciblés " sont définis et placés sous la responsabilité d'un coordonnateur nommé. Ces sujets doivent être fédérateurs de la communauté française. Ils seront menés, à terme, en collaboration avec des partenaires britanniques et allemands dans le cadre de relations bi- ou trilatérales qui seront mises en place conjointement par le CNRS, le NERC et le DFG.

■ **Le rôle des fluctuations climatiques dans la mise en place et le maintien de la structure génétique des populations et des communautés.** **Projet à dominance SDV**, coordinateur : Rachid Cheddadi

L'objectif de cet axe est de mettre en relation données biologiques du passé et données génétiques actuelles pour comprendre la dynamique des écosystèmes, établir les routes de migration des espèces (ou des variants génétiques) et estimer leur vitesse. Il permettra également d'évaluer l'impact de l'homme sur le milieu naturel et d'estimer les capacités d'adaptation d'une espèce aux changements climatiques futurs.

■ **Changements climatiques, biologiques et culturels en Europe au cours du dernier cycle climatique.** **Projet pluridisciplinaire à dominance SHS (+SDU et SDV)**, coordinateur : Francesco

D'Errico

L'objectif de cet axe est de faire émerger des modèles d'utilisation du territoire européen par les derniers néanderthaliens et par les premières populations d'hommes modernes qui intègrent les dimensions climatique, environnementale, biologique et culturelle. Cet axe implique l'acquisition de données paléoenvironnementales, paléontologiques, paléanthropologiques et archéologiques, la quantification des proxies, et la modélisation.

■ **Environnement et climat du Crétacé.** **Projet à dominance SDU (+ SDV)**, coordinateur : François Guillocheau

Il s'agit de collecter les données de l'environnement du Crétacé pour comprendre et modéliser les variations climatiques à l'intérieur de cette période la plus chaude de l'histoire de la Terre. Cet axe s'appuie sur un effort de cartographie à l'échelle la plus précise permettant la reconstitution fine de la paléogéographie et des paléoenvironnements à l'échelle globale. Il permettra également d'aborder la question de l'adaptation du vivant à des conditions très différentes des actuelles (comme, par exemple, les faunes et flores polaires). Cette approche globale permettra de comparer l'ensemble des données géologiques et paléontologiques avec les résultats de modèles pour différentes périodes du " Crétacé moyen ".

Modes d'action

L' **appel d'offre**, deux modes d'actions sont envisagés :

- un appel d'offre ouvert sur les actions prioritaires du programme
- des projets ciblés, à visée européenne, coordonnés par un scientifique nommé par la direction du programme. Cet aspect du programme implique (1) la recherche d'un accord entre les organismes de

recherches concernés (CNRS, NERC, DFG), (2) la mise en place d'une structure multilatérale d'évaluation (rédaction des projets en anglais, invitation de représentants NERC et DFG au comité scientifique du programme par exemple).

■ **Les projets** : évaluation tous les ans sur la base d'un rapport scientifique et financier. Dans le cas de projets impliquant plusieurs programmes du CNRS et de l'INSU, il sera fait appel à un représentant de ces programmes pour leur évaluation lors de la

• Environnement et climat passé

réunion du CS. Ceci afin d'éviter les duplications.

■ Les bases de données

paléoenvironnementales : cette action, prise en charge par MEDIAS-France dans le cadre d'ECLIPSE I a abouti à la mise en place d'un serveur de données et d'une base de méta-données qu'il conviendra de développer. Des bases de données mono et multi-

proxies devront être élaborées couvrant les différents domaines de la science couverts par ECLIPSE II.

■ **les actions en soutien** : comme c'était le cas lors d'ECLIPSE I, le nouveau programme sera accompagné d'écoles de formation, ateliers et colloques spécialisés.

Le Comité Scientifique (2002-2003)

Président du Comité Scientifique

Gilles Ramstein

Jean Broutin SDV

Michel Brunet SDV

Yves Godderis SDU

Coordonnateurs des projets européens

Rachid Cheddadi SDV

François Guillocheau SDU

Francesco d'Errico SHS

Luc Beaufort SDU

Christian France-Lanord SDU

Experts

Henri Galinié SHS

Michel Magny SHS

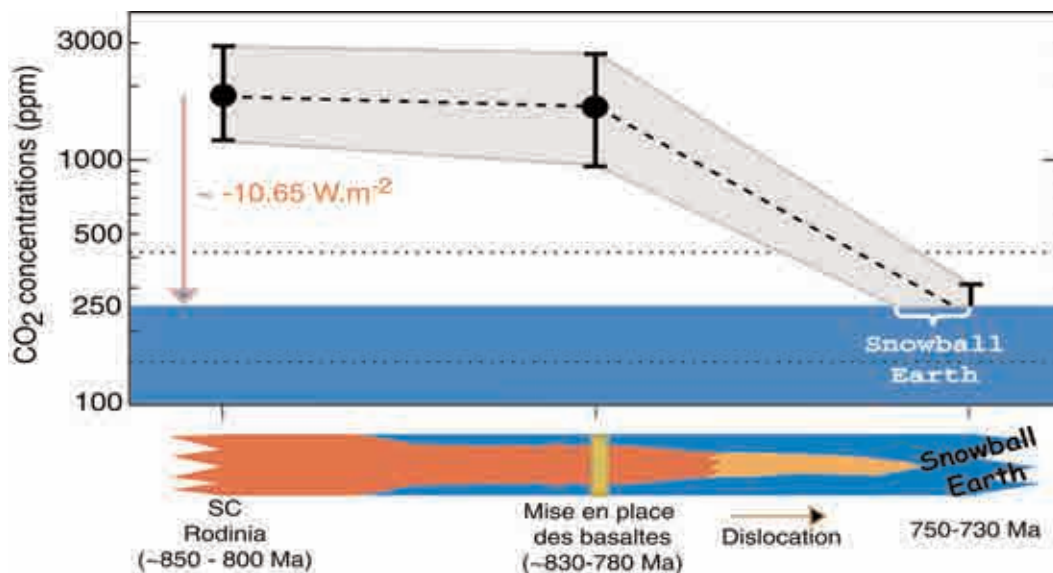
Membres invités

Représentants du comité national de la recherche scientifique, des départements du CNRS (SDU, SHS, SDV) et des programmes du CNRS et de l'INSU.





Les tillites du Brésil témoignent de la glaciation Néoprotérozoïque.
© A. Nedelec



Simulation de l'évolution du CO₂ avec le modèle GEOCLIM entre ~ 850 et 730 Ma tenant compte de la disposition des continents au cours du temps et des provinces basaltiques. La zone bleu indique les valeurs de CO₂ requises pour générer une glaciation globale en configuration dispersée (celle atteinte autour de 750 Ma) avec le modèle GEOCLIM. Les barres d'erreur verticales représentent les incertitudes sur le flux de dégazage et sur la surface des traps mise en place. Le fractionnement du supercontinent Rodinia concomitant à la mise en place des provinces basaltiques provoque une chute de la teneur en CO₂ de 1550 ppm, soit une baisse du forçage radiatif de 10,65 W.m⁻², suite à l'augmentation du ruissellement continental liée à la diminution de la continentalité. Cette baisse de CO₂ produit l'initiation d'une glaciation globale dans le modèle GEOCLIM. Le scénario quantifié ici permet donc d'expliquer l'existence d'un événement de type Snowball Earth (Terre recouverte de glace) durant le Néoprotérozoïque.
[Donnadieu et al., 2004]

séisme

Deuxième partie
Aspects anthropiques du
système Terre

B .1-Risques naturels et observations

- *Enjeux de la recherche*
- *Bilan des connaissances*
- *Axes de recherches prioritaires*

• Risques naturels et observations



Comprendre le fonctionnement de la planète est un objectif fondamental de la connaissance. C'est aussi l'objet d'un vigoureux effort international de recherche dont les retombées sociétales en termes de développement durable justifient les importants investissements consentis. Ces recherches reposent sur la qualité d'observations physiques et chimiques à caractère pérenne portant sur le milieu naturel. La rareté de certains phénomènes (séismes, éruptions volcaniques) et la nécessité d'enregistrer en continu certaines variables (champs magnétique et gravimétrique, composition chimique d'éléments dans l'eau et les systèmes volcaniques) confèrent aux dispositifs d'observation des sciences de la Terre un caractère bien spécifique. Les observations au sol, qu'elles soient effectuées dans des observatoires permanents au sein de réseaux internationaux ou acquises lors de campagnes de mesures, constituent des compléments indispensables aux observations conduites depuis l'espace et vice-versa.

Une exigence sociale de sécurité et de prévention grandissante met les problèmes des risques naturels au centre des préoccupations des Sciences de la Terre. Bien qu'il s'agisse là d'un domaine qui nécessite l'intervention de différents domaines de compétence (Ingénierie, Sciences de l'Homme et de la Société), l'analyse et la compréhension des processus naturels sont fondamentaux pour que des progrès significatifs soient réalisés. Les risques liés à la Terre solide (séismes, volcans, mouvements gravitaires) sont marqués par une physique complexe, associant des phénomènes d'échelles spatiales différentes aboutissant à des accélérations catastrophiques. Les objectifs aujourd'hui sont d'aller vers une quantification des phénomènes, par l'utilisation des méthodes d'observation les plus modernes et par un recours à la modélisation physique ou numérique. L'utilité de ces recherches passe aussi par un effort pour en insérer rapidement les apports dans les schémas de prévention. Cela passe par une collaboration renforcée avec les organismes chargés des aspects opérationnels.

Avec l'ensemble des Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU), la communauté française dispose d'un outil exceptionnel pour aborder les problèmes des risques naturels et bien au-delà un vaste ensemble de questions scientifiques fondamentales. Les observatoires permettent une acquisition des données continues et pérennes, ce qui est indispensable à l'étude de phénomènes rares comme séismes, grandes éruptions ou variations du champ magnétique dont les échelles de temps de répétition sont bien supérieures à celles de simples programmes de recherche. Les OSU sont le support naturel des recherches concernant la sismicité, le volcanisme, la gravimétrie et le géomagnétisme. Ils sont utilement complétés par les observatoires maintenus par d'autres instituts (IRD, IPEV BRGM, etc.). Seules des observations de qualité et sur de longues durées peuvent permettre d'avancer sur des problèmes comme la compréhension du rôle des comportements sismique-asismique des failles, la variabilité des émissions volcaniques et l'évolution des édifices ou les évolutions temporelles du champ magnétique interne et du champ de pesanteur. Des campagnes scientifiques spécifiques limitées dans le temps pour cerner une question scientifique précise sont néanmoins souvent nécessaires en appui aux activités des observatoires.

Michel Campillo

avec le comité scientifique du
PNRN :

Rolando Armijo, Pierre-Yves
Bard, Bernard Bossu, Pascal
Bernard, Catherine Berge-Thierry,
Claude Jaupart, Claude Gilbert
Tim Druitt, Yves Gallet, Gérard
Brugnot, G. Herall H. Modaresi,
Jean-Louis Durville, Michel
Granet, Michel Quintard Pascale
Ultre-Guerard, Jean Virieux.

Bilan des connaissances

Volcans

■ Les techniques de télésurveillance ouvrent de nouvelles perspectives tant sur le plan de la compréhension des processus que du suivi à long terme. Les images optiques et radar permettent de bâtir des modèles numériques de topographies de haute résolution. Les déformations de surface peuvent être suivies par GPS ou par interférométrie radar satellitaire ou terrestre avec des précisions suffisantes pour suivre les processus internes. Des données quantitatives sur l'éruption sont aujourd'hui disponibles : vitesses et dynamique par radar Doppler et les mesures acoustiques, flux et composition des gaz (spectroscopie FTIR, COSPEC, DOAS), vitesse et dynamique d'éruption (radar Doppler, détecteurs acoustiques), concentration des particules dans les panaches éruptifs (mini LIDAR), flux thermique (caméras infra-rouge). Ces données nouvelles apportent des contraintes aux modèles physiques de volcan développés à partir de simulation analogique et numérique des transports multiphasiques et de la stabilité des édifices. Les observatoires volcanologiques assurent la pérennité du suivi des volcans sur le territoire national et développent des programmes spécifiques de recherches sur leur fonctionnement. Il est nécessaire de coupler télédétection avec mesures au sol. Ces dernières apportent d'une part une mesure bien calibrée, utile pour recalibrer les observations spatiales et, d'autre part, elles permettent une résolution en temps inabordable avec les techniques de télédétection.

Séismes

■ La géométrie des failles recoupant la surface est reconnue avec précision grâce aux nouvelles techniques d'imagerie satellitaires qui complètent le travail de terrain. L'identification des failles potentiellement actives reste un enjeu majeur, particulièrement dans le cas du territoire national, du fait de sa faible sismicité. De nombreux exemples récents ont montré l'importance d'accidents ayant peu d'expression directe en surface. Le problème des failles cachées est important et ne peut être abordé

que par une imagerie fine de subsurface jusqu'à quelques kilomètres de profondeur. Notre connaissance de l'histoire de ces failles actives a progressé grâce à la réalisation de tranchées ou de carottages permettant l'analyse des perturbations de sédimentation dues aux séismes et à des méthodes de datations précises en particulier reposant sur l'utilisation des gaz cosmogéniques pour l'étude des escarpements.

■ L'étude de la source sismique a connu des progrès spectaculaires ces dernières années. Bien que de nombreuses questions restent ouvertes, les modèles de friction ont renouvelé nos approches du cycle sismiques, de l'interaction entre séismes et notre compréhension de la physique des séismes eux-mêmes. S'appuyant sur les développements de l'accélérométrie et de la géodésie, les inversions des processus de glissement et leur modélisation dynamique permettent de réaliser des scénarios incluant le calcul des mouvements forts attendus au voisinage des failles. L'influence première des structures superficielles sur les mouvements destructeurs ne fait plus de doute et la compréhension des effets de propagation dans les derniers kilomètres ouvrent des opportunités pour des applications assez directes des recherches universitaires en termes d'aide aux politiques de prévention.

■ Les observatoires assurent la surveillance sismique avec le réseau national RENASS qui centralise, valide et distribue les données des différents instituts. Une localisation rapide et routinière est fournie à partir des enregistrements de 113 stations réparties en France. En complément, le Réseau Accélérométrique Permanent (RAP) recueille des données de mouvements forts qui permettent des études des sources sismiques et des analyses de sismologie pour l'ingénierie. Les mouvements lents sont mesurés grâce aux réseaux GPS permanents REGAL ou le futur RENAG.

**Observation globale :
sismologie, GEOSCOPE,
magnétisme, INTERMAGNET,
gravimétrie GGP**

■ Géoscope est la contribution française au réseau

• Risques naturels et observations

global sismique large bande. Du fait de la répartition originale des stations GEOSCOPE, ce réseau joue toujours un rôle majeur dans de nombreuses études de sources et de structure. Un effort de fond a été fait pour rendre l'ensemble des données accessibles en ligne au centre de données GEOSCOPE ou au centre DMC-IRIS. Le développement de la sismologie large bande a conduit à un renouvellement complet de notre vision de la structure interne tridimensionnelle de la Terre.

■ Cependant, la couverture globale est encore incomplète. Le développement et l'installation d'observatoires en fond de mer, principalement dans l'hémisphère sud, permettrait de remédier à ce problème. La nécessité de disposer d'observatoires en fond de mer est vrai également pour d'autres disciplines (géodésie, gravimétrie, ...). L'avenir de GEOSCOPE passe également par le développement de stations multi-paramètres qui permettraient d'étudier les co-variations de plusieurs paramètres physiques et également d'améliorer le rapport signal sur bruit des données.

■ L'observatoire gravimétrique de Strasbourg, lié à l'EOST, est la seule station française de mesures continues des variations du champ de pesanteur

terrestre. Elle fait partie du réseau mondial de gravimètres supraconducteurs GGP (Global Geodynamics Project) et alimente les recherches en géodynamique globale (dynamique et structure de la Terre profonde, couplage Terre solide-enveloppes superficielles, marées terrestres). Le site de Strasbourg est également le site principal d'accueil du gravimètre absolu national.

Mouvements gravitaires

■ Les mesures de caractérisation et d'évolution des structures potentiellement dangereuses sont notablement insuffisantes pour permettre une stratégie efficace de modélisation. Les efforts récents se sont donc portés sur l'acquisition de données (structure en profondeur de grands glissements, mesures géodésiques, hydrologiques et géochimiques), d'une part, et l'étude des processus élémentaires associés aux instabilités (instabilités de milieux granulaires, phases d'écoulement rapide), d'autre part. La recherche sur les mouvements de terrain a structuré une communauté scientifique venant d'horizons très variés. Les enjeux sont d'importance, allant de l'identification des zones potentielles de glissement à l'étude approfondie et au suivi des zones susceptibles de déplacements rapides.

Axes de recherche prioritaires

Un projet global se décline, d'abord, par l'observation des phénomènes naturels, l'élaboration des modèles physiques qui rendent compte de ces observations puis, éventuellement, la production de scénarios quantitatifs de nature à être utilisés, par exemple pour la prévision et la prévention des risques. L'évolution de la recherche, ces dernières années, a montré que ces domaines d'activités ne devaient pas être dissociés. La coordination par la programmation des efforts spécifiques requis par chacun des domaines est une nécessité.

Densification des observations de phénomènes naturels

■ L'échelle pertinente d'observation, pour autant qu'elle soit pratiquement atteignable, est imposée par les processus physiques ou le milieu naturel. Dans de nombreuses applications nous n'avons pas atteint cette limite (volcanologie, sismogenèse, tomographie, géomagnétisme). Certaines des contraintes technologiques qui ont limité nos capacités (informatique, télécommunications, technologies spatiales) sont progressivement levées et il est

possible d'accéder à de nouvelles résolutions spatiales par le déploiement de nombres importants d'instruments. Les efforts dans cette direction sont à même de changer qualitativement notre compréhension des processus physiques et ils doivent être privilégiés aux dépens d'opérations plus classiques. Un second axe de développement des expérimentations implique des mesures directes *in situ*, à savoir en profondeur donc en forage, sur des failles actives reconnues ou dans des édifices volcaniques. Face au risque sismique majeur auquel les Antilles sont soumises, recourir à l'installation de stations en fond de mer dans la zone de subduction améliorerait considérablement la localisation spatiale et temporelle des séismes régionaux et permettrait une meilleure quantification des mouvements forts potentiels. En gravimétrie, l'installation d'un observatoire français dans l'hémisphère Sud compléterait utilement le réseau international.

Modélisation des phénomènes naturels

L'introduction de modélisations prenant en compte des phénomènes naturels complexes fait appel à une communauté de plus en plus spécialisée. La communauté française est particulièrement bien placée dans ce domaine puisqu'elle est à été récemment à l'origine de développements prometteurs (comme les méthodes d'éléments spectraux). On peut noter les effets des hétérogénéités, les milieux à plusieurs phases, les comportements non-linéaires, les phénomènes critiques tant dans des approches déterministes que dans des approches statistiques. Ainsi, les modélisations qui restaient "simples" en raison de notre connaissance limitée des milieux naturels devraient, dans l'avenir, devenir plus quantitatives et réclameront des stratégies de mises en œuvre en équipes adaptées à l'ampleur des problèmes.

Lier aléa et vulnérabilité

Il est classique d'analyser le risque comme le croisement d'un aléa et d'une vulnérabilité. L'aléa naturel est évidemment l'objet de la recherche en sciences de la Terre mais il est de plus en plus clair qu'une part de la compréhension de la vulnérabilité relève aussi des mêmes compétences. Il est naturel de prolonger l'estimation des mouvements sismiques par une analyse de l'interaction sol-structure en offrant ainsi une interface plus large de collaboration avec une communauté d'ingénieurs. Il a été montré

récemment un effet en retour des vibrations des constructions sur les ondes sismiques. Ce phénomène pourrait devenir important pour les grandes métropoles et devrait être quantifié. Les effets des constructions sur la propagation des ondes doivent être étudiés pour rendre crédibles les applications à des milieux très urbanisés, qui sont bien sûr le domaine de prédilection des analyses d'aléa sismique.

Développer les études sur les instabilités gravitaires

Les différentes échelles inhérentes à cette problématique compliquent la stratégie d'observation et les outils satellitaires ou aéroportés doivent être impliqués dans les reconnaissances de sites potentiels. Les facteurs déclenchant, de nature géométrique et rhéologique, devront être bien cernés par des compétences relevant de domaines extrêmement variés allant de la mécanique des fluides à celle des solides, en passant par la physique des milieux granulaires ou divisés. Les modélisations analogique et numérique sont à développer. La compréhension du contexte géologique et tectonique des grands glissements permettra de mieux appréhender la complexité des phénomènes naturels en jeu.

Développer les études en géomagnétisme

Associées aux observations permanentes, l'acquisition de données magnétiques satellitaires a montré des variations rapides des caractéristiques du champ magnétique interne. La description précise et l'interprétation de ces évolutions sont un enjeu très important. Des avancées significatives sont en cours autour de la modélisation expérimentale et numérique de l'effet dynamo (magnétohydrodynamique du noyau liquide) qui doivent être soutenues.

Développer les études en gravimétrie

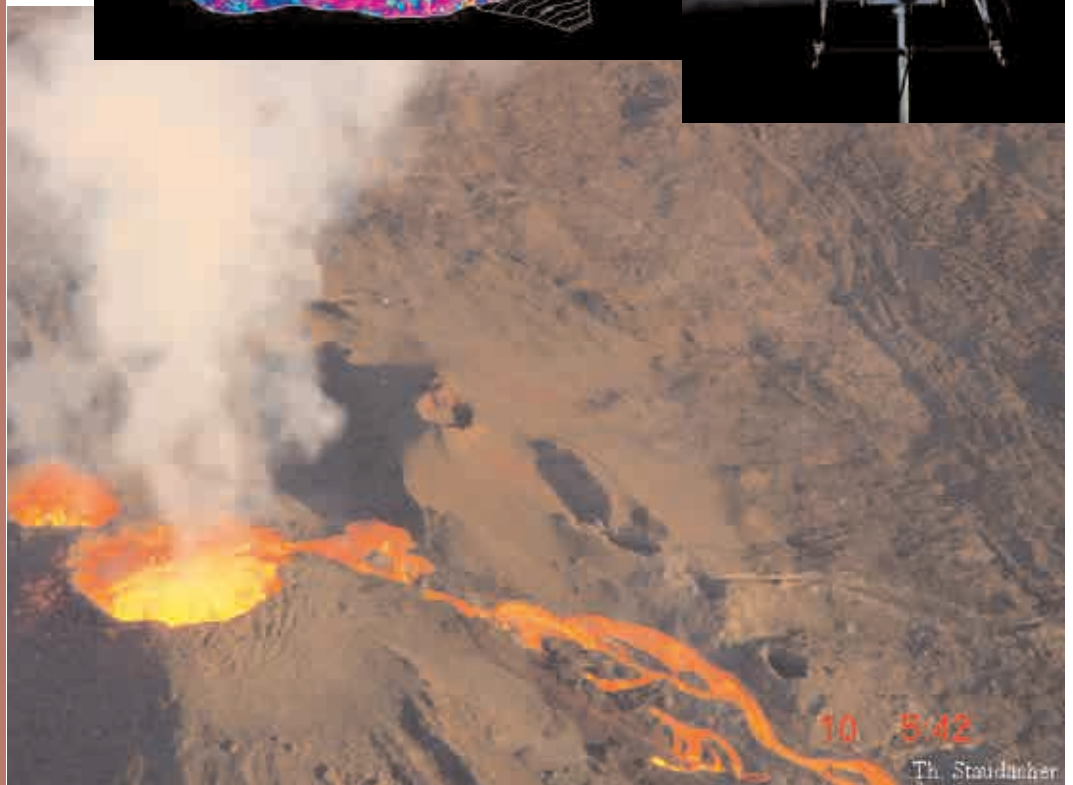
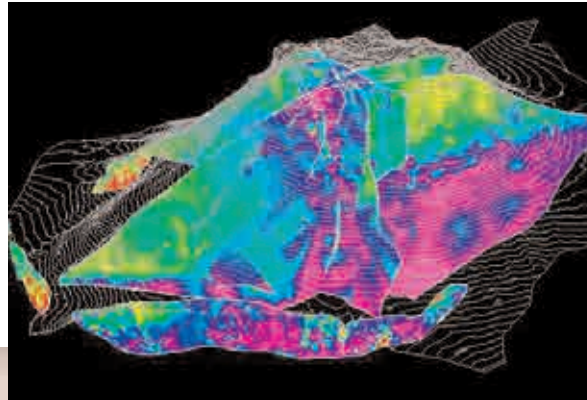
De la même manière que pour le géomagnétisme, le calage des données de gravimétrie spatiale des satellites récemment lancés tels que CHAMP ou GRACE par des mesures continues au sol des variations de l'intensité de la pesanteur est un enjeu de première importance.

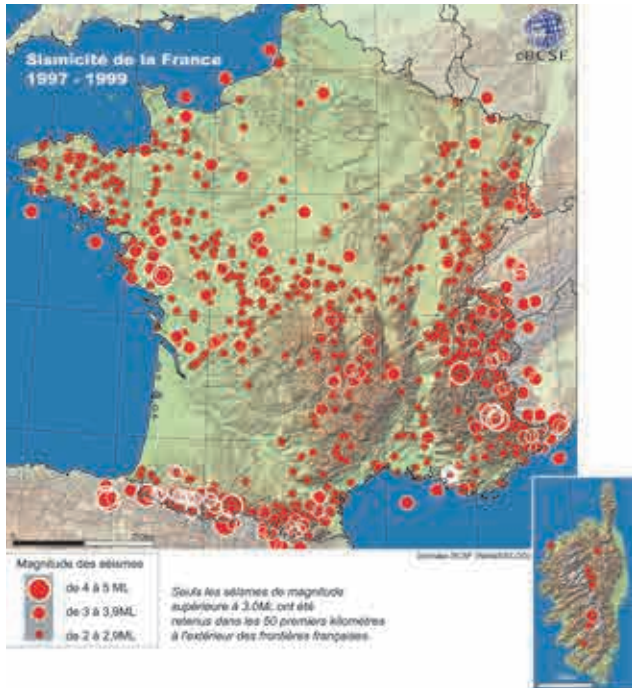
• Risques naturels et observations

■ Le futur des observatoires

■ Tout en gardant leurs spécificités, les observatoires doivent s'adapter aux mutations technologiques requises par les développements (grands instruments, densification, observation spatiale...). Il est aussi nécessaire d'y associer une réflexion sur la gestion et la distribution des observations (bases de données) qui ont changé de volume, de nature et de demande. Un effort majeur doit être entrepris pour que toutes les données des observatoires soient mis à la disposition de la communauté scientifique française d'une manière

rapide et sous des formes permettant une exploitation optimale. Les tâches d'observation globale doivent associer à la fois des composantes traditionnelles au sol et des composantes spatiales en particulier pour les observatoires magnétiques, mais une telle réflexion doit aussi être menée en ce qui concerne les activités d'observations géodésiques et gravimétriques. Des moyens humains à la hauteur des ambitions de notre communauté peuvent seuls garantir l'avenir d'un réseau d'observatoires dont la nécessité ne peut que s'affirmer avec les l'exigence de données de la recherche fondamentale et de ses applications à des problématiques d'intérêt général.





Page de gauche :

Tomographie électrique du dôme de la Soufrière.
©Géosciences Rennes-cnrs

Volvorad pour l'observation des panaches volcaniques à distance. ©Magmas et volcans - cnrs

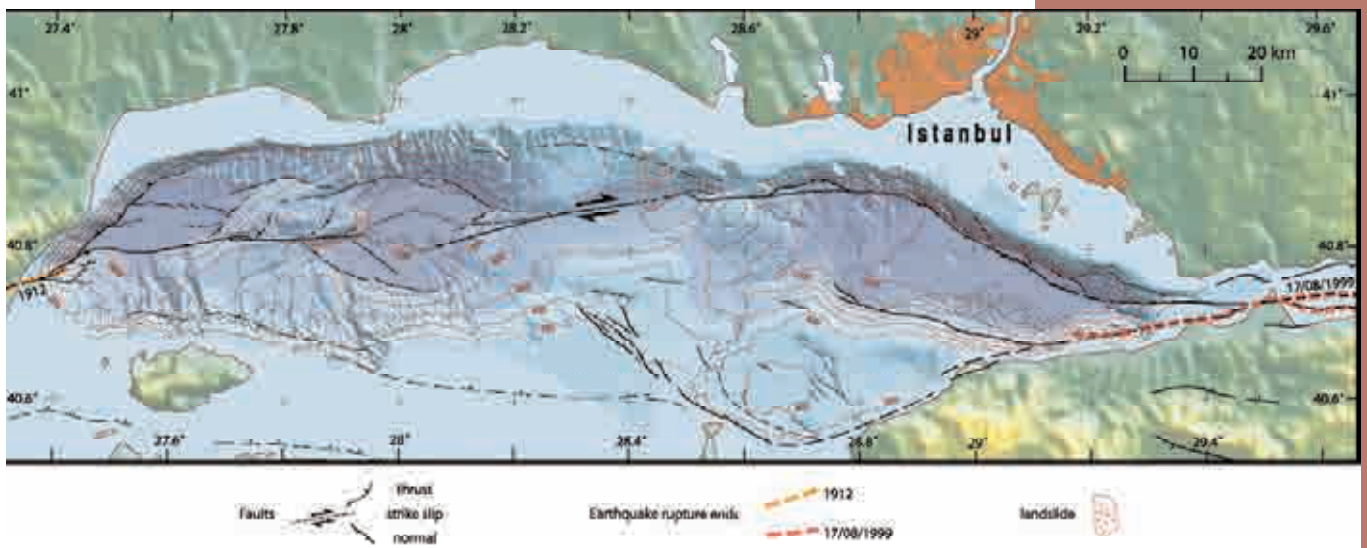
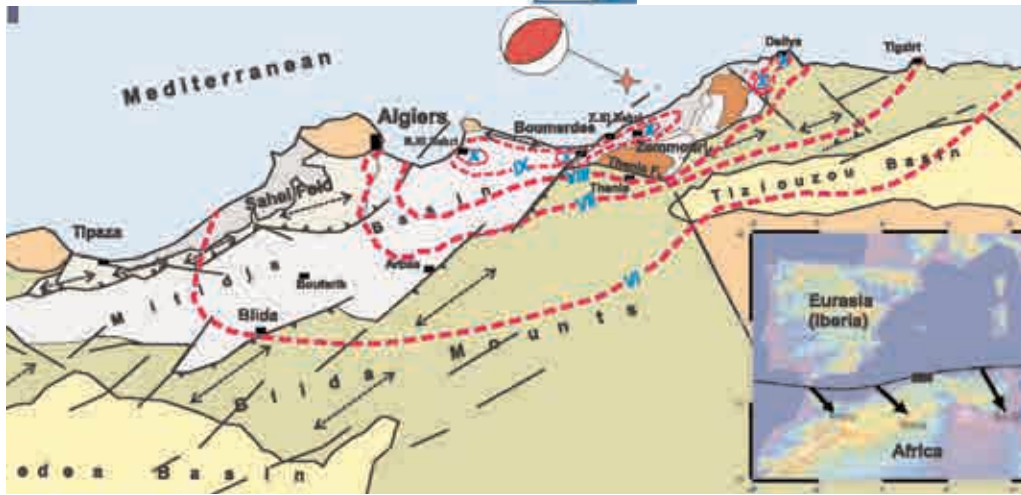
Eruption au Piton de la Fournaise, Ile de la Réunion.
© ipgp-cnrs

Page de droite

Sismicité de la France
©BSCSF-EOST

Analyse du séisme de Boumerdes
©EOST-cnrs

Carte bathymétrique de la mer de Marmara
© ipgp-cnrs



minéra

Deuxième partie

Aspects anthropiques du
système Terre

B .2-Gestion des
déchets, un enjeu capital
pour préserver les ressources

forage

contamination

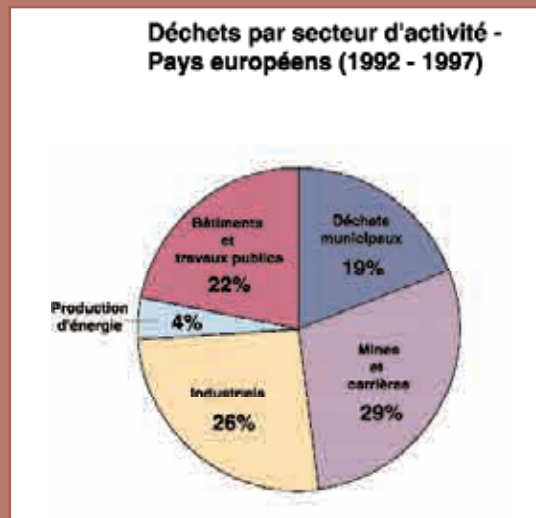
- *Les enjeux de la recherche*
- *Bilan des connaissances*
- *Les axes prioritaires*
- **GDR FORPRO**
- **GDR NOMADE**

traçage

écoulement

- *Gestion des déchets*

Un enjeu capital pour prévoir les ressources naturelles



Origine des déchets
industriels et banals

Cette réflexion a été menée par un groupe composé de chercheurs et d'ingénieurs des organismes publics et des industries impliquées dans la recherche fondamentale et opérationnelle sur les thématiques concernées.

Jean Yves Bottero (CEREGE)

Avec la collaboration de :

Alain Bonneville (IPGP),

Anne-Marie Boullier (LGIT Grenoble),

Georges Calas (Paris 6),

Jean-Pierre Delhomme (Schlumberger),

Etienne Deloule (CRPG Nancy),

Alain Feugier (IFP),

Jean-Paul Foucher (IFREMER),

Christian Fouillac (BRGM),

Bruno Goffé (ENS Paris),

Dominique Guérillot (IFP),

François Kalaydjian (IFP),

Joël Lancelot (GDR FORPRO),

Patrick Landais (ANDRA),

Patrice Piantone (BRGM),

Christophe Poinssot (LCRE-CEA),

Georges Raimbault (LCPC),

Thierry Reuschle (EOST-IPGS),

Maria Zamora (IPGP).

Les enjeux de la recherche

Que représente la gestion des déchets dans nos sociétés développées ?

■ Le mode de gestion des déchets est un choix de société. Leur gestion oblige les sociétés développées à prévoir sur le long terme leur devenir. Si le long terme est pris dans son sens strict pour les déchets nucléaires il s'applique de plus en plus pour les autres déchets (urbains et industriels). Pour ces derniers la gestion est délocalisée au niveau des communautés de communes et d'agglomération ainsi que des régions alors que pour les déchets nucléaires les décisions sont nationales et prises à un très haut niveau de l'état.

■ La perception du citoyen de la gestion des déchets nucléaires est modulée par les contraintes énergétiques du pays, les nouvelles données environnementales telles que la limitation de l'effet de serre et des marées noires, le poids des lobbies pro et anti-nucléaires et la sensibilisation médiatique. La gestion localisée, " très politique ", fertilise les attitudes de rejet et

augmente le coût des contraintes dans les choix technologiques de la gestion des déchets urbains et industriels. La loi de 1992 a apporté des modifications importantes de la gestion des déchets. En 10 ans la mise en décharge des déchets les plus dangereux a augmenté, et l'incinération hors et dans les cimenteries représente plus de la moitié des modes de traitement des déchets dangereux

Quantités et sources

■ Contrairement aux déchets nucléaires, l'origine des autres déchets est très variée (cf fig.). Les quantités produites sont énormes et en augmentation constante :

- 94 Mt de déchets industriels banals (DIB) ;
- 9 Mt de déchets industriels dangereux (DIS) ;
- 130 Mt de déchets issus du BTP ;
- 375 Mt de déchets agricoles.

Cela coûte 130 euros/habitant/an, 170 euros/habitant/an pour les eaux usées et la R & D représente 15 euros/habitant/an.

La production de déchets nucléaires de très faible activité (TFA) va augmenter fortement dans les 50 prochaines années en fonction du programme de démantèlement du parc de réacteurs nucléaires français en fin d'exploitation.

Bilan des connaissances

La loi de 1991 relative aux déchets radioactifs à haute activité et à vie longue, fixe non seulement les axes de recherche mais définit également les acteurs de ce domaine, CEA et ANDRA. Les relations entre ces organismes et le CNRS ont été structurées au travers du Programme pour l'Aval du Cycle Électronucléaire, programme qui recouvre plusieurs GDR (dont FORPRO cf. fiche et NOMADE cf. fiche) qui structurent la communauté CNRS autour des objectifs définis par la loi.

■ En revanche, rien n'a été fait en terme de structuration pour les autres déchets. Ils représentent

pourtant, en terme de quantité et d'impact, un risque immédiat pour notre environnement. Cette structuration devra se faire autour d'objectifs clairs avec les acteurs publics (ADEME, BRGM, LCPC...) et privés sans quoi on continuera à développer des travaux redondants sans liens avec les décisions et les choix nécessaires. Néanmoins, les besoins de connaissances fondamentales pour évaluer les risques environnementaux liés au stockage, au recyclage, aux traitements des déchets et en particulier des déchets dangereux, de traitement des sites pollués vont croître avec l'évolution des législations. Les scientifiques ne peuvent pas ne pas participer aux décisions importantes à venir sachant que l'impact financier de cette gestion augmentera avec le temps.

Les axes prioritaires

Les deux grands types de déchets ont des points communs si on s'intéresse au concept de stockage : c'est la problématique de l'exportation la pollution (le vecteur est toujours l'eau) et de la réactivité du milieu géologique, des colis de déchets et de la barrière ouvragée les ceinturant. La formation géologique hôte pourra selon les conditions physico-chimiques et hydrodynamiques servir de barrière de confinement ou de retardement ou d'accélérateur de dispersion. Ainsi, si on définit une approche de sûreté, on se heurtera toujours à la problématique de la modélisation prévisionnelle du comportement du stockage (et de l'entreposage) pour le court et le long terme et aux études de sensibilité selon des scénarii prédéfinis. Ces derniers seront centrés sur deux entités : le terme source et le terme transfert. Toutefois, la modélisation du comportement à long terme d'un site de stockage de déchets nucléaires prendra toujours en compte le caractère chronodégradable spécifique de ces déchets. La priorité pour les recherches à venir sera de faire sauter quelques verrous dont les principaux sont évoqués ici.

La minéralogie des déchets, cristalochimie des phases amorphes

■ Il s'agit de la minéralogie des phases complexes, aussi bien dans les roches encaissantes que de leur minéralogie à l'échelle "particulaire" ou de celle des phases issues des procédés de traitement thermique dont le contact avec l'eau est générateur de réactions lentes, hors équilibre.

■ Il faut connaître la minéralogie des phases jouant un rôle, de par leurs propriétés surfaciques et volumiques, dans le transfert des contaminants. En particulier, un des verrous scientifiques réside dans la détection et l'analyse structurale des colloïdes amorphes et des nanoparticules silicatées ainsi que dans leur réactivité vis-à-vis des contaminants, dans l'identification cristalochimique et dans la datation isotopique des particules argileuses dites "fondamentales" dans les sédiments. Ceci inclut les

aspects cinétiques, structuraux et les mécanismes de transformation à l'interface. Pour cela les techniques à développer sont le μ XANES, le μ EXAFS, la RMN en phases solides des traces, les spectroscopies et spectroscopies optiques...

■ Le comportement de matrices de confinement ou de barrières ouvragées impliquant des matériaux tels que les verres, les liants hydrauliques, les argiles ou encore les phosphates doit être évalué pour conduire à des prédictions "fiables" de leur pérennité. Pour cela deux approches sont nécessaires et déjà en cours, par exemple, dans le cadre du GdR NOMADE :

- coupler des méthodes de vieillissement rapide à la caractérisation de l'interface altérée ;
- établir des modèles physiques représentatifs de leur comportement en situation de stockage ;
- modéliser les transferts sur de longues échelles de temps dans ce milieu poreux en perpétuelle évolution.

■ Nous manquons encore de données thermodynamiques fiables en particulier en ce qui concerne les produits de solubilité des phases mal cristallisées et les constantes de complexation des contaminants métalliques avec les sites de surface de ces phases, mais aussi d'une connaissance approfondie de la texture de l'interface altérée. Nous n'avons que des modèles empiriques pour la formation des gels qui se développent à l'interface verre-solution, ainsi que pour leur rôle sur la cinétique d'altération des verres et le transfert des polluants. Les techniques de microtomographie X doivent être développées et utilisées pour valider les coefficients de diffusion choisis pour modéliser les transferts. L'analyse *in situ* 3D chimique et isotopique est aussi un moyen actuellement sous-utilisé pour l'analyse des produits d'altérations naturels ou expérimentaux. Par ailleurs, la gestion des phénomènes transitoires ou relevant de situations aux interfaces doivent bénéficier de recherches expérimentales et de modélisations complémentaires.

La spéciation des contaminants

■ Il s'agit de caractériser la spéciation des

contaminants. Cela nécessite l'utilisation de moyens analytiques lourds qui, pour certains métaux, radionucléides ou toxiques chimiques (organiques ou non), ne permettent pas encore de descendre aux concentrations "environnementales".

■ Il faut connaître le rôle des phases organiques dans le piégeage et le transfert de ces contaminants. Ceci est un des points les plus importants car le moins connu.

■ La détermination des temps de transfert repose principalement sur deux types d'approche : l'utilisation de traceurs géochimiques et la détermination de la porosité cinématique (accessible aux solutés et dépendant de leur forme ionique). Dans le premier cas, les traceurs actuellement disponibles ne sont soit pas assez sensibles (quantités de fluides nécessaires importantes), soit mal adaptés aux temps à estimer (quelques dizaines à quelques centaines de milliers d'années). Ceci impose le développement de nouvelles technologies. Il en va de même pour la porosité cinématique dont la détermination passe par une meilleure connaissance du statut de l'eau et de l'interprétation des signaux de spectroscopie (RMN par exemple).

L'imagerie à toutes les échelles

■ Il s'agit d'avoir une représentation 3D des circulations de contaminants et des interactions physiques et chimiques consécutives à la mise en place d'ouvrages. Pour cela il est impératif de coupler les techniques spectroscopiques (diffusion X aux petits angles, microtomographie X) et de géophysiques avec les approches de la chimie et géochimie afin d'avoir une vision non équivoque de la représentation des mesures au moyen des méthodes

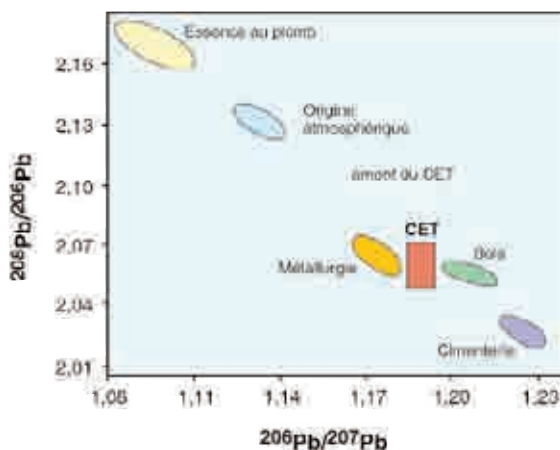
numériques. Dans le cas du stockage de déchets HAVL en formations géologiques profondes cette approche pluridisciplinaire est essentielle pour préciser l'initialisation, le développement, l'extension, la zonation et la cicatrisation de la zone endommagée (EDZ) affectant la paroi d'un ouvrage souterrain (galeries, puits, forages). Ces recherches multidirectionnelles, menées en particulier dans le cadre du GdR FORPRO, se développent vers la mise au point de prototypes de sonde, de méthodes d'endoscopie sismique, de tests dans des sites dédiés (mesures de perméabilité, processus de cicatrisation, perturbations géochimiques), de modèles d'écoulement, d'algorithmes de traitement.

■ Ceci doit se traduire, en particulier, par le suivi scientifique d'expérimentations *in situ* sur le comportement des matériaux en situation de stockage c'est-à-dire sur le long terme et dans des conditions géochimiques réelles, susceptibles de permettre l'évaluation de la réactivité aux interfaces.

La géochimie isotopique

■ L'utilisation des isotopes permet de tracer les sources de contamination et les circulations. Cela est valable aussi bien pour la phase aqueuse que pour la phase gazeuse. Un des aspects les plus intéressants consiste à utiliser les isotopes du zinc, cuivre etc. en corrélation avec les isotopes du plomb et du strontium afin de mieux contraindre les lois de mélange qui ne sont basées, actuellement, que sur des lois de diffusion simple.

■ Dans le cas des études expérimentales, les traçages isotopiques permettent de la même façon de mieux quantifier les échanges chimiques et ainsi de mieux comprendre les processus d'altération ou de contamination. De même, la datation des eaux souterraines doit être faite en couplant les données de



Distribution des rapports isotopiques de Pb en fonction des sources, dont un Centre d'Enfouissement Technique de classe II de déchets (CET).

• Gestion des déchets

^{81}Kr , ^{36}Cl , ^3H , ^{85}Kr , ^{15}N et ^{14}C . Par ailleurs, l'utilisation de la géochimie isotopique (fluides et solides) pour reconstituer l'histoire des paléocirculations est essentielle à la compréhension des circulations actuelles et futures. Toutefois, la connaissance des eaux de formation (âge, origine, vitesse d'écoulement) ne doit pas conduire à négliger les transferts sous forme de solutés (et de colloïdes) dans l'eau porale d'une formation géologique très imperméable. Pour ce faire, l'accent doit être mis sur l'acquisition de données fiables couplées, en particulier isotopiques (Cl, Sr, O, H, gaz rares), sur ce type d'eau porale et, si possible, sur le même échantillon.

■ Les notions d'échelle temporelle et spatiale

■ Que l'on considère les milieux de stockage des déchets ou encore les études relatives à leur réutilisation en techniques routières, par exemple, le point commun est l'hétérogénéité de l'encaissant. Cette hétérogénéité à la fois spatiale, chimique, mécanique etc. est le caractère clé de la fiabilité des modèles de transfert prenant en compte des temps et des distances longs. La question alors est celle de la pertinence des échelles d'observation, depuis la structure à l'échelle moléculaire et celle à l'échelle du transfert du contaminants dans le champ proche et lointain. Des approches intéressantes existent qui prennent en compte le rôle des colloïdes pour expliquer le transfert en champ lointain. Ceci devrait être un axe de recherche à développer. Les approches génériques sur les couplages thermo-hydro-mécanique-chimique dans les milieux hétérogènes sont un appui à la compréhension des transformations et des lois de transfert. La question pendante à tous ces systèmes hétérogènes est la validité des essais en laboratoire par rapport au terrain. A ce niveau, le transfert des résultats expérimentaux au contexte du stockage ne peut être réalisé qu'au travers de modèles qui satisfont non seulement aux courbes expérimentales mais traduisent aussi des réalités physiques implémentables dans des codes de simulation numérique des scénarios à long terme. Si on se base sur des travaux faits sur le transfert des polluants organiques persistants dans les sols, cet aspect est résolu au moyen des études dites "au champ" et des lysimètres couplés ou non à des expériences en laboratoire permettant de mesurer des constantes "thermodynamiques". L'hétérogénéité et les relations entre les échelles sont des constantes à

prendre en compte pour toutes les approches visant à modéliser les évolutions et les transferts.

■ Néanmoins deux aspects semblent (peut être) compromettre une analyse extensive et complète du phénomène :

- le caractère hiérarchique et hétérogène des structures géométriques impliquées dans le transport ;

- la nature statistique des processus qui se développent à la fois dans l'espace et le temps.

■ En particulier les problèmes des cinétiques de relâchement aux temps longs qui, dans certains nombres de cas, n'obéissent pas aux prédictions du modèle gaussien. Dans ce cadre, les méthodes d'homogénéisation sont certainement à prendre en compte. Cependant, il existe des approches statistiques récentes qui doivent être considérée. Enfin, les approches de biogéoprospective, particulièrement étudiées au niveau international (modèles de climat et de biosphères) sont essentielles afin de produire des scénarii climatiques pouvant servir de base à la définition des modifications géomorphologiques (érosion, réseau hydrographique, captures de rivières...) susceptibles de modifier les régimes hydrauliques dans l'environnement d'un stockage ainsi que les temps de transfert des toxiques ou radionucléides.

■ Les analogues naturels et archéologiques/historiques

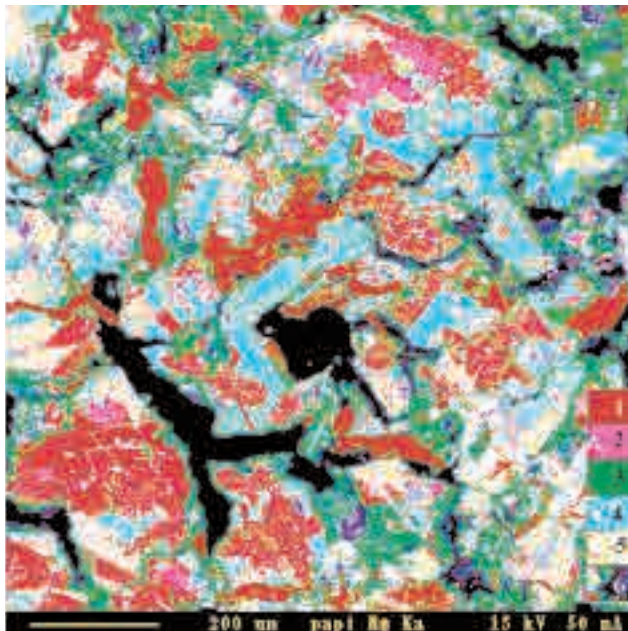
■ Les analogues naturels constituent des éléments importants pour la validation des modèles physiques déduits d'expériences en laboratoire. Ils concernent en particulier les géomatériaux de synthèse (verres, aciers, céramiques, bitumes, ciments) mais également les formations géologiques impliquées dans le concept multibarrière, soumises à des impacts variés : thermiques, chimiques (solutions hyperalcalines) et physiques (zone endommagée induite) et qui peuvent relever d'échelles temporelles variables allant de quelques siècles aux millions d'années. On recouvre donc les périodes qui sont exigées par les analyses de sûreté, notamment dans le domaine des déchets radioactifs à vie longue, d'ordre millénaire à géologique.

■ Les travaux réalisés dans ce domaine sur les verres sont exemplaires car ils reposent à la fois sur des objets géologiques (verres basaltiques) et sur des

objets manufacturés (vitraux anciens par exemple). On peut ainsi approcher le comportement des métaux lourds lors de ces processus d'altération avec, notamment, l'influence de structures complexes pouvant se former en relation avec des phénomènes lents. Cette approche permet d'appréhender certains mécanismes d'altération qui ne peuvent être reproduits en laboratoire en raison des constantes de temps nécessaire à leur développement. Dans le cas des objets historiques et archéologiques, ils pourraient être intéressants de se rapprocher du programme national de recherche sur les matériaux du patrimoine qui vient d'être lancé par le ministère de la culture et de la communication. Le CNRS a approuvé de façon formelle ce programme, essentiellement dans le cadre

des sciences humaines et sociales, mais des laboratoires de "sciences dures" pourraient y être associés, en veillant à ce que ces recherches puissent avoir des retombées environnementales sur la prédiction du comportement à long terme des matériaux.

■ Les analogues naturels peuvent être utilisés pour l'étude de phénomènes plus complexes, comme la perturbation d'une formation géologique (argile, calcaire) par un panache alcalin issu des interactions de l'eau avec des phases minérales cimentaires naturelles produites à 1200°C dans des conditions de sub-surface (exemples jordaniens de Maqarin et Kusaïm Matruck).



LES ANALOGUES NATURELS

Légende :

- (1) Ca (Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$),
- (2) Ca (Oxyde de Ca CaO),
- (3) $\text{Ca} > \text{Si} > \text{P}$ (Gel CSH),
- (4) $\text{Fe} \geq \text{Ca} > \text{Al, Si, Ti} > \text{e P, Cr}$
(Ca-Ferrite $\text{Ca}_x\text{O}(\text{Fe}_2\text{O}_3)_{1-x}$,
Srebrodolskite)
- (5) $\text{Fe} > \text{Ca} > \text{Mg, Mn} > \text{e Al, Si}$ (Ca-Ferrite $\text{Ca}_x\text{Fe}_{1-x}\text{O}$?)

hydrate

Deuxième partie

*Aspects anthropiques du
système Terre*

B.3-Energie et séquestration géologique du CO₂

- *Les enjeux de la recherche*
- *Bilan des connaissances*
- *Les axes prioritaires*

réservoir
hydrocabure

• Energie et séquestration du CO₂



Les problèmes scientifiques posés sont vastes et relèvent de disciplines variées. Ils correspondent cependant tous à des enjeux de société importants, tant sur le plan de la sauvegarde de l'environnement que sur un plan économique.

La contribution des hydrocarbures à l'approvisionnement énergétique global devrait décroître dans les années 2030-2050. Ceci rend nécessaire la mise en évidence de nouvelles réserves permettant de prolonger l'accès à ce type d'énergie mais aussi d'assurer une transition sans heurt vers d'autres sources d'énergie. Pour renouveler les réserves dans l'approvisionnement énergétique, deux voies d'exploration s'offrent à l'industrie pétrolière : des zones encore peu explorées comme l'offshore très profond ou l'exploitation de réserves non conventionnelles. Les hydrates de gaz jouent un rôle important dans chacun de ces deux cas. Ils participent d'une part, par leur rôle dans la dynamique des systèmes sédimentaires, à la stabilité des pentes en fond de mer et, d'autre part, peuvent constituer une source originale d'hydrocarbures dont le potentiel réel reste cependant à évaluer.

La séquestration profonde du dioxyde de carbone constituera quant à elle un thème important pour les géosciences dans les prochaines années. Ce stockage géologique du CO₂, auquel il faudrait sans doute ajouter celui de gaz acides comme l'hydrogène sulfuré ou les mercaptans, pourra être réalisé dans des gisements pétroliers ou gaziers épuisés ou en phase de récupération assistée, dans des aquifères profonds, ou bien encore dans des couches de charbon inexploitable.

Sur chacun de ces deux thèmes, plusieurs équipes de recherche relevant de l'INSU peuvent s'impliquer. Après un rapide bilan des connaissances, nous présenterons les principaux problèmes ou "verrous scientifiques" identifiées pour chacun d'entre eux.

Cette réflexion a été menée par un groupe composé de chercheurs et d'ingénieurs des organismes publics et des industries impliquées dans la recherche fondamentale et opérationnelle sur les thématiques concernées.

Alain Bonneville (IPGP)

Avec la collaboration de : Jean Yves Bottero (CEREGE), Anne-Marie Boullier (LGIT Grenoble), Georges Calas (Paris 6), Jean-Pierre Delhomme (Schlumberger), Etienne Deloule (CRPG Nancy), Alain Feugier (IFP), Jean-Paul Foucher (IFREMER), Christian Fouillac (BRGM), Bruno Goffé (ENS Paris), Dominique Guérillot (IFP), François Kalaydjian (IFP), Joël Lancelot (GDR FORPRO), Patrick Landais (ANDRA), Patrice Piantone (BRGM), Christophe Poinssot (LCRE-CEA), Georges Raimbault (LCPC), Thierry Reuschle (EOST-IPGS), Maria Zamora

Bilan des connaissances

Les hydrates de gaz

Les hydrates de gaz naturel sont des solides semblables à la glace. Ce sont des molécules de gaz, tel le méthane, incluses dans une cage de molécules d'eau. Dans la nature, ils sont stables dans certaines conditions de température et de pression, qui sont celles de l'offshore profond (au-delà de 300 mètres de profondeur d'eau) pour les marges continentales situées à moyenne ou basse latitude, comme c'est le cas pour la marge atlantique de l'Europe ou de l'Afrique. Ils ont été mis en évidence lors de nombreux forages du programme de forages scientifiques international ODP (Ocean Drilling Program) et sont connus en plus de 80 sites.

■ De très grandes quantités de gaz peuvent être stockées sous forme d'hydrates puisqu'un volume unitaire d'hydrate peut emmagasiner ou libérer 160 volumes de méthane durant sa formation ou sa décomposition. Le service géologique américain (USGS) a récemment estimé à $2 \times 10^{16} \text{ m}^3$ la quantité de méthane présente sous forme d'hydrate dans les fonds marins et les sols gelés arctiques, soit deux fois le volume équivalent de méthane des réserves prouvées de charbon, pétrole et gaz réunis, à la surface de la Terre. Cette estimation demande à être confrontée à des observations de terrain encore trop limitées. Des évaluations techniques et économiques de la production de méthane à partir des hydrates présents dans les sédiments marins sont en cours.

■ Les hydrates de gaz ont aussi l'inconvénient d'être une source significative de gaz à effet de serre. Ce gaz peut être libéré vers l'atmosphère durant la décomposition des hydrates par suite d'un réchauffement climatique ou d'une montée du niveau de la mer, en particulier dans les zones littorales où l'eau est à une température plus élevée que le sol. Les hydrates de gaz constituent également un danger pendant le forage d'exploration ou les activités de production des hydrocarbures. En effet, si les mesures appropriées ne sont pas prises pour maintenir leur stabilité, il peut s'ensuivre une libération non contrôlée de gaz, des explosions, des incendies et des phénomènes dus à l'instabilité des sédiments. Il est

donc important de bien connaître leur répartition et leur comportement.

■ Depuis la fin des années 1980, de très nombreux programmes de recherche ont été mis en place aussi bien dans le domaine académique qu'industriel citons, entre autres, en Amérique du Nord, ceux de l'US Geological Survey, de Woods Hole Oceanographic Institution et du Geological Survey of Canada, mais aussi au Japon ou bien encore en Allemagne, avec le Gas Hydrat Research program de Geomar.



■ En France, L'IFP, Total et IFREMER se sont intéressés à ce thème ces dernières années mais peu d'équipes du CNRS l'ont fait (citons l'ENS Paris et l'IPGP) et leurs travaux restent ponctuels.

La séquestration géologique du CO₂

■ Le CO₂ peut être séquestré dans les formations géologiques de trois façons :

- piégé sous forme d'un gaz ou d'un fluide supercritique sous un toit imperméable, comme le gaz naturel l'est dans un gisement ou un stockage en aquifère ;
- dissous dans la phase fluide, dans le cas de récupération assistée d'huile ;
- en réagissant avec les minéraux ou la matière organique des formations géologiques jusqu'à faire partie de la matrice solide.

■ On parle de piégeage hydrodynamique (qui devrait vraisemblablement être le plus fréquent), soluble et minéral.

Echantillon d'hydrate de gaz (principalement du méthane) prélevé par carottage dans les premiers mètres de sédiment sous le fond de la mer au cours de la campagne Zaï-ROV (document IFREMER).

• Energie et séquestration du CO₂

■ Des initiatives importantes existent déjà sur un plan international, ainsi aux Etats-Unis, le DOE (Department of Energy) a retenu la séquestration du CO₂ comme un axe majeur de recherche avec un objectif de réduire le coût de la séquestration d'une tonne de carbone à moins de 10 dollars d'ici 2010. Les grandes compagnies pétrolières ne sont pas restées à l'écart d'un tel marché et développent depuis deux ans des programmes importants tant en interne qu'en partenariat avec le monde académique. Citons les plus aboutis :

- Center for Technical Sciences de Delft University of Technology aux Pays-Bas (SHELL) ;
- Carbon Mitigation Initiative de Princeton University, USA (BP+Ford) ;
- Global Climate & Energy Project de Stanford University (ExxonMobil, avec GE, et Schlumberger).

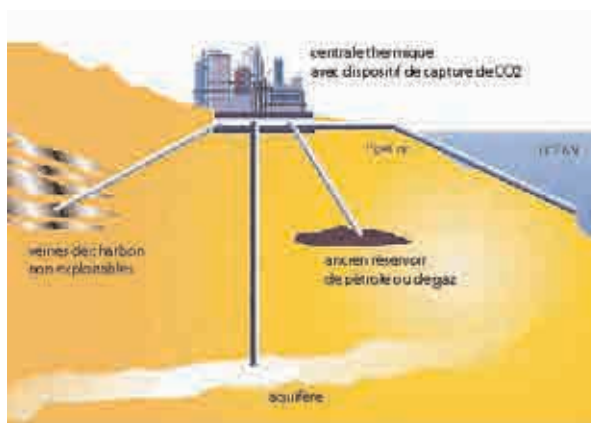
■ La France est encore peu présente. Seuls le BRGM et l'IFP participent avec des moyens et du personnel destinés à croître, à des projets d'injection de CO₂ dans des réservoirs (sites de Sleipner en mer du Nord et de Weyburn au Canada) dans le cadre de projets européens (SACS, CO₂Store) et internationaux. A Sleipner, une opération industrielle conduit à des injections de 1Mt/an dans un aquifère profond (800 m sous le fond de la mer). A Weyburn, il s'agit

d'injections dans un champ pétrolier, avec pour le moment des objectifs de récupération d'hydrocarbures, et à plus long terme, de stockage du CO₂. Un effort d'examen des sites potentiels de stockage de CO₂ en Europe est mené par ailleurs par les services géologiques nationaux dont le BRGM (projet GETSCO).

■ Au niveau académique national, et spécifiquement sur la question de la séquestration profonde, des équipes ont ponctuellement réalisé des études de qualité mais il a fallu attendre 2002 pour que des projets ambitieux regroupant plusieurs équipes et des disciplines variées voient le jour :

- le projet PICOR soutenu par le Réseau des Technologies Pétrolières et Gazières et conduit par l'IFP en association avec des laboratoires du CNRS relevant de l'INSU et de SPI de Toulouse, Bordeaux, Montpellier, Grenoble ainsi qu'avec Total, le BRGM et Geostock ;
- le programme d'étude sur la séquestration profonde du CO₂ conduit par l'IPG de Paris en partenariat avec Schlumberger et Total.

Par ailleurs dans le cadre de l'appel d'offres du 6ème PCRD, plusieurs projets ont été déposés.



Injection en profondeur du CO₂ (d'après une figure de l'Agence Internationale de l'Energie)

Les axes prioritaires

Les hydrates de gaz

■ On peut identifier plusieurs verrous scientifiques qui concernent :

- l'évaluation de la distribution des hydrates de gaz en offshore profond par des méthodes acoustiques/sismiques avancées. Ces travaux devront être combinés à des forages légers (avec carottages dédiés et mesures dans les puits) ou d'autres mesures en fond de mer, pour obtenir la vérité terrain, préciser les propriétés physiques des dépôts d'hydrates de gaz et, notamment, identifier leurs réponses diagraphiques ;

- la modélisation analogique et numérique de la formation et de la dissociation des hydrates de gaz en milieu sédimentaire (transferts de chaleur et de fluides en milieu poreux perméable avec changement de phase associé à la formation ou dissociation d'hydrates de gaz) pour mieux évaluer les mécanismes de concentration des hydrates en certains sites géologiques des marges continentales (affinité ressources), le comportement mécanique des pentes continentales lors de la dissociation des hydrates (affinité risques) ainsi que les phénomènes de rejet vers la colonne d'eau et l'atmosphère du méthane libéré par la dissociation des hydrates (affinité climat). Ces études de simulation seraient avantageusement couplées à une expérimentation sur site.

■ Un réel effort d'incitation et de coordination doit être entrepris par l'INSU. Cet effort devra être coordonné avec les actions du GDR Marges

La séquestration géologique du CO₂

■ Il est désormais indispensable que le CNRS participe, en association étroite avec les autres acteurs de ce domaine dont notamment l'IFP et le BRGM, à l'organisation et à l'essor d'un secteur où la recherche française doit prendre toute sa place. Les chercheurs doivent percevoir les problèmes issus du champ opérationnel, mais leurs travaux doivent avant tout porter sur des questions fondamentales des sciences de la Terre. Il faut d'ailleurs noter que la séquestration profonde du CO₂ n'est qu'un aspect de la "chaîne du

carbone" prise en compte par ailleurs dans le programme Energie piloté par SPI avec lequel les liens doivent être renforcés.

■ Les quelques questions importantes liées à ce problème pour lesquelles une avancée des connaissances est nécessaire et où la communauté française a des atouts certains, sont :

- **en géochimie** : étudier la stabilité (T, P, X) des phases qui incorporent du CO₂, les mécanismes et les médiateurs d'incorporation (biogéochimiques, géochimiques), évaluer les cinétiques de formation/destruction de ces phases, et quantifier les transferts de matière associés ;

- **en géophysique** : modéliser et surveiller :

- la stabilité physique du réservoir lors de la montée en pression (évolution du champ de contrainte) ;

- la perméabilité/porosité du réservoir en réponse à l'injection de CO₂ (e.g. ouverture et colmatage des fissures) ;

- le fluage des roches soumises à une circulation d'un fluide réactif. L'évolution à long terme (5000 ans) des propriétés mécaniques du réservoir.

■ Plus particulièrement, l'un des problèmes actuellement mal maîtrisés est **la réactivité chimique, à différentes échelles de temps et d'espace**, de fluides riches en CO₂ avec les principaux minéraux de l'encaissant. Les études doivent être conduites à des pressions élevées (au maximum plusieurs centaines de bars) et des températures de l'ordre de quelques dizaines de degrés, à l'échelle de l'interface fluide/minéral (échelle moléculaire, nm à μm), et dans des conditions thermodynamiques variables : loin de l'équilibre (début du processus) et proches de l'équilibre où les affinités chimiques sont faibles (stade plus avancé du processus). Dans le cas de stockage dans des gisements d'hydrocarbures épuisés, la modélisation du comportement thermodynamique de systèmes (eau salée, CO₂, hydrocarbures) à forte pression et forte température, mérite encore une recherche académique. Par ailleurs, connaître la réactivité de ces fluides profonds avec les roches encaissantes, c'est d'une part étudier la solubilité dans ces fluides des différents minéraux caractéristiques d'un site de stockage éventuel, et d'autre part, étudier les phases minérales spécifiques

• *Energie et séquestration du CO₂*

nouvellement formées au cours des réactions.

■ Comprendre les circulations en milieu poreux et les modéliser correctement implique aussi de prendre en compte les aspects **de dissolution et de colmatage** par le fluide qui circule et leur effet sur les propriétés hydrauliques des roches poreuses ou fracturées. De même, il faut prendre en compte le régime de contraintes, une compression ayant pour effet d'augmenter localement la solubilité d'un minéral dans un fluide et d'induire des transferts locaux de matière. Ce mécanisme appelé classiquement "**dissolution sous contrainte**", intervient aussi bien dans le stockage de déchets, la séquestration de gaz ou la géothermie. L'intégration des évolutions géochimiques, mécaniques et thermiques des roches réservoirs et éventuellement des couvertures ainsi que les différents couplages associés seront les buts de ces études. Notons que ces études auront aussi de fortes implications sur la

connaissance de la déformation dans la croûte supérieure.

■ L'intérêt d'employer **des analogues naturels** est aussi souligné, il existe par exemple des provinces géologiques dans lesquelles de grandes quantités de CO₂ ont circulé sur de grandes échelles de temps (province carbogazeuse du sud-est de la France notamment) permettant d'aborder l'évolution à long terme du milieu poreux naturel soumis à des circulations de CO₂.

■ Enfin, le devenir du CO₂ en profondeur est probablement lié à **l'existence d'une biosphère**, ou bien intrinsèque, ou bien injectée lors des forages ou de l'injection du fluide. L'interaction à toutes les échelles de temps, y compris courtes, entre le CO₂ injecté et cette biosphère microbienne du sous-sol, est une question qui se posera quelle que soit l'évolution conceptuelle dans ce domaine.

gisements

Deuxième partie

Aspects anthropiques du
système Terre

B.4-Géomatériaux

silicate
du
oxydes

- *Les enjeux de la recherche*
- *Les recherches actuelles en SDU*
- *Les pierres d'oeuvre*

argile
géomatériaux

- Géomatériaux



usqu'à la fin des années 80, la recherche publique française a soutenu des travaux relatifs à la métallogénie et la physicochimie des matériaux naturels. Conjointement à ces efforts des entreprises d'extraction et de transformation ont accompagné ces travaux. Les argiles ont fait l'objet d'attentions toutes particulières, tant dans les domaines de la cristallogénie, de la morphométrie ou des propriétés interfaciales, que dans l'analyse des lois de comportement. Les applications directement liées à ces recherches étaient : les composites de grande diffusion (papiers, plastomères, élastomères), les cosmétiques, la catalyse, les céramiques, les pigments, le traitement des eaux et des effluents, enfin le génie civil (dont le forage pétrolier). Ces travaux qui s'appuyaient sur un patrimoine académique déjà constitué ont fortement contribué au renouvellement thématique et à la structuration de l'école française des argiles. De même des travaux importants sur la physicochimie des carbonates, des silicates, des oxydes et des hydroxydes ont permis des réalisations majeures dans l'industrie des verres, des liants hydrauliques, des coagulants, des complexants...

Les enjeux de la recherche

Ce patrimoine de compétences reste vivant et il est enseigné dans certaines universités et à l'ENSG, mais les filières d'applications ont considérablement évolué ces dernières années, en même temps que l'organisation du paysage de la production et de son cadre réglementaire, au point que notre univers du quotidien change de façon très significative.

■ Il existe en fait deux voies extrêmes : soit de continuer à exploiter des formules composites complexes et performantes qui interdisent le recyclage des composants, soit de revenir à des pièces monomatérielles ou de compositions standardisées dont le recyclage est plus facile. De nouvelles contraintes apparaissent dans la définition des propriétés d'usage qui, outre les propriétés de service, incluent maintenant l'aptitude à la destruction ou au recyclage, et la réhabilitation des sites d'exploitation.

■ Ici encore, deux approches se dessinent, une approche de compositions très élaborées, fondées sur beaucoup d'inventivité, réservées à de petites niches et des applications à grand volume où sont avant tout privilégiées la régularité et la robustesse.

■ Les compétences concernent :

- Les approches modernes des systèmes naturels complexes, Expérimentation et mesures *in situ*
- La typologie des gisements étroitement associée aux usages (transfert des compétences vers l'étranger : Brésil, Vietnam....)

■ L'analyse typologique a comme ambition de ranger les qualités de minéraux en familles aussi compactes que possible et autant distinctes que possible les unes des autres. Si ce rangement est effectué selon des distributions de propriétés d'usage, l'analyse typologique permet de choisir simplement les qualités qui conviennent le mieux à un usage donné.

■ Dans les cas où la statistique descriptive révèle des liens entre des conditions de process ou des caractères des composants et des propriétés d'usage, il est possible de les modifier expérimentalement et

par là déterminer si ces relations sont de cause à effet ou purement typologiques. Outre son intérêt académique, cette pratique est une voie à la modification des process.

■ Toute la problématique des minéraux industriels revient à considérer que la valeur d'usage est conditionnée par des lois de comportement qui s'apprécient à l'échelle macroscopique, mais qui sont gouvernées par des phénomènes microscopiques, le plus souvent moléculaires.

■ L'année 2002 a vu naître la première synthèse typologique des matières premières de tuileries couvrant la variabilité de façon très complète. De cette typologie sont nés des modèles numériques de prévision des principales propriétés mécaniques, de la couleur de la gélivité et des déformations. Il reste évidemment à exploiter ces données pour proposer des algorithmes de modification ou de redéfinition des process, particulièrement tous les aspects relatifs au modelage des pâtes à fort extrait sec.

■ La première typologie structurale des smectites a également été établie en 2002 ; elle repose sur le type d'occupation octaédrique et la localisation de la charge, des distinctions plus subtiles concernent la répartition des lacunes et des cations. Récemment, les grandeurs gouvernant les seuils d'arrachement et les viscosités dynamiques de suspensions de montmorillonites ont été reliées pour la première fois à des caractères cristallochimiques. Ces deux grandeurs qui sont déterminantes dans les applications pour le génie civil et les technologies d'épaississement, varient selon une combinaison de la charge et de la répartition des cations octaédriques. Pour une concentration solide donnée, quand la charge est élevée et le fer octaédrique distribué de façon ordonnée, le seuil d'arrachement et la viscosité dynamique sont plus élevés. Les applications de ces découvertes restent à valoriser et à généraliser à toutes les smectites.

■ L'industrie minérale produit des fines dont la gestion est encadrée de façon assez stricte. Le champ privilégié du réemploi de ces matières est la correction des sols. On a cherché à établir une stratégie de la correction adaptable à tous les grands types de sols, et

• Géomatériaux

à concevoir les produits correspondants; en transférant les données génériques des classements minéralogiques. La démarche compte quatre étapes :

- Fonder un diagnostic précis des propriétés de substrat, sur des critères facilement accessibles ;
- Proposer des formules de correction, en termes de propriétés de service à apporter ;
- S'assurer du réalisme technique et économique du procédé en utilisant préférentiellement des résidus d'élaboration de minéraux industriels, des composts et des dopants naturels comme des déchets phosphatés ou des farines protéiniques (plume, cuir...) ;
- Valider le procédé par des essais en vraie grandeur.

■ Ces recherches ont permis à des compagnies française d'accéder avec succès à des chantiers prestigieux comme le Golf de Doha au Qatar, le Creek side Park à Dubai et la serre tropicale du métro Météor à Paris. Il manque malheureusement ici des outils d'évaluation à l'échelle pilote où les industriels pourraient procéder à des essais de moyenne durée. La politique de recherche devrait envisager de les constituer.

Approches expérimentale et modélisatrice de la durabilité chimique et physique des géomatériaux transformés (ex : ciments, verres).

■ Les fondements de la formulation des matrices de confinement de déchets ou des matériaux de construction reposent sur des raisonnements analogiques : soit que la prévision des évolutions

puisse facilement être déduite d'évolutions de matières semblables exposées à des conditions semblables, soit que la reconnaissance des formes résiduelles autorise à les considérer comme statuts de moindre réactivité à atteindre. La principale inconnue étant l'effet de la durée, deux approches complémentaires se présentent, soit expérimenter à court terme et faire confiance aux lois générales de la cinétique pour prévoir les évolutions ; soit analyser des systèmes ayant évolué sur de longues durées, et considérer que leur état est celui qu'atteindra le système à évaluer.

■ De façon spécifique, il faut ici évaluer les effets d'échelle. Les géomatériaux sont testés à l'échelle de la paillasse par des tests normalisés, mais leur mise en œuvre relève souvent du domaine hectométrique où les transferts de matière et de chaleur sont d'un autre registre. De la sorte, l'excellent travail de modélisation des confinats de déchets effectué entre 1985 et 2000 est pratiquement inutilisable pour avoir ignoré que les grands massifs de confinement demeurent au moins dix années à des températures avoisinant quatrevingt degrés C ce qui induit une paragenèse et une texture très distantes de celle observée sur de petites éprouvettes qui se refroidissent vite.

Sur la mise au point de procédés durables de valorisation. Procédés prenant en compte les aspects environnementaux dès la conception du process, elles concernent :

- les matériaux argileux
- les oxydes

Les recherches actuelles en SDU

E - les pierres d'œuvre, les granulats Elles sont aussi menées pour certaine en étroite collaboration avec des laboratoires de chimie ou de physique. Les trois grands axes sont :

■ Les matériaux argileux

L'utilisation d'argiles et leur transformation en catalyseur par formation de piliers mixtes Al-Fe.

Les recherches concernant l'utilisation des argiles en catalyse et chimie fine sont nombreuses depuis des

années. Les plus connues sont celles concernant les argiles modifiées par traitements chimiques acides ou basiques et les argiles à piliers (piliers Al, Al-Fe, Zr, ...).

Il s'agit de mettre au point des procédés catalytiques innovants mettant en jeu des argiles naturelles, des argiles naturelles modifiées ou des silicates de synthèse (argiles avec cations "exotiques", silices avec cations catalytiques actifs).

Les buts sont :

- Décontamination purification des solutions

aqueuses polluées par des phénols et autres constituants organiques.

La dépollution se fait par oxydation (H_2O_2) catalysée par un matériau contenant du fer (Fe^{2+} - Fe^{3+} , réaction "Fenton"). Le catalyseur testé est actuellement une bentonite avec des piliers Al-Fe [1].

Seront employées comme catalyseurs de substitution:

- des argiles naturelles ferrifères ;
- des argiles de synthèse ferrifères ;
- des argiles de synthèse cuprifères .

■ Réduction des émissions de Composés Organiques Volatils dans l'air.

Une des technologies émergentes pour réduire les émissions de Composés Organiques Volatils (VOCs : dichlorométhane, trichloroéthylène, ...) est l'oxydation catalytique. Les catalyseurs actuellement utilisés sont des zéolites modifiées [2] enrobées dans un liant à base de kaolin. Dans ce contexte, plusieurs recherches sont prévues :

- synthèses de nanocristallite d'argiles ayant des propriétés de surface acide, basique, bifonctionnelles ;
- synthèse ou modification d'argiles naturelles incorporant des cations ayant des propriétés catalytiques intéressantes (Cs^+ , $Cs^+ + Cu^{2+}$, Ga^{3+}) ;
- étude du rôle de la kaolinite dans la modification des propriétés des zéolites (étude fine des produits industriels, remplacement des kaolins naturels par des produits de synthèse).

L'utilisation d'oxydes d'aluminium (Boehmite) et de fer(III) (Lepidocrocite) pour synthétiser des membranes mésoporeuses.

Les applications ici sont le traitement des effluents liquide ou gazeux. Ces nouvelles membranes appelées alumoxanes et ferroxanes sont obtenues par dissolution ménagée des oxyhydroxydes par des acides faibles. Les matériaux obtenus après séchage sont mésoporeux et permettent une bonne sélectivité dans la filtration grâce à la faible distribution en taille des pores. L'incorporation dans le matériau membranaire de cations actifs permet d'envisager des réactions sélectives d'oxydo-réduction des contaminants adsorbés sur la surface de la membrane. Ces recherches se développent en étroite collaboration avec des spécialistes du Génie des Procédés Membranaires et des chimistes des nanomatériaux et des assemblage moléculaires.

Les Argiles à piliers organiques.

Les montmorillonites ou les vermiculites peuvent

échanger les cations compensateurs Na^+ ou Ca^{++} par des tensio-actifs cationiques à plus ou moins longues chaînes alkyles. L'espace interfoliaire est alors composé de piliers de chaînes hydrophobes $n-CH_2$ permettant de piéger des solvants organiques comme les solvants chlorés. Ces matériaux font l'objet de nombreux travaux depuis une vingtaine d'années et constituent une alternative aux charbons actifs dans le traitement des eaux pollués par des xénobiotiques. Le problème de leur régénération n'est pas résolu et mériterait une attention particulière si l'on veut qu'ils soient économiquement viables.

Les argiles et oxydes et hydroxydes de synthèse et les applications réalisées par les laboratoires de SDU

Les connaissances acquises sur les matériaux naturels ont permis d'envisager une implication forte des géosciences dans les travaux sur les synthèses.

Les argiles

La synthèse d'argiles par voie hydrothermale en quantité pouvant dépasser le décagramme est à la base de nombreux développements méthodologiques et technologiques. Ces développements permettent de réaliser synthèse, réactions et transformations d'argiles de pureté garantie, de cristallinité nettement supérieure à celle des phases naturelles, généralement monodisperses, et porteuses de substitutions cationiques et anioniques qualitativement et quantitativement contrôlées. L'utilisation d'autoclaves de type Morey, à grand volume interne, chemisés à l'argent ou à l'or, fournit ainsi des lots d'argiles homogènes, à stoechiométrie et cristallinité reproductibles, à la communauté scientifique nationale et internationale.

Les familles d'argiles concernées sont les kaolinites, les talcs, les smectites trioctaédriques (saponites, hectorites). A cette liste, il faut ajouter les chrisotiles diversement substitués, ainsi que les micas connus dans le milieu naturel et leurs solutions solides. Enfin, des phases minérales non présentes dans le milieu naturel mais constituant d'excellents matériaux modèles sont synthétisés et constituent autant de matériaux qui possèdent des propriétés spécifiques.

Les études réalisées à partir de ces minéraux de synthèse permettent d'établir les diagrammes de phases des argiles et autres silicates synthétisés :

• Géomatériaux

domaines de stabilité, mécanismes et étendue des solutions solides, contrôle des écarts à la stoechiométrie, équilibres solides-solutions, en milieu hydrothermal.

Parmi les retombées pratiques de ces synthèses, on peut citer l'optimisation des compositions en vue du pontage, la détermination des propriétés des interfaces argiles-solutions, la préparation de catalyseurs supportés, la mise en évidence des mécanismes de déshydroxylation. C'est en particulier le cas actuellement des synthèses de saponites nickélicifères, ammoniées, fluorées, de type $(\text{NH}_4)_x\text{Ni}_3(\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x)\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$, utilisées comme catalyseurs d'isomérisation et substitut des mordénites (zéolites) Pt, Pd. C'est aussi le cas des synthèses de saponites Na, de charge variable, $\text{Na}_x\text{Mg}_3(\text{Si}^{4-x}\text{M}^{3+x})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, avec $0,33 \leq x \leq 1$, et $\text{M}^{3+} = \text{Al}^{3+}, \text{Fe}^{3+}$, précurseurs purs, homogènes, et de composition connue, d'argiles à piliers : analyse de l'influence de la charge sur les propriétés de floculation, propriétés des surfaces et interfaces argiles-solutions, insertion et greffage de polymères. C'est enfin aussi le cas des synthèses de chrysotiles diversement substitués pour études bio-médicales (amiante et cancérogène).

■ Les hydroxydes lamellaires

Enfin, des travaux purement académiques ont ces dernières années concerné les silices lamellaires et les hydroxydes lamellaires multiples. Ces deux familles de composés sont séparables par divers composants, dès les étapes de synthèse. La connaissance de ces matières a considérablement évolué ces dernières années. Trois points doivent être relevés, les possibilités d'exfoliation, l'utilisation des propriétés

d'échange anioniques (hydrotalcites) ou étranges et des aptitudes à l'hydratation microscopique souvent très typées.

Les silicates non lamellaires : les allophanes et imogolites.

Les travaux de synthèse de ces matériaux permettent d'obtenir des nanosilicates de composition contrôlée et rigoureusement similaires aux matériaux naturels que l'on trouve dans les sols volcaniques. Les applications sont associées à la rétention des molécules organiques et le cycle du carbone dans les sols mais aussi au rôle de ces matériaux sur le transport de contaminants organiques et métalliques vers la nappe phréatique dans les régions du globe où les sols en contiennent (Réunion, Hawaï, Guadeloupe ...).

■ Nano-oxydes

Les laboratoires des sciences de la Terre ont été parmi les premiers à s'intéresser à la synthèse et aux propriétés de nano oxy-hydroxydes d'aluminium et de fer dans le cadre d'applications intéressantes la catalyse, le traitement des eaux par coagulation-floculation et plus récemment la synthèse de membranes nanoporeuses. Les nano oxy-hydroxydes d'aluminium et de fer sont obtenus par hydrolyse basse température. Les structures obtenues ont montré une très grande variété de sites à forte réactivité vis-à-vis des contaminants organiques et métalliques. Ces nanoparticules (1 à 2 nm) montrent une grande efficacité vis-à-vis de la coagulation-floculation et leur sélectivité vis-à-vis de la coagulation de molécules organiques naturels (polysaccharides, amino-sucre, polyhydroxyaromatiques etc....)

Les pierres d'œuvre

Durabilité des pierres d'œuvre

L'étude de la durabilité des pierres d'œuvre répond à des besoins touchant aussi bien le génie civil que la conservation du patrimoine bâti et l'art, avec des préoccupations esthétiques évidentes. Parmi les nombreux facteurs

qui interviennent dans l'altération des pierres, on retrouve le rôle prépondérant de l'eau mais cette altération résulte d'un ensemble de processus chimiques, physiques et biologiques. Ces altérations entraînent une évolution de la texture ce qui a pour conséquence de modifier les propriétés de transfert. Cette évolution est d'autre part reconnue comme étant un des facteurs importants expliquant le comportement des pierres mises en œuvre lors de leur vieillissement et par conséquent leur durabilité.

Les travaux en cours consistent en une étude détaillée des phases minérales qui apparaissent lors de l'altération des pierres d'œuvre. Il s'agit d'identifier les différentes phases en présence ainsi que leur mode d'assemblage. Les travaux ont ainsi, entre autres objectifs, d'aboutir à des reconstructions numériques 3D de la répartition des différentes phases solides afin de déterminer les caractéristiques des interfaces solide - porosité. Ces travaux permettront de simuler l'altération de pierres d'œuvre au cours du temps, et

de connaître l'évolution de leurs caractéristiques texturales et de leurs propriétés de transfert. La modélisation des transferts est en effet un préalable à la compréhension des phénomènes de dissolution-recristallisation qui conditionnent la durabilité des matériaux ouvragés. A terme, de telles études ont aussi pour objectif de contribuer à la mise au point de procédés de restauration et de protection de pierres d'œuvre.

MÉCANISMES DES CYCLES GLACIAIRES...

• Géomatériaux



clichés M. Rautureau)

Altération en plaque

*Altération par
alvéolisation sur tuffeau*

*Altération par
alvéolisation sur tuffeau*

Altération en plaque

*Altération en plaque
(Château de Blois)*



projets

Troisième partie
Actions et moyens

C.1- Chantiers

MOMA Antilles

- *Enjeux de la recherche*

- *Bilan des connaissances*

- *Propositions*

- *GDR Marges*

- *GDR Corinth*

Méditerranée

manteau

• Chantiers



La focalisation des efforts de recherche en sciences de la Terre sur des chantiers géographiquement limités amène, si les cibles sont bien choisies et s'accordent aux priorités thématiques définies par les programmes, des avancées significatives dans la compréhension des processus. Pour atteindre cet objectif, les chantiers doivent être peu nombreux (3 à 4 au maximum), de durée limitée (5 ans) et, évidemment, justifier par leur intérêt scientifique qu'un effort financier important leur soit consacré. Les chantiers qui vont être choisis par l'INSU ne devront toutefois pas être exclusifs d'autres régions, notamment celles où des travaux importants ont été menés ces dernières années (par exemple les chantiers du programme Intérieur de la Terre).

Les enjeux principaux sont de :

- comprendre les relations entre processus de surface (déformation active, reliefs, érosion, activité sismique et volcanique, ...) et les processus en profondeur (structure et dynamique de la croûte, du manteau lithosphérique et asthénosphérique),*
- mieux appréhender l'aléa sismique et volcanique,*
- fédérer et structurer la communauté dans une approche pluridisciplinaire,*
- monter des collaborations avec des équipes d'autres nationalités, notamment européennes.*

Anne Paul

Avec la collaboration de :

Jean-Pierre Brun, P. Charvis,

P. Cochonat, Claude Jaupart, P. Ledru,

Catherine Mével et P. Tricart.

Bilan des connaissances

Sans que la notion de chantier ait été placée au cœur de la programmation des recherches en sciences de la Terre dans le passé, une certaine focalisation sur des cibles géographiques a été opérée par certains programmes, notamment GéoFrance-3D, Intérieur de la Terre et Dorsales. Faute de disposer d'éléments concrets d'évaluation, le groupe de prospective n'a pu faire qu'une liste des chantiers passés ou en cours, sans réel bilan.

Chantiers marins

■ Au cours de ses 8 années d'existence (1994-2001), le programme Dorsales a fédéré la communauté autour de deux grands chantiers, la dorsale SW indienne, exemple de dorsale ultra-lente, et la zone MOMAR (ride médio-Atlantique, sud des Açores), exemple d'interaction entre dorsale et point chaud, avec une large variété de types d'activité hydrothermale (profondeur et substrat variables). Les travaux sur la dorsale SW indienne se sont déroulés dans un cadre de coopération internationale promue par le programme InterRidge (Américains, Britanniques, Japonais). Ce chantier n'est pas complètement achevé, mais n'a pas été mis en avant lors des discussions de prospective par la communauté. Sur la zone MOMAR, les travaux des équipes françaises ont bénéficié d'un soutien européen (coopération avec les Anglais et les Portugais), et d'une participation américaine. L'exploration de la zone est achevée et l'on peut maintenant passer à l'observation continue et/ou répétée pour contraindre les variations temporelles sur des échelles de temps de l'ordre de l'année à la dizaine d'années.

■ Les chantiers sélectionnés par le GDR Marges sont multiples pour répondre à la grande diversité des thématiques abordées. Mais la communauté a fait un important effort pour converger sur un certain nombre de chantiers fédérateurs pour l'étude de la structure profonde, des processus sédimentaires et des fluides, de la matière organique et du cycle du carbone (recoupements possibles avec Surfaces et Interfaces Continentales). Deux thèmes de recherche transverses

ont été définis pour étudier le Golfe du Lion et l'Atlantique Nord. Le GDR, récemment renouvelé devrait permettre la mise en place de nouveaux thèmes de recherche sur les hydrates de gaz (Mer Noire), les turbidites clastiques (Atlantique nord et Méditerranée Occidentale) et les instabilités gravitaires (Méditerranée occidentale).

■ D'autre part, un nouveau chantier démarre en Nouvelle Calédonie pour l'étude des hydrates de gaz par l'IFREMER en collaboration avec l'IFP.

Chantiers continentaux

■ Le programme GéoFrance-3D a réussi à fédérer un grand nombre de chercheurs de spécialités et d'origines différentes autour d'objets emblématiques situés sur le territoire national, notamment les Alpes et l'Armor. La réflexion conjuguée de géologues et de géophysiciens, par exemple autour des tomographies géophysiques a fourni des résultats novateurs et importants.

■ Le thème "collision continentale" du programme Intérieur de la Terre a concentré ses financements sur deux cibles, le Tibet et l'Iran. La justification du chantier Himalaya-Tibet est évidente puisqu'il s'agit là du plus beau problème de collision continentale à la surface de la Terre. Financé quasiment en continu depuis plus de 10 ans, ce chantier a apporté de nombreux et importants résultats scientifiques aussi bien en tectonique qu'en imagerie lithosphérique. Il a permis aux équipes françaises de jouer un rôle majeur dans le contexte international. Il serait donc très regrettable que les équipes françaises s'en retirent complètement. Financé par l'INSU depuis 4 ans, le chantier iranien a fédéré un grand nombre d'équipes et a regroupé des chercheurs travaillant sur la dynamique de la collision continentale et le risque sismique. Après 4 ans d'acquisition de données, il s'agit maintenant d'en faire la valorisation. La mise en place d'une collaboration bi-latérale effective avec les équipes iraniennes a fourni aux chercheurs français l'opportunité unique, au niveau international, de travailler sur une région-clé pour la compréhension de la dynamique de la collision continentale. Ici encore, il serait regrettable d'interrompre la collaboration.

• Chantiers

■ Le thème "panaches" du programme Intérieur de la Terre a permis qu'un effort financier important soit consacré par l'INSU ces dernières années (et depuis plus de 10 ans) au chantier "Afar", cible idéale pour étudier les interactions entre une tête de panache et une lithosphère continentale. Ce chantier a concerné un grand nombre d'équipes sur des axes variés, de la structure profonde du panache aux processus de croissance des failles normales. L'un des problèmes de fond reste celui de l'imagerie détaillée du panache en profondeur, mais l'organisation de campagnes géophysiques est difficile dans cette zone. L'autre cible possible est le panache de la Réunion, mais les

problèmes posés ne semblent pas d'un intérêt suffisamment large pour fédérer la communauté.

■ Suite aux séismes destructeurs de 1999 en Turquie, d'importantes campagnes d'acquisition de données ont été conduites ces deux dernières années sur le chantier Marmara. Ces données sont en phase d'analyse et de valorisation.

■ Corinthe : financé par un GDR et des programmes européens, il s'agit moins là d'un chantier que d'un laboratoire permanent, où de très importants développements instrumentaux sont, ou vont, être réalisés.

Propositions

Cinq propositions de chantier ont été discutées par le groupe de prospective. Certaines étaient relativement évidentes, puisque issues des présentations et débats du colloque de prospective de Vulcania (septembre 2002). Il s'agit des chantiers MOMAR et Antilles. Les trois autres cibles mentionnées ci-après, manteau sous la France, Méditerranée orientale et Alpes-Ligure (ou un chantier plus général sur la Méditerranée occidentale), sont proposées pour ouvrir un espace de discussion, une réflexion prospective sur les chantiers qui ne peut évidemment pas être déconnectée de la réflexion sur les programmes. Nous avons également discuté de la prise en considération possible, à plus long terme, d'un chantier en Afrique.

Arc Antillais

■ L'arc des Antilles est la région du territoire national présentant la plus forte probabilité d'occurrence d'un événement catastrophique, volcanique ou sismique. Cette cible s'inscrit dans la thématique subduction qui concerne un mécanisme fondamental dans la géodynamique globale de la Terre, le transfert entre réservoirs profonds et superficiels. Une cible subduction antillaise permettrait donc d'aborder simultanément des questions de recherche fondamentale et de tectonique active à fort impact sociétal. Elle constituerait à ce titre un chantier privilégié

susceptible de fédérer un nombre significatif de chercheurs d'horizons différents.

■ De multiples questions géodynamiques intéressantes s'y posent. On peut citer le problème de la co-existence de 2 arcs d'âges différents, dont les Antilles sont l'un des plus beaux exemples ; il s'agit aussi d'une subduction relativement récente dont on ne connaît pas le mécanisme (extension de la plaque plongeante ?). Une action intégrée combinant des observations et mesures géophysiques à terre et en mer avec des études géochimiques, tectoniques, sédimentologiques et pétrologiques est indispensable pour contraindre l'évolution de la marge active à l'échelle de tout l'arc des Antilles, et mieux appréhender l'aléa sismique et volcanique.

■ L'existence d'un fond de données significatif, notamment bathymétrique, et d'un observatoire permanent facilitera le démarrage des opérations de recherche et leur logistique. Une instrumentation spécifique devra probablement être développée.

■ Il faut souligner que le BRGM porte un grand intérêt à la région visée par ce chantier, notamment en relation avec le développement de ressources d'énergie géothermale, et que l'IRD serait intéressé par le développement d'un observatoire sismologique marin. L'IFP qui travaille depuis plusieurs années notamment sur le prisme de la Barbade pourrait également être intéressé. Enfin, des contacts positifs ont été pris avec nos collègues anglais.

MOMAR

Il s'agit d'effectuer une observation à long terme des processus actifs aux dorsales océaniques, en se positionnant sur la dorsale médio-atlantique, au sud des Açores.

Le problème scientifique

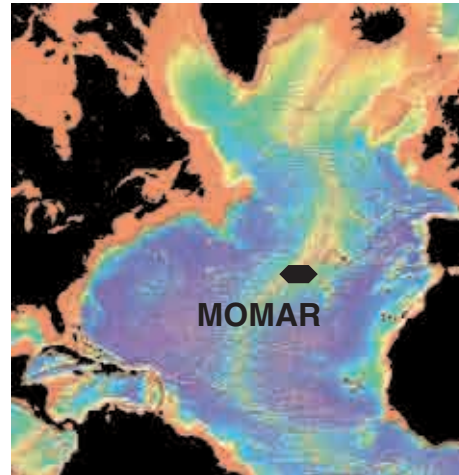
Les dorsales océaniques sont des zones actives où les interactions entre l'intérieur de la Terre (convection mantellique, fusion partielle et migration des liquides, déformation tectonique) et les enveloppes superficielles (eau de mer, biosphère) sont très importantes. Pour comprendre ces interactions, une approche intégrée et multidisciplinaire, dans laquelle les différents processus sont abordés simultanément, est indispensable. L'hydrothermalisme constitue le point central : l'activité hydrothermale est générée par une source de chaleur d'origine profonde ; la circulation de l'eau de mer est guidée par le système de failles axiales ; les sources hydrothermales émettent des fluides chauds et chargés en métaux, qui précipitent en formant des cheminées de sulfures, alimentent des colonies biologiques chimiosynthétiques et forment des panaches hydrothermaux altérant la composition de l'eau de mer. L'enjeu scientifique de l'observation à long terme des processus actifs est de caractériser et de quantifier les relations entre ces différents processus : comment un apport magmatique ou un rejeu tectonique peut-il modifier la géométrie de la circulation hydrothermale, influencer sur la localisation ou la composition des fluides des événements, et influencer sur la nature et la répartition de la biologie ?

Pour aborder ces questions, nous proposons d'installer un observatoire sous marin similaire à ceux qui permettent de suivre l'activité d'un volcan à terre. Par des observations et mesures continues ou répétées, sur des échelles de temps de l'ordre du mois à la dizaine d'années, l'objectif est de caractériser simultanément l'évolution temporelle d'un certain nombre de paramètres tels que la sismicité, la déformation, le flux et la composition des fluides hydrothermaux, la nature et la répartition des populations, et de comprendre leurs relations.

Le choix du chantier

Le chantier MOMAR (MONitoring of the Mid-Atlantic Ridge) a été sélectionné par le programme

InterRidge pour y installer, à moyen terme, un observatoire, centré sur la zone de Lucky Strike. Il a l'intérêt de présenter plusieurs champs hydrothermaux situés à des profondeurs variées et sur des substratums différents (basaltes et serpentinites). Sur le plan logistique, il a l'avantage d'être facilement accessible (proximité des Açores). Les équipes françaises ont joué un rôle majeur dans les travaux



exploratoires, souvent dans le cadre de projets européens. La communauté française se propose donc de devenir le moteur du projet InterRidge, en association avec des partenaires européens.

La stratégie

La conduite d'un tel programme constitue un défi technologique. La stratégie choisie est de commencer dès maintenant certaines expériences avec les outils existants dans la communauté française, ou en collaboration avec des collègues étrangers. Suivant les possibilités, mesures en continu ou mesures répétées pourront être conduites. Les submersibles (VICTOR et NAUTILE) sont des vecteurs indispensables pour la manipulation d'outils, et le futur navire, *Le Pourquoi Pas*, sera particulièrement bien adapté. Un certain nombre d'outils et de capteurs ont été déjà développés autour des submersibles (capteurs de température, de pression, de chimie des fluides, mesures de flux, cages largables, etc.). D'autres nécessitent encore un développement ou une simple acquisition. Le parc OBS de l'INSU permettra de commencer rapidement des travaux sur la microsismicité, la compliance et la structure profonde. A plus long terme, les AUV (Autonomous Underwater Vehicles) équipés de différents capteurs deviendront probablement les vecteurs les plus performants.

Le bassin Méditerranéen

La Méditerranée orientale

■ Le chantier Méditerranée orientale (autour de la Mer Egée) est une zone-cible tectoniquement active évidente et une région de forts séismes potentiels. La connaissance géologique et géophysique, fruit de plus de 20 ans de présence française sur le terrain et des investissements lourds récents (GDR Corinthe, projet Marmara) est aujourd'hui renforcée par un réseau dense de données cinématiques (GPS) et une imagerie du manteau supérieur. C'est aujourd'hui l'un des meilleurs sites pour aborder la question du couplage entre processus profonds (notamment structure mantellique) et superficiels (tectonique active). Dans un contexte tectonique aussi complexe, des objectifs détaillés demandent à être précisés.

■ Il est également envisageable d'étendre ce chantier jusqu'au Liban, au Caucase ou à l'Iran, pays avec lesquels des programmes de coopération internationale fonctionnent efficacement autour des thèmes de la tectonique continentale et de l'aléa sismique.

■ La Méditerranée orientale est aussi la zone sélectionnée pour le projet EUROCORES-MEDIFLUX (avec le soutien de l'INSU via le GDR Marges) pour l'étude interdisciplinaire des suintements froids du cône du Nil profond (recoupements possibles avec Surfaces et Interfaces Continentales).

Système Alpes du Sud - Mer Ligure, Méditerranée occidentale

■ Ce chantier combine des objectifs profonds et superficiels. Les questions-clés qui s'y posent sont par exemple celle de la transition entre lithosphères alpine et ligure, ou celle du contrôle de la cinématique par les structures profondes crustales ou mantelliques. Le calibrage des processus d'exhumation-dénudation (par exemple par thermochronologie) et la reconstitution de la morphogenèse dans les Alpes franco-italiennes sont très en retard par rapport à celle des Alpes centrales et orientales ; ce retard est encore plus important dans la terminaison sud de l'arc. C'est une zone-atelier presque évidente pour le thème "reliefs de la Terre". Enfin, il s'agit là d'un chantier important pour les études de risques, notamment d'inondations. Son caractère structurant et fédérateur est donc clair.

■ Le BRGM est déjà fortement impliqué dans cette région dans le cadre de travaux de cartographie à terre et en mer et des études de prévision des risques naturels. La coordination de ces actions avec les activités de recherche de l'INSU sur ce chantier serait envisagée favorablement.

■ La question reste toutefois posée de la pertinence de l'extension de ce chantier Alpes-Ligure au cadre plus général d'un chantier "Méditerranée occidentale", notamment en liaison avec les chantiers du GDR Marges et du "Défi Marges" de l'IFREMER regroupant l'ensemble des préoccupations mises en avant pour l'étude des marges (ouverture océanique, mouvements verticaux, héritage structural, problème du Messinien, enregistrements des variations climatiques, aléa sismique et instabilités gravitaires, hydrodynamisme sédimentaire plateau/pente, fonctionnement des canyons et systèmes turbiditiques...). Plusieurs campagnes à la mer seront réalisées dans le Golfe du Lion-Sardaigne, Var-mer Ligure, Corse et pente algérienne dans des programmes où l'approche "terre-mer" est souvent mise en avant.

Discussion autour d'un chantier en Afrique

■ La question de l'opportunité de la définition d'un chantier en Afrique à terme de 4 ou 5 ans a été soulevée par J. Ludden. Selon les axes prioritaires qui seront définis par le groupe de prospective "Jeune Terre", il est bien possible qu'il soit nécessaire de réfléchir à une cible africaine.

■ Le BRGM est actuellement très intéressé par la recherche de liens entre le développement des provinces métallogéniques à travers les grandes époques de l'histoire de la terre et la persistance d'anomalies d'échelle lithosphérique, et notamment avec le fonctionnement de points chauds. De tels contextes sont particulièrement bien développés en Afrique Australe, où se superposent depuis l'Archéen des phénomènes à l'origine de l'une des plus importantes provinces à cuivre, qui renferme également les principaux gisements de diamant de la terre. Le développement, avorté ou en cours, de rift intracontinentaux qui s'étendent du Kenya jusqu'à la marge atlantique de l'Afrique semble être un guide structural témoin de phénomènes exceptionnels à l'échelle continentale, leur environnement géologique offrant de nombreux sujets d'étude scientifique. L'IRD

réfléchit plutôt actuellement à travailler en Afrique sur les thèmes des Surfaces et Interfaces Continentales, et non sur des thèmes intéressant la division Sciences de la Terre. L'IFREMER poursuit également des travaux en Afrique de l'ouest sur les systèmes sédimentaires profonds, les sorties de fluides et les hydrates de gaz en relation avec l'activité pétrolière (recouvrements possibles avec Surfaces et Interfaces Continentales).

■ Une cible en Afrique, par exemple sur les rifts intracontinentaux de l'Afrique Australe et sur le Précambrien aurait sûrement la capacité de mobiliser la communauté. Mais la question reste posée de la difficulté du travail sur le terrain. Il faut toutefois souligner que le BRGM dispose là-bas de très bons contacts et qu'il y travaille sans problème.

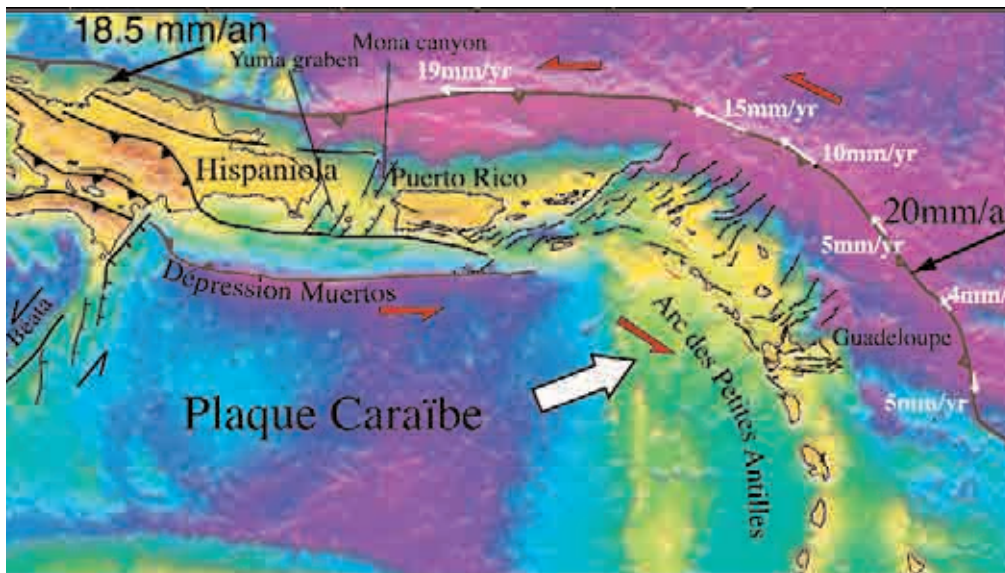
Manteau sous la France

La chaîne hercynienne est stabilisée thermiquement depuis le Trias. Toute anomalie de vitesse des ondes sismiques détectée dans le manteau sous cette chaîne

(comme sous la Bretagne par exemple) peut donc sans ambiguïté être interprétée comme l'indice d'une hétérogénéité lithologique ou structurale. Pour mieux comprendre la mécanique de la lithosphère, il faut donc étudier le manteau sous une chaîne stabilisée thermiquement. La chaîne hercynienne sous la France est un exemple emblématique d'une telle structure. De plus, à la faveur des échantillons de manteau remontés par les volcans du Massif Central, ou affleurant dans les Alpes ou les Pyrénées on peut mener une étude géologique du manteau sous la France. Ce chantier devrait permettre de progresser sur la question de la définition de la lithosphère.

Géofrance 3D a démontré l'importante capacité de mobilisation d'une cible sur le territoire national.

La définition plus précise d'un chantier " manteau sous la France " devra être menée en concertation avec le BRGM.



calculs

Troisième partie
Actions et moyens

C.2-Instrumentation - calculs

- *Instrumentation géophysique*
- *Instrumentation géochimique*
- *Expérimentation en sciences de la Terre*
- *Equipements informatiques*

accélérateur
instruments

- Instrumentations - calculs

D

epuis le dernier exercice de prospective l'Insu a poursuivi et même renforcé sa politique d'instrumentation, d'équipements, de création de parcs mobiles et permanents en géophysique, ainsi que la labélisation de laboratoires nationaux en géochimie et en minéralogie. Cette politique doit être renforcée par l'INSU.



*L'expérience de géodynamo " Derviche
Tourneur Sodium " © cnrs-igrit
Gravimètre absolu, campagne de mesures en
Iran © cnrs-east
Microsonde ICPMS, instrumentation nationale
de la géochimie © cnrs-crpg*

Instrumentation géophysique

A rticulation entre instrumentation nationale et de laboratoire

■ Depuis le dernier exercice de prospective, l'INSU a poursuivi et même renforcé sa politique de mutualisation des équipements au sein de parcs nationaux d'instruments géophysiques portables en sismologie, géodésie GPS, gravimétrie et magnéto-tellurique. Cette politique volontariste a permis, au moins en sismologie et GPS, d'atteindre un niveau d'équipement correct, proche de celui de nos voisins anglais et allemands. Elle a également eu un effet structurant très positif pour les communautés d'utilisateurs de ces instruments. La priorité au développement de parcs et outils géophysiques nationaux doit donc être maintenue.

■ De nouveaux besoins se font toutefois sentir dans les laboratoires pour des équipements spécifiques permettant de mener à bien des observations de type semi-permanent pour l'étude de phénomènes dynamiques. C'est le cas en particulier des récepteurs géodésiques GPS qui, devant être immobilisés entre 2 et 5 ans sur des chantiers précis pour des observations semi-permanentes, ne peuvent être empruntés pour une telle durée au parc national. On peut également anticiper une demande de ce type en gravimétrie terrestre liée aux progrès récents effectués sur les gravimètres supraconducteurs autonomes et transportables. En sismologie, les équipements de laboratoire ont représenté une part très faible du financement INSU en instrumentation géophysique du fait de la politique volontariste de mutualisation en matière de parcs sismologiques. Mais les limites de cette politique ont été perçues l'an dernier et soulignent la nécessité d'un compromis sur ce type d'équipement. Pour conserver l'homogénéité technique des matériels, en faciliter la mise en œuvre et la maintenance, il faut veiller à conserver la synergie entre équipements de laboratoires et instrumentation nationale.

Instrumentation nationale en géophysique, bilans et grands projets

■ Ces dernières années, un important effort d'équipement a été mené pour combler des lacunes importantes en sismologie large-bande mobile (création du RLBM – réseau large-bande mobile –) et fond de mer (création du parc OBS). Le montage d'un nouveau parc sismologique (IHR – imagerie haute-résolution –) a également été initié avec l'objectif de progresser dans l'imagerie détaillée des structures à risques (volcans, failles) en augmentant sensiblement le nombre de voies d'acquisition. La programmation scientifique a pu s'appuyer sur une instrumentation nationale performante, permettant à la communauté française de jouer un rôle de premier ordre au plan international, par exemple dans le domaine de l'aléa sismique, ou dans celui de la dynamique des déformations intra-continentales.

■ En imagerie sismologique, les enjeux sont toujours de progresser en résolution spatiale grâce à la densification des réseaux de capteurs, et d'ajouter la dimension temporelle en réitérant les campagnes de mesures. Ces aspects sont particulièrement importants pour l'investigation des structures à risque comme les édifices volcaniques et les failles actives. Il faut donc poursuivre les développements instrumentaux permettant d'augmenter le nombre de voies d'acquisition tout en facilitant la mise en œuvre des instruments. Pour que la communauté conserve la place importante qu'elle occupe au plan international, une jouvence totale du RAM (réseau accélérométrique mobile de l'INSU) est nécessaire, ainsi que la poursuite de l'équipement des parcs GPS et RLBM.

■ La question de la gestion et de la conservation des données acquises par les instruments nationaux, notamment sismologiques, est un problème ancien et récurrent, mais qui peut aujourd'hui trouver sa solution grâce aux développements de logiciels menés dans plusieurs laboratoires et à la baisse du coût du stockage informatique. Cette résolution passe par la création de centres de stockage et distribution de données accompagnée de la mobilisation de personnels techniques.

■ Equipement géophysique de laboratoire

■ En plus de l'instrumentation nationale, l'INSU finance l'équipement en matériel de géophysique des laboratoires français en sciences de la Terre. Les demandes font toujours l'objet d'un montage en cofinancement avec d'autres organismes (Région, Ministère, IRD, BRGM, etc.) et la contribution demandée à l'INSU se situe généralement entre 1/3 et 2/3 du budget total. Il est à noter une forte augmentation des demandes en 2003 qui suit une année où la participation financière de l'INSU a connu elle-même une forte progression. Ces demandes couvrent l'ensemble de l'instrumentation en géophysique. Comme il a été souligné précédemment, les équipements en sismologie représentent une part très faible des financements accordés du fait de la politique volontariste de l'INSU en matière de parcs sismologiques. En plus des équipements en sismique marine (en milieu côtier en particulier) et en physique des roches ou en expérimentation, une forte proportion du soutien en équipement est allé au magnétisme (surtout en paléomagnétisme et un peu en électromagnétisme) entre autres à cause d'un besoin identifié de jouvence d'instruments anciens.

■ Il n'est bien entendu pas question de faire ici une prospective en équipements des laboratoires qui doit rester du ressort des équipes de recherche mais il est souhaitable de mettre en avant : 1) une nécessaire inter-opérabilité des équipements de laboratoire avec ceux des parcs, notamment en sismologie et en géodésie, 2) la nécessité d'observations semi-permanentes en liaison avec les grands chantiers ou programmes qui se dessinent, 3) la part importante que doit conserver la jouvence régulière d'équipements existants.

■ Instrumentation géophysique de fond de mer

■ Les océans recouvrent près des 2/3 de la surface du globe ; les 2/3 de la lithosphère se forment aux rides médio-océaniques ; la plupart des zones de

subduction où se localise une grande partie de l'activité sismique mondiale sont immergées ; la plupart des panaches mantelliques et donc des volcans sont situés sous les océans ; enfin, une part importante des réserves en hydrocarbures est localisée dans des terres immergées. La compréhension de la structure et de la dynamique de la lithosphère océanique, et plus généralement celle des terres immergées, est donc un enjeu fondamental pour les sciences de la Terre. Il n'est pas surprenant que l'INSU envisage de focaliser sa programmation scientifique sur des cibles à forte composante marine, comme la Méditerranée orientale, les Antilles ou le site MOMAR. Les GDR Marges et Corinthe concernent également des cibles immergées. L'étude de tous ces chantiers requiert le déploiement d'instruments géophysiques de fond de mer ainsi que des expériences combinées terre-mer.

■ Les enjeux présentés ci-dessus nécessitent toutefois l'acquisition et le développement de nouveaux instruments de fond de mer. C'est sur cette voie que l'INSU s'est engagé récemment avec la création du parc de sismographes fond de mer (OBS). Une réflexion est actuellement en cours avec l'IFREMER et l'IRD pour une mutualisation des parcs OBS des trois instituts. La mise en œuvre de sismographes large-bande et d'instruments magnéto-telluriques en fond de mer demeure un challenge important qu'il nous faut mener à bien à l'échelon national. A l'échelle des laboratoires, il nous faut développer d'autres instruments de fond de mer pour la mesure du flux de chaleur, des capteurs de pression, gravimètres, magnétomètres, inclinomètres, etc. Tout comme dans le domaine du spatial, la communauté des géophysiciens marins doit mener elle-même ces développements instrumentaux qui ne sont pas disponibles dans le commerce. La mise en œuvre de grands projets instrumentaux comme ce qui pourrait être envisagé sur l'arc des Antilles ou le site MOMAR doit s'appuyer sur une collaboration significative avec nos partenaires anglais ou allemands qui disposent de compétences importantes dans ce domaine de l'instrumentation fond de mer.

Instrumentation géochimique

A rticulation entre Instrumentation nationale et de laboratoire

■ Au cours des dernières années le concept d'instrumentation nationale en géochimie s'est développé. Ce type d'instrumentation se caractérise par un coût d'achat élevé pouvant dépasser les 2 ou 3 millions d'euros, la nécessité d'accompagner cet équipement par du personnel technique, ingénieur et chercheur, et donc la vocation de ce type d'instrument à n'être présent dans la communauté géochimique française qu'en un seul exemplaire ou en un nombre très restreint. En contrepartie l'accès de la communauté à ces instruments doit être garanti.

■ L'existence d'un certain nombre d'instruments nationaux ne peut évidemment pas suffire à satisfaire tous les besoins de recherche des laboratoires français. A côté de ces instruments nationaux un besoin réel existe donc pour des instruments d'analyse dédiés à un laboratoire ou à un groupe de laboratoires. Ce parc instrumental de laboratoire, que ce soit des spectromètres de masse, des microscopes électroniques ou des appareils de diffraction de rayons X par exemple, comporte de très nombreux instruments et donc implique des moyens importants en personnel et en soutien financier, notamment pour leur jouvence.

■ La politique menée ces dernières années par l'INSU a cherché à trouver un équilibre entre ces deux types d'instruments pour pouvoir à la fois réaliser de grosses opérations en France (e. g. accélérateur ^{14}C à Saclay, ICMPS à l'ENS de Lyon, sonde ionique au CRPG de Nancy, ...) et développer le potentiel analytique des laboratoires. Des cartes de France des équipements existants ont été dressées pour avoir une vue d'ensemble des forces et des faiblesses des laboratoires français en termes de potentiel analytique et pour prévoir les jouvences à faire. Pour assurer une efficacité optimum des moyens analytiques des laboratoires tout en limitant leur coût, fonctionnement et personnel, il semble que la mutualisation entre plusieurs laboratoires, à une échelle régionale par exemple, d'équipements mi-

lourds soit une voie d'avenir. Deux autres aspects restent à améliorer : d'une part le recrutement ou la mobilité des chercheurs ne devrait pas se faire sans que ce soit en phase avec la politique d'équipement et d'autre part il semble indispensable que dans le futur les évaluations des demandes mi-lourds ou d'instruments nationaux soient croisées ou conjointes entre l'INSU et le ministère de l'éducation.

Instrumentation nationale en géochimie, bilans et grands projets

■ Il existe actuellement 6 instruments ayant le statut d'instrument national en géochimie. Ce sont l'ICPMS de l'ENS de Lyon, la microsonde nucléaire du laboratoire Pierre Sue de Saclay, le laboratoire ^{14}C de Saclay, le Rock-Eval d'Orléans, le service d'analyse des roches et minéraux (SARM) et la sonde ionique du CRPG de Nancy. Le fonctionnement de ces instruments a jusqu'à présent été examiné chaque année par l'INSU lors d'une réunion "instruments nationaux" pendant laquelle les bilans techniques et scientifiques, les projets de développement, les taux d'utilisation et les budgets sont présentés et discutés. Un comité scientifique chargé de trier les projets soumis et de leur attribuer du temps machine existe déjà dans le cas de la microsonde nucléaire. Un comité de pilotage existe aussi pour le SARM. La pression des demandes par rapport au temps disponible dans le cas du laboratoire ^{14}C et de la sonde ionique rend indispensable la création de tels comités pour ces deux instruments qui sont dans une certaine mesure victimes de leur succès. Dans le cas de la sonde ionique par exemple il semble inévitable que 30 à 50 % des demandes ne soient plus satisfaites par manque de temps machine.

■ Quatre grands projets sont actuellement en cours de discussion et à des stades d'avancement très différents. Ces projets répondent à des besoins scientifiques clairement identifiés de la communauté. En premier lieu tous les projets qui se développent autour des processus d'érosion, de l'évolution des reliefs et de la tectonique récente, de la formation et de l'évolution des sols, nécessitent un outil de datation approprié comme l'est le ^{10}Be cosmogénique qui avec le ^{26}Al et le ^{36}Cl pourra être mesuré sur le

• Prospective instrumentale - calculs

futur **accélérateur ^{10}Be** du Cerege à Aix. Beaucoup de développements récents en géochimie isotopique, que ce soit ceux concernant la cosmochimie, la Terre profonde ou les cycles de surface, sont conditionnés à notre capacité de mesurer avec une grande précision les rapports isotopiques d'éléments jusqu'à présent quasiment hors d'atteinte analytiquement. L'installation d'une **MC-ICPMS Nu à grand rayon à l'ENS de Lyon** répondrait à ce besoin. L'exploration du système solaire va franchir une étape très importante dans la prochaine décennie avec le retour sur Terre d'échantillons de comètes, de planétésimaux et peut être de grains prélevés dans l'atmosphère de Mars. Pour étudier ces micro-échantillons il faut, à l'instar de ce qui se développe aux Etats Unis et au Japon, développer des techniques de caractérisation minéralogique, chimique mais surtout isotopique à l'échelle nanométrique. Ces possibilités analytiques seraient aussi très utiles pour tous les projets à l'interface entre la biologie et le minéralogie. L'installation d'une **sonde ionique nanosims au Muséum d'Histoire Naturelle de Paris**, qui pourrait fonctionner en réseau avec la sonde ionique IMS 1270 de Nancy, serait la manière de répondre à ces défis instrumentaux et scientifiques. Enfin, il existe dans la communauté un grand nombre de laboratoires qui auraient besoin pour mener à bien leurs projets de recherche de mesures isotopiques "classiques de routine", isotopes du Sr par exemple, mais qui n'ont pas les moyens de créer et de faire fonctionner un laboratoire isotopique pour cela. Il semble indispensable de trouver une solution pour ce cas de figure et de voir dans quelle mesure le SARM de Nancy ne pourrait pas étendre ses prestations analytiques vers un **SARM isotopique**. D'autres solutions pourraient être trouvées en créant des **réseaux entre les laboratoires isotopiques** pouvant offrir une partie de leur temps machine en service.

Instrumentation de laboratoire en géochimie

■ Les demandes à l'INSU de cofinancement (à hauteur maximale de 1/3 du coût total de l'opération) d'équipements mi-lourds de géochimie-minéralogie ont connu une augmentation constante au cours des dernières années. La pression de la communauté est forte dans tous les domaines : microscopies, analyses minéralogiques, analyses élémentaires et isotopiques. Des programmes de remise à niveau des capacités analytiques de la communauté française ont été menés à bien au cours des dernières années comme par exemple le renouvellement des microscopes

électroniques à transmission, la jouvence des spectromètres de masse source solide (presque terminée) ou la jouvence du parc des spectromètres de masse à source gazeuse (en cours). De nombreuses demandes ont vu le jour ces dernières années pour des techniques d'analyse chimique de routine (ICPMS, chromatographie, ...) en vue d'étudier la distribution des polluants dans les sols, les déchets et les eaux. Un effort particulier a déjà été entrepris et devra être amplifié pour assurer l'installation dans les laboratoires des équipements amont à l'utilisation des instruments nationaux ou des futurs instruments en réseaux, comme par exemple des salles de chimie pour l'extraction du ^{10}Be ou des salles de chimie et des moyens de pré-analyse en amont de l'ICPMS. Dans l'état actuel des moyens financiers et surtout en personnel il est évident que tous les laboratoires existant actuellement ne pourront faire l'objet de jouvence et d'attribution de nouveaux équipements. Les choix devront être fondés sur l'excellence scientifique et sur la possibilité d'établir des réseaux pour mutualiser une partie des moyens.

Le futur de la géochronologie

■ Le dernier effort de prospective avait identifié un besoin très fort de la part de la communauté scientifique pour un accès plus large à l'outil géochronologique toutes spécialités confondues et en particulier pour l'analyse $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ *in situ*. Durant ces dernières années la géochronologie a été marquée par le développement analytique des méthodes d'échantillonnage ponctuel (sonde laser en $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, micro-carottages et sonde ionique en U/Pb), par des progrès sur les bruits de fonds analytiques (notamment un U/Pb conventionnel), et par le développement du couple Lu/Hf par MC-ICPMS. Parallèlement des efforts méthodologiques ont été accomplis pour comprendre le fonctionnement des chronomètres isotopiques considérés comme des systèmes physico-chimiques complexes, notamment en K/Ar s.l. et U/Pb.

■ Les besoins que l'on peut identifier à l'heure actuelle sont d'abord liés au besoin de géochronologie sur des objets difficiles à dater :

- descendre en dessous de 20 μm en $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ notamment pour l'insertion de ces âges dans les trajets P,T directement dérivés des lames minces et gagner en résolution spatiale par l'analyse de très petites quantités de matière pour l'analyse des

isotopes solides ;

- analyser du matériel très récent, plus jeune que 100 ka, par les méthodes $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ et si possible U/Pb, ce qui devient réalisable en dessous du million d'années;
- développer l'utilisation de la datation des surfaces par les isotopes cosmogéniques et/ou l'U/Th/He;
- analyser des matériaux déformés hors condition d'équilibre, notamment les faciès métamorphiques " froids ".

■ A côté de ces besoins méthodologiques la communauté scientifique a clairement besoin d'un accès encore plus facile à la géochronologie, alors que la communauté géochronologique s'inquiète de l'état de son parc analytique, des coûts de revient de plus en plus élevés des méthodes pas toujours prises en compte dans les programmes nationaux, et des moyens humains vieillissant. La communauté utilisant la géochronologie $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ voit se restreindre de jour en jour ses possibilités d'irradiation (la base de la méthode) déjà inexistantes en Europe, et disparaissant aux USA. Cela peut, à court terme peut mettre en danger mortel cette technique. Dans la pratique il faudrait :

- garantir la pérennité des installations compétitives, en leur garantissant jouvence, mais aussi achat de matériel neuf et maintien des moyens humains;
- garantir ainsi la compétitivité internationale de ces unités et leur pouvoir d'innovation;

- garantir l'accès de ces moyens à la communauté, en routine ainsi que pour des développements spécifiques;
- permettre aux unités de recherche publique et ou associées sur contrat scientifique de bénéficier de coûts d'analyse réduits, tout en garantissant aux unités de géochronologie par d'autres moyens un coût d'analyse réel leur évitant d'avoir recours aux contrats privés pour financer les dépenses courantes.

■ Il est clair que l'état de fait du fonctionnement de la géochronologie amène à dresser le constat d'une inadéquation entre les moyens réellement disponibles, leur pérennité, et leur ouverture à la communauté dont il faut soigneusement évaluer les besoins réels. Il serait souhaitable qu'un groupe compétent réfléchisse rapidement sur les leçons à tirer. Parmi les pistes à envisager on peut noter :

- la création d'un service national de géochronologie ;
- le rassemblement en réseau des unités de géochronologie les plus compétitives, ce réseau ayant les prérogatives et les devoirs d'un service national ;
- la garantie d'un financement récurrent à un tel réseau, accompagné de jouvence d'équipement mais aussi du devoir d'ouverture à la communauté, la disposition en réseau permettant une gestion mutualisée des domaines, des problèmes d'irradiation, d'achat de petit matériel etc.

Expérimentation en sciences de la Terre

L e fonctionnement du groupe *ad hoc*. Expérimentation : bilan 1997-2002

■ Ce groupe a été créé dans le but de financer des expériences originales et les méthodes d'observation *in situ* afférentes. L'augmentation en flèche de la pression montre que la création du groupe suite à la dernière prospective à Poitiers répondait à une demande effective de la communauté. Elle coïncide avec la diversification des projets qui émanent des laboratoires étudiant les matériaux géologiques

solides et fluides à diverses pressions et températures et des équipes de modélisation analogique. Les expériences relevaient d'abord des thématiques "Terre profonde" où les laboratoires demandeurs ont acquis une forte réputation. L'émergence des thématiques de recherche "Enveloppes superficielles" s'est faite à travers les activités expérimentales en volcanisme (e. g. expériences de dégazage des magmas, dynamismes volcaniques). Les demandes émanant de laboratoires travaillant sur les systèmes de basse température (environnement, interactions vivant-minéral, ...), de géomorphologie (expériences analogiques sur la stabilité de terrains, l'érosion et le transport) ont été incitées dans les appels d'offres et des expériences significatives ont été financées. L'effort doit être

• Prospective instrumentale - calculs

poursuivi. Au bilan, l'ensemble des projets soutenus montre une diversité thématique importante qui est souhaitable pour un groupe dont l'intitulé n'est pas disciplinaire. Cette diversité se marque aussi dans les exposés variés qui ont été donnés lors de l'atelier de prospective à Lyon.

Instrumentation nationale en expérimentation : bilans et grands projets

■ Il existe deux équipements labélisés "instrument national INSU" en expérimentation : la presse multi-enclumes à Clermont-Ferrand et le centre de spectroscopie *in situ* à Lyon. Leur fonctionnement correspond aux critères d'ouverture requis avec une occupation par des utilisateurs extérieurs au laboratoire d'accueil d'environ 50%. Il n'y a pour l'instant pas d'autres demandes d'ouverture d'instruments nationaux. La nécessité d'un centre de calorimétrie et de nouvelles expériences synchrotron (infrarouge, spectroscopies X) a été évoquée au cours de l'atelier de prospective.

■ Outre les instruments nationaux, le comité a soutenu certaines actions de portée scientifique importante : géodynamo à Grenoble, réacteurs biogéochimiques en contexte terrestre ou aquatique, de la presse triaxiale et du piston-cylindre à l'ENS Paris, de modélisation analogique sur l'érosion à Rennes, du centre de synthèse à très hautes pressions statiques qui se met en place sur le site de Jussieu.

Instrumentation de laboratoire en expérimentation : les grands développements

Les besoins

■ L'accélération du rythme d'acquisition de nouvelles données géophysiques nécessite un renforcement et des remises à niveau régulières des moyens de calcul des laboratoires. Ces développements sont d'autant plus nécessaires qu'ils interviennent dans un contexte de forte évolution des performances des machines. Des moyens de calcul performants sont nécessaires pour le traitement et la

■ Il y a une forme de stabilité dans la communauté, avec des centres de compétences bien identifiés dans les grands domaines de l'expérimentation directe et analogique. Dans ces domaines, les préoccupations d'avenir se rejoignent autour de la mise au point des systèmes de visualisation *in situ* de la morphologie, des champs de vitesses, de la répartition des éléments chimiques, des phases, ... Ainsi, l'utilisation du rayonnement synchrotron doit continuer à se généraliser, avec une palette de techniques en forte diversification. Les chercheurs des sciences de la Terre sont fortement impliqués dans l'adaptation des techniques nouvelles et participent activement à la définition des nouveaux programmes et équipements. Des techniques spectroscopiques sont développées ou le seront sur les synchrotrons de Grenoble (ESRF) ou Saclay (SOLEIL), et sont particulièrement adaptées au développement de l'expérimentation impliquant le vivant qui est en pleine explosion. Pour la modélisation analogique, les besoins vont vers des méthodes d'imagerie visant à caractériser des formes et leur évolution dynamique avec une résolution spatiale et temporelle de plus en plus importante et dans des conditions de non-interaction avec le phénomène à visualiser ou des environnements agressifs. D'une manière générale, les progrès viendront de la mise au point de méthodes de visualisation en 3D des échantillons sous les conditions expérimentales qui rejoignent certaines préoccupations de la géophysique et de la géochimie (imagerie et dynamique des écoulements, imagerie chimique spécifique). L'organisation d'un fonctionnement en réseau devra permettre de valoriser les compétences spécifiques développées depuis plusieurs années dans les laboratoires, d'optimiser leur échange, et d'éviter les redondances.

Equipements informatiques

visualisation de gros volumes de données, mais bien plus encore pour les modélisations directes et inverses "réalistes" de grandes dimensions qui réclament des ressources importantes en termes de mémoire et/ou de temps de calcul. Les laboratoires nationaux des sciences de la Terre ont su mettre à profit les développements technologiques récents en informatique pour aborder de nouveaux problèmes scientifiques et améliorer leur productivité. La généralisation des réseaux de communication à haut débit, l'émergence des ressources Internet,

l'apparition de supports économiques pour le stockage des données, l'augmentation de puissance des calculateurs, et la mise à disposition de moyens graphiques performants ont largement modifié nos habitudes de travail. De manière moins visible, celles-ci ont également bénéficié de la simplification des procédures d'administration et de maintenance des systèmes, et du renforcement de la sécurité informatique. Naturellement, tous ces aspects seront encore développés dans les années à venir.

Stratégie d'équipement

Cependant, l'évolution rapide de la puissance de calcul des microprocesseurs impose aujourd'hui un changement de stratégie en ce qui concerne les choix techniques de nos différents serveurs : les machines actuelles sont basées sur des technologies de masse (Commodity Off the Shelf Technology – COST) faisant appel à des composants prévus pour un usage générique dans des environnements diversifiés. Ces machines générales, peu coûteuses et facilement interchangeables, sont essentiellement constituées d'ordinateurs ou de cartes de type PC tournant avec des logiciels libres. Elles vont progressivement remplacer nos anciens systèmes propriétaires dont les coûts élevés sont de plus en plus difficiles à justifier au regard de la courte durée (deux à trois ans) durant laquelle leur fonctionnement est véritablement compétitif.

Le développement des moyens de calcul

Dans le domaine du calcul scientifique, on assiste actuellement à un développement important des

grappes de PC, une architecture modulaire et économique particulièrement propice à la simulation numérique, autorisant à la fois l'exécution parallèle des codes de calcul et l'accès à des ressources importantes en mémoire centrale. Les nombreuses possibilités offertes par cet environnement de développement stimuleront sans aucun doute des recherches innovantes. Dans notre communauté, de telles configurations permettront de progresser dans des domaines importants tels que l'environnement et les risques naturels, la sismologie, la géodynamique, ou encore le comportement des géomatériaux, en permettant aux chercheurs de développer et de mettre au point leurs codes dans leur laboratoire. Les grands centres de calcul nationaux, IDRIS et CINES, et les centres de calcul mésoéchelle en cours de constitution pourront accueillir les calculs les plus lourds. Cette approche demande donc à être encouragée et soutenue. Au-delà de l'aspect purement matériel des grappes de PC, leur généralisation devrait servir à impulser de nouvelles actions de recherche en modélisation numérique, dont l'importance n'est plus à démontrer pour le développement et la validation de nouvelles théories, et pour la compréhension de la "machine Terre" à partir des nombreuses observations géophysiques collectées à terre, en mer et à bord des plates-formes spatiales.

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
3, rue Michel-Ange - BP 287 - 75766 Paris cedex 16
<http://www.insu.cnrs-dir.fr>