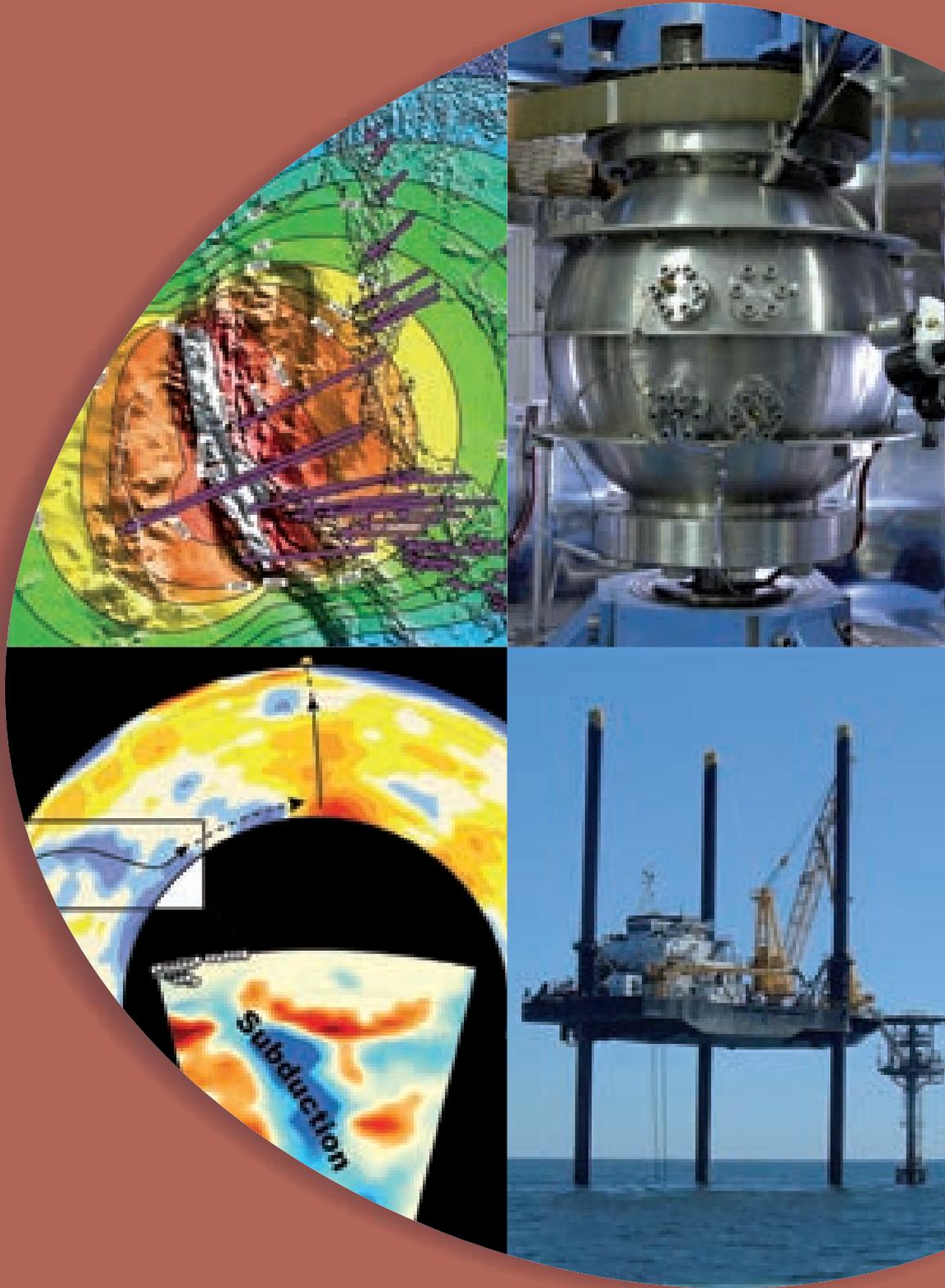


Prospective

Institut National des Sciences de l'Univers



Prospective 2008 – 2013 de la Commission spécialisée sciences de la Terre (CSST) de l'Institut National des Sciences de l'Univers

Synthèse des travaux préparatoires et du colloque d'Aussois,
20-21 octobre 2008.

Les travaux des groupes de travail ont été conduits par les membres de la CSST sous la direction de son président.

Commission spécialisée sciences de la Terre

Philippe Davy, président

Pierre Agrinier, Michel Campillo, Michel Cara, Christine Deplus, François Guillocheau, François Guyot, Bruno Hamelin, Laurent Jolivet, Gabriel Marquette, Bernard Marty, Christophe Monnin, Pascal Neige, Etienne Ruellan, Elisabeth Vergès.

Secrétariat de rédaction

Christiane Grappin

Sommaire

| | |
|--|-----|
| Éditorial | 06 |
| Rétrospective | |
| Méthode de travail | 10 |
| Quelques données bibliométriques | 11 |
| Les programmes ST 2002-2008 | 12 |
| Fonctionnement des programmes | 13 |
| Enjeux scientifiques | |
| Préambule | 16 |
| Les origines | 22 |
| Structure et dynamique de la Terre | 28 |
| Risques naturels | 41 |
| Environnements de surface actuels et anciens, couplages avec les autres enveloppes terrestres..... | 50 |
| Sciences de la Terre et biologie, une pluridisciplinarité à construire | 60 |
| Ressources minérales | 66 |
| Enjeux scientifiques spécifiques : sol, sous-sol et eau | 69 |
| Enjeux scientifiques spécifiques : outils numériques en sciences de la Terre | 74 |
| Enjeux industriels et sociétaux | |
| Préambule | 84 |
| La recherche en sciences de la Terre face à la demande industrielle et sociétale | 85 |
| L'énergie | 89 |
| Les ressources minérales | 94 |
| Les aléas et le risque | 98 |
| L'INSU face à ces enjeux : organisation de la recherche, valorisation, formation, communication ... | 101 |
| Moyens et structures | |
| La politique d'instrumentation nationale | 108 |
| Les services nationaux d'observation en sciences de la Terre interne | 112 |
| Très grands équipements et plateformes instrumentales nationales | 132 |
| Europe et international | |
| Les infrastructures | 139 |
| Projets et appels d'offre internationaux | 141 |
| Coordinations internationales | 144 |
| EUREKA | 145 |
| Conclusions | 146 |
| Annexes | |
| Les Sciences de la Terre en chiffres | 152 |
| Instrument national : Définition, principe général de gestion | 154 |
| Instrument national : Coût, tarification des prestations | 155 |
| Mécanisme d'élaboration des programmes du 7 ^{ème} PCRD et organisation au niveau français | 156 |
| Sigles et acronymes | 157 |

Éditorial

La prospective des sciences de la Terre a été conduite en 2008 dans le cadre des missions spécifiques de l'INSU par la commission spécialisée des sciences de la Terre (CSST), sous la direction de Philippe Davy, président de cette commission. Cette prospective sera publiée en 2011, soit plus de deux ans après sa présentation à Aussois en octobre 2008 et 8 ans après la précédente qui avait eu lieu à Vulcania. Les prospectives de l'INSU ont pourtant généralement une périodicité de 4 ans. Les raisons de ces retards sont sans doute à rechercher dans les réformes fondamentales de la structuration de la recherche française qui ont eu lieu durant cette période et dont le terme ne semble pas encore atteint.

Durant ces dernières années les réformes visant à restructurer la recherche ont été nombreuses. Les principales sont la Loi de Responsabilité des Universités (LRU), la création de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), la création de l'Agence d'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur (AERES), la réforme du CNRS organisé désormais en instituts incluant l'INSU, qui se faisant a perdu une partie de ses prérogatives, et créant un Institut de l'Ecologie et de l'environnement (INEE) couvrant une partie du domaine de l'INSU. Conjointement, ce paysage de la recherche a été aussi impacté, sans doute à une échelle moindre, par la création des Alliances comme ANCRE pour l'énergie ou ALLENVIE pour l'environnement, par l'organisation des feuilles de route de la SNRI (Stratégie Nationale pour la Recherche et l'Innovation) et plus indirectement par les réformes globales du fonctionnement de l'Etat comme la loi de finance (LOLF) ou la Réforme Générale des Politiques Publiques (RGPP).

Devant un tel bouleversement, notre prospective se devait d'analyser les forces et les faiblesses du domaine des sciences de la Terre et d'ouvrir avec détermination les axes de recherche tant pour répondre aux questions fondamentales de la connaissance qu'à celles posées par notre société en pleine expansion et complexification. Questions qui remettent le milieu naturel, ses risques et ses ressources au cœur d'un débat pour lequel les sciences de la Terre doivent reprendre toutes leur place et y être prêtes.

Bâtie sur une analyse rétrospective, un état des lieux, une présentation des enjeux scientifiques et sociétaux, cette prospective met en évidence la force d'une communauté scientifique nombreuse, innovante et productive, riche en jeunes chercheurs, bien insérée dans les universités, avec un fort impact international et scientifiquement bien organisée à l'échelle nationale à travers les programmes de l'INSU. Elle illustre aussi des faiblesses structurelles, qui, en 2007, au début de cette réflexion prospective étaient, à de rare exception, celles d'unités de recherche de taille sous critique, souvent sous dotées en personnels techniques et corollairement sous représentées dans la gestion des grands équipements de la recherche.

Les recommandations de cette prospective ont largement guidé la réorganisation de la division des sciences de la Terre à l'INSU, quatre décisions majeures ont été prises :

1- Cinq comités thématiques, centrés sur les grands enjeux scientifiques, ont été créés.

Ils ont la charge de la programmation scientifique, de son évaluation et d'une prospective permanente. Ces comités sont :

- Terre interne et de planétologie ;
- Couplages entre phénomènes profonds surface et enveloppes externes ;
- Les aléas et risques telluriques ;
- Interactions avec la vie dans le passé et l'actuel ;
- Ressources géologiques et développement durable.

2 - Les unités de recherche ont été regroupées autant qu'il a été possible, elles forment désormais un ensemble équilibré de grands laboratoires répartis sur l'ensemble du territoire national.

3 - Les services nationaux d'observation, renforcés et stabilisés dans leur financement, dotés chacun d'un conseil scientifique et coordonnés par une commission nationale, sont réorganisés en cinq services majeurs : géodésie - gravimétrie, magnétisme, sismologie, volcanologie et instabilités de versants.

4 - Enfin, le projet RESIF (Antenne sismologique et géodésique française) a été lancé.

La communauté des sciences de la Terre des universités, des établissements et des organismes de recherche gère en propre RESIF qui, comme ECORD, a été reconnu comme un grand instrument de la recherche par le ministère de la recherche.

Même si d'évidence la mise en œuvre de cette prospective 2008-2013 n'est pas close, en particulier pour l'évolution de la structuration des instruments nationaux, on peut affirmer sans beaucoup se tromper que les sciences de la Terre, positionnées au cœur des problématiques du risque et des ressources, retrouvent progressivement leur place dans les questionnements scientifiques en cours très largement dominés par les questions climatiques et environnementales.

Je tiens à remercier tous les collègues qu'ils soient du CNRS, des universités ou des organismes partenaires qui ont participé aux différents groupes de réflexion durant les travaux de cette prospective et tout particulièrement les responsables de groupes et Philippe Davy qui a assuré la direction de cet exercice difficile.

Bruno Goffé

Directeur adjoint scientifique Sciences de la Terre
Institut National des Sciences de l'Univers

Rétrospective

Composition du groupe

| | |
|--------------------------|---|
| Etienne Deloule | (CRPG Nancy), Coordinateur |
| Yanick Ricard | (Sciences de la Terre - ENS Lyon) |
| Anne Davaille | (FAST Orsay) |
| Christian France-Lanord | (CRPG Nancy) |
| Jean-Marc Lardeaux | (Géosciences Azur Villefranche-sur-mer) |
| Anne-Marie Lézine | (LSCE Saclay) |
| Gautier Hulot | (IPG Paris) |
| Bernard Marty | (CRPG Nancy) |
| Michel de Saint-Blanquat | (LMTG Toulouse) |
| Olivier Vidal | (LGCA Grenoble) |

Une démarche de prospective, destinée à définir les prochains programmes de l'INSU pour les sciences de la Terre (ST), est nécessairement l'occasion d'une rétrospective, pour analyser ce qui a été fait depuis la prospective précédente (Vulcania de Septembre 2002). Son but n'est pas d'analyser les progrès scientifiques effectués ou les nouveaux champs ouverts, chaque groupe thématique étant plus à même de le faire en profondeur dans ses champs spécifiques. Ce ne peut pas être non plus une évaluation de la production et du fonctionnement des laboratoires, le Comité national et l'AERES en ayant la charge. Nous nous sommes donc attachés à comprendre le rôle joué pendant 6 ans par les programmes animés par la section ST de l'INSU dans la vie et pour la production scientifique de notre communauté. Cet exercice devrait nous permettre de proposer des éléments de réflexion sur l'organisation des prochains programmes, de les situer d'une façon bien documentée dans un contexte qui est en forte évolution et ainsi d'y défendre leur rôle.

Méthode de travail

Les programmes de ST étant fortement intégrés dans la vie de nos laboratoires et de notre communauté, il est assez difficile d'obtenir des éléments d'évaluation spécifique sur leur rôle, à la fois interdisciplinaire et inter laboratoire. Chaque programme vit avec son propre comité de programme et d'évaluation, sous le contrôle des commissions spécialisées de l'INSU. Pour enquêter globalement sur les programmes, nous avons choisi :

- d'obtenir directement les données bibliométriques concernant notre communauté dans son contexte international ;
- d'interroger directement les directeurs d'unité pour obtenir un retour de l'échelle locale des programmes nationaux.

Les programmes étant réellement indépendants des laboratoires, cette partie s'est révélée peu productive, malgré la bonne volonté de nos interlocuteurs. Nous avons donc entrepris une enquête directe auprès des porteurs des projets soutenus par ST depuis 2002. En complément de cette vision généraliste et synthétique des programmes, chaque responsable de programme a été sollicité pour présenter les grandes lignes développées au cours des années écoulées.

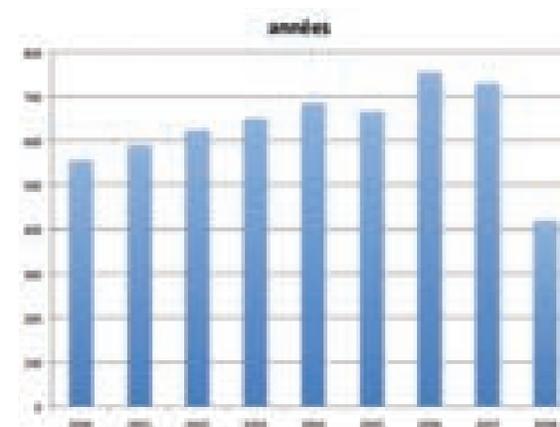
Quelques données bibliométriques

Pour obtenir des données bibliométriques à la fois représentatives de la communauté ST et les moins contestables possible, 24 revues qui représentent le plus de citations en Sciences de la Terre (table 1) ont été retenues (Nature et Science, revues généralistes sont exclues), sur la période allant de 2000-2008, en excluant les abstracts. De 2002 à 2007, le nombre de publications incluant un coauteur passe de 600 à plus de 700, à un rythme commun au pays européen (Fig. 1).

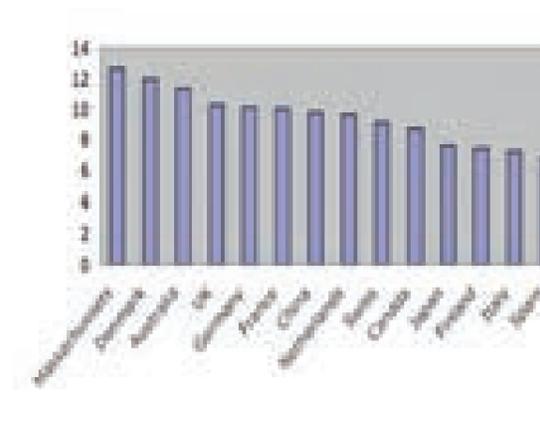
L'impact individuel moyen de ces publications dans la littérature internationale se situe au meilleur niveau européen (Fig. 2), sans différence significative avec l'Angleterre ou l'Allemagne,

après le Massachusetts (MIT USA), le Danemark et l'Australie. Le classement en terme de H facteur est plus favorable à la France, qui se classe 3^e, avec un H Facteur de 61, contre 65 pour l'Angleterre et 63 pour l'Australie, 60 et 59 pour l'Allemagne et le Massachusetts respectivement.

Ces chiffres montrent la réelle productivité scientifique de la communauté ST française. Une réelle comparaison internationale demanderait de recenser les communautés et les moyens de chaque communauté nationale, ce qui est hors de propos ici.



1. Publications ST 2000-2008 (Y. Ricard)

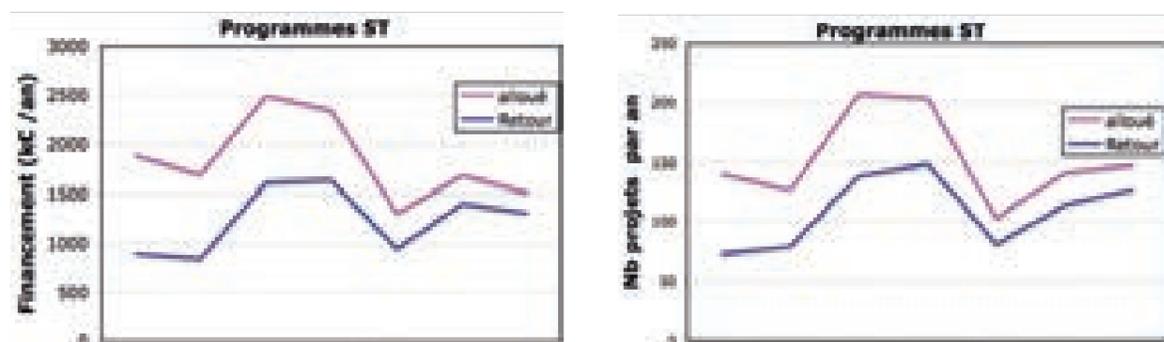


2. Taux de citations moyen ST 2000-2008 (Y. Ricard)

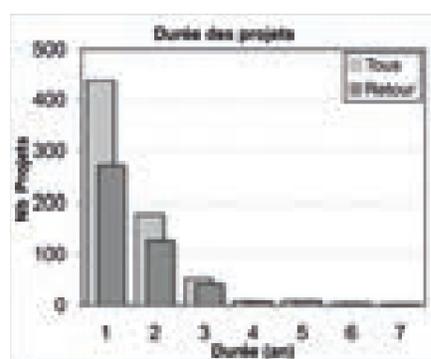
Les programmes ST 2002-2008

De 2002 à 2008, la Commission spécialisée des sciences de la Terre (CSST) a organisé plusieurs programmes, en parallèle ou successivement. Le programme Intérieur de la Terre (IT) est devenu en 2003 DYNamique et évolution de la TERre Interne (DyETI), puis en 2006 Structure, Evolution et Dynamique de l'Intérieur de la Terre (SEdit) et Fluide-Faille-Flux (3f). Les programmes Planétologie (PNP), Environnement et Climat du Passé : histoire et évolution (ECLIPSE), RELIEFS de la Terre (RELIEFS) se sont poursuivis depuis 2002, et le programme Hydrogène naturel (H₂ naturel) a vu le jour en 2008.

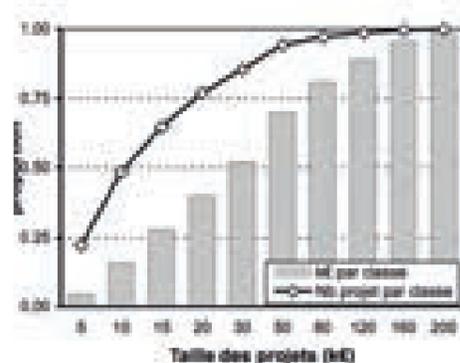
Une enquête a été menée auprès de l'ensemble des porteurs de projets soutenus par ces différents programmes depuis 2002. En utilisant la base de données d'attributions de subventions 2002-2008, 704 projets ont été identifiés, correspondant à 484 porteurs de projets et un montant total de 12 900 k€ répartis en 1073 subventions annuelles (Fig. 3). 531 réponses ont été faites à cette enquête, correspondant à 475 projets, une fois les doublons éliminés. Ces 475 réponses représentent 66 % des projets en nombre et 67 % en financement. La figure 3 montre la répartition des réponses en nombre et en financement pour les différentes années de l'enquête, l'an 1 étant 2002, l'an 7 2008. On note que le taux de retour est bien meilleur pour les dernières années.



3. Montants des financements des programmes ST et nombre de projets soutenus sur la période 2002-2008, tous programmes confondus. « alloué » indique les financements attribués, la courbe « retour » ceux pour lesquels une réponse a été obtenue pendant l'été 2008.



4. Distribution en durée des projets.



5. Distribution en coût des projets.

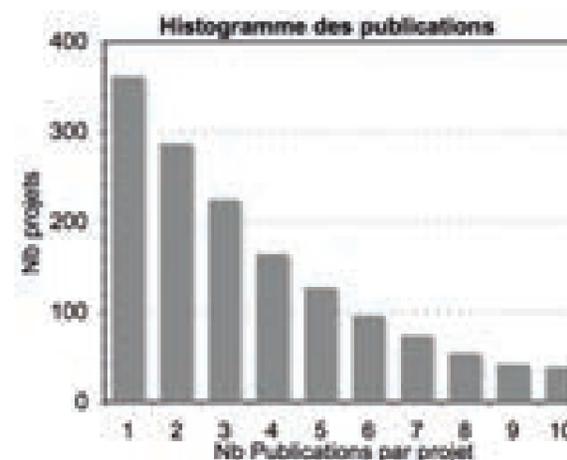
Fonctionnement des programmes

L'analyse des données obtenues permet de définir un certain nombre de points caractéristiques des programmes ST.

- La durée moyenne des projets ST est de moins de deux ans (figure 4), avec plus de la moitié des projets portant sur un an. Un nombre significatif (53/712) de projets sont programmés sur 3 ans. Quelques projets se sont prolongés plus longtemps, après re-soumissions.
- Le coût des projets soutenus (Figure 5) s'étale de moins de 5 k€, avec près de 25 % des projets en dessous de cette limite, à 200 k€ pour quelques projets. La figure 4 montre que 50% des projets sont < 10 k€ et 75% < 20 k€. L'historique associé des coûts par classe (Fig. 5) montre que 5% du budget permet de financer près de 25 % des projets, et 52 % du budget permet de financer 85 % des projets à des niveaux < 30k€. Il n'y a pas de corrélation forte entre la durée des projets et leur coût, suggérant que les projets les plus coûteux incluent des équipements ou des missions spécifiques.
- Pour les 475 projets documentés, le nombre total de participants déclarés est de 2212, soit 4.7 participants et 1.56 EPT/an

par projet. 484 doctorants sont aussi associés à ces projets, sans qu'il soit possible de vérifier la participation possible d'un même étudiant à plusieurs projets (d'une durée d'un an). Le participant N°1 s'investit en moyenne à plus de 40% dans son projet, et pratiquement tous les projets concernent au moins deux personnes, et 50% 5 personnes ou plus.

- En termes de publications, les résultats obtenus font apparaître 484 thèses, et 1425 publications, pratiquement toutes dans des revues internationales. Cela représente une moyenne de 3,22 publications par projet, avec 77 % des projets ayant abouti à au moins 1 publication, 23 % n'ayant pas encore donné lieu à publication. Il faut noter d'une part que notre enquête inclut les projets 2008, et d'autre part que l'intérêt de ces programmes communautaires est certainement la prise de risque. Dans les différents histogrammes présentés dans ce texte, il n'y a pas de biais entre les projets documentés et les projets non encore documentés pour les différents chiffres considérés (coût, durée...). Il semble donc raisonnable d'extrapoler les chiffres obtenus à l'ensemble des projets, ce qui revient à passer de 1425 publications à 2130. Si l'on compare ce chiffre à l'ensemble des articles publiés entre 2003 et 2008, près des 2/3 de ces publications sont issues des programmes ST.



6. Distribution des publications par projet.

Table 1 : Revues prises en compte

| | |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, | PALAEOGEOGRAPHY, |
| GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS | PALAEOCLIMATOLOGY PALAEOECOLOGY |
| GEOCHIMICA ET COSMOCHEMICA ACTA | BULLETIN OF THE SEISMOLOGICAL |
| EARTH AND PLANETARY SCIENCE LETTERS | SOCIETY OF AMERICA |
| TECTONOPHYSICS | JOURNAL OF PETROLOGY |
| JOURNAL OF HYDROLOGY | JOURNAL OF STRUCTURAL GEOLOGY |
| TECTONICS | PRECAMBRIAN RESEARCH |
| REVIEW OF GEOPHYSICS | PHYSICS OF THE EARTH AND PLANETARY |
| TECTONICS | INTERIORS |
| JOURNAL OF GEOLOGY | REVIEWS OF GEOPHYSICS |
| SEDIMENTOLOGY | TECTONICS |
| GEOMORPHOLOGY | JOURNAL OF GEOLOGY |
| GEOPHYSICS | CONTRIBUTIONS TO MINERALOGY AND |
| | PETROLOGY |
| | GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA |
| | BULLETIN |

Enjeux scientifiques

Composition du groupe

| | |
|-----------------------|---|
| Jean Besse | (IPG Paris), Président, membre de la CSST |
| Henri-Claude Nataf | (LGIT Grenoble), ex-président de la section 13 du Comité national du CNRS |
| Gilles Ramstein | (LSCE Saclay), co-responsable du programme ECLIPSE de l'INSU |
| Michel Campillo | (LGIT Grenoble), membre de la CSST |
| François Guyot | (IPG Paris), membre de la CSST |
| Laurent Jolivet | (ISTO Orléans) membre de la CSST |
| Yann Klinger | (IPG Paris), membre de la CSST |
| Pascal Neige | (Biogéosciences Dijon), membre de la CSST |
| Patrick Pinet | (DTP Toulouse), membre de la CSST |
| François Guillocheau | (Géosciences Rennes), membre de la CSST |
| Bernard Marty | (CRPG Nancy), membre de la CSST |
| Bruno Goffé | (INSU Paris), directeur-adjoint scientifique de l'INSU |
| Edouard Kaminski | (IPG Paris), membre de la section 18 du Comité national du CNRS |
| Frédérique Eynaud | (EPOC Bordeaux) |
| Benoît Ildefonse | (Géosciences Montpellier) |
| Philippe Lognonné | (IPG Paris) |
| Denis-Didier Rousseau | (Ens Paris), chargé de mission INSU |

Avec la contribution de :

Pascale Bernard (IPG Paris), Anne Davaille (FAST Orsay), Yves Godderis (LMTG Toulouse), Isabelle Manighetti (LGIT Grenoble), François Robert (LEME Paris).

Préambule

Les enjeux scientifiques des sciences de la Terre et des Planètes sont au cœur des préoccupations humaines les plus intimes, de la genèse du monde qui nous entoure jusqu'aux ressources, défi bien plus pressant aujourd'hui qu'il y a une quinzaine d'années. Les astronomes découvrent périodiquement de nouvelles planètes gravitant autour des étoiles. Ressemblent-elles à celles de notre système solaire ? Remplissent-elles des conditions nécessaires à la naissance de la vie organique et peut-être intelligente ? Comment ces planètes se sont-elles formées ? Les exoplanètes sont situées à des distances si colossales que leur observation directe sera pour longtemps (sinon à jamais) impossible.

Au contraire, les marges de progression cognitives en science de la Terre et des planètes proches sont colossales. D'ailleurs, les grandes questions posées à propos de systèmes lointains ne sont pas non plus résolues pour notre propre système solaire : Sait-on avec certitude comment la vie est née sur Terre ? Quand la graine a-t-elle cristallisé ? Quand et comment se sont différenciées la croûte océanique ou la premières croûte continentale ? Comment fonctionne la dynamo terrestre ? Comment la Terre interne pilote-t-elle le climat ? Comment la vie interagit-elle avec le monde minéral ? Peut-on prévoir les éruptions ou tremblements de Terre ? Peut-on trouver et exploiter de nouvelles ressources ? Quels mondes fascinants va-t-on découvrir avec nos futures sondes ou véhicules habités dans l'espace et au fond des océans ?

Conceptuellement et financièrement réaliste, l'étude des planètes du système solaire et de la Terre est un objectif scientifique majeur. Les géosciences ont la responsabilité de ne pas se limiter à uniquement étudier ou résoudre des problèmes appliqués ou sociétaux. Comme une science, elles doivent aborder les questions fondamentales. On peut d'ailleurs noter que les découvertes, souvent inattendues, ont souvent eu des retombées sociétales importantes. Un tel investissement est par nature risqué, mais la communauté française des sciences de la Terre est partie prenante d'avancées techniques et de découvertes internationales capitales, allant des analyses géochimiques des échantillons terrestres et extra terrestres permettant d'établir la chronologie de la formation et l'évolution précoce du système solaire aux imageries spectaculaires des enveloppes profondes de notre planète ou des minéraux qui la composent.

La découverte de la tectonique des plaques dans les années 60, issue de campagnes sans précédent d'observations géophysiques en particulier en mer, a permis de donner aux

géologues, paléontologues, géophysiciens ou géochimistes une théorie unificatrice. Un nombre impressionnant de découvertes fondamentales rapides s'en est ensuivi, où les découvertes des uns éclairent des problèmes non résolus d'autres scientifiques appartenant à des communautés a priori lointaines. Une telle moisson de découvertes pendant quarante ans donne de façon presque automatique une impression d'essoufflement, d'asymptote. Une étude plus attentive montre qu'il n'en est rien, et que, si des premiers ordres ont certes été établis, la fusion des idées n'est que très partiellement réalisée : l'un des principaux enjeux concernant la dynamique de la Planète consiste à fournir un cadre complet et cohérent pour ses différentes manifestations, qui préfigure une révolution aussi importante que celle de la tectonique des plaques.

Les couplages importants entre les différentes enveloppes (ionosphère, atmosphère, océan, croûte, manteau, noyau) imposent une approche globale, même si chaque système a ses caractéristiques propres. La nouvelle piste qui se dessine consiste à incorporer dans la description de la dynamique actuelle les conséquences de l'évolution des différentes enveloppes au cours des temps géologiques et comprendre leur fonctionnement sur des échelles de temps emboîtées. En particulier, les interactions entre la Terre solide, et les paléoenvironnements, les climats de la Terre constituent un domaine très prometteur.

L'arrivée de nouvelles techniques performantes telles que l'imagerie sismique à partir du bruit, ou les micro- et nano-cartographies chimiques ou optiques, ouvrent de nouvelles perspectives, mais il est important de souligner que l'observation doit continuer à se faire sous tous les angles, de l'espace aux forages océaniques, en passant par le terrain géologique. Enfin, observations et mesures doivent être complétées par une modélisation rigoureuse et quantitative, pour mener à la compréhension et à la prévision des phénomènes naturels.

Les interfaces entre sciences du vivant et sciences de la Terre doivent être multipliées, des origines de la vie à la paléontologie et aux paléoenvironnements. Les biominéraux, par exemple sont les témoins inscrits dans les archives géologiques laissés par les organismes et leurs métabolismes. Il importe donc d'étudier ces processus sur des systèmes naturels actuels ou des systèmes modèles. En sciences de la Terre, les communautés de minéralogie, « mineral physics », géochimie, magnétisme, sédimentologie, fluides crustaux, géosciences marines, géologie de la subsurface, stockage profond, ... et bien évidemment de paléontologie, sont directement concernées.

Quel que soit l'importance métaphysique des grandes questions des origines et de l'évolution de la Terre, l'homme vit sur le sol de notre planète, respire son atmosphère, subit les colères de ses éléments, et fonde son économie et son bien-être sur ses ressources. Il est par conséquent également une tradition et une responsabilité des géosciences de s'occuper des problèmes sociétaux : les chercheurs en Océan-Atmosphère ont la lourde tâche de comprendre la crise climatique actuelle (et devraient d'ailleurs regarder avec attention le passé, mais en sciences de la Terre, les sismologues, tectoniciciens ou volcanologues essayent de sauver des vies en essayant de comprendre et de prévoir des éruptions ou de comprendre les déclenchements et les effets des tremblements de terre. En ce qui concerne les risques (volcans, séismes, glissements, risques hydriques), il faut mettre en place des réseaux d'instruments de mesures pérennes, faire la part des processus transitoires et du régime permanent, développer de nouveaux outils conceptuels, et comprendre l'histoire et le comportement passé des objets (failles, volcans) pour envisager le futur.

Diverses composantes de nos disciplines vont jouer un rôle prépondérant dans la recherche de ressources nouvelles et le stockage des déchets (voir prospective « aspects sociétaux »). En matière de ressources (eau, énergie, minéraux), les défis actuels sont bien plus pressants qu'il y a 10 ou 15 ans. Les géosciences disposent des outils et savoirs pour relever ces défis qui passent par l'exploration de régions nouvelles, une meilleure compréhension des processus, en particulier de circulation des fluides dans la croûte, d'une symbiose meilleure entre mécanique des roches et géologie. Les sciences spatiales et marines ouvrent des fenêtres dans laquelle nos satellites ou nos sous-marins sondent des mondes inconnus.

Quel que soit l'implication sociétale ou fondamentale des recherches, il nous faut combiner des approches variées.

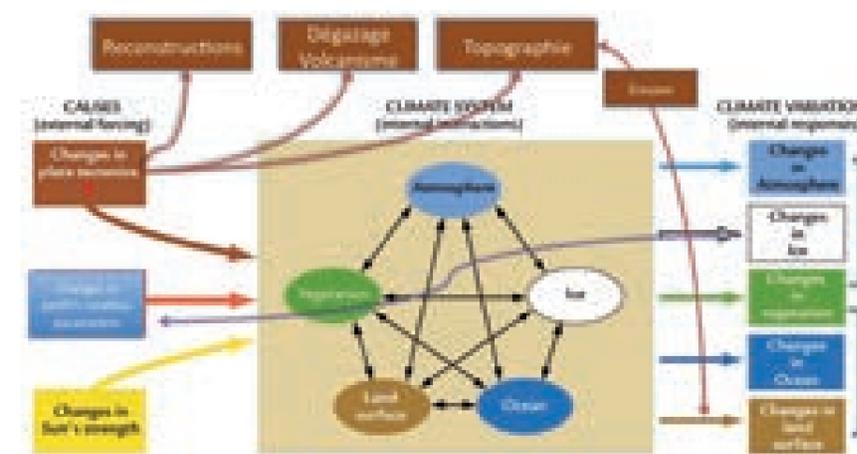
Nos équipes de recherche doivent travailler sur une classe de problèmes donnés, mais multi-approches et éviter l'isolement.

Enfin, ce qui concerne le soutien financier, il est bon de parier sur de nouveaux thèmes ; mais il faut également des programmes très ouverts et en partie fondamentaux et qui ne changent pas tout le temps ni ne suivent la mode. Le manteau, le noyau, la lithosphère, le sort des plaques, les relations terre solide vie climat, sont autant de thèmes à maintenir à l'INSU (ou à passer à l'ANR), car les groupes qui y travaillent constituent un noyau d'excellence international, et il est édifiant de voir l'étendue des résultats nouveaux depuis les propositions de la dernière prospective de Clermont-Ferrand.

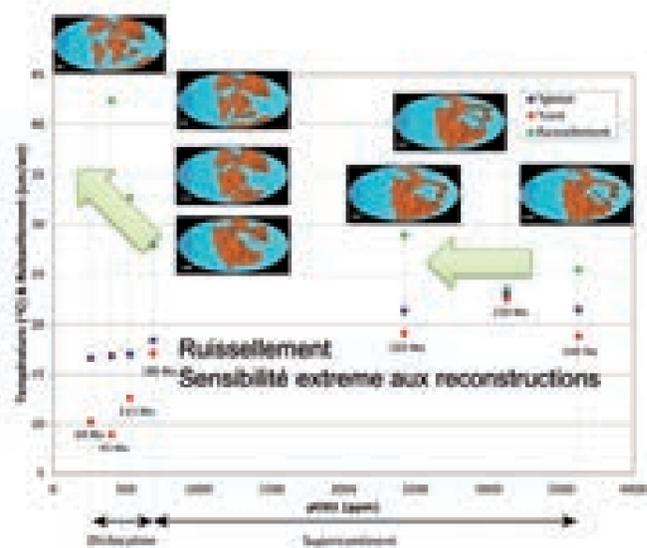
On n'oubliera pas la création de nouveaux programmes transdisciplinaires entre les différents instituts du nouveau CNRS en favorisant les liens entre sciences humaines, biologie et sciences de la Terre et Physique, comme c'était le cas par exemple du programme Eclipse.

Il ne faut également pas oublier que les besoins financiers des mêmes chercheurs sont variés et que l'ANR ne permet pas le dépôt ou financement de petits projets, innovants ou non. En particulier, même si leur recherche a été soutenue par des programmes excessivement coûteux, l'exploitation des données pose quelque fois problème. Pour mener à bien leurs missions, - « Observer, mesurer, comprendre, prévoir » - les chercheurs ont besoin de soutien, humain et financier, pérenne.

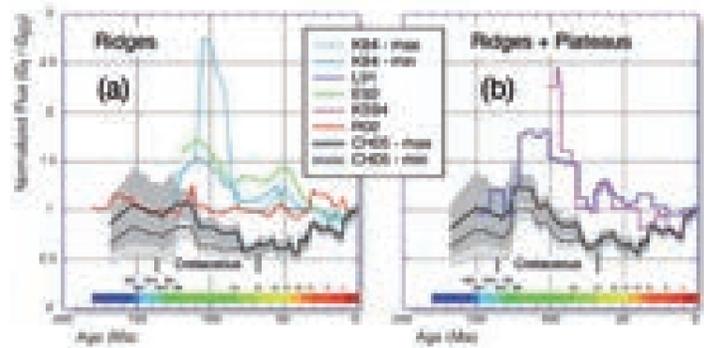
Au cœur des thématiques de l'INSU, et plus particulièrement des sciences de la Terre et des Planètes, le cadre des origines (fonctionnement et évolution d'une planète) et de la survie (ressources, environnement, aléas, risques) sont prégnants. Fort des découvertes des 40 dernières années, le document qui suit tente de faire un premier point sur les défis de demain.



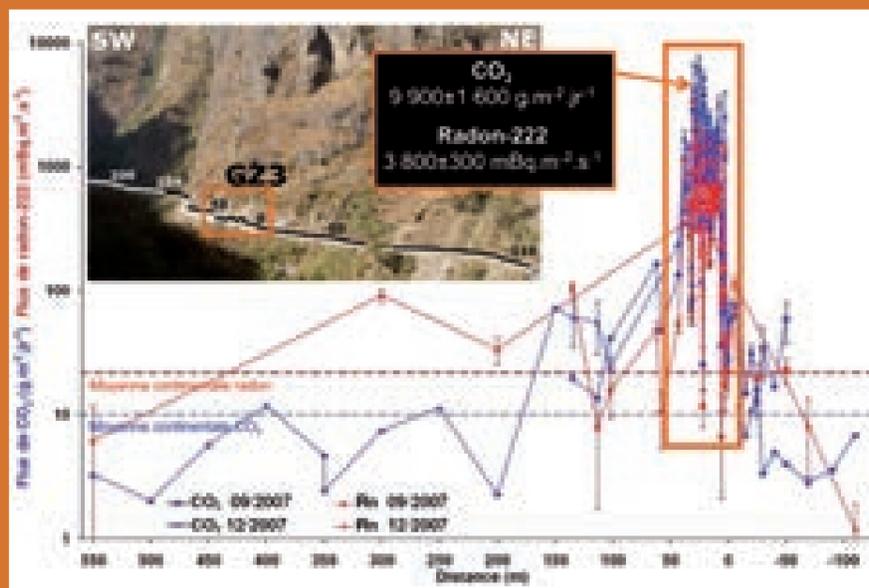
1. Couplage externe-interne (d'après Ruddiman 2002).



2. Importance des reconstructions hyperprécises pour établir des modèles couplés climat/cycles géochimiques, forcés par la reconstruction des plaques. Ici, « Géoclim » (Godderis, 2003).



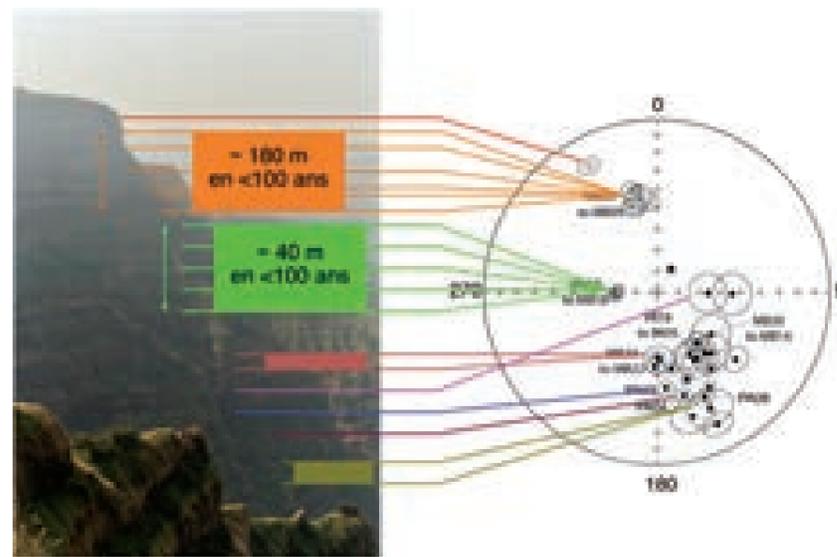
3. Nécessité de réévaluer les flux aux dorsales et arcs volcaniques. (Ici, JP Cogné, E Humler).



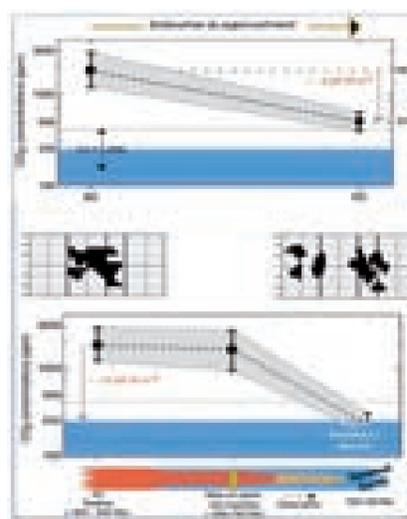
4. Etude des flux de gaz carbonique et de radon au Népal. (Perrier, Giraud 2008).



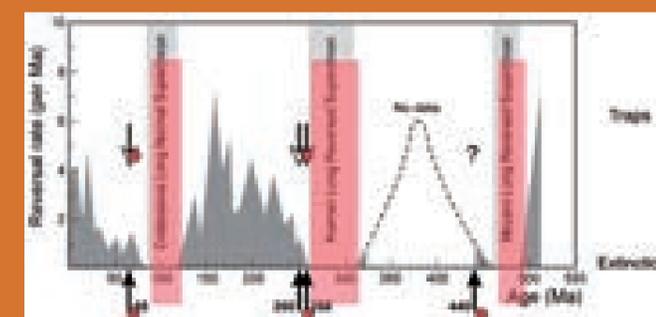
5. Le carbone dans l'exosphère est actuellement traité comme un système fermé faute de connaissance précise des flux de carbone provenant des réservoirs internes (volcanisme, métamorphisme) - (schéma Gaillardet et Galy Science 2008).



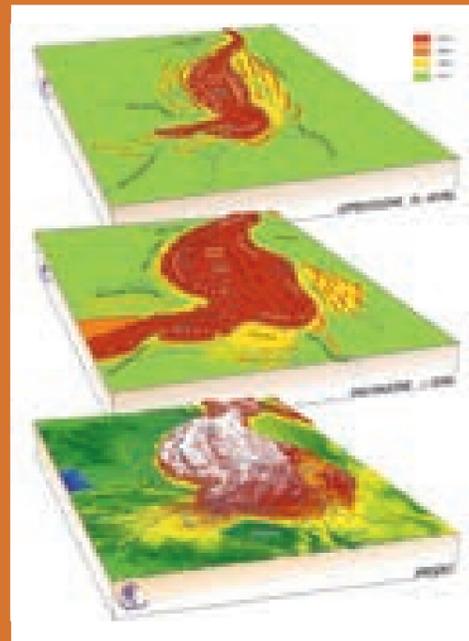
6. Datation des trapps du Grand escarpement près de Mahabaleshwar (Inde). Des volumes importants de magmas (quelques 10⁹ km³) émis en moins de 100 ans. L'impact des éruptions est considérable sur le climat en fonction de l'intensité et de la latitude. (Cheney & Fluteau).



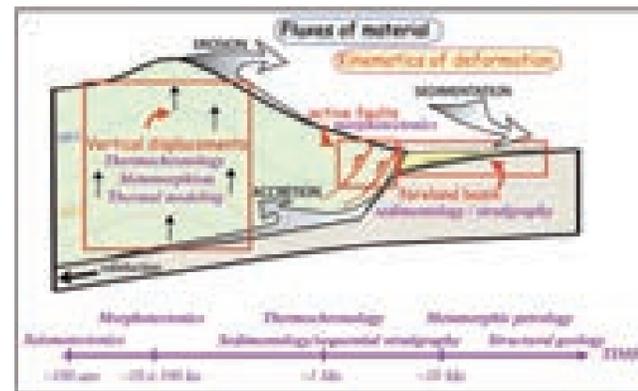
7. La Terre boule de neige. Exemple de forçage tectonique des plaques/climat/biogéochimie. (Godderis et al. 2003, Donnadieu et al. 2004).



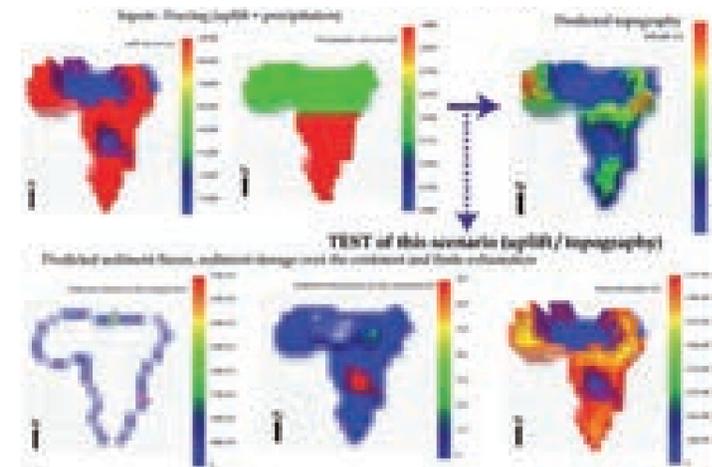
8. Corrélation entre trapps, extinctions de masse et remontée d'un plume de la limite manteau noyau modulant la fréquence des inversions du champ magnétique terrestre. (Courillot et Olson, EPSL 2007).



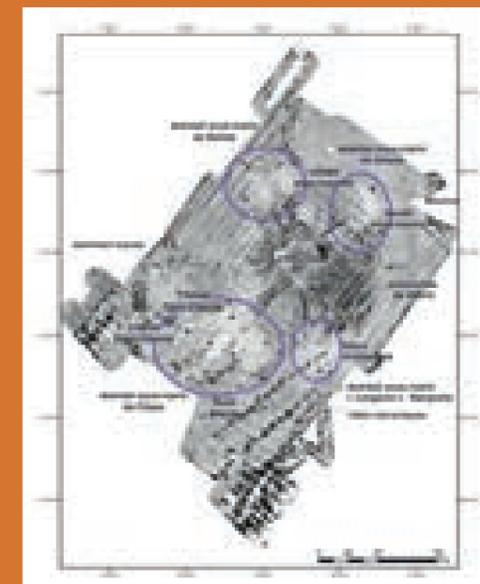
9. Modèle de relief et de croissance du Tibet guidés par la croissance des failles (Liu Jinget al. 2008).



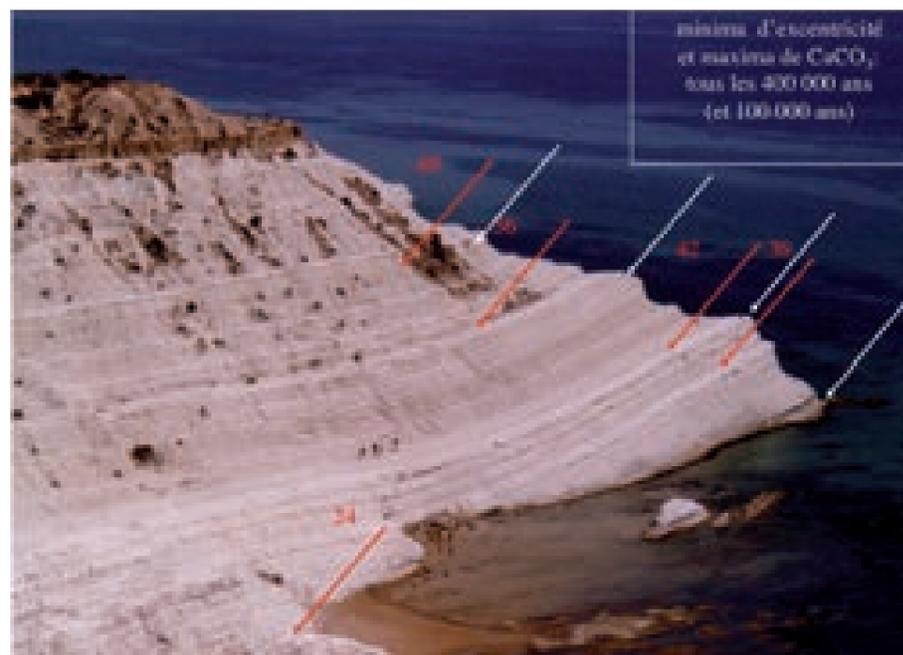
10. Dans les zones de collision, existe une forte interaction entre orogène, climat, érosion et évolution thermomécanique de la croûte (L. Barrier, T. Coudroy, M. Simoes, et al).



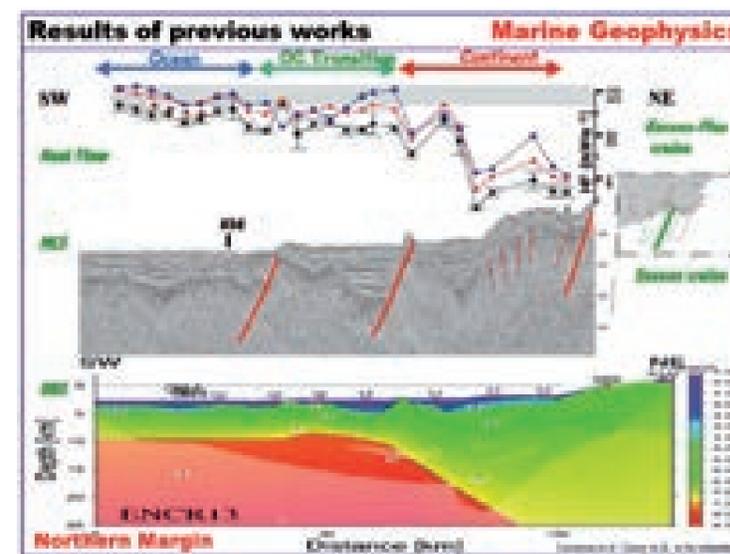
12. Exemple de modélisation érosion transport à l'échelle des temps géologiques. L'exemple de la simulation de la topographie et de la sédimentation en Afrique au cours de l'Albien, 112 - 99 Ma. (J. Braun & M. Simoes).



13. Mise en évidence de grands systèmes turbiditiques produits par l'édifice volcanique de la Réunion, comparables à ceux des marges continentales. La grande extension de ces systèmes sur le fond océanique peut s'expliquer par de très forts taux d'érosion sur l'île et une caractéristique originale de ce volcan : l'absence de flexure de la lithosphère. Ici, réflectivité du fond sous-marin obtenu par sondeur multifaisceaux embarqué sur un navire. (Campagnes en mer FOREVER et ERODER - 2006 IPGP - CNRS - Univ. Réunion - IFREMER).



11. Les cycles d'excentricité astronomiques sont corrélés à la sédimentation des carbonates, ici Punta di Maiata (Sicile).



14. Ressources : ces données montrent une structure thermique très chaude dans la marge profonde de ADEN encore mal comprise dans le contexte des modèles de marge classiques tels qu'utilisés par les pétroliers. (Lucaseau et al.)

Les origines

Bernard Marty, François Robert
Coordinateurs

■ Formation du système solaire et des planètes

Comprendre l'origine du système solaire et des systèmes planétaires en général : voilà quelques uns des grands rêves de l'humanité. D'une part, les avancées des techniques d'analyse isotopiques, électroniques, spectroscopiques des échantillons permettent désormais de lire directement le livre des origines et d'établir sa chronologie (formation des premiers solides, accréation et différenciation des premiers planétésimaux, assemblage des planètes telluriques). D'autre part les observations astronomiques visant à caractériser les petits corps les plus primitifs (comètes, astéroïdes carbonés) et les réservoirs les plus lointains (ceinture de Kuiper, nuage de Oort) fournissent de plus en plus de contraintes pour les modèles d'évolution physique et dynamique des objets du système solaire. La constante progression de la puissance de calcul des ordinateurs et des techniques de simulation permet désormais d'élaborer des modèles sophistiqués et réalistes des collisions dans notre système planétaire, dont les résultats peuvent être comparés directement aux contraintes observationnelles (tant astronomiques que cosmochimiques).

Le contexte astrophysique de la formation du système solaire est depuis quelques années bien alimenté par les observations des disques circumstellaires des étoiles en formation. Le disque de gaz et de poussière a pu être visualisé, ainsi que les jets bipolaires. Les données spectroscopiques sont de plus en plus précises sur la matière circumstellaire (gaz et phases solides). Les observations des astrophysiciens aiguillonnent régulièrement la communauté des sciences de la Terre, en particulier pour comprendre la transition entre la matière précurseur interstellaire et son évolution minéralogique et chimique dans le disque protoplanétaire. L'identification des différentes étapes de l'évolution minéralogique de celui-ci représente une des clés de la compréhension de la formation de notre système solaire.

Dans ce contexte, l'étude des météorites primitives, les micrométéorites ou des poussières cométaires et leur confrontation avec les observations des astrophysiciens représentent un enjeu majeur.

L'établissement d'une échelle chronologique de la formation du système solaire repose en grande partie sur l'interprétation des chronomètres radioactifs à courte période. Deux modèles s'affrontent. Selon le premier, les éléments radioactifs ont été injectés dans la nébuleuse proto-solaire par l'explosion de supernovae ou les vents stellaires des étoiles AGB (Asymptotic Giant Branch). Ce modèle implique une distribution initiale uniforme des éléments radioactifs dans le disque, condition indispensable pour l'établissement d'une chronologie. Le modèle antagoniste propose que les éléments radioactifs ont été produits par irradiation à proximité du Soleil jeune et en conséquence, n'ont pas été distribués de façon homogène dans la nébuleuse. La communauté française joue un rôle très actif dans la mise en évidence d'éléments radioactifs à très courte période dans la nébuleuse primitive (^{10}Be et ^7Be) dont l'existence corrobore le modèle d'irradiation, et dans le développement des modèles eux-mêmes. Cependant, la présence dans le système solaire primitif du ^{60}Fe qui ne peut être formé par irradiation appuie le modèle de la supernova.

Faire la part entre ces deux modes de production de ces éléments radioactifs dans le système solaire primitif est un enjeu considérable et, dans les cinq prochaines années, la communauté française doit impérativement consolider ses thèses, et affiner ses méthodes d'investigation afin de décrypter d'autres informations.

• Physico-chimie du gaz et des solides

Les premières étapes de la formation du système solaire, avant l'accréation des gros objets comme les planètes et les astéroïdes, sont probablement enregistrées dans la composition chimique, minéralogique et isotopique des chondres, des inclusions réfractaires et de la matrice fine des météorites les plus primitives. L'objectif des études est donc de comprendre le devenir de la matière condensée d'origine interstellaire, incorporée dans le disque protosolaire, le mode de formation des premiers minéraux, leurs interactions avec le gaz nébulaire et les mécanismes des premiers accolements de matériaux solides qui conduiront ensuite à l'accréation des objets plus massifs. La démarche analytique est souvent couplée à des expériences en laboratoire qui ont permis des avancées importantes ces dernières années.

Les assemblages minéralogiques étudiés sont de plus en plus souvent de taille micrométrique, voir même nano-structurés. Cette échelle est intéressante.

Elle met en jeu une physico-chimie qui n'est pas bien comprise et représente un enjeu scientifique important en science des matériaux car, à l'échelle nanométrique, les propriétés intrinsèques du matériau sont méconnaissables.

La distribution des isotopes stables des éléments légers (e.g. H, C, N, O) et la mesure des « anomalies » isotopiques (variations indépendantes de la masse ; Os, O, Cu, Zn, Fe, ...). dans les météorites est une thématique dans laquelle la communauté française s'illustre régulièrement. L'origine des atmosphères planétaires repose en grande partie sur les données des éléments légers. Quant aux anomalies (mélange incomplet dans le disque d'accréation des matériaux précurseurs ou réactions chimiques), elles posent un problème totalement ouvert ; ces anomalies recèlent vraisemblablement des données insoupçonnées sur l'environnement physico-chimique où se sont condensés les premiers solides du système solaire. C'est un domaine où tout reste à faire, où la communauté géochimique française a déjà réalisé des avancées importantes et qui doit naturellement bénéficier d'un soutien sur le long terme.

L'effort particulier développé depuis quelques années pour étudier et quantifier la nanostructure des phases carbonées (matière organique, nano-diamants, graphites...) a révélé le potentiel exceptionnellement prometteur du couplage entre microspectrométrie Raman et microscopie électronique par transmission à haute résolution. Il faut consolider cette avancée technologique.

La longue expérience des laboratoires français dans la micro-analyse des micrométéorites les place en première ligne pour identifier - dans les collectes de micro météorites et de poussières interplanétaires - les échantillons cométaires. Ces échantillons seront une fenêtre sur la composition chimique du système solaire lointain. Leur étude demeure complémentaire de celle des échantillons collectés par la sonde Stardust dans le coma de la comète Wild 2 et dans l'analyse desquels la communauté française joue un grand rôle.

Plusieurs expériences visent à reproduire en laboratoire les conditions de la nébuleuse lors de la formation des premiers solides. Ces expériences très originales au niveau international

touchent à l'origine des silicates cristallins, à leur amorphisation sous irradiation, à l'évolution de la matière organique, au piégeage des gaz rares par la matière organique, à l'origine du fractionnement isotopique non dépendant de la masse.

La composition isotopique du soleil est la pierre angulaire de l'interprétation des variations isotopiques dans la matière extra-terrestre. En effet, elle représente la composition de la fraction gazeuse du disque circum-solaire. Déterminer cette composition via l'analyse soit des minéraux des météorites, soit du sol lunaire, soit du vent solaire collecté par la mission spatiale Genesis, a été une thématique où plusieurs laboratoires français ont réalisé des « premières » notamment pour les compositions du lithium, du carbone, de l'azote et de l'oxygène.

• Les clés de voûtes : les radiochronologies et les structures internes des planètes

Une des avancées majeures en planétologie est l'établissement d'une chronologie fine de la formation et de l'évolution précoce du système solaire. Cette chronologie concerne à la fois les échelles de temps de formation des premiers solides (chondres et inclusions réfractaires), l'évolution des premiers planétésimaux (hydrothermalisme, métamorphisme) mais également l'accréation des planètes telluriques. Cette dernière est enfin quantifiée par la détermination de la structure interne des planètes, qui caractérise, par les tailles des noyaux, épaisseur de la croûte et structure du manteau, la vigueur de l'accréation et la vigueur de la différenciation.

La communauté française a fortement participé au développement de ces deux axes. L'établissement de la chronologie s'est faite par le développement de modèles et de mesures expérimentales. Par exemples les mesures de l'abondance du ^{10}Be , de ^{26}Al et du ^{60}Fe dans une diversité d'objets primitifs ont permis de préciser la chronologie de la formation des premiers solides. Le développement des chronomètres ^{53}Mn et ^{182}Hf a établi les échelles de temps de différenciation planétaire. Le chronomètre Pb-Pb a permis de dater la formation du système solaire. Il est remarquable que la communauté française soit impliquée dans la découverte et l'exploitation de la plupart des chronomètres majeurs en cosmochimie (^{10}Be , ^{53}Mn , Pb-Pb). La chronologie du système solaire a fait l'objet d'un colloque international à elle seule (Hawaii 2007) où la communauté était fortement représentée. Il ne fait pas de doute que dans les années à venir, cette activité va s'enrichir et se développer au niveau international.

■ Terre Primitive

Décrire l'évolution de la Terre au cours de son premier milliard d'années d'existence, reconstituer, sur des bases observationnelles, l'hydrosphère et l'atmosphère Archéenne étaient des exercices inenvisageables il y a vingt ans.

Grâce au développement de techniques expérimentales et analytiques de pointe, la communauté française a franchi de nombreuses avancées. **Il est indispensable de soutenir cette recherche en Terra Incognita.** Il n'en faut pas moins comprendre la dynamique interne de notre planète en fournissant un cadre complet et cohérent pour ses différentes manifestations. **Les couplages importants entre les différentes enveloppes (ionosphère, atmosphère, océan, croûte, manteau, noyau) imposent toujours une approche globale.** Il faudra élargir aux planètes telluriques les progrès réalisés pour la Terre et, réciproquement, on veillera à intégrer à la modélisation de la Terre les contraintes qu'apporte l'étude des planètes et de leur origine. Enfin, il faut connaître et comprendre l'évolution de la planète, pas seulement l'Hadéen et les grands événements de l'Archéen, mais également son évolution jusqu'à nous. Ceci nécessite un gros effort sur les données qui pour le moment sont très inégales (en qualité et en quantité). Les modèles ont bien entendu besoin de données fiables.

• Evolution précoce : des « planétésimaux » à la Terre primitive

Les planétoïdes du système solaire ancien représentent probablement les précurseurs des planètes actuelles. La plupart de ces premiers objets ont disparu lors de collisions, mais leurs reliques ont été identifiées dans des météorites, donnant accès à l'investigation des « planètes oubliées ». Plusieurs classes de météorites sont les témoins de leur évolution géochimiques et minéralogiques. L'altération hydrothermale, le métamorphisme, la fusion partielle et la cristallisation fractionnée, la formation de réservoirs métalliques au sein de planétoïdes différenciés, sont des « classiques » de la Cosmochimie. L'expertise de la communauté en ces domaines est historique. Elle est toujours porteuse d'informations nouvelles pour comprendre la première centaine de millions d'années de vie de la Terre.

A une échelle encore plus grande, les météorites martiennes (SNC) nous renseignent sur l'évolution magmatique apparemment très complexe, d'une planète plus petite que la Terre. Ces SNC continueront de jouer un grand rôle dans

la définition des missions géochimiques martiennes. La communauté française, stimulée par le programme défunt « Premier », a développé une expertise unique de manipulation et caractérisation de nombreuses nouvelles SNC : développant un savoir faire prometteur pour le retour d'échantillon martien du futur.

Tout pose problème quand il s'agit de décrire l'évolution de la Terre au cours de la première centaine de millions d'années de son existence. La formation d'un océan magmatique, la différenciation du manteau, la formation du noyau, l'apparition de la croûte océanique et des premières croûtes continentales... autant de mécanismes où les conditions initiales semblent avoir jouées un rôle central. Quelles sont les contributions relatives de ces conditions sur la structure actuelle de la Terre profonde : sa taille qui dicte sa gravité, sa teneur en radio-isotopes disparus qui dictent le gradient de température et la convection durant les premières centaines de millions d'années, sa composition chimique qui dicte la taille de son noyau et donc l'évolution de son champ magnétique ? Toutes ces questions sont au cœur des thématiques « Terre Primitive » et « Terre Interne » au chapitre suivant.

Il existe plusieurs façons d'aborder ces questions :

- Par l'analyse pétrologique, minéralogique et géochimique des roches sédimentaires et cristallines les plus vieilles et les mieux conservées sur la Terre, au-delà de 3 milliards d'années et ce à toutes les échelles spatiales pour s'affranchir de leur hétérogénéité. Par exemple, un grand débat international s'est ouvert sur l'origine et la nature de la première croûte et les laboratoires français y ont apporté des contributions décisives via les mesures hyper-précises des systèmes isotopiques du Hf et du Nd.
- Par les modèles théoriques qui décrivent la convection mantellique, les processus d'évacuation de la chaleur interne, l'épaisseur de l'océan magmatique, l'évolution du degré d'oxydation du manteau au cours des âges géologiques, la composition chondritique de la Terre à une échelle globale, le calendrier de la mise en place des grandes structures du manteau, le bombardement extraterrestre.
- Par des expériences de laboratoire qui reconstituent des conditions de haute pression et de haute température pour étudier les changements de phase en profondeur, les solubilités des éléments volatils enfouis dans le manteau via la tectonique des plaques, la réduction des silicates à l'origine de l'extraction du métal constituant aujourd'hui le noyau.

• Hydrosphère et atmosphère archéennes et hadéennes.

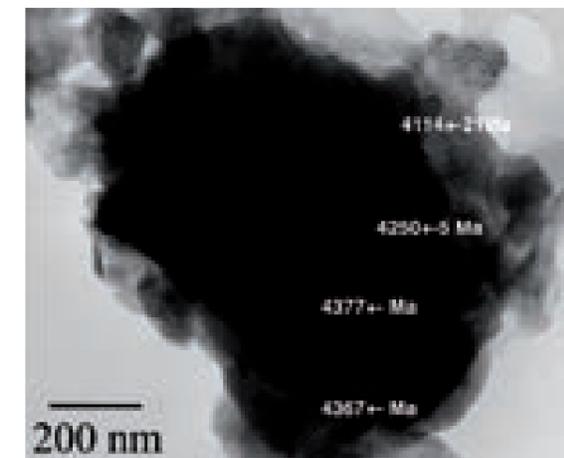
Se représenter la surface de la Terre durant le premier milliard d'années de son existence est un exercice très difficile car il faut accepter de traiter d'une planète aujourd'hui disparue du système solaire, dont l'environnement de surface n'avait rien de commun avec les milieux géologiques habituels. Les modèles de l'atmosphère qui s'appuient sur quelques rares données planétologiques conduisent tous à des températures, des compositions chimiques, des degrés d'ionisation et d'oxydo-réduction, des pressions au sol, sans aucune commune mesure avec l'atmosphère de ces 500 derniers millions d'années, même au regard des crises géologiques les plus graves. Il en va de même avec les océans, leurs températures, leurs paramètres physico-chimiques à l'origine des sédiments, leurs marées, leurs évolutions chimiques

via l'érosion des terres émergées. C'est dans ce milieu de l'extrême que l'on doit rechercher la source moléculaire de la Vie. C'est cet environnement qu'il nous faudrait reconstituer. Tâche d'autant plus difficile qu'il a évolué de façon irréversible en grande partie sous l'influence de la Vie.

La communauté française s'est résolument investie dans une véritable « nano paléontologie du Précambrien » à travers des études de minéralogie-pétrographie des plus vieux sédiments de la Terre, de leur contenu organique, des traces chimiques de vie fossile qu'ils contiennent, de leurs inclusions fluides. Cette thématique représente la part du risque de la géochimie internationale et plusieurs équipes françaises ont fait la preuve qu'elles y avaient toute leur place, notamment grâce à la réalisation de forages dans des cibles bien choisies de formations sédimentaires archéennes.



1. Premières carottes de forages extraites du site de Tumbiana (2,7 milliards d'années) au cours du projet de forage « Pilbara Drilling Project », craton (croûte continentale primitive) des Pilbara, Australie occidentale. L'analyse de ces roches a révélé la médiation microbienne dans la formation des stromatolites anciens, CNRS Photothèque / PHILIPPOT Pascal, IPGP/CNRS-INSU, Paris Diderot.

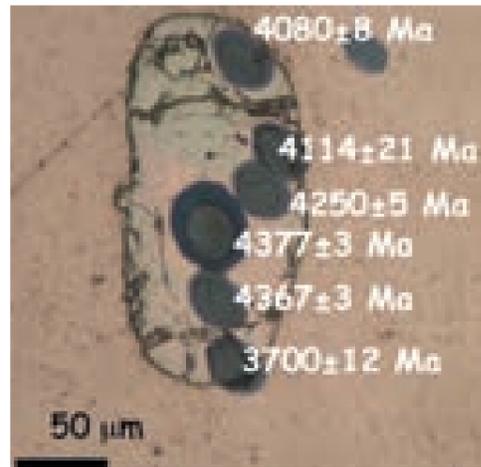


2. Datation de nanocarbonates biogéniques (Ma= Millions d'années), IPGP/CNRS-INSU, Paris Diderot.

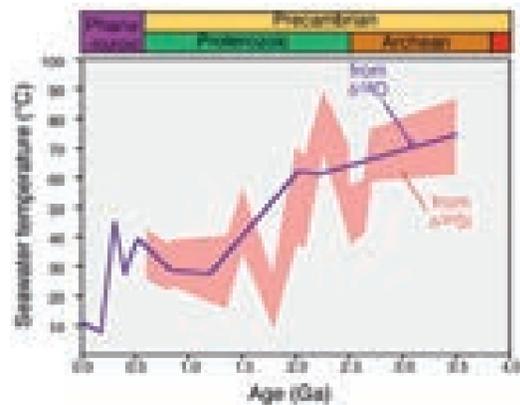


3. Stromatolites vus à l'affleurement de la formation de Tumbiana (2,7 milliards d'années), craton (croûte continentale primitive) des Pilbara, Australie occidentale. Ces stromatolites ont préservé des globules organiques présentant des morphologies de microfossiles associés à des nanocristaux d'aragonite. Ils sont interprétés comme des fossiles de cellules ayant participé à l'accrétion des stromatolites, CNRS Photothèque / PHILIPPOT Pascal, IPGP/CNRS-INSU, Paris Diderot.

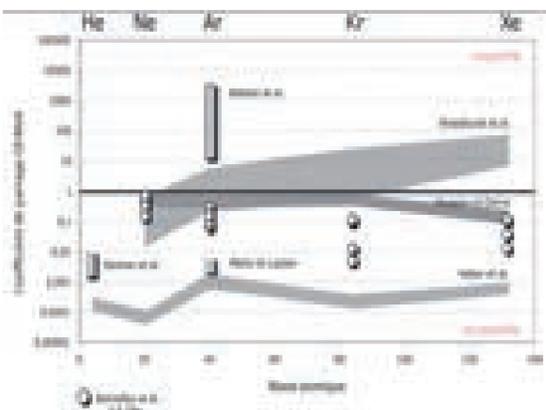
Les origines



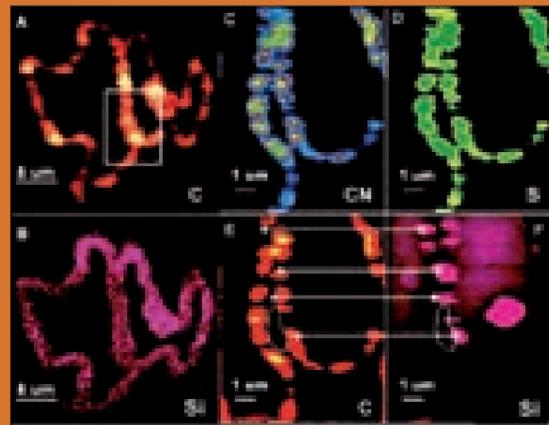
4. Zircons hadéens dans des roches détritiques archéennes, Jack Hills, Australie, dérivées de granites, liquide ayant interagit avec de l'eau à BT. IPGP.



5. Reconstitution de la température des océans précambriens à partir des compositions isotopiques en oxygène et silicium. LMCM/CNRS-INSU, MNHN et CRPG/CNRSINSU Nancy.



6. Fractionnement des gaz rares à haute pression haute température.



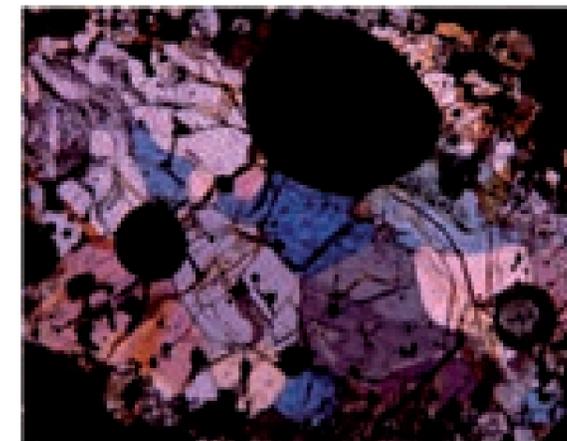
7. La fossilisation de la matière organique a préservé les morphologies cellulaires dans les sédiments siliceux, Précambrien (1900 Ma). LMCM/CNRS-INSU, MNHN.



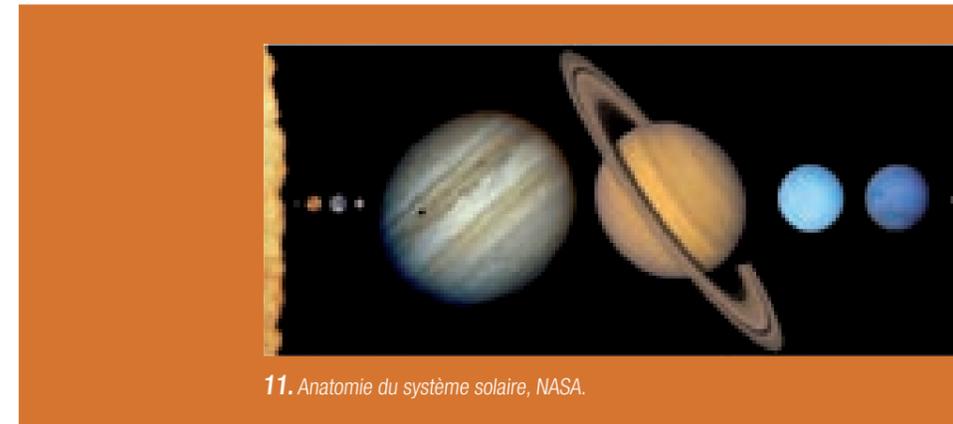
8. La surface lunaire a enregistré le bombardement météoritique tardif qui a dû accompagner l'apparition de la vie, NASA.



9. Expérience de condensation à haute température d'un gaz de composition solaire, CRPG CNRS-INSU Nancy.



10. Les chondres des météorites : premières briques de la matière planétaire ? LMCM/CNRS-INSU, MNHN et CRPG Nancy.



11. Anatomie du système solaire, NASA.



12. La collecte des atomes du « vent » solaire par la mission spatiale Genesis, NASA.



13. La collecte de la poussière émise par la comète Wild 2 à son passage près du soleil par la mission spatiale StarDust, NASA.

Structure et dynamique de la Terre

Henri-Claude Nataf, Laurent Jolivet, Edouard Kaminsky, Anne Davaille,
Coordinateurs

Le principal enjeu concernant la dynamique interne de la Planète consiste à fournir un cadre complet et cohérent pour ses différentes manifestations, à l'instar de ce qui s'est passé avec l'avènement de la tectonique des plaques dans les années 60. Les couplages importants entre les différentes enveloppes (ionosphère, atmosphère, océan, croûte, manteau, noyau) imposent toujours une approche globale, même si chaque système a ses caractéristiques propres. La nouvelle piste qui se dessine consiste à incorporer résolument dans la description de la dynamique actuelle les conséquences de l'évolution des différentes enveloppes au cours des temps géologiques. À titre d'exemple, il faudra étudier les conséquences de la présence éventuelle d'un océan magmatique primordial que semblent indiquer les analyses géochimiques.

L'arrivée de nouvelles techniques performantes telles que l'imagerie sismique à partir du bruit, ou les micro- et nano-cartographies chimiques, ouvrent de nouvelles perspectives. Elles seront indispensables pour répondre aux grands enjeux. On veillera à élargir aux planètes telluriques les progrès réalisés pour la Terre et, réciproquement, on veillera à intégrer à la modélisation de la Terre les contraintes qu'apporte l'étude des planètes et de leur origine. Même si une approche globale est nécessaire, il est plus simple de détailler les enjeux de chacun des grands systèmes qui constituent l'intérieur de la Terre, en mettant en exergue les couplages qui les relient.

■ Dynamique de la lithosphère et de la croûte

La conjonction de nouvelles idées sur la déstabilisation de la base de la lithosphère continentale, sur son régime thermique et sur sa rhéologie, et de nouvelles mesures du champ de gravité (GOCE), mais également de positionnement par GPS en réseau dense, d'anisotropie sismique et de tomographie haute résolution, ouvrent de nouvelles voies. La lithosphère continentale apparaît comme un acteur particulier de la dynamique terrestre qui d'une part influence le régime convectif, et d'autre part enregistre ses évolutions au cours des temps géologiques (via le flux de chaleur et sa structure géologique). L'intégration des idées concernant des processus physiques originaux, et des mesures, passe par le développement d'outils numériques plus performants, qui puissent se coupler à des modèles de dynamique du manteau dont le fonctionnement complexe et multi-échelles sera utilement déchiffré par des expériences analogiques.

Une préoccupation centrale est de comprendre et modéliser la mécanique de la lithosphère. Le futur est clairement dans l'intégration de données multiples, dans l'interprétation structurale et dynamique (observations géologiques,

géochimiques, modélisation de la rhéologie, images tomographiques, images satellitaires, électriques etc...). Il faut continuer à développer notre compréhension des déformations transitoires (géodésie, interférométrie, modélisation), de la caractérisation du cycle sismique et de l'enchaînement de plusieurs cycles ou séquences de séismes, de la mécanique de la rupture et du fonctionnement des failles à différentes échelles de temps et d'espace. (Voir chapitre Risque Sismique et Failles).

Suivant le degré de couplage entre les différents niveaux de la lithosphère, et donc suivant le contexte géodynamique, la tectonique de surface (croûte, bassins) est plus ou moins conditionnée par la dynamique mantellique (par exemple le comportement des plaques plongeantes (slabs), ou l'action des points chauds). La tomographie sismique indique que les plaques plongeantes subissent un pliage important lors de leur descente dans le manteau que les modèles de lithosphère devront expliquer afin d'en tirer les conséquences pour la dynamique globale. Au contraire, la convection en profondeur sera forcée par la géométrie des plaques plongeantes. Il faut donc combiner la description des mouvements des plaques dans le temps, en tant que phases solides et de surface de la convection, et coupler ces modèles à des modèles convectifs du manteau.

La formation des chaînes de montagnes ou des bassins arrière-arc au-dessus des zones de subduction, continentales ou océaniques est bien loin d'être comprise. Les liens entre les mécanismes de déformation et les processus de surface (érosion, évolution des reliefs, sédimentation) devront également être étudiés plus avant et modélisés (chapitre couplage interne-externe).

Parmi les questions importantes, on notera en particulier :

- Comment l'eau et les fluides en général influent-ils sur la rhéologie et la géodynamique? (eau et rhéologie, eau et réactions métamorphiques dans la croûte et dans le manteau, eau et magmatisme, bilan de l'eau, eau et érosion, fluides et failles sismiques jusqu'au manteau profond, fluides et gîtes métallifères.
- Le développement de la modélisation numérique en géodynamique permet aujourd'hui de prendre en compte les changements de phase et leurs conséquences en termes de changement de densité et de paramètres rhéologiques. Les premières tentatives sont très encourageantes. Il faut donc à la fois développer les approches qui permettent de coupler les codes thermo-mécaniques et les codes thermodynamiques, et conduire des approches expérimentales sur la rhéologie des roches.
- Structure de la lithosphère : Il est nécessaire de rediscuter le lancement de campagnes de géophysique profonde en France et en Europe et, de manière générale, de favoriser les études conduites sur le territoire national ou européen dès lors qu'elles sont novatrices. Ceci est d'autant plus nécessaire si l'on compare la qualité des données acquises récemment dans les autres pays européens, et en particulier l'Espagne, le Portugal, l'Allemagne ou la République Tchèque aux données disponibles en France aujourd'hui. Par ailleurs le forage est un outil indispensable pour caler les images géophysiques. Qu'il s'agisse de forages off-shore (IODP) ou on-shore (ICDP) la communauté française doit être largement impliquée dans la définition des sites de forages et leur mise en œuvre.

Ces avancées devraient également éclairer les questions toujours en suspens de la collision continentale, où le couplage avec la dynamique crustale et l'érosion doit être opéré.

■ Géosciences marines

Benoît Ildefonse, Frédérique Eynaud
Coordinateurs

L'océan couvre les deux tiers de la Planète, et des questions fondamentales des sciences de la Terre ne peuvent évidemment

être abordées sans données marines. Cependant les grandes questions abordées en géosciences marines sont pour la plupart partagées avec la communauté des sciences de la Terre en général, et nécessitent la mise en œuvre d'approches commune. Plus que les questions scientifiques, ce sont donc les contraintes techniques et instrumentales, et les méthodes de travail qui en découlent, qui identifient la discipline et justifient un paragraphe spécifique dans ce chapitre.

Un enjeu important concerne la dynamique des processus aux frontières de plaques (dorsales, failles sous-marines, subduction), et ce qu'elle révèle des modes d'interaction entre le manteau convectif et la lithosphère. On retiendra :

- Les modes d'accrétion crustale aux dorsales océaniques ;
- Les interactions entre dorsales et points chauds ;
- L'évolution thermique de la lithosphère lors du rifting et la dynamique des marges passives ;
- La dynamique des marges actives, avec notamment les interactions entre lithosphère plongeante et manteau, la genèse du volcanisme d'arc (aléa volcanique), la transition sismique/asismique, les mécanismes de la sismogenèse et de la genèse des tsunamis.

Les frontières de plaques sont aussi le siège de nombreux échanges tant au niveau des dorsales (hydrothermalismes de températures variées) qu'au niveau des marges, notamment actives (e.g., rôle des fluides dans le comportement sismogénique des zones de subduction), les interactions entre l'océan et les roches de la lithosphère sont nombreuses. Ces zones d'échange sont par ailleurs des lieux d'interaction privilégiés avec la biosphère. Les objectifs majeurs dans ce domaine comprennent notamment :

- La quantification des flux passant par les **systèmes hydrothermaux marins** , et le(s) moteur(s) de ces derniers (magmatisme ou serpentinitisation) ;
- La compréhension des **processus de circulations de fluides à très haute température** , et les relations entre hydrothermalisme et magmatisme ;
- La **production d'hydrogène et de méthane** liée à l'hydrothermalisme dans les péridotites mantelliques, et les réactions de carbonatation associées (stockage du CO₂) ;
- La **production de molécules prébiotiques** dans les mêmes sites et leur rôle potentiel dans la genèse de la vie sur Terre ;

- La **genèse des amas sulfurés actifs et fossiles**, à étudier d'un point de vue fondamental en amont de la prospection minière ;
- Les **interactions entre tectonique et flux de fluides**, notamment l'évolution des propriétés physiques des roches et de la composition des fluides au cours du cycle sismique.

• Moyens : les observatoires fond de mer et une politique concertée à long terme

Accéder à la dynamique des processus d'interactions entre manteau convectif, lithosphère, hydrosphère et biosphère, et étudier ces interactions implique notamment de recourir à des observations de longue durée ou récurrentes (observatoires fond de mer), adaptées aux échelles spatiales et aux constantes de temps des processus observés : depuis l'échelle des observations *in situ* à l'échelle plurikilométrique, de quelques heures à plusieurs décennies, selon les phénomènes, et dans les trois dimensions (forages/carottages, instrumentation de puits ou méthodes géophysiques). Cette approche nécessite donc des moyens logistiques importants pour l'installation des capteurs, la conduite des observations, le fonctionnement et la maintenance des observatoires ainsi que des développements technologiques pour les mettre en œuvre. La France est bien placée au niveau européen pour relever ce défi grâce, d'une part, aux moyens navals nationaux et, d'autre part, aux développements technologiques et instrumentaux de l'Ifremer, de l'IPEV, du CNRS-INSU et de quelques unités de recherche.

Les campagnes à la mer constituent la seule approche possible pour aborder l'ensemble des questions scientifiques évoquées ci-dessus. Pour que la communauté académique puisse poursuivre les efforts déjà entrepris et mener à bien des projets ambitieux en domaine hauturier par l'observation à long terme, il est essentiel d'avoir une vision politique et une garantie de moyens à aussi long terme sur :

- Un accès récurrent aux moyens navals hauturiers, qui implique la pérennité de ces moyens et de leur budget de fonctionnement (temps bateau) ;
- Un soutien pluriannuel pour les développements instrumentaux (fonctionnement et équipement).

Au cas où ces conditions ne seraient pas remplies, il serait parfaitement vain de se lancer dans cette aventure scientifique et technologique. **Ces conditions, notamment la première, ne sont actuellement plus remplies.** Actuellement, le découplage ANR/Flotte/Géosciences, le manque de disponibilité

des bateaux et les changements de programmations, rendent la planification à moyen terme (2-3 ans), nécessaire à ces projets, irréalisable. Il n'y a pas non plus de mécanisme de coopération permettant d'assurer la réalisation de campagnes à la mer planifiées, en cas d'indisponibilité de bateaux.

A long terme il faut améliorer le dialogue entre les différents partenaires (Ministère, CNRS, Ifremer, IPEV, ANR, autres) afin de mettre en place des projets avec les moyens nécessaires pour leur réalisation. Une mutualisation des moyens à la mer au niveau européen serait souhaitable, pour apporter la flexibilité nécessaire à une utilisation optimisée de la flotte pour la réalisation des différents projets, qu'ils s'appuient sur une ou plusieurs campagnes.

Les autres conditions du succès scientifique sont naturellement :

- L'assurance du maintien des moyens d'observation (e.g. Nautilie, ROV, AUV, parc OBS, hydrophones, magnétotellurique, ...) et d'échantillonnage (e.g., carottiers géant et grand diamètre) existants, leur développement et leur extension (sismiques 3D et très haute résolution, gravimétrie et géodésie fond de mer, capteurs T et P, caméras, capteurs chimiques, prélèvement de fluides, instrumentation en puits de forage, ...)
- Le maintien, en complément de l'observation long terme aux dorsales, de l'étude géophysique de la lithosphère océanique hors axe, permettant d'appréhender les processus sur une échelle de temps plus longue (\geq plusieurs millions d'années) ;
- Le lien avec les études à terre des mêmes objets (e.g., marges passives) ou des objets complémentaires (e.g., ophiolites et dorsales) ;
- L'accès à des moyens internationaux (e.g., IODP via ECORD) ;
- La mise en place de réseaux permanents de transpondeurs pour la navigation sur les sites d'études (séries temporelles, observatoires fond de mer, ...)
- Le financement d'instrumentations dédiées aux observations à long terme. Ceci est nécessaire afin d'éviter le blocage des instruments pour le reste de la communauté et de permettre les tâches d'observations indépendantes de ces projets.
- Le recrutement, dans le cadre des observatoires fond de mer, de personnel dédié à moyen terme au traitement et à l'archivage des données, aux interventions techniques à la mer ;
- Un minimum de financement des projets immédiatement consécutifs aux campagnes en mer, permettant d'exploiter ces dernières à court terme et de préparer des projets (e.g., ANR) plus ambitieux.

• Chantiers

Plusieurs laboratoires français participent à des initiatives européennes ou internationales de mise en place d'observatoires sous-marins (chantiers MoMAR, Ligure, Cadix ...), composantes du réseau européen ESONET, dont l'ambition, outre des objectifs de recherche fondamentale, est d'être une des contributions européennes au réseau Global Ocean Observing System (GOOS). Tant du point de vue technologique que de celui de l'étude des ressources (e.g. biomasse profonde), cet axe de recherche est susceptible de resserrer les liens entre recherche fondamentale et finalisée.

Pour ce qui est des marges actives et de leur comportement sismogénique et tsunamigénique, les équipes françaises sont notamment très présentes sur le chantier NanTroSEIZE (Nankai Trough Seismogenic Zone Experiment), s'articulant notamment autour du projet IODP démarré en septembre 2007.

La mer de Marmara, Sumatra, Taiwan, sont d'autres exemples de chantiers actifs et en devenir.

La zone de subduction des Petites Antilles, en territoire national, mérite également que soit poursuivis et développés les efforts consentis depuis quelques années.

Le chantier du golfe d'Aden est une cible privilégiée des équipes françaises pour l'étude du rifting et des marges passives. L'intégration des données en mer et à terre y est exemplaire.

Les aspects paléo-environnementaux et leurs chantiers associés ont également fait l'objet d'une prospective commune en géosciences marines, et sont décrits dans le chapitre Paléo-environnements.

■ Dynamique du manteau

La modélisation analogique de la convection thermique de deux couches chimiquement différentes a renouvelé notre vision de la convection mantellique. Il faut continuer à tirer les enseignements de cette vision. Trois voies se dégagent :

- Relier cette stratification à l'évolution du manteau à partir d'un océan magmatique primordial ;
- Ré-évaluer la structure et dynamique des points chauds, véritables « fenêtres » sur le manteau profond ;
- Comprendre dans le détail les processus de mélange.

Le couplage, nécessaire, avec les observations pétrologiques et géochimiques imposera de mieux comprendre les interactions complexes entre roches et magmas. La lecture des ophiolites, les travaux théoriques sur les écoulements biphasés et la fusion

partielle, la micro-cartographie chimique, et l'expérimentation devront être combinées pour décortiquer les mécanismes complexes (y compris hors équilibre et en fonction de la présence d'eau) qui s'y produisent. Ces études devraient apporter un éclairage nouveau sur les couplages responsables de l'apparition des plaques tectoniques évoquées ci-dessus.

Plus en détail, à l'issue du colloque Sedit, en mars 2007 à Lyon, les points suivants au cœur de cette problématique des couplages dans le système convectif terrestre ont été mis en exergue :

- Comprendre la fusion partielle (génération et extraction) et le filtre qu'elle exerce sur toutes les données que nous récupérons (géochimie, sismologie) et sur la dynamique ;
- Comprendre le mélange/brassage dans le manteau pour interpréter la géochimie (qui se sert pour l'instant de modèles basés sur le brassage rapide et efficace de traceurs passifs dans un fluide homogène) : ceci nécessite des études en mécanique des fluides, mais aussi en hautes pressions/hautes températures pour déterminer les coefficients de partage, les diagrammes de phase, etc... ;
- Nécessité de développer de nouveaux outils en géochimie et en hautes pressions (nanosims, fib, ...) qui ouvrent une nouvelle ère pour la pétrologie qui peut maintenant s'intéresser au manteau inférieur (chose impossible il y a quelques années), mais aussi au manteau supérieur (asthénosphère-lithosphère en particulier). Couplée aux avancées du premier point, il va devenir possible de comprendre le message des éléments majeurs, et non plus simplement des traceurs isotopiques ;
- Imager quantitativement la lithosphère, le manteau, le noyau et la graine. Ce qui nécessite le développement de nouvelles techniques en sismologie (ex: tomographie à partir du bruit qui permet d'étudier la croûte en l'absence de séisme, tomographie de l'atténuation sismique, modélisation des amplitudes des ondes, etc...), le développement des réseaux d'observations pérennes (ex: stations fonds de mer, réseaux denses à terre, observations spatiales,) mais aussi des progrès en physique des matériaux (propriétés élastiques, phases). A terme, les données des réseaux sismologiques et celles des missions de l'ESA GOCE et SWARM permettront d'étudier, avec une résolution inégalée, la structure, température et composition de la lithosphère et du manteau terrestre par des inversions multi-paramètres des vitesses et atténuations sismiques, des densités et des conductivités électriques.

- Comprendre la génération de la tectonique des plaques à partir de la convection et de la rhéologie complexe des roches mantelliques. Des progrès sont en cours sur la rhéologie des roches, son lien avec l'anisotropie, et avec la mécanique des fluides complexes. Il reste une jonction à faire avec la tectonique et les données de surface, en améliorant également les reconstructions de tectonique des plaques depuis le Précambrien. Enfin, l'origine même du découpage de la lithosphère en « plaques tectoniques » demeure un enjeu important.
- Il faut connaître et comprendre l'évolution de la planète, pas seulement à l'Hadéen ou à l'Archéen, mais son évolution jusqu'à nous. Ceci nécessite un gros effort sur les données qui pour le moment sont très inégales (en qualité et en quantité). Nos modèles ont besoin de données fiables.

■ Couche D''

Cette couche à la base du manteau mérite une attention particulière. Il s'y produit des phénomènes probablement aussi riches et complexes qu'à la surface de la Terre, la vie en moins... Elle se distingue par de fortes hétérogénéités, des zones fondues, une forte anisotropie, des réactions chimiques intenses, etc. La découverte de la transition de phase post-perovskite modifie l'interprétation des données sismiques et enrichit les modèles dynamiques : il faut continuer à tirer les conséquences de sa présence, et raffiner la cartographie 3D de cette région, ce que permettra la construction d'un modèle 3D de référence de la Terre. Le déploiement des stations sismiques fond de mer fournira une meilleure couverture géographique. Cette zone est enfin à la portée des études expérimentales de haute pression aujourd'hui couplées à des calculs ab-initio performants. Après avoir identifié les nouveaux changements de phases ayant lieu dans cette couche, il faut maintenant déterminer leurs propriétés de transport pour quantifier leur effet sur les courants de convection, et leurs propriétés élastiques pour comprendre leur signature sismique.

Côté noyau, la situation est peut-être aussi complexe, avec des « sédiments » piégés au sommet du noyau, qui pourraient jouer un rôle dans le couplage visco-magnétique entre noyau et manteau, avec des conséquences sur les observables géodésiques (longueur du jour, nutations).

L'un des challenges sera, dans l'esprit du groupe international SEDI, de combiner ces différentes observations pour aboutir à une représentation complète et cohérente de la dynamique de la couche D''.

■ Dynamique du noyau

Le principal enjeu concerne la compréhension de la turbulence très particulière qui régit la géodynamo. Elle contrôle les phénomènes tels que la variation séculaire, les secousses magnétiques et les inversions, mais également le bilan énergétique et l'évolution de la dynamo aux échelles de temps géologiques.

La question de la turbulence est très pluridisciplinaire et devra être abordée avec les spécialistes d'autres domaines (physique, astrophysique, mécanique, etc). Les volets théoriques, numériques et expérimentaux devront être développés.

En ce qui concerne les données, l'observation de plus en plus précise de la rotation de la Terre par exemple, ou celle du champ magnétique terrestre dans les observatoires et depuis l'espace, ont ainsi permis des avancées importantes. On connaît désormais bien mieux le champ magnétique terrestre, et la façon dont ce dernier évolue. Les progrès réalisés en la matière n'intéressent pas seulement la question de la génération du champ magnétique terrestre au sein du noyau terrestre, mais aussi l'ensemble des disciplines concernées par l'exploitation des données magnétiques (études ionosphériques, magnétosphériques, cartographies des anomalies magnétiques, imagerie électromagnétique des couches superficielles de la Terre, etc.). L'observation du champ magnétique terrestre depuis l'espace a notamment permis de confirmer la présence d'une dynamique très riche à l'échelle décennale, qui sera étudiée avec détail par la mission SWARM au début de la prochaine décennie.

Il faudra également améliorer la caractérisation des directions et intensités des champs magnétiques passés (du Précambrien aux périodes historiques) grâce aux données paléo- et archéo-magnétiques.

Les modèles sismologiques indiquent des écarts par rapport à un profil thermodynamique isentropique qui ne sont pas expliqués par les modèles numériques de dynamo. On profitera des progrès réalisés à travers la construction d'un modèle sismologique 3D de référence pour réexaminer cette question. La structure de la graine solide et la réponse du système manteau-noyau-graine aux sollicitations célestes (précession, nutations, etc) apporteront d'autres contraintes à affiner.

La chimie du noyau liquide, notamment le type et l'abondance des éléments légers reste une question ouverte dont la résolution apportera des contraintes sur les modèles de formation et de différenciation de la planète.

On poursuivra la caractérisation des propriétés de l'alliage de fer qui constitue le noyau liquide, grâce aux expérimentations à haute pression et haute température, en particulier par la technique de choc laser, et grâce au développement des méthodes ab initio. L'étude des propriétés anisotropes des phases du fer à haute pression et la modélisation de l'anisotropie dans la graine complètent ce panorama.

■ Observations spatiale de la Terre et des planètes

Philippe Lognonné, Patrick Pinet

Coordinateurs

• Enjeux scientifiques en observation de la Terre

Depuis plus de 20 ans, l'utilisation des techniques spatiales s'est développée en sciences de la Terre et est devenue une des nouvelles dimensions de la recherche et de l'observation des processus géodynamiques et tectoniques de la Terre Interne. Les dix prochaines années seront décisives pour notre communauté, avec toute une série de missions clefs.

Les missions majeures de la communauté en géophysique spatiale seront GOCE (gravimétrie spatiale, lancée en 2009) et SWARM (magnétisme spatial, lancement prévu en 2011). La première mission permet une étude globale, avec une résolution inégalée, de la structure et du comportement de la lithosphère terrestre. La seconde, poursuivra l'observation de la dynamique du noyau (par la mesure de la variation séculaire), l'étude des champs ionosphérique et magnétosphérique et permettra d'achever la caractérisation du champ crustal. SWARM abordera aussi pour la première fois l'étude tridimensionnelle de la conductivité électrique de la lithosphère et du manteau.

L'enjeu majeur pour notre communauté sera l'analyse des données de ces missions qui compléteront dans l'espace les observatoires gravimétriques et magnétiques.

• Enjeux sociétaux en observation de la Terre

L'observation spatiale des volcans va changer d'échelle avec l'apparition de constellations (Pleiades, COSMO-skymed, SARlupe), de même que la géodésie avec le lancement, après les deux satellites tests, de la constellation GALILEO. La constellation IRIDIUM sera également lancée, avec une charge utile d'opportunité qui reste à définir. Dans tous les cas

cependant, les objectifs premiers des programmes ne sont pas scientifiques. Il est capital que la dimension scientifique soit pleinement intégrée et que des centres d'analyses scientifiques (Observatoires spatiaux de la Terre et des planètes) soient prévus (avec les moyens nécessaires, y compris en postes CNAP et ITA). Il est aussi important d'intégrer les partenaires de la Défense et des missions duales, en particulier dans la gestion des risques naturels, avec l'idée que les données classifiées puissent être au moins analysées par du personnel accrédité.

• Enjeux de l'exploration du système solaire, habitabilité des planètes telluriques

Les données acquises par la première sonde européenne martienne, Mars Express, et en particulier celle de l'expérience française OMEGA, ont précisé l'image d'une planète ayant très rapidement perdu son champ magnétique, son atmosphère, son cycle de l'eau. Mars était-elle réellement habitable durant son premier milliard d'années et si tel a été le cas, comment a-t-elle perdu son habitabilité ? Comment la Terre a-t-elle maintenue un environnement habitable pendant près de 4 milliards d'années alors que d'autres planètes n'ont pas pu réaliser cet équilibre au-delà de quelques centaines de millions d'années ? Quel est l'impact de la Lune sur la formation de la Terre, son évolution et son habitabilité ? Ces enjeux scientifiques, sur lesquels notre communauté s'implique de plus en plus (voir par exemple une des monographies de l'ISSI sur le sujet), est central au programme européen d'exploration du système solaire AURORA et au programme d'exploration de la NASA : la France y jouera un rôle clef avec, pour Mars, l'expérience Chemcam/MSL en 2011 et celles d'ExoMars en 2018, et pour la Lune avec la mission SELENE2 vers 2015. En parallèle, plusieurs équipes françaises sont impliquées sur l'analyse des rares données contraignant les structures internes de la Lune, de Mars et des satellites de glace des planètes géantes, avec dans ce dernier cas la perspective de la mission EJSM de l'ESA, vers la fin de la décennie. L'exploration de la structure interne des corps planétaires est un axe de recherche correspondant à l'une des grandes priorités du CNES depuis maintenant près de 15 ans. Il est indispensable que dans ces deux domaines (géochimie/minéralogie et géophysique in situ), la communauté nationale puisse continuer de jouer son rôle pionnier.

Les priorités de la communauté sont donc d'une part la géophysique planétaire, mise en avant pour la Lune mais aussi capitale pour pleinement comprendre l'évolution de Mars, et

la minéralogie/géologie in-situ, en particulier pour Mars avec les places centrales de l'expérience CHEMCAM sur MSL en 2011 et du rover ExoMars de l'ESA en 2018. Une stratégie de fonctionnement en réseau de laboratoires est essentielle pour optimiser le retour scientifique et assurer un rôle leader à la France dans ces domaines. Dans le cas de l'exploration lunaire, la création d'un Institut Lunaire Scientifique sans mur associé à la NASA et structuré en GDR pourrait ainsi rassembler les équipes françaises.

• Accompagnement des missions

Les missions d'observation de la Terre et de planétologie prolongeront les observatoires magnétiques, géodésiques, gravimétriques et volcanologiques dans l'Espace. Les tâches d'observation spatiales, de développement et de calibration d'instrumentaux spatiaux, de développement de banques de données virtuelles (i-science) doivent donc être maintenant reconnues par le CNAP pour les physiciens et physiciens adjoints, comme cela peut l'être déjà pour les astronomes. Des modulations de service devront aussi être possibles pour les enseignants-chercheurs des Universités. Ces mesures encourageront les prises de responsabilité et l'émergence de futurs « Principaux Investigateurs » (PIs) d'expériences et de missions spatiales.

Les programmes PNP, PNTS seront d'une importance capitale dans l'analyse scientifique, en particulier en sciences de la Terre où la majorité des laboratoires participant à l'exploitation des données spatiales ne sont pas des laboratoires instrumentaux spatiaux. Ces programmes seront de plus en plus pertinents dans la mesure où de plus en plus de données seront disponibles rapidement et en grande quantité.

• Structuration des laboratoires spatiaux instrumentaux

Contrairement aux secteurs Océan-atmosphère et Astronomie-astrophysique, les sciences de la Terre n'ont développé une capacité d'instrumentation spatiale que tardivement. Il est devenu aujourd'hui indispensable de pouvoir s'appuyer sur quelques laboratoires spatiaux pour relever les défis de l'exploration planétaire et de l'observation de la Terre. Nous proposons donc une structuration basée sur trois pôles spatiaux :

- Les deux premiers, seront spécifiquement sciences de la Terre et orientés vers la géophysique in situ et l'analyse d'échantillons planétaires. Ils s'appuieront sur l'expérience accumulée lors des programmes ou expériences Premier,

Aurora/Humboldt, SELENE2 pour le pôle géophysique et des missions de retour d'échantillons Stardust et Genesis pour le pôle d'analyse d'échantillon.

- Le troisième, orienté vers la minéralogie *in situ*, bénéficiera de l'expérience acquise dans les techniques GRS et dans l'expérience Chemcam de la mission MSL et Aurora/Pasteur.

Le laboratoire Spatial de l'IPGP (associé au Campus Spatial Paris Diderot), le nouveau laboratoire Astrophysique-Planétologie-Géophysique (associé au Pole Spatial Toulousain) ainsi que le CRPG sont des candidats naturels à ces pôles, qui devront être développés en fonction des prochaines échéances de mission, avec une forte compétence technique. Ces pôles auront aussi pour vocation de permettre la réalisation d'expériences spatiales (ou d'analyse d'échantillons) « en sous-traitance », avec des PIs issus d'autres laboratoires sciences de la Terre. Il sera donc indispensable que le développement technique des pôles spatiaux s'accompagne de moyens ITA mis en place régionalement pour assister ces PIs.

■ Actions structurantes « structure et dynamique de la Terre »

Il faut des programmes très ouverts et sur le long terme. Le manteau, le noyau, la lithosphère, le sort des plaques, les relations Terre Solide-Vie-Climat, sont autant de thèmes à maintenir à l'INSU (ou à passer à l'ANR), car les groupes qui y travaillent constituent un noyau d'excellence international. Il ne faut également pas oublier que les besoins financiers des mêmes chercheurs sont variés et que l'ANR ne permet pas le dépôt ou financement de petits projets, innovants ou non. En particulier, même si leur recherche a été soutenue par des programmes excessivement coûteux, l'exploitation et la valorisation des données disposent souvent de moyens insuffisants.

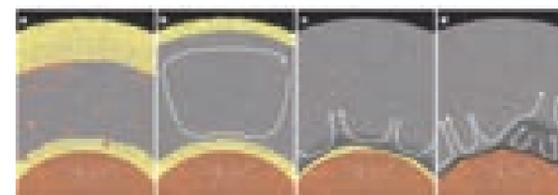
Des appels à projets spécifiques de l'ANR pourraient être consacrés :

- A la construction d'un modèle de référence 4D (espace et temps) de la Terre, outil associé et données observationnelles.
- Aux études conjointes numériques et expérimentales des contextes géodynamiques complexes (eg subduction, tectonique des plaques).
- Aux modèles numériques communautaires de la dynamique interne de la Terre et des planètes telluriques.

- A la préparation des outils d'analyse des missions géophysiques d'exploration de Mars et de la Lune, et des retours d'échantillons.

- Au fonctionnement de la lithosphère dans tous ses aspects (interactions fluides/roche/tectonique, dynamique des bassins et des chaînes, ressources, interaction avec le climat, avancées physiques et chimiques confrontées aux observations.)

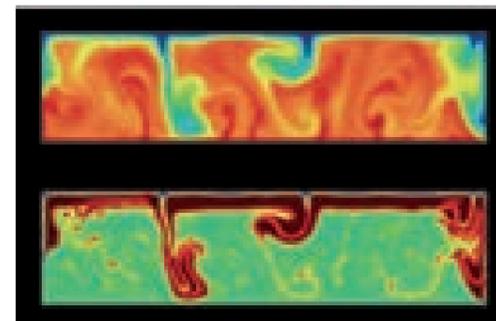
ANR ou programme spécifique INSU, dans tous les cas, un soutien fort et pérenne de ce type de recherche est une clé essentielle à sa réussite.



1. Expérience numérique de différenciation de la Terre primitive, (Labrosse et al. 2007).



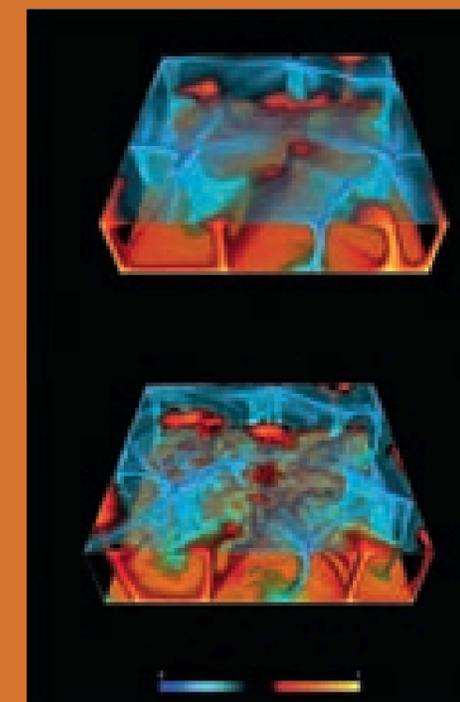
2. Modélisation analogique de convection avec viscosité dépendant de la température, (Davaïlle et al.).



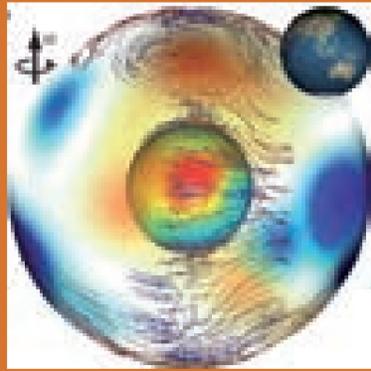
3. Expérience numérique de convection prenant en compte la composition, (Ricard et al.).

• Observatoires Fond de Mer (feuille de route d'ESFRI)

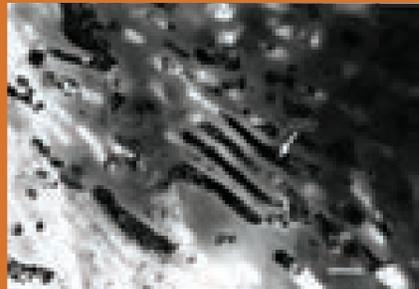
Maintenant que le déploiement d'Observatoires fonds de mer est inscrit dans la feuille de route des équipements européens ESFRI, nous devons nous préparer à accueillir des données totalement nouvelles qui risquent de modifier profondément notre vision de l'intérieur de la Terre. Les océans ne sont pas les seuls concernés puisque cette couverture sismologique étendue ouvrira également des fenêtres nouvelles sur les régions profondes de la Terre.



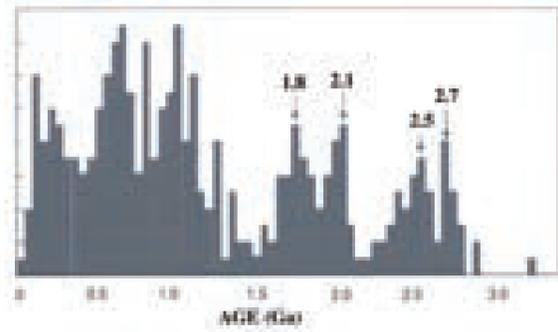
4. Expérience numérique de convection d'un fluide homogène conduisant à la formation de panaches. (Dubuffet et al.).



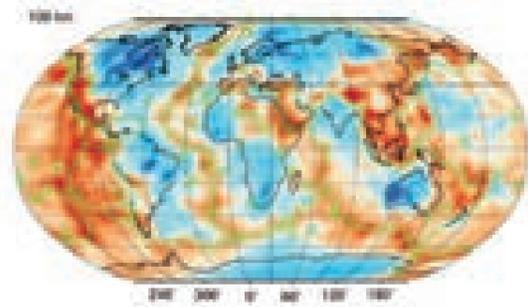
5. Expérience numérique de la dynamo terrestre. La subduction extrait de la chaleur qui génère des circulations dans le noyau liquide et provoque la croissance dissymétrique de la graine, (Aubert et al 2008).



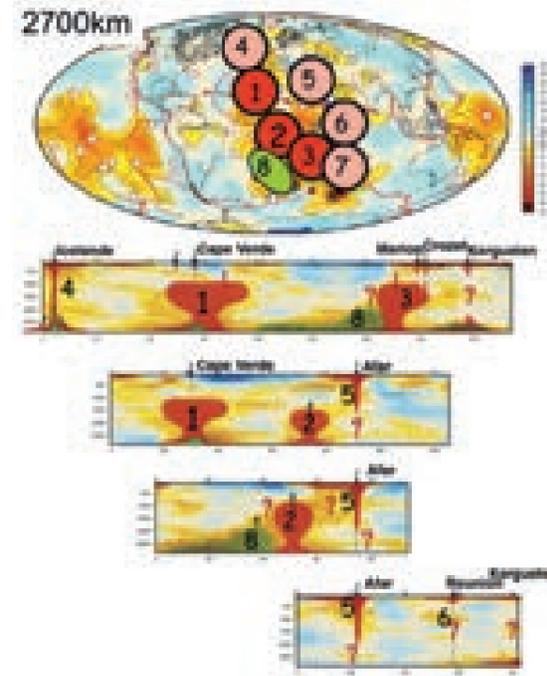
6. Synthèse des minéraux de haute pression, haute température du manteau inférieur, (Fiquet et al.).



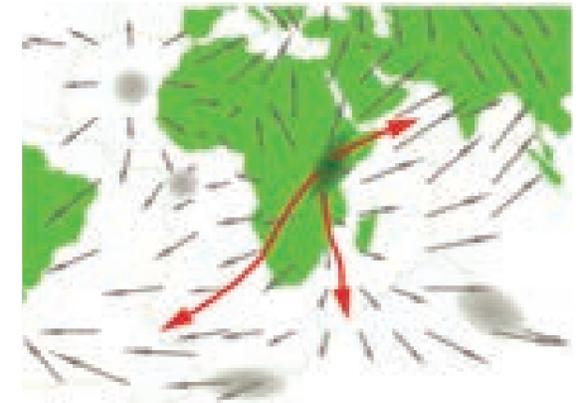
8. La datation des roches de la croûte terrestre révèle-t-elle une croissance épisodique de la croûte continentale, l'apparition de la tectonique des plaques ? (Arndt et al. 2006).



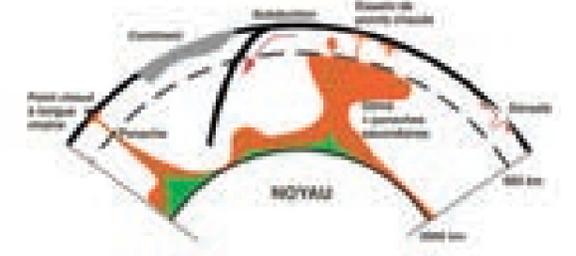
9. Tomographie à 100 km de profondeur, (Debayle et al. 2003).



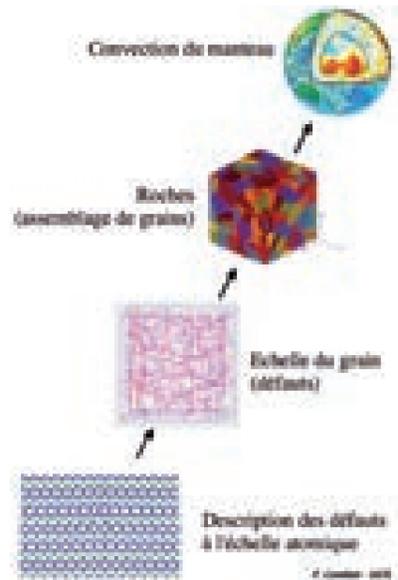
11. Le manteau hétérogène en densité reflète la diversité des remontées chaudes et des points chauds (primaires pour Hawaii et La Réunion, essaims et supervells pour le Pacifique, (Davaille et al).



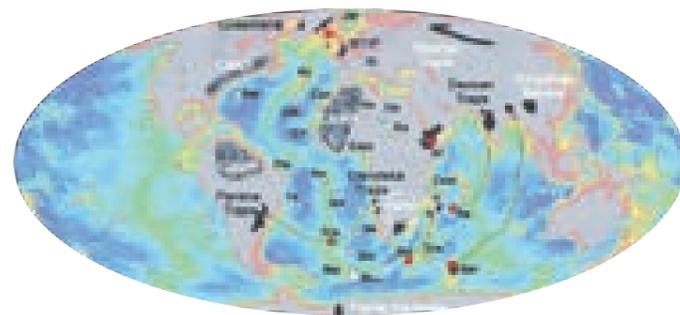
12. Evaluation des flux du manteau supérieur, (Meyzen et al. 2007).



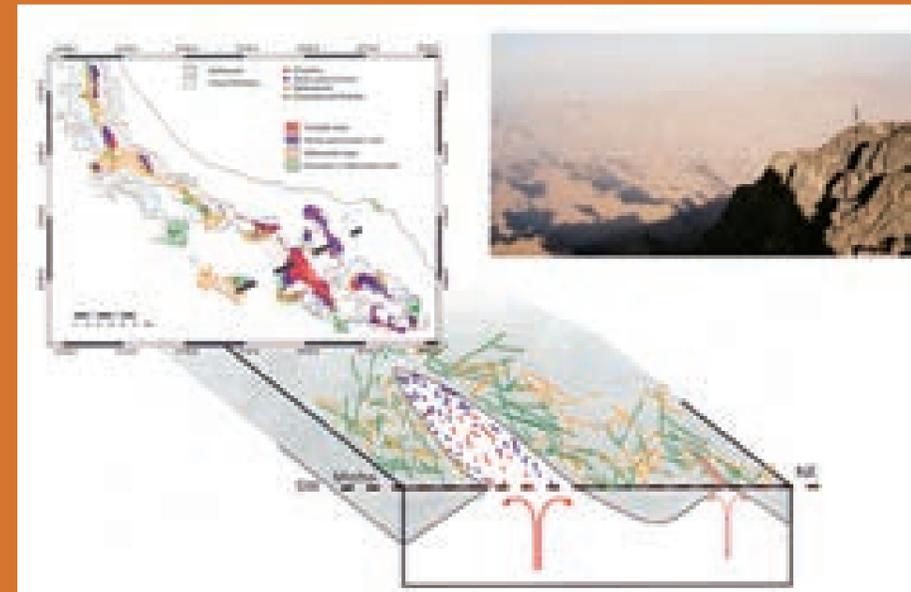
13. Modèle synthétique des hétérogénéités et des mouvements du manteau, inspiré des modélisations et tomographies.



7. Comment passer de l'échelle atomique à l'échelle planétaire ? (Cordier et al).



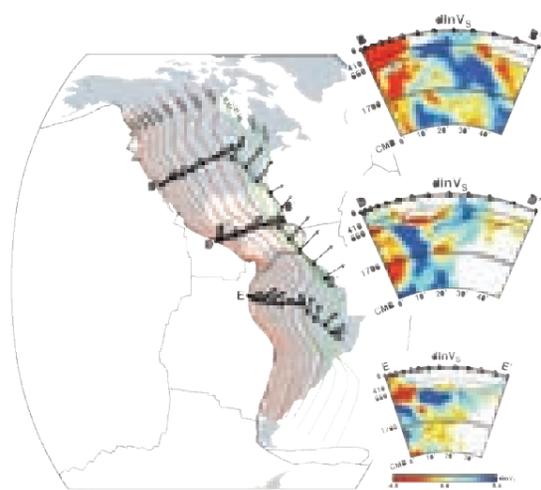
10. Projet PLUME, (Barruol et al.).



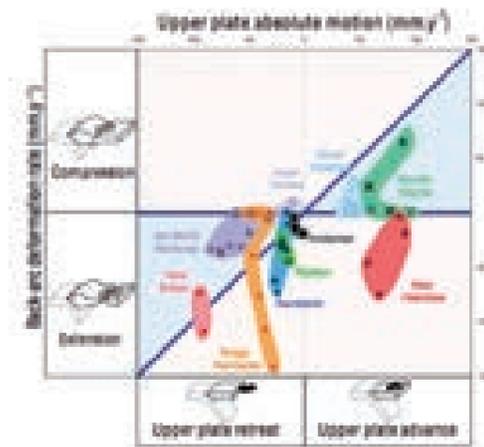
14. Ophiolites d'Oman, cartographie des dykes, (Python et Ceulener 2002).



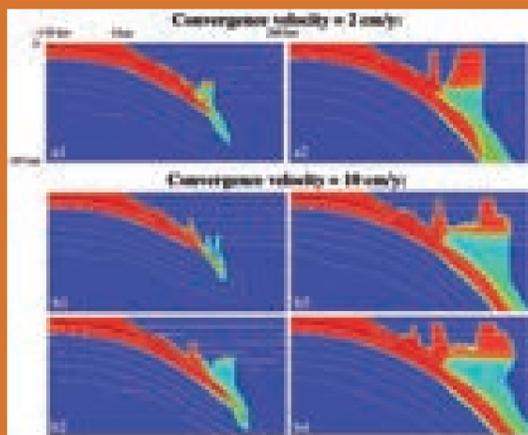
15. Observation et modélisation des concentrations en magma interstitiel, (Rabinowicz et Ceuleneer 2005).



16. Tomographies des plaques en subduction le long de l'Amérique, (Ren et al. 2007).



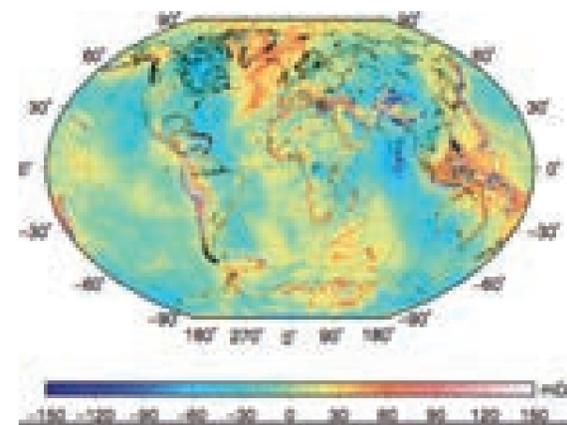
18. Typologie des zones de subduction, (Lallemand et al. 2003).



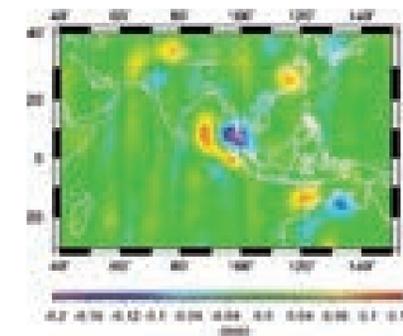
17. Expérience numérique de développement de la subduction en fonction de la vitesse de convergence, (Arcay & al, 2003).



19. Expérience analogique de subduction, (Bellahausen et al. 2005, Martinod et al. 2006).



20. Anomalies à l'air libre du champ de pesanteur déterminées par la combinaison de mesures du satellite GRACE, de mesures SLR (Satellite Large Ranging) et de mesures au sol (modèle EIGEN 04C développé au GRGS-CNES et au GFZ).



21. Variation du champ de pesanteur en millimètres de géoïde associé au séisme de Sumatra de décembre 2004. Un filtrage passebande autour de 500 km d'échelle a été appliqué, d'où une amplitude filtrée inférieure à la variation totale. Calcul fait sur les modèles de champ GRACE, (GRGS-CNES).

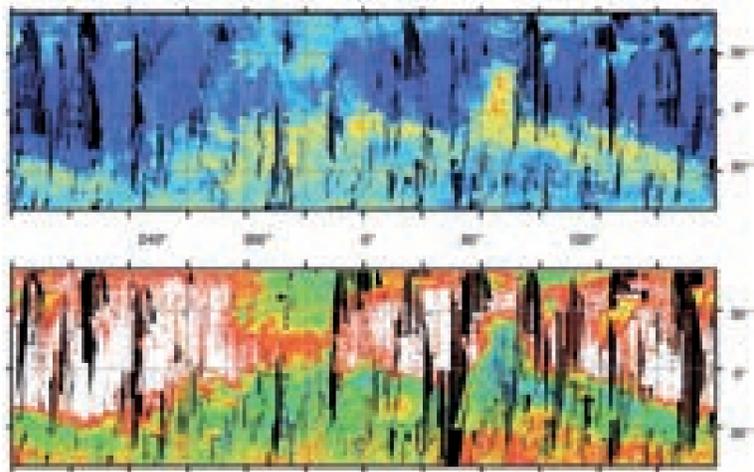


22. Les deux missions de l'ESA, GOCE (lancé en 2009) et SWARM (lancement en 2011) étendent dans l'espace les observatoires gravimétriques et magnétiques. Dans les deux cas, la communauté française est fortement impliquée, tant dans la réalisation des instruments avec l'ONERA et le CEA que dans l'analyse des données dans les laboratoires du CNRS, ESA.



23. La contribution française à la mission SELENE2 de l'Agence Spatiale Japonaise pourrait rassembler l'expertise nationale en sismologie planétaire et en analyse in-situ, avec la fourniture du sismomètre large bande et une contribution au LIPS du rover, JAXA.





24. Minéralogie de Mars par le spectromètre Omega, (IAS, DTP).



25. Debris flow sur une dune martienne (gauche) et simulation en chambre froide (droite) (Cean, Orsay).



26. Des terrains riches en argiles (bleu et rouge clair) détectées par OMEGA autour de Mawrth Vallis (au centre). La scène fait 80 km de long de gauche à droite. (LPGN/IDES/IAS/DLR/ESA).

Risques naturels

Laurent Jolivet, Michel Campillo, Edouard Kaminsky,
Isabelle Manighetti, Pascal Bernard,
Coordinateurs

La problématique des failles actives, ou des éruptions volcaniques et des risques associés fait appel à de nombreuses spécialités des sciences de la Terre : tectonique, sismologie, géodésie, physique des roches, géochimie, hydrologie, mécanique des fluides ..., avec des approches complémentaires et des instruments variés (terrain, observation satellitaire, mesures géophysiques, modélisation expérimentale et numérique). La plupart des chantiers appropriés se trouvent à l'étranger. Cependant, les territoires français sont soumis à un risque sismique et/ou volcanologique significatif. En géologie-géophysique marine sont étudiés le fonctionnement et le déclenchement des instabilités gravitaires sous-marines, affectant le domaine côtier directement (érosion, destruction des infrastructures, remobilisation de polluants) et indirectement (tsunamis).

■ Risque sismique et fonctionnement des failles actives

Les territoires français, comme nous l'avons indiqué sont soumis à un risque sismique important, non seulement aux Antilles, mais également en métropole ; ils sont insuffisamment étudiés à ce jour, de sorte que notre connaissance du risque sismique en France est encore parcellaire.

Une anticipation plus fiable d'évènements futurs passe par une meilleure compréhension des séismes et du fonctionnement des failles. Trois axes majeurs de travail méritent pour cela d'être approfondis :

- Il faut parvenir à comprendre et modéliser le fonctionnement des failles au cours des différentes phases de leur cycle sismique. Pour la phase cosismique, la modélisation et la prédiction du mode de propagation de la rupture sur des failles à géométrie complexe et toujours segmentées est un challenge majeur pour la prédiction correcte des mouvements du sol. L'existence de processus dissipatifs au cours de la rupture nécessite par ailleurs d'être prise en compte, ainsi que la réponse non linéaire du milieu. Les effets de site locaux qui peuvent considérablement amplifier les mouvements du sol sont eux aussi encore mal cernés. Pour la phase post-sismique, de nombreux modèles existent mettant en jeu des rhéologies et des profondeurs crustales ou lithosphériques variées, mais les mesures pertinentes (géodésie et sismologie) font encore défaut pour les contraindre. La possibilité d'interventions rapides sur le terrain après un grand séisme, associant
- mesures tectoniques, sismologiques et géodésiques de haute résolution, est essentielle dans ce contexte. La recherche sur les modes de déclenchement d'un séisme par un autre, essentielle pour l'évaluation de l'aléa, est encore balbutiante. Pour la phase de chargement intersismique, il faut déterminer la zone bloquée de la faille et sa vitesse de chargement, pour en évaluer le potentiel sismogène, ce qui exige d'améliorer les techniques de traitement des données géodésiques (GPS continu, Interferométrie Radar, corrélation d'images satellites). Enfin, les phases de déformation transitoires (essaims sismiques, glissements lents au cours de l'intersismique) et les phases d'initiation des ruptures (précurseurs) restent encore largement comprises et très peu documentées. Leur compréhension et leur quantification nécessitent de densifier les mesures fines de déformation et de déplacement du sol (enregistrements sismologiques et géodésiques continus). Le rôle des circulations de fluides profonds, souvent évoqué pour ces processus transitoires, doit également être élucidé.
- Il faut améliorer notre connaissance des forts séismes passés. Ceci nécessite de poursuivre les efforts d'identification des ruptures passées sur les failles actives, notamment en tranchées, d'améliorer les techniques de datations des très courts termes par les isotopes « cosmogéniques » (^{36}Cl et ^{10}Be notamment), de mettre au point de nouvelles méthodes d'identification des ruptures passées.
- Certaines observations suggèrent que la géométrie et le degré d'évolution des failles long-terme jouent un rôle dans les processus d'initiation et d'arrêt des ruptures sismiques, ainsi que sur l'amplitude des déplacements co-sismiques

et des chutes de contrainte. Il faut donc améliorer notre connaissance de la géométrie et de l'histoire long-terme des failles, ce qui nécessite de poursuivre les études morphotectoniques classiques (imagerie satellitaire à différentes échelles, modèles numériques de terrain à haute résolution, datation fine des marqueurs géologiques décalés par les failles).

• Instrumentation spatiale et de terrain

Les thèmes évoqués ci-dessus demandent que soient collectées des observables géophysiques. L'instrumentation des chantiers doit donc être possible à des échelles de temps variables : déploiements permanents, semi-permanents (longue durée), temporaires (courte durée) et urgents (interventions non programmables). La France est sous-équipée en instrumentation géophysique destinée à l'étude de la structure de la lithosphère et des risques naturels. Il est urgent de développer des réseaux denses de stations sismologiques 3 composantes large-bande, des réseaux d'accéléromètres, des réseaux de GPS permanents, continus et haute fréquence. La détection et la mesure des phénomènes transitoires de déformation et des phases d'initiation des séismes requiert une instrumentation spécifique de très grande résolution sur quelques chantiers pilotes de lacunes sismiques : réseaux de GPS continus permanents haute fréquence, sismomètres très large-bande, réseaux de sismomètres courte-période en forage, inclinomètres longue base et extensomètres en forage, et enfin forages profonds pluri-kilométriques instrumentés recoupant des failles actives. Les déformations transitoires étant généralement de faible amplitude et de courte durée, leur mesure nécessite également un gros effort de développement méthodologique, dédié à diminuer les incertitudes.

Les couplages de méthodes géophysiques devraient par ailleurs être encouragés : par exemple sismologie et tectonique pour une meilleure détermination des « paramètres-clé » des modèles de rupture (géométrie, histoire long-terme, degré d'activité des failles), sismologie et magnétotellurique pour l'étude de la structure et de l'anisotropie, sismologie et GPS haute fréquence pour enregistrer l'ensemble du signal sismique et post-sismique. Enfin les efforts doivent être poursuivis en imagerie haute résolution (développement de satellites dédiés à l'étude des séismes et des déformations transitoires, modèles numériques de terrain ultra-précis), imagerie structurale (structure fine des failles et des conduits volcaniques), imagerie des séismes en mer (réseaux d'OBS) et plus généralement toutes les méthodes qui permettent de détecter et mesurer des déformations du sol très petites et courtes (imagerie radar haute résolution, GPS haute fréquence).

Enfin, pour aborder ces différentes phases du cycle sismique, la modélisation numérique doit progresser dans son réalisme, en intégrant la 3D, la visco-plasticité, les couplages fluides, et plus généralement les processus thermo-physico-chimiques, ces derniers devant par ailleurs être étudiés en laboratoire. Le besoin en expérimentation (haute et basse température) est de fait également important et requiert des développements instrumentaux.

■ Estimation de l'aléa sismique

L'estimation de l'aléa sismique consiste à calculer la probabilité de dépasser une accélération du sol donnée à un site donné, pour un scénario donné (source, magnitude, distance). Combinée à une analyse de la vulnérabilité physique et humaine, elle permet une estimation du risque sismique. Pour être efficace, cette estimation doit être accompagnée d'une réflexion concernant les paramètres pertinents pour les ingénieurs et pour la société.

Traditionnellement, l'évaluation du mouvement du sol peut être décomposée, analysée et modélisée en plusieurs segments concernant la source, la propagation des ondes, et les effets locaux. La variabilité concernant l'estimation du mouvement du sol doit quantifier les incertitudes associées à chacun de ces segments et tenter de réduire celui dont la variabilité est la plus grande.

Par la suite, combinée à une analyse de la source en temps réel, il est envisageable de mettre en œuvre une alerte permettant d'anticiper le mouvement du sol. L'efficacité de cette alerte est étroitement conditionnée par la compréhension des mécanismes physiques associés à la rupture sismique.

■ Nouvelles perspectives pour la sismologie instrumentale

Les ondes sismiques utilisées traditionnellement pour imager la Terre sont produites par les séismes ou par des explosions. Les ondes de surface ont été largement utilisées à toutes les échelles. Les progrès actuels de l'instrumentation conduisent à l'acquisition et l'archivage de très grandes quantités d'enregistrements des mouvements du sol. Pendant la plus grande partie de ces enregistrements, il n'y pas de séismes détectés mais un « bruit » microsismique résultant de l'interaction entre la Terre solides et ses enveloppes fluides, particulièrement l'effet des ondes océaniques (houle, ondes infragravitaires). Il a été montré récemment que la réponse de la Terre entre 2 stations peut être reconstruite à partir de

ce bruit. Il devient donc possible de construire des collections de sismogrammes correspondant à des trajets associés à la distribution des stations et non plus imposés par l'occurrence des séismes. Il en résulte une meilleure résolution des images tomographiques construites à partir de ces sismogrammes virtuels. De nouvelles stratégies de déploiement des réseaux doivent être mises en œuvre pour aborder par l'imagerie des problèmes ouverts et importants (structures sous-jacentes aux grands systèmes de failles, structure des édifices volcaniques, analyse fine de structures inactives sismiquement comme sutures anciennes, etc...).

Ces nouvelles techniques permettent une répétition des mesures pendant des périodes très longues et avec des précisions qui sont suffisantes pour mettre en évidence les variations temporelles des propriétés mécaniques de la croûte. Ces variations peuvent avoir des causes variées (thermomécaniques, tectoniques, hydrologiques ...) et doivent être analysées quantitativement. Ces analyses sont à leur tout début mais trouvent déjà des applications pratiques dans le domaine des volcans où elles devraient être évaluées systématiquement.

• Imagerie de la source, séismes rapides

À la fois techniques d'inversion et données disponibles ont beaucoup progressées ces dernières années. Il devient possible d'étudier la source des grands séismes avec une résolution nouvelle grâce à la complémentarité d'enregistrements télé-sismiques, de données accélérométriques en champ proche dont le nombre et la qualité sont en pleine explosion, et bien sûr de données géodésiques dont la densité et la résolution temporelle ont beaucoup progressé. L'imagerie de la source produit les données de base pour la modélisation dynamique des séismes et contraint les modèles de fonctionnement proposés.

• Séismes lents

Une découverte récente, due à la densification des réseaux GPS permanents, vient aujourd'hui montrer que, loin d'être linéaire et continu, le chargement des failles en période intersismique présente des phases transitoires (des séismes lents et silencieux), pouvant avoir des durées importantes (0.1-1 an), sans radiation d'ondes sismiques, et d'amplitudes significatives pour les grandes échelles (avec des moments équivalents allant jusqu'à M7.5). Toute une gamme d'échelles de vitesses de déformation semble à investiguer aujourd'hui, ces phénomènes « lents » s'avérant beaucoup plus systématiques que l'on a pu le penser dans le passé. La découverte de ces

phénomènes transitoires inter-sismiques marque un tournant dans notre compréhension du fonctionnement des failles. Elle pose des questions de premier ordre, auxquelles il est urgent de répondre :

- Quelle est la raison d'être des séismes lents ?
- Ces séismes lents se produisent-ils sur la partie bloquée ou « glissante » des failles, et de fait diminuent-ils ou augmentent-ils le risque sismique immédiat ?
- Quelles quantités de déformation accommodent-ils ?
- Leur fonctionnement est-il cohérent avec les modèles de friction généralement acceptés pour décrire la dynamique et la distribution des séismes ?

Un effort soutenu d'observation avec les différents outils de la géodésie est nécessaire pour avancer la description de ces phénomènes dont l'occurrence est attestée dans différentes régions. Ces événements lents devraient pouvoir être décrits avec la même précision que les grands séismes dans la distribution et l'histoire de leur glissement.

Apparemment associés à ces processus de déformations des trémors non-volcaniques ont été découverts ces dernières années dans des contextes tectoniques variés. Difficiles à localiser, peut-être de nature différentes (trémors proprement dits, essais de sismicité etc.), leur interprétation pourrait être un élément clé dans la compréhension de la mécanique des grandes failles. En particulier, il est déterminant de réaliser des localisations précises et une analyse des corrélations avec les glissements pour mettre en évidence de possibles implications de mouvements de fluides.

■ Risque volcanique

Les deux dernières décennies du 20^{ème} siècle ont été marquées par une mobilisation exceptionnelle de la communauté scientifique lors des éruptions majeures du Mt St Helens (1980) et du Mont Pinatubo (1992) et de l'éruption plus modeste de Soufrière Hills à Montserrat (actif depuis 1995). Ces efforts, supportés par le développement d'équipes multidisciplinaires performantes aux USA et en Europe (principalement au Royaume Uni, en Italie et en France) en association étroite avec celui d'Observatoires volcanologiques (USGS, INGV, IPGP) ont donné naissance à une volcanologie physique moderne, qui a permis la définition d'un modèle de référence pour les systèmes volcaniques. Les éléments principaux de ce modèle de référence sont une zone de fusion partielle, une zone de collecte et de remontée des liquides, une zone de stockage -

la « chambre magmatique » et enfin un système aérien. C'est aux différents éléments de ce modèle que sont reliées les diverses observables récoltées autour des volcans : images géophysiques, données pétrologiques et géochimiques, géologie des coulées et dépôts aériens. Mais, ce modèle permet surtout de formaliser les différentes questions qui se posent aux volcanologues du 21^{ème} siècle.

La volcanologie française est aujourd'hui à même, en tant que communauté, de prendre sa part dans les nouveaux défis de la volcanologie moderne. Parmi ceux-ci certains peuvent être mis en exergue, notamment en raison de leur lien avec les volcans actifs français qui resteront un objet d'étude emblématique pour les sciences de la Terre en France. Depuis les plus fondamentaux - et de plus grandes échelles - aux plus appliqués, on peut souligner les aspects suivants.

• Les volcans en tant qu'acteurs des grands cycles terrestres

- Quelle est la contribution en terme de flux de masse et de gaz des volcans ? Quels sont les taux de construction et de destruction des édifices ; ceux-ci sont-ils affectés par les changements globaux ?
- Quelle est l'influence des phénomènes volcaniques sur le climat ? Quel rôle jouent ou ont joué les volcans sur les autres planètes ?
- Quel est le lien entre activité tectonique, sismique et volcanique ? Les changements de contraintes d'origine tectonique peuvent-ils déclencher une éruption et sous quelles conditions ? Une éruption volcanique peut-elle en retour provoquer le relâchement de contraintes géologiques ?
- Pourquoi et comment une chambre magmatique se forme-t-elle dans un contexte géodynamique donné ?

• Développement de modèles (éruptifs, pétrologiques) contraints par la collecte de données fines sur les éruptions récentes et historiques et évaluation des capacités de prévision des modèles

La dynamique éruptive de chaque volcan est enregistrée précisément par les caractéristiques des dépôts formés, mais également par les caractéristiques pétrologiques des produits émis. Une étape indispensable à la modélisation des processus est donc une étude de terrain détaillée, notamment pour les

volcans français, l'île de la Réunion et les petites Antilles, et ceux du Chantier méditerranée. La confrontation fine (à petite échelle de temps) entre ces données et les modèles éruptifs permettra au-delà des grands dynamismes de référence, de comprendre les évolutions d'un volcan au cours d'un cycle éruptif, voire d'une éruption. Il est nécessaire notamment de décrire en détail l'évolution de ces données (en particulier en utilisant les techniques de la (micro) pétrologie moderne) pour les volcans explosifs actuellement peu actifs des Petites Antilles françaises, afin de nous aider à mieux cerner le comportement auquel il faut s'attendre de leur part. En particulier, quels sont les facteurs physiques et chimiques qui contrôlent le passage d'un régime éruptif à un autre ?

La pétrologie expérimentale constitue une approche aujourd'hui incontournable dans la compréhension des processus magmatiques et volcaniques. En effet, la possibilité de simuler des conditions de pression, température, oxydo-réduction, composition chimique et teneurs en volatils réalistes pour les magmas permet d'aborder au mieux les processus magmatiques et volcaniques (dégazage, cristallisation, vitesse d'ascension, déformation). L'approche expérimentale constitue fréquemment une étape intermédiaire nécessaire entre la caractérisation fine des produits naturels et l'élaboration des modèles physiques.

• Surveillance des volcans et risque volcanique : évolution vers une stratégie de spécification des observations en fonction d'objectifs identifiés

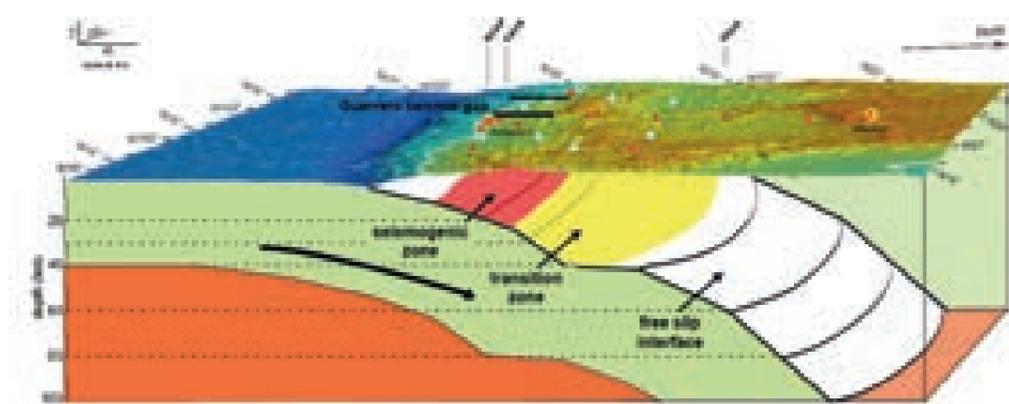
Il existe aujourd'hui une grande quantité de mesures géophysiques et géochimiques sur les volcans actifs, complétées par des observations spatiales multi-paramètres. Données et techniques sont mal hiérarchisées car elles ne sont pas intégrées dans des modèles de fonctionnement du volcan. Il est nécessaire d'évoluer vers des méthodes d'imagerie fonctionnelle associant géophysiques et géochimie des fluides, reliées quantitativement aux évolutions de pression et transferts de fluides au sein des édifices volcaniques et aux données spatiales. L'intensité d'une éruption à venir, ou le changement d'un régime éruptif à un autre, peuvent-ils être reliés à l'intensité ou au type de sismicité, le type d'éruption (phréatique ou magmatique) à l'importance des flux et la composition des gaz émis ? Ce point est particulièrement important pour l'identification, la quantification et la compréhension des phénomènes précurseurs, notamment dans les systèmes hydrothermaux.

Lors du réveil d'un volcan, il n'est pas évident que les observatoires aient la capacité d'utiliser leurs réseaux de surveillance, quand ils existent. La gestion d'une éruption nécessite donc la capacité de mesurer les manifestations de l'activité volcanique à distance, soit en utilisant les techniques de télédétection sol (ex. radar, infrason), soit par une augmentation de la fréquence d'acquisition des données spatiales, par activation de la charte « catastrophe naturelle ». Ces techniques sont aujourd'hui existantes mais elles doivent encore être reliées de façon quantitative aux paramètres éruptifs. Ces derniers (flux, direction des coulées, déformations) doivent être intégrés dans des modèles permettant des prédictions également quantitatives (génération et dynamique des écoulements pyroclastiques, avalanches, lahars, etc). Les résultats de ces modèles ont vocation à être produits en temps réels et proposés sur des interfaces soit aux autorités, soit à la population, afin de mieux gérer humainement la crise. Ceci nécessitera un travail de réflexion et de formation des personnels important, en intégrant notamment des compétences issues des sciences humaines.

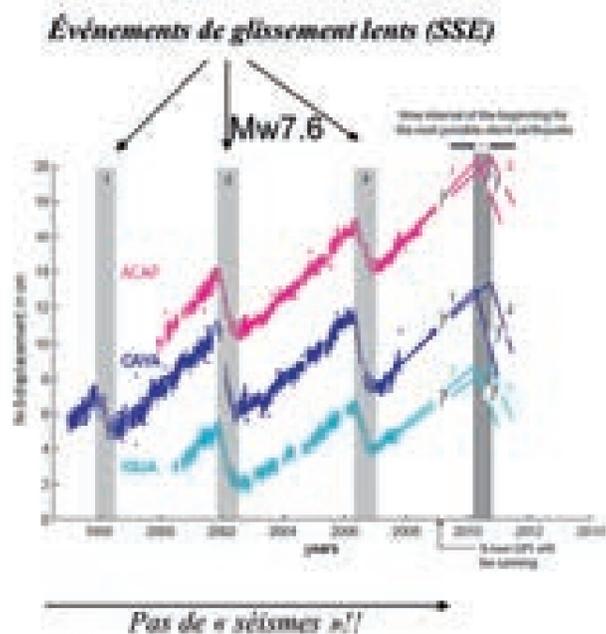
Trois axes de recherche peuvent être mis en avant :

- Analyse de l'aléa volcanologique de plus en plus performant, intégrant les risques associés comme les déstabilisations de flanc et tsunami ;
- Analyse du risque associé, interaction avec la recherche en génie civil, aménagement du territoire et sciences humaines et sociales ;
- L'impact climatique, analyse de la composition des phases volatiles, des aérosols et des poussières.

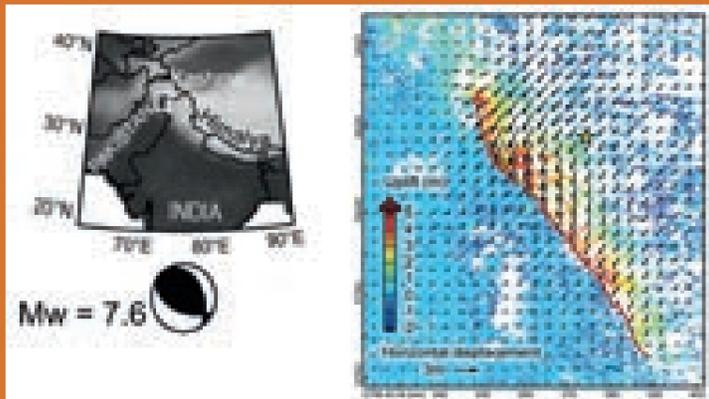
Il est toutefois indispensable de maintenir dans les observatoires des moyens en personnels, relativement indépendants des modes de la recherche fondamentale, afin d'assurer une surveillance fiable.



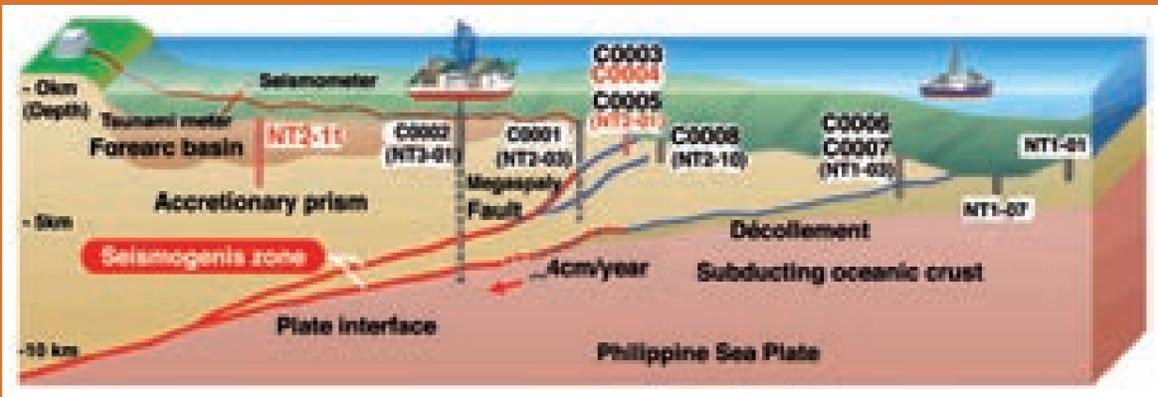
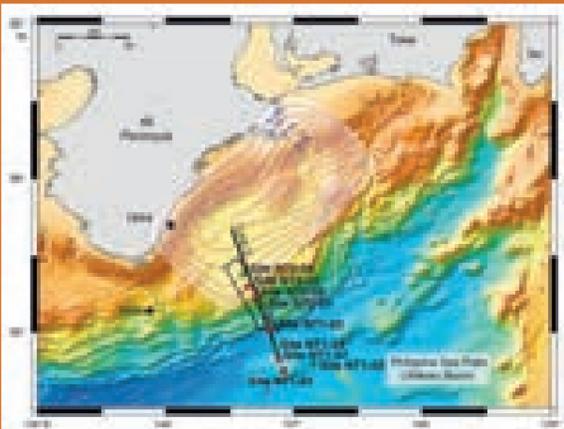
1. Localisation de la zone sismogénique dans une zone de subduction, ici Mexique (N. Cotte, LGIT 2009).



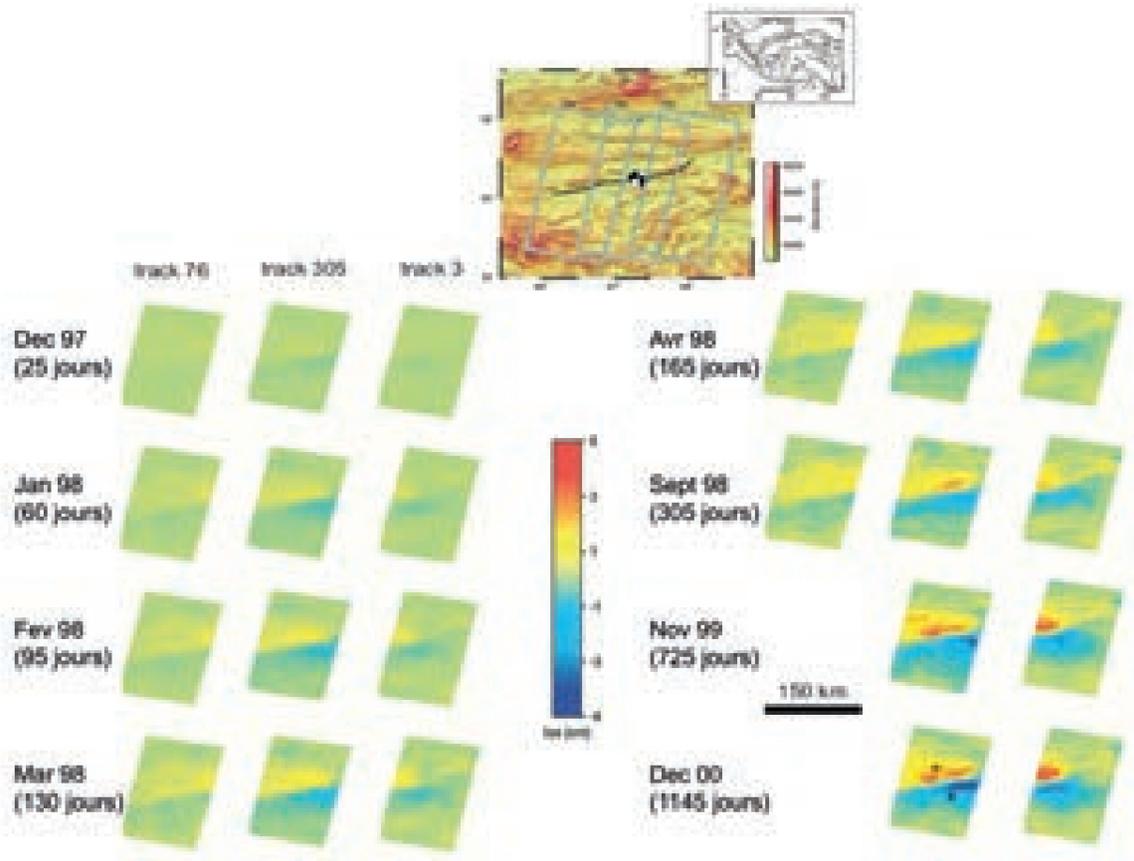
2. Enregistrements de mouvements lents correspondant à une magnitude Mw 7.6, sans séisme, Mexique (N. Cotte, LGIT 2009).



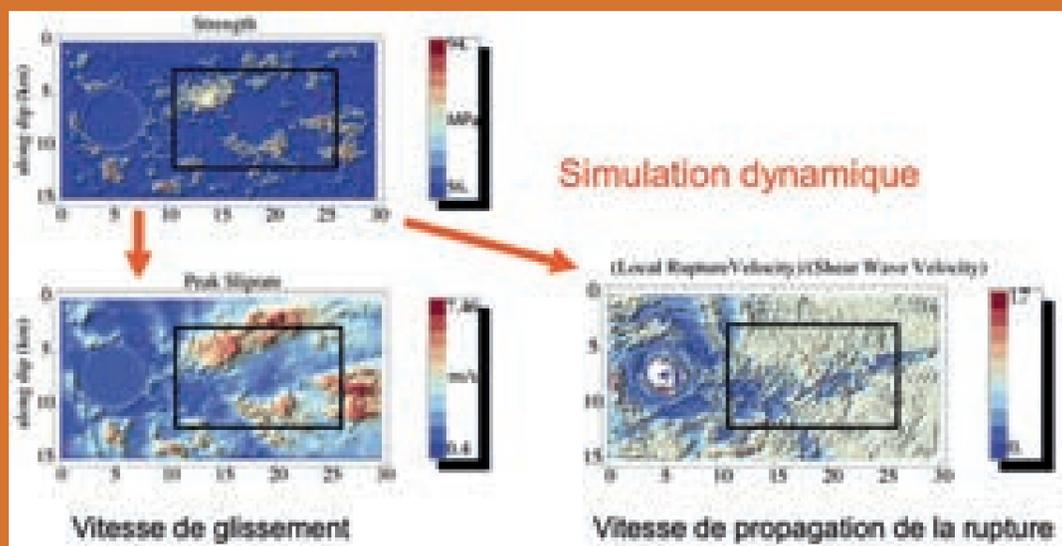
4. Observation et mesure du mouvement des failles. Ici Séisme du Pakistan 2005, (Pathier et al 2006).



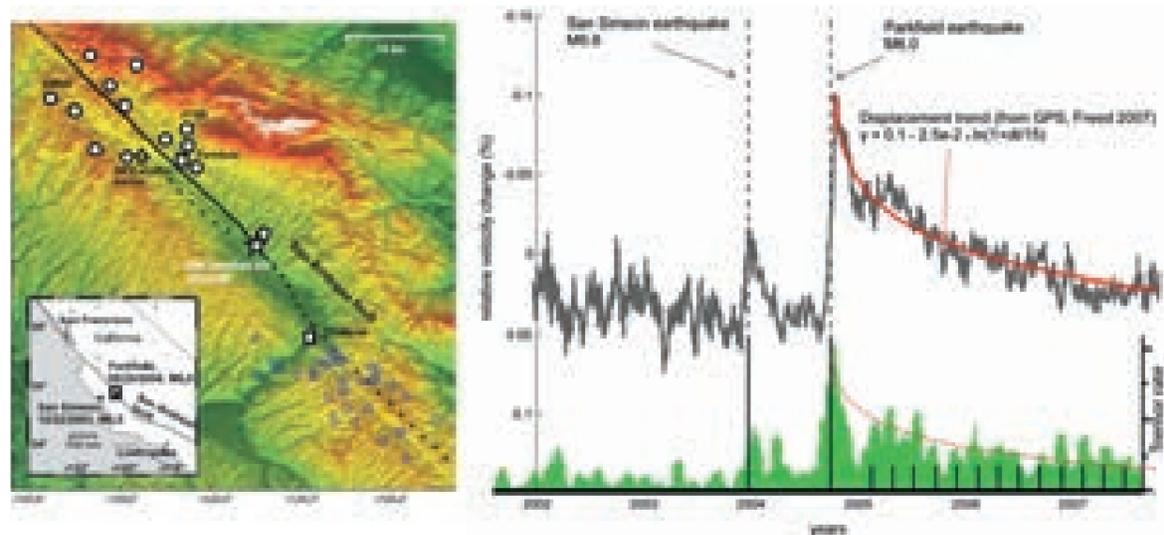
3. Forage de la zone sismogène NanTroSEIZE (Japon) par le navire océanographique japonais Chikyu – Programme IODP, (NanTroSEIZE-IODP-Jamstec).



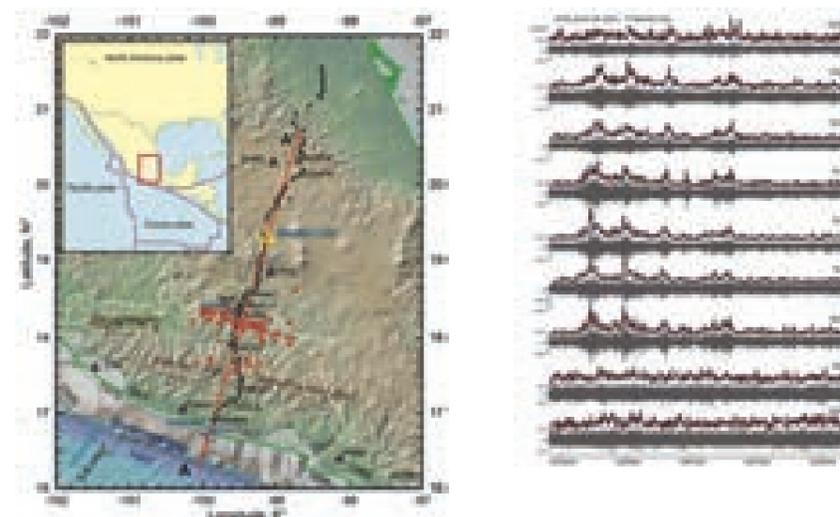
5. Déplacements post-sismiques du séisme de Manji (Tibet), 1997, Mw= 7.6 mesurés par série temporelle INSAR, (Ryder et al. 2007).



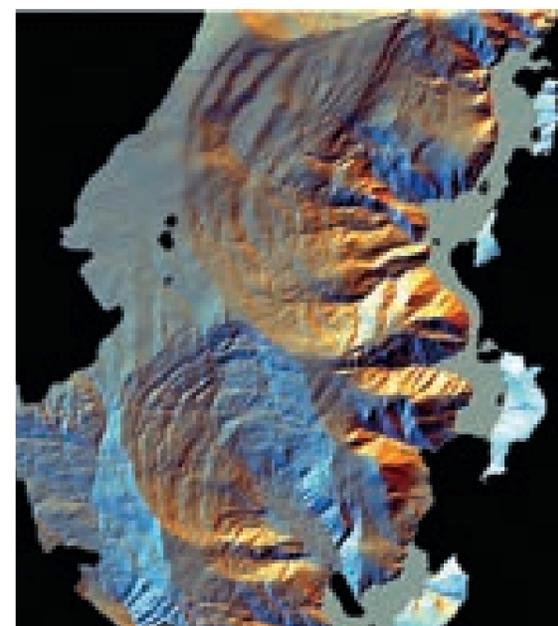
6. Simulation dynamique de la vitesse de glissement en bas à gauche et de la vitesse de rupture en bas à droite, (Schmedes et al. 2008).



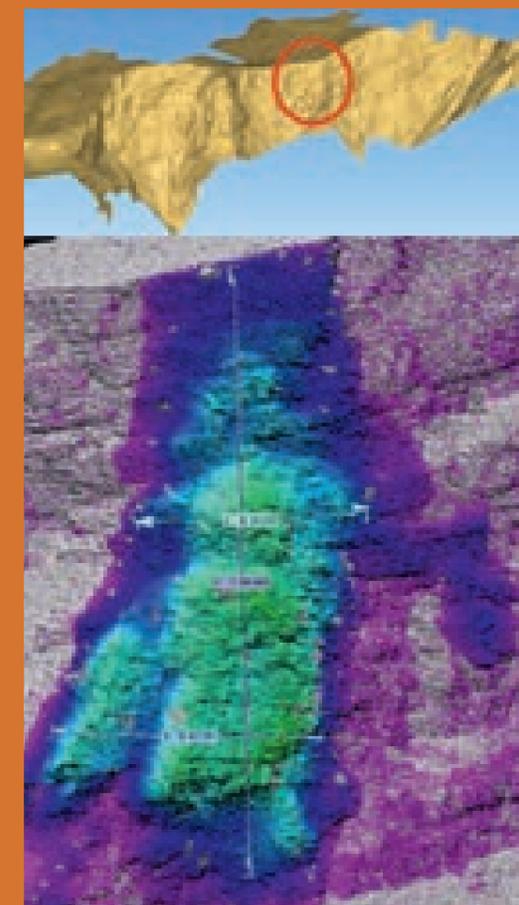
7. Mesure de l'évolution des propriétés mécaniques avec le bruit sismique, (Brenquier et al. 2008).



8. Enregistrements de tremors non volcaniques dans la zone de subduction mexicaine, (Payero et al. 2008).



9. Image Lidar (précision 10 cm) pour la mesure des mouvements gravitaires, (Le Roux et al. 2008).



10. Traitement lidar d'une falaise. En haut l'échelle est entourée en rouge. En bas, différence des MNT obtenus par lidar avant et après éboulement (LGIT).

Environnements de surface actuels et anciens, couplages avec les autres enveloppes terrestres

Denis-Didier Rousseau, Yves Godderis, Gilles Ramstein, Coordinateurs

Ces dernières années les recherches menées autour des interactions et rétroactions entre tectonique, érosion volcanisme, climat, et biosphère ont été fédérées par différents programmes de l'INSU ou du CNRS (en particulier Relief et Eclipse) et ont rassemblé une large communauté utilisant de nouvelles approches de quantification (outils géochimiques et chronologiques, géomorphologie quantitative, modélisation numérique, expérimentation, etc.). Des projets pluridisciplinaires ont émergés, liant géologie, géochimie, climat et jusqu'à la paléontologie et l'archéologie. Cette dynamique doit être poursuivie. De nombreux aspects de la problématique paléo-environnementale n'ont pas été abordés. En particulier, les liens existants entre la Terre profonde et les enveloppes de surface doivent être au cœur des développements futurs (histoire du dégazage, volcanisme, champ magnétique, tectonique des plaques et ses conséquences au sens large, paramètres astronomiques). De multiples exemples seront donnés tout au long de ce chapitre, les nombreuses rétroactions existant également entre la biosphère et l'évolution biologique d'une part, et l'évolution climatique et géochimique de la Terre d'autre part, sont également une thématique importante.

L'évolution du climat de la Terre est, à tout moment, la résultante de fonctions de forçages externes et internes qui agissent à toutes les échelles de temps. Les changements à basse et haute fréquence du climat et de l'environnement global ne peuvent donc se comprendre que via l'étude des nombreux processus agissant entre les diverses sphères internes et externes du système Terre. La très basse fréquence, de forte amplitude, définit l'évolution lente à l'échelle du milliard et du million d'années. Superposés à ces variations lentes, des mécanismes à plus haute fréquence imposent au système Terre des changements plus rapides voire abrupts. L'amplitude de ces changements est liée aux caractéristiques des

forçages à haute fréquence, mais dépend aussi des conditions imposées par ceux à long terme. C'est en ayant à l'esprit cette vision intégrée de l'évolution climatique que se définit notre réflexion.

Un enjeu complémentaire porte sur la compréhension des processus de surface qui, de la création du relief au fonctionnement des sols, conditionnent les grands transferts à la surface de la planète et contrôlent le cycle bio-géochimique. Ces processus restent mal connus même pour la période actuelle. S'ils constituent clairement un enjeu de recherche pour les périodes géologiques, ils représentent également une interrogation majeure pour la période moderne et notre capacité de prédiction de l'évolution des processus de surface dans le contexte du changement climatique.

Enfin, ces approches reposent sur de réelles recherches en géochronologie (développement méthodologique et réflexion sur la chronostratigraphie, utilisation des paramètres orbitaux pour contraindre la chronologie sur les échelles de temps les plus longues possibles). L'offre en datations ne doit pas être limitée mais l'adéquation entre technologies ou méthodes de datation d'une part et événements à dater d'autre part, doit permettre l'accès au plus large panel de datations disponible à la communauté.

Ces recherches doivent être soutenues par l'INSU, pour leur intérêt novateur et cognitif, mais aussi parce qu'elles sont transposables à des grandes préoccupations environnementales, comme un regard neuf sur l'évolution récente des climats, qu'il est impossible de comprendre et de modéliser sans prendre en compte la dimension géologique. La création d'un successeur du programme Relief, et d'un nouveau programme de type Eclipse, prenant plus en compte les relations Terre interne/environnement semblent des pistes incontournables.

■ Reliefs, bilans de matière

• Construction et destruction des reliefs

On sait que les interactions entre orogènes, climats et érosion sont intimement couplées. La convergence continentale induit la formation de reliefs et d'une topographie élevée (plusieurs km) sur des largeurs et surfaces variées (typiquement 100 à 5000 km et jusqu'à 10⁷ km²). Ce sont les endroits du globe où processus tectoniques et érosion interagissent le plus fortement, et sont couplés à des processus internes à la croûte (entre autre son évolution thermomécanique) ou plus profonds (mantelliques). Dans ce contexte, un courant de pensée de plus en plus dominant minore l'importance du forçage tectonique (déplacements sur les failles, épaissement crustal) dans l'évolution des reliefs et de l'érosion, et donne un rôle majeur à des phénomènes tels que la délamination lithosphérique ou le flux chenalisé de la croûte inférieure fluide.

Ils ont été dramatiquement remis en question par le séisme du 12 mai 2008 au Sechuan qui montre une correspondance frappante entre les déformations à très court terme et celles visibles dans la topographie acquise sur des durées de plusieurs millions à dizaines de millions d'années. Comprendre cette correspondance a des implications fondamentales, sur la dynamique des déformations et des reliefs.

Dans l'étude de la dynamique des systèmes de reliefs liés à la convergence continentale (chaînes de montagnes, hauts-plateaux), on ne peut donc se passer d'actions intégrant à la modélisation du fonctionnement de tels systèmes, (numérique, analogique) l'acquisition de données contraignantes sur la structure à différentes échelles de temps et d'espace (sismotectonique, tectonique, imagerie géophysique, y compris dans la partie profonde de la croûte et de la lithosphère) et sur l'évolution temporelle du système étudié (âges, vitesses, constantes de temps des différents processus).

Certains reliefs très anciens présentent toujours des altitudes importantes. Ceci est en contradiction avec les lois exponentielles classiques de destruction de ces reliefs. Ces lois évoluent-elles en fonction du vieillissement des reliefs ? Une réponse à cette question passe par l'étude du transport fluvial, afin d'identifier d'éventuelles modifications dans les lois d'érosion en fonction de l'âge des reliefs. Mais elle passe aussi par l'étude couplée de l'évolution thermique du manteau terrestre et de la lithosphère continentale, et le test des concepts de topographie dynamique et des modèles de variation de l'épaisseur des racines continentales en fonction

de l'âge, en déterminant par exemple si la production de chaleur radioactive (donc la composition chimique) dans la croûte évolue au cours des temps géologiques.

Les processus d'érosion des surfaces continentales constituent un moteur important de l'évolution de l'environnement. Ils définissent en partie les reliefs et donc jouent un rôle primordial sur le climat terrestre. Ils contrôlent également dans une large mesure les processus d'érosion chimique des surfaces continentales, et jouent donc un rôle clé dans l'histoire des cycles biogéochimiques. Par conséquent, l'histoire du relief est à mettre en relation étroite avec l'histoire de l'environnement (climat, cycles géochimiques, biosphère) en général.

• Transferts de matière des continents vers les océans en fonction du relief

À ce jour, les flux de matière à la surface de la Terre sont encore mal contraints, à la fois en amplitude et en durée. Il en résulte que nous n'avons qu'une image très incomplète de l'histoire du relief de notre planète. La réponse des transferts océan-continent face aux changements climatiques à toutes échelles de temps est également un défi majeur des études futures. Que valent les flux particuliers, dissous et de carbone organique des continents vers les océans pour une situation climatique et paléogéographique donnée, et comment répondent-ils aux changements climatiques ? En réponse à ces modifications, comment la sédimentation dans l'océan va-t-elle évoluer ? Quelle quantité d'éléments est stockés sur les marges continentales ? De plus, comment les processus d'altération vont-ils répondre aux modifications de la biosphère, elle-même très réactive vis-à-vis du climat ? Quel sera le rôle de la croissance ou de la destruction des sols sur les flux particuliers et dissous ? Plus largement, comment décrire le rôle de la zone critique (sols + saprolithes) ? Dans quelle mesure et à quelle vitesse la chimie des océans répond-elle à des modifications de ces flux ?

La réponse à ces questions nécessite d'envisager :

- Une modélisation intégrée des processus d'érosion, d'altération et de l'impact de la biosphère. A des fins de validation, les changements climatiques majeurs du passé (comme les cycles quaternaires) constituent un cadre d'étude pour comprendre ces processus.
- Il faut également soutenir les études sur les bassins versants actuels, de l'échelle régionale à l'échelle continentale. Ces bassins constituent des outils vitaux permettant de contraindre l'évolution des flux de transfert en réponse

aux changements environnementaux à grande échelle spatiale. Ils permettent également l'étude des processus à l'œuvre dans les mécanismes d'érosion. Ceux-ci incluent le transport des charges de fond, l'influence de la végétation et des sols sur l'érosion, les relations étroites entre érosion et altération chimique, les transferts de carbone organique vers les océans, le rôle du réacteur chimique que constituent les zones estuariennes, etc.

- La possibilité de travailler sur des échelles de temps et d'espace de plus en plus fines (géomorphologie à haute résolution) permet d'aborder des questions scientifiques nouvelles en particulier sur l'évolution historique et paléohistorique des systèmes géomorphologiques, sur les conséquences de certains aménagements anthropiques (barrages, etc.) ou sur les conséquences des variations climatiques récentes. D'un point de vue fondamental, ces échelles sont nécessaires pour comprendre finement les couplages hydro-sédimentaires.
- Sur une plus longue échelle de temps, la contrainte de ces flux et de leur relation avec le relief nécessite une nouvelle approche de la paléogéographie, incluant la collecte d'informations sur le relief des continents et des océans (altitudes, localisation des paléolittoraux, des paléobassins versants) ; des approches « de la source au dépôt » qui doivent être privilégiées, en parallèle avec l'acquisition de données chronologiques de haute qualité ; la mise en œuvre du concept de topographie dynamique à l'échelle des continents.

Sur des échelles de temps allant du millier au million d'années, comment la composition chimique des océans répond-elle aux changements des flux d'altération et d'érosion ? Ces flux sont en effet très dépendants de l'apparition et de la destruction des reliefs dans le passé géologique de la Terre. Il existe donc des couplages très forts entre l'altération/érosion, le relief, la chimie océanique et le climat qui doivent être explorés. Cela soulève en particulier le rôle des orogènes sur l'évolution climatique de la Terre, question très abordée ces dernières années mais pour laquelle seulement des éléments de réponse sont disponibles. Y a-t-il réellement une augmentation des flux de matières à l'échelle globale lors de l'exhumation de reliefs, et avec quelle amplitude ? Quelles conséquences sur la consommation de CO₂ atmosphérique par l'altération des continents et par les processus de sédimentation marine ? Le rôle de l'orogène himalayenne a été très discutée, mais quel est le rôle d'autres chaînes de montagnes qui sont apparues dans des contextes géodynamiques très différents (les Andes).

• Bassins sédimentaires

Les bassins sédimentaires sont des marqueurs de la déformation lithosphérique, des enregistreurs des événements climatiques, mais également des réserves de ressources énergétiques, minérales et en eau. Le relief de la Terre est par ailleurs le résultat de l'action couplée de processus très différents, mantelliques, lithosphériques et climatiques. Il existe des couplages très forts entre tectonique, climat, vivant, altération-érosion, relief, cycle de l'eau et chimie des océans, couplages qui doivent être explorés.

Le principal défi en géologie sédimentaire est de comprendre les facteurs de préservation de l'ensemble des milieux de sédimentation des cônes alluviaux aux systèmes gravitaires profonds, ainsi que leurs échelles de temps et d'espace caractéristiques.

Parmi les paramètres qui contrôlent la géométrie des sédiments dans les bassins, deux sont encore très mal contraints : le flux sédimentaire et l'eustatisme. Concernant les relations déformation-sédimentation, les recherches actuelles se focalisent sur les déformations de grandes (x100 km) et très grande (x1000 km) longueurs d'onde. Le flux sédimentaire comprend les produits d'érosion des bassins versants amonts, mais également l'ensemble des sédiments formés dans les bassins, au premier rang desquels les carbonates. Comprendre les flux terrigènes suppose de caractériser les bilans de matière à terre et en mer des grands bassins versants actuels ou anciens dans des contextes climatiques différents. La cinétique de la production carbonatée doit être quantifiée en relation avec les zonations des différents écosystèmes producteurs, fonction de la paléotopographie marine, des variations du niveau marin et de l'évolution de la biosphère au cours des temps géologiques. De telles études doivent être également conduites sur d'autres types de sédiments formés dans les bassins : évaporites, sédiments riches en matière organique, phosphates...

La quantification de ces différents paramètres doit permettre de développer une nouvelle génération de modèles numériques stratigraphiques déterministes, intégrant les processus de production et de transport des sédiments, stables à l'échelle des temps géologiques. C'est le moyen de prédire la géométrie des systèmes sédimentaires, et donc les ressources qui s'y trouvent.

Les progrès considérables réalisés sur les reconstitutions et la prédiction des géométries sédimentaires qui conditionnent les structures primaires de porosité-perméabilité, ont occulté l'étude pluridisciplinaire des transformations ultérieures aux

contacts de fluides lors de l'enfouissement. L'étude de la transformation des sédiments après leur dépôt est un passage obligé pour la prospection et l'utilisation des ressources, en particulier par l'analyse des processus diagénétiques (lato sensu), et un sujet très structurant qui peut faire intervenir de nombreuses disciplines des géosciences : relations fracturation-circulation des fluides, datation des phases minérales néoformées, expérimentation et modélisation des interactions fluide-roche, contribution biologique...

■ Evolution climatique à très long terme période, couplages avec la Terre solide

Les processus qui définissent l'évolution climatique à très basse fréquence (très longue période) sont au nombre de quatre : l'**évolution de la constante solaire**, les **conditions tectoniques horizontales** (mouvement des plaques) et verticales (orogénèses et érosion subséquente), les **échanges d'éléments entre la Terre profonde** et les **enveloppes superficielles** et l'**évolution de la biosphère**.

On sait depuis longtemps que la tectonique des plaques au sens large est « maître du temps ». Dépendant du relief, de la distribution Terre-mer à la surface du globe, de la topographie océanique, du dégazage de CO₂, voire de mouvements rapides, la paléogéographie est la clé de voûte de toute étude des paléoclimats. Il faut donc tout faire pour améliorer les reconstructions paléogéographiques à terre et en Mer, et utiliser des reconstructions dynamiques précises.

Concernant les **autres liens entre le climat et la Terre profonde**, plusieurs questions s'imposent :

- Y a-t-il une forte variabilité des interactions entre le manteau terrestre et les enveloppes superficielles, y compris les flux de CO₂ ?
- Dans quelle mesure la dynamique de la Terre profonde influence-t-elle l'histoire des enveloppes fluides à la surface de la Terre ? Cette question couvre une vaste gamme de fréquences (dégazage de la Terre solide à l'échelle de l'histoire de la Terre, rôle des éruptions paroxysmales dans les extinctions de masse et dans les événements climatiques à haute fréquence). Cet aspect nécessite une interdisciplinarité forte entre les communautés « Terre profonde » et les paléoenvironnementalistes.

Les temps les plus reculés de l'histoire de la Terre (Précambrien) constituent une période clé pour comprendre

le rôle des forçages lents compte tenu de la faible résolution temporelle des données. De nombreuses questions restent encore en suspens sur le climat au cours de l'Archéen et du Protérozoïque. Elles concernent notamment :

- Les liens entre l'état d'oxydation du manteau terrestre, le dégazage de la Terre solide, l'accrétion continentale, l'apparition de la photosynthèse oxydante d'une part et le cycle du carbone, du soufre et de l'oxygène d'autre part.
- Les conditions et le déroulement temporel du grand événement d'oxydation des enveloppes fluides.

Des approches pluridisciplinaires novatrices sont indispensables, impliquant des liens avec la planétologie et l'exobiologie, avec la biologie moléculaire et évolutive et avec l'évolution de la dynamique de la Terre profonde au cours du temps. L'utilisation de nouveaux marqueurs isotopiques de conditions redox est indispensable (isotopes du fer, fractionnement indépendant de la masse), ce qui inclut d'encourager les développements méthodologiques inhérents à cette étude.

Les forçages à très longue période continuent à influencer les époques plus récentes couvrant le **Phanérozoïque** (540 Ma à 0 Ma), où leur fonctionnement peut être exploré avec plus de finesse. Les mouvements tectoniques, à la fois horizontaux (mouvement des plaques continentales) et verticaux (surrection et érosion subséquente de chaînes de montagnes, activité des zones de subduction) ont des impacts climatiques, géochimiques et biologiques majeurs en modulant les transferts d'éléments des continents vers les océans, en contrôlant la circulation océanique, et en modelant la surface des continents.

Les processus tectoniques peuvent agir à haute fréquence. Des mouvements de faible amplitude relative sont suspectés être à l'origine de modifications climatiques majeures dans des fenêtres temporelles courtes (10⁵ à 10⁶ ans) : ouverture/fermeture de passages océaniques, mouvements rapides de blocs continentaux, surrection de barrières climatiques et effets de seuil, ... Il en résulte une cascade de problématiques scientifiques couvrant un large spectre de fréquences :

- Peut-on confirmer, sur des exemples précis, le rôle de l'ouverture et de la fermeture des passages océaniques (agissant seuls) sur le climat global du mésozoïque et sur l'évolution biologique (Drake, Tasmanie-Antartique, Feroe-Groenland, Panama) ?
- Comment quantifier l'impact de la surrection rapide de chaînes de montagnes sur le cycle des éléments, en particulier du carbone, et sur le climat ?

- Quel est le rôle des déséquilibres dans le cycle géologique du carbone organique en réponse à ces forçages tectoniques ? En particulier, dans quelles mesures la surrection de chaînes de montagnes modifie-t-elle la composante organique du cycle du carbone et l'évolution climatique de notre planète

Ces trois premières interrogations conduisent aux questions essentielles suivantes, toujours d'actualité, qui permettent d'insister sur les problèmes non résolus des couplages interne-externe :

- Quelles sont les causes et les modalités de la mise en place du mode climatique froid à la fin de l'Oligocène ?
- Faut-il des coïncidences d'événements géodynamiques internes (par exemple : panache + tectonique) pour provoquer un changement climatique majeur ou un seul événement suffit-il ? Plus généralement, peut-on hiérarchiser les facteurs géodynamiques en fonction de leur impact climatique ?
- Quel est le rôle des forçages à long terme dans le renforcement des cycles glaciaire-interglaciaires à haute fréquence à partir de 3 millions d'années ? Quelles sont les causes et modalités du changement de fréquence glaciaire-interglaciaire au milieu du Pleistocène ? Quel est le couplage entre l'état moyen à long terme du système Terre et sa stabilité, ou sa réponse, face à des perturbations à court terme (10^3 à 10^4 années) ?
- Certains « pulses volcaniques » mettent en place des volumes considérables de lave (parfois plus de $20\,000\text{ km}^3$) et injectent dans l'atmosphère jusqu'à plusieurs dizaines de gigatonne de dioxyde de soufre en quelques dizaines d'années. Les conséquences climatiques de tels événements sont donc catastrophiques et impliquent évidemment la biosphère.
- Le forçage tectonique de l'ensemble des géosphères peut-il engendrer des découplages entre le climat et le cycle du carbone ? Quelles en sont les causes ? S'agit-il de découplages à proprement parler ou de superpositions de forçages climatiques opposés ? Comment appréhender l'ensemble des forçages capables d'influencer l'évolution climatique de la Terre, en dehors du cycle du carbone ?

L'évolution biologique à la surface de la Terre module et est modulée par les modifications environnementales globales, qui répondent elles-mêmes aux forçages tectoniques et de la Terre profonde. Cette évolution peut s'aborder par deux méthodes différentes. La première cherche à établir dans quelle mesure les **changements de diversité systématique sont corrélés à des événements environnementaux**. Un effort particulièrement important est requis en milieu continental où

les données paléontologiques restent éparses temporellement et spatialement. Répondre à cette problématique nécessite donc un effort accru de recherche de données bien datées, dans des zones géographiques peu explorées, en envisageant la panoplie la plus large possible d'indicateurs paléoenvironnementaux, y compris d'origine biologique. La seconde approche, plus intégrative, vise précisément à **analyser les interactions organismes-environnement sur le plan fonctionnel**. A partir de modèles dont la complexité varie selon le système étudié, elle cherche à établir le rôle de chacun des éléments du système et à en prévoir l'évolution. Cette approche novatrice permet d'envisager les liens évolution biologique-paléoenvironnement du point de vue des processus, et doit être soutenue. En effet, les approches de ce type pourront à terme s'intégrer dans les études quantitatives du type modélisation numérique de l'environnement à grande échelle.

De nouveau, à cette approche à grande échelle temporelle se superposent en continu des processus à **plus petites échelles temporelles**. La thématique de la pression environnementale s'applique à toutes les échelles de temps, de l'échelle Phanérozoïque à l'échelle Quaternaire. On est sans doute en mesure dans quelques cas bien ciblés, de mettre en évidence de manière très quantitative, l'impact d'une pression environnementale sur l'évolution-disparition d'espèces dans le passé, les modifications de leur répartition géographique, les variations morphologiques de type écophénotypique, ainsi que les rétroactions exercées sur le système géochimique et climatique. Dans ce domaine, les modélisateurs du climat et des cycles géochimiques définissent des amplitudes de variations de paramètres (température, précipitation mais aussi pH de l'océan et alcalinité, ...) et ont souvent une idée très réductrice des interactions climat-environnement face à la potentialité extrême qu'a le vivant de s'adapter. Les liens simples de cause à effet valables pour des perturbations extrêmes trouvent là leur limite et seules des collaborations étroites entre les différentes disciplines (biologie, évolution, paléontologie, géochimie, climatologie) peuvent permettre d'avancer sur ces questions.

■ Les variations rapides du climat

Les **quatre grands forçages** (constante solaire, tectonique, échanges entre Terre profonde et enveloppes superficielles, et évolution de la biosphère) déterminent les conditions d'arrière-plan qui interagissent avec les transitions climatiques cycliques et abruptes déterminant le plus court terme. Il s'agit des variations cycliques de l'insolation (forçage orbital) et des **accidents climatiques** dont la dynamique reste largement

à explorer. Les processus associés aux ruptures, transitions rapides d'ordre millénaire à décennal, doivent constituer un objectif majeur des travaux conduits par la communauté en réponse aux inquiétudes liées au changement climatique actuel. Contrairement aux données instrumentales dont la couverture temporelle ne permet de nous renseigner que sur l'amplitude et la rapidité du changement climatique d'origine anthropique, seules les archives paléoclimatiques (sédiments marins et continentaux, glace) sont à même d'explorer les mécanismes initiateurs de ces accidents climatiques. **Les transitions rapides et ruptures climatiques sont sources d'impacts considérables, souvent irréversibles, sur les milieux, la biodiversité et les sociétés**. Elles impliquent des mécanismes complexes et très largement méconnus d'interaction-rétroaction des différentes composantes du système climatique et géochimique, et ce dans différents contextes de forçage orbital.

Plusieurs périodes clé ou causes objectives doivent être explorées :

- Les périodes quaternaires à faible couvert de glace susceptibles d'apporter des éléments d'interprétation sur les transitions futures. Cette démarche analytique couplée à une démarche de modélisation numérique régionale-mésoscale doit permettre d'aborder l'hétérogénéité des réponses régionales à cette variabilité rapide, ainsi que les spécificités des mécanismes (rétroactifs) agissant à l'échelle régionale. D'un point de vue conceptuel, cette fenêtre temporelle (interglaciaire) doit être élargie aux terminaisons glaciaires qui fournissent une perspective extrême du fonctionnement (et des interactions-rétroactions) du quatuor océan-glace-biosphère-atmosphère sur la variabilité climatique rapide, en y associant la question des variations abruptes du niveau marin et de leur origine.
- Les périodes glaciaires : les variations de la paléomousson estivale est-asiatique reconstruites à partir des spéléothèmes chinois pour les deux derniers cycles climatiques posent à nouveau la question de la variabilité climatique à haute fréquence sous couvert glaciaire, notamment celle de la reproduction des changements abrupts d'un cycle à l'autre et les mécanismes inhérents à cette cyclicité.
- Le passé géologique est ponctué d'événements très brefs comme le montrent les enregistrements isotopiques sédimentaires à haute résolution. Par exemple, les événements brefs de déstabilisation de clathrates se manifestent par des variations abruptes du climat à l'échelle millénaire (par exemple le « Paleocene-Eocene Thermal Maximum »). Les temps caractéristiques de réponse du

climat et des systèmes biogéochimiques sont des paramètres qui prennent une importance considérable dans le cadre des changements climatiques actuels.

- Le volcanisme. Il faut étudier l'impact des grosses éruptions volcaniques (comme par exemple l'éruption du volcan Laki en 1783, considérée comme l'un des plus importants événements volcaniques de ces deux derniers millénaires). En forçant un modèle numérique avec la séquence éruptive de ce volcan, on peut simuler les variations au cours du temps de la distribution des aérosols sulfatés dans l'atmosphère (permettant ainsi de comprendre les conséquences climatiques et sociétales d'un tel événement).

L'étude de ces ruptures climatiques dans le passé doit mener à une vision intégrée et quantifiée de la variabilité climatique rapide. La question de la récurrence des instabilités-accidents climatiques doit être posée. Y-a-t-il une cyclicité ? Quel est également l'impact de ces événements brefs sur les cycles continentaux, incluant la rétroaction de la biosphère (biomasse, biodiversité) continentale, les changements dans les flux d'éléments des continents vers les océans (des études récentes montrent la sensibilité importante de ce transfert à des changements climatiques à l'échelle de la décennie), et sur la biosphère marine. La compréhension du lien continent-océan-climat à toutes les échelles temporelles est un enjeu majeur.

Autre processus à la croisée de toutes les échelles de temps, **la cause et les mécanismes des variations du niveau de la mer (eustatisme) doivent être mieux compris**. Comment mesurer les variations eustatiques sur des longues échelles de temps (10 Ma) et des courtes échelles de temps (10^4 à 10^5 ans, pour des variations comprises entre 10 m et 100 m d'amplitude) ? Cette question est encore débattue même pour le Pléistocène supérieur :

- L'eustatisme est-il réellement un processus global ? N'y a-t-il pas un effet régional notamment à la verticale des zones de subduction ? D'une manière générale, quel est l'effet de la topographie dynamique (lien entre la dynamique du manteau et la topographie de surface) sur l'eustatisme ?
- Quelle est l'importance de la dilatation thermique des océans en période de « greenhouse » ?
- Quelle est la vitesse de réaction des calottes de glace continentales à un réchauffement ? Existe-t-il d'autres exemples d'événements d'instabilité des calottes de glace ?

■ Climat, homme et milieu

A l'heure où les changements climatiques dus à un accroissement des gaz à effet de serre se font sentir de manière perceptible, il faut se pencher sur leurs impacts, en particulier dans les zones les plus sensibles. Ces zones plus vulnérables ont un intérêt socio-économique majeur et cela d'autant plus qu'elles sont souvent les plus peuplées. L'étude du passé fournit un moyen - qui devient très puissant quand elle est combinée avec la modélisation - **d'étudier l'effet des variations climatiques sur la biodiversité, l'hydrologie, les sols, les ressources marines et la dynamique des sociétés humaines**. Les groupes humains se sont en effet développés parallèlement à des fluctuations climatiques et des changements paléoenvironnementaux importants. Les forçages à long terme, incluant la tectonique et les échanges avec la Terre profonde, ont défini un mode climatique globalement froid depuis l'Oligocène, soit un mode climatique particulièrement inhabituel à l'échelle de l'histoire de la Terre. Ce mode froid a été brutalement perturbé au cours du Miocène de manière globale et régionale, à une époque clé dans l'évolution du buisson évolutif qui a mené à l'espèce humaine. De plus, se sont superposées des oscillations climatiques rapides (10^4 à 10^3 ans) qui ont eu un impact direct sur les peuplements tout au long du Quaternaire.

L'homme interagit avec son milieu depuis des millions d'années. Les premiers hominidés ont subi des changements climatiques qui ont été non seulement un facteur d'évolution morphologique, mais aussi ont contraint leurs dispersions au sein des paléoenvironnements successifs. Depuis quelques dizaines de milliers d'années, les sociétés humaines successives se sont adaptées en se protégeant et en essayant de domestiquer leur environnement. Elles ont progressivement influencé ce dernier jusqu'au point où, par l'agriculture et l'industrialisation, ces sociétés ont eu un effet de plus en plus fort sur le climat. Les archives de ces environnements et de ses activités humaines constituent des indicateurs à la fois des changements physiques du milieu et des impacts que le climat a pu avoir sur les sociétés. C'est ce type d'archives dont il convient d'encourager la collecte et l'analyse afin d'améliorer notre compréhension des interactions homme-milieu. Des questions clés se posent :

- Aux longues échelles de temps, les causes de l'expansion et de la diversification des hominidés à partir d'un berceau africain ne sont pas encore complètement comprises. Le climat en est-il le moteur principal ?
- A l'échelle de l'Holocène, et a fortiori dans les périodes les plus récentes, les changements majeurs sont d'ordre socio-économique aboutissant souvent à des crises de civilisations

qui peuvent servir de modèle pour les changements climatiques futurs. Quel est le rôle du climat dans ces événements ?

- A l'inverse, quels sont les forçages des événements climatiques de l'Holocène ? Est-ce que l'homme a pu avoir un effet majeur sur certains de ceux-ci ?

■ Temps géologiques, cycles astronomiques

Une grande partie des questions posées ci-dessus demandent que l'âge et les vitesses des processus géologiques soient bien connus. Nous avons donc besoin d'une part, d'accéder beaucoup plus facilement aux différentes méthodes de datations dans leur globalité (haute et basse température, processus profonds et de surface) et d'autre part, de continuer à développer de nouvelles techniques à très haute résolution temporelle.

Les grands enjeux, tels que l'on peut les définir actuellement sont :

- De pouvoir déterminer précisément la durée et la cinétique des processus géodynamiques (notamment être capable de déterminer la durée des processus rapides, d'utiliser les équilibres locaux, voire les déséquilibres) ;
- La datation juste et précise d'objets de très petite taille et/ou très jeunes (plus jeunes que 100 ka) ;
- De dater les processus de surface ;
- De calibrer avec précision les grandes coupures de l'échelle des temps géologiques ;
- De mieux comprendre le fonctionnement des chronomètres (taux de production cosmogéniques, température de fermeture, diffusion, etc...).

Les méthodes les plus largement utilisées sont l'U/Pb et le K/Ar (avec la technique Ar/Ar), la géochronologie U/He et la thermochronologie par traces de fission. La recherche sur le risque sismique ou l'érosion implique des datations précises des événements quaternaires récents. Des progrès indéniables ont été faits avec la mise en service d'Artemis pour le ^{14}C et de la ligne pour le ^{10}Be et le ^{36}Cl au Cerege. Il faut poursuivre ces efforts et ouvrir sur d'autres techniques (gaz rares, thermoluminescence).

Les variations temporelles du champ magnétique terrestre constituent désormais des outils de datation puissants. Hormis la magnétostratigraphie, les méthodes basées sur la variation séculaire du champ géomagnétique offrent des datations à des échelles beaucoup plus courtes. Le principe de la datation archéomagnétique appliqué aux dépôts volcaniques permet l'identification et la datation fine d'événements éruptifs avec

une résolution supérieure à celle des techniques géochimiques. Cette même méthode peut être appliquée aux dépôts lacustres et marins à fort taux de sédimentation, avec des implications évidentes sur les paléo-environnements. Enfin, la variation séculaire du champ magnétique est utilisable aux échelles de temps géologiques, pour estimer des durées de processus (résolution de quelques milliers d'années) sur des événements d'âge géologique, en particulier sur les laves...

Les variations quasi périodiques de l'orbite terrestre et de son inclinaison par rapport au soleil produisent des variations cycliques à long terme de l'insolation, les « cycles de Milankovitch ». Ces cycles astronomiques ont des effets modulateurs sur le climat global et la circulation océanique et s'enregistrent dans les sédiments. Les séries sédimentaires peuvent ainsi être calibrées à l'échelle de ces cycles sur une courbe d'insolation dérivée des modèles sur la dynamique du système solaire. A contrario, les paramètres de rotation de la Terre peuvent être validés dans le passé par comparaison avec la chronologie absolue. La communauté française est bien armée pour contribuer à une telle calibration astronomique, qui nécessite la coopération d'astrophysiciens, de radiochronologues, de magnétostratigraphes et de stratigraphes. Un effort à moyen terme, sur moins de 10 ans, devrait permettre de calibrer astronomiquement l'ensemble du Cénozoïque et l'essentiel du Crétacé et du Jurassique.

Enfin, un point qui reste préoccupant est la disparition progressive de l'expertise biostratigraphique, en France et d'une manière générale en Europe. Il est urgent, en micropaléontologie (foraminifères, nanofossiles) et en palynologie, de recruter de nouveaux experts spécialistes non d'un étage, mais d'un système.

■ Efforts méthodologiques

L'acquisition de données est primordiale dans la reconstruction des paléoenvironnements et des paléoclimats, et doit être menée en lien très étroit avec la modélisation numérique. Au-delà des aspects purement descriptifs de la reconstruction des paléoclimats et paléoenvironnements, il est devenu nécessaire de mieux prendre en compte les modalités, mécanismes et processus mis en jeu. On a longtemps considéré les objets à l'échelle « globale » (matière organique totale, « Terre globale », océan, continent ...) alors que certaines interrogations d'aujourd'hui seront résolues en considérant la plus petite des échelles (molécules spécifiques, « région », bassin versant, platier continental ...). Mais l'interprétation des grandeurs obtenues à la petite échelle en utilisant les clés identiques à celles qui sont utilisées à l'échelle « globale » induisent souvent

des contradictions, voire des oppositions avec les scénarii consensuels préalablement définis à la grande échelle. Cet apparent paradoxe est le résultat d'une méconnaissance des processus mis en jeu et de leurs imbrications les uns avec les autres. Aussi, pour accompagner ce nécessaire changement d'échelle faut-il :

- Augmenter la résolution temporelle et spatiale des données ;
- Régionaliser au maximum les modèles ;
- Revisiter les principes et concepts de base qui prévalaient à l'échelle « globale » ;
- Adapter les paramétrisations des modèles à la petite échelle (introduction des processus petites échelles).

• Les efforts devraient porter à deux niveaux

La compréhension des processus, afin de mieux préciser les approximations effectuées dans les concepts généraux et les modèles biogéochimiques et climatiques en usage :

- Potentialité des nouveaux proxies (D_{47} sur carbonates, isotopes du Ca et du Mg, éléments traces, marqueurs de conditions anoxiques ou dysoxiques, indicateurs paléontologiques, mesures paléomagnétiques couplées aux isotopes stables, biomarqueurs moléculaires et autres...);
- Contrainte des effets de diagenèse, d'enfouissement et des traitements de laboratoire sur le signal original des proxies ;
- Propagation des incertitudes en fonction des échelles considérées et validité des postulats de base ;
- Paramétrisation des liens proxies-conditions paléoenvironnementales et climatiques, par une triple approche « observation, expérimentation, modélisation ».

La livraison de nouvelles données pour combler les lacunes spatiales et temporelles :

- Ré-analyser certaines données et bases de données existantes, et développer l'usage des bases de données ;
- Revaloriser la recherche d'observation, sur le « terrain », en facilitant les missions de terrain et de prospection ;
- Développer de nouvelles technologies analytiques ;
- Encourager les plateformes technologiques communes et la mutualisation des équipements, permettant ainsi une meilleure structuration de la communauté ;
- Mieux tirer bénéfice des sites-chantiers communs d'étude (bassins versants, embouchures de fleuves, régions côtières, ...), permettant l'inter-calibration des proxies, l'observation intensive des conditions actuelles et récentes, et la modélisation à haute résolution.

Environnements de surface actuels et anciens, couplages avec les autres enveloppes terrestres

Une gestion pluridisciplinaire de l'approche et de l'effort de recherche dans les domaines des sciences humaines, des sciences du vivant et de la Terre est encouragée. Des efforts importants sont ainsi recommandés sur la géochronologie (pour la datation précise et la synchronisation des enregistrements), la méthodologie (des approches originales sont nécessaires pour traiter de manière rigoureuse l'hétérogénéité des données quantitatives et qualitatives), le développement de «proxies» marqueurs de processus physiques et socio-économiques (en particulier des marqueurs des activités humaines), l'acquisition d'archives (y compris la ré-analyse de données existantes), de nécessaires retours au terrain et un développement de la modélisation (simulations climatiques, modélisations des proxies). La mise en place de nouvelles approches peut nécessiter la confrontation et/ou l'utilisation de plusieurs technologies disponibles ou non en France. Cet accès aux technologies au plus haut niveau international doit être facilité. L'objectif s'inscrit dans la caractérisation et la chronologie précises des événements climatiques, biogéochimiques et culturels, depuis des états anciens non-anthropisés jusqu'aux processus actuels, dans le but de comprendre les

processus et de produire des modèles prédictifs : **le passé est un laboratoire permettant de valider nos modèles qui pourront alors devenir prédictifs.**

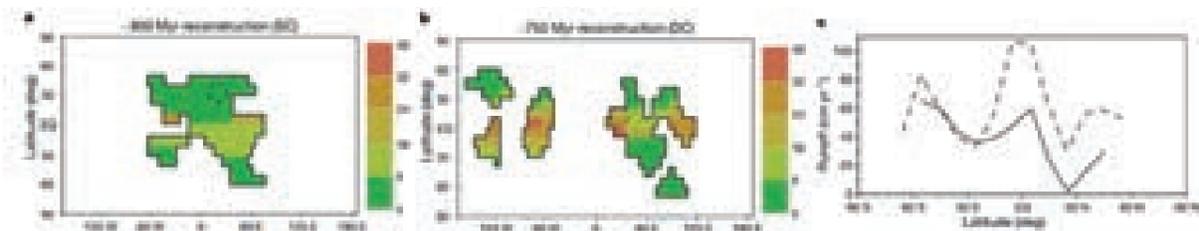
• Développement et adaptation de modèles climatiques

(développé dans la partie séparée « Modélisation numérique en sciences de la Terre ».

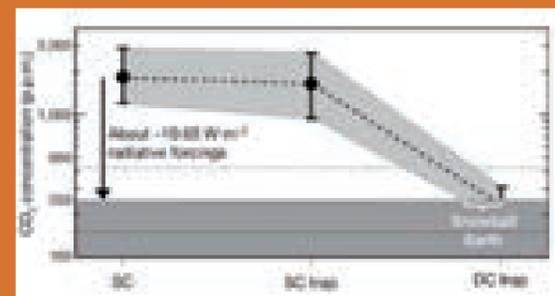
Un effort particulier doit être consenti sur la construction d'outils de modélisation couplant les processus pilotant l'histoire des paléoenvironnements et des paléoclimats. L'expérience montre que des outils numériques initialement développés pour des problématiques couvrant des échelles de temps très courtes (par exemple les modèles de circulation de l'atmosphère) trouvent un champ d'application extrêmement vaste dans le passé, des échelles temporelles millénaires aux échelles géologiques. Inversement, des outils numériques développés pour les longues échelles de temps peuvent également trouver un champ d'application à plus courte échelle (rôle de l'altération continentale par exemple).



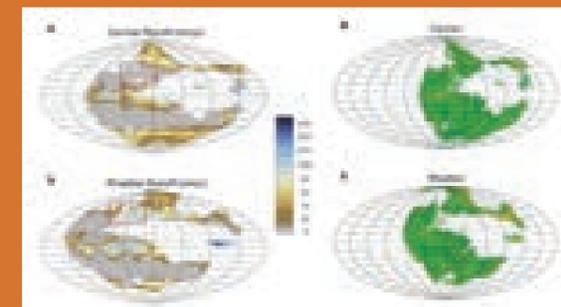
1. Reconstruire et comprendre l'histoire de la Terre, du climat et de la vie l'évolution du système Terre.



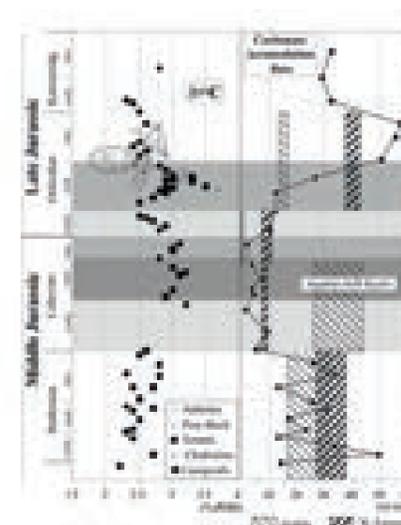
2. Donnadieu et al., Nature 2004.



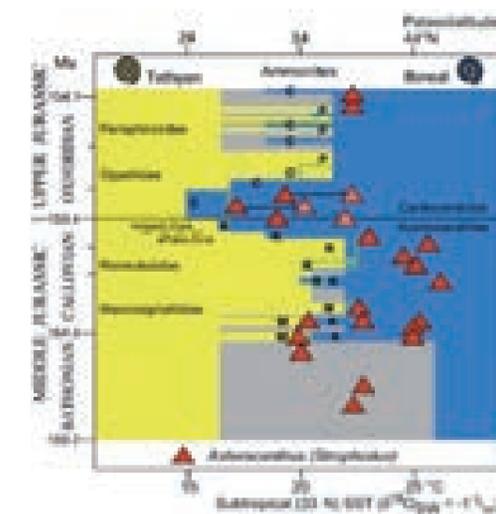
3. Donnadieu et al., Nature 2004.



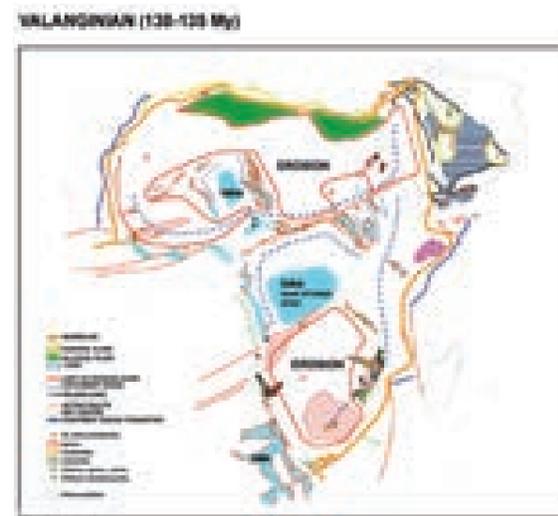
4. Donnadieu et al., Geophys. Geochem. Geosys., 2006.



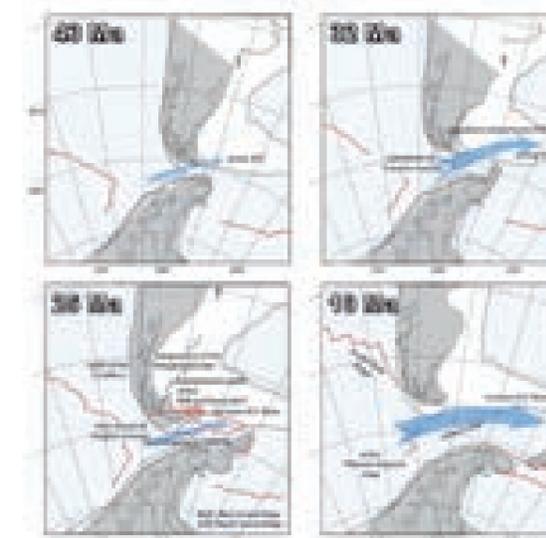
5. Dromart et al., Am. J. Sci., 2003.



6. Dromart et al., Am. J. Sci., 2003.



7. Reconstitution de la topographie de l'Afrique au Valanginien, (Robin, ANR TopoAfrica).



8. Relation tectonique horizontale et climat au passage de Drake, (Lagabrielle 2008).

Sciences de la Terre et biologie, une pluridisciplinarité à construire

François Guyot, Pascal Neige

Coordinateurs

Avec la contribution de Thomas Servais, Karim Benzerara

■ Biominéralisation

Un premier axe de prospective est constitué par la problématique de **biominéralisation**. Il s'agit en effet d'un point de contact évident entre sciences de la Terre et biologie moléculaire, qui grâce à des recherches conjointes dans ce domaine peuvent s'enrichir mutuellement. Les progrès récents de la biologie et de la génétique des procaryotes magnétotactiques sont, parmi plusieurs autres, une illustration remarquable de cet intérêt mutuel et de la richesse scientifique ainsi engendrée. Cette interaction reste toutefois encore relativement peu explorée, en particulier en France.

Du point de vue géologique, la biominéralisation joue un rôle fondamental dans les grands cycles géodynamiques (carbonates, silice, oxydes de fer) et fournit des témoins géologiques uniques et importants dans les systèmes actuels et anciens, voire très anciens. Du point de vue de la biologie, elle représente une opportunité intrinsèquement intéressante dans le domaine de l'expression, la production de biominéraux étant un phénotype particulièrement visible et propice à la sélection de mutants, de variants, voire de tris originaux (biominéralisation magnétique). À côté de modèles génétiques procaryotes ou eucaryotes pluricellulaires, on peut imaginer que se développe dans ce domaine, pour les eucaryotes pluricellulaires, des études de type Evo/Devo, éventuellement en rapport à définir avec la communauté de l'ostéogenèse. À ces titres divers, la biominéralisation joue aussi un rôle central dans le cadre de la biologie de l'évolution et rejoint les priorités de la paléontologie.

En sciences de la Terre, les communautés de minéralogie, « mineral physics », géochimie, magnétisme, sédimentologie, fluides crustaux, géosciences marines, géologie de la subsurface, stockage profond, ..., et bien évidemment de paléontologie, sont directement concernées. Les biominéraux

sont les témoins inscrits dans les archives géologiques laissés par les organismes et leurs métabolismes. Il importe donc d'étudier ces processus sur des systèmes naturels actuels ou des systèmes modèles. On peut mentionner à titre de pistes de réflexion pour des projets ou programmes :

- Des études de biominéralisation sur organismes modèles, de préférence organismes sur lesquels une approche génétique est possible.
- La détermination dans ces situations modèles de gènes et protéines impliqués dans les processus de biominéralisation. Les ouvertures de cette approche sur la phylogénie de la biominéralisation établiraient un lien important avec les priorités des paléontologues concernant l'histoire de la biominéralisation et le décryptage des formations sédimentaires déposées au cours des temps géologiques anciens (en particulier précambrien).
- Des études d'altération biologique de minéraux et de roches, leurs signatures minéralogiques, chimiques, isotopiques, le décryptage des mécanismes à l'interface des matériaux biologiques et minéraux et ce à la fois dans des situations de terrain et dans des modèles de laboratoire.
- Des études taphonomiques à haute résolution, impliquant les meilleures méthodes de physique des minéraux, ainsi que des approches isotopiques, dans des situations bien contrôlées de laboratoire. Les études de fossilisation procaryote ou eucaryotes unicellulaires sont particulièrement à encourager avec une vision aussi claire que possible de la perte d'information relative des différents marqueurs concernant l'organisme et le métabolisme initial.
- Des études de biominéralisation impliquant à la fois les biominéraux et les mécanismes biologiques en jeu dans une approche géomicrobiologique des milieux géologiques discutée ci-après et qui constitue le second grand volet de réflexion.

■ Géomicrobiologie

Tout comme la géophysique et la géochimie ne sont pas réductibles à une physique et une chimie appliquées à la géologie, il apparaît clairement dans les diverses discussions que la géomicrobiologie n'est pas que l'application de la microbiologie aux sciences de la Terre. Les concepts, paradigmes si l'on veut, de la géophysique et de la géochimie sont maintenant bien établis et développés, mais pour la géomicrobiologie, cela reste en grande partie à faire, et ce principalement par les géologues. En ce sens, la géomicrobiologie est incontestablement un axe prospectif plutôt qu'une discipline établie.

Pour développer ce domaine, il serait intéressant d'étudier de manière ambitieuse des sites d'intérêt géologique pouvant faire l'objet d'une approche intégrée en **géomicrobiologie**. Ces études ancrées dans le terrain devraient correspondre à de grands problèmes actuels des sciences de la Terre dont on évoque ci-après une liste non exhaustive, sites de stockage profond (CO₂, déchets nucléaires), croûte océanique, serpentinitisation basse température et génération d'hydrogène, sédiments océaniques, hydrates de gaz, oxydation anaérobie du méthane, bassins versants, fluides et failles, études des biosphères intra-crustales océaniques ou continentales, drainages miniers acides, analogues actuels de minéralisations anciennes ... De manière générale, cette composante géomicrobiologique devrait se greffer sur des sites, ateliers, observatoires, ... qui font déjà l'objet d'études intégrées en sciences de la Terre. Dans ce cadre, c'est d'un accompagnement scientifique et financier spécifique dont les actions de géomicrobiologie auraient besoin.

Pour atteindre un bon standard scientifique, ces projets devraient contenir au moins une des composantes suivantes (liste à amender et compléter lors des discussions ultérieures) :

- Une ambition en méta-génomique du site géologique ou de parties du site. Noter la coordination nécessaire et souhaitable avec les projets OA en méta-génomique marine, et évidemment en EDD sur des sites anthropisés ;
- Eventuellement des études de méta-transcriptome et méta-protéome sur ces sites, malgré les énormes difficultés techniques actuelles l'on peut sans doute considérer comme un verrou technologique à rompre ;
- Un couplage aussi systématique, ambitieux et multitraceurs que possible, de ces analyses utilisant la biologie moléculaire avec l'analyse par isotopes stables et autres traceurs (élémentaires, radioactifs) des principaux processus métaboliques en jeu qui permettrait au final une modélisation

quantitative des flux dans des écosystèmes d'intérêt pour les sciences de la Terre.

- Des études de calibration de systèmes réduits en laboratoire (calibration des signatures géochimiques et minéralogiques induites par différents micro-organismes).
- Une modélisation géochimique d'écosystèmes microbiens « simples » permettant d'évaluer la part effective du vivant dans le cycle de certains éléments chimiques ou de certaines molécules.
- Dans ce type de projet, la visualisation, dans le contexte géologique, des agents microbiologiques et de leurs principales fonctions sur site constitue un verrou technologique clairement identifié par tous les participants aux discussions. Faire progresser cet aspect d'imagerie structurale et chimique appliquée à la géomicrobiologie serait certainement un programme ou un sous-programme potentiellement stratégique qui impliquerait nécessairement des **développements d'une imagerie fonctionnelle des fonctions géochimiques réalisées par les organismes vivants**.

Ces développements méthodologiques devraient être effectués dans le cadre des sites et/ou des expériences de laboratoire préalablement définis avec pour ambition une meilleure visualisation et quantification *in situ* des microorganismes actifs dans ces environnements et de leurs métabolismes (méthodes optiques, microscopies, hybridation avec des gènes, des transcrits ou des protéines spécifiques des processus géochimiques et de leurs agents microbiologiques, analyses spectroscopiques, élémentaires et isotopiques à l'échelle des microorganismes).

On pourrait sans doute imaginer que ces recherches soient incitées par un **programme ou une action incitative de géomicrobiologie** qui pourrait aussi avoir un pendant du côté OA ainsi qu'en EDD. Les relations/échanges/collaboration avec la communauté des écologues autour de ces objectifs devraient être réfléchies.

■ Paléontologie

Par nature la paléontologie est une science à la charnière de deux domaines : sciences de la vie, sciences de la Terre. Son questionnement théorique est fortement ancré dans les sciences de la vie via la théorie de l'évolution : la paléontologie est la discipline majeure permettant la démonstration du fait évolutif, et contribue au débat des patterns et mécanismes de l'évolution.

• Axes thématiques majeurs

Evolution et développement « EVO/DEVO »

Depuis quelques années, le mariage entre biologie du développement et sciences de l'évolution a permis l'émergence d'un nouvel axe de recherche appelé Evo/Dévo. Cet axe à la frontière des connaissances doit son succès aux gènes Hox et il a permis des avancées considérables dans notre compréhension de la structuration des organismes et donc de leur évolution. Les biologistes du développement se tournent désormais vers l'évolution et un objectif d'avenir serait de renforcer l'interface paléontologie-biologie sur l'axe évolution et développement, les fossiles apportant des données totalement inédites et nécessaires à une vision unitaire de l'évolution.

Dynamique de la biodiversité et des écosystèmes anciens

Reliées aux questions d'évolution, des préoccupations sociétales majeures sont désormais ciblées sur l'érosion actuelle de la biodiversité. La paléontologie peut fortement contribuer à la compréhension de la dynamique de la biodiversité, par la mise en perspective temporelle, et par la diversité des cas d'étude quelle seule peut apporter. Cet axe très fédérateur pour la communauté paléontologique doit aussi être en connexion avec paléoclimatologie, géologie sédimentaire, géochimie, écologie et modélisation pour une communauté plus large en sciences de la Terre et en sciences de la vie.

Couplant approches micro et macroévolutives, cette question fédère les recherches autour de la biodiversité, sa mise en place et son maintien, en intégrant différentes échelles spatio-temporelles. Elle implique l'élaboration de descripteurs pertinents de la biodiversité (taxonomiques, morphologiques, phylogénétiques, ...). Elle intègre la prise en compte de niveaux hiérarchiques complémentaires depuis l'individu jusqu'au clade en passant par la différenciation et l'émergence des espèces et ce pour des cas d'études incluant les périodes anciennes. Ceci suppose le traitement de grands jeux de données. Quelques sous-axes forts peuvent être cités : période de crise biotique, cicatrisation post-crise, histoire de la biominéralisation, passage de la vie précambrienne à la vie cambrienne).

Préservations exceptionnelles, Lagerstätten.

La plupart des clés de lecture de l'origine de la vie et de l'évolution de la biodiversité et des écosystèmes sont à rechercher dans des gisements à préservation exceptionnelle. Cet axe doit être prospecté en étroite collaboration avec des sédimentologues, des biologistes, voire des biogéochimistes : un thème « préservation exceptionnelle » va donc beaucoup plus loin que la recherche de fossiles médiatiques ; l'étude

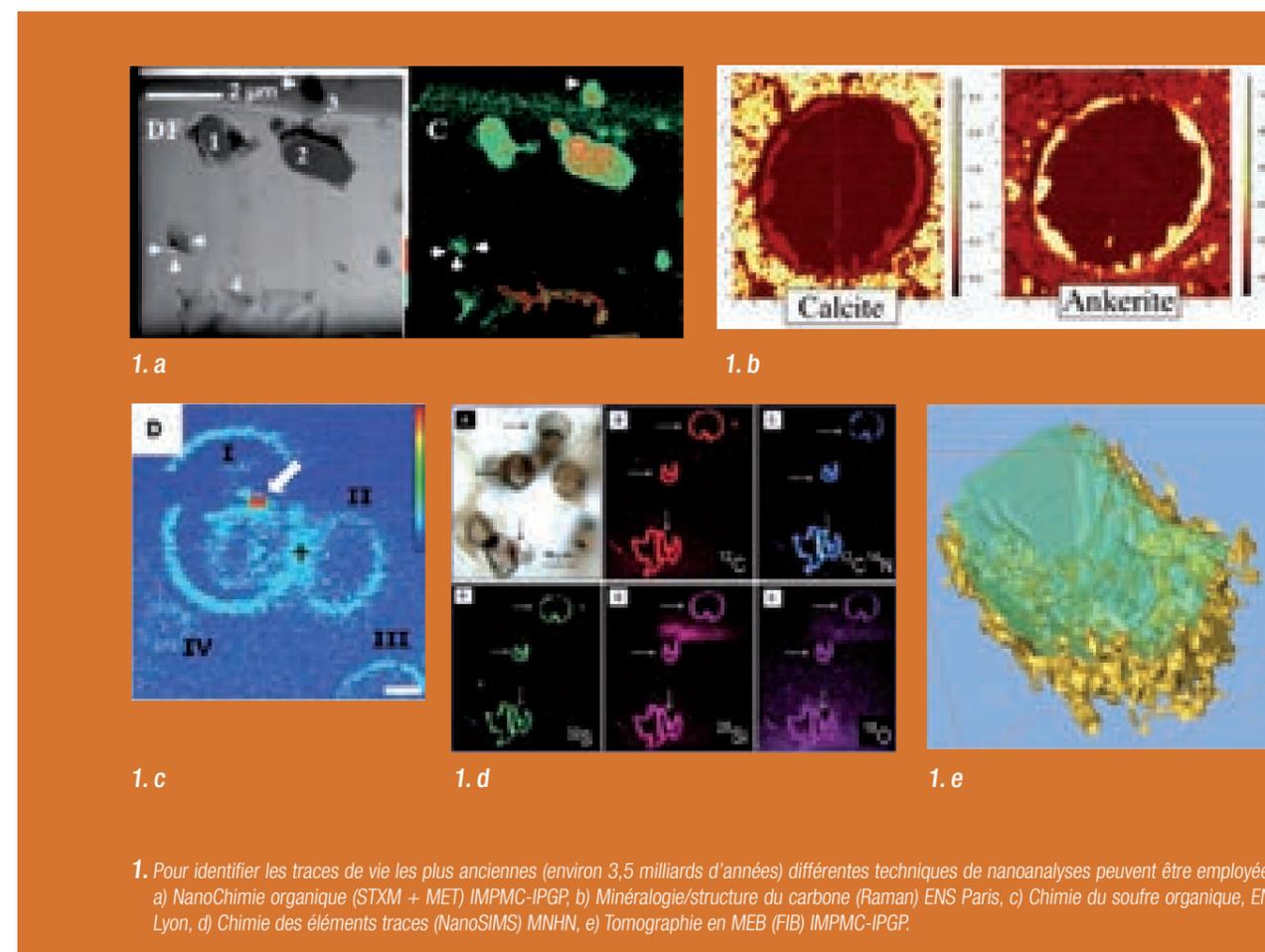
des processus de fossilisation constitue une caractéristique propre à ce thème, absente des deux précédents thèmes. Cette thématique pose par ailleurs le problème très concret de la conservation des sites fossilifères exceptionnels (donc une conservation *in situ*) situés sur le territoire national. Il ne revient pas à l'INSU de répondre seule à cette question, mais elle doit être prise en compte : les gisements exceptionnels devraient pouvoir être considérés comme un outil pour les paléontologues, les sédimentologues.

• Contribution à d'autres axes

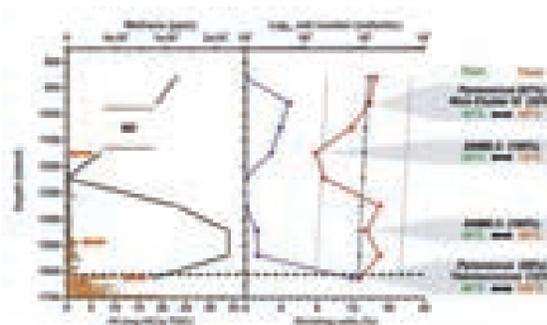
Pendant de nombreuses années, les paléontologues se sont collectivement focalisés sur le domaine de la biostratigraphie. Les résultats obtenus permettent aujourd'hui de considérer ce domaine comme un outil : « l'outil biostratigraphique » plus que comme un domaine de recherche de pointe. Cependant, cet outil biostratigraphique est toujours primordial pour certaines études strictement paléontologiques (e.g. étude des crises biotiques majeures) mais aussi dans de nombreuses études des sciences de la Terre : contrairement à certaines prédictions les besoins de référentiels biostratigraphiques se font toujours cruellement sentir... Il est également un point de rencontre avec l'industrie pétrolière. Dans ce cadre, il est clair que la communauté des paléontologues doit pouvoir être associée. Ainsi, la biostratigraphie pourra servir d'outil à une problématique de recherche pointue.

• Collections

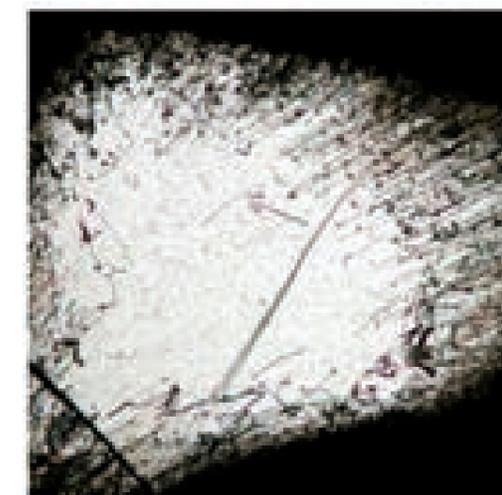
Les paléontologues français sont désormais relativement bien fédérés autour du projet Trans'tyfal, qui était soutenu par des fonds ministériels. Ce projet vise à référencer l'ensemble des spécimens types et figurés de la paléontologie situés sur le territoire national. Cette plateforme internet doit encore se développer, notamment en y injectant des référencements plus thématiques (par exemple un ensemble de données paléontologiques particulières sur une crise). Les coûts engendrés tiennent principalement à la main d'œuvre de saisie des données. **D'un point de vue plus général, les collections constituent un « équipement national » qu'il convient de soutenir massivement et enfin de reconnaître officiellement.**



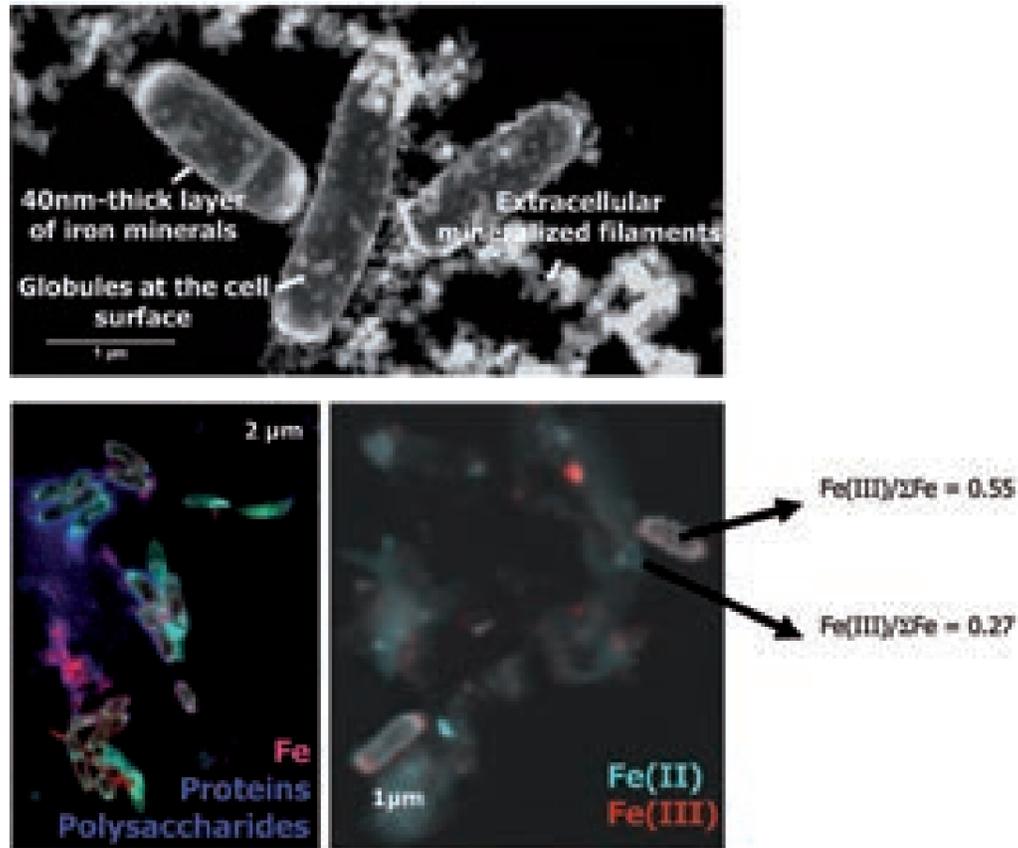
1. Pour identifier les traces de vie les plus anciennes (environ 3,5 milliards d'années) différentes techniques de nanoanalyses peuvent être employées. a) NanoChimie organique (STXM + MET) IMPMC-IPGP, b) Minéralogie/structure du carbone (Raman) ENS Paris, c) Chimie du soufre organique, ENS Lyon, d) Chimie des éléments traces (NanoSIMS) MNHN, e) Tomographie en MEB (FIB) IMPMC-IPGP.



2. Biosphère enfouie sous le plancher océanique, (Roussel et al. 2008 Science).



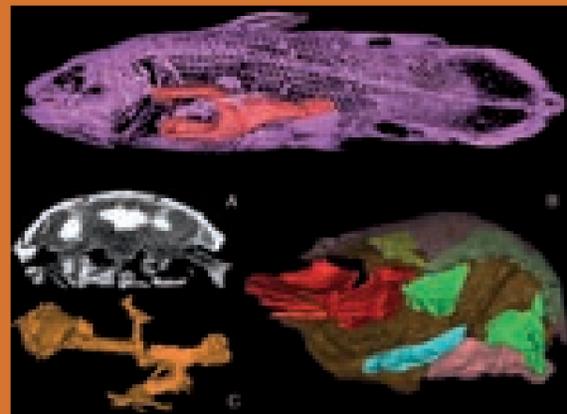
3. Verre basaltique attaqué par l'activité microbienne (Benzerara et al. (2008) EPS).



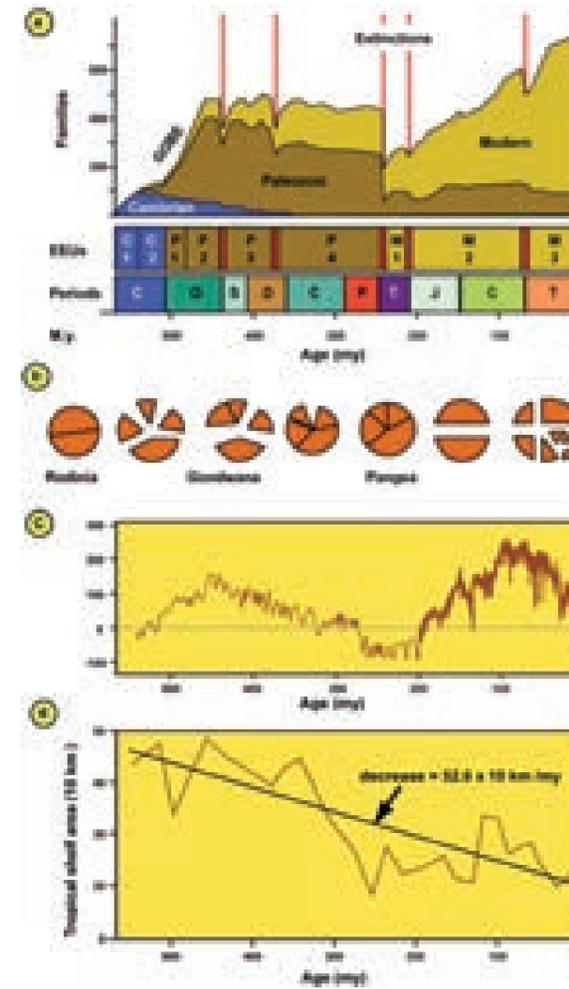
4. Imagerie fonctionnelle des fonctions géochimiques réalisées par les microorganismes, (Miot et al. 2008 GCA).



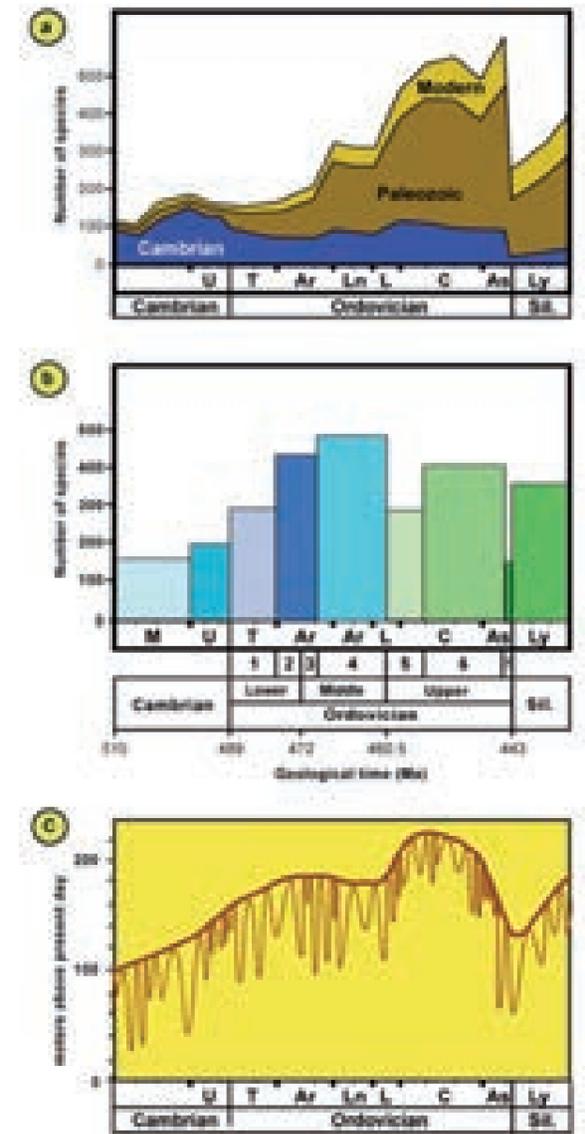
5. Lagerstätten, gisements fossilifères où la préservation des spécimens est exceptionnelle. Ici, feuille trilobée dans des argiles laminées (Crétacé moyen, Cénomaniens (98 Ma) de Charente-Maritime), (Géosciences Rennes).



6. Les équipements lourds tels les MEB, MET, ESRF, spectromètre de masse, nanosims, CT-scna donnent accès à la structure interne des fossiles.



7. a) Courbe de « Sepkoski » de diversité des organismes marins au cours du phanérozoïque montrant le relais des trois ensembles fauniques (Cm, Pz & Md), la diversification majeure de l'Ordovicien (GODE) ainsi que les cinq grandes crises majeures. EEU : unités évolutives écologiques (d'après Sheehan, 1996). b) Modèle d'éclatement des continents (d'après Valentine et Moores, 1972). c) Courbe globale de variation du niveau marin (d'après Miller et al., 2005). d) Abondance des plates-formes continentales tropicales au cours du phanérozoïque (d'après Walker et al., 2002). (Servais et al. 2009).



8. Corrélation des courbes de biodiversité entre : a) les invertébrés marins (d'après Webby et al. 2004), b) le microphytoplancton à paroi organique (Servais et al. 2008) et c) la courbe de changement global du niveau marin (Haq & Shutter 2008). (Servais et al. 2009).

Ressources minérales

Laurent Jolivet, François Guillocheau, Elisabeth Lallier-Vergès
Coordinateurs

Nous développons ici un petit nombre d'aspects sur ce problème par soucis de complétude, car ces aspects sont développés plus en détail dans le chapitre « enjeux sociétaux ». La géologie des ressources énergétiques et minérales fournit de nombreuses questions fondamentales sur les interactions fluides-roches ou la circulation des fluides et nécessite une expertise géologique de haut niveau. L'approvisionnement en métaux de base (Fe, Cu, Zn) est une condition indispensable au développement des pays émergents (Inde, Chine, Brésil). L'identification des gisements en métaux « précieux ou spéciaux » (Au, Ag, Pt, Ir, In, Cd, Ta...) est par contre une nécessité pour les économies des pays développés.

La géothermie et l'hydrothermalisme font appel à l'ensemble des connaissances nécessaires à l'étude de la croûte terrestre, de la géologie à la minéralogie, en passant par la géochimie, la géophysique, l'hydrodynamique et la thermo-mécanique.

Il faut considérer la genèse des gîtes minéraux comme un cas particulier des processus de transferts endogènes et exogènes, dans lequel la convergence inhabituelle de facteurs connus (métallotectes) permet la concentration d'éléments particuliers d'intérêts économiques. En ce sens toutes les recherches dans le domaine de la géodynamique trouvent une application en métallogénie qui doit être valorisée par les laboratoires et notamment la datation des sources et des processus de minéralisation.

La crise actuelle et les envolées des prix des substances énergétiques (hydrocarbures, gaz, charbons, ...) démontrent bien la nécessité d'en maîtriser l'identification, l'exploitation et la préservation. Or cette maîtrise implique l'acquisition de données de très haute précision sur les structures et les dynamiques des bassins sédimentaires et des marges continentales. Les réservoirs géologiques de la croûte supérieure doivent par ailleurs être regardés aujourd'hui aussi comme les sites de stockages de la ressource, voire des déchets.

L'architecture et l'évolution des blocs rocheux de l'échelle de la dizaine de kilomètres à l'échelle du pore est donc devenu un enjeu scientifique.

L'approvisionnement en eau des sociétés est le souci majeur du 21^{ème} siècle. La prédiction, l'évaluation et la protection de la ressource sont avant tout un problème de réservoir (architecture, dimensionnement, propriétés, vulnérabilité) dont la connaissance fondamentale appartient au savoir-faire des géosciences. Certaines méthodes d'exploration ou de suivi de cette ressource restent aujourd'hui très rustiques (comme le « piézomètre »), notamment face à celles qui sont déployées à plus grande profondeur pour l'extraction d'hydrocarbures. Il semble donc nécessaire de faire évoluer ces disciplines, tout particulièrement en y intégrant de façon plus directe une bonne connaissance de l'architecture géologique et géophysique du réservoir, ainsi que de son comportement dynamique. Il n'y a donc pas de raison pour que les chercheurs des sciences de la Terre se détournent des applications de la géologie.

■ Métallogénie

• Où sont les métaux pour l'avenir ?

Quels sont les processus de fractionnement à l'origine des hyper-accumulations métalliques ? Est-on capable de décrire le fonctionnement des grands systèmes métallogéniques ? Quelles sont les accumulations encore mal connues et comment se sont formés les gisements, délaissés parce que peu rentables. Ce sont là quelques-uns des enjeux de la métallogénie.

Développer de nouveaux modèles conceptuels de la formation des gisements exige une compréhension et une modélisation numérique et expérimentale du fonctionnement des sources (solubilité des porteurs, du transport des métaux par les phases fluides (nature des fluides, spéciation) et des processus de dépôt des métaux dans des pièges physiques ou chimiques.

Les acquis et savoir-faire

La communauté a su se doter d'un savoir-faire indéniable dans le domaine de la caractérisation des fluides, des relations entre migrations des fluides et déformation.

Plusieurs aspects restent à développer sur la base de la connaissance des objets et des processus concentrateurs :

- Mieux caractériser les sources des métaux, leur fonctionnement, notamment à travers des traçages isotopiques. La collaboration et l'accès à certaines techniques analytiques (microsonde ionique, ablation laser-ICP-MS avec excellente discrimination en masse) serait fondamentale.
- Relier les phases de migration précisément à l'histoire géologique (uplift, délamination crustale, magmatisme), temporellement grâce à des datations (un grand manque de calage temporel existe) et au développement de techniques nouvelles de datation sur les objets étudiés.
- Situer les transferts de fluides par rapport à la déformation crustale, à la rhéologie et à l'évolution thermomécanique de la croûte supérieure. D'où la nécessité d'une collaboration étroite avec des géophysiciens et des modélisateurs de l'évolution de la croûte.
- L'acquisition de données thermodynamiques sur les complexes métalliques reste incontournable pour une meilleure compréhension et modélisation numérique du transport/dépôt des métaux. Ceci est aussi valable pour le domaine de basse température.

Il est à noter que ces besoins sont très peu couverts par les ateliers et programmes actuels (sauf 3F en partie seulement).

Questions scientifiques spécifiques

- **Fonctionnement des sources des métaux : peut-on les identifier et développer un modèle conceptuel de leur fonctionnement ?**

- ◆ Traçage minéralogique, cristalochimique, géochimique (localisation des métaux (roches et porteurs) ;
- ◆ Comportement des métaux au stade magmatique (géochimie des magmas, teneurs préservées en métaux dans les inclusions magmatiques) ;
- ◆ Stabilité des porteurs en fonction des conditions physico-chimiques.

- **Transport des métaux par les phases fluides**

Mode de transferts de métaux :

- ◆ Fluides minéralisateurs : peut-on reconstituer précisément la paléochimie des fluides minéralisateurs (en particulier les concentrations en métaux en conditions de transport) et de leurs conditions de migration (pression-température-pH-pressions partielles des gaz) dans l'environnement des concentrations métalliques ?

- ◆ Relations avec circulation des fluides minéralisateurs, déformation de la lithosphère, la chenalisation et la déformation localisée, formation des pièges structuraux (modélisation des réseaux fracturés, et place des minéralisations par rapport au fonctionnement spatio-temporel des zones de drainage).

- **Processus de dépôt des métaux :**

- ◆ Solubilité des phases, spéciation du métal dans la phase fluide, processus impliqués dans le dépôt (mélanges, immiscibilité, modification du redox) : les données thermodynamiques essentielles manquent (données sur les sulfures, sur les complexes de métaux dans les saumures, ...).

- ◆ Interactions fluides-roches favorables aux dépôts : simulation numérique (modélisation thermodynamique du dépôt), et expérimentale encore insuffisante pour estimer les paramètres critiques contrôlant le dépôt.

- ◆ Evaluer le rôle réel de la matière organique sur les conditions physico-chimiques et le processus de dépôt.

- **Concentration dans le temps et dans l'espace**

En général, il faudrait continuer à appuyer la dynamique et l'excellence des équipes françaises notamment dans les domaines expérimentaux, et des paléofluides, et chercher à stimuler un pont avec la géodynamique (resituer le fonctionnement d'un système hydrothermal dans son contexte géodynamique), aspect non abordé par Transmet.

- ◆ Progresser dans la datation des objets minéralisés eux-mêmes : beaucoup de pvs restent dans la datation des épisodes minéralisateurs (progrès à faire dans la datation des objets difficiles (carbonates, sulfures) beaucoup plus abondants que les objets facilement datables : une session entière était consacrée à Dublin en août 2007 à ce sujet et était certainement la plus féconde).

- ◆ Modélisation stochastique des structures du sous-sol (modélisation des incertitudes).

- ◆ Couplages géométrie 3D-processus physiques et chimiques.

- ◆ Couplage géodynamique-mouvements de fluides : nécessité de se placer dans un cadre lithosphérique et planétaire : beaucoup trop de gisements ne sont décrits que dans un espace étriqué sans les replacer dans la formation des orogènes ou des bassins.

• Peut-on exploiter proprement et réhabiliter les sites pollués en métaux ?

• Problématique générale (en concertation avec les problématiques SIC/ EDD)

Le comportement des métaux aux interfaces géo/hydro/biosphères suit la même logique et exige d'évaluer les modes de fonctionnement des termes source (résidus miniers, zones contaminées), les modes de transport (ionique/ colloïdal) et les processus d'accumulation.

- ◆ Comment utiliser des matériaux autrefois considérés comme des « déchets » comme des ressources?
- ◆ Comment exploiter proprement ? Les géosciences ont leur mot à dire car les métallogénistes et minéralogistes connaissant beaucoup mieux le fonctionnement du terme source (porteurs, comportement, spéciation des éléments en solution). Ils doivent cependant s'associer aux biologistes pour développer les thématiques nouvelles sur le rôle des bactéries, sur le transport et l'accumulation des métaux dans la biosphère.
- ◆ Quels enseignements peut-on tirer du comportement supergène des métaux à proximité de concentrations métalliques naturelles (mines, carrières) et de leur remaniement anthropique éventuel ? La dispersion naturelle des métaux, leur séquestration dans des phases minérales néoformées, le transport sous forme de complexes organiques, inorganiques ou de particules (colloïdes ou particules de plus grande taille).

• Question scientifiques spécifiques

Transferts superficiels : Dispersion et accumulation de métaux en subsurface.

Il paraît logique et conjoncturel d'étendre les domaines de compétence des métallogénistes vers les problèmes environnementaux. Une nouvelle facette des domaines d'activités concernera donc les enseignements que l'on peut tirer du comportement supergène des métaux à proximité de concentrations métalliques naturelles avec deux sous thèmes :

- ◆ La séquestration des métaux dans des phases minérales néoformées, en particulier la compréhension des formes naturelles de rétention, la dispersion naturelle des métaux, en particulier leur forme de transport (complexes organiques, inorganiques ou de particules (colloïdes ou particules de plus grande taille).
- ◆ Il est projeté également de s'intéresser à la déconvolution des signaux naturels et anthropiques, en particulier la

définition du comportement du métal à l'état de traces dans le milieu naturel, à proximité de concentrations naturelles non exploitées, ou d'activités minières.

Les métallogénistes ont une expérience indéniable dans la minéralogie des phases minérales primaires des gisements qui est essentielle à la compréhension du fonctionnement du terme « source » lorsqu'une concentration métallique est mise à l'affleurement. L'association entre des minéralogistes et des géochimistes de l'eau (analyse, modélisation numérique) et des interactions eau-roche peut constituer une contribution essentielle des laboratoires de sciences de la Terre au domaine environnemental. Déjà une grande partie des laboratoires travaille dans ce sens mais sans fédération au niveau national, car une grande partie des projets est de nature régionale (exemple du GISFI « Fiches industrielles » en Lorraine).

Rôle des bactéries

Une grande partie des processus gouvernant l'altération des phases minérales primaires est contrôlée par les activités bactériennes. Il paraît logique de s'intéresser à la quantification du rôle des bactéries sur la dissolution des phases notamment sulfurées ou arséniées, et leur aptitude à modifier les systèmes (sulfato-réduction, néoformation de gaines silico-alumineuses, et piégeage de métaux par adsorption sur des minéraux finement divisés issus de l'activité bactérienne, ...).

Processus de transport et bio-accumulation

Le transport est réalisé en sub-surface par des particules minérales, ou des colloïdes organo-minéraux sur lesquels les métaux sont adsorbés ; il est important de connaître la stabilité des liaisons formées, leur devenir lors de modifications des conditions physico-chimiques (changement de redox dans des milieux de faible énergie par exemple, en présence de matières organiques dégradées (issues de végétaux supérieurs par exemple)).

Ecotoxicologie et métaux

La communauté des sciences de la Terre, de par la connaissance de la complexité des milieux naturels, de la minéralogie des sédiments et des réactivités des matières organiques, de la spéciation des métaux, devrait absolument se placer dans un domaine massivement occupé par les biologistes et les chimistes.

Il est important de relancer la recherche en géologie appliquée (métallogénie, hydrogéologie, pétrole...) dans les universités et de faire en sorte que la géologie appliquée soit en phase avec les recherches plus fondamentales. C'est un impératif sociétal et un impératif de formation.

Enjeux scientifiques spécifiques sol, sous-sol et eau

Ary Bruand, Philippe Davy, Jean-Dominique Meunier

Coordinateurs

Avec la participation de : Olivier Bour, Michel Cathelineau, Frederick Delay, France Lagroix, Benoit Noetinger, Hélène

Pauwels, André Revil, Pascal Salliac

Parce qu'ils sont intimement associés à des flux hydrologiques considérables, le sous-sol et les sols représentent de véritables éléments du couplage entre la dynamique interne de la Terre, les cycles externes et évidemment l'activité humaine. Il est donc tout à fait naturel qu'une prospective en sciences de la Terre s'y intéresse.

Dans la communauté internationale, il existe une recherche très active sur ces systèmes à la mesure des enjeux qu'ils concentrent :

- Ce sont des systèmes critiques pour un certain nombre de grands phénomènes géologiques et de grandes problématiques environnementales.
- Ce sont des ressources au centre des grandes préoccupations environnementales, mais qu'il est impossible de comprendre et de modéliser sans prendre en compte la dimension géologique.
- Ils représentent des systèmes emblématiques de la complexité à la fois par leur structure (hétérogénéités à toutes les échelles) et leur dynamique (grand nombre d'interactions).
- Ils ont des évolutions à des échelles de temps très diverses avec des évolutions géologiques importantes car constitutives, et des fonctionnalités mises en œuvre sur des pas de temps très courts.
- Leur caractérisation, observation et modélisation représentent 3 enjeux majeurs de la recherche qui répond à une problématique de gestion de ces ressources. La dimension nécessairement « prédictive » de ces recherches leurs donne une exigence forte autant sur le résultat que sur le niveau de détail qu'il faut atteindre.
- Enfin (et non en moins), ils restent des systèmes largement sous-contraints où la connaissance objective n'est pas à la hauteur des enjeux de prédiction.

Au sein de la communauté scientifique, ces thèmes de recherche sont organisés à différents niveaux, autour :

- ◆ De systèmes différents (zone vadose, bassins sédimentaires, aquifères de socle, ...);
- ◆ De problématiques (ressource en eau, stockage de déchets, énergie, ...);
- ◆ De processus (physiques, chimiques, microbiologiques, ...);
- ◆ De disciplines/communautés (pédologie, hydrogéologie, géologie sens lato, géophysique, sciences de l'ingénieur, physique, chimie, biologie, sciences humaines et sociales, ...).

Cela traduit à la fois la complexité des phénomènes en jeu et la diversité des approches, et donc un fort besoin de recherches pluridisciplinaires.

■ Les problématiques scientifiques • Caractériser et modéliser l'hétérogénéité des milieux et des flux

Sans viser l'exhaustivité, nous mettons en exergue quelques thématiques importantes actuellement très actives dans la communauté. Elles sont motivées par une dimension cognitive forte, par des applications, ou par les deux.

Comme l'intérieur de la Terre, le sous-sol reste une « terra incognita » dont la structure n'est approchée que très partiellement. Dans les milieux les plus hétérogènes (aquifères karstiques ou fracturés), le degré de résolution des

méthodes actuelles sur les structures et surtout sur les flux est extrêmement faible. Or la connaissance de ces structures est un enjeu majeur pour la gestion de ces ressources et le développement de modèles réellement prédictifs.

Le développement des méthodes non invasives

Le forage est la méthode classique d'exploration du sous-sol, mais 1) il ne donne qu'un échantillonnage très limité d'un milieu où des hétérogénéités existent souvent à toutes les échelles, et 2) il peut modifier considérablement les circulations souterraines. Aller plus loin dans la connaissance des structures du sous-sol et des écoulements passe par le développement de méthodes non invasives de tomographie géophysique. Ce champ de recherche est actuellement très actif avec des progrès considérables sur des méthodes classiques (électriques, électromagnétiques, géoradar, sismiques, etc.) ou plus nouvelles (polarisation induite, résonance magnétique du proton, etc.). Deux nouvelles pistes sont particulièrement à encourager : le développement de méthodes sensibles aux flux (polarisation spontanée, RMN, gravimétrie, etc.), et l'analyse très fine des mouvements du sol (inclinométrie, GPS, etc.). L'objectif poursuivi est de développer une nouvelle approche de la géophysique qui à la fois produise une tomographie de haute-résolution, et soit discriminante sur la nature des flux et/ou sur la composition chimique de l'aquifère, y inclus celle du compartiment biologique.

Le développement de ses méthodes passe par 3 voies de recherches parallèles :

- Une compréhension théorique des phénomènes physiques mis en jeu dans le signal géophysique – comme c'est le cas pour les phénomènes électro-sismiques et électrocinétiques, par exemple – ;
- Le développement de méthodes pétrophysiques pour mesurer en laboratoire les paramètres physiques de l'eau et des roches qui permettront d'interpréter quantitativement le signal géophysique ;
- Le développement de nouveaux capteurs pour de nouvelles mesures, des mesures plus précises, des approches multi-paramètres, ou des fonctionnements plus automatisés et « intelligents ».

L'approche spatiale est aussi à mentionner car il existe un potentiel d'interprétation des données liées à l'hydrologie qui reste à explorer.

La connaissance des temps de transferts

La connaissance des temps de transferts dans les systèmes souterrains est évidemment un élément-clé de compréhension

et de quantification des systèmes hydrogéologiques. Mais elle est restée longtemps rudimentaire, principalement par manque de méthodes de datation. Les choses évoluent et des progrès considérables sont faits dans deux voies différentes : les méthodes basées sur les isotopes radioactifs (cosmogéniques, chaîne de désintégration de l'Uranium, etc.), classiques pour les roches, se développent de plus en plus pour les eaux ; le traçage des polluants atmosphériques (CFC, SF₆), qui ont été utilisés avec succès en océanographie, sont maintenant appliqués aux eaux souterraines.

Le développement et l'application de ces méthodes aux systèmes hydrogéologiques est évidemment à encourager.

La prise en compte de la « complexité naturelle » dans les modèles d'écoulement et de transport

La reconnaissance de la complexité des (sous-)sols et sa prise en compte dans les modèles est une tendance lourde de l'hydrogéologie. Cette complexité est à la fois structurelle, liée à la présence à toutes les échelles de structures « catastrophiques » (i.e. celles qui ont un impact sur le fonctionnement beaucoup plus important que leur volume relatif) telles que les fractures ou les karsts, et réactionnelle. Elle remet en question un certain nombre d'hypothèses de modélisation qui avait été formulées sur des milieux homogènes ou peu hétérogènes.

Les recherches dans ce domaine sont nombreuses et portent par exemple :

- Sur l'intégration spatiale de l'hétérogénéité dans des modèles équivalents qui restent compatibles avec le milieu naturel ;
- Sur l'adoption de descriptions probabilistes du milieu et de techniques issues des approches stochastiques : équations aux dérivées partielles à coefficients aléatoires en mathématiques, théories des champs dans les approches de physiciens, etc. ;
- Sur la prise en compte du caractère multi-échelle de l'hétérogénéité ;
- Sur l'homogénéisation des processus non-linéaires (réactivité, multiphasique, ...).

Notons que la pertinence de ces recherches souvent théoriques ou numériques passe par une connaissance non pas théorique mais réelle du milieu géologique. Nous avons cité les méthodes non invasives particulièrement prometteuses ; il faut les associer aux mesures en forage qui ont encore un potentiel très important de développement, que ce soit en diagraphie, afin d'améliorer la résolution des images à proximité de puits de forage, ou sur la mesure *in-situ* des propriétés du solide ou

des fluides présents, ou sur les méthodes d'interférence entre puits. L'enjeu dans les années futures sera donc de proposer des méthodes fiables appropriées aux aquifères hétérogènes.

Le problème inverse

La modélisation a pour finalité d'être un outil d'aide à la gestion de ces ressources, ce qui requiert une bonne capacité prédictive pour prévoir les évolutions possibles de ces milieux. Cette qualité n'est obtenue que si les modèles sont calés de manière pertinente sur des données. Cet exercice – le problème dit inverse – présente plusieurs difficultés qui constituent autant d'axes de recherche. La première est plutôt théorique. Le problème inverse s'adresse à un milieu très peu contraint au regard de son hétérogénéité. Il s'agit donc de trouver le couple modèle/données qui optimise la pertinence de la prédiction. La deuxième est plus méthodologique. Pour être prédictif, un modèle doit avoir un degré de résolution important et donc être décrit par un nombre suffisant de paramètres. Or, au-delà d'un certain nombre de paramètres, il est numériquement impossible d'en faire une exploration systématique. Il faut donc développer des méthodes adéquates pour trouver la solution de l'espace des paramètres qui soit la plus compatible avec les données.

Notons enfin que ces recherches nécessitent des moyens numériques mais aussi des sites suffisamment instrumentés pour tester la pertinence des modèles sur des jeux de données importants.

• Identifier et modéliser la réactivité des milieux

Les sols et les aquifères souterrains sont de véritables réacteurs biochimiques qui jouent un rôle essentiel sur le stockage ou la transformation des polluants. L'identification des phases et la compréhension des processus thermodynamiques élémentaires restent des enjeux fondamentaux de la recherche avec des conséquences directes, par exemple, sur le rôle des sols dans la capacité de stockage du carbone et donc dans les cycles climatiques.

Ces enjeux dépassent largement le cadre des sciences de la Terre et ont été largement développés dans la prospective INSU de 2007 sur les « Surfaces et Interfaces Continentales ».

Identification des phases et des interactions thermodynamiques eau-sol-biologie

Pour les sols, l'un des objectifs serait de se rapprocher de la précision des données en biologie moléculaire sur les relations entre fonctionnalité et structure. Cela passe par

une connaissance des constituants solubles, de la fraction macromoléculaire insoluble ainsi que de la dynamique des interactions entre la matière organique et les minéraux finement divisés qui régissent la structure et l'activité des sols.

Dans les aquifères, la réactivité est peut-être, mais ce n'est pas sûr, un peu moins complexe mais le manque de données directes rend la caractérisation des phases et des réactions plus difficile. Il est donc important de développer des méthodes qui permettent l'identification et le suivi des réactions in situ. Là aussi, la thermodynamique biochimique est un enjeu majeur pour comprendre les réactions d'adsorption/désorption, d'oxydoréduction, etc., naturelles ou associées à la transformation de substances exogènes.

Biominéreaux

Dans les formations sédimentaires les biominéraux sont des marqueurs environnementaux largement utilisés. Dans les études de sols, ces marqueurs sont beaucoup moins bien connus alors qu'ils offrent pourtant un potentiel large pour mieux comprendre les cycles des éléments terrigènes (ex : Si, Fe, Ca...) dans des contextes naturels ou anthropisés. Les processus de biominéralisation dans les sols ont pour origine d'une part les végétaux (ex. biominéralisation siliceuse sous la forme de phytolithes) engendrant, entre autres des potentiels de séquestration du CO₂ et d'autre part les bactéries (ex. réduction des métaux Fe, Mn, S, ...) par voie dissimilatrice lors de la respiration anaérobie, jouant par là-même un rôle important dans les processus d'altération dans les sols (pédogenèse).

Diversité et fonctionnalité microbienne

L'écologie des sols et du sous-sol est en train de devenir une préoccupation environnementale forte qui manque encore de données quantitatives objectives. D'un point de vue très général (ce sujet a été largement développé dans la prospective sur les Surfaces et Interfaces Continentales), les nouvelles méthodes de la génomique vont permettre une identification la plus exhaustive possible de la biodiversité souterraine, l'enjeu étant de faire le lien avec sa fonctionnalité.

• Développer les approches systémiques vis-à-vis des forçages climatiques-météorologiques, géodynamiques, et anthropiques

Les sols et les aquifères sont à la fois des systèmes à part entière soumis à des forçages complexes, et les éléments de cycles beaucoup plus globaux comme le cycle climatique.

Ces visions intégrées des processus sont à développer pour comprendre à la fois les déterminants de leur évolution et leur rôle dans le fonctionnement des grands cycles terrestres.

L'évolution des sols et des aquifères en réponse aux forçages climatiques, géodynamiques et anthropiques

Aux interfaces biosphère, hydrosphère, cryosphère, atmosphère et géosphère, les (sous-)sols sont d'abord le produit des interactions de ces différents compartiments créant ainsi une interface additionnelle. Leur structure et évolution pulsent aux rythmes des nombreux cycles terrestres (saisons, cycles glaciaire-interglaciaires, cycles subsidence-exhumation, biologiques, agronomiques ...) nécessitant une déconvolution du système afin d'évaluer et de caractériser les fonctions de réponses aux divers cycles individuellement. La compréhension des déterminants réels de leur évolution, et/ou des couplages, est un prérequis indispensable à la question de la vulnérabilité et du renouvellement de ces ressources.

La question se pose évidemment pour les sols avec des recherches actives menées au sein du CNRS mais aussi de l'INRA ou de l'IRD.

Le fonctionnement des aquifères est beaucoup moins étudié avec ce point de vue mais des recherches récentes sur l'hydrologie des grands bassins sédimentaires soumis aux cycles tectoniques et climatiques, et sur l'érosion chimique des aquifères, ont montré qu'il y avait un intérêt scientifique indéniable à développer ce type de recherches.

Le (sous-)sol constituant des grands cycles climatiques

La contribution des sols au cycle climatique fait l'objet de nombreuses études tant du point de vue énergétique que chimique. Nous renvoyons à la prospective de l'INSU « océan, atmosphère » de 2006 pour décrire les principaux enjeux scientifiques et méthodologiques. Deux points complémentaires :

- Les sols anciens – dits paléosols – constituent autant d'archives continentales qui sont d'une importance majeure dans l'étude des climats du passé. Elles sont à ce jour sous exploitées. Elles représentent une contrepartie aux nombreuses archives marines qui dominent largement les données d'entrées des modèles climatiques passé et future.
- Les eaux souterraines sont souvent négligées dans ces études. Pourtant des modélisations récentes montrent que leur contribution mérite d'être mieux étudiée car elles participent au bilan hydrologique et sont en interaction avec la zone non saturée.

■ Points complémentaires

• Problématiques environnementales et sociétales

Les recherches sur le (sous-)sol et l'eau sont souvent ancrées sur des grandes problématiques environnementales ou industrielles. Pour une description exhaustive des enjeux scientifiques relatifs à ces problématiques, nous renvoyons le lecteur au chapitre « enjeux industriels et sociétaux ». Cela concerne principalement :

- La question des ressources (eau souterraine, sols, réhabilitation) ;
- Les risques (inondation, glissements de terrain) ;
- L'énergie (géothermie, aval du cycle énergétique : séquestration du CO₂, déchets nucléaires).

Il faut noter que la collaboration entre les industriels (ou les organismes d'état) en charge de ces questions et les scientifiques est extrêmement fructueuse pour plusieurs raisons. Les questions scientifiques posées touchent de près à une connaissance très fondamentale des systèmes et au développement de méthodes performantes d'analyse ou de modélisation. Sur un certain nombre de projets, les industriels ont construit des infrastructures uniques d'observation et d'expérimentation *in situ* dont le financement aurait dépassé les moyens académiques.

• Priorités de développement

La communauté scientifique

La situation de la recherche en France sur ces thématiques est paradoxale. D'un côté, on recense un grand nombre d'acteurs institutionnels (EPST, EPIC, ministères, universités, ...) et de nombreuses associations scientifiques nationales (AIH, CFH, AFES, Société Hydrotechnique de France, Groupe Français des Argiles, ...) qui jouent un rôle considérable de promotion de leur propre discipline, d'animation de la réflexion sur les problématiques environnementales, et de formation des ingénieurs et des experts.

De l'autre, même s'il existe des exceptions notables, la recherche française dans le domaine de l'eau reste sous-dimensionnée par rapport aux enjeux et aux recherches pratiquées aux Etats-Unis et dans les grands pays européens (Allemagne, Angleterre, Italie, Suisse). Les raisons sont multiples et souvent institutionnelles, liées à un manque de priorités sur ces champs de recherche vis-à-vis d'autres

domaines des sciences de l'Univers (géochimie, géophysique interne et externe, astrophysique, etc.)

L'implication de la communauté des sciences de la Terre reste très modeste, essentiellement centrée sur quelques grands enjeux sociétaux et industriels : le stockage souterrain des déchets radioactifs (collaborations CNRS-ANDRA), la séquestration du CO₂, et les études sur les climats anciens.

Le développement de ces recherches passe donc par une politique volontariste de recrutement dans les prochaines années sur des postes de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens. Une concertation entre les différentes disciplines concernées (sciences de la Terre, hydrologie, biologie, physique) et les établissements (CNRS, universités, autres EPST) est évidemment souhaitable pour créer des groupes de recherche possédant une masse critique suffisante.

Un effort doit aussi être fait dans le domaine de la formation universitaire pour développer le vivier de scientifiques qualifiés. Une politique active d'échange d'étudiants avec les institutions étrangères est évidemment à encourager. Notons que le besoin de formation ne se situe pas que dans le monde académique. L'industrie et les collectivités territoriales ont aussi des besoins importants de recrutement dans les prochaines années (voir le rapport BRGM sur le sujet).

Les recherches cognitives

Tout d'abord, nous soulignons une nouvelle fois le rôle extrêmement bénéfiques des programmes nationaux comme le Programme National de Recherche en Hydrologie ou le Programme National Sol et Erosion, qui ont permis d'établir un réseau efficace de partenaires scientifiques et de développer des projets d'envergure.

Il nous semble nécessaire de maintenir un programme de recherches fondamentales sur le (sous-)sol et l'eau, avec une ouverture élargie vers des disciplines connexes comme la physique, la chimie ou la biologie, en partenariat avec l'ensemble des partenaires français, EPST (INRA, IRD peut-être CEMAGREF), EPIC (BRGM, ANDRA) ou grands groupes ayant des capacités de recherche (Schlumberger, Veolia, ...).

Les sites d'observation

Le principal point de blocage reste l'observation *in situ* de ces milieux complexes. Pour le lever, il faut pouvoir disposer de sites représentatifs et fortement instrumentés. Les grandes infrastructures souterraines développées dans le cadre des programmes industriels sur le stockage de CO₂, le stockage

de déchets nucléaires, etc., représentent une opportunité exceptionnelle pour la communauté scientifique qu'il faudra saisir.

Il est nécessaire de développer en parallèle des sites dévolus d'un côté à l'observation long terme des phénomènes, et de l'autre à l'expérimentation *in situ*. En hydrogéologie, le service d'observation H⁺ (réseau national de sites hydrogéologiques) joue ce rôle en se donnant pour objectif de développer des sites qui deviennent des références internationales. Il reste à définir une structure équivalente dans le domaine des sols ou du continuum sol - zone non saturée - nappe.

Ces sites doivent participer à la validation de protocoles expérimentaux innovants ou de nouveaux outils de caractérisation *in situ*.

Les moyens et plateformes nationaux

Ces recherches nécessitent des moyens lourds qui existent pour partie actuellement, mais qu'il faut rendre disponible à la communauté. Cela concerne en particulier :

- La télédétection aéroportée ;
- Les grands instruments de caractérisation spectroscopiques et géochimiques ;
- L'imagerie X des microstructures (~μ) par synchrotron ;
- Les chaînes de mesure pétrophysique, etc ;
- Une réflexion devrait être menée pour le développement d'un parc instrumental de moyens de forage, sondes multi-paramètres, sondes voltamétriques, équipements géophysiques (électrique, sismique, Audio MT, RMP), spectroscopie de terrain (IR, gaz des sols, ...) ;
- Enfin, la question des plates-formes numériques nationales se pose.

Les développements en R&D

Le développement de la mesure *in situ* est essentiel, et doit se faire avec des collaborations industrielles. Il concerne de nombreux domaines de la géophysique, des capteurs géochimiques, de la bactériologie, micro-LIBS, micro-Mössbauer, équipements de forages (obturateurs, ...), prélèvements notamment dans la zone non saturée, etc.

Enjeux spécifiques outils numériques en sciences de la Terre

J-P. Vilotte

Coordinateur

Avec la participation de : Etienne Chaljub, Emanuel Dormy, Frédéric Fluteau, Alexandre Fournier, Jean-Pierre Virieux

■ Introduction

Comprendre et prévoir le fonctionnement et l'évolution du système Terre dans son environnement, prévoir et prévenir les risques naturels et environnementaux à court, moyen et long termes, constituent un enjeu et une mission de l'INSU.

Pour y répondre il est indispensable de combiner :

- Des observations physiques et environnementales sur de longues échelles de temps ;
- Des outils de traitement et d'analyse de gros volumes d'observations, de plus en plus complexes permettant d'extraire des informations nouvelles ;
- Des modèles et d'outils numériques pour la simulation quantitative et prédictive des systèmes géologiques sur les échelles de temps et d'espace impliquées ;
- Des méthodes performantes d'inversion et/ou d'assimilation de données permettant de contrôler ces modèles, et d'imager l'intérieur de la Terre, en exploitant la dynamique des observations actuelles.

La modélisation et la simulation numériques sont devenues en sciences de la Terre un outil de recherche puissant, au coté des outils d'acquisition et de traitement d'observations, permettant l'étude quantitative et prédictive de systèmes naturels issus des domaines scientifiques fondamentaux, ainsi que leur impact économique et sociétal dans les domaines de l'environnement, des risques naturels et de la gestion et l'exploitation des ressources énergétiques.

Dans le même temps, le volume et la résolution des observations géophysiques ne cessent d'augmenter grâce aux progrès de l'instrumentation et des techniques d'acquisition et de transmission de données. La validation, l'analyse et la

modélisation de ce flux de données, distribuées pour partie par les centres de données des observatoires, sont aujourd'hui des enjeux importants en sciences de la Terre.

Une politique émerge aujourd'hui autour des grands centres nationaux. En janvier 2007, la société civile GENCI (Grand Equipement National pour le Calcul Intensif), regroupant l'état, le CEA, le CNRS et les universités, a été créée. Le GENCI a une mission de maîtrise d'ouvrage pour les grands calculateurs et représente la France dans les infrastructures de recherches européennes.

La nécessité de créer au niveau européen une infrastructure de calcul haute-performance a été identifiée pour des applications frontières issues de différents domaines scientifiques dont celui des sciences de la Terre. L'Europe devrait se doter d'un certain nombre d'infrastructures ~ 1 Petaflops dans moins de 2 ans, notamment au travers du projet PRACE (Partnerships for advance computing in Europe), démarré en janvier 2008, et articulé autour de cinq principaux pays (Allemagne, Espagne, France, Pays-Bas, Royaume Unis).

Ces évolutions engagent la communauté des sciences de la Terre à mieux se structurer autour d'un certain nombre d'enjeux afin de contribuer et de bénéficier scientifiquement de ces investissements nationaux et européens. Une telle politique de grandes infrastructures doit s'appuyer sur une pyramide de ressources équilibrée, et en particulier une stratégie de méso-centres à l'échelle des communautés scientifiques, répondant à des besoins plus ciblés en termes de ressources partagées et d'environnement interactif. Cet aspect est essentiel afin que ces communautés puissent relever les défis méthodologiques posés par l'utilisation des nouvelles technologies de calcul haute-performance des très grands centres nationaux et européens. Ces dernières années ont vu l'émergence d'un certain nombre de méso-centres en sciences de la Terre, de

taille et de finalité parfois hétérogènes, résultat d'initiatives locales plus que d'une véritable politique coordonnée par l'INSU et les universités.

L'INSU doit définir une stratégie au niveau national pour le déploiement et l'évolution de ressources en matière de calcul intensif et de traitement de données pour : renforcer leur mutualisation et leur intégration dans la pyramide de ressources au niveau national et européen ; favoriser l'utilisation de ces ressources par les équipes de recherche et les services d'observation en sciences de la Terre ; mieux structurer la communauté et permettre les développements méthodologiques de certaines applications frontières en vue de l'utilisation des très grandes ressources de calcul intensif au niveau national et européen. Cette politique doit être construite autour de ces missions et être associée aux besoins des observatoires et des équipes de recherche en sciences de la Terre. Elle devra également prendre en compte l'émergence des technologies de type « GRILLE », au niveau national et européen, avec la création récente de l'Institut des Grilles par le CNRS.

■ Quelques enjeux

Quelques enjeux et défis qui se posent aujourd'hui à la modélisation numérique en sciences de la Terre sont brièvement identifiés ici.

• Modélisation et simulation numérique

Couplage de modèles

Il est aujourd'hui fondamental de pouvoir étudier les interactions entre des systèmes naturels jusqu'ici conceptuellement modélisés et simulés de manière séparée. L'évolution de la capacité des architectures parallèles permettent de nouveaux développements méthodologiques autorisant le couplage entre des modèles physiques et numériques dont les régimes dynamiques, et les échelles spatio-temporelles, sont souvent différents. Ces développements sont critiques en particulier dans les domaines de la modélisation de l'évolution des climats anciens, des fluctuations rapides du climat, de la géodynamo et des fluctuations du champ magnétique, des interactions noyau-manteau et noyau-graine, de l'évolution du cycle sismique, et de la simulation des mouvements forts associés aux séismes ...

Modélisation multi-échelles

La modélisation des systèmes géologiques requiert la prise en compte d'échelles de temps et d'espace qui diffèrent de

plusieurs ordres de magnitudes, de manière à dépasser les limites des approches empiriques actuelles, basées sur des modèles « paramétrés » dont la validité aux diverses échelles est questionnable. L'augmentation de la capacité des solutions de calcul parallèle et de stockage autorise aujourd'hui des développements méthodologiques permettant la construction d'une hiérarchie de modèles formulés chacun de manière consistante, par homogénéisation théorique ou numérique, à partir de simulations aux échelles inférieures. C'est le cas dans les domaines de la propagation d'ondes en milieu géologiques, de la dynamique de la rupture sismique, de la dynamique du noyau liquide, du géomagnétisme, des mécanismes physiques d'érosion et de transport fluide, de l'hydrologie et de la dynamique des fluides en milieu poreux ...

Quantifier les incertitudes

La modélisation et la simulation numérique des systèmes géologiques sont imparfaites. Les processus physiques, et leurs interactions, sont parfois incomplètement compris. La connaissance des milieux géologiques reste incomplète à certaines échelles. Il est donc essentiel de caractériser la sensibilité aux paramètres, les incertitudes et la variabilité de ces simulations numériques, et ce en termes probabilistes. Cela nécessite le développement d'approches de type stochastique impliquant des réalisations d'ensemble et donc de nombreuses simulations numériques ainsi que leur analyse probabiliste *a-posteriori*. Dans les domaines des risques naturels et environnementaux, i.e. modélisation de l'évolution du climat, des mouvements forts associés à la réponse sismique, ou des mécanismes de transport et d'érosion de surface, il s'agit d'un défi important.

• Traitement et analyse de données

Validation des données

Le contrôle de qualité des observations, issues des observatoires (sismologie, volcanologie, magnétisme, environnement), des chantiers expérimentaux et des techniques d'instrumentation spatiales, dont le volume et la résolution ne cessent d'augmenter, est une étape essentielle avant leur distribution dans la communauté scientifique nationale et internationale au travers des centres des services d'observation nationaux. Cela implique le développement de chaînes de traitement automatisées disposant de ressources de stockage hiérarchisé et de calcul distribué intégrées, proches des ressources des centres d'archivage et de distribution des observatoires, au sein de réseaux de communication disposant d'une bande passante importante.

Traitement et analyse des données

L'extraction d'informations nouvelles à partir des observations continues en temps, dont la dynamique et la résolution ne cessent d'augmenter, requiert aujourd'hui le développement d'outils d'analyse et de traitement complexes capables de manipuler de gros volumes de données homogènes, ou multi-attributs. C'est un enjeu important en particulier dans le domaine de la surveillance des risques naturels (sismologie, volcanologie), environnementaux (stockage, climat), et industriel (traitement sismique, réservoirs). Cette capacité est également devenue indispensable afin de mieux exploiter la structure fine des signaux observés, et leur variabilité temporelle, en particulier la partie non cohérente associée aux hétérogénéités de propriétés et/ou aux fluctuations environnementales. C'est le cas dans les domaines des fluctuations du champ magnétique, des fluctuations rapides du climat, de la sismologie et de la géodésie ...

Imagerie spatiale

L'analyse des données d'imagerie spatiale requiert le développement de chaînes de traitement robustes permettant de manipuler et de traiter un nombre croissant d'images. C'est en particulier le cas dans les domaines de l'interférométrie (InSAR) radar et du traitement d'image haute résolution ...

Données synthétiques

Les simulations numériques, bientôt stochastiques, des systèmes géologiques génèrent un volume de plus en plus important de données synthétiques dont l'analyse et le traitement exigent des ressources de stockage et de calcul similaires à celles associées au traitement et à l'analyse des observations continues. C'est le cas dans le domaine de la sismologie (propagation d'onde et sismogrammes synthétiques) et de la dynamique des tremblements de Terre, mais également de l'évolution des climats anciens.

- **Inversion et/ou assimilation de données**

Avec les avancées réalisées dans les domaines de l'acquisition et de l'instrumentation, le principal défi en sciences de la Terre est aujourd'hui le développement de nouvelles méthodes d'inversion performantes afin de contrôler les paramètres des modèles, augmenter la résolution 3D de la structure interne de la Terre, aux échelles globales et locales. Un tel développement requiert des solutions de calcul intégrant des architectures parallèles performantes disposant d'une capacité mémoire importante et des serveurs de stockage disposant d'une capacité importante et d'accès disque rapides.

Inversion par méthodes globales

Les méthodes d'inversion probabilistes sont les seules qui peuvent permettre d'explorer de manière globale ou semi-locale l'espace des paramètres de ces modèles via des algorithmes de type recuit simulé, génétique ou Monte-Carlo. Leur utilisation reste malheureusement aujourd'hui limitée aux problèmes dont la dimension de l'espace des paramètres est réduite, et ce malgré l'évolution rapide de la puissance des solutions de calcul. Le développement de stratégies parallèles efficaces pour l'exploration de l'espace des modèles et de techniques permettant de résoudre en parallèle, et/ou de manière distribuée, le nombre important de simulations directes impliquées constitue le défi des prochaines années. Les domaines concernés par de telles approches sont aujourd'hui par exemple la sismologie (tomographie, inversion de la source sismique), champ magnétique et gravimétrie ...

Inversion par méthodes locales

Pour les problèmes dont la dimension de l'espace des paramètres reste hors de portée des méthodes non linéaires, l'exploitation des méthodes adjointes, associées à une linéarisation locale du problème, ouvre aujourd'hui des perspectives concrètes pour l'inversion et l'assimilation de données, via des stratégies d'optimisation itératives et multi-échelles. Cela passe par l'utilisation de méthodes parallèles, en temps ou en fréquence, permettant de résoudre efficacement le grand nombre de simulations associées aux problèmes direct et adjoint, ainsi qu'une augmentation considérable des capacités de stockage. Les principaux domaines concernés sont aujourd'hui l'imagerie sismique 3D et 4D, la tomographie (inversion de la forme d'onde ou du signal complet, inversion par méthodes de corrélation), inversion de sources étendues, fluctuations du champ magnétique, dynamique du noyau liquide ...

Assimilation de données

Le développement de méthodes d'assimilation de données est aujourd'hui un domaine émergent en sciences de la Terre. Pour certains systèmes dynamiques, comme la dynamique des fluides dans le noyau, ces méthodes passent par la construction de distributions de probabilité des états assimilés à partir de modèles dynamiques déterministes intégrant un terme de bruit, pour d'autres systèmes, tels que les modèles de sismicité, les méthodes d'assimilation impliquent la construction d'une distribution à partir de celles des variables d'état du fait de la nature stochastique du problème. Ces méthodes ont des besoins de calcul et de stockage élevés en raison la dimension du nombre de variables d'état, de la caractérisation de

leur distribution et de la modélisation de leur évolution. Le développement de ces méthodes constitue un défi pour les années à venir.

Pour que ces objectifs se concrétisent, il est nécessaire de disposer d'une politique pour l'évolution et le déploiement des ressources de calcul intensif en sciences de la Terre, et d'une stratégie associant étroitement :

- Des solutions de calcul parallèle performantes ;
- Des serveurs de stockage hiérarchisé combinant accès rapides et volume important ;
- Des accès à des ressources de calcul et de stockage distribuées de type grille.

■ Structure

- **Pyramide de ressources nationales et européennes**

Les ressources pour répondre aux enjeux de la modélisation et de la simulation numérique, issus d'applications et de communautés scientifiques variées, couvrent un spectre assez large en termes de classes d'infrastructures allant des très grands centres de calcul aux stations de travail en passant par les méso-centres. Cette pyramide des ressources doit d'une part être pensée en tenant compte des spécificités des différentes disciplines et d'autre part être organisée et hiérarchisée en s'appuyant sur des infrastructures réseaux performantes, des technologies et des architectures adaptées.

A titre d'illustration, on peut prendre trois classes d'infrastructures avec pour puissance : la dizaine de Teraflops ; la centaine de Teraflops ; le Petaflops.

10 Teraflops

Ces infrastructures de type méso-centre ont pour but de répondre à un certain nombre de besoins de recherche d'une communauté scientifique ciblée. Les technologies pour ce type d'infrastructure sont d'un coût modéré, peuvent être assez facilement déployées et ne nécessitent pas de réorientation majeure des directions de recherche, ni de très grandes infrastructures. Elles peuvent être adaptées et optimisées aux besoins particuliers d'une communauté scientifique au plus proche des équipes de recherche. Elles constituent également un outil indispensable pour la formation de cette communauté aux technologies du calcul intensif, et pour le développement méthodologique d'applications frontières capables d'utiliser

les nouvelles architectures de calcul des très grands centres européens et nationaux qui posent aujourd'hui des défis importants.

100 Teraflops

Ces infrastructures correspondent à celles des centres nationaux comme l'IDRIS ou le CEA civil. Ce type de machine ne constitue plus un défi technologique pour l'industrie, ce qui d'un côté en assure la robustesse et la sécurité, et d'un autre côté devrait en permettre une diminution rapide des coûts. Ces infrastructures servent aujourd'hui les besoins des applications « dimensionnantes » d'une communauté scientifique très large. Elles impliquent des contraintes d'exploitation qui devraient viser à privilégier les applications dont les besoins sortent du cadre des méso-centres. Nombre d'applications exploitant aujourd'hui les ressources de ces grands centres, trouvent au stade de leur développement un environnement plus favorable au sein des infrastructures de type méso-centre.

1 Petaflops

Ces infrastructures stratégiques, de type très grands centres, seront bientôt disponibles à l'échelle européenne et constituent un défi technologique pour les constructeurs. Les architectures pré-senties sont conçues autour d'un très grand nombre de nœuds (multi processeurs et multi cœurs) et de mémoires distribuées avec un rapport mémoire/nœud assez faible. Leur utilisation constitue également un défi méthodologique pour les applications impliquant de repenser les méthodes et les stratégies de parallélisation. Un tel effort ne pourra se faire qu'au plus près des équipes scientifiques et dans un environnement interactif. Ces machines sont aujourd'hui vitales pour résoudre des problèmes hors de portée des architectures actuelles. Elles devraient donc être réservées à ces grands défis scientifiques issus des différentes communautés scientifiques en raison de leur coût et de la complexité de leur mise en œuvre. Les contraintes et la complexité d'exploitation de ces infrastructures seront donc bien supérieures à celles des grands centres nationaux.

L'organisation de la pyramide de ressources doit également répondre à un certain nombre de contraintes techniques et organisationnelles, au plus proche des spécificités des différentes communautés :

Organisation

Certaines fonctions doivent être réalisées à l'échelle d'un petit nombre d'équipes opérant de manière réellement interactive et collaborant autour d'une approche scientifique commune. C'est typiquement le cas des pôles de recherche

en sciences de la Terre, dont les activités couvrent un grand nombre de domaines des géosciences, avec une approche multidisciplinaire de la modélisation des systèmes géologiques reposant sur l'intégration du calcul intensif et du traitement et de l'analyse des données. Une part importante des besoins de la recherche dans ce domaine nécessitent un environnement interactif articulé autour d'infrastructures mutualisées de type méso-centre. Ces infrastructures fournissent également les ressources et l'environnement appropriés pour les développements méthodologiques d'applications plus lourdes permettant d'exploiter efficacement au sein de la pyramide les ressources des grands centres nationaux, et des très grands centres européens, ainsi que d'assurer la formation des chercheurs de cette communauté à l'utilisation des grands centres nationaux.

Technique

Malgré les progrès réalisés dans les domaines des technologies de communication, le transfert de données a encore aujourd'hui un coût et des limitations. Cela a d'importantes implications dans le domaine des sciences de la Terre. Une part importante de la modélisation repose en effet sur le traitement et l'analyse complexes de gros volumes de données issues des observatoires et des grands chantiers expérimentaux ; et sur l'inversion et l'assimilation de grands jeux de données. Nombres d'applications requièrent donc une forte intégration entre infrastructures de calcul parallèle et solutions de stockage pour l'analyse des données et la modélisation numérique. Par ailleurs, ces ressources tirent profit d'une proximité et d'une articulation avec celles des centres d'archivage et de distribution des données.

• Une politique de méso-centres en sciences de la Terre

Il existe aujourd'hui des besoins croissants en termes de ressources et d'architectures pour répondre aux besoins de la modélisation en sciences de la Terre dans les domaines de la simulation numérique, de l'inversion et de l'assimilation de données, du traitement et de l'analyse de gros volumes de données. Ces solutions doivent être partagées et articulées autour d'une communauté d'équipes de recherche couvrant divers domaines des géosciences, afin de développer une approche multidisciplinaire, et des services d'observation, et de leurs centres d'archivage et de distribution.

Ces infrastructures doivent permettre d'intégrer fortement diverses architectures de calcul intensif, et des solutions de stockage performantes, en termes de capacité et de rapidité

d'accès. Une telle mutualisation, dans un environnement interactif, permettra aux équipes de recherche et aux services d'observation de disposer des solutions nécessaires pour leurs applications et la production de nouveaux résultats scientifiques.

Ces infrastructures doivent également permettre de renforcer l'utilisation de ces technologies par les équipes de recherche et les services d'observation. Elles sont nécessaires pour la réalisation des développements méthodologiques et de logiciels permettant à la communauté de tirer bénéfices des nouvelles technologies de calcul intensif des très grands centres européens.

Alors que se met en place une politique ambitieuse au niveau national et européen en termes de grandes infrastructures, il est urgent que parallèlement, au niveau de l'INSU, une politique ambitieuse et long terme soit définie en matière de méso-centres pour équilibrer la pyramide des ressources et permettre aux sciences de la Terre de pouvoir répondre aux enjeux de la modélisation et de l'utilisation des très grands centres.

Dans une telle politique, ces infrastructures pourraient trouver une place naturelle, et la taille critique, au sein des OSU et des IPG de l'INSU intégrés aux universités, mais également au niveau de certains pôles régionaux associant étroitement des équipes des sciences de la Terre à des partenaires de type industriel.

• Technologies « GRILLE »

Les technologies de type « GRILLE » pour le calcul et le stockage distribués émergent au niveau national et européen avec des infrastructures de Grille de recherche et de production, avec en particulier l'infrastructure Grille EGEE orientée vers la production et les applications scientifiques.

Ces dernières années, dans le cadre de la grille européenne EGEE, et au travers de la « virtual organization (VO) Earth Sciences » sous la responsabilité de l'IPG Paris et l'IPSL, un travail a permis d'explorer les contraintes d'utilisation de ces technologies, et de porter des applications qui tournent aujourd'hui de manière opérationnelle.

Dans le domaine des sciences de la Terre interne, ces applications sont principalement des applications de type calcul distribué mettant en jeu un faible volume de données et de communications. Pour ces applications, les technologies se sont avérées très performantes, permettant de mobiliser

ponctuellement un très grand nombre de CPU (central processing unit > 4000). Ces applications sont principalement dans les domaines du traitement et de l'analyse du bruit sismique, de l'inversion de CMT (centroid moment tensor), et des processus d'érosion et de formation des paysages. Dans le domaine du traitement sismique, des applications comme Géovecteur de la CGG sont aujourd'hui opérationnelles sur la grille EGEE. Ces applications sont reconnues comme des applications tests dans le cadre d'EGEE.

En 2007, Le CNRS a créé l'Institut des Grilles afin de fédérer et intégrer ces initiatives, de faciliter l'utilisation des technologies de type Grille et de faire émerger une infrastructure nationale de Grille de production. L'Institut regroupe les informaticiens qui travaillent sur la Grille et les communautés scientifiques qui portent les applications. Parmi les principales communautés scientifiques, les sciences de la Terre sont représentées au côté de la physique des hautes énergies et de la biologie.

Il est important que l'INSU intègre la composante Grille dans sa politique en matière de modélisation numérique et de traitement de données, en s'investissant au sein de l'Institut des Grilles et en développant une stratégie de soutien permettant à la communauté l'utilisation de ces technologies en premier lieu pour des applications de type calcul distribué, et une meilleure mutualisation des infrastructures de type méso-centres.

• Environnement humain et technique

L'expérience acquise en matière de calcul intensif et de traitement de données a clairement montré l'importance de l'environnement technique et humain pour :

- L'exploitation et l'évolution de ces solutions complexes de calcul intensif et de stockage ;
- La formation et l'assistance aux utilisateurs dans l'utilisation des technologies de calcul intensif et de stockage, ainsi que des technologies de type « GRILLE » ;
- L'assistance pour le développement et l'optimisation des applications sur les technologies de calcul parallèle et de « GRILLE ».

Sans une telle assistance, difficilement disponible à l'échelle d'une équipe, la communauté ne pourra relever les défis méthodologiques associés à l'utilisation des nouvelles architectures de calcul parallèle et des nouvelles technologies de type « GRILLE ».

Les méso-centres, associant équipes de recherche et services d'observation, sont un cadre naturel pour une telle mutualisation.

Aujourd'hui les besoins urgents se situent au niveau de :

- L'administration et l'exploitation de solutions intégrant architectures de calcul parallèle et solutions de stockage ;
- Le développement applicatif, au contact des chercheurs, dans les domaines de l'algorithmique parallèle et du génie logiciel afin pour la communauté de disposer de codes adaptés à l'évolution des technologies de calcul ;
- L'organisation de gros volumes de données, les méthodes de data mining et de visualisation.

Une politique dans ce domaine doit intégrer des postes techniques permanents, des CDD et des post-docs dans le cadre de projets ciblés et structurés autour de certaines applications, ainsi que des postes de chercheurs interdisciplinaires (INSU/STIC).

• Environnement scientifique

Un aspect très important est le développement, au sein de la communauté des sciences de la Terre, d'une expertise pour assurer le développement de nouvelles méthodes de simulation numérique, d'inversion et d'assimilation de données, de traitement et d'analyse de données, en relation avec les nouvelles technologies de calcul intensif et de stockage. Cela implique :

- Le développement de nouveaux modèles physiques basées sur les observations ;
- Le développement, ou l'amélioration, d'une hiérarchie de méthodes mathématiques, numériques et statistiques afin de résoudre et d'exploiter les modèles ainsi développés ;
- Le développement des logiciels, ainsi que des algorithmes requis pour exploiter les nouvelles technologies de calcul intensif.

Construire et structurer une telle communauté est en enjeu de taille en sciences de la Terre. Une manifestation du retard pris dans ce domaine peut sans doute être trouvée dans le faible nombre de logiciels partagés à l'échelle des différentes communautés actives dans le domaine de la simulation numérique, de l'inversion, du traitement et de l'analyse des données en sciences de la Terre. Une autre manifestation de ce retard réside dans la faible représentation, en termes de projets, des sciences de la Terre dans les grands programmes nationaux de type ANR autour du calcul intensif et des bases de données, ou dans les comités d'expertise sur l'évolution du calcul intensif à l'échelle nationale et européenne.

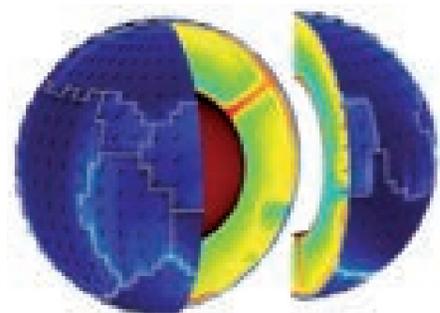
Enjeux spécifiques outils numériques en sciences de la Terre

L'évolution dans ce domaine passe par :

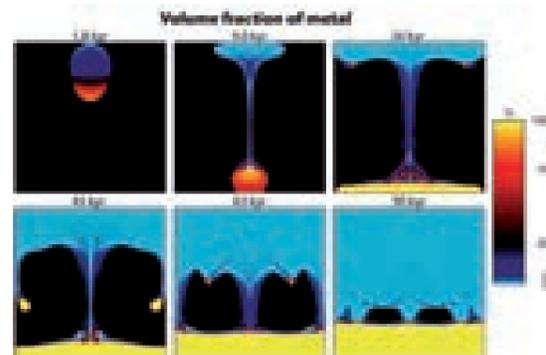
- Le renforcement des collaborations entre les divers chercheurs impliqués, au sein d'un même domaine des géosciences, dans la modélisation numérique et l'analyse des données au travers de programmes ou d'initiatives INSU plus structurantes comme les GDR ;
- Le développement de collaborations plus structurées avec d'autres disciplines comme la physique, l'analyse numérique,

l'informatique, ainsi que des partenaires industriels, avec une politique plus active de recrutement de chercheurs interdisciplinaires.

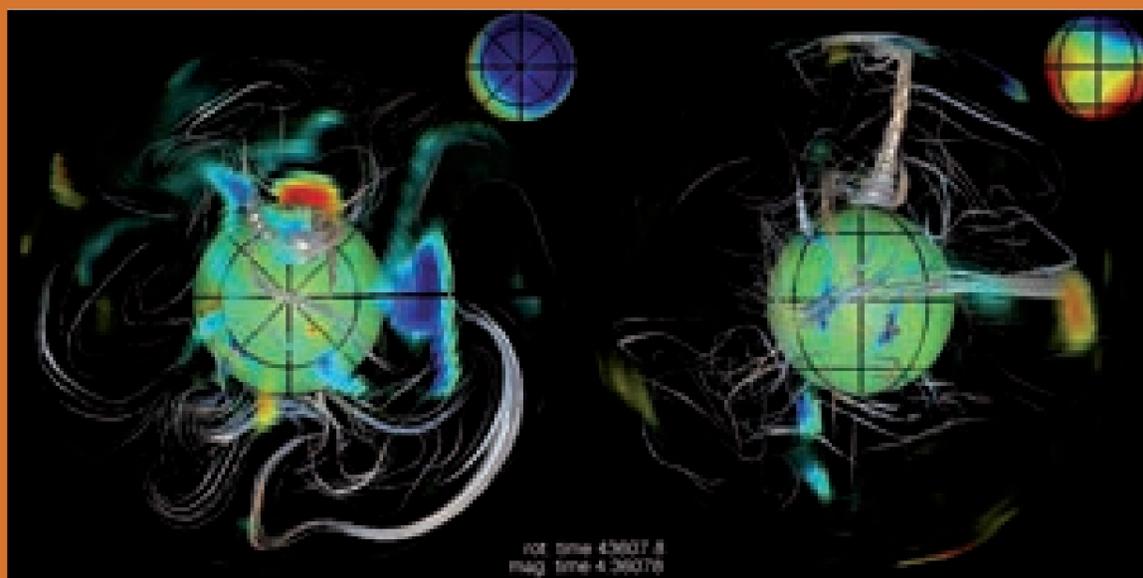
Un autre aspect est la formation des jeunes chercheurs aux domaines de la modélisation numérique et de l'analyse des données en sciences de la Terre. Cette composante est sans doute encore trop peu représentée dans nos projets d'enseignements au niveau Licence, Master et Doctorat.



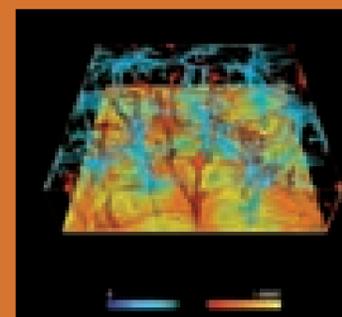
1. Modélisation de l'interaction convection du manteau – plaques tectoniques, (DTP Toulouse).



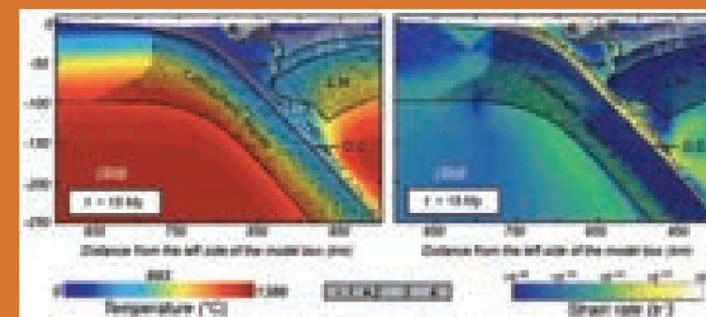
2. Modélisation de la formation du noyau, (ENS Lyon).



3. Modélisation des lignes de champ magnétique du noyau liquide, (Aubert, IPGP).



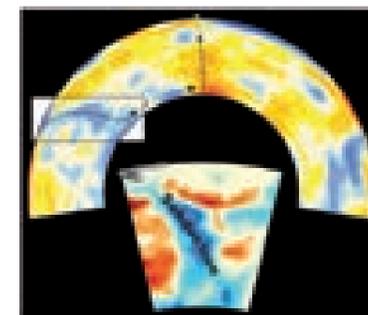
4. Modélisation de la convection du manteau, (ENS, Lyon).



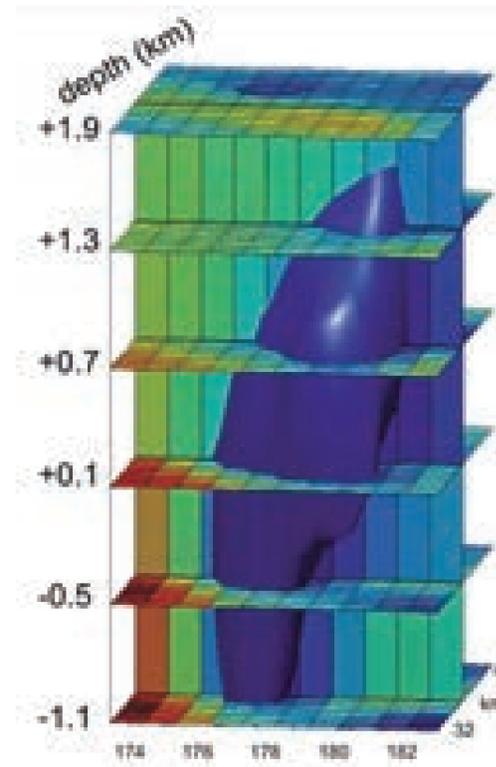
5. Modélisation de la subduction, (Yamato).



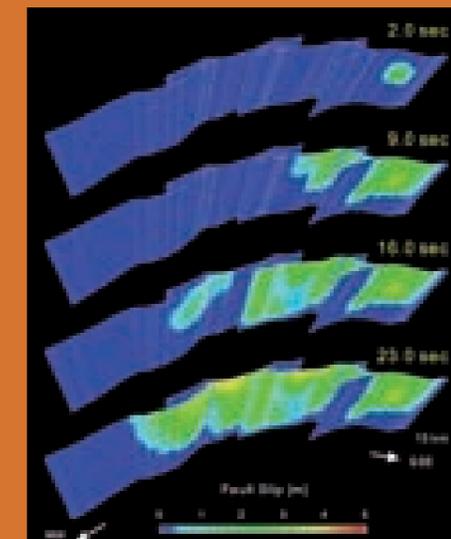
6. Modélisation de l'écoulement des cours d'eau, (Géosciences Rennes).



7. Tomographie globale et de la subduction sous l'Amérique, (IPGP).



8. Chambre magmatique du Piton de la Fournaise révélée par la sismologie, (LGIT, IPGP, Obs réunion).



9. Propagation de rupture sismique (ENS, Paris).

Enjeux industriels et sociétaux

Composition du groupe

| | |
|-------------------------|--|
| Elisabeth Vergès | Animatrice du groupe de travail, membre de la CSST |
| Alain Bonneville | (IPGP), invité |
| Pierre Soler | (IRD), membre invité de la CSST |
| Michel Cathelineau | (G2R Nancy), invité |
| Christian Fouillac | (BRGM Orléans), membre invité de la CSST |
| Patrick Landais | (Andra), membre invité de la CSST |
| Sylvie Leroy | (Laboratoire de Tectonique Paris), invitée |
| Gabriel Marquette | (Schlumberger Clamart), membre de la CSST |
| François Roure | (IFP Rueil-Malmaison) membre invité de la CSST |

Personnes ayant contribué à l'élaboration du texte :

Michel Cathelineau, Alain Cheilletz, Christophe Monnin (Ressources), Bruno Goffé, Christian Fouillac (Energie), Laurent Jolivet, (Formation), Section 18 (Risques), Christiane Grappin (Communication), Elisabeth Vergès (Préambule, La recherche en ST face à la demande industrielle et sociétale, Structuration et organisation de la recherche, Formation, Valorisation, Communication)

Préambule

L'INSU agit comme opérateur national et agence de moyens de la recherche fondamentale dans le domaine des sciences de l'Univers. C'est un institut du CNRS chargé par le Ministère de la recherche de développer et coordonner une politique de recherche en concertation avec les universités et les autres établissements de recherche publique comme l'INRA, IRD, CNES, IFP, BRGM, CEA, IFREMER dans le domaine des sciences de la Terre. A travers les structures dont il a la tutelle ou la co-tutelle : Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU) et unités de recherche du CNRS et des universités, l'INSU a des relations de recherche partenariales avec les régions et de nombreux industriels et en particulier, les industriels du milieu du pétrole du fait de leur forte implication dans les domaines des sciences de la Terre. Ces relations sont le plus souvent organisées à travers des contrats gré à gré, de consortiums privés ou de projets conjoints soutenus par l'ANR. Cette contractualisation répond, le plus souvent, à des questionnements immédiats venant des partenaires. Elle ne doit cependant pas exclure des relations au niveau national sur des sujets plus en amont, choisis en dehors des domaines d'activité concurrentiels des industriels, qui pourraient être exprimés par le monde académique. Sur ces sujets, les partenaires publics et industriels peuvent partager les risques, les coûts et les bénéfices d'une recherche innovante qui ne pourra pas, ou difficilement, être réalisée par chacune des parties individuellement. Ces recherches communes ont aussi l'intérêt pour la recherche académique d'illustrer l'intérêt sociétal ou économique de tel ou tel projet qui, sans cette

collaboration, pourrait apparaître comme peu réaliste par les agences de financement de la recherche au niveau national ou international. Le texte suivant a pour objet de présenter une vision prospective des sujets d'intérêt sociétal ou économique sur lesquels notre recherche académique pourrait s'orienter et se focaliser dans les années futures compte tenu de nos forces, de notre organisation et de l'intérêt de nos partenaires sociétaux ou économiques. Ce texte s'articule en trois grandes parties.

Réflexion générale sur :

- Les différents enjeux industriels et sociétaux dans le domaine des sciences de la Terre ;
- Les recherches amont à mener en sciences de la Terre en écho à ces enjeux ;
- Les défis technologiques et instrumentaux à développer en parallèle.

Les grands enjeux que représentent l'énergie, les ressources et l'aléa tellurique pour lesquelles les sciences de la Terre apportent une contribution majeure. Les domaines de la ressource en eau et du risque environnemental à la frontière ST-SIC n'ont pas été développés ici.

Eléments de réflexion sur la structuration et l'organisation de la recherche pour les sciences de la Terre, la valorisation, la formation et la communication avec la société.

La recherche en sciences de la Terre face à la demande industrielle et sociétale

Repousser les frontières de la connaissance sur les grandes questions scientifiques en lien avec la demande industrielle et sociétale nous apparaît le point majeur à développer au sein de l'INSU. Au premier rang de ces frontières, l'INSU, en lien direct avec les Universités, fait face au défi de la connaissance sur les grandes « questions » qui nous interpellent à savoir : **l'origine des planètes, l'origine de la Vie, l'histoire de l'évolution, notre place dans le système Terre, notre place dans l'Univers...** En ces temps de montée lancinante d'un certain type de négationnisme, il est impératif que les scientifiques du domaine soient capables d'interpeller nos gouvernants et la société en rappelant par communiqués ou interventions diverses les fondements de notre connaissance. A l'instar du positionnement net de l'Académie des sciences aux USA contre les théories créationnistes, il pourrait revenir à l'INSU pour partie, en lien avec l'Académie pour une autre partie, d'être le garant ou le garde-fou de visions rétrogrades qui pernicieusement pourraient venir entamer la rigueur du débat scientifique des prochaines décennies.

■ Quels sont aujourd'hui les principaux enjeux sociétaux et industriels relevant du domaine des sciences de la Terre ?

Nous avons rapidement recensé ces principaux enjeux qui peuvent se résumer par les questions suivantes : « En 2050 : 9 milliards d'êtres humains sur la planète !! »

- Quelles sont les réserves en ressources énergétiques et non énergétiques (notamment en eau potable) ?
- Comment garantir l'accès aux ressources ?
- Comment mettre en oeuvre les énergies propres ?
- Que faire des « déchets » ?
- Comment prévenir les risques naturels et anthropiques ?

Certaines de ces questions ainsi formulées peuvent sembler relever plus de la stratégie politique et économique que du questionnement scientifique. Toutefois, derrière chaque question, l'INSU a un rôle particulièrement déterminant à jouer en contribuant à la connaissance des processus

fondamentaux. Parallèlement à ces enjeux, il nous semble également important de nous interroger sur d'autres points qui intéressent la demande sociétale : le mode de communication avec notre société et la formation de demain dans les métiers des Géosciences.

Pour ce qui concerne plus particulièrement le domaine des sciences de la Terre, qu'il convient de ne pas se déconnecter des domaines « Surfaces continentales » ou « Océan-Atmosphère », nous avons listé les domaines suivants :

● Energie

- Approvisionner et/ou prolonger les réserves : Hydrocarbures ; charbon « propre » (Clean Coal technologies – CCT) ; géothermie ;
- Les nouvelles filières énergétiques : hydrogène naturel ; hydrates de gaz (méthane) (lié également à la prospective OA).

● Ressources minérales,

- Approvisionner et prolonger les ressources en métaux, matériaux, eau (ressources, qualité).

● Stockage des déchets et durabilité des ouvrages

- CO₂ ;
- Aval du cycle nucléaire ;
- Pollutions chimiques (après-mines, état initial, termes source) ;
- Déchets ultimes ;
- Couvertures et confinement (argiles, nouveaux matériaux).

● Risques naturels, comprendre, prévenir et communiquer sur

- Le risque sismique ;
- Le risque volcanique ;
- Les mouvements de terrain (provoqués par sismique, retrait/gonflement argiles, coulées de boues et autres ...) ;
- Les tsunamis (d'origine sismique, turbidites, déstabilisation des pentes par les clathrates, éboulements massifs d'origine naturelle ou anthropique).

● Environnement atmosphérique, changement climatique

- Emission de gaz et poussières naturels (méthane, radon, cendres ...) ;
- Fonctionnement et évolution des bassins versants ;
- Evolution des littoraux :
 - ◆ Invasion des aquifères littoraux d'eau douce par des intrusions salines (la salinisation des nappes par évaporation stimulée ou par des pratiques agricoles comme l'irrigation sont également un enjeu intéressant à considérer mais qui relèvent plutôt de la prospective SIC) ;
 - ◆ Exondation des niveaux karstiques (Méditerranée).

■ Quelles recherches fondamentales en écho à ces enjeux et quels défis technologiques et instrumentaux ?

De nos discussions, quatre grandes thématiques transversales nous semblent matérialiser les enjeux scientifiques essentiels majeurs situés à la croisée du questionnement fondamental et de la demande industrielle et sociétale, certaines relevant plutôt de défis technologiques et instrumentaux :

- « Rôle du vivant » ;
- « Transferts réactifs : processus et modélisation » ;
- « Architecture des géosystèmes : modélisation et imagerie » ;
- « Prédicibilité, vulnérabilité ».

Ce travail loin d'être exhaustif n'a pas vocation à faire double emploi avec celui du groupe « Enjeux scientifiques », mais nous semble essentiel à l'avancement de notre réflexion. Nous les avons listés ci-dessous, ils concernent clairement le domaine externe de la Terre. Ces thématiques sont développées soit dans les travaux du groupe de travail « Enjeux scientifiques », soit dans ce chapitre.

● Rôle du vivant dans la formation, la transformation et l'altération des géomatériaux

- Relation vivant-minéral, géomicrobiologie ;
- Relations organique-biologique-microbiologique/inorganique ;
- Bio-minéralisation, organo-minéralisation ;
- Mécanismes bio-géochimiques ;
- Cycle du carbone (organique et minéral) et des éléments associés (H) ;
- A toutes échelles de temps ...

● Transferts réactifs et flux de matière

- Transferts de fluides réactifs complexes ;
- Transfert de chaleur et couplages, flux de matière et de chaleur ;
- Interaction phases fluides – phases solides (équations d'état, thermodynamique, cinétique) ;
- Chimie des minéraux, fractionnement des métaux (magma > croûte) ;
- Age des fluides, mécanismes d'accumulation ;
- Cohérence avec la géodynamique et les processus de surface.

● Modélisation des géosystèmes

- Propriétés physico-chimiques, texturales et mécaniques des matériaux ;
- Rôle des hétérogénéités et architecture 3D ;
- Transfert d'échelle (du « nano-micro » aux objets géologiques) ;
- Modélisation des bassins en prenant en compte le remplissage, la déformation et la circulation des fluides.

● Prédicibilité

- Durabilité des matériaux et des structures ;
- Localisation de la source (endommagement, rupture), compréhension du mécanisme (chimique, physique, couplé) ;
- Propagation du processus (diffusion, ondes, remontée des magmas, déplacement des eaux...) ;
- Effets locaux (milieux physiques, géologiques, géographiques...).

Il est fondamental dans l'avenir que notre démarche sur le risque s.l. prenne en compte l'ensemble des données non seulement celles de la connaissance scientifique, géophysique et géologique (séismes, volcans...) qui nous concernent au premier chef, mais aussi celles qui concernent l'impact sur nos sociétés jusqu'à la capacité de donner une alerte. Toute cette partie de la démarche doit se faire en collaboration avec les bureaux d'ingénierie (EPIC, bureaux d'étude) et les SHS.

- Comportement des matériaux, des bâtiments, du littoral, des pentes, des sols (génie civil, aménagement du territoire) ;
- Capacité de donner l'alerte à temps (sociologues...) ;
- Implications juridiques pour les acteurs de la recherche.

Il s'agit donc de mettre en place des projets intégrés (scientifiques, ingénieurs génie civil, urbanistes, sociologues, juristes, industriels...) permettant de donner aux décideurs et aux politiques des réponses avec des barres d'erreur chiffrées si possible inférieures à 100%. L'incertitude existe à chaque niveau de la démarche entreprise présentée plus haut dans les différents items.

■ Les défis technologiques et instrumentaux

Les progrès de la connaissance fondamentale et nos capacités à nous développer et à nous intégrer dans la recherche d'intérêt sociétale et industrielle ne peut se faire sans des avancées instrumentales ou conceptuelles importantes. Ce chapitre tente d'illustrer les principaux points pour lesquels les sciences de la Terre doivent s'investir pour répondre à ces enjeux.

● Observations *in situ*

- Réorganisation et renforcement des services d'observation existants : magnétisme, gravimétrie, sismologie, volcanologie (voir travaux GT services d'observation) ;
- Développement de sites instrumentés ;

- Effort R&D en instrumentation notamment sur les capteurs de paramètres environnementaux (physique, chimie, bio). Les faibles coûts, les miniaturisations et la télé-transmission des données sont en particulier des verrous à lever pour une étude des milieux naturels efficace, durable et significative.

Pérennité des données et des sites sur le long terme.

Calibration des données satellitaires par des observations au sol

● Observations de la planète vues de l'espace (voir travaux GT SPATIAL)

- Approche globale, cartographie, imagerie des données ;
- Développement de bases de données.

Rapprochement des communautés AA et ST (possible au sein des OSU)

● Géochimie et Géochronologie

- Développement de l'analyse *in situ*, effort sur l'analyse des fractions organiques ;
- Développement de la géochronologie (U-Pb, Ar-Ar, Re-Os, OSL, traces de fission ...).

L'analyse *in situ* et la datation sont les données indispensables à la quantification et à la compréhension des processus. Le développement des études autour des ressources va sûrement accroître les besoins en géochronologie et thermochronologie. La division ST de l'INSU doit veiller à ce que l'accès à ces capacités d'analyse soit maximum.

● Simulation-modélisation

- Effort R&D en instrumentation expérimentale (et outils analytiques adaptés) permettant une reproduction paramétrée des phénomènes représentatifs des processus naturels. Cet effort est également associé au développement de la démarche projet avec une définition d'objectifs de finalisation et de valorisation.
- Modèles 3D/4D tenant compte : de l'hétérogénéité du milieu, des emboîtements d'échelle, de la notion de temps (thermicité).
- Modèles intégrés espace – sol.

Capacités de calcul de plus en plus grandes exigées : développement de mésocentres, accès aux grilles de calculs distribués

En fait, de cette analyse rapide, quatre grandes notions apparaissent, transversales à presque tous les domaines d'étude en Sciences de la Terre :

- La notion de réservoir ;
- La notion de flux (de matière, de chaleur...);
- La notion d'interfaces et la notion de temps.

A ces quatre notions qui se déclinent simultanément et à différentes échelles de temps et d'espace emboîtées, s'ajoutent les contraintes apportées par l'observation très souvent indirecte de phénomènes et objets cachés ou observés en décalage de temps et de lieu. C'est là que résident la complexité et l'originalité des sciences de la Terre. A cette complexité s'ajoute l'hétérogénéité intrinsèque liée aux milieux naturels, accentuée par les interactions avec la biosphère et l'Homme. Le défi des sciences de la Terre de demain est de tenter de modéliser l'ensemble.

Avec les autres domaines des sciences de la planète, les sciences de la Terre possèdent également une démarche scientifique originale par rapport aux autres domaines scientifiques : celle des sciences de l'observation des milieux naturels. L'observation doit rester une priorité. En cela, la mise en place d'Observatoires des sciences de l'Univers (OSU) au sein du dispositif universitaire français regroupant des laboratoires de recherche d'excellence est une particularité à laquelle nous devons tenir pour l'avenir des recherches en sciences de la Terre. La mise en place de services d'observation et sites instrumentés pérennes est essentielle au développement de notre discipline. L'observation spatiale doit par ailleurs devenir un « outil » au service de nombreuses questions scientifiques en sciences de la Terre. A l'instar de la géochimie qui a fait littéralement exploser les frontières de la connaissance dans de nombreux domaines en se mettant « au service » du questionnement scientifique et en sortant de son isolement disciplinaire, le spatial doit contribuer de plus en plus aux programmes scientifiques des sciences de la Terre. L'INSU peut contribuer à cela en renforçant sa collaboration avec le CNES pour les questions propres aux sciences de la Terre. L'initiative internationale GEO et sa déclinaison européenne GMES offrent également une opportunité de labelliser, et valoriser et normaliser les sites instrumentés et les Observatoires des sciences de la Terre en leur donnant des implications sociales évidentes à travers un service amont utilisable par le public et les autorités territoriales, nationales et internationales dans les domaines de l'information et de la sécurité. Un service intitulé « Earth movement core service : EMCS » a été proposé par l'INSU comme un exemple de service amont pouvant être porté par les sciences de la Terre. Ce service pourrait être mis en place par la communauté des sismologues dans les années futures.

L'énergie

■ L'énergie sans carbone basée sur l'hydrogène naturel

Il y a beaucoup de façon de produire de l'énergie sans carbone. Nous considérons ici l'utilisation du vecteur « Hydrogène naturel » qui concerne plus précisément le domaine des sciences de la Terre.

• Contexte, enjeux et verrous

Extrait du rapport « L'économie de l'hydrogène » du Programme des Nations Unies pour l'Environnement, 2006 :

« Il règne au sein de la sphère politique, des organisations écologiques, des analystes de l'énergie et des grands industriels un sentiment croissant selon lequel l'hydrogène représente le carburant de l'avenir et qu'il révolutionnera la façon dont nous produisons et consommons l'énergie. À long terme, il est clair que notre dépendance à une énergie fossile limitée n'est pas tenable, tant écologiquement qu'économiquement. L'envolée des prix du pétrole au cours des dernières années a attiré l'attention sur les risques de la dépendance envers le pétrole et le gaz au plan de la sécurité énergétique. Elle a en outre suscité la prise de conscience que le monde commence à épuiser ses réserves de carburant bon marché, en hâtant ainsi l'impératif d'une mutation vers des technologies énergétiques plus sûres et plus propres. Parmi l'éventail de technologies de cet ordre susceptibles d'être préconisées à grande échelle dans un avenir prévisible, l'hydrogène est largement considéré comme la plus prometteuse. Le remplacement des combustibles fossiles par l'hydrogène dans les consommations d'énergie finale pourrait se traduire par des atouts écologiques majeurs, sous réserve que soient surmontés les défis techniques, écologiques et financiers relatifs au mode de production, d'acheminement, de stockage et d'utilisation de l'hydrogène. »

« Sur le chemin qui mène à l'économie de l'hydrogène, la production efficace et propre de l'hydrogène constitue l'obstacle majeur. Vecteur d'énergie, l'hydrogène doit être fabriqué à partir d'une source d'énergie primaire. De nombreuses méthodes industrielles de production d'hydrogène sont aujourd'hui disponibles, mais toutes sont plus onéreuses que si la même quantité d'énergie était produite à partir de formes d'énergie conventionnelles (le coût étant plusieurs fois supérieur à celui des combustibles fossiles) ».

Outre le coût, la plupart des procédés actuels de production de H₂ sont basés sur le « reforming » des hydrocarbures et produisent du CO₂ qui doit être séquestré. L'étude des milieux naturels nous montre qu'il existe deux voies originales de faible coût énergétique pour produire H₂ : l'altération hydrothermale des roches riches en fer et les mécanismes biologiques mettant en jeu des hydrogénases. Ces deux processus peuvent en outre être couplés et se supporter mutuellement pour la génération de H₂. Ces deux processus permettent d'envisager l'exploitation naturelle de l'H₂ comme source d'énergie et non plus uniquement comme vecteur (cas actuellement considéré) et d'envisager la construction d'appareil de production d'H₂ à faible coût et à basse énergie par reproduction artificielle de ces processus.

• Exploitation directe de H₂ dans le milieu naturel

Etat de l'art

Les sources naturelles d'H₂ sont peu connues, un effort important de recherche est à faire, aucun pays n'a encore tenté l'aventure, les leaders mondiaux du domaine pour l'identification des sources sont la France (Ifremer et INSU/CNRS) et la Russie (Académie des sciences). Les productions de certaines sources de H₂ en milieu sous-marin sont considérables et actuellement estimées autour de 5 à 10³ millions de m³ de H₂ par an/source (équivalent de 5 à 10 millions de litres d'essence). C'est donc une ressource qui ne peut être négligée en terme énergétique. C'est une ressource durable car relevant d'un processus naturel continu lié au fonctionnement fondamental de la Terre et indépendant de l'activité humaine (interaction de l'eau de mer avec le manteau terrestre). Il faut aussi savoir que cet hydrogène est en partie perdu car migrant dans l'atmosphère et l'espace, l'autre partie interagissant avec le milieu sous-marin et la vie pour générer des molécules organiques prébiotiques principalement du méthane (c'est un point qu'il sera nécessaire d'étudier pour mesurer l'impact d'une exploitation et éventuellement en tirer des ressources complémentaires).

Grands axes de recherche

- Inventaire et évaluation des sources de H₂ (les principales sont concentrées sur les rides médio-océaniques, mais devraient aussi exister dans certains appareils volcaniques ou gisements d'hydrocarbures en bassin sédimentaire) ;

L'énergie

- Compréhension des mécanismes de production, de migration, de distribution et pérennité des sources de H₂ ;
- Evaluation des sources d'hydrocarbures associées ;
- Mise au point des outils industriels de recherche : extraction, production et séparation des fluides hydrogénés en milieux sous-marins et continentaux ;
- Evaluation des contraintes environnementales et juridiques associées.

Organismes impliqués et partenaires industriels français possibles

INSU/CNRS, IFREMER, IFP, INERIS, EUROGIA+ (cluster d'Eureka pour le développement soutenable et une meilleure sécurité pour la fourniture d'énergie pour un futur plus propre et plus sûr des énergies sans émissions atmosphériques de carbone) représentant l'ensemble du domaine parapétrolier et des industriels intéressés par le développement des technologies compatibles hors du domaine nucléaire. (CGGveritas, Technip, BV (bureau Veritas) Schlumberger) et de leurs partenaires pétroliers (Total).

- **Procédés artificiels mimétiques pour une production de H₂ délocalisée à faible coût, procédés hydrothermaux d'oxydation du fer en milieux réduits**

Etat de l'art

Les procédés naturels d'oxydation du fer dans des minéraux est actuellement reproduit en laboratoire et fonctionne pour des températures comprises entre 150 et 400°C. Les laboratoires français sont bien avancés dans cette démarche et sont soutenus par une action incitative de l'INSU. Les autres équipes au monde qui travaillent sur ce sujet sont essentiellement aux USA. Ces procédés ouvrent la voie à la construction d'unités industrielles de production de H₂ utilisant des roches naturelles riches en fer ferreux (typiquement des laves) et chauffées par énergie solaire. Ces unités seraient idéales pour la production de H₂ dans des sites isolés comme, typiquement, l'île de la Réunion. Ce procédé, bien qu'il ait un rendement environ trois fois plus faible que les procédés biologiques, a l'avantage d'être totalement propre en n'utilisant aucun autre produit que ceux de la réaction de base, les procédés biologiques nécessitant l'utilisation de composés supplémentaires nécessaires à la vie (Phospore, azote ...) qu'il faut ensuite traiter.

Grands axes de recherche

- Compréhension et amélioration des cinétiques et rendement ;

- Conception et optimisation des conditions expérimentales et du design des prototypes et des matériaux des réacteurs (sans fer) ;
- Conception et optimisation du chauffage solaire ;
- Recherche de procédés couplés avec les mécanismes biologiques pour aboutir à un système en circuit fermé ne consommant que de l'eau et de la biomasse.

Organismes impliqués et partenaires industriels français possibles

INSU, /CNRS (INST2I), CEA, BRGM, EUROGIA+ et TENERDIS, CapEnergies, (pôle de compétitivité).

- **Procédés biologiques**

Etat de l'art

L'idée est d'utiliser les propriétés qu'ont de nombreux organismes vivants d'échanger de l'hydrogène et d'en utiliser l'énergie. Dans les zones inondées, les sédiments, le tractus digestif des animaux ou les nodules des plantes fixatrices d'azote par exemple, de très nombreux micro-organismes consomment ou produisent de l'H₂. Des avancées significatives dans la compréhension des bases moléculaires et de la physiologie des mécanismes conduisant à l'utilisation et à la production biologiques d'H₂ ont été obtenues récemment. Ces avancées ont permis de mettre en place des projets d'optimisation de la bio-production de H₂. Deux enzymes sont responsables de la production d'H₂ : la nitrogénase et l'hydrogénase. Le pouvoir réducteur utilisé par ces enzymes provient dans la plupart des cas, soit de substrats carbonés (biomasse), soit de l'eau (via la photosynthèse oxygénique). Si une économie de l'H₂ venait à se développer, plusieurs bioprocédés pourraient s'y inscrire et éventuellement générer des bénéfices environnementaux secondaires. Certains déchets peuvent notamment être utilisés comme substrats et seront certainement la base des premiers pilotes de bioproduction d'H₂, qui, à l'instar des systèmes éprouvés de méthanisation, apparaîtront comme une voie de valorisation de ces déchets. Un couplage de ces procédés avec les procédés hydrothermaux sont envisageables impliquant une collaborations des équipes des sciences de la Terre et des biologistes environnementaux dans le cadre de l'INSU, du CNRS et du CEA.

Grands axes de recherche

- Evaluation des sources d'énergie utilisables par les microorganismes, de l'énergie solaire aux différentes formes de biomasse ainsi que les propriétés métaboliques et les caractéristiques des hydrogénases de différents organismes ;

- Estimation des procédés économiquement viables ;
- Définition des rendements ainsi que l'identification des facteurs limitant ;
- Compréhension des bases physico-chimiques de ces mécanismes pour la réalisation de nouveaux catalyseurs dits « biomimétiques » à très faible coût pour l'utilisation d'organismes à photosynthèse oxygénique capables de réaliser la photo-oxydation de l'eau et utilisables pour synthétiser de l'hydrogène, avec un rendement photochimique remarquable ;
- Développement d'un système de production d'hydrogène à partir d'énergie renouvelable (solaire, biomasse) et pouvant être couplé aux procédés hydrothermaux à base minérale (lien ST) ;
- Criblage de la diversité du monde microbien permettant la sélection de micro-organismes voire d'enzymes les plus performants dans la production d'hydrogène ;
- Développement de biopiles convertissant directement H₂ en électricité.

Organismes impliqués et partenaires industriels français possibles

CNRS, INSU/CNRS, CEA, INRA, INSA, BRGM, Veolia, Eurogia+ CapEnergies, (pôle de compétitivité).

■ L'énergie du carbone

- **Exploitation soutenable des hydrocarbures en régions fragiles et englacées (arctique)**

Etat de l'art

Dans la recherche des sources d'énergies conventionnelles hydrocarbures et gaz, l'Arctique est un domaine totalement inexploré susceptible de contenir des réserves importantes en offshore. C'est une région difficile d'accès où les méthodes conventionnelles ne peuvent être utilisées directement. C'est aussi un domaine fragile pour lequel des technologies particulières doivent être impérativement développées. Un seul forage a été réalisé dans les zones englacées par le consortium européen de recherche scientifique, ECORD, pour le compte de l'organisation scientifique internationale de forage océanique IODP. ECORD est un TGE (Très Grand Equipement) de la France qui en assure la gestion (INSU) pour l'ensemble de nos partenaires. L'intérêt scientifique pour ses archives géologiques et climatiques mais également pour son potentiel énergétique, liée à une exploitation propre bien sûr, justifie l'organisation

de l'exploration conjointe de l'Arctique par les industriels et les scientifiques de la recherche publique par la réalisation de plusieurs grands forages sur les marges continentales.

Grands axes de recherche

- Connaissance de la géologie sous marine de l'Arctique par exploration sismique et par forage ;
- Mise au point de procédés d'exploration géophysique en milieu englacé ;
- Mise au point de technologie propre, sûre et économique de forage et de mise en exploitation des gisements en milieu englacé ;
- Mise au point de technologie propre et sûre de transport d'hydrocarbures en milieux sous glaciaires.

Organismes impliqués et partenaires industriels français possibles :

INSU/CNRS, IFREMER, IFP, ECORD EUROGIA+ représentant le domaine parapétrolier et intéressé pour le développement des technologies (CGGveritas, Technip, BV (Bureau Veritas) Schlumberger) et de leurs partenaires pétroliers (Total).

- **Gisements profonds et ultra-profonds**

Etat de l'art

Dans la recherche des sources d'énergies conventionnelles, hydrocarbures et gaz, les grandes profondeurs (>6000m) offrent des potentialités encore peu connues. Leurs évaluations sont difficiles et dépendent des outils analytiques et théoriques qui permettent de reconstituer l'histoire thermique et la structure des bassins profonds parfois cachés par des formations superficielles opaques aux ondes sismiques. Les équipes françaises de la recherche publique développent des outils tout à fait performants pour résoudre ces questions en collaboration avec l'industrie.

Grands axes de recherche

- Nouveaux outils d'estimations des paléothermicités des bassins et modélisations ;
- Développement des technologies d'imagerie sismique à haute résolution en milieux perturbés ;
- Connaissance et modélisation des bassins sédimentaires cachés en particulier au front des chaînes de montagnes.

Organismes impliqués et partenaires industriels français possibles

CNRS, IFP, EUROGIA+ représentant le domaine parapétrolier et intéressé pour le développement des technologies (CGGveritas, Technip, BV (Bureau Veritas), Schlumberger) et de leurs partenaires pétroliers (Total).

• Hydrates de gaz

Etat de l'art

Dans la recherche des sources d'énergies conventionnelles, hydrocarbures et gaz, les hydrates de gaz concentrés sur les marges océaniques et visibles par leur imagerie sismique offre un potentiel intéressant. Ceci est d'autant plus intéressant que ces hydrates (CH₄) pourraient être remplacés par ceux du CO₂ et présenter une alternative intéressante pour la séquestration de ce gaz à effet de serre (GES).

- **Les clathrates** sont des solides cristallins qui ressemblent à de la glace d'eau, et qui se forment lorsque des molécules d'eau constituent une structure en forme de cage autour d'une plus petite molécule-hôte sous certaines conditions de pression et de température. Les molécules les plus communément piégées dans les clathrates terrestres sont le méthane (la molécule la plus abondante), l'éthane, le propane, le butane, l'azote, le dioxyde de carbone et le sulfure d'hydrogène. Plusieurs raisons majeures font que l'étude des clathrates constitue de nos jours un enjeu à la fois énergétique, environnemental, industriel, sociétal et même en astrophysique.
- **Les hydrates de gaz sont considérés comme un enjeu industriel majeur pour leur capacité à perturber le transport** du gaz naturel ou du pétrole par la création de bouchon dans les conduites. Risque qui s'accroît avec la mise en production de puits pétroliers off-shores de plus en plus profonds. La recherche dans ces domaines a permis de structurer une collectivité académique internationale très active en Europe et en Amérique du Nord. En Europe, cette communauté se trouve essentiellement dans les pays pour qui la production pétrolière constitue un enjeu historique, et donc en Norvège, Royaume-Uni et en France. La France est ainsi un acteur majeur dans ce domaine de recherche qui regroupe un ensemble de laboratoires académiques et d'instituts de recherche spécialisés en thermodynamique, cinétique, analyse structurale, et physico-chimie. Les clathrates sont aussi utilisés en tant que matériaux à changement de phase pour des applications en climatisation ou en réfrigération. Ils sont également utilisés pour leur capacité de séparation du CO₂ à base pression, pour une application en captage du CO₂. On soulignera que dans cette dernière application, la recherche académique française est en pointe avec la mise en place d'un projet ANR CO₂ intitulé SECOHYA.
- **Les hydrates de gaz pourraient constituer une source importante d'énergie fossile.** Il a été suggéré que les

hydrates de méthane représenteraient un potentiel énergétique égal à deux fois celui de toutes les énergies fossiles combinées. En particulier, d'importants réservoirs existeraient sur le plancher océanique et dans les régions du permafrost (Kvenvolden 1988, 1993, 1998 ; Satoh 1996). Ces possibilités poussent actuellement certains pays (Etats Unis, Canada, Russie, Inde et Japon) à trouver et développer les moyens d'exploiter les hydrates de méthane comme source d'énergie fossile. Outre la détermination de leur abondance et de leur densité, l'enjeu de l'exploitation des hydrates est certainement celui des risques d'exploitation par déstabilisation des pentes sous marines initialement cimentées par les clathrates. Plusieurs exemples d'effondrements importants ont été décrits dans la littérature, tels que celui de la marge continentale Norvégienne (Bugge et al. 1987). Un de ces effondrements a entraîné un Tsunami qui a déposé des sédiments jusqu'à une hauteur de 4 mètres au-dessus du niveau de la mer sur le littoral de Ecosse (Nisbet & Piper 1998).

- **Les hydrates de gaz sont des agents du changement climatique.** Le méthane est un gaz à effet de serre et la libération d'importantes quantités de ce gaz dans l'atmosphère pourrait entraîner un réchauffement climatique conséquent. L'actuel réchauffement des régions polaires arctiques pose une question majeure sur ce problème qui incite une réflexion sur les possibilités de récupération ou de fixation de ces hydrates pour éviter leur relâchement incontrôlé dans l'atmosphère.

• La séquestration géologique du CO₂

Etat de l'art

S'agissant du stockage du CO₂, il semble que les véritables enjeux scientifiques soient revenus vers le « pompage » du CO₂ atmosphérique, car le pompage industriel en sortie d'usine sera largement insuffisant, même en cas d'efficacité totale pour atteindre les objectifs de réduction des GES. En fait, biomasse et océans ont été considérés en premier lieu (cf. premiers rapports du GIEC). Aujourd'hui, on revisite les pompages à partir de l'atmosphère. Les voies de recherche sortent alors du domaine des sciences de la Terre pour les domaines de la surface, l'enjeu étant d'augmenter les piégeages par la biomasse et les océans. Une voie encore intéressante possible pour les sciences de la Terre serait l'augmentation du piégeage de CO₂ par la carbonatation des sulfates en milieux littoraux (via les microorganismes) ou le piégeage ex-situ dans des carbonatateurs artificiels comme, par exemple, les bassins de traitement des eaux usées.

Grands axes de recherche

- Recherche sur la caractérisation des différents types d'hydrates et de leurs propriétés physiques, thermodynamique et leurs cinétiques de transformation ;
- Connaissance sur les propriétés physiques des sédiments contenant les hydrates ;
- Connaissance de la géologie des marges par exploration sismique et par forage ;
- Evaluation des risques de déstabilisation des pentes et risques de tsunamis ;
- Evaluation des risques de changement du pH de l'océan ;
- Evaluation des ressources et de leur densité ;
- Mise au point de technologies propres, sûres et économiques d'exploitation des gisements ;
- Mise au point de technologies propres et sûres de transport des gaz.

Organismes impliqués et partenaires industriels français possibles :

INSU/CNRS, IFREMER, IFP, ECORD BRGM (si ressources minérales considérées), EUROGIA+ représentant le domaine parapétrolier et intéressé pour le développement des technologies (CGGveritas, Technip, BV (Bureau Veritas) Schlumberger) et de leurs partenaires pétroliers (Total).

• Charbon « propre » (clean coal technologies)

Etat de l'art

Dans la recherche des sources d'énergies conventionnelles, le charbon représente encore un potentiel énergétique fondamental non seulement dans les pays émergents mais aussi en Europe, aux Etats-Unis surtout en Australie et au Canada. Son exploitation menée parallèlement au stockage du CO₂ est un enjeu essentiel. Nous ne parlons ici que du stockage du CO₂ puisqu'il s'agit ici d'une prospective sciences de la Terre, il est clair que la capture du CO₂ fait partie intégrante de la démarche.

Grands axes de recherche

- Connaissance de la géologie des bassins ;
- Evaluation des ressources et de leur densité ;
- Evaluation des émissions de CO₂ ;
- Mise au point de technologies propres, sûres et économiques d'exploitation des gisements ;
- Mise au point de technologies propres et sûres de transport des gaz.

Organismes impliqués et partenaires industriels français possibles :

INSU/CNRS, BRGM, IFP, Eurogia+

■ Stockage de l'énergie thermique

Etat de l'art

La production discontinue d'énergie (éolienne, photovoltaïques et autres) ou des raisons économiques rendent de plus en plus nécessaire de développer des moyens de stocker de l'énergie dans des régions qui ne disposent pas de possibilité gravitaire ou qui ne désirent pas des installations à air comprimé gigantesques. Le stockage de l'énergie par voie géothermique offre une alternative possible. Elle n'est quasiment pas mise en œuvre et les besoins de recherche sont considérables. Ils rejoignent les problèmes de la géothermie conventionnelle et de la connaissance du sous-sol imposée par les projets de séquestration souterraine de CO₂ avec lesquelles d'ailleurs elle peut être couplée.

Grands axes de recherche

- Connaissance de la géologie des bassins et sites géothermiques par exploration sismique, par forage et modélisation ;
- Modélisation des comportements des fluides souterrains, transfert de chaleur et évaluation des risques de perdre le fluide caloporteur ;
- Evaluation et inventaires des meilleurs sites de stockage ;
- Mise au point de technologies propres, sûres et économiques d'exploitation de la chaleur.

Organismes impliqués et partenaires industriels français possibles

INSU/CNRS, BRGM, IFP, EUROGIA+ représentant le domaine parapétrolier et intéressé pour le développement des technologies (CGGveritas, Technip, BV (Bureau Veritas) Schlumberger).

Les ressources minérales

■ La métallogénie : un chantier essentiel pour les sciences de la Terre et les interfaces lithosphère - hydrosphère

La France possède historiquement une expertise et une excellence en métallogénie. Aujourd'hui, des organismes comme le BRGM, l'IRD ou l'IFREMER continuent d'y mener une politique active, avec cependant des mutations importantes du point de vue thématique (notamment vers l'environnement). Les équipes académiques de l'Université et du CNRS/INSU, produisent de leur côté une recherche de qualité internationalement reconnue. L'absence d'une structure commune d'animation de ce réseau de compétences (suite en particulier à la disparition du Groupement de Recherche « GdR Transmet ») pourrait nuire dans l'avenir à l'efficacité des politiques mises en oeuvre par les pouvoirs publics pour accompagner en France l'exceptionnel retour en force de la demande en matières premières minérales dans le monde.

Un raisonnement simpliste consisterait à examiner la situation minière en Europe et à considérer qu'en raison du déclin de l'extraction, il n'y a pas de raisons de continuer à étudier les concentrations métalliques. A ceci on opposera que les grands groupes européens (AREVA, RTZ, XSTRATA, ERAMET) prospectent à l'échelle internationale, qu'il paraît curieux de se limiter à l'Europe de l'Ouest quand il s'agit de cette discipline, et qu'il serait facile d'appliquer le même raisonnement sur beaucoup d'autres objets ou processus géologiques.

Si l'on considère le contexte international, le secteur des matières premières minérales, après plus d'une décennie d'abondance suivie d'une forte récession de l'activité minière dans le monde, revient actuellement et de manière durable sur le devant de la scène, en raison de la croissance très forte des prix des matières premières, liée notamment à la demande des économies chinoises et indiennes, ou à la perspective programmée pour les prochaines décennies d'une raréfaction des matières énergétiques (pétrole, uranium). Si l'activité extractive ne représente plus qu'une part limitée, de l'ordre de 17% de l'économie mondiale, l'accès aux différents métaux est donc de plus en plus décisive pour l'existence même de la civilisation industrielle.

Les enjeux de la recherche sur les gisements métalliques se sont largement déplacés. D'un côté, la protection de l'environnement et le souci d'éviter les gaspillages (« sustainable development ») posent aux exploitations minières (actives, ou abandonnées) des problèmes nouveaux dont la solution exige des avancées scientifiques, dans des domaines où, compte-tenu de leur expertise, les métallogénistes sont appelés à tenir une très grande place aux interfaces de la lithosphère et de l'hydrosphère. D'un autre côté, les progrès technologiques réalisés au cours de la dernière décennie dans les domaines de la géochimie, de la géochronologie et de la modélisation 3D géologie-géophysique permettent aujourd'hui d'affiner considérablement les modèles de gisements, outils indispensables à l'élaboration des stratégies d'exploration des nouvelles cibles situées à des profondeurs toujours plus grandes. Incontournables également sont aujourd'hui les stratégies d'exploration basées sur des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) performants élaborés dans le cadre de leur politique d'infrastructure géologique par les organismes gouvernementaux (SIG Afrique BRGM par exemple, ou SIGEOM au Québec où la stratégie d'exploration du diamant, par exemple, repose essentiellement sur le programme de cartographie général du territoire relancé par le gouvernement). La France, grâce à l'excellence de ses équipes de recherche et de plateformes analytiques exceptionnelles peut aujourd'hui relever le défi de cette nouvelle aventure du XXI^{ème} siècle, et donner ainsi au pays les moyens d'une réflexion stratégique sur sa politique des matières premières alimentée par des scientifiques de terrain.

■ Perspectives

Pour l'avenir, l'amélioration des modèles métallogéniques passe par une recherche s'appuyant sur les objectifs suivants :

- **Minéralogie-pétrographie-expérimentation** : analyse des constituants des gisements et de leur encaissant ; relations de phases ; identification et description de nouvelles espèces ;
- **Géochimie** : traçage des sources des métaux, des ligands (soufre et chlore), des fluides ; origine des salinités ; mécanisme de dépôt des métaux (mélange ; dilution, redox) ;
- **Géochronologie** : datation de la mise en place des minéralisations (U-Pb, Ar-Ar, Re-Os), polyphasage des gisements, relations des gisements avec la géodynamique, les paléostratigraphies (organisation des bassins, discordances par exemple).

Des progrès décisifs en matière d'**exploration de gisements cachés** viendront certainement de deux technologies complémentaires en pleine évolution aujourd'hui :

- La géophysique aéroportée haute résolution pour laquelle les équipes de recherche françaises doivent absolument s'investir ;
- La modélisation 3D géologie-géophysique couplant géométrie et propriétés physiques des roches pour laquelle l'expertise française est mondialement reconnue aujourd'hui (plateforme Gocad et Géomodelleur).

La prise en compte des **facteurs économiques** est aujourd'hui capitale dans la conduite d'une politique d'approvisionnement en matières premières :

- Quels sont les paramètres contrôlant la formation des gisements « géants » ?
- Comment se distribuent les gisements les plus importants dans les principales ceintures minéralisées ?
- Comment évoluent les politiques de prix des matières premières (cycles, bourses, spéculations) et de réorganisation des acteurs industriels (concentration, interactions juniors-majors) ?

Le **renouvellement des ressources humaines** en métallogénie apparaît aujourd'hui comme un élément incontournable d'une politique cohérente dans le domaine des matières premières. La France possède un certain nombre d'experts mondialement reconnus dans les domaines de la géologie de l'uranium, des métaux de base (Cu-Pb-Zn-Ni-PGE), des gemmes notamment. Le renouvellement de ces cadres est urgent ; il sera décisif pour accompagner le développement de nos principales ressources industrielles dans ces secteurs. Enfin, une politique de recherche dans le domaine des matières premières doit nécessairement s'appuyer sur un **réseau associant partenaires industriels et académiques** (groupements d'intérêts partagés, programme nationaux types ANR, structures R&D à finalité commerciale, bourses de recherche BDI, CIFRE, etc..). Les réussites du groupe CREGU et du consortium GOCAD dans ce domaine constituent des exemples remarquables à développer et sur lesquels toute politique nouvelle devrait s'appuyer.

L'existence d'une structure de recherche en réseau, construite sur des actions fédératrices, et organisant la synergie entre les équipes universitaires, les organisations gouvernementales et le secteur industriel, est à l'évidence un facteur de potentialisation dans cette démarche. Des relations internationales renforcées avec les pays à forte composante ou intérêt minier sont à privilégier. Pour des raisons politiques et linguistiques le Québec nous offre une opportunité dans ce sens. L'Afrique pour des raisons équivalentes apporte également des possibilités importantes d'applications et de développement de notre savoir faire mais sans exclusives.

• La recherche académique en France dans le domaine de la Métallogénie

La communauté métallogénique française bien que performante est réduite en effectifs comparativement aux autres disciplines scientifiques : c'est un point faible incontestable dans le cadre de la réorganisation d'ensemble du système universitaire qui doit être pris en compte et pousser à un renforcement des structures de réseau. Elle est aujourd'hui dispersée dans une dizaine d'universités avec de nombreux chercheurs isolés. Il s'agit maintenant de définir les moyens d'une coopération plus poussée, qui permettrait de surmonter le handicap des effectifs et de la dispersion face à la concurrence internationale.

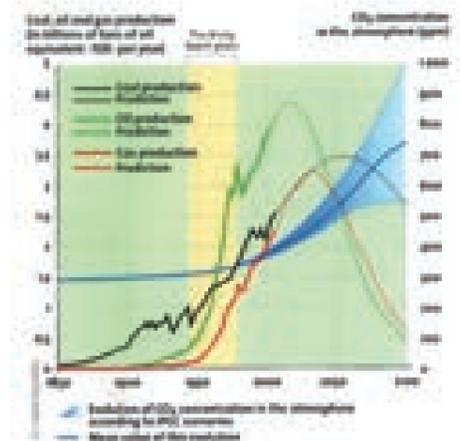
La visibilité des groupes travaillant sur les ressources est difficilement assurée, mis à part au niveau des équipes ayant continué d'afficher cette thématique au cours de la décennie qui s'achève : le G2R et le CRPG à Nancy, l'ISTO à Orléans et le LMTG à Toulouse.

Comme l'a souligné le rapport d'activité du GdR « Transmet », la métallogénie française souffre encore d'un certain manque de visibilité internationale. Les points forts de notre communauté :

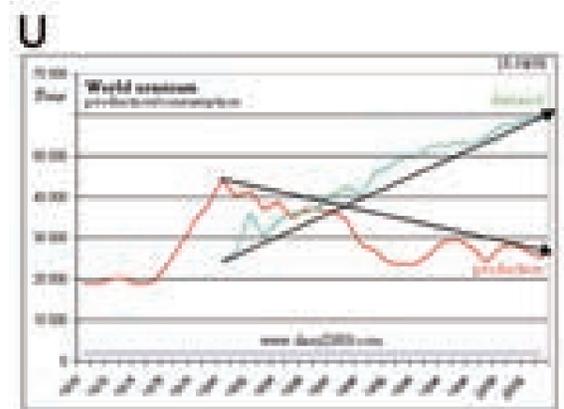
- Présence sur quelques grands terrains de jeu dans le domaine des matières premières aujourd'hui : Canada (AREVA-CREGU ; Orléans/Montréal), Afrique de l'Ouest, Maroc (Groupement de recherche Toulouse-IRD; BRGM, CRPG), Europe centrale et occidentale Roumanie, Espagne (G2R, ISTO), Nouvelle Calédonie (IRD), Russie (AREVA-CREGU) ; Afrique du Sud (Rennes, Paris-IPGP, Grenoble) ;
- Appui sur un réseau analytique d'excellence dédié aux sciences de la Terre en général et développé par le partenariat Universités-CNRS ;
- Poursuite du développement d'un domaine d'expertise dans la micro-analyse ponctuelle des fluides et de leurs constituants (microsonde nucléaire, microspectrométrie Raman, Synchrotron, etc.) ;
- Expérimentation et modélisation numérique des fluides transportant et déposant les métaux ;
- Développements informatiques en modélisation 3D.



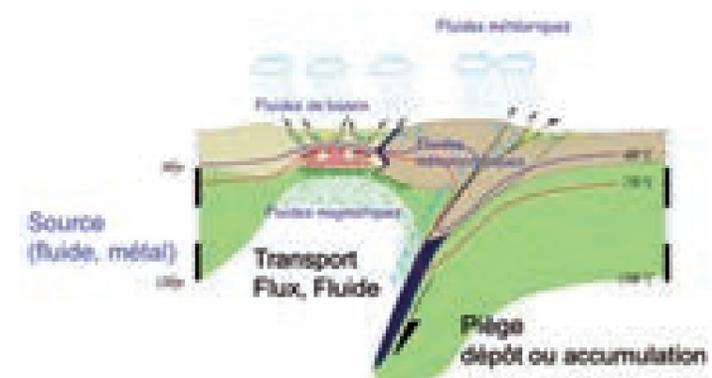
1. Les géoénergies ressources, stockage.



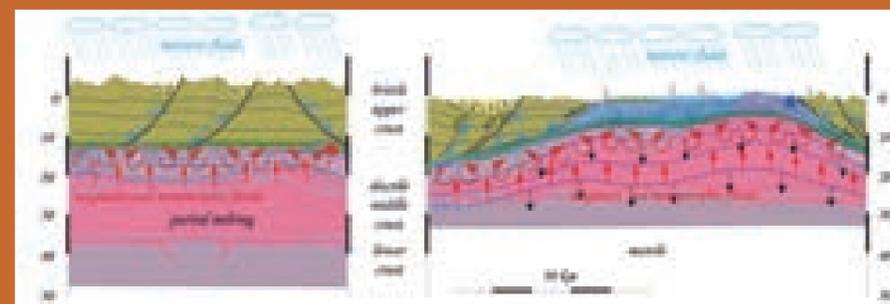
2. Charbon, pétrole, gaz, production et prédiction, (J. Varet/Futuribles).



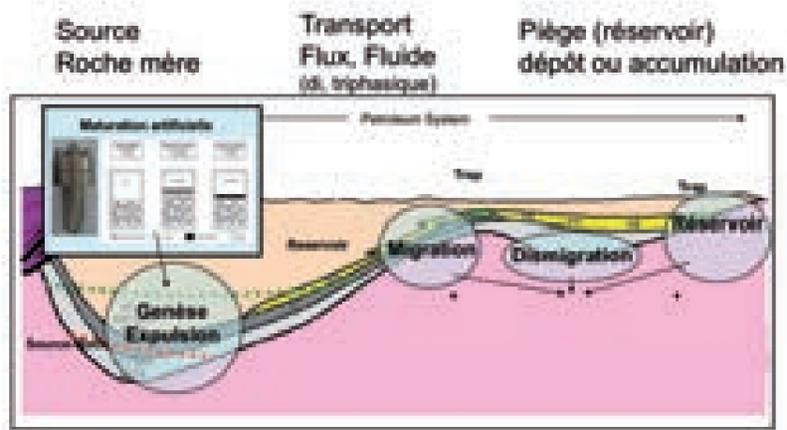
3. Production et demande d'uranium et de nickel.



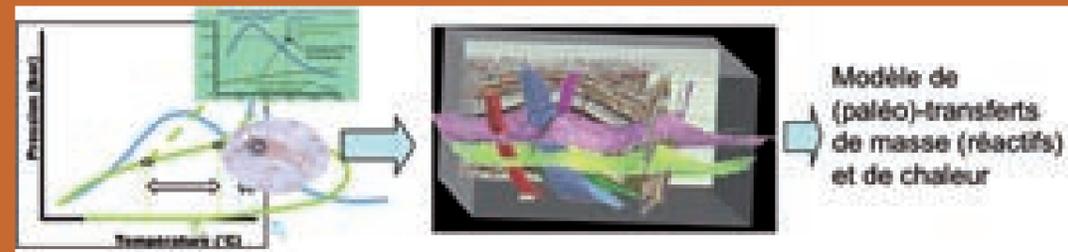
4. Les fluides en géosciences, (G2R).



5. Les fluides dans la croûte et interaction croûte cassante, ductile, (G2R).



6. Genèse, transport, accumulation des ressources minérales, (G2R).



7. L'analyse des inclusions fluides permet de déterminer les domaines de pression et températures, l'imagerie donne accès aux structures profondes. L'ensemble permet la modélisation des paléo-transferts de masse et de chaleur, (GOCAD, G. Caumon, LIAD Nancy).

Les aléas et le risque

La problématique « Risques » telle que déclinée dans l'appel d'offre RISKMAT, concerne trois domaines majeurs : les aléas, la vulnérabilité et les applications opérationnelles (P.Y. Bard). S'agissant des sciences de la Terre, au-delà de notre participation à des projets intégrés de la source du risque à l'impact sociétal et économique, il existe encore des verrous scientifiques importants à lever au niveau de l'aléa sismique et volcanique à savoir :

- L'évaluation de la probabilité d'un séisme ou d'une éruption et de son niveau d'incertitudes ;
- L'étude des phénomènes précurseurs.

Des développements R & D majeurs restent à faire au niveau des capteurs et d'une manière générale des systèmes de prévision.

■ Verrous scientifiques et risque volcanique

Les volcans explosifs, qui représentent le risque le plus important pour les populations, ne sont pas encore bien compris. Pour progresser, il faut développer des techniques permettant de quantifier les paramètres physiques lors d'une éruption (vitesse des éjecta, flux et compositions des gaz) et donc faire un effort particulier dans les méthodes de « *remote sensing* » (radar, laser, satellites...).

L'identification et l'interprétation des précurseurs d'une éruption explosive nécessitent de développer la modélisation du système magmatique et du système hydrothermal généralement associé, en faisant appel notamment à la physique des milieux poreux déformables. La question de la genèse, de l'évolution et de la destruction des chambres magmatiques est en grande partie ouverte et doit donner lieu à des modélisations plus complètes et intégrées. La compréhension de la transition effusive-explosive, de la dynamique des jets explosifs, des mécanismes de génération des effondrements de colonne, ainsi que la modélisation des écoulements pyroclastiques, sont le pré-requis de la gestion des risques naturels. La connaissance de l'historique de ces volcans complète le champ d'investigation. La comparaison des données recueillies à l'occasion de campagnes de forage, à terre et en mer est indispensable pour fournir un cadre cohérent à l'interprétation de la stratigraphie volcanique trop souvent incomplète et trop ancienne si, bien entendu des efforts sur le développement de techniques de datation précises sont consentis.

■ Verrous scientifiques et risque sismique

La problématique plus spécifique du risque sismique associé aux failles actives fait appel à de nombreuses spécialités des sciences de la Terre : tectonique, sismologie, géodésie, physique des roches, géochimie, hydrologie ..., avec des approches complémentaires et des instruments variés (terrain, modélisation expérimentale et numérique). Trois points cruciaux peuvent être identifiés dans l'étude des déformations actives et en particulier des failles et du risque sismique :

• Comprendre et modéliser le fonctionnement des failles au cours des différentes phases de leur cycle sismique

Pour la phase co-sismique, la modélisation et la prédiction du mode de propagation de la rupture sur des failles segmentées est un challenge majeur pour la prédiction correcte des mouvements du sol. L'existence de processus dissipatifs au cours de la rupture nécessite d'être prise en compte. Les effets de site locaux (sols mous ou liquéfiables, topographie) qui peuvent considérablement amplifier ces mouvements sont eux aussi encore mal cernés.

Pour la phase de réajustement post-sismique, de nombreux modèles existent mettant en jeu des rhéologies et des profondeurs crustales ou lithosphériques variées, mais les mesures pertinentes (géodésie et sismologie) font encore défaut pour les contraindre. La recherche sur les modes de déclenchement d'un séisme par un autre, essentiel pour l'évaluation de l'aléa, est encore balbutiante.

Pour la phase intersismique (chargement continu des failles) il faut déterminer la zone bloquée de la faille et sa vitesse de chargement, pour en évaluer le potentiel sismogène, ce qui exige d'améliorer les techniques de traitement des données géodésiques (GPS continu, Interférométrie Radar, corrélation d'images satellites). Enfin, les phases de déformation transitoires (essais sismiques, glissements lents au cours de l'intersismique) et les phases d'initiation des ruptures (précurseurs) restent encore largement incomprises et très peu documentées ; le rôle des circulations de fluides profonds, souvent évoqué pour ces processus, doit être élucidé.

• Améliorer notre connaissance des forts séismes passés

C'est-à-dire poursuivre les efforts d'identification des ruptures passées sur les failles notamment en tranchées ; améliorer les techniques de datations à très court terme par isotopes « cosmogéniques » ^{36}Cl et ^{10}Be notamment ; mettre au point de nouvelles méthodes d'identification des ruptures passées.

• Etudier la géométrie et le degré d'évolution des failles long-terme

Les failles, à long terme, jouent un rôle dans les processus d'initiation et d'arrêt des ruptures sismiques, ainsi que sur l'amplitude des déplacements co-sismiques et des chutes de contrainte. Il faut donc poursuivre les études morphotectoniques « classiques » (imagerie satellitaire à différentes échelles, modèles numériques de terrain haute résolution, datation fine des marqueurs géologiques décalés par les failles).

• Appuyer les développements technologiques

En effet, les thèmes évoqués ci-dessus demandent que soient collectées des observables géophysiques ; l'instrumentation des chantiers doit donc être possible à des échelles de temps variables. Le besoin en expérimentation (haute et basse température) est aussi important et requiert souvent des développements instrumentaux. La France est sous-équipée en instrumentation géophysique destinée à l'étude de la structure de la lithosphère et des risques naturels. Il est important de développer des réseaux denses de stations sismologiques 3 composantes large-bande, des réseaux d'accéléromètres, des réseaux de stations GPS permanents, continus et haute fréquence. La recherche et la mesure des phénomènes transitoires de déformation et des phases d'initiation des séismes (précurseurs) requiert une instrumentation spécifique de très grande résolution sur quelques chantiers pilotes de lacunes sismiques : sismomètres très large-bande, réseau de sismomètres courte-période en forage, inclinomètres longue

base et extensomètres de forage, et enfin forages profonds pluri-kilométriques instrumentés recoupant des failles actives. Les déformations transitoires étant généralement de faible amplitude et de courte durée, leur mesure nécessite également un gros effort de développement méthodologique, dédié à diminuer les incertitudes.

Les couplages de méthodes géophysiques devraient être encouragés : par exemple sismologie et tectonique, pour une meilleure détermination des « paramètres-clé » des modèles de rupture (géométrie des failles, histoire long-terme, degré d'activité), sismologie et magnétotellurique pour l'étude de la structure et de l'anisotropie, sismologie et GPS haute fréquence pour enregistrer l'ensemble du signal sismique et post-sismique dans les zones actives.

Les efforts doivent être poursuivis en imagerie haute résolution (développement de satellites dédiés à l'étude des séismes et des déformations transitoires liées au cycle sismique, modèles numériques de terrain ultra-précis), imagerie structurale (imagerie de la structure fine des failles, mais aussi des conduits volcaniques), imagerie des séismes en mer (OBS) et plus généralement toutes les méthodes qui permettent de détecter et de mesurer des déformations du sol très petites et courtes (imagerie radar haute résolution, GPS haute fréquence).

Enfin, pour aborder ces différentes phases du cycle sismique, la modélisation numérique doit progresser dans son réalisme, en intégrant le 3D, la visco-plasticité, les couplages fluides, et plus généralement les processus thermo-physico-chimiques, ces derniers devant par ailleurs être étudiés en laboratoire.



L'éruption de la Montagne Pelée, qui fit 29 000 morts à Saint Pierre de la Martinique, est emblématique de l'aléa et du risque volcanique auxquels sont soumises les Antilles françaises. Risque auquel s'ajoute le risque sismique. Photo Lacroix.

L'INSU face à ces enjeux : organisation de la recherche, valorisation, formation, communication

■ Organisation de la recherche : quelques propositions

● Structuration renforcée des équipes françaises en sciences de la Terre

- Augmenter leur visibilité par une meilleure adéquation recherche et formation au sein des OSU ;
- Favoriser les interactions entre laboratoires français au travers de réseaux mis en place autour de grandes questions scientifiques plutôt que par disciplines (cf. Métallogénie) ;
- Rapprocher les recherches sciences de la Terre avec celles des autres divisions de l'INSU : Surfaces et interfaces Continentales, Astronomie-Astrophysique, Océan-Atmosphère (Prospective commune, comités communs, unification des procédures ... !)

Mettre en place les OSU dans les universités permettant une meilleure visibilité régionale et une mise en œuvre concertée des politiques scientifiques des tutelles, cela dans le cadre des contrats quadriennaux.

● Organisation du mode de partenariat avec les industriels et les autres organismes de recherche

- Mettre en place un système de conventionnement plus souple entre INSU, organismes de recherche et industriels pour la recherche fondamentale (action coordonnée de l'INSU) ;
- Travailler en réseaux (networking) avec les industriels en créant des consortia, favorisant le partage équilibré des résultats et des droits ;

- Réfléchir à une modalité de collaboration des industriels aux recherches fondamentales dans les contrats quadriennaux. Développement des chaires d'excellence.

Confirmer l'INSU comme opérateur inter-organismes pour la recherche amont dans le domaine des sciences de la Terre

● Ancrage régional

- Les Universités/Ecoles/PRES devraient permettre le développement de la recherche au sein d'OSU, lesquels permettent le regroupement des laboratoires de recherche, des services d'observation et des enseignements du domaine des sciences de la Terre et de l'Univers à l'échelle d'une composante de l'Université, augmentant ainsi la cohérence du dispositif.
- L'ancrage régional doit se traduire par une collaboration forte avec les collectivités territoriales. L'INSU doit être actif en région pour aider à mettre en place les CPER en amont.

Inciter l'INSU à discuter avec les régions (CPER, contrats quadriennaux) en cohérence avec l'Université

● Ancrage national : préserver le rôle de l'INSU

- Comme coordinateur et « labellisateur » des services d'observation des milieux naturels ;
- Comme incubateur de projets et valorisation à moyen et long terme des recherches (actions sur projet INSU) sur projets de taille moyenne (10-50 k€/an) INSU : maintien des connaissances, réserve de pensée, veille scientifique ;

L'INSU face à ces enjeux : organisation de la recherche, valorisation, formation, communication

- Dans sa politique à la fois multi-disciplinaire et multi-organismes. La coordination et la gouvernance des accords de partenariat doit être faite en concertation, en renforçant le rôle de plateforme pluri-organismes de l'INSU ;
- Dans sa politique de coordination, mutualisation et support des plate-formes et outils communs.

Soutenir l'INSU dans sa mission d'observation des milieux naturels et son approche inter-disciplinaire

● Financement

- Préserver le financement de la recherche amont sur la base d'un juste équilibre entre dotation sur soutien de base, dotations sur projet INSU et projets ANR.
- Renforcer la démarche de proposition de programmes ANR à travers l'INSU avec un effort de coordination des recherches intégrées des mondes « académique » et « industriel ».

Renforcer les capacités d'influence de l'INSU sur la programmation de la recherche de l'Europe. Renforcer le rôle de l'INSU dans sa mission de coordination européenne et internationale.

■ Valorisation

● Visibilité des compétences des laboratoires vers les industriels

- Communiquer sur les résultats : sites web, lettres d'information, journées scientifiques, colloques envers les industriels ;
- Faire communiquer les labos sur leurs domaines d'excellence ;
- Favoriser les plate-formes analytiques ou expérimentales mutualisées visibles pour les industriels ;
- Organisation nationale de centres d'excellence spécialisés s'appuyant sur des pôles de formations complémentaires organisés en réseaux.

L'OSU en région peut être la bonne échelle pour favoriser les relations des laboratoires avec les industriels.

● Communication des connaissances vers la société

- Transmission de l'information ;
- Mise en place de réseaux de compétences par thématique relayés au niveau de l'INSU-Organisation en groupe du type G.I.E.C. (climat) ;
- Expertise ;
- Intégration des sciences humaines et sociales dans l'étude et l'expertise ;
- Géographes – économistes – juristes - sociologues ;

■ Les Sciences de la Terre dans le dispositif de formation universitaire

● Impulser des relations plus étroites entre les chercheurs, les universités et les industriels

Les industriels nous disent qu'ils auront dans les années à venir des besoins en recrutement très importants et qu'ils comptent en partie sur les universités pour former des chercheurs à bac+8, les recrutements à Bac+5 se faisant plutôt du côté des écoles d'ingénieurs. Cet effort en direction des industriels ne peut pas se faire sans contacts étroits avec eux et sans soutien de leur part. Ils nous demandent également de former des géologues capables de ramener des données fiables et quantifiables du terrain. Il nous faut donc repenser largement notre offre de formation et mettre l'accent sur l'acquisition de cette pratique afin de donner à nos thésards une chance supplémentaire, car tous ne pourront pas, et ne souhaiteront pas, intégrer la recherche académique. Cet effort de notre part doit cependant se faire en préservant et développant notre métier de base qui est la recherche fondamentale sur les processus qui font la dynamique de la planète. C'est donc un meilleur équilibre entre fondamental et appliqué qu'il nous faut trouver. Les géologues universitaires ne doivent pas être les prestataires de service des industriels mais des partenaires de confiance.

● Former des géologues ¹

La société a besoin que nous formions des géologues (lato sensu) de terrain, capables de rapporter des données quantifiables et fiables, pour que l'enseignement en L et M suive le mouvement... En particulier, il est primordial de redonner

toute leur place aux fondamentaux des géosciences, y compris aux travaux analytiques de terrain. Nous devons impulser une évolution considérable de nos missions de formation. Après avoir délaissé, durant de nombreuses années, l'éducation des jeunes géologues à la cartographie des objets à l'échelle régionale, les besoins de former les futurs gestionnaires des risques et ressources naturelles nous imposent de la reprendre et d'en améliorer la qualité.

● Renforcer les contacts avec les enseignants du secondaire et des classes préparatoires.

Les universitaires doivent s'impliquer davantage dans la formation continue des enseignants de STU à l'occasion des PAF et/ou des journées organisées aussi bien par l'Inspection Générale de l'Education Nationale que les Associations d'enseignants (APBG, CBGA, ...). Il est important que nos « meilleurs » géologues enseignent aussi dans les filières de formation et de préparation aux concours (CAPES, Agrégation). Il faut enfin œuvrer pour que les programmes de l'enseignement secondaire évoluent vers la notion de « **géosciences au service de l'humanité** », œuvrer pour que les programmes soient modifiés dans le bon sens. A l'heure actuelle les programmes sont axés sur une géologie un peu désincarnée et très académique. Le lien avec les besoins de la société est très ténu et il n'est pas étonnant que les français ne sachent souvent même pas à quoi peut bien servir un géologue.

● Formation continue des formateurs.

Nos collègues du secondaire, et en relation étroite avec des collègues chercheurs et enseignants-chercheurs, font des efforts miraculeux pour faire évoluer la pratique de l'enseignement des sciences de la Terre dans les lycées et les collèges. Les élèves du lycée sont aujourd'hui à même d'analyser des sismogrammes enregistrés par des stations situées dans l'établissement même et ils peuvent localiser les séismes en temps réels, construire des blocs 3D grâce à des « géomodeleurs », ils utilisent couramment les PDA et le GPS pour localiser leurs observations de terrain et les rentrer dans des SIG... bref, les élèves sont souvent mis en présence, dès le lycée, de méthodes de travail très à la page et souvent plus ludiques que ce que nous leur offrons dans les universités en L1. Cette évolution doit beaucoup aux contacts avec les universitaires qui s'impliquent dans les relations avec leurs collègues du secondaire. Il est par ailleurs indispensable que l'enseignement passe à un moment par un stade un peu

fastidieux et un peu moins ludique. Nous risquons donc, et c'est déjà souvent le cas, de décevoir les élèves qui viennent du lycée et se trouvent face à de vraies équations à résoudre ou de séries à apprendre. Nous ne devons pas esquiver cette question et réfléchir à la meilleure façon de faire passer un message précis et clair, et en même temps de garder intact l'enthousiasme des étudiants.

■ La communication avec la société : réflexion

● Responsabilité scientifique et communication

Communiquer, c'est-à-dire transmettre les résultats des recherches, les connaissances, les questionnements mais aussi les blocages, est utile et nécessaire au bon fonctionnement de la Recherche car une société mieux au fait des avancées scientifiques, mais aussi des contraintes et des difficultés de la recherche, est davantage encline à en défendre les investissements, la nécessité, à en apprécier les progrès.

Pour cette raison, la responsabilité du scientifique et des acteurs du dispositif de recherche vis-à-vis de la société comprend aussi la mise à disposition en-dehors de la communauté scientifique des savoirs acquis, de l'expertise, qu'il s'agisse du progrès des connaissances, de mises au point méthodologiques ou instrumentales. Cette responsabilité peut aller jusqu'à l'alerte ou la prise de parole. Ceci implique une part de communication vers un ou plusieurs destinataires (cibles) : médias, public, décideurs, entreprises, monde enseignant..., mais aussi des contraintes déontologiques, légales et juridiques. On l'a constaté plusieurs fois, qu'il s'agisse du climat ou de l'astronomie, ou bien de risques avérés (séisme de Sumatra) ou potentiels (OGM, nano-particules).

Le lien entre la compréhension du public, la demande sociétale et la communication scientifique est complexe. Les rétroactions sont fortes, beaucoup des interrogations de la société, auxquelles on se réfère si fréquemment, sont en fait le résultat d'un travail de communication coordonné entre chercheurs et leurs organismes, que la société finit par assimiler. Il en est ainsi du changement climatique, comme il en a été de la raréfaction de l'ozone dans les zones polaires. Travail d'information que chercheurs et services de communication de l'INSU, de Météo France, du CNES, du CEA ont mené ensemble depuis le début des années 1980.

¹ - Cf. « Prospective de l'emploi dans les Géosciences à l'horizon 2020 » J. Varet, BRGM

Comment améliorer la communication dans le domaine des Sciences de la Terre en dehors de la communauté scientifique ? Cette question peut être abordée sous deux angles différents et complémentaires : celui des responsabilités et possibilités de la communauté scientifique, celui des institutions.

• Communication : rappels

Les besoins d'information dépendent du public visé :

- Le monde des entreprises qui a besoin d'une information technique, de valorisation, d'expertise ;
- Le monde enseignant, pour lequel compte plus la démarche logique et pédagogique. Le lien peut se faire à tous les niveaux, celui des établissements scolaires, des centres pédagogiques, celui des structures académiques et ministérielles.
- Le monde des médias, décideurs, public qui ont en commun de devoir être informés en dehors de leur activité principale ou de leur spécialité, et ont besoin d'aller immédiatement à l'essentiel en des termes clairs.

La communication vers les médias, les décideurs, le public

Les actions de communication sont de multiples natures. Elles peuvent aller de la rencontre entre le chercheur et le public lors d'une conférence, à l'émission de communiqués de presse, l'organisation de conférences de presse, de voyage et visite de presse par l'organisme de tutelle ; la programmation d'un reportage filmé, la mise en ligne d'un journal de bord sur le net, l'émission d'actualités et d'une lettre électronique ou encore, l'édition de documentation, l'organisation d'opérations de communication de plus grande ampleur (expositions, conférence, éditions, films). Les actions de communication impliquent une interaction entre scientifique(s), décideurs de l'organisme, et professionnels de la communication. Il y a échange d'informations, puis prise de décision sur le mode de traitement, et une mise en œuvre qui peut aller de la simple rédaction d'un communiqué de presse à propos d'une publication majeure, à l'organisation d'une série d'opérations comme pour l'Année internationale de la planète Terre.

• Comment la communauté scientifique peut-elle mieux communiquer dans le domaine des sciences de la Terre ?

Une prise de conscience de la part des scientifiques est nécessaire.

La mise à disposition et le transfert des savoirs acquis commencent par une prise de conscience par le chercheur

que ses propres recherches ne sont pas uniquement destinées à la communauté scientifique. Une démarche systématique de « communication au sens large » en parallèle à la communication scientifique doit être acquise par tous : participation aux journées portes ouvertes, fêtes de la science, cycles de conférences, interventions dans les milieux scolaires ou professionnels, contributions à des sites spécialisés. Avoir une démarche systématique de communication demande un minimum d'entraînement et de savoir faire, minimum qui pourrait être enseigné pendant la thèse. C'est en particulier :

- En premier lieu savoir à tout moment, de manière succincte ou détaillée selon les circonstances ou les interlocuteurs (éventuellement des journalistes), expliquer l'objet et le contexte de ses recherches, sans a priori négatif sur l'interlocuteur ;
- Prévoir un résumé détaillé en français de ses publications majeures ;
- Savoir apprécier ce qui peut faire ou doit faire l'objet d'une transmission d'information ou d'alerte vers les responsables des institutions et de leurs services de communication. Il s'agit par exemple justement des publications majeures, des campagnes de terrain, des observations exceptionnelles, réussites ou premières expérimentales. En effet, si chacun peut avoir des contacts avec des journalistes, la responsabilité d'alerter les médias (notamment nationaux) revient plutôt à l'INSU et à ses services de communication et de presse.
- Mentionner son appartenance et celle de son laboratoire lors d'une prise de parole ou d'interview en tant qu'expert représentant l'institution.

• La communication au niveau des laboratoires

Le site web des laboratoires

Pour les laboratoires, le premier outil de communication vers divers publics est le site web. Si tous les laboratoires présentent leurs activités de recherche et d'enseignement, l'idée que le site WEB du laboratoire puisse aussi être un vecteur de transmission de l'avancée des connaissances n'est pas assez répandue. Or différents secteurs d'activité (services de communication des organismes, journalistes, médiateurs culturels, enseignants du secondaire, mais aussi des entreprises) les consultent pour y chercher de l'information. A titre d'exemple, depuis quelques années, le Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement de Grenoble (en océan atmosphère) met en ligne sur son site des résumés vulgarisés des publications que les auteurs jugent importantes.

Les lettres d'information

Les laboratoires peuvent aussi en fonction de leur domaine et de leur activité avoir identifié, ou décidé de privilégier, des partenaires ou un public particulier. Dans ce cas, l'émission d'une lettre d'information est utile car elle peut être conçue et diffusée de façon ciblée. A notre connaissance deux laboratoires (Géoscience Montpellier, l'EOST), deux programmes (ECORD/IODP et GDR Marges) et un OSU (OMP) le font.

Des actions ciblées

Enfin, les laboratoires peuvent avoir leur propre réflexion sur une démarche de communication sur un ou plusieurs des modes : la valorisation et la relation avec les entreprises, la pédagogie, la culture... avec des partenaires spécifiques, partenaires régionaux par exemple. Le site web du laboratoire peut toujours être le vecteur minimum d'information.

• Comment les institutions peuvent-elle mieux communiquer sur les géosciences ?

Tous les organismes de recherche ont une mission de communication à court terme qui porte sur leur politique, l'activité des laboratoires, les avancées de la recherche et les résultats majeurs. Cela se traduit le plus souvent par l'information de la presse, l'édition d'un journal et de documentation. A plus long terme la mission est culturelle, elle peut se traduire par la réalisation de documentaires, d'expositions, de rencontres avec le public, etc. Dans un contexte où il n'y a pas pléthore de moyens, chaque organisme ou institution tente de faire au mieux en fonction de ses moyens humains et financiers. L'information de la presse est toujours prioritaire. Il en va de même pour l'INSU à son échelle. La cellule de communication de l'INSU a, entre autres, la responsabilité des informations émises vers la presse nationale par le CNRS ou directement par l'INSU, sous-couvert du Directeur et des DAS. Les OSU pourraient être les centres de communication de l'INSU en région. Dans ce schéma, une politique de développement de cellules de communication au niveau des OSU est donc à concevoir et à mettre en réseau.

Cette communication devrait porter sur :

- Les publications majeures dès leur acceptation, de préférence avec un résumé français ;
- Les départs et retours de missions importantes (pour faire évoluer ce point les campagnes de mesures sur le terrain seront annoncées sur le site web des OSU au même titre que les colloques) ;

- Signaler les mises au point analytiques majeures en particulier sur les moyens utilisables par la communauté ;
- D'enrichir le fond d'images de l'INSU.

Depuis 2002, date de la dernière prospective ST, la communication de l'INSU a :

- Mis en place le site web avec ses actualités diffusées par la lettre électronique ;
- Edité les plaquettes de présentation de l'INSU et des activités spatiales ;
- Pour les sciences de la Terre, produit avec le Muséum et le CNRS l'exposition présentée à la Grande galerie « Himalaya Tibet le choc des continents », cette exposition est partiellement reprise par le CCSTI de Bordeaux et itinère depuis ;
- Organisé une visite de presse au LGIT, plusieurs conférences de presse (Signature ECORD, forage à Tahiti, campagne Gravituck, campagne Sumatra, ECLIPSE)...

La production de l'INSU en matière de communiqués de presse et d'actualités scientifiques est du même ordre de grandeur que celle des organismes partenaires. Entre 2004 et 2007, le nombre des nouvelles d'actualité de l'INSU diffusées par la lettre électronique à plus de 2000 personnes dont au moins une centaine de journalistes est passé de 58 à 128. Elles portent essentiellement sur des résultats scientifiques (dont 55 en AA, 34 en OA et 28 en ST en 2007). A titre indicatif, le CNES a émis en 2007 50 communiqués de presse, l'Ifremer 29, le BRGM 69 (qui portent sur l'ensemble des activités du BRGM alors que les nouvelles de l'INSU portent en grande partie sur les résultats de publication).

Moyens et structures

La politique d'instrumentation nationale

Composition du groupe de travail

| | |
|----------------------|---|
| Bruno Hamelin | (CEREGE Aix-Marseille), président, membre de la CSST |
| Nicolas Arnaud | (Géosciences Montpellier) |
| Jane Blichert-Toft | (ENS Lyon) |
| François Chabaux | (CGS Strasbourg), responsable de la commission adhoc mi-lourds géochimie |
| Philippe Charvis | (Géosciences Azur Nice) |
| Pierre Cochonat | (IFREMER Issy-les-Moulineaux), membre de la CSST |
| Anne Deschamps | (Géosciences Azur Nice), responsable de la commission adhoc mi-lourds géophysique |
| Etienne Deloule | (CRPG Nancy), membre de la CSST |
| Anne Paul | (LGIT Grenoble) |
| Etienne Ruellan | directeur de la division technique de l'INSU |
| Nicolas Shapiro | (IPG Paris) |

Catherine Mével, Jérôme Dymont, chargés de mission INSU assurant le suivi

■ Instruments nationaux et politique d'équipement des laboratoires

La labellisation, le suivi et l'évaluation des Instruments nationaux doivent être assumés par la **même commission « ad hoc » en charge de l'évaluation des projets d'équipement mi-lourds** des laboratoires. Le concept d'Instrument national ne trouve en effet son sens et son efficacité que s'il est clairement articulé avec une connaissance approfondie et actualisée de l'ensemble du parc national d'équipement dans les laboratoires. Ceci est particulièrement crucial pour étayer rationnellement les recommandations de priorités d'acquisition et jouvence instrumentale, et éclairer les arbitrages de la direction de l'Institut entre les investissements dans les Instruments nationaux et dans les instruments de laboratoires.

Afin de bien marquer le poids du dispositif des Instruments nationaux, il est recommandé que cette commission apparaisse comme un **organe central de l'INSU**, afin d'homogénéiser et d'harmoniser les modes de travail et de gestion entre les différentes divisions de l'Institut, autour de principes communs.

Strictement centrée sur les questions instrumentales, cette commission n'aura **pas le même champ d'exercice que la commission en charge de la labellisation et du suivi des Services d'Observation**, et les deux entités doivent donc être distinguées.

L'élargissement des tâches des actuels « groupes *ad hoc* Mi-lourds » implique un **changement de mode de travail actuel** de ceux-ci. Le travail de cette commission devrait être centré sur **l'évaluation comparative des plans quadriennaux d'équipement** des laboratoires, tels que préparés dans le cadre de la contractualisation et des CPER, en abandonnant la procédure antérieure d'appel d'offres annuel. Cette méthode permettrait de recentrer l'intervention de l'INSU sur l'établissement d'une **politique nationale pluriannuelle** en matière d'équipement. Cette fonction de prospective, qui devrait être au cœur du rôle de l'Institut dans le dispositif national, s'est en effet trouvée progressivement diluée dans la gestion annuelle et au coup par coup des demandes d'équipement morcelées par l'appel d'offres « Mi-Lourds » annuel. Axer principalement le travail de la Commission sur les plans quadriennaux aurait également l'avantage de responsabiliser les équipes et leur directeur dans la préparation des plans

d'équipement, qui devraient être strictement ordonnés et hiérarchisés, échelonnés dans leur calendrier, et argumentés sur le plan des demandes de co-financement. Ce dernier point redonnerait à l'INSU un rôle central dans les négociations inter-organismes, particulièrement vis-à-vis du Ministère de la Recherche et vis-à-vis des Universités, mais également vis-à-vis des collectivités locales et des organismes partenaires.

En revanche, ce recentrage sur les considérations stratégiques peut comporter un risque de perte de flexibilité et de réactivité du dispositif de l'INSU. Ce soucis, bien que potentiellement très important pour la vie quotidienne des équipes, relève cependant plus directement de la responsabilité de la direction de l'INSU, et ne doit pas occulter la fonction de cadrage d'ensemble, trop négligée auparavant.

Recommandations

Maintien et renforcement du concept d'Instrument national de l'INSU.

Actualisation des critères de labellisation, de suivi et d'évaluation des Instruments nationaux.

Mise en place d'une commission Politique d'Instrumentation Nationale (PIN) au niveau du CS de l'INSU, remplaçant les actuels groupes « *ad hoc* » Mi-lourds.

Abandon de l'appel d'offres Mi-lourds dans sa forme actuelle.

■ Charte des Instruments nationaux

Afin de donner toute sa visibilité au système des Instruments nationaux, l'INSU doit adopter et publier une charte qui en explicite le cadrage général. Une première proposition est jointe en annexe, adaptée de la charte des instruments nationaux de géochimie de la division ST (1996), et de la charte des instruments nationaux rédigée en 2007 par la division OA (cf. annexe).

L'objectif est d'aboutir à un texte unique fixant la politique d'ensemble de l'Institut sur cette question, par delà la diversité des cas d'application, et proposant une gestion homogène sur les trois divisions actuelles ST, OA et SIC. Cette charte doit en particulier être suffisamment générale pour couvrir à la fois les situations d'instruments mis à disposition, et celles de services d'analyses.

En parallèle à cette charte, des conventions spécifiques à chaque instrument peuvent être passées au cas par cas, en

particulier pour fixer précisément le cadre partenarial lorsque plusieurs tutelles institutionnelles sont impliquées dans la supervision d'un instrument. Dans ces conventions apparaissent également les conditions particulières au fonctionnement d'un instrument (droits et devoirs des utilisateurs ; conditions de mise à disposition des données ; pourcentage de l'activité de service ; tarification ; composition de l'équipe maîtresse d'œuvre, modalités d'arbitrage entre les demandes, etc...).

Recommandations

Actualisation et publication de la Charte, au niveau central du CS de l'INSU.

Etablissement des conventions spécifiques, lorsque nécessaire.

■ Valorisation et mise à disposition des données

Comme pour les Services d'Observation, la valorisation des données acquises par les Instruments nationaux doit figurer parmi les critères d'évaluation et de renouvellement du label. Les modalités de cette valorisation doivent être explicitées dans les conventions spécifiques. Dans les cas où les données instrumentales en elles-mêmes sont importantes, notamment en géophysique, ces données doivent être mises à disposition ouverte après une période en accès réservé aux commanditaires.

En parallèle, chaque équipe maîtresse d'œuvre d'un Instrument national doit avoir à charge de collecter les informations, en particuliers publications, issues des analyses réalisées par l'instrument.

Recommandations

Veiller à l'évaluation précise de l'impact scientifique de l'activité des Instruments nationaux.

Mise à disposition impérative des données, suivant des modalités à expliciter au cas par cas.

■ Coût, tarification des prestations

Une grande diversité de protocoles de facturation existe actuellement suivant les instruments, allant de la gratuité totale des analyses pour les utilisateurs (ARTEMIS), jusqu'à l'autofinancement complet du fonctionnement grâce à tarification à prix coûtant (SARM).

La politique d'instrumentation nationale

Néanmoins, l'uniformisation systématique du dispositif n'apparaît pas indispensable, sous réserve que son fonctionnement soit évalué précisément et actualisé périodiquement, au cas par cas et dans son ensemble.

D'un côté, la gratuité complète présente l'inconvénient de dé-responsabiliser les demandeurs, et peut conduire à une inflation non justifiée des demandes. La facturation aux utilisateurs induit automatiquement le filtre de l'évaluation par les programmes qui financent les projets. Ceci ne résout cependant pas les cas où la demande excède l'offre, pour lesquels un niveau d'arbitrage supplémentaire reste nécessaire, par un comité scientifique indépendant de l'équipe maîtresse d'oeuvre. A l'autre extrême, l'autofinancement total d'un instrument national comporte le risque d'entrer dans une logique de rentabilisation purement commerciale. Le label doit donc rester étroitement lié au principe de contribution pérenne de l'INSU au fonctionnement des instruments nationaux.

Recommandations

Maintien du principe d'une participation récurrente de l'INSU au budget de fonctionnement d'un instrument labellisé.

Généralisation du principe de facturation des analyses ou des services aux utilisateurs, selon un barème de tarification à établir au cas par cas pour chaque instrument.

Mise en place de comités scientifiques spécifiques à chaque Instrument national, en charge des arbitrages entre demandeurs lorsque nécessaire.

■ Moyens humains : affectation dans les UMR, UMS (OSU), ou à la DT-INSU

Dans toutes les situations, la responsabilité de la maîtrise d'oeuvre, ainsi que l'équipe en charge d'un Instrument national, doivent être explicitement stipulés dans le cadre de

la labellisation, et donc actualisés périodiquement. Autant pour le bon fonctionnement et le développement de l'Instrument que pour le personnel lui-même, il est important que l'équipe technique soit en contact étroit avec les applications de l'instrument pour la recherche.

Les personnels techniques impliqués sur les Instruments nationaux appartiennent à différents établissements, et sont gérés sous diverses configurations administratives (UMR, UMS, USR, DT INSU). Cette diversité est précieuse dans la mesure où elle multiplie le potentiel humain et les moyens qui peuvent être affectés au dispositif. Cependant, elle peut également être source de disparités dans le suivi de carrière des personnels. Par ailleurs, dans les cas où un Instrument national est intégré au sein d'une UMR, les demandes de recrutement au titre de cet instrument entrent directement en concurrence avec celles présentées pour les activités propres de l'Unité, dans le cadre de la procédure LABINTEL actuellement en vigueur.

L'affectation de personnels en charge d'instruments nationaux à la Division technique de l'INSU, éventuellement suivie d'une mise à disposition au sein d'une unité, peut être une solution à envisager, au cas par cas.

Recommandations

Identification explicite (composition, responsabilités, de l'équipe maîtresse d'oeuvre de chaque Instrument national.

Mise en place d'une ligne spécifique de recrutement étiquetée Instruments nationaux.

Sensibilisation des instances d'évaluation au suivi des personnels affectés aux Instruments nationaux.

Utilisation des possibilités d'affectation de personnels à la DT INSU, pour la prise en charge des parcs d'instrumentation relevant des Instruments nationaux.



1. b

1. c

1. d

1. Instruments nationaux de la géochimie (a-Aix en Provence, b-Lyon, c-Nancy, d-Paris).



2. Campagne d'acquisition de données pour l'imagerie 3D du Puy des Goules, Auvergne, utilisant le parc de sismologie mobile, (Brenquier et al 2006).



3. Presses multi enclumes (Magmas et volcans).



1. a

Les services nationaux d'observation en sciences de la Terre interne

Denis Hatzfeld (LGIT Grenoble)
Coordinateur

Avec la contribution de la commission des observatoires de la CSST : Pierre Agrinier, Michel Cara, Pierre Cochonat, Olivier Coutant, Philippe Davy, Catherine Deplus, Jacques Déverchère, Michel Diamant, Bernard Dupré, B. Feignier, Steven Hosford, Liliane Jenatton, Michel Kasser, Rémy Louat



La stratification du monde d'après Aristote

■ Résumé

Les services d'observation « Terre Interne » de l'INSU ont une tradition bien établie de collecte de données dans les domaines de la sismologie, de la gravimétrie, du magnétisme et de la volcanologie. Ces services d'observation sont confiés aux Observatoires des sciences de l'univers (Osu) et Instituts de physique du globe et produisent des données qualifiées mises à disposition gratuitement, et sans limitation, et servant très souvent de référence.

L'utilisation d'observations a été bouleversée par la nécessité d'aborder les phénomènes de manière globale, par les évolutions technologiques (informatique, spatial, communication...), et l'augmentation de la vulnérabilité humaine aux aléas naturels. Pour répondre à ces nouveaux objectifs, les services d'observation ont besoin d'une augmentation importante de leurs moyens techniques, financiers et humains.

Nous proposons, dès à présent, une évolution vers un nombre restreint de services nationaux élargis placés sous la responsabilité de l'INSU et dont l'opérabilité est assurée contractuellement par les Osu. Les missions de surveillance dévolues ponctuellement à certains Osu comportent une

déclinaison « opérationnelle » de ces services. L'évolution proposée aux structures d'observation permettra :

- De mieux dynamiser les liens recherche-observation du monde universitaire ;
- D'avoir le poids nécessaire dans le cadre des partenariats et conventions inter-organismes indispensables à mettre en place ;
- De devenir les partenaires naturels des réseaux internationaux.

Cette évolution dans l'organisation n'a de sens que si elle est soutenue par un apport de personnel relevant du Cnap et des moyens à la mesure des nouveaux objectifs d'observation.

La gouvernance de ces services sera évaluée par des conseils, issus des communautés concernées qui auront pour mission de veiller à la qualité et la diffusion des observations, à la nécessaire interaction avec la société, à l'insertion dans des réseaux internationaux d'observation. Ces conseils pourront statuer sur les budgets et moyens humains nécessaires, sur la complémentarité des sites instrumentés et des campagnes dans la durée. Ils auront aussi la capacité de proposition pour des observations dans des domaines connexes aux sciences de la Terre ou des disciplines émergentes.

■ Introduction

L'observation permanente est une nécessité dans les sciences de la Terre. En effet, la Terre est un objet naturel qui n'est pas figé mais au contraire soumis à des phénomènes dont les constantes de temps varient du milliard d'années à la milliseconde et les dimensions spatiales de l'échelle globale au millimètre.

Toute recherche en physique repose sur la nécessaire complémentarité entre les observations (sans lesquels les modèles sont inutiles) et les modèles (indispensables à la compréhension des observations et à leur prédiction). Mais à la différence de la physique classique, la plupart des phénomènes naturels ne sont pas reproductibles en laboratoire, et si on veut les étudier il faut donc disposer d'observations *in situ* dans la durée, soit pour en étudier la continuité soit pour les saisir quand ils se produisent.

Tous les pays ayant une politique de recherche en géophysique ont mis en place de tels observatoires qui représentent un investissement et un coût de fonctionnement importants. Mais cette observation permanente est la seule permettant d'avancer dans la compréhension de ces phénomènes transitoires. On l'a vu par exemple lors de la crise de la Soufrière de 1976 en Guadeloupe pour lesquelles des mesures ponctuelles obtenues lors de campagnes limitées dans le temps, et qui n'étaient pas intégrées dans des séries longues, étaient ininterprétables.

En ce qui concerne les différents dispositifs français, nous nous référons à la terminologie de la direction de l'INSU, résumée ci-après :

- **Observatoires** « sensu lato », institution dont une partie de l'activité est dévolue à un système d'observations pérennes.
- **Observatoires des sciences de l'Univers (OSU)**, établissements particuliers du Ministère de la recherche dont les missions sont définies par décret, et dont une partie de l'activité est consacrée à la gestion de systèmes d'observation. Leurs autres activités concernent la recherche et la diffusion des connaissances.
- **Système d'observation**, désigne un ensemble cohérent de moyens de mesures et/ou de suivi qualitatif d'un système naturel ou d'un anthropo-système.
- **Sites Instrumentés**, ensemble de dispositifs de mesures instrumentales, localisés sur un même site, développé et suivi par des personnels rattachés à un observatoire.

- **Campagne**, opération visant à déployer des moyens de mesures sur un territoire pour répondre à un projet de recherche, de manière temporaire mais organisée.
- **Chantier**, ensemble de programmes de recherches coopératif de grande ampleur, impliquant la mobilisation sur une longue durée de moyens d'observations, pérennes, visant à décrire et à comprendre le fonctionnement d'une grande région terrestre caractérisée par sa singularité.
- **Services nationaux**, dispositif d'appui à la recherche sur les milieux naturels mis à disposition des équipes de recherche selon une procédure garantissant la qualité de leur utilisation et de l'exploitation des données.
- **Service national d'observation (INSU)**, dispositif cohérent et pérenne de mesures quantitatives permettant le suivi d'un système ou d'un processus naturel bien défini. Associé à un contrôle qualité et un archivage pérenne. Données mises à la disposition d'une large communauté d'utilisateurs scientifiques. Labellisation contractuelle par une décision du comité scientifique de l'INSU.
- **Tâches de services**, activités spécifiques à la responsabilité et au fonctionnement des Services nationaux de l'INSU et particulièrement des services d'observation permettant le recrutement dans le Corps national des astronomes et physiciens (CNAP) placés sous la responsabilité du directeur d'un observatoire des sciences de l'Univers.

■ Objectifs

• Comprendre la Terre

Les géophysiciens ont, de longue date, mis en place des observatoires dont la mission est de mesurer certains paramètres de manière continue. Ces observations ont toujours mêlé préoccupations scientifiques et sociétales. Par exemple, les observations magnétiques commencées dès le début du 16^{ème} siècle, qui avaient pour objectif de mieux comprendre le champ magnétique, étaient aussi nécessaires pour une navigation maritime précise.

Certains observatoires sismologiques installés dès la fin du 19^{ème} pour étudier la structure interne du globe ont aussi permis de mieux connaître l'aléa sismique mondial et des séismes anciens peuvent maintenant être étudiés en utilisant les enregistrements de l'époque. Actuellement, les stations sismologiques forment par ailleurs l'essentiel des réseaux d'alerte tsunami.

Les observatoires volcanologiques ont été mis en place pour améliorer la compréhension et la prédiction des éruptions volcaniques. En associant l'observation de variables géophysiques et géochimiques ces observatoires jouent un rôle clé dans la surveillance des processus volcaniques.

Comprendre la Terre c'est connaître les structures internes et les processus à toutes les échelles ainsi que leurs interactions mutuelles. C'est, par exemple, connaître la relation entre la structure du manteau et les volcans actifs, entre la géodynamique et la nucléation sismique. Cela nécessite de densifier les observations à des échelles de temps et d'espace très différentes.

Notre connaissance des processus affectant la Terre nous permet aussi de contribuer à la réduction de la vulnérabilité aux aléas naturels (séismes, tsunamis, volcans, glissements de terrain) et anthropiques (mouvements de terrain, subsidences minières, ...) Enfin, les progrès dans la connaissance des milieux naturels et des mécanismes associés apportent des informations déterminantes concernant le suivi et la gestion des ressources naturelles (énergies fossiles, matières premières, eau, stockage souterrain, ...).

• Participer aux missions de surveillance des aléas

Les observations sont indispensables pour mieux connaître les aléas naturels et en prévoir les effets. D'une part, comprendre les phénomènes naturels permet d'en réduire la dangerosité en association avec les études de vulnérabilité ; d'autre part, beaucoup de phénomènes naturels d'origine endogène peuvent provoquer des catastrophes et seule l'observation très fine de variables géophysiques/géochimiques, associées à une modélisation spécifique, permet de mettre en évidence les phénomènes transitoires précurseurs.

Des missions de surveillance (volcanologie et sismologie) ont été confiées à divers Osu. Ces missions s'appuient sur un corpus complet d'observations dont l'une des caractéristiques est l'accès à l'information en « temps réel ». Ces missions de surveillance et d'alerte s'appuient sur les dispositifs d'observation relevant de plusieurs laboratoires, mais elles doivent être identifiées comme telles dans le cadre d'un établissement. Elles font l'objet d'une contractualisation spécifique aux Osu qui en sont responsables. Ces missions de surveillance peuvent être partagées avec d'autres organismes.

• Aborder la Terre de manière globale

La compréhension du système Terre passe par celles de ces différentes enveloppes et des processus d'interactions entre ces enveloppes. Ces différentes enveloppes sont étudiées par des communautés scientifiques différentes qu'il est indispensable de faire dialoguer de manière permanente. Il est tout aussi indispensable de renforcer la complémentarité des observations permettant de comprendre les mécanismes aux interfaces. Par exemple la contribution de la géodésie à l'étude des mouvements verticaux de la surface terrestre est un des éléments de compréhension de la variation du niveau des océans et donc des effets du réchauffement climatique. De manière symétrique, la tectonique a besoin de mesures géodésiques précises nécessitant la contribution de la communauté astronomique pour établir de bons systèmes de référence.

• Contribuer aux systèmes d'observations mondiaux

L'étude de la Terre ne peut être tributaire ni des frontières, ni des politiques nationales. L'échelle de certains problèmes nécessite une observation globale, la compréhension d'autres phénomènes demande des données recueillies dans d'autres régions. Les systèmes d'observations nationaux doivent donc s'intégrer dans des dispositifs en réseaux interconnectés mondialement. Par ailleurs, des initiatives internationales d'observation et de surveillance se mettent en place. Ces dispositifs ont pour vocation d'être globaux, tant en ce qui concerne les dispositifs d'acquisition, que ceux de traitement, de diffusion ou d'alerte. Les observatoires nationaux sont la base naturelle de ces initiatives internationales.

• Prendre en compte les spécificités des observations en Terre interne

A la différence des observations des enveloppes fluides (océan-atmosphère), les constantes de temps des processus à étudier en Terre interne peuvent être très grandes avec une localisation brutale d'un phénomène catastrophique (séisme, éruption volcanique, tsunami, glissement gravitaire...). Les processus en Terre interne sont souvent très lents à l'échelle humaine (cycle sismique, variation magnétique séculaire, ...) et il faut garantir la pérennité des observations sur le long terme si on veut observer une variabilité significative des phénomènes.

Par ailleurs, nous n'avons pas accès à des observations directes « *in situ* » de certains paramètres importants (par

exemple la rotation de la graine au centre du noyau) et il faut donc coupler plusieurs types d'observations si on veut croiser les informations et lever toute ambiguïté.

• S'appuyer sur les Observatoires des sciences de l'univers (OSU)

Les Observatoires des sciences de l'Univers relèvent du Ministère de l'Éducation nationale et du Ministère de la recherche. Les Osu relèvent de l'article L713-9 (ex article 33) du code de l'éducation de la nouvelle loi sur l'autonomie des universités (statut des écoles internes aux universités avec un directeur nommé par le Ministre). Ils ont en plus des missions d'enseignement et de diffusion des connaissances que leur confère leur établissement universitaire de rattachement, la mission d'observation des phénomènes naturels. Ils disposent pour accomplir cette dernière mission spécifique, de personnels spécifiques relevant du CNAP qui leurs sont affectés.

Localement, les Osu sont les structures d'animation scientifique et de diffusion des savoirs, grâce au couplage enseignement-observation-recherche. Ils permettent une gestion intégrée des services d'observation en étant acteurs de l'ensemble de la chaîne allant de la production du savoir par la recherche et l'observation jusqu'à la diffusion des connaissances dans le cadre de la formation initiale et continue.

L'INSU, quant à lui, est chargé de définir et de coordonner la politique nationale d'observation au sein du dispositif de recherche du CNRS et des établissements d'enseignement supérieur dont dépendent les Osu. A ce titre, il assure la coordination des services d'observation avec l'ensemble des autres organismes nationaux.

■ Dispositif actuel d'observation

Si les premières observations géophysiques remontent au 17^{ème} siècle (en particulier grâce à l'action de la communauté jésuite), le dispositif actuel est en partie hérité d'un système datant de la fin du 19^{ème} siècle avec 3 composantes principales : le magnétisme, la sismologie, et la gravimétrie. Ces observations ont été effectuées pendant longtemps sous la responsabilité des Instituts de physique du globe de Paris et de Strasbourg. Avec la création de l'Inag en 1966 (devenu INSU), une politique nationale d'observation en sciences de la Terre a alors vraiment commencé.

L'INSU a procédé à la labellisation de services d'observation respectant certains critères et en particulier la pertinence

scientifique des observations, une évaluation périodique de leur qualité, un archivage et une mise à disposition totale dans le domaine public.

Ces services d'observation labellisés par l'INSU et opérés par les Osu remplissent dès à présent leurs missions et produisent des données mises dans le domaine public et utilisées par les communautés scientifiques et non scientifiques. Que cela soit en sismologie, magnétisme, géodésie et volcanologie, les données produites par les 14 services existants sont de grande qualité et servent le plus souvent de référence. Elles sont utilisées pour faire progresser la connaissance scientifique, mais aussi dans les systèmes de surveillance des aléas naturels.

• Les observations magnétiques

Ces observations ont pour objectif de comprendre l'origine des variations du champ magnétique terrestre pour des échelles de temps allant du siècle (variation séculaire) à la seconde (variations d'origine externe). Elles sont pilotées par le Bureau central de magnétisme terrestre (BCMT) placé sous la responsabilité de l'IPG de Paris. Participent au BCMT, l'EOST de Strasbourg ainsi que l'IRD. Le BCMT représente la contribution française à INTERMAGNET, qui est le réseau global des observatoires magnétiques vérifiant les standards internationaux de qualité et transmettant leurs données en temps quasi-réel.

La variation séculaire du champ géomagnétique résulte des mouvements du fluide dans le noyau terrestre, siège de la géodynamo. Elle permet de mieux comprendre la dynamique du noyau et la géodynamo. L'enregistrement des variations rapides du champ géomagnétique permet d'étudier les phénomènes associés aux sources externes du champ (orages magnétiques, sous-orages, courants Sq, pulsations, anneau de courant, etc.), et en particulier leur évolution à long terme.

Le dispositif d'observation comprend l'Observatoire magnétique national de Chambon la Forêt qui sert de référence à toutes les mesures ponctuelles, ou de répétition, effectuées sur le territoire français du fait des calibrations périodiques qui y sont effectuées. Sans ces calibrations il serait impossible de corriger les inévitables dérives instrumentales et donc de déterminer la variation séculaire et de constituer de très longues séries homogènes pour l'étude du champ externe. Il comprend aussi 15 autres observatoires de type INTERMAGNET (sur la centaine existant) répartis dans 10 pays ainsi que dans les Terres Australes et Antarctiques Françaises qui transmettent leurs données régulièrement au centre localisé à l'IPGP.

Ce dispositif est complété par le Service international des indices géomagnétiques (SIIG) qui sert à décrire l'activité magnétique (utilisé en particulier pour décrire la physique des relations Soleil-Terre et pour la météorologie spatiale) et qui est un service de la Federation of Astronomical and Geophysical Data Services.

Il est aussi complété par les satellites magnétiques Ørsted et CHAMP qui ont donné lieu à des avancées spectaculaires dans le domaine de la modélisation globale du champ magnétique terrestre mais qui nécessitent eux aussi une calibration au sol, en particulier en-dessous de l'ionosphère. La future mission de l'agence spatiale européenne, Swarm, continuera cette série de missions dédiée à la mesure du champ magnétique terrestre à partir de 2010. Le développement instrumental est un élément essentiel du dispositif français d'observation du champ géomagnétique. Le magnétomètre vectoriel triaxial de type « fluxgate », développé à l'IPGP depuis les années 1990, équipe 11 des 16 observatoires du BCMT, et l'EOST a développé de son côté un magnétomètre mono-axe pour les mesures absolues du champ. Grâce à ces développements, la France a pu étendre son réseau dans d'autres pays tout en maintenant un coût d'exploitation raisonnable. Le site de Chambon la Forêt est aussi utilisé pour tester les instruments embarqués pour les missions spatiales.

Le BCMT évolue actuellement dans deux directions. D'une part via l'installation de nouvelles stations (Dôme C, Ile de Pâques, Nouvelle Calédonie) pour homogénéiser la couverture globale d'INTERMAGNET. D'autre part en augmentant la fréquence d'échantillonnage à 1Hz de manière à synchroniser données spatiales et terrestres et à permettre de répondre aux préoccupations de la physique spatiale.

• Les observations sismologiques

Elles s'organisent autour de plusieurs réseaux ayant des fonctions complémentaires suivant les objectifs poursuivis.

L'identification des failles potentiellement actives est un enjeu majeur, particulièrement sur le territoire national. Ces failles ne sont pas toutes visibles en surface et leur identification passe parfois par l'analyse fine de la sismicité pendant une longue durée. Le Réseau national de surveillance sismique (RéNaSS) est placé sous la responsabilité de l'EOST de Strasbourg et a pour objectif d'observer la sismicité française, d'améliorer notre connaissance de l'aléa sismique et d'informer rapidement (activité reconnue d'utilité publique) les pouvoirs publics en cas de séisme important. Le RéNaSS est constitué

de 107 stations sismologiques à courtes périodes fédérant 7 réseaux régionaux opérés par l'EOST, l'IPGP, l'OCA, l'OMP, l'OPGC, l'OSUG (auxquels s'ajoutent d'autres partenaires), dont 71 sont reliées directement au site central de Strasbourg. Les données concernant les 3 000 séismes annuels sont intégrées, après validation, dans une base de données ouverte. Les évolutions du RéNaSS concernent une modernisation et une homogénéisation de l'instrumentation. Pour les volcans français d'outremer, la surveillance sismique est assurée par les Observatoires volcanologiques placés sous la responsabilité de l'IPGP.

L'identification des failles actives n'est que l'un des aspects de l'aléa sismique. Le mouvement du sol dépend aussi des propriétés de la source sismique, de la propagation des ondes, des propriétés locales (effets de site). Le dispositif concernant l'aléa sismique est complété par le Réseau accélérométrique permanent (Rap) dont la vocation est l'étude du mouvement du sol et de la vulnérabilité des ouvrages. Le Rap (dont le siège central est à l'Osug de Grenoble) est constitué en GIS avec pour tutelles les Ministère de l'environnement et de l'équipement ainsi que le Bureau central sismologique français. Il rassemble tous les acteurs du monde académique (EOST, IPGP, OCA, OMP, OSUG), et du monde extérieur à l'université en charge de l'aléa sismique. Le Rap comprend 140 stations réparties sur le territoire métropolitain et dans les DOM-ROM et COM. Toutes les données récoltées, ainsi que celles des réseaux complémentaires (IRSN, CEA, BRGM, CG-Martinique), sont archivées et distribuées par le site central à l'Osug. Le Rap doit évoluer vers l'enregistrement continu et la transmission des données en temps réel.

Enfin, le dispositif concernant l'aléa sismique est complété par le Bureau central sismologique français créé par décret à l'EOST en 1921 et qui a pour mission de veiller à la collecte des données sismologiques sur le territoire. En particulier c'est lui qui gère les enquêtes macrosismiques qui permettent d'établir le lien entre la sismicité instrumentale et la sismicité historique. Ces données sont elles aussi archivées et disponibles.

Les ondes sismiques permettent de cartographier les propriétés (vitesse, atténuation, anisotropie...) de l'intérieur de la Terre. Leur analyse donne une contrainte importante sur la minéralogie des matériaux des différentes enveloppes terrestres, les hétérogénéités qui peuvent être mises en relation avec la dynamique du noyau et du manteau. Le Réseau large bande (RLB) est le dispositif permettant d'étudier la structure de la croûte et du manteau sous le territoire français. Il est placé sous la responsabilité de l'EOST de Strasbourg et fédère

les laboratoires universitaires. Il permet de s'intégrer dans un dispositif global européen et donc de constituer une antenne sismologique à l'échelle européenne permettant d'utiliser des techniques d'analyse du champ d'ondes.

Le service d'observation GEOSCOPE est un réseau à couverture mondiale de 30 stations réparties dans 18 pays qui fait partie de la Federation of Digital Seismograph Network. Ce service associe l'IPG de Paris, l'EOST de Strasbourg, l'IRD et le CEA. Il est axé sur la compréhension de la dynamique terrestre à partir d'études de structure et de sources sismiques. Son instrumentation très performante associée à une localisation de stations notamment dans l'hémisphère sud en fait un partenaire incontournable pour les études « globales ». Les stations GEOSCOPE contribuent aux dispositifs d'alerte internationaux aux tsunamis par la mise à disposition en temps réel des données de certaines stations, dans l'Océan Indien notamment.

La continuité des données GEOSCOPE, accessibles au centre de données de l'IPGP permet également d'aborder la sismologie dépendante du temps (variations temporelles de la structure de la graine), l'excitation des modes propres de la Terre en absence de séismes ou encore l'origine du bruit sismique. Les évolutions concernent une mise à niveau instrumentale (observations multi paramètres) et une mise à disposition en temps quasi réel de données validées.

Toutes les données acquises par les différents réseaux doivent être validées, archivées et distribuées. Avec la généralisation des données numériques, ce sont des centaines de To qu'il faut identifier, organiser et rassembler pour être utilisés de manière efficace. C'est la fonction du portail de données FOSFORE (dont le siège est à l'IPG de Paris) qui est l'interface avec les bases de données existantes. Il sert aussi d'interface avec les autres portails de données européens (Orfeus) et américains (Iris) et s'intègre ainsi dans un réseau global d'échanges de données.

L'observation des mouvements de terrain qui constituent un aléa majeur dans les régions montagneuses peut également s'appuyer sur l'observation sismologique. Pour l'Europe seule, les dommages liés aux mouvements de terrains s'élèvent à 16158 personnes tuées et 1.7 milliards de dollars pour 75 évènements se produisant entre 1903 et 2004. De par leur soudaineté, ils restent peu prédictibles à l'heure actuelle, en dépit des progrès récents observés dans la modélisation. Cette progression est actuellement freinée par la rareté des observations dans le domaine spatial et le domaine temporel, et le petit nombre de paramètres mesurés. Parmi les paramètres

essentiels pour une modélisation numérique prédictive, on peut identifier ceux associés à des prédispositions 'statiques' des sites (géométrie - structure géologique, propriétés des matériaux, - lois rhéologiques) et de leur sensibilité à divers forçages (pluviométrie, fonte des neiges, séismes, etc...). D'autres paramètres essentiels concernent le suivi dynamique et la distribution spatio-temporelle des évènements.

OMIV (Observatoire multidisciplinaire des mouvements de terrain) est un observatoire unique pour suivre ces paramètres à l'échelle mondiale car multi-paramètres (géodésie, géophysique, hydrologie, sismologie) et multi-échelles (surface, télédétection). Il s'appuie largement sur des réseaux sismologiques, car ceux-ci permettent de suivre l'évolution d'une instabilité depuis sa phase d'initiation jusqu'à sa propagation. L'auscultation et la surveillance sismologique permettent de répondre aux questions concernant les causes de l'activité interne des mouvements de terrain (émission acoustique, chutes de blocs), potentiellement précurseur d'évènements de grande ampleur, et également leurs réponses dynamiques à des forçages externes (météorologiques, séismes, effets de sites). Dans le cadre d'OMIV, quatre sites pilotes ont été choisis dans les Alpes françaises tant pour leurs spécificités géomécaniques que pour les risques associés. Elles seront élargies dans le futur aux instabilités gravitaires sur les édifices volcaniques.

• Les observations volcanologiques

Les territoires et départements d'Outre-mer abritent 3 volcans actifs Piton de la fournaise (Iles de la réunion), Montagne Pelée (Martinique), Soufrière (Guadeloupe). Au cours du 20^{ème} siècle, le volcan de la Montagne Pelée a causé la mort de 30.000 personnes en 1902-1905. C'est la première cause de mortalité par catastrophe naturelle en France et l'un des volcans les plus meurtriers du globe. La compréhension du fonctionnement des volcans et la prédiction des éruptions est donc l'un des enjeux sociétaux majeurs pour les régions concernées et la responsabilité de l'observation et de la surveillance des volcans actifs français a été confiée par décret à l'IPGP de Paris. Cette surveillance est effectuée en partenariat avec les départements de la Guadeloupe, de la Martinique et de la Réunion. Elle est aussi associée à des programmes de recherche.

Dans les observatoires, des réseaux de capteurs géophysiques et géochimiques mesurent en permanence l'activité sismique, la déformation, l'activité magnétique et électrique. Des prélèvements réguliers de gaz et d'eau sont effectués à des

fins d'analyse géochimique. Ces mesures sont complétées périodiquement par des réseaux de répétition permettant de densifier temporairement les observations permanentes. La plupart de ces mesures sont transmises puis archivées en temps réel au site central. Ces observations permettent d'affiner les modèles de dynamique des volcans qui sont de types variés, et aussi d'améliorer notre capacité à prédire les éruptions.

Les observatoires volcanologiques sont intégrés dans un réseau mondial WOVO, partenaires du réseau GLOBVOLCANO qui vise à intégrer les données *in situ* et spatiales dans des produits qui pourraient faire partie d'un futur service GMES. Les évolutions concernent une modernisation de l'instrumentation existante souvent ancienne et disparate. Elle concerne aussi l'utilisation plus systématique de techniques satellitaires pour l'analyse de la déformation et de télésurveillance pour l'analyse des flux et de la dynamique éruptive.

• Les observations géodésiques et gravimétriques

Les méthodes géodésiques et gravimétriques permettent l'analyse de la structure et de la déformation de la Terre à des fréquences complémentaires de la sismologie. Des observations (qui souvent doivent être couplées entre elles pour s'affranchir de certains effets) apportent des informations tant en ce qui concerne l'étude de la Terre profonde que les couplages Terre solide-enveloppes superficielles ou encore l'étude de la déformation à une échelle intermédiaire entre la tectonique et la sismologie. Par ailleurs, la géodésie fournit des référentiels nécessaires à de nombreuses mesures.

Le réseau GPS permanent RENAG couvre les régions tectoniquement actives du territoire de manière à mesurer en continu avec une précision millimétrique la déformation tectonique et à améliorer notre connaissance de l'aléa sismique. En corollaire, le réseau GPS permet de déterminer le taux de vapeur d'eau dans l'atmosphère (en couplage avec la météorologie) et les déformations provoquées par surcharge hydrologique, océanique et atmosphérique. RENAG, dont le siège est au LDL de Montpellier et qui fédère l'ensemble des laboratoires universitaires, comprend 24 stations réparties majoritairement dans les Alpes. Il a établi un partenariat avec l'IGN et les autres organismes ayant aussi installé des stations GPS. L'ensemble des données est archivé par Géosciences-Azur à Nice et les solutions calculées périodiquement.

Ces solutions sont aussi publiées périodiquement sous la forme d'un champ de vitesse et combinées avec des solutions

du réseau européen EUREF et du réseau RGP de l'IGN. Les développements futurs concernent l'installation de stations supplémentaires pour combler certaines lacunes et rendre scientifiquement exploitables (grâce à des stabilités validées) certaines des nombreuses autres stations permanentes (plus de 150 fin 2007). Un effort particulier est fait pour mettre à disposition des scientifiques, en partenariat avec l'IGN, l'ensemble des données permanentes. Ces données pourraient comprendre celles issues des campagnes temporaires de manière à les regrouper en une base de données unique.

Le gravimètre supraconducteur de l'EOST de Strasbourg est la contribution française aux mesures continues du champ de pesanteur. Ces mesures permettent l'étude du champ de gravité dans une fenêtre spectrale allant des modes propres de la Terre à l'année. Ce gravimètre est intégré dans le projet Global Geodynamics Project et le réseau mondial de gravimètres. Les objectifs poursuivis concernent les questions de géodynamique globale et de la dynamique du noyau fluide, les interactions Terre solide-Athmosphère-Océan, le calage des données satellitaires pour l'estimation des ressources en eau. L'installation d'un nouvel instrument dans l'hémisphère sud (Tahiti) pour compléter le réseau GGP (Global Geodynamics Project) est en projet.

Le Bureau gravimétrique international (BGI) collecte toutes les données existantes de pesanteur et les informations disponibles sur le champ de gravité terrestre, il les compile et les archive dans une base de données afin de les redistribuer à la demande à une large communauté d'utilisateurs scientifiques. Le BGI est hébergé à l'OMP à Toulouse et il est affilié à la Fédération des services d'analyses de données astronomiques et géophysiques (FAGS) à l'Association internationale de géodésie (IAG). Le BGI a développé divers algorithmes et logiciels de validation et d'analyse de données et des services variés sont proposés aux utilisateurs.

Comme pour le magnétisme, le spatial est devenu l'une des composantes essentielles des observations gravimétriques, avec les satellites CHAMP et GRACE, en opération, et surtout le lancement prochain de GOCE. Le service FROG, porté par l'IPGP de Paris, concerne les données de cette dernière mission. Il a pour objectif de préparer la communauté à une utilisation optimale des données de la mission en particulier par la constitution d'une bibliothèque complète de logiciels d'exploitation. Les évolutions concernent les autres missions spatiales dédiées aux Sciences de la Terre ainsi que la constitution d'un pôle thématique inter-organismes.

■ Perspectives

Les observations dont dispose actuellement la communauté scientifique des sciences de la Terre ont, pour la plupart, comme caractéristiques des années de continuité pour les observations et les méthodes. C'est cette continuité qui a permis l'analyse de variations temporelles lentes de certains phénomènes géophysiques (déplacement du pôle magnétique, dynamique de la graine...) ou l'analyse de phénomènes soudains (tsunami, éruption volcanique, séismes...) importants pour la connaissance de la dynamique terrestre et pour celle des aléas naturels associés.

Les techniques de mesures, et les moyens de diffusion de celles-ci ont considérablement évolué depuis 2 décennies et il est nécessaire de compléter le dispositif existant par une instrumentation mieux adaptée à l'échelle des phénomènes physiques étudiés en densifiant et automatisant bon nombre des systèmes d'observation.

Par ailleurs, il devient indispensable d'intégrer les observations existantes dans des systèmes d'observation multi-paramètres et multi-échelles dans un seul système de référence (par exemple de type GEO) de manière à aborder la complexité des phénomènes et de leurs interactions et de faciliter l'approche pluri-disciplinaire. L'initiative intergouvernementale GEO (Group on Earth Observations) vise à établir des normes d'interopérabilité de données géolocalisées qui devrait faciliter l'atteinte de cet objectif. La mise en réseau mondial des observations est par ailleurs une nécessité pour aborder des études globales et échanger les données.

Il est ainsi nécessaire d'étendre le concept d'observation à celui d'une observation accompagnée de ses méta-données, ou de données interprétées et assimilables. Il est aussi nécessaire de combiner les données terrestres avec les données spatiales de manière à avoir une vision aussi complète que possible des phénomènes étudiés, de leur variation temporelle, et du couplage des différentes enveloppes. Elle doit être complétée par une incorporation permanente des données dans des modèles évolutifs de type assimilation de données.

Enfin, la demande sociétale en ce qui concerne aléas et risques a beaucoup évolué. Les informations produites par la recherche académique sont progressivement intégrées par la puissance publique. Les observations qui font partie de cette information doivent en tenir compte pour la rendre accessible et intégrer dans leur problématique la demande SHS.

La constitution des 4 services proposés permettra :

- De moderniser les outils d'acquisition des données ;
- De rationaliser et globaliser l'information traitée ;
- De prolonger l'observation à terre par une observation vue de l'espace ;
- De mieux participer aux observatoires virtuels internationaux qui se mettent en place.

• Géomagnétisme

La future mission Swarm de l'ESA, dont le lancement est prévu fin 2010 et dont la durée prévue est de cinq ans minimum (<http://www.esa.int/esaLP/LPswarm.html>), est sans aucun doute le projet majeur du géomagnétisme des dix prochaines années. Compte tenu de l'investissement réalisé par l'ESA (180 M€) et le CNES (plus de 10 M€), il est indispensable que les observatoires du réseau mondial INTERMAGNET (www.intermagnet.org), et en particulier ceux du BCMT, soient en mesure de produire des données complétant au mieux les données de cette mission. C'est pourquoi l'essentiel des projets du BCMT pour les années à venir concerne l'accompagnement de la mission Swarm.

Elargissement du réseau d'observatoires

Depuis 1993, le BCMT s'est engagé dans un élargissement spectaculaire de son réseau, passé de 9 à 16 observatoires en dix ans, faisant de lui le premier contributeur à INTERMAGNET en nombre d'observatoires. Une fois les observatoires de l'Ile de Pâques et de Dalat installés (en 2008 et 2009 respectivement), le BCMT aura la responsabilité ou la co-responsabilité de 18 observatoires INTERMAGNET dans le monde, soit 16% du réseau mondial. Ce total pourrait même passer à 19 observatoires si la qualité des données produites par l'observatoire de Dôme C s'améliore. Un grand nombre de ces observatoires sont très isolés géographiquement (dans l'hémisphère Sud, mais aussi en Afrique et en Amérique du Sud), le plus isolé étant celui de l'Ile de Pâques au centre d'un cercle de 4 000 km de rayon ne contenant aucun autre observatoire.

Cette distribution géographique exceptionnelle rend les observatoires du BCMT très précieux pour la modélisation globale du champ magnétique, tant interne qu'externe. D'autres institutions dans le monde se sont lancées dans un élargissement de leur réseau (GFZ, DMI, BGS, ETH) en vue de la mission Swarm, mais leur contribution reste très inférieure à celle du BCMT. Il paraît donc sage de marquer une pause dans l'élargissement du réseau et de concentrer les activités du BCMT sur la modernisation de l'instrumentation et du système de traitement des données dans les prochaines années.

Développements instrumentaux

Dans le domaine de l'instrumentation, INTERMAGNET recommande formellement depuis 2003 aux observatoires participants de passer à la fréquence d'échantillonnage d'un point par seconde (contre un point par minute actuellement). Cette évolution répond au besoin de synchroniser les données sol et les données des satellites magnétiques de type Ørsted et CHAMP (échantillonnées à 1 Hz), et en particulier les données des trois satellites de la future mission Swarm. Elle répond aussi à une demande très forte de la communauté de physique de l'ionosphère et de la magnétosphère, pour l'étude des pulsations géomagnétiques notamment. Il est donc indispensable que les observatoires du BCMT soient en mesure de fournir des données à la fréquence de 1 Hz d'ici 2010.

L'objectif ne paraît pas hors de portée, à condition que les moyens humains et financiers nécessaires à la réalisation de cet objectif ne fassent pas défaut. L'IPGP et l'EOST ont d'ores et déjà développé de nouveaux systèmes d'acquisition satisfaisant aux spécifications d'INTERMAGNET en ce qui concerne le filtrage et la synchronisation des données. Ces systèmes sont en cours d'installation dans les observatoires du réseau et nous prévoyons de les déployer dans la plupart des observatoires du réseau d'ici 2010, à raison de quatre ou cinq observatoires par an.

A moyen terme il faudra aussi résoudre le problème du bruit pour l'instant excessif des capteurs de type « fluxgate » à partir de 0.3 Hz environ. Il s'agit d'une difficulté à laquelle sont confrontées toutes les équipes travaillant sur le sujet dans le monde (USGS, BGS, Natural Resources Canada, Géosciences Australia, Observatoire Royal de Belgique, etc.), aucun capteur « bas-bruit » n'existant à l'heure actuelle sur le marché.

Un autre projet d'instrumentation mérite d'être soutenu dans les années à venir. Il s'agit du développement d'un magnétomètre scalaire à pompage optique spécifiquement destiné à l'utilisation en observatoire. En effet, les magnétomètres scalaires actuellement disponibles sur le marché souffrent d'une fiabilité aléatoire nécessitant une maintenance coûteuse, ou bien sont basés sur des technologies sensibles ne permettant pas leur déploiement en dehors du territoire national. Le développement par le BCMT de son propre magnétomètre scalaire permettrait de résoudre ce problème, comme cela a été le cas avec le magnétomètre « fluxgate » il y a une dizaine d'années.

Modernisation du traitement des données

L'élargissement du réseau et le besoin accru de données quasi-définitives dans un laps de temps très court, notamment dans le contexte de la future mission Swarm de l'ESA, rendent

nécessaire une révision en profondeur des processus de traitement des données. C'est dans ce but qu'est développé depuis 2007 par l'IPGP un système d'information rassemblant toute l'information technique sur les observatoires et leurs équipements, recevant en temps réel les données des observatoires et effectuant les traitements pouvant être automatisés. Un tel système est conçu pour être un outil de travail commun à tous les observateurs du réseau, quelle que soit leur localisation géographique, et sera prochainement étendu aux observatoires de l'EOST et de l'IRD. Il s'agit d'un projet structurant qui s'étalera sur plusieurs années.

Par ailleurs INTERMAGNET réfléchit à la possibilité de renforcer son offre de données dans le secteur de la météorologie spatiale. L'idée est de produire des indicateurs simples et lisibles par les non-spécialistes du niveau d'activité magnétique au niveau global à partir des données des observatoires magnétiques. Les Canadiens sont pionniers dans ce domaine et proposent un service très utilisé sur leur site web (<http://www.spaceweather.gc.ca>). Il est envisagé d'étendre ce service au niveau global, et les observatoires de l'IPGP auraient dans ce cas un rôle important à jouer en raison de leur très grande dispersion géographique.

Modernisation du réseau de répétition

Le réseau magnétique de répétition de la France métropolitaine, démarré en 1947 et réoccupé tous les cinq ans, a besoin d'une modernisation : déplacement de certaines stations menacées par la végétation ou les activités humaines, installation de nouvelles stations plus faciles à réoccuper (par ex. sur les aéroports), modification du protocole de mesure (avec par ex. l'enregistrement simultané des variations par un variomètre, comme cela est fait dans plusieurs autres pays). Afin d'être prêts d'ici la prochaine campagne prévue en 2012 et qui aura lieu pendant la mission Swarm, l'IPGP démarrera ce projet dès 2009.

• Géodésie-gravimétrie

Utilisé depuis la fin des années 1980 pour les études de la déformation, le GPS est devenu le système le plus utilisé pour la mesure de la déformation continentale, que ce soit en utilisant des enregistrements continus (GPS permanent) ou par la mesure répétée de réseaux (GPS de campagne). Grâce au GPS, l'étude des séismes connaît un bon en avant important, en particulier par la mesure continue de la déformation postsismique. Récemment, la technique GPS a permis de découvrir des mouvements intermittents de type nouveau dans les zones de subduction, des mouvements jusque là inaccessibles à la mesure géophysique et géodésique. Il devient

de plus en plus clair que la mécanique des séismes ne se limite pas à une phase de chargement lente (intersismique) et à un déchargement rapide, mais fait intervenir des déformations à des échelles intermédiaires, pour lesquelles le GPS est un instrument privilégié d'observation.

Dans le contexte de la déformation de la plaque européenne, il est important de continuer l'effort entrepris en GPS permanent (REGAL puis RENAG) en répartissant de façon homogène de nouvelles stations sur les zones actuellement mal couvertes. D'autre part, l'avènement de Galileo rendra nécessaire la jouvence progressive du parc de stations existantes pour bénéficier de la double couverture GPS-Galileo. Cette jouvence et modernisation du réseau pourra être faite dans le cadre du projet RESIF pour lequel pourront être mutualisés certains sites d'observation et des moyens de communication.

L'autre apport important du GPS dans le futur proche sera l'assimilation des délais troposphériques issus des traitements GPS afin d'améliorer le pouvoir prédictif des modèles météorologiques. En effet, ces délais de propagation permettent de quantifier de façon dense et précise la vapeur d'eau troposphérique cumulée. Cette donnée essentielle est actuellement sous-exploitée, mais elle permettra dans le futur une amélioration significative de la prédiction de la localisation et de l'intensité des précipitations. Pour ce faire, une couverture dense (50 km) et une transmission en quasi temps réel seront à privilégier. D'autre part, l'installation de réseaux GPS en mer sur des bateaux ou des bouées permettra d'obtenir des informations essentielles sur la source de la vapeur d'eau, tout en fournissant des données nouvelles sur la cinématique maritime. Des retombées sont donc aussi à attendre dans des domaines aussi variés que la géodésie (géοide), l'océanographie (courants, vagues et tsunamis). Dans ce domaine, une collaboration des communautés Terre interne (communauté GPS) et Terre externe (océanographie, météorologie) doit être fortement encouragée.

Un dernier aspect, embryonnaire mais prometteur, concerne l'utilisation du GPS permanent pour l'étude des glaciers alpins et polaire, qui permettront de préciser à toutes les échelles de temps leur cinématique et leur dynamique.

Ces deux aspects, qui intéressent une vingtaine de laboratoires en France, doivent être soutenus par un effort financier régulier, ainsi que par la mise à disposition de personnels dans les laboratoires et à la **Division technique de l'INSU (DT)** pour assurer le bon fonctionnement des stations et des bases de données correspondantes. Bien que le parc mobile GPS ne soit

pas considéré comme un service d'observation, il est rappelé ici que le bon fonctionnement du parc GPS mobile doit aussi faire partie de l'effort de soutien de l'INSU au GPS.

D'autre part, la communauté géodésique doit aussi porter attention au développement de nouvelles techniques comme l'inclinométrie à haute résolution et stabilité, qui possède des capacités de détection des mouvements bien supérieurs au GPS dans certains contextes. Des nappes de capteurs inclinométriques, qui complèteraient les stations GPS, pourraient permettre des avancées significatives dans le domaine des relations entre déformation et hydrologie, ainsi que pour la détection de mouvements sismiques lents et de faible ampleur.

L'observation des variations de gravité sur un spectre spatial et temporel très large doit permettre d'obtenir des résultats significatifs sur nombre de problèmes de géodynamique en liaison avec des phénomènes superficiels (cycle sismique, volcanologie, hydrologie continentale, mouvements verticaux, dynamique de l'océan et de l'atmosphère) ou profonds (mouvement de la graine, dynamique du noyau liquide). Cette observation est aujourd'hui accessible par des mesures diverses au sol (avec à la fois des instruments absolus et relatifs) ou depuis l'espace.

Toutes ces mesures sont complémentaires et leur combinaison devient un élément clé pour mieux répondre aux objectifs scientifiques visés. Un effort important présent et à venir concerne les études de comparaison sol-orbite dans le but de disposer d'une observation la plus complète possible des phénomènes géodynamiques. L'apport des observatoires permanents et des réseaux de mesures absolues ou relatives est fondamental à la validation des missions de gravimétrie spatiale actuelles (GRACE) ou à venir (GOCE, GRACE-follow on, etc.). Dans ce contexte, plusieurs objectifs de l'observation gravimétrique se dégagent :

Mesures permanentes et semi-permanentes

La poursuite, dans des conditions optimales des observations continues de haute précision des variations temporelles de gravité avec les stations existantes - et en particulier celles du gravimètre relatif à supraconductivité de Strasbourg intégrée au réseau mondial GGP (www.eas.slu.edu/GGP/ggphome.html). Une extension à d'autres sites est envisagée pour des programmes de recherche nationaux et internationaux. En particulier la communauté nationale souhaite installer deux nouvelles stations : l'une à Tahiti et l'autre en Afrique occidentale. La première permettrait de densifier la couverture

géographique du réseau GGP dans l'hémisphère sud. Pour la deuxième, signalons qu'un instrument relatif à supraconductivité va être installé de façon semi-permanente en Afrique sur le site de Djougou (ORE AMMA-CATCH) au Bénin dans le cadre du projet ANR GHYRAF (Gravité et Hydrologie en Afrique) (2008-2010). Si les données tiennent leur promesse, il faudra alors envisager une pérennisation de cette station africaine qui, elle aussi, a une localisation privilégiée. Une autre option, serait l'installation sur un site plus éloigné de l'océan, par exemple Tamanrasset en Algérie ; ce site permettrait, de plus, d'opérer dans un contexte aride où les effets hydrologiques sont pratiquement inexistantes et, par conséquent, pourrait servir de stations de référence pour le 'test zéro' dans les mesures comparées sol-orbite de gravimétrie.

D'autres applications scientifiques (marées terrestres, hydrologie, volcanologie...), nécessitent également des observations sur des réseaux denses de mesures semi-permanentes. Aucun parc instrumental de ce type n'est actuellement disponible au sein de la communauté. Un objectif majeur d'une réelle prospective consisterait à s'équiper de gravimètres relatifs précis (gravimètres enregistreurs relatifs dédiés, supraconducteurs ou à ressort) pouvant être mobilisés sur un site donné sur des durées allant d'un semestre à quelques années.

Mesures ponctuelles absolues et relatives

Un effort fondamental doit être accompli dans les prochaines années pour définir un système de référence global et absolu du champ de pesanteur. Des moyens doivent être mis en place pour maintenir, enrichir et mettre en œuvre le parc de gravimètres absolus qui est amené à être de plus en plus sollicité dans de très nombreuses applications (mesures précises et absolues de variations de gravité, validation d'observations satellitaires, étalonnage d'instruments relatifs enregistreurs ou de terrain, constitution d'un réseau global).

Par ailleurs, les gravimètres relatifs à ressort constituent encore le seul moyen de mesure dans de nombreuses applications scientifiques. Le parc actuel de gravimètres relatifs de terrain doit donc être mis à niveau et complété. Ces besoins en équipement sont pris en compte dans le projet GMob porté par la communauté des gravimétriciens.

Développement et synergie des Services d'Observation en gravimétrie

Cette synergie existe déjà et la communauté a déjà fait preuve de sa capacité à se fédérer autour de projets scientifiques, de ses moyens d'observation ou de ses Services d'Observation (voir

par exemple le cas du BGI, service international fonctionnant grâce à la fédération de moyens de nombreux organismes). Il est fondamental de poursuivre dans les meilleures conditions l'action des services de gravimétrie, dont certains bénéficient déjà d'une reconnaissance et d'une visibilité internationale. Par ailleurs, toute action future contribuant à renforcer cette synergie est souhaitable. La perspective de combiner et d'exploiter de nouveaux jeux de données issues d'observations spatiales et sol, nécessitera une interaction encore plus étroite entre les services d'observations (par ex BGI, FROG, Observatoire gravimétrique permanent de l'EOST) et les utilisateurs (laboratoires ou groupements de recherche). La constitution d'un « pôle thématique gravimétrie », fédérant cette communauté sur le modèle des pôles thématiques (CNES-INSU) existants en chimie de l'atmosphère ou pour les surfaces continentales et doté de moyens humains (notamment par des postes de physiciens et physiciens-adjoints CNAP et des postes d'ITA) et de matériels ad hoc pourrait permettre une action plus volontaire au sein de structures internationales (GGOS par exemple).

• Sismologie

Cette dernière décennie, les évolutions importantes des techniques d'acquisition numérique et de télécommunications ainsi que l'explosion des moyens de calcul avec possibilités de traitement en temps réel des données ont bouleversé les concepts de réseau sismologique. La télésurveillance de la sismicité peut se faire maintenant en continu et en temps réel et la disponibilité du signal continu en sismologie ouvre la voie à de nombreuses applications nouvelles qui sortent du champ traditionnel de l'étude des séismes. Restructurer, moderniser et étendre l'outil d'observation des sismologues français est une étape nécessaire et cruciale pour remettre au niveau international cet outil et répondre aux attentes d'une communauté qui dépasse le cadre strict de la sismologie. Si la sismologie est l'un des plus puissants outils d'exploration de la Terre interne et si la compréhension de sa dynamique repose pour une grande part sur les observations sismologiques, ces dernières alimentent le dialogue avec toutes les autres disciplines des sciences de la Terre. Par ailleurs, la conception traditionnelle de l'observation sismologique qui consiste à mesurer le déplacement du sol à l'aide de capteurs inertiels évolue fortement en intégrant d'autres capteurs destinés soit à mieux identifier et réduire la composante de bruit (mesures de pression et de température) soit élargir la bande de fréquence vers des mesures absolues de déplacement du sol (GPS).

Trois objectifs principaux ont été identifiés :

- Améliorer notre connaissance de la structure et de la composition la Terre à toutes les échelles, depuis des objets locaux et superficiels, jusqu'aux objets les plus profonds dans la Terre avec, en particulier, une focalisation sur le sous-sol national et la structure de la croûte et de la lithosphère en métropole.
- Comprendre la dynamique de la planète, notamment dans le contexte géodynamique euro-méditerranéen, et améliorer la surveillance et la gestion du risque sismique en France (détermination des paramètres décrivant la source des séismes en temps quasi-réel, calculs prédictifs de leurs effets sur le territoire et anticipation des dommages potentiels).
- Développer l'instrumentation sismologique de demain par l'adjonction de nouveaux capteurs (e.g. capteurs de rotation), par des concepts d'installation de l'instrumentation en puits, par le développement de systèmes comme ceux basés sur des trames de fibres optiques.

Du fait des évolutions techniques qui ouvrent des perspectives de développement d'une nouvelle sismologie et face au retard flagrant des équipements dont dispose la communauté sismologique française au plan international, si l'on met à part GEOSCOPE, la communauté sismologique française a proposé le volet « observation permanente » du projet Epos-Résif.

Epos-Resif (European Plate Observation System-Réseau sismologique français) s'inscrit dans le projet fédérateur d'infrastructure européenne EPOS qui lui-même a été sélectionné en 2008 dans la feuille de route ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructure). Epos-Resif est une initiative dont l'un des objectifs est de bâtir la contribution française d'une antenne européenne regroupant la majorité des moyens d'observation géophysique en France.

Volet d'observation du TGI ou Resif-Epos

En plus des avancées sur notre connaissance fondamentale des structures et de la dynamique terrestres, en plus d'une meilleure connaissance de notre sous-sol national, Epos-Resif permettra aussi d'améliorer très significativement la surveillance, l'alerte, et le suivi de tout phénomène concernant les risques dus aux mouvements du sol qu'ils soient de basse ou de haute fréquence, d'origine naturelle (sismique, glissement, gonflement, tsunamis) ou artificielle (barrages, mines, stockages souterrains, explosions etc.). Il fournira des données sismologiques acquises en continu et en temps réel à l'ensemble des organismes utilisant ces données (recherches universitaires, organismes de surveillance, services de sécurités civiles).

L'observation permanente de Epos-Resif est envisagée comme une antenne sismologique multi-échelles s'intégrant dans le réseau sismologique virtuel européen permettant d'étudier le champ d'onde de manière complète sur la surface de l'antenne. De telles antennes sont à la base de nombreuses découvertes, à la fois sur l'imagerie des structures de la Terre et la compréhension de la physique de la source des séismes. Le dimensionnement d'une antenne dépendant de la gamme de fréquences du signal étudié, il est nécessaire de disposer d'antennes sismologiques de tailles différentes avec des densités de stations adaptées, pour imager et étudier une gamme variée d'objets et de phénomènes.

La création d'une antenne multi-échelles en France nécessite de repenser globalement le dispositif universitaire existant. Ce nouvel instrument, moderne et global, sera basé sur un remaillage géographique des sites actuellement instrumentés, une distribution des observations en temps réel, une mutualisation des moyens et une homogénéisation à la fois du matériel, de la gestion et de la distribution des données. Epos-Resif est amené à se substituer progressivement aux réseaux actuels comme le ReNaSS (Réseau National de Surveillance Sismique) conçu il y a plus de vingt ans. Ainsi il sera possible de mesurer, de manière uniforme à l'échelle du territoire, les déformations de la surface de la Terre sur une échelle de temps très grande, allant de la dizaine d'années à la milliseconde. Enfin, il faudra envisager une concertation avec des stations sous-marines comprenant des capteurs sismologiques.

Ainsi, après la mise en place d'une antenne sismologique européenne dépassant les frontières politiques, c'est une nouvelle antenne de dimension plus large dépassant les frontières naturelles, dont la France et l'Europe se doteront.

Les données acquises par Epos-Resif seront distribuées par le portail unique de toutes les données sismologiques universitaires françaises FOSFORE.

• Volcanologie

Les observatoires volcanologiques et sismologiques doivent, d'une part, fournir des informations et interprétations scientifiques aux autorités chargées de la protection civile leur permettant de prendre des décisions opérationnelles nécessaires pour protéger des gens et des biens lors d'une crise, et d'autre part, assurer une fonction de recherche dans le but d'améliorer notre compréhension des systèmes et des signes précurseurs qui nous permettront de prévoir une crise à l'avance. Pour mieux assurer ces deux fonctions dans les années qui viennent, nous proposons une stratégie résumée

ci-dessous. Il semble raisonnable, en vue de l'évolution rapide des technologies et méthodologies scientifiques, de nous projeter en avant, à l'échelle environ de la décennie.

Les problématiques scientifiques aux Antilles, d'un côté, et à l'île de la Réunion, de l'autre côté, sont assez différentes. La zone de subduction des Antilles présente une chaîne de volcans dont deux, La Montagne Pelée en Martinique et la Soufrière de la Guadeloupe, sont français. Le risque sismique est également très élevé aux Antilles, à cause du chevauchement de la subduction et de nombreuses failles dans la plaque Caraïbe. Il est plausible qu'il existe des liens entre l'activité tectonique exprimée par les mouvements sur les différents types de failles et l'alimentation des édifices volcaniques en magma. Chaque système volcanique de la chaîne présente de longues périodes de repos entre les éruptions, mais si on regarde la chaîne dans son ensemble, il y a assez souvent de l'activité quelque part. Il est nécessaire de voir le dispositif d'observation français comme une partie intégrante d'un dispositif international à plus grande échelle, en construisant une collaboration avec des partenaires régionaux chargés de la surveillance des autres volcans. Notons enfin le fait que le risque de tsunamis est aussi très important aux Antilles, un tel phénomène pouvant être engendré par un tremblement de terre sous-marin ou par l'effondrement d'une partie d'un édifice ou une coulée pyroclastique rentrant dans la mer. Ce contexte multirisque doit être pris en compte dans le dispositif observationnel. Contrairement au territoire métropolitain, il paraît nécessaire de coupler complètement les dispositifs d'observation sismologiques à ceux liés à la surveillance des volcans.

Le paysage international aux Caraïbes évolue rapidement avec la mise en place d'un centre d'alerte aux tsunamis (placé sous la tutelle de l'UNESCO), ce qui implique la centralisation et le traitement des données en temps réel. Nos partenaires régionaux (Vénézuéla, Etats-Unis, West Indies, etc...) sont tous en train de moderniser leurs réseaux selon des choix technologiques communs définis dans des discussions auxquelles nous avons participé. La France doit en faire autant si elle veut maintenir un dispositif opérationnel français moderne de surveillance sismique et volcanique et rester un acteur important dans la région. L'IPGP a démarré les actions de modernisation nécessaires. Il s'agit de l'installation de capteurs sismologiques large bande avec télétransmission des données en temps réel par satellite. Une jouvence quasi-complète du réseau régional est prévue selon ces choix à l'échelle de 5 ans environ. Ces nouvelles stations seront multi-capteurs et deux « hubs » de réception seront construits, l'un à

l'OVSM en Martinique et l'autre à l'OVSG en Guadeloupe. Sur la même échelle de temps l'observatoire de la Martinique va être reconstruit selon des normes parasismiques.

Une forte et constructive coopération régionale/internationale aux Caraïbes est indispensable et bénéfique. L'IPGP vient de remporter conjointement avec le « *Seismic Research Unit* » de l'Université des West Indies un contrat de 5 ans (appel d'offre international) pour prendre en charge la surveillance du « *Montserrat Volcano Observatory* ». La gestion de la crise éruptive sur Montserrat nous apportera une expérience sans prix qui pourra être mise en œuvre en Martinique et/ou Guadeloupe lors d'un épisode volcanique.

Le Piton de la Fournaise est un des volcans les plus actifs au monde, environ 25 éruptions ayant eu lieu dans la dernière décennie. Cette activité intense fournit une occasion très importante d'analyser les différents signes précurseurs qui ont eu lieu en fonction du comportement observé pendant chaque éruption, et de construire une vision de l'évolution de l'édifice, du point de vue géométrique et de l'état des contraintes. Nous prévoyons trois évolutions du dispositif observationnel pour tenter de mieux comprendre l'évolution de ce volcan. Le premier est de densifier mais surtout d'étendre les réseaux sismique et géodésique pour pouvoir imager des niveaux plus profonds du système. Le deuxième est la mise en place d'un réseau de capteurs pour surveiller des émissions de gaz volcaniques. Le troisième est de mieux intégrer les observations faites depuis des plateformes spatiales, notamment l'utilisation d'imagerie radar en bande L. Ceci se fera en utilisant des données du satellite ALOS, mais aussi des mesures de rayonnement thermique permettant d'observer des anomalies thermiques et ainsi de remonter à des flux d'émission de lave en temps quasi-réel, ce qui est très difficile à l'heure actuelle. L'observatoire du Piton de la Fournaise va également participer au système d'alerte aux tsunamis pour l'Océan Indien. Enfin il est clair que le développement de l'observation depuis l'espace en intégrant les démarches et des avancées technologiques qui sont en voie de conception pour la géologie et la géophysique planétaire peut être très bénéfique pour surveiller les volcans associés à la subduction, comme aux Antilles. Nous prévoyons ceci, mais pour des raisons principalement techniques pour l'instant, il semble judicieux de développer cette démarche dans un premier temps sur le Piton de la Fournaise.

Nous mettons en place actuellement à Paris une base de données pour les observatoires, qui permettra, selon des modalités encore en élaboration, une mise à disposition des données pour les communautés française et internationale. Le

but est de faciliter l'accès aux données pour les chercheurs souhaitant mener des projets de recherche en collaboration avec les observatoires. Les lignes à haut débit internet permettront à terme de visualiser les données en temps réel en métropole aussi bien que dans les observatoires des DOM.

• Structuration nationale des services d'observation

La nécessité de diversifier les observations doit aller de pair avec une meilleure coordination entre les services et une meilleure articulation avec la recherche. Les meilleurs analystes de la pertinence des observations et des outils à mettre en place pour les exploiter sont les scientifiques eux-mêmes. Trop de services ont une gouvernance réduite au directeur de l'établissement d'accueil qui la délègue au seul responsable de service. Une structuration en grands thèmes disciplinaires permettra de rendre plus dynamique la relation observation-recherche correspondante. On propose ainsi de distribuer les services existants en services nationaux de Géomagnétisme, Sismologie, Volcanologie, Géodésie-gravimétrie, qui auront la charge de coordonner les évolutions de l'outil d'observation et de veiller à la valorisation des activités d'observatoire (instrumentation, calcul numérique, assimilation de données...). Ces services nationaux étant représentatifs de la communauté académique et possédant la taille critique pourront alors prendre toute leur place dans les instances nationales et européennes d'observation et de programmation. Par exemple, ils faciliteront l'établissement de partenariats avec les autres organismes français effectuant aussi des observations (BRGM, CEA, CNES, Ifremer, IGN, IRD, IRSN, ...). Ils auront la représentativité nécessaire au dialogue avec d'autres tutelles ministérielles que celle en charge de la recherche. Ils auront le poids nécessaire à la représentativité dans les discussions internationales. L'INSU, en liaison avec le Ministère des Affaires étrangères, pourra s'appuyer sur l'analyse émanant de ces services nationaux pour proposer d'étendre les observations à des objets localisés hors du territoire si nécessaire. La gouvernance de ces services nationaux devra être représentative de la communauté scientifique concernée. C'est la condition nécessaire pour augmenter le dynamisme des outils d'observation et la valorisation des données.

• Gouvernance des services nationaux d'observation

Les services nationaux d'observation ainsi redéfinis devront chacun être dotés d'un conseil scientifique représentatif de la communauté (académique et non-académique) concernée. Il

comprendra aussi les directions des Osu ayant la responsabilité du fonctionnement de tout ou partie du service, ainsi que ceux ayant des responsabilités de surveillance et d'alerte auprès des pouvoirs publics. Ces conseils scientifiques auront en particulier les fonctions suivantes :

- Evaluer le bon fonctionnement du service national d'observation ;
- Répartir les responsabilités entre les différents Osu partenaires du service d'observation ;
- Evaluer la qualité des données, de leur archivage et de leur distribution publique ;
- Donner son avis sur les budgets et personnels affectés dans les divers Osu ;
- Proposer les partenariats avec d'autres organismes ;
- Faire, si nécessaire, des propositions concernant les campagnes ou sites instrumentés susceptibles d'apporter des informations complémentaires aux observations ;
- Veiller à l'intégration internationale ;
- Faire des propositions concernant l'évolution des thématiques scientifiques abordées.

• Couplage des Services d'observation et des Observatoires des sciences de l'Univers

Les Osu sont les unités de base rassemblant recherche-enseignement-observation. Leur rôle est déterminant de plusieurs points de vue, scientifiques, techniques et politiques :

- Ils animent et peuvent coordonner l'activité des services d'observatoire en propre ;
- Ils peuvent avoir une responsabilité de surveillance de certains phénomènes naturels ;
- Ils permettent une meilleure association entre observation, recherche et enseignement et « rentabilisent » en termes de recherche les activités d'observation ;
- Ils complètent utilement la prospective et l'évolution de l'observation car ils ont la souplesse leur permettant de servir d'incubateurs pour de nouvelles propositions de service ;
- Ils ont vocation à atteindre la taille critique permettant une mutualisation des moyens techniques et humains et un enrichissement mutuel entre disciplines ;
- Ils ont l'échelle adéquate pour évaluer et dynamiser continuellement les observations ;

- Les Osu sont des structures universitaires qui ont le plus souvent un accrochage local et régional leur permettant une bonne visibilité (principalement en ce qui concerne les aléas) et un transfert aval efficace.

L'organisation de ces services nationaux élargis s'appuie nécessairement sur le dispositif des Osu avec affectation de personnels CNAP et inscription des missions d'établissement dans le cadre des contrats quadriennaux passés avec le Ministère en charge de la recherche et le CNRS. Conformément à son rôle de tutelle sur les Osu, l'INSU formalisera la délégation opérationnelle de l'observation aux Osu lors de la signature de leur contrat quadriennal. Parallèlement, l'INSU pourra s'appuyer sur les conseils scientifiques des Services nationaux d'observation pour transmettre ses priorités de recrutement au CNAP.

• Elargissement des techniques d'observation

Les limitations technologiques des dispositifs d'observations sont repoussées de plus en plus loin. Les capteurs sont sensiblement améliorés, mais c'est surtout l'informatique et la télécommunication qui bouleversent l'ancien concept d'observatoire. Il est impératif de mettre à niveau nos capacités de mesure et de diffusion de l'information de manière à être en phase avec la communauté scientifique internationale. Le retard est flagrant en sismologie car une grande partie de l'instrumentation d'observatoire utilisée par les équipes françaises est devenue obsolète et la réponse est le projet Epos-Resif.

Les services d'observatoires doivent maintenant être en mesure de fournir des données accompagnées de tous les paramètres (meta-données) les décrivant et permettant de les utiliser de manière paramétriques. Le stockage et l'archivage deviennent plus élaborés et doivent être scientifiquement fondés sur les meta-données d'accompagnement. La nécessité de partage de ces données avec nos collègues à travers le monde et d'autres disciplines devient aujourd'hui pressante et nous conduit à adopter des normes d'interopérabilité telles que celles proposées par le GEO.

Ces Services d'observation doivent avoir la capacité de procéder à une veille technologique et de développement instrumental qui font trop souvent défaut en France. Avec le soutien de la Division technique de l'INSU, une meilleure relation avec le tissu industriel peut être espérée. Le développement instrumental ainsi que la réalisation d'expériences spatiales doivent donc être reconnues comme une tâche de service,

en raison de la complexité de leur pilotage et de la nécessité d'anticiper les développements futurs. Ces tâches de service pourront également intégrer les activités liées à la diffusion des données et de codes de calcul communautaires (i-science).

Par ailleurs l'observation spatiale se développe, principalement en ce qui concerne la géodésie, la gravimétrie, le magnétisme et l'imagerie. Cette observation spatiale nécessite souvent un calage au sol, en particulier en géodésie où la notion d'observatoire est récente mais indispensable. Les données spatiales et terrestres doivent être intégrées dans un même service d'observation de manière à maintenir la dynamique nécessaire à la valorisation réciproque des techniques. Enfin, une nouvelle composante apparaît, avec des projets d'Observatoires Planétaires sur Mars et sur la Lune, associés pour les prochaines années, à de forts développements instrumentaux.

• Sites instrumentés

En complément d'une observation faite à l'échelle nationale conservant la continuité avec le passé, l'étude de certains phénomènes localisés peut nécessiter une durée d'observation supérieure à celle des campagnes (en général quelques années), ou être répétée régulièrement et avec une densité supérieure. Pour ce faire, il peut être envisagé, surtout si les données sont complémentaires des réseaux existants, de mettre en place des sites instrumentés pour des durées plus importantes. Ceci semble particulièrement justifié dans trois configurations :

- L'étude du « forçage » de certains phénomènes ;
- Les études associant des disciplines en provenance d'horizons très variés ;
- Les sites situés en dehors du sol national, mais où les équipes françaises font des observations structurées de longue durée.

A la différence des Services d'observation, l'INSU ne s'engage pas sur les moyens (humains et financiers) attribués à ces « sites instrumentés ». Il s'agit donc avant tout d'un label de qualité.

Il est proposé que les demandes de reconnaissance de sites instrumentés soient faites sur la base d'un dossier scientifique justifiant, pour l'ensemble de la communauté, de l'intérêt de ce label. L'expertise du dossier sera conduite par la Commission des observatoires suivant des procédures analogues à celles utilisées pour la labellisation des services d'observation.

Ces sites instrumentés devraient alors être soumis aux mêmes contraintes que les services d'observation nationaux en ce qui concerne la validation des données, leur archivage pérenne et leur distribution publique. Comme les services d'observation, ils devraient faire l'objet d'une gouvernance basée sur un conseil scientifique.

La reconnaissance par l'INSU de sites instrumentés à l'étranger ne pourra en tout état de cause se faire sans une discussion impliquant les relations internationales du CNRS et définissant de manière très stricte les protocoles d'observation et les engagements de tous les partenaires dans la durée.

• Les Observatoires fond de mer

Les 2/3 du globe sont couverts par les océans et nombres d'avancées majeures en sciences de la Terre sont venues de données collectées lors de campagnes à la mer. C'est dans le domaine marin que se produit une partie importante de la sismicité, du volcanisme, des phénomènes hydrothermaux et de nombreux processus actifs liés au piégeage sédimentaire ou aux mouvements de terrain. C'est aussi dans le domaine marin qu'est stockée une partie importante des ressources fossiles énergétiques. La difficulté d'y installer des observatoires permanents pénalisent très sérieusement la compréhension de certains phénomènes et biaise les réseaux d'observation en les cantonnant aux terres émergées.

Une instrumentation fond de mer fiable est nécessaire pour acquérir simultanément de longues séries temporelles de données complémentaires des données terrestres dans les champs disciplinaires « classiques », mais aussi pour le suivi de processus spécifiques au domaine marin (données relatives à la sismologie, magnétisme, géodésie, tsunami, dégagement de fluides et de gaz, océanographie physique, transports sédimentaires, glissement de terrain et avalanches sous-marines, évolution de la biodiversité, fonctionnement des écosystèmes...). Leur observation et l'obtention des séries temporelles seront donc nécessairement pluridisciplinaires, justifiant ainsi la mise en place d'infrastructures génériques.

Dans le cadre européen, le réseau d'excellence ESONET (« *European Seafloor Observatory Network* ») ainsi que la sélection dans la feuille de route ESFRI (*European Strategy Forum on Research Infrastructure*) du projet EMSO (*European Multidisciplinary Seafloor Observatories*) permettent à toute une communauté scientifique et industrielle d'être prête pour envisager la réalisation d'un tel réseau de stations d'observation en fond de mer. Rappelons également que la France fait partie des membres fondateurs de ION « *International Ocean*

Network », dont le but est d'installer des stations d'observation fond de mer au milieu des océans pour améliorer la couverture globale des réseaux terrestres.

L'INSU, l'Ifremer et l'IRD encouragent depuis de nombreuses années le développement de stations en fond de mer. Des chantiers incitatifs à forte composante océanique ont été définis (Antilles, Méditerranée, projet MOMAR,...). Les équipes françaises sont déjà bien mobilisées autour de l'observation sous-marine à la fois pour les géosciences, l'océanographie physique, la biologie et le développement technologique. Elles sont fortement impliquées sur trois sites retenus par le groupe ESONET (la zone MOMAR, la mer Ligure et la mer de Marmara) et également au niveau des Antilles Françaises.

Il est donc indispensable de compléter les observations terrestres par des observations effectuées en domaine marin. Un réseau d'observatoires en fond de mer pourrait être vu comme une composante du programme européen GMES ou mondial GEO. C'est un projet de TGI qui représente un réel défi technologique pour les décennies à venir. Il doit être accompagné également d'autres projets d'observation en concertation avec l'observation terrestre.

• Intégration européenne, mondiale et dans GMES

La compréhension de la plupart des phénomènes géophysiques nécessite une densité d'observations compatible avec l'échelle des phénomènes physiques associés tout en maintenant une couverture globale. Par ailleurs, les phénomènes étudiés dépassent souvent les frontières politiques. Cet effort instrumental ne peut être fourni par des pays isolés et une collaboration internationale est indispensable. Ceci rejoint le concept d'Observatoire virtuel, ou de réseaux d'observatoires. Cette collaboration doit se faire sur tous les aspects, depuis le travail de prospective, en passant par la définition des objectifs et leur financement, la collecte des données et leur mise à disposition. Les services nationaux permettront une meilleure participation aux structures européennes et une meilleure construction de projets transfrontaliers. Il est indispensable de faire un gros effort en ce qui concerne la mise à disposition des données de manière à pouvoir intégrer facilement les consortiums internationaux qui commencent à se mettre en place.

Programme structurant dans l'élaboration de la stratégie européenne en observation de la Terre (par observation de la Terre, on entend tous types d'observations : *in situ*, marines, aéroportées, spatiales), le programme GMES (*Global Monitoring*

for Environment and Security) résulte d'une volonté politique forte visant à soutenir les objectifs de l'Europe en matière de développement durable et de gestion de l'environnement mondial. Il a pour objet de mettre en place une capacité européenne d'acquisition, de traitement, d'interprétation et de distribution d'information en support aux « Directives et Politiques européennes » sur l'environnement et la sécurité.

L'architecture générale de GMES repose sur une gouvernance globale et sur deux composantes principales : les services (de base et aval) et l'infrastructure d'observation (spatiale et *in situ*). Il consiste en un ensemble de services thématiques, dont les premiers éléments devraient être mis en place à partir de 2008. Ils permettront d'optimiser l'utilisation des infrastructures existantes et futures, mais également de développer les moyens de collecte et de diffusion de données et d'intégrer ces données dans des systèmes de suivi et de prévision de l'état de l'environnement. Il prévoit également d'assurer la pérennité et l'évolution des infrastructures nécessaires à l'acquisition de ces données.

Les services GMES répondent à un besoin exprimé par des utilisateurs publics de la recherche et de la société civile. Dans un contexte où la « sécurité du citoyen » fait partie des priorités de l'Union Européenne, il est naturel que GMES ait vocation à devenir un outil central pour la gestion des risques. Dans le paysage national, les services d'observations labellisés par l'INSU jouent un rôle important dans cette fonction (services d'observation sismiques ou volcaniques). La mise en place de services pour le Ministère en charge de l'environnement et pour les collectivités territoriales associant la recherche et les services opérationnels devraient se faire dans le cadre du programme GMES. Il est proposé de travailler sur la mise en place d'un service GMES ciblant les déplacements du sol, toutes fréquences confondues, associant sismologues, géodésiens et géophysiciens. Ce service transverse devrait permettre la valorisation des divers réseaux sols (sismologie, GPS) et les moyens spatiaux, et mettre en avant la synergie entre ces observations. La communauté française peut être moteur de ce projet qui doit être porté au niveau européen.

• Spatial et observatoires géophysiques planétaires

Les missions GOCE, SWARM, GALILEO et les missions de télédétection optique et radar vont devenir le prolongement des observatoires magnétiques, géodésiques, gravimétriques et volcanologiques dans l'Espace. La préparation des futurs observatoires planétologiques et des expériences de minéralogie

in situ sont également un renouveau des développements en instrumentation géophysique ou géochimique.

• Capacités de proposition

La connaissance scientifique est en perpétuel mouvement et évolution. S'il est nécessaire de conserver des observations dans la durée (on a vu son importance pour la compréhension du fonctionnement de la planète), le questionnement scientifique évolue. Les données permettant de contraindre les nouveaux concepts et les nouveaux modèles suivent la même évolution. Il est donc indispensable de se donner la possibilité de compléter, dans des champs déjà définis, les données existantes avec des données d'un type nouveau. Il est tout aussi indispensable d'admettre que de nouvelles disciplines puissent maintenant nécessiter des observations dans la durée de manière à en comprendre les mécanismes.

Il est donc essentiel d'avoir, au sein des diverses instances scientifiques de l'INSU, une capacité de proposition et d'évaluation de nouvelles observations dans des champs disciplinaires en évolution.

• Demande sociétale

La demande sociétale concernant les aléas naturels a considérablement augmenté ces dernières années. En ce qui concerne les sciences de la planète, elle s'adresse à l'aléa sismique, volcanique et gravitaire en liaison avec les observations des divisions SIC et OA pour les transferts de fluides et les bilans globaux. Ces aléas naturels sont augmentés des aléas anthropiques dont on découvre continuellement de nouveaux aspects (ressources en eau, stockage de déchets, ...).

Nos services d'observation ont la compétence et produisent des données dont la qualité est reconnue en ce qui concerne ces aléas. Encore faut-il que ces données soient rapidement accessibles à l'utilisateur aval comme c'est déjà le cas avec l'information sismique. Cela est une contrainte allant dans le sens d'une généralisation des procédures de transmission et de traitement en temps quasi-réel. Cela implique d'une manière plus générale que les données soient mises en forme et interprétées de manière à être utilisables rapidement. Il faut pour cela que les Services d'observation et les Osu fassent un effort de diffusion des données non seulement auprès des Ministères concernés, comme le Ministère en charge de l'environnement, mais aussi auprès des collectivités territoriales. La mise en place de partenariats inter-organismes est une des voies qui doit permettre d'améliorer la situation actuelle.

■ Conclusions

- Les évolutions de la demande scientifique et sociétale, la nécessité d'augmenter sensiblement les financements et personnels impliquent une évolution du dispositif d'observation en sciences de la Terre interne.
- Un rassemblement des compétences dans des services d'observation nationaux coordonnés par l'INSU est nécessaire. Ce rassemblement permettra de dynamiser les relations recherche-observation, de simplifier le dialogue entre établissement et organismes, de faciliter la mise en place de partenariats et de co-financements et d'améliorer l'intégration dans des dispositifs internationaux.
- La Commission observatoire des sciences de la Terre propose la création de 4 services nationaux d'observation labellisés par l'INSU (Sismologie, Gravimétrie-géodésie, Magnétisme, Volcanologie). Ces services doivent chacun être dotés d'un conseil scientifique comprenant des représentants de la communauté scientifique (y compris les organismes partenaires), des Osu impliqués, et de l'INSU. L'INSU déléguera contractuellement (lors de la mise en place du contrat quadriennal) l'aspect opérationnel et le fonctionnement des observations aux Osu auxquels seront affectés les moyens humains nécessaires.
- De tels services d'observation nationaux permettront aux Osu concernés d'assurer dans les meilleures conditions les tâches de surveillance et d'alerte concernant les aléas dont ils ont la charge.

- L'INSU-CNRS d'une part et le Ministère de l'enseignement supérieur d'autre part devront s'engager, lors de la contractualisation des OSU, sur les moyens d'accompagnement financiers et humains nécessaires au bon fonctionnement des Services nationaux d'observation.

Sites web des services d'observation existants

Géomagnétisme

BCMT : <http://obsmag.ipgp.jussieu.fr/>

SIIG : <http://isgi.cetp.ipsl.fr/>

Géodésie-gravimétrie

RENAG : <http://www.renag.fr/>

Observatoire gravimétrique : <http://eost.u-strasbg.fr/obsgrav/>

BGI : http://bgi.cnes.fr:8110/bgi_debut_f.html

FROG : <http://ganymede.ipgp.jussieu.fr/frog/index1.html>

Sismologie

ReNaSS : <http://renass.u-strasbg.fr/>

RAP : <http://www-rap.obs.ujf-grenoble.fr/>

RLBP : <http://rlbp.u-strasbg.fr/spip/>

BCSF : <http://www.franceseisme.fr/>

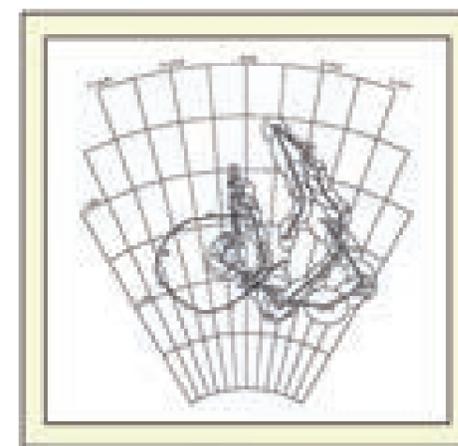
GEOSCOPE : <http://geoscope.ipgp.jussieu.fr/index.htm>

FOSFORE : <http://www.fosfore.ipgp.fr/index.php>

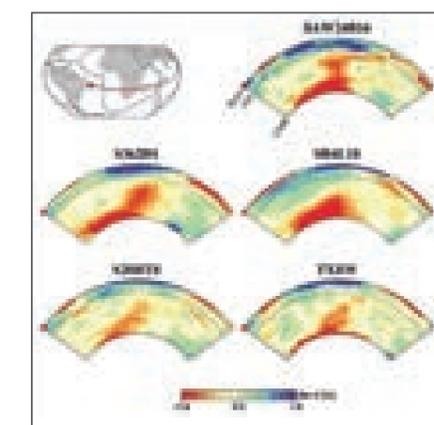
OMIV : <http://www-igjt.obs.ujf-grenoble.fr/observations/omiv/>

Volcanologie

<http://www.ipgp.jussieu.fr/pages/0303.php>



1. Variation du champ magnétique terrestre depuis 3 000 ans.

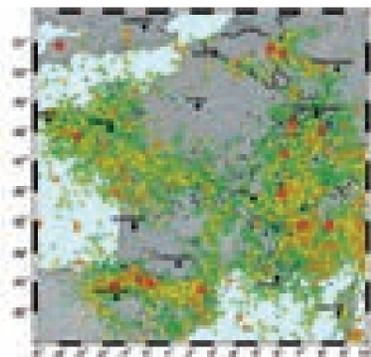


2. Image sismologique d'un panache mantellique.

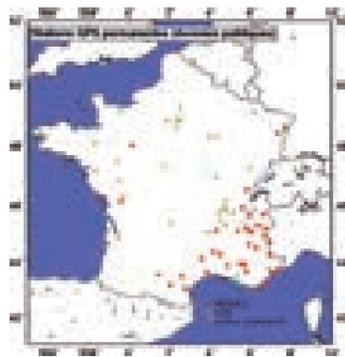
Les services nationaux d'observation en sciences de la Terre interne



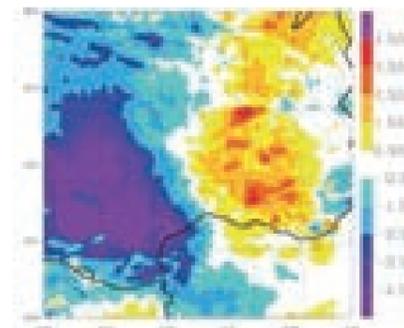
3. Glissement de terrain de Séchillienne.



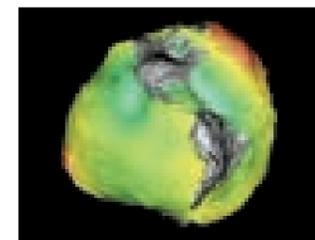
4. Sismicité de la France 1980-2006 (RéNaSS).



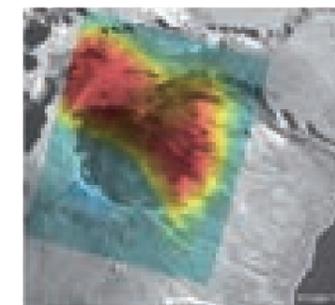
5. Carte des stations GPS du RENAG.



11. Modification de la quantité d'eau précipitable (en mm) induite par l'assimilation des données GPS (donnée CNRM / Météo- France).



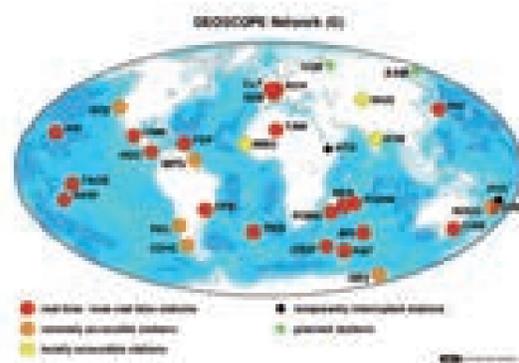
12. Géoïde calculé d'après les mesures satellitaires.



13. Variation de vitesse à la Réunion (déduite de l'analyse du bruit) 3 jours avant éruption.



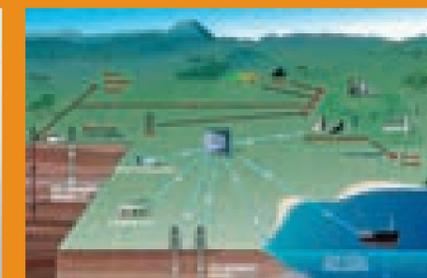
6. Réseau du BCMT.



7. Réseau Geoscope.



14. Mise en place d'une station « fond de mer ».



15. Stockage de CO₂.



8. Gravimètre supraconducteur GWR.



9. Station GPS de La Féclaz.



10. Satellite magnétique SWARM.



16. Volet d'observation du TGI ou Resif-Epos.

Très grands équipements et plateformes instrumentales nationales

Bruno Goffé, Directeur adjoint scientifique INSU

Le CNRS gère, en collaboration avec ses partenaires français, européens et internationaux, des Très Grands Equipements et Infrastructures de Recherche (TGE et TGIR) pour le bénéfice de l'ensemble de la communauté scientifique.

En décembre 2008, le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche a publié une feuille de route nationale des Très Grandes Infrastructures de Recherche (TGIR). La programmation budgétaire des TGIR gérées par le CNRS (une partie est gérée par le CEA) s'inscrit pleinement sur cette feuille de route nationale et intègre des instruments y figurant, induisant de ce fait un élargissement conséquent du périmètre des TGIR. **A noter que la flotte océanographique hauturière est un TGIR et devrait être gérée comme tel par l'IFREMER.**

Le plan stratégique « Horizon 2020 » du CNRS souligne ainsi que « la mise en place d'équipements et d'infrastructures à dimension nationale » et internationale est nécessaire au progrès de la plupart des champs disciplinaires. « **Le CNRS poursuivra une politique ambitieuse d'investissement, dans les très grandes infrastructures et les plateformes mutualisées, pour créer et maintenir ces équipements au meilleur niveau international** » (Conseil d'administration du CNRS du 1^{er} juillet 2008). Ainsi au TGIR du périmètre 2009 s'ajoutent d'une part de nouveaux Très Grands Equipements (TGE), incluant des transferts de base en provenance des Instituts et d'autres part des réseaux de plateformes.

En apportant une visibilité accrue, une gouvernance unique au niveau national (inter-organisme), un lien et une valorisation, la constitutions de ces structures apportent :

- Le maintien des moyens financiers, matériels et humains ;
- Eventuellement des moyens plus nombreux et renouvelés ;
- Le partage des données et des expériences ;
- Le soutien aux systèmes d'observation.

Cependant si la labellisation, la visibilité et la reconnaissance structurelle des TGE, TGIR et plateforme mutualisées intéressant l'INSU et les sciences de la Terre sont progressivement acquises, il n'en est pas de même pour les financements.

Actuellement, dans le cadre de l'INSU, le seul TGE réellement financé en sciences de la Terre par la dotation TGE est la participation à ECORD (European Consortium for Ocean Research Drilling).

Concernent les sciences de la Terre à l'INSU (*en Italique, les TGE non gérés par l'INSU*)

- Les TGE déjà existants : **ECORD/IODP**, *ESRF*, *Soleil*, *XFEL/FAIR*, *GENCI/PRACE*, *RENATER* ;

- De nouveaux TGE :

- ◆ **EMSO/KM3NET/MEUST** (Observatoires sous-marins et leur intérêt commun avec Km3). Projets d'observatoires du fond des mers, inscrits dans la feuille de route ESFRI. La France s'est positionnée sur le site de MOMAR (ride médio atlantique), Ligure (commun avec ANTARES et le futur Km3) et MARMARA. En termes d'innovation, la collaboration avec l'industrie permettra d'atteindre un haut niveau de développement de la technologie marine déployée en environnement hostile (grande profondeur, corrosion, etc.). Il est prévu le déploiement d'un réseau à haut débit reliant divers capteurs au fond de la mer (« internet des objets ») ; le développement du positionnement acoustique avec Genesea est une première mondiale. Le dépôt récent par le CNRS d'un brevet auprès de l'INPI sur un nouveau type de connexion sous marine en est un autre exemple. Il y a plusieurs développements de capteurs innovants reliés à ce projet : sismographes ultrasensibles, des photo-détecteurs innovants (PHOTONIS) passeront à la phase d'industrialisation grâce à ce projet, ainsi que des développements d'électronique, de logiciel et de calcul intensif.

- ◆ **RESIF/EPOS** (REseau Sismologique et géodésique Française – European Plate Observing System) est un projet d'équipement dont le but est de développer nos capacités techniques dans l'étude et l'observation de la Terre. Il s'agit d'une antenne d'observation orientée vers l'intérieur de la Terre, équivalent aux grands télescopes tournés vers l'espace. Au niveau national, l'analyse des données concernera toute la communauté géophysique et les résultats auront un impact sur toute la communauté étudiant de près ou de loin l'intérieur de la Terre (tectonique, géologie, géochimie, hydrologie, ...). RESIF-EPOS s'appuiera sur les « Observatoires Géodésiques Fondamentaux » pour la réalisation des repères de référence absolus et l'étalonnage des systèmes altimétriques spatiaux. Les données apporteront également des informations sur l'atmosphère et serviront dans le domaine de la météorologie.

RESIF-EPOS aura des impacts sociétaux dans l'étude des risques naturels et dans le domaine des ressources naturelles. Il sera un outil de mesure, d'étude et de compréhension, des risques dus aux mouvements du sol, qu'ils soient de courte ou de longue période, d'origine naturelle (séismes, glissements de terrain, tsunamis, ...) ou artificielle (barrages, mines, stockages souterrains, explosions, ...), à la mesure de l'urbanisation forte et des nombreux ouvrages stratégiques qui caractérisent la France.

Le parc d'équipements sera composé par l'achat d'équipements neufs ainsi que par l'intégration et l'homogénéisation d'équipements existants. Un effort majeur sera l'installation d'environ 200 sismomètres permanents moyenne bande et large bande, équipements presque inexistant actuellement en France métropolitaine. Un deuxième élément concerne le renouvellement de la station de télémétrie satellitaire laser mobile et la mise en place d'une antenne « Very Long Baseline Interferometry » (VLBI) à l'Observatoire de Tahiti. A ce dispositif sera ajouté un ensemble d'instruments mobiles permettant de focaliser l'antenne d'observation sismologique et géodésique sur des objets d'étude particuliers et géographiquement localisés. L'acquisition d'un volume grandissant de nouvelles données imposera une réorganisation complète du Système d'Information pour assurer une distribution rapide (sous quelques minutes) de données émanant de RESIF et une mise à disposition en temps quasi réel à la communauté scientifique.

RESIF est un projet multi-organisme dont les tutelles sont le MESR, le MEEDDM et le BCSF (Bureau Central de

Sismologie Français). Le porteur principal est le CNRS-INSU. Le consortium RESIF-EPOS implique tous les grands organismes et établissements en sciences de la Terre : BRGM, CEA-LDG, CNES, IFREMER, IGN, IRD, IRSN, LCPC, Observatoire de la Côte d'Azur, Institut de Physique du Globe de Paris, Université Joseph Fourier (Grenoble), Université de Strasbourg, Université de Toulouse, et en association avec d'autres établissements, notamment les Universités de Clermont-Ferrand, Montpellier et Nantes. RESIF est adossé aux activités des Alliances ALLENI et ANCRE principalement, ainsi qu'à l'Alliance ALLISTENE pour l'ensemble « Centre de données ».

RESIF-EPOS est pressenti comme une contribution française majeure à EPOS (European Plate Observing System).

- ◆ **Flotte océanographique semi-hauturière (de l'INSU)**

La démarche entreprise par l'INSU, avec le soutien de l'INEE pour le CNRS, s'inscrit dans le cadre d'un partenariat public-privé de recherche scientifique pour les institutionnels, et économique pour les industriels.

L'intérêt est d'aider les différents segments de l'activité navale nationale (concepteurs, chantiers navals nationaux, opérateurs, utilisateurs scientifiques, ...) à se saisir des opportunités de renouvellement de la flotte océanographique européenne. Ce renouvellement est estimé à plus de trente navires de classe « océanique » à « régionale » (50 à 60 m de long).

L'objectif sera de définir une filière basée sur un navire océanographique type de nouvelle génération, « propre » tel que cela a été exprimé par le Grenelle de l'Environnement et par le Grenelle de la Mer, c'est-à-dire innovant, économique en énergie et fonctionnement opérationnel, peu polluant, polyvalent, normalisé, interopérable, optimisé et mutualisable au niveau européen. Cela permettra entre autres, une meilleure coordination et optimisation de la programmation de la flotte et des équipements, réduira les temps de transit, facilitera la coopération internationale et le partage des équipements.

Les partenaires privés (concepteurs et constructeurs) qui collaborent actuellement au projet (ou ayant été sollicités), et qui bénéficieront directement des retombées économiques, sont des grands groupes industriels et des PME, en particulier Bureau Veritas France, D2M France, Schlumberger France, Technip France, STX Lorient, OCEA, Kongsberg Norway.

Outre le CNRS, les partenaires institutionnels attendus sont ceux de la TGIR nationale Flotte océanographique (Ifremer, IRD, IPEV) auxquels s'ajoute l'ENSTA.

Très grands équipements et plateformes instrumentales nationales

◆ CALIFF (Octobre 2009) carothèque-lithothèque et forages français

En octobre 2009, la proposition de labellisation d'un TGIR CALIFF (INSU, BRGM, MNHN) a été acceptée par le ministère de la recherche. Il s'agit de constituer une plateforme française d'exploration des domaines continentaux, glaciaires et océaniques par forage et carottage, qui soit aussi une plateforme d'archivage et de conservation des patrimoines géologiques (Géodiversité). CALIFF fédérera, coordonnera et maintiendra au meilleur niveau de compétence :

- L'ensemble des moyens nationaux et internationaux que la France dédie à l'exploration scientifique des domaines continentaux, glaciaires et océaniques par les outils de forage et carottage ;
- L'ensemble des structures physiques, humaines, organisationnelles et légales que la France dédie ou devra dédier à l'archivage, la conservation et la mise à disposition des carottes et échantillons géologiques représentatifs prélevés à l'échelle mondiale dans le cadre de la recherche académique française, et des carottes prélevées par les acteurs miniers et industriels sur le territoire national.

CALIFF sera :

- Un outil scientifique au service des problématiques de l'environnement, du climat, de la biodiversité, des ressources minières et énergétiques représentant la France auprès des grandes organisations européennes et mondiales du secteur notamment, ICDP, ECORD/IODP, voire d'autres à venir ;
- Un outil industriel au service des industries du sous sol ;
- Un outil légal répondant aux exigences du code minier ;
- Un outil de formation, de culture et de valorisation du patrimoine et du savoir-faire national dans le domaine des géosciences vis-à-vis du public, des collectivités locales, des médias pour l'acceptabilité des technologies du sous-sol nécessaires à la réduction des gaz à effet de serre ;
- Un outil de restitution de l'information vers les pays d'origine.

La mise en cohérence des moyens existants passera successivement par :

- 2010-2014 (voire 2017 suivant possibilités de financement) la construction des quatre premières tranches de la carothèque – lithothèque (Géothèque) nationale (maître

d'ouvrage : BRGM en lien avec le réseau des musées (MNHN) ;

- 2010-2015 : la participation à l'organisation internationale ICDP (INSU) ;
- 2011 et années suivantes : l'intégration de la plateforme carottage forage C2FN de l'INSU dans CALIFF (C2FN comprend les carottages marins (INSU, IPEV), carottage et forages glaciaires (INSU, IPEV) conservation des carottes de glace (INSU-LGGE), carottage et forages continentaux nationaux (Meudon, Chambéry, Aix-Marseille, Montpellier, BRGM...)
- 2013-2023 : l'intégration des forages océaniques (TGE existant ECORD, INSU) dans CALIFF.

Les Plateformes Mutualisées

Outre une meilleure coordination des efforts au niveau national, les plateformes doivent permettre d'identifier les besoins (soutien financier, jouvence, personnel, acquisition de nouveaux matériels, etc...) de la communauté scientifique concernée pour répondre plus efficacement à ses perspectives scientifiques et choix stratégiques. Elles regroupent au sein de l'INSU, dans divers domaines, les grands instruments, dont une partie du temps a une vocation de service national.

Les plateformes sont dotées d'un comité national de coordination (CNC) qui réfère à la commission PEPIN qui, elle-même, assure l'interface entre la communauté, la CSST et le DAS.

- La **Plateforme Géochimique à Haute Performance** concerne les analyses chimiques et isotopiques dans tout type d'échantillons naturels, extraterrestres, terrestres ou anthropisés.

Les laboratoires et les services nationaux actuellement concernés sont :

- ◆ Le service national **ASTER**, spectromètre de masse par accélérateur, CEREGE, Aix en Provence ;
 - ◆ Le service national Sonde Ionique, **SIMS**, CRPG, Nancy ;
 - ◆ Le service national **SARM**, analyse spectrochimique, CRPG, Nancy ;
 - ◆ Le service national **MC-ICP-MS**, ENS Lyon ;
 - ◆ Le service national de **Microsonde Ionique**, NanoSIMS ;
 - ◆ Le service national **ARTEMIS**, Carbone 14, CEA, Gif sur Yvette.
 - ◆ **FAME**, ligne de l'INSU au sein des 4 CRG (Collaborating Research Group) de l'ESRF.
- Communautés concernées : ST, SIC et en partie INEE

- La **Plateforme d'Expérimentation, Synthèse et Analyses Nanométriques** regroupe les grands instruments consacrés à la synthèse et à l'analyse des matériaux dans le domaine de la minéralogie et de la pétrologie. Les laboratoires et les services nationaux actuellement concernés sont :
 - ◆ La facilité nationale de **Microscopie Electronique** avec le pôle de Lille USTL et le pôle de Paris IMPMC ;
 - ◆ La facilité nationale **FIB**, le pôle de Paris IMPMC ;
 - ◆ La facilité **Crystal Probe**, Géosciences Montpellier ;
 - ◆ La facilité **CAMPARIS**, Paris ;
 - ◆ La facilité **Lignes de Lumière** : ESRF, Soleil, ILL ;
 - ◆ La facilité nationale **Expérimentation** (Multi Enclume Haute Pression, LMV ; Clermont-Ferrand, l'expérience

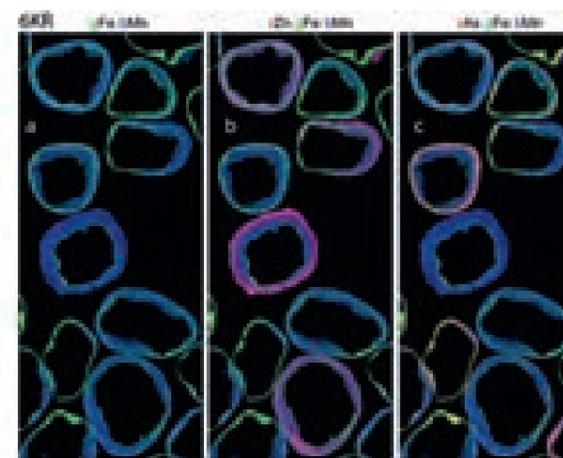
Dynamo : OSU Grenoble ; les enclumes diamants : IMPMC Paris, Marne la Vallée, ENS Lyon ; les presses Patterson : Orléans Géosciences Montpellier ; les Pistons cylindres Orléans, ENS Paris, Clermont Ferrand ; les bombes à chauffage interne : ENS Paris, ISTO Orléans, G2R Nancy, LMV Clermont, LGCA Grenoble).

Communautés concernées : ST, SIC et en partie INEE

Une réflexion est en cours pour l'intégration de cet ensemble dans une grande plateforme d'instruments distribués dans les réseaux de plateformes nationales gérées par la cellule TGE-TGIR du CNRS.



1. IODP-ECORD, à gauche le brise-glace suédois Oden mis en oeuvre par ECORD pour l'expédition ACEX, à droite le Chikyuu, décente du BOP (Blow Out Preventer) sur le fond, (ECORD et JAMSTEC).



2. FAME ESRF, cartographie de grains de quartz, (Manceau et al.).

3. RESIF carte de l'implantation future des différents types de stations, (RESIF).

Europe et international

Composition du groupe de travail

| | |
|------------------------|--|
| Catherine Mével | (IPG Paris), présidente, chargée de mission à l'INSU |
| Pierre Cochon | (IFREMER Issy-les-Moulineaux), membre de la CSST |
| Guy Vasseur | (INSU Paris), chargé de mission relations Europe et international à l'INSU |
| Elisabeth Kohler | (INSU Paris), chargée d'affaires Europe et international à l'INSU |

A également participé aux discussions :
Michel Cara (EOST Strasbourg), membre du GTN Environnement

Chargé de mission INSU assurant le suivi : François Cornet

Au sein de l'INSU, la communauté des sciences de la Terre est relativement fragmentée par rapport à celles des astronomes et de l'océan-atmosphère. Elle est impliquée dans de nombreux projets qui s'appuient souvent sur des chantiers régionaux. De ce fait, à l'exception de certaines thématiques, elle est moins organisée en réseaux européens et internationaux. Renforcer le positionnement de la recherche française en sciences de la Terre dans un cadre européen et international est un enjeu important pour les années à venir. Les objectifs sont multiples :

- Accroître la qualité de la recherche grâce à la coopération avec les équipes de pointe ;
- Gagner en efficacité au niveau des réponses au 7^{ème} plan cadre de la Commission Européenne ;
- Rationaliser les investissements en mutualisant les équipements ;
- Renforcer la visibilité de la France en assurant un leadership dans quelques domaines phares.

La coopération au niveau européen et international se fait dans différents cadres : les infrastructures, les projets et appels d'offres internationaux, et les coordinations. La France participe à l'ESA (European Space Agency) qui joue un rôle absolument essentiel pour la collecte de données spatiales. Enfin, il est indispensable de se positionner par rapport à la recherche finalisée en Europe et d'explorer les possibilités offertes au niveau européen par EUREKA.

Ce document fait le point sur les projets en cours et propose un certain nombre de recommandations pour améliorer la visibilité des équipes françaises au plan européen et international, et accroître son efficacité dans les montages de projets. Etant donnée la diversité des actions, il ne doit en aucun cas être considéré comme faisant une revue exhaustive.

Les infrastructures

Le coût des infrastructures de recherche ne cesse d'augmenter avec la sophistication croissante des instruments. Pour conserver l'accès aux infrastructures de pointe, il est essentiel de partager ces coûts en s'organisant au niveau européen et/ou international. Par ailleurs, participer de façon organisée à de grandes infrastructures internationales contribue à structurer la communauté française, à travers des structures de proposition et d'évaluation. Diverses actions sont en cours ou sont en train d'être montées.

■ Les grandes infrastructures européennes

Au niveau de la Commission Européenne, une définition des priorités des futures grandes infrastructures de recherche a été effectuée dans le cadre ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures). La France a dû se positionner par rapport à ces projets. Le rôle de l'INSU, en concertation avec les autres partenaires, est clair puisque mettre les grands instruments à la disposition des équipes de recherche fait partie de ses missions. Mais l'Europe ne financera qu'une faible partie du coût des instruments (de l'ordre de 10% maximum). Si la France s'engage à soutenir des instruments figurant sur la liste ESFRI, un soutien financier au niveau national doit suivre. Ce relais au niveau national doit passer par les TGE/TGI et donc obtenir le soutien du Ministère.

Pour l'instant, la communauté des sciences de la Terre est concernée principalement par les projets :

- **EMSO** (European Multidisciplinary Sea Observation), dont l'objectif à moyen terme est de développer l'infrastructure nécessaire aux observatoires fond de mer. EMSO est inscrit sur la liste ESFRI et la partie instrumentation est soutenue par une action de coordination. En parallèle, ESO-Net (European Sea Observatory Network of Excellence), piloté par l'IFREMER, soutient la partie scientifique. La France est particulièrement impliquée dans les projets MOMAR, mer Ligure et mer de Marmara. Pour l'instant, le relais au niveau national n'est pas assuré. La France ne pourra jouer un rôle de premier plan dans ce projet que si il est accompagné par un financement national pour développer l'infrastructure fond de mer.

- **Le projet Km³**, poussé par les physiciens, pourrait avoir des retombées pour la communauté des sciences de la Terre. L'objectif est d'installer un ou plusieurs télescopes pour mesurer le flux cosmique de neutrinos. Il s'agit d'un ensemble de capteurs fond de mer reliés à la côte par un câble pour obtenir les données en temps réel. L'idée est de profiter de ces infrastructures pour installer d'autres types de capteurs à intérêt géologique ou géophysique. Trois sites sont actuellement envisagés en Méditerranée.

- **EPOS** (European Plate Observing System) a pour objectif le développement d'un réseau sismique pour mesurer en temps réel les déformations de la plaque Européenne. Ce projet a été soumis à la liste complémentaire d'ESFRI et est en attente de validation. Au niveau national, la communauté géophysique est organisée dans le projet EPOS-RESIF (Réseau Sismologique et géodésique Français) dont l'objectif est la constitution d'une antenne unique regroupant tous les réseaux fixes et mobiles en sismique, géodésique et gravimétrie. Ce projet a un effet structurant majeur sur la communauté. Il a reçu le soutien du Ministère et devrait être inscrit dans les TGE dès 2009, avec un soutien financier à partir de 2010.

Un projet de construction de navire polaire multidisciplinaire, l'Aurora Borealis, est également inscrit sur la liste ESFRI. Il pourrait être utilisé par les équipes des sciences de la Terre, en particulier dans le cadre de sa capacité de forage. La position française sur ce projet n'est pas encore complètement arrêtée. Mais compte tenu du coût très élevé de ce projet, il est peu vraisemblable que la France s'engage.

Recommandations

Accompagner au niveau national les projets européens en grandes infrastructures soutenus par la France par la mise en place de TGE/TGI.

■ Participation aux programmes de forages internationaux

La participation au programme **IODP (Integrated Ocean Drilling Program)** donne accès à des navires de forage. IODP est le seul programme en sciences de la Terre intégralement financé au niveau international. La France a été impliquée dans les programmes de forages océaniques depuis de longues années, à travers les programmes successifs DSDP, ODP et IODP. Le programme IODP constitue une avancée majeure puisqu'il diversifie les plates-formes de forage et offre de nouvelles opportunités aux scientifiques. Les thèmes mis en avant sont : les changements environnementaux ; la biosphère profonde et les circulations de fluide ; la géodynamique et les cycles de la Terre solide.

La France participe au programme à travers le consortium européen ECORD, que l'INSU pilote. La contribution française est financée par un TGE. La plupart des laboratoires français sont impliqués à des titres divers (embarquants, représentants dans les structures d'évaluation, utilisateurs des données). Les programmes successifs ont eu une politique de conservation et de mise à disposition des données absolument remarquable. Toutes les carottes sont accessibles, conservées dans 3 carothèques internationales situées aux Etats-Unis, au Japon et en Allemagne. Les données acquises sur les navires sont accessibles en ligne.

La France est en cours de négociation pour rejoindre **ICDP (International Continental Drilling Program)**. La cotisation relativement modeste permet d'être représenté dans les instances de décision, d'avoir accès aux données et au soutien logistique, mais ne finance pas les opérations. Un certain nombre de scientifiques français ont été impliqués à titre individuel dans des projets ICDP ces dernières années, il est donc important que la France régularise sa situation en rejoignant officiellement le programme.

Recommandations

La France doit maintenir sa participation aux programmes internationaux de forages (IODP et ICDP).

■ Les laboratoires internationaux associés au CNRS

Les laboratoires internationaux sont des structures associées au CNRS qui lient une (des) équipe(s) françaises à une équipe internationale. Ces laboratoires sont très utiles car ils facilitent la coopération entre des équipes sur des projets ciblés. Plusieurs laboratoires internationaux ont été créés ces dernières années (Chili, Taïwan). Il semble cependant que ces créations aient été faites au coup par coup, sans réflexion globale sur les besoins et les priorités de la communauté INSU.

Recommandations

Mener une réflexion stratégique sur les futurs projets de laboratoires internationaux.

Projets et appels d'offre internationaux

Les scientifiques français participent à des projets européens ou internationaux qui sont soutenus par un financement provenant soit de la France, mais dans un cadre de coordination internationale, soit de la Commission européenne.

■ Les actions bilatérales

Du fait de l'approche par chantier géographique qui caractérise les sciences de la Terre, il existe au niveau international de nombreuses actions bilatérales soutenues par le MAE ou le CNRS (PICS...). Ces actions, d'un montant modeste, permettent le plus souvent de financer des missions de terrain. De ce fait, elles sont absolument essentielles pour les scientifiques. Cependant, elles sont éparpillées et ne permettent pas d'avoir une vision globale.

L'INSU a en revanche joué un rôle proactif dans la mise en place de certaines actions bilatérales. C'est le cas du projet en cours de montage avec le Québec pour un « Observatoire de la mine en milieu fragile » (Canada et Nouvelle Calédonie). Ce rôle est également à maintenir dans le futur, sur des actions stratégiques.

Il est essentiel que l'INSU définisse sa stratégie de coopération en sciences de la Terre avec un certain nombre de partenaires clés. On peut citer l'exemple de la Chine, avec laquelle des actions de coopération ponctuelles existent déjà. Le potentiel est énorme, et la demande très forte. Une fois cette stratégie définie, elle doit s'accompagner d'actions incitatives qui faciliteront le développement de cette coopération. Parmi les actions envisagées, on peut citer :

- Le montage de PICs pour amorcer la coopération ;
- L'affichage de bourses de thèse ;
- L'affichage de postes rouges pour des chercheurs étrangers dans nos laboratoires ;
- La création de laboratoires internationaux (LIA, GDRI, UMI).

Recommandations

Définir une stratégie de coopération bilatérale et multipartenaires au niveau international (à travers une direction Europe/international ?)

L'accompagner par des actions incitatives.

■ Participation à des projets de la Commission européenne

De nombreux chercheurs/laboratoires ont participé ou participent à des projets européens dans le cadre de réseaux qu'ils ont développés avec leurs collègues. Cependant, par rapport à sa position au plan international, la recherche française en sciences de la Terre reste modérément impliquée dans les programmes financés par la Commission européenne. Celle-ci offre des possibilités de financement à travers les PCRD, mais dans un cadre contraignant, voire considéré comme décourageant par de nombreuses équipes :

- L'information sur les programmes et les appels d'offres n'est pas aisée à trouver et demande un fort investissement en temps. Outre le site officiel de la CE, <http://cordis.europa.eu/>, il existe, au niveau national, le site web EUROSFAIRE <http://www.eurosfaire.prd.fr/7pc/> qui donne des informations générales et les points de contact nationaux (PCN) pour les différents instruments. Au niveau de l'INSU, la Cellule Europe et international est aussi membre du point de contact national Environnement.
- Les appels d'offres sont souvent ciblés et de nombreux laboratoires ne se retrouvent pas dans les thématiques affichées.

Projets et appels d'offre internationaux

- Pour répondre efficacement, il est essentiel d'avoir déjà un réseau de partenaires organisé.
- Le montage d'un projet, en particulier pour le coordinateur, peut se révéler un véritable casse-tête quand il faut remplir les formulaires. Le CNRS peut mettre à la disposition des équipes des « Ingénieurs Europe ». C'est une très bonne initiative, mais qui se fait pour l'instant dans un cadre très strict ne répondant pas nécessairement aux besoins. Par exemple, les demandes dans le cadre du programme « mobilité » ne sont pas prises en considération, alors que le montage du projet est tout aussi contraignant.
- La gestion d'un projet européen et la production des rapports sont très lourds. Le budget attribué au soutien administratif est souvent insuffisant (quelques mois par an) pour embaucher un CDD.

Par ailleurs, faire passer des idées à Bruxelles nécessite un lobbying efficace. Celui-ci doit être renforcé au niveau de l'INSU. Le mécanisme d'élaboration des programmes de travail dans le 7^{ème} PCRD et l'organisation au niveau français sont détaillés en annexe.

■ Quel est notre positionnement dans le « Seventh Framework Programme » ?

Il y a peu de place pour les sciences de la Terre dans les domaines thématiques ciblés. Le thème privilégié est l'environnement, mais les sciences de la Terre n'y occupent qu'une position marginale, essentiellement à travers les risques et dans une certaine mesure les écosystèmes. D'une manière générale, ce sont seulement quelques domaines qui peuvent prétendre à un soutien :

- Ressources et risques (DG Environnement) ;
- Energie (stockage du CO₂ par exemple) ;
- Information society technologies (IST) ;
- Espace.

Le programme I3 (Integrated Infrastructure Initiatives) peut apporter un soutien aux infrastructures, à la condition de les ouvrir à l'Europe. **C'est une ouverture à ne pas négliger. Le projet EUROFLEET, en cours de discussion, pourrait par exemple faciliter l'accès aux navires océanographiques dans un cadre européen concerté.**

Le programme « People » offre de nombreuses opportunités à tous les niveaux :

Jeunes chercheurs, déroulement de carrière, partenariat industrie-académie, dimension internationale.

L'European Research Council (ERC) vient d'arriver dans le paysage. Pour la Commission européenne, son rôle est de soutenir les meilleurs chercheurs quel que soit leur domaine. Le seul critère est l'excellence, avec une mise en compétition au niveau de toute l'Europe. Le résultat du premier appel d'offre (« Jeunes chercheurs ») est très bon pour les sciences de la Terre (2 projets financés sur 250, tous domaines confondus). Cependant la compétition est très forte : 9 000 projets ont été soumis, nombre qui a largement dépassé l'attente de la Commission européenne. Le deuxième appel (« Chercheurs expérimentés ») a été moins fructueux. Sur 2 200 projets déposés, dont environ 300 financés, un seul relève de l'INSU (AA). Malgré la sélectivité des appels ERC, il faut inciter la communauté sciences de la Terre à soumettre des projets.

La Commission européenne a décidé d'encourager les agences de financement nationales à promouvoir le « **Joint Programming** » pour les années à venir. L'INSU doit se positionner dans quelques domaines clés. Cela passe par la participation à des **ERA-Nets** qui préparent les bases de futurs programmes. Pour participer à des « appels d'offres communs », il faut participer au financement. Au niveau français, l'ANR a donc un rôle à jouer. Certains projets très fédérateurs pourraient aboutir au financement d'**Articles 169**, qui permettent une forte contribution de la commission européenne, à la fin du FP7 ou dans le cadre du FP8. Les articles 169 doivent être approuvés par le parlement Européen et donc nécessitent un appui politique. Des thématiques telles que le chantier Méditerranée ou l'océan profond pourraient être considérées.

Le **chantier Méditerranée**, lancé par l'INSU en concertation avec les autres partenaires, est un exemple de projet qui nécessite une organisation au niveau national et une concertation avec les partenaires étrangers pour obtenir le soutien de la Commission européenne. Ce projet de chantier multidisciplinaire devrait regrouper les pays riverains et se décliner en différentes actions avec, pour les sciences de la Terre, l'initiative TERMEX.

Recommandations

Même si les sciences de la Terre ne font pas partie des thématiques prioritaires mises en avant dans le FP7, il existe de nombreuses opportunités à saisir, mais cela demande une meilleure organisation au niveau national.

Sur le plan stratégique :

- L'INSU doit s'appuyer sur une Direction Europe. Celle-ci devra développer une stratégie sur les thématiques à soutenir et informer les laboratoires des opportunités de financement.
- Il est indispensable de développer une meilleure concertation au niveau national avec les autres organismes et en liaison avec les représentants français dans les « advisory groups ». Ceci est indispensable pour accroître l'efficacité de lobbying de la France, en particulier pour jouer un rôle dans la rédaction des appels d'offres.
- Il est important de développer dans la mesure du possible une stratégie commune avec d'autres pays européens pour avoir plus de poids (cf. réunions franco-allemandes).
- Il est important que l'INSU se positionne dans les projets de « Joint Programming » qui vont se développer dans les années à venir.
- Il faut encourager les scientifiques français à s'inscrire sur les listes d'experts de la Commission européenne.
- Il faut encourager les scientifiques français à informer l'INSU de leurs projets dans le cadre de la Commission européenne. Pour que ce message passe, il est important que ceci soit perçu non comme une lourdeur administrative supplémentaire, mais comme une opportunité pour faire remonter des idées.

Pour aider les équipes à monter et gérer les projets :

- Le soutien pratique du CNRS (« Ingénieurs Europe ») doit être généralisé à tous les types de projet.
- Les UMR doivent être encouragées, dans la mesure du possible, à mutualiser les supports administratifs associés aux projets européens pour permettre une aide plus efficace aux coordinateurs.

■ Programmes de l'European Science Fondation (ESF)

A la différence de la Commission européenne, l'ESF n'a pas de budget propre pour financer ses activités. Elle joue un rôle de coordination et d'évaluation pour les agences de financement des pays européens qui en sont membres.

Au niveau européen, l'ESF joue un **rôle de lobbying** non négligeable. Le « *Marine Board* » et le « *Polar Board* » sont bien organisés et visibles. Il est important que l'INSU y soit présent pour faire passer ses messages.

Mais c'est surtout à travers ses divers **instruments de soutien** que l'ESF joue un rôle pour la communauté scientifique. Elle peut financer des ateliers, des réseaux. Mais surtout elle organise des évaluations communes au profit des agences de financement sur des thématiques sélectionnées, les projets retenus étant financés au niveau national.

Ce système a fonctionné en particulier au travers des EUROCORES. Dans la pratique, la mise en œuvre des EUROCORES s'est révélée assez complexe. D'une part, cet instrument n'a pas toujours été bien compris par les proposant : il n'y a pas d'argent supplémentaire, les projets sont financés sur les budgets nationaux, d'où la nécessité de coupler ces EUROCORES avec des programmes (ou des actions incitatives) existants. D'autre part, les priorités et le niveau de financement possible des différents pays varient, ce qui conduit parfois à bloquer des projets qui ont reçu une excellente évaluation parce que l'un des partenaires ne peut pas suivre. L'ESF est consciente de ces problèmes et souhaite s'adapter mieux à la demande de ses partenaires en proposant des instruments « à la carte ». Malgré ces inconvénients, les EUROCORES ont joué un rôle important pour la structuration de la communauté scientifique. La France a été ou est impliquée dans 4 projets : EuroMARGIN (terminé en 2007), EuroMARC (se termine en 2009), EuroMinSci (se termine en 2008), TOPO-Europe (se termine en 2010).

Dès 2009, on voit se profiler un grave problème de financement. Jusqu'à peu, la Commission européenne apportait une aide financière à l'ESF pour l'organisation des évaluations. Cette aide a été récemment supprimée, conduisant l'ESF à taxer ses partenaires de façon prohibitive (6,6k/an par sous-projet), de sorte que les frais de gestion dépassent parfois le budget consacré aux projets mêmes.

L'implication dans les Research networking programmes (RNP) reste à débattre.

Recommandations

- Utiliser l'ESF pour faire du lobbying à Bruxelles. Ceci nécessite une forte implication de l'INSU dans le Marine Board et le Polar Board.
- Evaluer le rapport intérêt/coût des prestations fournies par l'ESF.

Coordinations internationales

Des actions de coordination au niveau international sont menées dans le cadre de programmes sans financement pour les activités de recherche. Une cotisation modeste permet de soutenir un secrétariat et d'assurer la coordination et l'animation au niveau international : groupes de travail, ateliers, etc. C'est le cas des programmes IMAGES, InterRidge, ION (International Ocean Network), etc... Le rôle structurant de ce type d'initiative est très important et permet éventuellement le montage de projets internationaux (campagnes de carottage IMAGES par exemple).

La France participe également à des réseaux montés par des équipes de recherche qui mettent en commun des données au niveau global : GEOSCOPE, Observatoires Magnétiques, Observatoires gravimétriques, Réseau accélérométrique permanent (RAP), etc... Cette activité est très importante et doit absolument être soutenue. Mais il existe également des coordinations au niveau institutionnel.

La France peut faire entendre sa voix dans les Comités internationaux institutionnels, tels que l'ICSU (International Council for Science) qui regroupe toutes les Unions Internationales. Au niveau français, les Unions Internationales sont relayées par le COFUSI et ses comités nationaux (CNFG et CNFGG dans le domaine des sciences de la Terre) qui sont sous l'autorité de l'Académie des Sciences. Quel est leur rôle au niveau international, comment les représentants français sont-ils désignés, quel est le mécanisme pour faire passer des messages depuis la communauté, quelles sont les retombées pour la communauté nationale ? Les réponses à toutes ces questions ne sont pas évidentes et mériteraient d'être explicitées.

Recommandations

La participation de la France aux coordinations et réseaux internationaux doit être favorisée.

EUREKA

Dans les années à venir, l'implication des équipes françaises dans la recherche finalisée va certainement s'amplifier. Pour soutenir ces initiatives au niveau européen, EUREKA est un instrument qu'il est important de saisir. EUREKA est un réseau européen qui a été lancé pour soutenir les actions de recherche et développement finalisées, dans le but de soutenir la compétitivité des entreprises. EUREKA a différents « clusters » dont EUROGIA spécialisé dans les technologies

associées aux énergies nouvelles. Les projets sélectionnés, qui doivent regrouper des industriels et des scientifiques du monde académique, reçoivent un financement conjoint des industriels et des gouvernements, permettant de partager les risques. La deuxième phase d'EUROGIA, EUROGIA+, vient de démarrer. Les forages dans l'Arctique, la séquestration du CO₂, la production d'hydrogène, sont des sujets potentiels pour la communauté ST.

Recommandations

Explorer les possibilités offertes par EUROGIA+.

Conclusions

Les équipes françaises en sciences de la Terre ont une longue tradition de coopération au niveau européen et international. Cependant, pour accroître leur visibilité et leur efficacité, il est important que l'INSU développe une stratégie claire sur ses priorités, en concertation avec les autres organismes. La mise en place d'une direction Europe/international devrait faciliter la mise en oeuvre de cette stratégie. Elle devrait également accroître l'efficacité de la France pour faire passer des messages auprès de la Commission européenne.

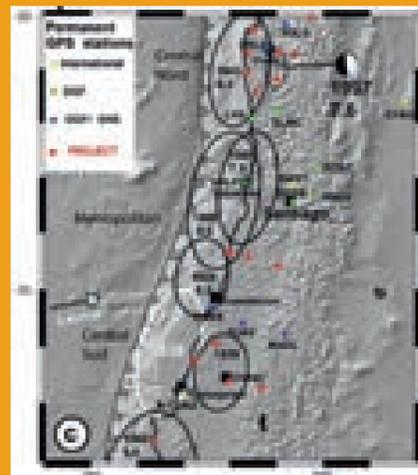
La participation de la France aux grandes infrastructures qui vont se mettre en place au niveau européen est un enjeu majeur pour les années qui viennent. Un relais au niveau national pour la participation financière est indispensable. Mais il faut souligner également que la recherche s'appuie sur des coopérations bilatérales ou des réseaux plus ou moins informels qu'il convient de continuer à encourager et soutenir.



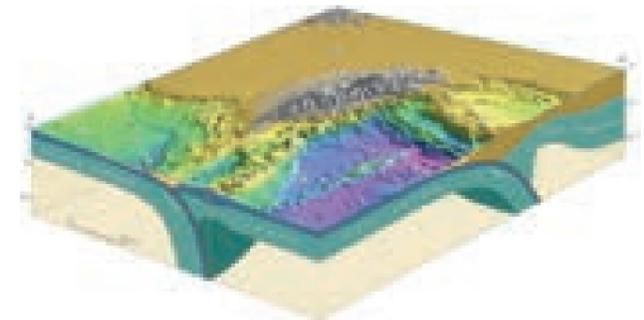
1. Observatoire de la mine en milieu fragile. Val D'Or Quebec, installation minière (en haut), exemple de destruction de la forêt boréale à la suite de la rupture d'une digue de bassin de rétention d'une mine de sulfure (en bas), (INSU).



2. Campagne de mesures dans le cadre du LIA Montessus de Ballore (Chili) d'une équipe de l'ENS Paris.



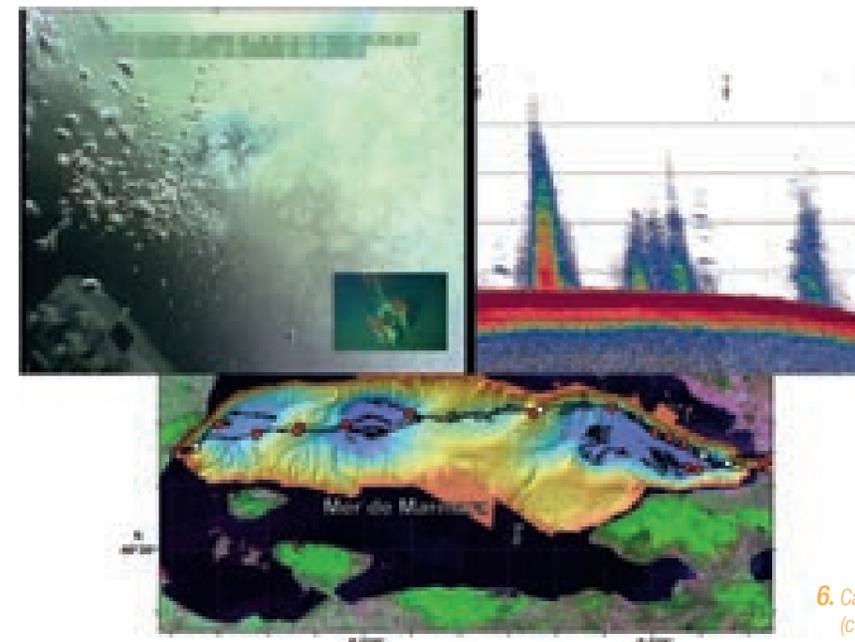
3. Principaux séismes (les ellipses représentent l'extension des zones de rupture, en blanc les lacunes sismiques actuelles) et localisation des stations GPS existantes ou en cours d'installation dans la région.



4. Coopération avec Taiwan (risques, environnement, géodynamiques), (Géosciences Montpellier).



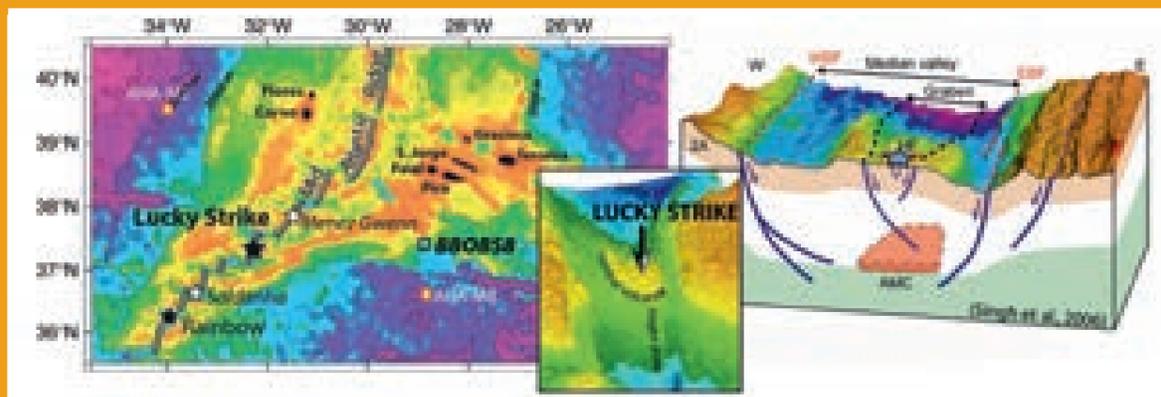
5. Vers un réseau d'observatoires fond de mer sur les marges européennes. ESONET European Network of Excellence (NoE). Lancé 1^{er} Mars 2007, pour 4 ans : 50 partenaires, 14 pays, 300 scientifiques & ingénieurs.



6. Campagnes en mer de Marmara (coopération avec la Turquie).



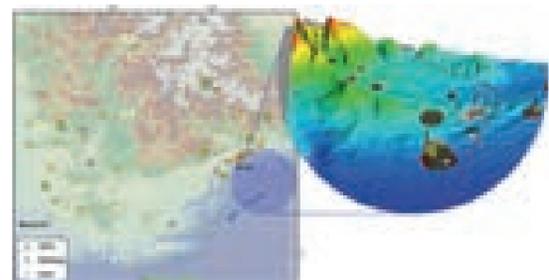
7. Campagnes en mer Ligure Géoazur.



8. Campagnes Momar.



9. Le pogrammes ICDP.



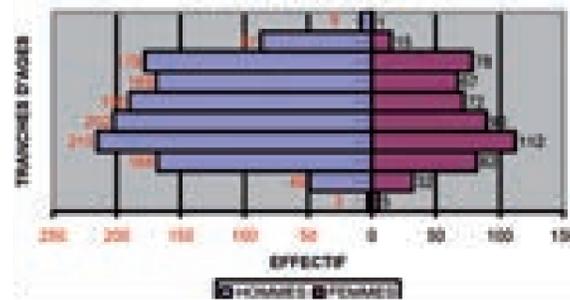
10. Projet AMPERE-KM3



11. IODP-ECORD, les navires océanographiques d'IODP Joides-Resolution et Chikyu. Les plate-formes et la carothèque mise en œuvre par ECORD.

Annexes

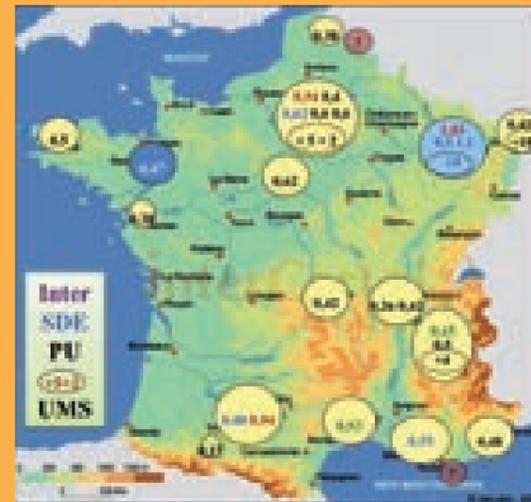
Les sciences de la Terre en chiffres



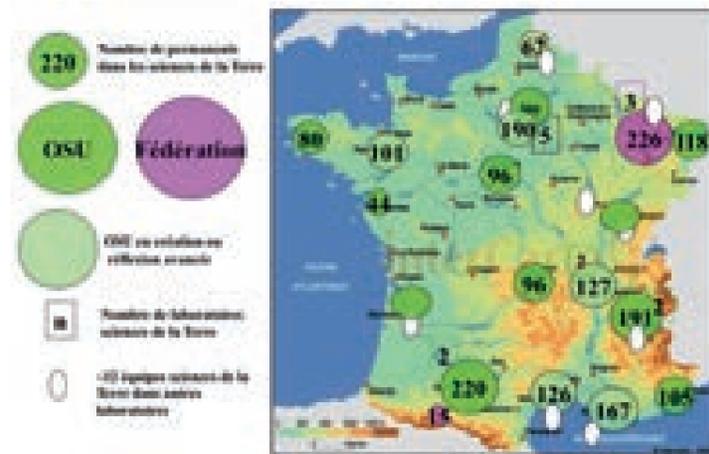
1. Pyramide des âges des effectifs permanents en sciences de la Terre au 31/12/2007.



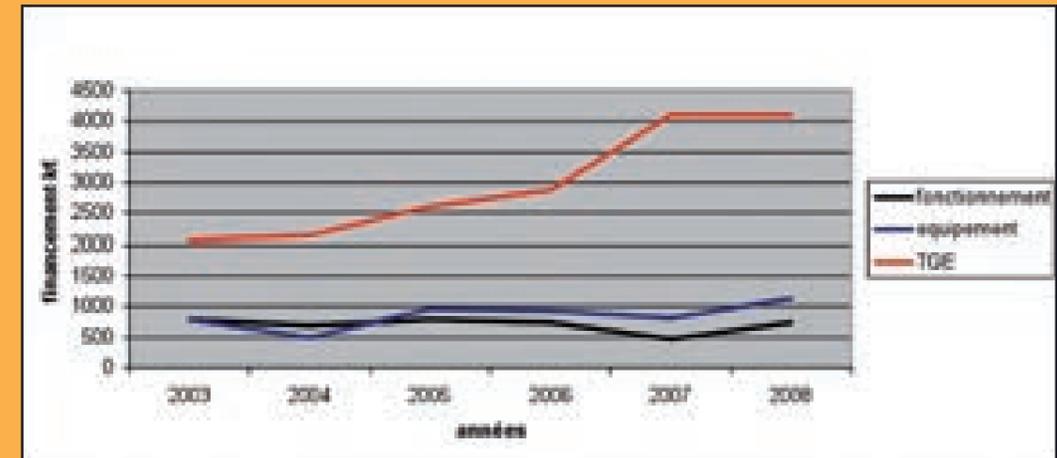
2. Chercheurs CNRS/enseignants chercheurs + autres (IRD+CNAP) chiffres 2006-2007.



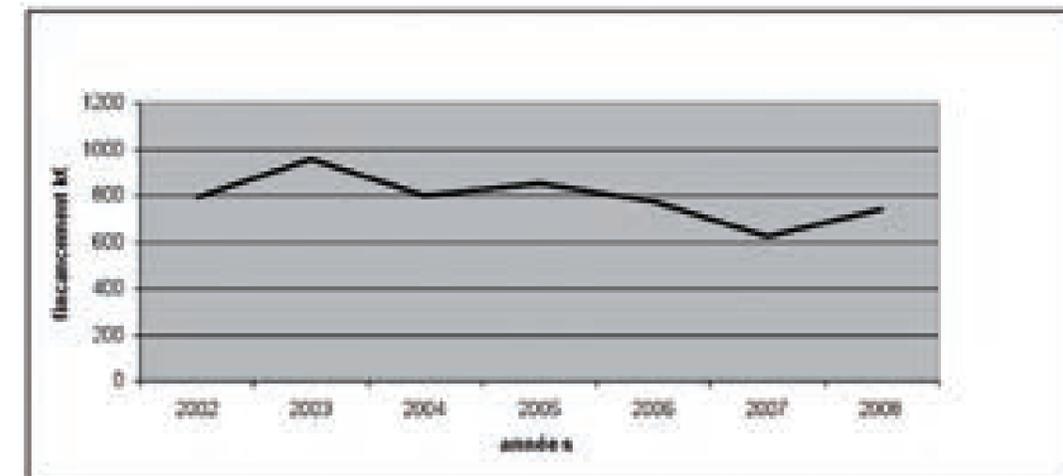
3. ITA/chercheurs = 0,56 (0,17-1,63) chiffres 2007.



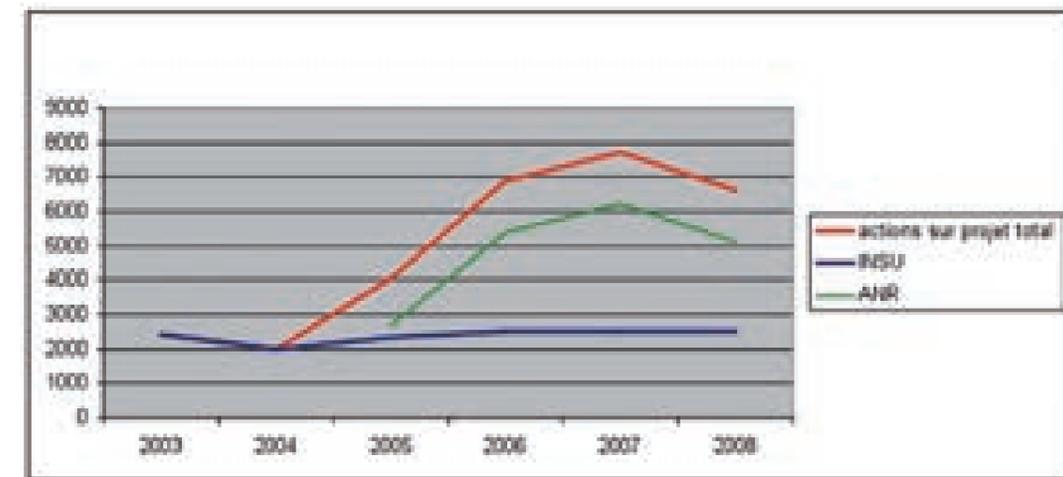
4. OSU et fédérations ayant des laboratoires et des équipes dans le domaine des sciences de la Terre.



5. Les instruments nationaux : 3 M€ en 2002 ; 6 M€ en 2008.



6. Services d'observation 2008. Effort d'intégration nationale et internationale des services d'observation, « Gravi-géodésie, Magnétisme, Sismologie, Volcanologie ».



7. Actions sur projet. Total sur 6 ans : 34 M€ (2,4 M€ en 2003 ; 7,6 M€ en 2008).

Instrument national : définition, principe général de gestion

■ Définition

Pourra être désigné par le label « Instrument national » et géré selon le protocole associé à ce label :

- Un instrument, ou une batterie d'instruments, représentant un investissement exceptionnel, dépassant la capacité habituelle d'un laboratoire isolé, à la fois en terme de mise de fonds initiale et en terme de soutien récurrent pour le fonctionnement et l'affectation de personnels.
- Cet instrument devra justifier d'un rayonnement scientifique particulièrement saillant au niveau national et international.
- Cet instrument devra permettre une mutualisation de capacité expérimentale au profit de l'ensemble de la communauté nationale, au-delà de la seule activité du laboratoire maître d'oeuvre.

Cette définition générale vise à couvrir et gérer de manière homogène des situations variées, allant d'appareils uniques de haute technicité, à des parcs d'appareils demandant à être déployés par des campagnes et utilisés en batterie, ou à des services d'analyses visant spécifiquement à concentrer et mutualiser des moyens analytiques pour économie d'échelle.

■ Labellisation

L'INSU assure, via une commission ad hoc et son conseil scientifique, la labellisation, le suivi et l'évaluation du « parc d'Instruments nationaux ». Le label est associé à un engagement de l'INSU, en général en partenariat avec d'autres tutelles, à participer à l'acquisition, ainsi qu'au soutien récurrent pour le fonctionnement de l'instrument et pour sa jouvence, sous réserve des résultats d'une évaluation périodique.

Le suivi et l'évaluation doivent également porter sur l'environnement humain autour des Instruments nationaux. A travers ce label, l'INSU se fixe donc également pour rôle de sensibiliser les différents partenaires institutionnels impliqués dans la tutelle d'un Instrument national afin d'affecter et de maintenir une équipe maîtresse d'œuvre clairement identifiée autour de cet instrument.

Instrument national : coût, tarification des prestations

■ Règles indicatives générales pour l'établissement du barème de tarification

Distinction de trois niveaux de tarification pour :

- Les partenaires fondateurs qui ont participé à l'achat de l'instrument ;
- Les demandeurs académiques (EPST, Universités) ;
- Les demandeurs « extérieurs » (EPIC, Privés, Etrangers).

Estimation des coûts de prestation. Le coût consolidé d'une prestation inclut :

- Les consommables directement liés à une analyse ;
- L'entretien, maintenance générale de l'instrument ;
- Le salaire des personnels ;
- L'amortissement.

Pour les partenaires fondateurs et pour les demandeurs académiques, l'amortissement doit être considéré comme pris en compte dans la politique de jouvence conduite par l'INSU. Ce poste doit par contre figurer dans la tarification externe.

Le coût consolidé, prenant en compte le temps des personnels impliqués dans la mise en œuvre de l'instrument, doit être évalué pour fixer la tarification « externe ».

L'importance grandissante des financements venant d'agences (ANR, Europe) soulève le problème d'une éventuelle distinction tarifaire selon l'origine des crédits, qui consisterait à appliquer le tarif « extérieur » à tout projet financé par ces agences, qui ne participent pas par ailleurs à l'acquisition et au soutien récurrent des instruments. Bien que logique dans son principe, une telle mesure apparaît ingérable en pratique, car elle nécessiterait des moyens de contrôle et vérification complètement hors de proportion, dans la mesure où les mêmes équipes demandeuses seraient amenées à demander des prestations sous tarifications différentes (programmes INSU versus programmes ANR, par exemple). Malgré tout à mettre en œuvre.

Mécanisme d'élaboration des programmes du 7^{ème} PCRD et organisation au niveau français

La Commission européenne :

- S'entoure d'experts indépendants pour définir le cadre stratégique des appels en accord avec les politiques communautaires ;
- Tient compte des projets du 6^{ème} PCRD en vue de leur éventuelle reconduction ou fusion avec d'autres projets dans le 7^{ème} PCRD. D'où l'importance des porteurs de projets et de leurs contacts avec les project officers ;
- Intègre (partiellement) les propositions émanant de la communauté des chercheurs qui lui parviennent via le Comité de programme.

Le Comité de programme

- Composition : 1 représentant national par état membre. Pour le programme Environnement, le représentant français est Michel Leblanc du MESR, secondé par un représentant du MEEDDATT.
- Fonction : négocier, amender et valider le programme de travail annuel avec la Commission européenne (5-6 réunions par an). Pour relayer l'avis des différents organismes de recherche qu'il représente, Michel Leblanc s'appuie sur le Groupe thématique nation.

Groupe thématique national (GTN)

- Composition : les chargés Europe communautaire des organismes (pour l'INSU : Elisabeth Kohler / Antoine Weexsteen) ainsi que des experts thématiques :

◆ 6.1.1. Changement climatique

Laurence EYMARD
Laurence.Eymard@locean-ipsl.upmc.fr

◆ 6.1.2. Environnement et Santé

Catherine GRILLOT - COURVALIN
ccouval@pasteur.fr

◆ 6.1.3. Risques naturels (Nouveau pilote)

Michel CARA
michel.cara@eost.u-strasbg.fr

◆ 6.2.1. Gestion durable des ressources

Yann MAUBRAS
yann.maubras@gis-ifb.org et <http://www.gis-ifb.org>
Eric FRANQUEVILLE
eric.franqueville@paris.inra.fr

◆ 6.2.2. Environnement marin

Antoine DOSDAT
adosdat@ifremer.fr

◆ 6.3.1. Eco technologies

Jean-Marc MERILLOT
jean-marc.merillot@ademe.fr

◆ 6.4.1. Observation de la Terre

Daniel VIDAL-MADJAR
daniel.vidal-madjar@ipsl.uvsq.fr
Pascale DELECLUSE
Pascale.Delecluse@meteo.fr

- Fonction : faire remonter les propositions des chercheurs et discuter le programme de travail. Ce dispositif doit être renforcé.

Réunions GTN franco-allemandes

Afin d'augmenter les chances d'acceptation de nouveaux sujets dans les programmes de travail 2010-2013, il existe une initiative spécifique au GTN Environnement : une concertation entre les membres du GTN français et leurs homologues allemands afin de défendre conjointement un certain nombre de propositions au niveau du comité de programmes. Contrairement à la communauté OA, la communauté ST y est peu représentée.

Sigles et acronymes

| | |
|--------------------|--|
| AERES | Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur |
| AFES | Association française pour l'étude des sols |
| AIH | American Institute of Hydrology |
| AMMA-CATCH | Analyse multidisciplinaire de la mousson africaine - Couplage de l'atmosphère tropicale et du cycle hydrologique |
| ANDRA | Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs |
| APBG | Association des professeurs de biologie et géologie |
| ARTEMIS | Accélérateur ARTEMIS pour la mesure du carbone 14 |
| ASTER | Accélérateur pour les sciences de la Terre au CREGE |
| AUV | Autonomous Underwater Vehicle |
| AVR | Automatique, vision et robotique |
| BCMT | Bureau central de magnétisme terrestre |
| BCSF | Bureau central sismologique français |
| BDI | Bourse de docteur ingénieur |
| BGI | Bureau gravimétrique international |
| BGS | Biogéosciences |
| BRGM | Bureau de recherches géologiques et minières |
| BV | Bureau veritas |
| CALIFF | Carothèque, lithothèque et forage français |
| CAPES | Certificat d'aptitude au professorat de l'enseignement du second degré |
| CBGA | Centre briançonnais de géologie alpine |
| CCFN | Conseil de coopération franco-néerlandais |
| CCSTI | Centre de culture scientifique, technique et industrielle |
| CDD | Contrat à durée déterminée |
| CE | Commission européenne |
| CEA | Commissariat à l'énergie atomique |
| CEMAGREF | Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement |
| CEREGE | Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement |
| CFH | Canada France Hawaii |
| CGG | Compagnie générale de géophysique |
| CHAMP | Challenging Minisatellite Payload |
| CHEMCAM:MSL | Chemistry & Camera : Mars Science Laboratory |
| CIFRE | Conventions industrielles de formation par la recherche |
| CMT | Core Molding Technologies |
| CNAP | Comité national des astronomes et physiciens |
| CNES | Centre national d'études spatiales |
| CNFG | Comité national français de géographie |
| CNRS | Centre national de la recherche scientifique |

| | |
|---------------------|--|
| COFUSI | Comité français des unions scientifiques internationales |
| COSMO SKYMED | Constellation of small Satellites for the Mediterranean basin Observation |
| CPER | Contrat plan état région |
| CPU | Conférence de présidents d'universités |
| CREGU | Centre de recherches sur la géologie des matières premières minérales |
| CRPG | Centre de recherches pétrographiques et géochimiques |
| CS | Conseil ou comité scientifique |
| DOM-ROM | Département d'outre-mer , Région d'outre-mer |
| DSA | Directeur scientifique adjoint |
| DSDP | Deep Sea Drilling Project |
| DYETI | Dynamique et évolution de la Terre interne |
| ECLIPSE | Environnement et climat du passé : histoire et évolution |
| ECORD | European Consortium for Ocean Research Drilling |
| EDD | Ecologie et développement durable |
| EJSM | Europa Jupiter System Mission |
| EMGS | Electromagnétique Geoservice |
| EMSO | European Multidisciplinary Seafloor Observatories |
| ENS | Ecole normale supérieure |
| ENSTA | Ecole nationale supérieure de technique avancée |
| EOST | Ecole et observatoire des sciences de la Terre |
| EPIC | Etablissement public à caractère industriel et commercial |
| EPOS | European Plate Observing System |
| EPOS-RESIF | Réseau sismologique et géodésique français |
| EPST | Etablissement public à caractère scientifique et technologique |
| ERANET | Réseau de financeurs publics européens |
| ERC | European Research Council |
| ESA | European Spatial Agency |
| ESF | European Science Foundation |
| ESFRI | European Strategy Forum on Research Infrastructures |
| ESONET | European Seafloor Observatory Network |
| ETH | Eidgenössische Technische Hochschule |
| EUREF | Reference Frame Subcommittee for Europe |
| EUROCORES | European Collaborative Research |
| EUROFLEET | Research Infrastructures project under the 7th Framework Programme of the European Commission. |
| EUROGIA | Eureka cluster for low carbon energy technologies |
| EUROMARGIN | EUROCORES Programme sur les marges continentales passives |
| EUROMINSCI | European Mineral Sciences Initiative |
| EUROSFaire | Service français d'accès à l'information sur la recherche en Europe |
| EVO/DEVO | Evolutionary Developmental Biology |
| FAGS | Federation of Astronomical and Geophysical Services |
| FIB | Faisceau d'ions focalisés |

| | |
|------------------|---|
| FOSFORE | Fédération de l'observation sismologique française |
| FP7 | The Seventh Framework Programme |
| G2R | Géologie et gestion des ressources |
| GALILEO | Projet européen de système de positionnement par satellites |
| GDR | Groupement de recherche |
| GDRI | Groupement de recherche international |
| GENCI | Grand équipement national de calcul Intensif |
| GEO | Group on Earth Observation |
| GES | Gaz à effet de serre |
| GFZ | GeoForschungs Zentrum |
| GFZ | Groupement français des zéolithes |
| GGOS | Global Geodetic Observing System |
| GGP | Global Geodynamics Project |
| GHYRAF | Gravity and HYdrology in AFrica |
| GIEC | Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat |
| GIS | Groupement d'intérêt scientifique |
| GMES | Global Monitoring for Environment and Security |
| GOCAD | Geological Objects Computer Aided Design |
| GOCE | Gravity Field and Steady-state Ocean Circulation Explorer |
| GOOS | Global Ocean Observing System |
| GPS | Global Positioning System |
| GRACE | Gravity Recovery and Climate Experiment |
| GT | Gigatesla |
| GTN | Groupement thématiques nationaux |
| GWR | Gravity Wave Retardation |
| H FACTEUR | H (John Hirsh) facteur |
| IAG | Association internationale de géodésie |
| ICDP | International Continental Scientific Drilling Program |
| IDRIS | Institut du développement et des ressources en informatique scientifique |
| IFP | Institut français du pétrole |
| IFREMER | Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer |
| IGN | Institut géographique national |
| IMAGES | International Marine Past Global Change Study |
| IMPMC | Institut de minéralogie et de physique des milieux condensés |
| INEE | Institut écologie et environnement |
| INPI | Institut national de la propriété industrielle |
| INRA | Institut national de la recherche agronomique |
| INSA | Institut national des sciences appliquées |
| INSAR | Interferometric Synthetic Aperture Radar |
| INST2I | Institut des sciences et technologies de l'information et de l'ingénierie |
| INSU | Institut national des sciences de l'Univers |

| | |
|--------------------|---|
| Intermagnet | International Real-time Magnetic Observatory Network |
| IODP | Integrated Ocean Drilling Program |
| ION | International Ocean Network |
| IPEV | Institut Paul-Emile Victor |
| IPGP | Institut de physique du globe de Paris |
| IPSL | Institut Pierre-Simon Laplace |
| IRD | Institut de recherche pour le développement |
| IRIS | Incorporated Research Institutions for Seismology |
| IRSN | Institut de recherche et de sûreté nucléaire |
| IST | Imagerie et structure de la Terre |
| ISTO | Institut des sciences de la Terre d'Orléans |
| IT | Intérieur de la Terre |
| ITA | Ingénieurs, techniciens, administratifs |
| KM3 | A km3-Scale neutrino telescope in the mediterranean sea |
| LCPC | Laboratoire central des ponts et chaussées |
| LDG | Laboratoire de détection et de géophysique |
| LDL | Laboratoire « Dynamique de la lithosphère » |
| LGCA | Laboratoire de géologie des chaînes alpines |
| LGGE | Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement |
| LGIT | Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique |
| LIA | Laboratoires internationaux associés |
| LMTG | Laboratoire des mécanismes et transferts en géologie |
| LMV | Laboratoire magmas et volcans |
| MAE | Ministère des affaires étrangères |
| MC-ICP-MS | Multi Collector-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry |
| MEEDAT | Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire |
| MESR | Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche |
| MNHN | Muséum national d'histoire naturelle |
| MOMAR | Monitoring the Mid Atlantic Ridge |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| OA | Océan-atmosphère |
| OCA | Observatoire de la côte d'azur |
| ODP | Ocean Drilling Program |
| OFM | Observatoire fond de mer |
| OMIV | Observatoire multidisciplinaire des instabilités de versants |
| OMP | Observatoire Midi-Pyrénées |
| OMS | Organisation mondiale de la santé |
| OPGC | Observatoire de physique du globe de Clermont Ferrand |
| ORE | Observatoire de recherche en environnement |
| ORFEUS | Observatories and Research Facilities for European Seismology |
| OSU | Observatoire des sciences de l'Univers |

| | |
|--------------------|---|
| OSUG | Observatoire des sciences de l'Univers de Grenoble |
| OVSIG | Observatoire volcanologique et sismologique de la Guadeloupe |
| PCN | Points de contacts nationaux |
| PCRD | Programme cadre de recherche et développement |
| PDA | Personal Digital Assistant |
| PEPIN | Programme d'équipement et politique d'instrumentation nationale |
| PI | Principal Investigator |
| PICS | Projet international de coopération scientifique |
| PNP | Programme national de planétologie |
| PNTS | Programme national Terre-soleil |
| PRES | Pôle de recherche et d'enseignement supérieur |
| RAP | Réseau accélérométrique permanent |
| REGAL | Réseau GPS permanent dans les Alpes occidentales |
| RENAG | Réseau national GPS permanent |
| RéNaSS | Réseau national de surveillance sismique |
| RENATER | Réseau national de télécommunications pour la technologie, l'enseignement et la recherche |
| RESIF | Réseau sismologique et géodésique français |
| RGP | Réseau GPS permanent |
| RISKNAT | Risques naturels |
| RLB | Réseau large bande |
| RMN | Raisonnement magnétique nucléaire |
| ROV | Remotely Operated Vehicle |
| SARM | Service d'analyse des roches et des minéraux |
| SECOHYA | Separation of CO2 by Hydrate Absorption |
| SIC | Surfaces et interfaces continentales |
| SIG | Service d'information géographique |
| SIGEOM | Système d'information géominière |
| SIIG | Service international des indices géomagnétiques |
| SIMS | Spectrométrie de masse à ionisation secondaire |
| ST | Sciences de la Terre |
| SWARM | Stabilised Weapon And Reconnaissance Mount |
| TGE | Très grands équipement |
| TGI | Très grandes infrastructures |
| TOPO-EUROPE | Topography Evolution in Europe |
| UMI | Unité mixte internationale |
| UMR | Unité mixte de recherche |
| UMS | Unité mixte de service |
| UNESCO | United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization |
| USGS | United State Geological Survey |
| USR | User (utilisateur) |
| WOVO | World Organization of Volcano Observatories |

Coordination éditoriale

Christiane Grappin (CNRS-INSU)

Réalisation et impression

Imprimé par CARACTERE sur du papier issu de forêts gérées durablement.



Conception

Trait de caractère(s)

Mars 2011

■ Légendes de la mosaïque de couverture



Séisme de Sumatra, mesures GPS du déplacement (Géologie de l'ENS/CNRS-INSU)



Expérience de géodynamo (LGIT/CNRS-INSU/Univ. J. Fourier)



Tomographie en coupe de la Terre (IPGP/CNRS-INSU/Paris Diderot)



Plate-forme mise en œuvre par ECORD-IODP

Prospective

Institut National des Sciences de l'Univers



INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS
Centre National de la Recherche Scientifique
3, rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16

<http://www.insu.cnrs.fr>