

18

TERRE ET PLANÈTES TELLURIQUES : STRUCTURE, HISTOIRE ET MODÈLES

Président de la section

Marc CHAUSSIDON

Membres de la section

Pascal BERNARD

Janne BLICHERT-TOFT

Mathilde CANNAT

Philippe CHARVIS

Jean-Yves COTTIN

Bruno DAVID

Marcel DROUET-MALEWITCH

Timothy DRUITT

Michel GRÉGOIRE

Gauthier HULOT

Édouard KAMINSKI

Élisabeth LALLIER-VERGES

David MAINPRICE

Isabelle MANIGHETTI

Daniel OHNENSTETTER

Maurice PAGEL

Rémy PICHON

Ginette SARACCO

Patrick SCHIBLER

Alain VAUCHEZ

PRÉAMBULE

La section 18 a été créée il y a deux ans à la suite de la modification du découpage des sections qui dans la mandature précédente couvraient les Sciences de la Terre au sens large et à la suite de la disparition de la section 13 « Physique et chimie de la Terre ». En simplifiant, la section 18 actuelle regroupe principalement les scientifiques de l'ancienne section 11 et environ 1/3 de scientifiques de l'ancienne section 13. Il en résulte que la section 18 couvre un très grand spectre de domaines scientifiques du département PU, de l'étude du noyau de la Terre (et des planètes telluriques) à celle de l'évolution de la vie sur Terre depuis son origine jusqu'au Cénozoïque à l'exclusion du quaternaire.

Plusieurs des domaines scientifiques rattachés à la section 18 sont en fait à l'interface avec les autres sections rattachées au département PU. C'est le cas par exemple de l'étude de la formation du système solaire et de la planétologie à l'interface avec la section 17 « Système solaire et univers lointain », d'une partie de l'étude des paléo-environnements à l'interface avec la section 19, d'une partie de l'étude des processus sédimentaires, d'érosion et d'évolution des reliefs à l'interface avec la section 20 « Surface continentale et interfaces » et d'une partie de la paléontologie à l'interface avec la

section 29 « Biodiversité, évolution et adaptations biologiques : des macromolécules aux communautés ».

Ce rapport doit être vu comme un complément aux différents colloques de prospective qui ont eu lieu en Sciences de la Terre ont eu lieu ces dernières années (réunion de bilan-prospective du Programme National de Planétologie PNP, colloques de prospective de programmes « Reliefs de la Terre », « 3F, Faille, Fluide, Flux » et « Structure, Evolution et Dynamique de l'Intérieur de la Terre » (SEDIT). Ces colloques assurent une consultation très large de la communauté et différente de ce que peut faire la section 18. Enfin, les sections 11 et 13 avaient au bout de quatre ans fait des rapports de prospective dont l'analyse et les recommandations nous semblent toujours parfaitement d'actualité.

Nous reprenons donc dans la suite beaucoup des points déjà mentionnés dans les rapports de conjoncture des sections 11 et 13 précédentes ou dans de précédents rapports de prospectives (programmes, colloques). Ceci ne doit bien sûr pas être considéré comme exhaustif.

Les sciences de la Terre ont connu ces dernières années des avancées importantes liées au développement de nouvelles techniques de modélisation et d'analyse depuis l'observation et l'expérimentation à l'échelle nanométrique ou micrométrique en laboratoire jusqu'à l'observation satellitaire. Ces développements permettent d'étudier les mêmes processus à différentes échelles spatiales et temporelles, ce qui est certainement la clef du succès pour le futur. Nous indiquons donc dans ce rapport les domaines où des efforts nous semblent nécessaires en termes d'équipement, que ce soit en modélisation, expérimentation, analyse ou observation. La section 18 est aussi particulièrement bien placée pour juger du vivier des jeunes chercheurs formés dans nos laboratoires et de l'activité des chercheurs confirmés. Dans ce registre il est indispensable dans le futur :

– i) de maintenir les flux d'embauches CR (et DR2) actuels pour essayer de faire revenir

en France une partie au moins de nos jeunes les plus brillants et ;

– ii) d'offrir plus de possibilités de passage DR1, beaucoup de nos collègues DR2, parmi les plus actifs, connaissant des blocages de carrière flagrants.

1 – COSMOCHIMIE, PLANÉTOLOGIE & TERRE PRIMITIVE

Ces domaines de recherche sont à l'interface entre la section 18 et la section 17 : en simplifiant, la majorité des planétologues est rattachée à la section 17 et la majorité des cosmochimistes-géologues est rattachée à la section 18. Les exercices de prospective dans ces domaines sont réalisés régulièrement, et d'une manière plus large que ce que peut faire la section 18, par notamment le Groupe Système Solaire du CNES et le conseil scientifique du Programme National de Planétologie (PNP, qui demande son renouvellement pour la période 2007-2011). Le colloque de septembre 2006 du PNP a montré le dynamisme de la communauté française qui occupe le devant de la scène internationale (missions Cassini-Huygens, Mars Express, analyses des échantillons cométaires STARDUST et de vent solaire GENESIS, analyse des météorites, etc.). Nous ne mettons donc l'accent ici que sur certains aspects, notamment ceux concernant l'analyse en laboratoire de la matière extra-terrestre, aspects qui concernent plus particulièrement la section 18.

L'étude de la formation et de l'évolution précoce du système solaire connaît une « révolution » comparable à celle connue il y a une trentaine d'années à la suite du retour sur Terre des échantillons lunaires et aux investissements très importants faits à cette occasion dans les laboratoires étudiant les météorites. La « révolution » actuelle tient à la conjonction de trois circonstances particulières :

– i) les progrès récents de techniques de caractérisation minéralogique, spectroscopique, chimique et isotopique des météorites ;

– ii) les progrès des techniques d'observation astrophysique du milieu interstellaire ou des étoiles jeunes en formation avec leur disque d'accrétion et ;

– iii) les premiers retours d'échantillons extraterrestres depuis les missions Apollo. Les pistes de recherche actuelles les plus prometteuses concernent l'étude de toutes les transformations chimiques, minéralogiques et isotopiques qui accompagnent la formation des premiers solides et des premières planètes. Une même « révolution » est en train de se produire dans l'étude de la Terre primitive (différenciation précoce, recherches de traces de vie anciennes, enregistrements sédimentaires archéens, etc.).

La communauté française concernée par l'étude de la matière extra-terrestre s'est structurée ces dernières années grâce à l'aide notamment de l'INSU et du CNES. L'INSU a créé une plateforme d'analyse de la matière extra-terrestre qui regroupe pour l'instant des instruments d'analyse isotopique (sondes ioniques nanosims et ims 1270, ICPMS multicollektion et TIMS) et d'analyse minéralogique (Raman) auxquels devrait s'ajouter la microscopie électronique à transmission du laboratoire de Lille. Il faut souligner ici l'importance capitale que revêt la performance analytique pour l'étude de la matière extra-terrestre. Certains de ces instruments, présentant des capacités d'analyse inégalées grâce aux développements effectués ces dernières années, ne sont présents qu'en un nombre très limité d'exemplaires de par le monde et leur regroupement à travers une même structure est unique. Les laboratoires français sont actuellement au meilleur niveau international, mais cet effort doit absolument être poursuivi. Grâce à un financement du CNES et du PNP, plusieurs laboratoires (Paris, Orsay, Lille, Grenoble, Lyon, Nancy) se sont organisés à l'intérieur du consortium Stardust pour l'étude des grains cométaires et pour constituer une force capable de rivaliser dans les appels d'offres futurs avec les meilleurs laboratoires améri-

cains. Enfin, le PNP a joué un rôle très important ces dernières années pour la communauté, en permettant un financement pour de nombreux projets et en rapprochant les communautés astrophysiques et sciences de la Terre. Plusieurs écoles d'hiver et d'été transverses entre astronomie-astrophysique et sciences de la Terre ont aussi été soutenues par l'INSU et le PNP. Ces efforts doivent être continués. De plus, plusieurs des thématiques abordées à partir de l'étude de la matière extra-terrestre semblent à priori devoir être concernées par le futur programme Origines.

2 – PHYSIQUE DES MINÉRAUX & EXPÉRIMENTATION HAUTE PRESSION

Les recherches en physique des minéraux sont essentielles pour l'interprétation des données d'observation issues d'autres disciplines des sciences de la Terre, comme la géodynamique, la sismologie, la géochimie, la pétrologie, le géomagnétisme et les sciences planétaires au sens large. Le domaine de la minéralogie des phases haute pression est fondamentalement multidisciplinaire car il emploie des concepts et des techniques de la chimie, de la physique, des sciences des matériaux, de la biologie et de l'informatique. Les travaux récents ont montré l'importance de l'étude :

– i) de l'incorporation de l'eau, du carbone et d'autres volatiles dans les phases normalement anhydres à haute pression et l'influence de ces volatils sur les propriétés physiques (déformation, diffusion) et sur les processus profonds de la Terre (transformations de phase) et ;

– ii) de la rhéologie des minéraux aux conditions de la zone de transition du manteau et du manteau inférieur ainsi que des vitesses

acoustiques et des équations d'état des solides à haute pression et haute température.

Dans le domaine de l'expérimentation et de la modélisation des objets en conditions extrêmes, on peut définir deux grands champs de développements méthodologiques qui permettront des avancées conceptuelles majeures :

– i) l'utilisation du rayonnement synchrotron et ;

– ii) l'utilisation des méthodes de modélisation *ab initio* ;

et de dynamique moléculaire :

– i) La communauté des Sciences de la Terre est très attentive aux évolutions futures des synchrotrons et participe activement à la définition des nouveaux programmes et équipements (lasers à électrons). Des techniques spectroscopiques variées basées sur l'utilisation de rayonnements lumineux ou proches sont développées, notamment sur les synchrotrons de Grenoble (ESRF) ou Saclay (SOLEIL), pour la caractérisation d'échantillons complexes (minéraux/microorganismes) et dans des conditions extrêmes. Le développement d'enceintes de confinement (pression, température, déformation, stérilité, quarantaine, mini-P4) permettant l'utilisation des techniques *in situ* est un corollaire nécessaire qui doit continuer à être soutenu activement ;

– ii) La modélisation à l'échelle atomique est fondamentale pour quantifier les paramètres physiques et chimiques qui ne sont pas directement mesurables par des expériences conventionnelles (par exemple, les énergies des défauts ponctuels, dislocations ou des interfaces). En ce sens, elle apporte une aide unique pour l'interprétation des données spectroscopiques. Les champs d'applications de ces méthodes restent par excellence le manteau très profond et son interface avec le noyau, les zones de subduction et la convection dans le manteau terrestre mais aussi les interactions solide-liquide-vapeur à haute température pour la formation et l'évolution des objets primitifs de la nébuleuse solaire.

Notre communauté a un retard important dans ce secteur avec seulement quelques chercheurs isolés à Paris, Lille, Clermont-Ferrand et Toulouse travaillant sur ces méthodes. L'effort doit être porté sur une interaction forte avec les physiciens et les chimistes dans le but d'étendre les méthodes existantes aux conditions de l'intérieur de la Terre (haute température, haute pression).

Les projets d'équipement mi-lourd dans le domaine avec un intérêt multidisciplinaire et national sont les suivants :

1. des presses couplées au rayonnement synchrotron. Il y a PINS sur Soleil mais aussi une presse gros volume qui va être installée sur la ligne ID27 à l'ESRF. La France et l'Europe doivent rattraper un certain retard dans ce domaine et le CNRS-Sciences de la Terre doit s'investir ;

2. Un microscope électronique à balayage dédié à la cartographie cristallographique haute résolution (EBSD) et à la déformation *in situ* à haute température. Ce MEB doit être équipé avec d'une chambre de grande taille à pression variable et d'un canon à émission de champ (FEG), nécessaire pour attendre la haute résolution spatiale (50 nm) qui permet de réaliser des cartographies cristallographiques de grande qualité et de caractériser la texture d'agrégats à grains ultrafins (échantillons expérimentaux, météorites choquées, ultramylonites, roches de failles sismogéniques fortement endommagées). La pression variable permettra de travailler sur des échantillons hydratés spécifiques aux Sciences de la Terre et l'environnement ;

3. Un FIB (focused ion beam) couplés à un MEB, permettant de réaliser des sections extra-minces d'échantillons géologiques avec une localisation précise. L'arrivée de cet appareil issu de la nano-physique dans les Sciences de la Terre me semble essentielle à la fois pour la minéralogie physique mais aussi pour la géochimie (ablation spécifique, préparations pour la nanosims permettant une caractérisation conjointe MET/nanosims ou MET/ICP-MS). Il s'agit d'un investissement important : un FIB de génération correcte coûte plus de

1.4 Meuros., mais qui correspond à une priorité absolue dans cette communauté (y compris pour préparer certains échantillons synchrotron), mais ce type d'investissement n'a pas de sens s'il n'est pas accompagné de postes ;

4. des MET de nouvelle génération seront disponibles aux labos non développeurs vers 2007-2008. Avec un monochromateur en colonne, la résolution en pertes d'énergie en particulier gagne un facteur 10. Cela permettra par exemple d'étudier des degrés d'oxydation avec une résolution inégalée dans des échantillons géologiques extrêmes, domaine encore inabordable. En outre, les MET à résolutions spatiales très fortes (corrections d'aberration sphérique) disponibles au même moment permettront des études directes sur les nanophasés environnementales.

3 – GÉOCHRONOLOGIE

Un calage géochronologique précis devient un pré requis à tous les efforts de reconstruction géodynamique et de modélisation des processus géologiques fondamentaux. Le futur de la géochronologie a été discuté au cours de tous les colloques de prospective organisés ces dernières années et le développement de la géochronologie concerne évidemment une communauté scientifique bien plus large (sections 19 et 20) que celle représentée par la section 18. Pour les datations par ^{14}C ou ^{10}Be , des instruments nationaux viennent d'être installés.

Les deux méthodes les plus largement utilisées sont les datations U/Pb et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. À ces méthodes s'ajoute le développement de la géochronologie U/He associé à la thermochronologie traces de fission, techniques qui sont en train de devenir des outils fondamentaux en tectonique-géomorphologie au sens large. Les grands enjeux sont notamment de

– i) de pouvoir dater des processus rapides (e.g. être capable d'utiliser les équilibres locaux, voire les déséquilibres pour remonter à la cinétique de processus) ;

– ii) dater des objets très petits ou très jeunes (plus jeunes que 100 ka) ;

– iii) dater les processus de surface et ;

– iv) mieux comprendre le fonctionnement des chronomètres (température de fermeture, diffusion, etc.).

Les laboratoires français de géochronologie sont tirillés entre deux contraintes : d'une part réaliser des développements technologiques et scientifiques originaux et d'autre part assurer un accès sur une base plus ou moins de routine à la communauté qui a besoin de datations de tous types. Des recrutements ont été effectués régulièrement dans la plupart des laboratoires de géochronologie, qui ont des pyramides d'âge comparables à celles des laboratoires de géochimie isotopique par exemple, mais des problèmes de jouvence des installations analytiques vont se faire sentir dans le futur proche. Il n'y a pas actuellement de schéma pour organiser cette jouvence et l'acquisition de matériel neuf. Au cours des années précédentes plusieurs pistes ont été évoquées par la CSST, à la suite du colloque de prospective de Vulcania entre autres, pour trouver un moyen de faciliter l'accès de la communauté «des géologues» à la géochronologie tout en garantissant aux laboratoires de géochronologie des possibilités de développements instrumentaux et analytiques (financements récurrents, etc.). Les pistes envisagées tournaient autour de la création d'un service national de géochronologie qui reposerait sur quelques laboratoires ou alors le rassemblement en réseau de certains laboratoires. Aucune de ces pistes n'a pour l'instant abouti.

4 – MICRO-ANALYSE EN SCIENCES DE LA TERRE

L'importance fondamentale pour le futur des Sciences de la Terre du développement des techniques de micro-observation et de micro-analyse a déjà été soulignée dans les docu-

ments de prospective des sections précédentes 11 et 13. La communauté s'est récemment doté de nouveaux instruments, ligne de lumière qui utilise le rayonnement synchrotron ou sonde ionique nanosims par exemple. Il est cependant important ici d'insister sur le fait que ces efforts doivent être poursuivis. Le développement de ces techniques est vital dans de nombreux domaines tels que l'étude :

- i) des interactions minéral-vivant ;
- ii) des minéraux finement divisés ;
- iii) de la dynamique des systèmes magmatiques ;
- iv) des charges expérimentales haute pression ;
- v) des météorites. Plusieurs références à l'utilisation de ces techniques sont faites dans la suite, en géochronologie, expérimentation, cosmochimie et Terre primitive.

Parmi les pistes de développement futures on peut citer les techniques de préparation de nano-échantillons par FIB, l'analyse isotopique et la datation U/Pb par couplage laser femtoseconde et MCICPMS, l'analyse isotopique à haute résolution de masse par sonde ionique. Ces techniques sont compliquées à mettre en œuvre et sont des équipements lourds. Il convient donc de veiller à ce que leur installation se fasse selon un schéma (consortium avec des instruments déjà existants, service national) qui garantisse les moyens humains et financiers qui les accompagnent et qui garantisse le retour scientifique ainsi que l'accès de la communauté.

5 – PALÉONTOLOGIE

La paléontologie est en position d'interface entre les départements EDD et MPPU (pour sa partie Planète-Univers). Ce qui touche aux fossiles, en tant qu'êtres vivants, à leur évolution, à leur place et à leur rôle dans les écosystèmes anciens relève du département

EDD et de la section 29 du Comité National. Ce qui concerne la position des fossiles dans les systèmes sédimentaires et leur contribution à l'élucidation de phénomènes géologiques trouve sa place dans MPPU et la section 18. Cette distinction n'est cependant pas totalement tranchée et il existe une véritable zone d'interface entre les deux départements. Les réflexions qui suivent sont pour partie inspirées du travail du comité de réflexion sur la structuration de la paléontologie au plan national, comité mi en place par l'INSU en 2005.

La paléontologie est une discipline majeure des Sciences de la Terre et des Sciences de la Vie, traitant de l'histoire et de l'évolution du vivant, depuis la vie primitive jusqu'à la biodiversité actuelle. Une structuration existe au niveau national avec peu de paléontologues isolés. Cette discipline est très active avec par exemple beaucoup de candidats au concours de chargé de recherches en section 18.

La théorie de l'évolution occupe une place centrale en paléontologie. Les fossiles, même perdus dans un lointain passé, restent des objets biologiques et la manière dont ils réagissent face aux contingences externes (climatiques, géotectoniques, sédimentaires, etc.), la manière dont une coquille intègre tel ou tel élément dans son réseau cristallin, etc. ont toujours à voir avec l'évolution biologique. Le tropisme de la paléontologie est donc vers les Sciences de la Vie, mais les paléontologistes ne doivent pas pour autant s'isoler de la communauté Sciences de la Planète. D'une manière générale, la paléontologie doit veiller à développer des interactions explicites avec d'autres disciplines telles que la géologie sédimentaire, la géochimie, la biologie ou la génétique. Trois pistes essentielles pour des domaines d'étude futurs peuvent être mentionnées :

- i) vie primitive et radiations évolutives anciennes (biodiversité, sa mise en place et son maintien à différentes échelles spatio-temporelles) ;
- ii) « Lagerstätten » (gisements à conservations exceptionnelles) et histoire de la biodiversité (l'évaluation des fluctuations de la biodiversité à l'échelle du temps géologique) et ;

– iii) paléontologie, évolution et développement : l'analyse de la complexité biologique (renforcer l'interface paléontologie-biologie sur l'axe évolution et développement).

6 – ARCHIVES SÉDIMENTAIRES

L'étude des bassins sédimentaires est un domaine d'études qui se situe typiquement à la marge des autres sections du comité national (19, 20, 29) car elle concerne des géo-systèmes variés sur des époques de temps très larges. Plusieurs challenges s'ouvrent aujourd'hui à la discipline.

– i) l'étude de la préservation et de la signification des sédiments en termes d'évolution des paysages. Le mode de préservation et la représentativité des sédiments préservés dans les archives de la Terre sont deux questions primordiales à lever si l'on veut analyser correctement la succession des milieux de sédimentation, leur implication en termes de paléo-environnements et au-delà leurs interactions avec les circulations de fluides. En effet, leur modification physico-chimique et texturale au cours de l'enfouissement doit être analysée parallèlement si l'on veut éviter le biais récurrent d'interpréter toute évolution diagénétique en variation paléo-environnementale. Pour répondre à ces questions, il est nécessaire de développer l'étude des mécanismes de fossilisation des figures sédimentaires et des surfaces sédimentaires remarquables (discontinuités sédimentaires et tectoniques). Cette étude passe aussi par l'analyse des mécanismes de sédimentation actuels et le développement des modélisations analogique et numérique qui seules, permettront de quantifier les phénomènes. S'agissant des évolutions diagénétiques au sein des bassins, les variations de la porosité à toutes les échelles peuvent être maintenant quantifiées, elles doivent prendre en compte les discontinuités ;

– ii) l'obtention d'âges. La quantification des durées des phénomènes qu'ils soient sédimentologiques et/ou diagénétiques, doit être appréhendée le plus finement possible. De fait, l'obtention d'âges à haute résolution reste encore un des enjeux principaux du domaine pour les années à venir. L'utilisation des isotopes cosmogéniques et de la thermoluminescence des quartz doit être développée pour dater la mise en place des séries azoïques et/ou continentales. Des progrès méthodologiques récents permettent d'envisager la datation précise des événements diagénétiques et en conséquence de les relier à des causes géologiques majeures comme, par exemple, les variations de compositions isotopiques et la diagénèse « ponctuée ;

– iii) l'analyse des processus sédimentaires et diagénétiques : rôle de la vie s.l. (activité microbienne, biominéralisation, organominéralisation, minéraux diagénétiques : argiles, carbonates, sulfures, oxydes, phosphates, etc.). Une meilleure prise en compte de l'activité biologique, de la production et préservation de matières organiques naturelles et de leur rôle sur la sédimentogenèse, comme les biominéralisations (coquilles, os) et les organominéralisations (encroûtements, minéraux diagénétiques, etc.) permettra de mieux interpréter leurs influences sur la stabilité des minéraux et sur les processus de fossilisation. En effet, les interactions de la MO avec les carbonates, qu'ils soient biologiques, biochimiques, microbiens, pélagiques, néritiques, récifaux ou diagénétiques, mais également les argiles, ne sont pas encore toutes élucidées et leurs études devraient améliorer les estimations des flux et des bilans de carbone à l'échelle globale. Par ailleurs, il est clair que l'étude des processus de bio et organo-minéralisation sur Terre reste le passage obligé pour interpréter les données d'exobiologie (météorites, missions martiennes) ;

– iv) l'analyse 3D des bassins sédimentaires d'avant-pays. La prospection géophysique des bassins sédimentaires développée dans un but de soutien à la prospection pétrolière, trouve aujourd'hui un regain dans l'étude en 3D des volumes érodés permettant de réaliser des cal-

culs de flux, des bilans et des modèles d'érosion. Ces modèles pourront alors être placés en parallèle de modèles analogiques et numériques de surrection et de déformation ayant engendré les apports détritiques et rendre ainsi possible le décryptage des interactions et rétroactions entre « Mise en place des chaînes de montagne, Climat et Érosion » ;

– v) l'étude de la déformation de la lithosphère à grande longueur d'onde est également un enjeu important de la discipline. La mise en évidence récente de mouvements verticaux au sein de la croûte (flambage lithosphérique par exemple, etc.) éclaire d'une nouvelle manière les relations entre érosion, altération et sédimentation. À ce titre, le bouclier africain semble un très bon exemple pour comprendre ces interactions.

7 – RESSOURCES

Le domaine couvert par le thème « ressources » répond à la fois à :

– i) des enjeux de société (quel est l'avenir de l'alimentation en produits de base de la civilisation industrielle « *les ressources pour demain* » et comment les exploiter proprement « *développement durable* ») et à ;

– ii) des défis scientifiques majeurs autour de la recherche de nouveaux modèles conceptuels pour la genèse, l'exploration et l'exploitation des ressources.

Pour répondre à ces défis/enjeux il faut résoudre des questions qui se formulent différemment en fonction des degrés d'avancement des connaissances/pratiques dans les différents domaines. S'agissant des métaux et des géomatériaux, les questions fondamentales sont :

– i) quels sont les processus de fractionnement à l'origine des hyper-accumulations métalliques et ;

– ii) comment caractériser les grands systèmes métallogéniques ?

Les questions « sociétales » associées sont :

– i) où sont les métaux et les géo-matériaux pour l'avenir ;

– ii) comment exploiter « proprement » et ;

– iii) comment réhabiliter les sites pollués en métaux toxiques, et utiliser des matériaux autrefois considérés comme des « déchets » comme des ressources ?

S'agissant des énergies fossiles non renouvelables (pétrole et gaz) la question fondamentale est de quantifier les premières étapes du fonctionnement des systèmes pétroliers ? Les questions « sociétales » associées sont :

– i) où sont les réserves en hydrocarbures de demain (= où sont les réservoirs) ;

– ii) comment exploiter les hydrocarbures lourds et améliorer leur récupération et ;

– iii) comment exploiter proprement (développement durable, stockage d'H₂S par exemple en domaine pétrolier).

Le GDR Transmet a fédéré ces dernières années les recherches autour de ses thématiques avec des résultats marquants notamment autour de l'analyse in situ des paléofluides, l'étude expérimentale de la spéciation des métaux et de leur partage entre phase fluide et vapeur. Ses résultats soulignent l'importance dans les recherches futures des questions concernant :

– i) la nature des processus à l'origine des concentrations en métaux et ;

– ii) l'efficacité des processus de transport et de piégeage.

Enfin, il semble évident que les efforts de recherche autour du stockage souterrain de gaz et de déchets nucléaires devront être amplifiés dans le futur. Le GDR FORPRO a mené des études originales sur les sites de faible perméabilité pour le stockage des déchets nucléaires et le site de Bure (Meuse – Haute Marne) qui constitue un des plus importants chantiers en Sciences de la Terre et de l'ingénieur de ce début de siècle. Ces forma-

tions peu perméables sont également très importantes pour l'intégrité du stockage du CO₂ ou des déchets ultimes. Il est donc nécessaire de contribuer à l'exploitation scientifique du potentiel exceptionnel du site de Bure.

8 – GÉODYNAMIQUE INTERNE

La géodynamique interne englobe un ensemble de problématiques centrales en Sciences de la Terre et garde une place particulière au carrefour de différentes spécialités, notamment pétrologie, physique des hautes pressions, imagerie géophysique, chimie des éléments traces, majeurs et rapports isotopique. Toutefois, au-delà d'être un « alibi » pour les projets d'autres disciplines des Sciences de la Terre, la géodynamique repose sur des modélisations dont le développement nécessite certains efforts particuliers. On mentionnera ici quelques axes majeurs des recherches actuelles et probablement futures en géodynamique interne et des points sur lesquelles des actions fortes de la communauté seraient souhaitables.

La « nouvelle frontière » de la géodynamique interne est sans nul doute la thématique de la Terre primitive : quel est le matériel constitutif de la planète et comment ses caractéristiques chimiques ont-elles influencé la dynamique primitive ; ont-elles encore un effet sur la convection actuelle (manteau inférieur plus primitif, hétérogénéités dispersées dans un manteau non encore à l'équilibre du point de vue dynamique, etc.) ? Le démarrage de la tectonique des plaques et en corollaire les caractéristiques de la rhéologie qui l'ont permise reste une des questions majeures. La compréhension du mode de différenciation de la planète lors de la ségrégation du noyau, à partir ou non d'un océan magmatique, et ses conséquences pour la structure initiale du manteau et son évolution, est également incontournable. L'apport de la planétologie comparée

sera important pour répondre à ces questions ainsi qu'à celles plus en amont posées par le démarrage de la geodynamo et plus généralement de la physique des dynamos planétaires. Les continents, leur apparition, leur influence sur la convection et le sens de l'archive géologique qu'ils représentent, sont de nouveau d'actualité. Ces différents thèmes de recherche requièrent des efforts pluridisciplinaires : ils nécessitent le développement de modélisations originales aptes à défricher des questions dont la physique n'est pas forcément bien connue, et motivées par des jeux de données probablement non tout à fait adaptés. Des échanges importants seront nécessaires en direction de la physique et en direction de la géochimie pour progresser dans ces deux directions.

Au-delà de la thématique particulière de la Terre primitive, on retrouve en géodynamique un certain nombre de questions qui ont été soulevées assez précocement dans l'histoire de cette discipline, mais qui n'ont pour l'instant pas trouvé de réponse satisfaisante et sur lesquels il est nécessaire d'insister ici. La caractérisation de la rhéologie du manteau reste une controverse : les modèles de convection ne peuvent reproduire la dynamique actuelle du globe qu'en utilisant des rhéologies ad hoc (endommagement, pseudo plastique) qui ne correspondent pas aux modes de déformation déterminés sur les échantillons. Il est donc indispensable de mieux comprendre et modéliser le comportement effectif des matériaux à partir de celui des cristaux constitutifs, et le passage d'échelle (temps, espace) du laboratoire au manteau. Le développement d'expériences analogiques utilisant des matériaux avec des rhéologies originales devrait contribuer à cette réflexion. Il est aussi essentiel d'intensifier les transferts entre Sciences des Matériaux et Sciences de la Terre car de nombreux problèmes sont communs aux deux domaines.

Comprendre la dynamique actuelle de la Terre nécessite de bien la contraindre. Les modèles tomographiques par exemple nous renseignent mal sur le manteau inférieur alors qu'il est le siège des super-dômes dont le rôle dans la convection a été récemment souligné.

La question du lien entre les mouvements des plaques et ceux du manteau supérieur (degré de couplage) pourrait être résolue en développant les méthodes de tomographie sismique anisotrope et en couplant ces méthodes avec des études tectoniques des déformations crustales.

Un renouvellement de l'imagerie sismologique est en train d'émerger grâce aux nouvelles stratégies de déploiement des réseaux sismologiques et les capacités d'enregistrement largement accrues en termes de durée et de qualité. Des techniques nouvelles d'extraction de l'information, à la fois à partir des séismes et des enregistrements continus de l'agitation microsismique ont été récemment proposées et leur portée doit encore être investiguée. Ces éléments offrent de nouvelles possibilités pour l'imagerie des structures géologiques à différentes échelles. En particulier la résolution de l'imagerie sismologique tend à se rapprocher de l'échelle pertinente pour la tectonique et la compréhension des relations entre dynamique du manteau et expressions de surface.

Les grandes questions qui se posent sont entre autres :

– i) quel est le rôle du manteau lithosphérique dans les déformations continentales ?

– ii) quelles sont les interactions mécaniques entre lithosphère et asthénosphère (couplage avec la convection ? etc.) ?

– iii) comment se transmettent les contraintes et la déformation dans les domaines anormalement chauds (hauts plateaux, grands domaines en extension, orogènes anciens, etc.) ?

Enfin, l'interprétation du message chimique des laves de dorsales et de point chaud nécessite de mieux comprendre la physique de la circulation des magmas et leur interaction avec la convection (changement de densité, de viscosité).

9 – DYNAMIQUE DU NOYAU

L'étude du noyau de la Terre et des phénomènes dynamiques qui s'y produisent relève également de la Géodynamique Interne. Plusieurs particularités du noyau en font cependant un objet d'étude plus spécifique autour duquel de nombreux projets se sont développés avec succès au cours des dernières années, ouvrant de nombreuses perspectives. Rappelons tout d'abord que le noyau, et en son centre la graine solide, restent des régions dont les caractéristiques (composition, propriétés physiques) restent encore très mal connues. Si des progrès importants ont été faits ces dernières années, grâce notamment à l'expérimentation haute pression, qui a permis de mettre en évidence les phases probables du Fer constituant la graine, et à la sismologie, qui a permis de mettre en évidence une structure au sein de cette graine (et peut-être même une rotation lente de cette dernière), la nature précise des alliages constituant le noyau et la graine, et la présence éventuelles d'éléments radioactifs en leur sein, restent des questions largement ouvertes. Or la réponse à ces questions conditionne de manière importante l'interprétation que l'on peut donner de la dynamique du noyau à toutes les échelles de temps, depuis l'échelle de temps géologique (histoire thermique du noyau, naissance et croissance de la graine), jusqu'aux échelles les plus courtes (modes gravitationnels), en passant par des échelles de temps intermédiaires importantes pour la question de la génération du champ magnétique terrestre. Des progrès considérables ont par ailleurs récemment été faits dans l'étude de ces phénomènes dynamiques, grâce à un jeu de projets ambitieux et très complémentaires qui avaient été lancés dans le contexte des anciennes sections 11 et 13 et qu'il importe de continuer à soutenir dans le cadre de la section 18.

Il s'agit d'abord du développement d'expériences de laboratoires, ayant vocation à étudier tous les phénomènes dynamiques pouvant affecter des fluides en rotation

rapide dans une coquille sphérique, et donc susceptibles de se produire dans le noyau terrestre. Les efforts consentis dans ce domaine ont été payants à plusieurs titres. Non seulement de nouvelles équipes issues de la communauté géophysique ont ainsi pu développer de nouvelles expériences pionnières (par exemple au LGIT, à Grenoble), mais aussi d'autres équipes dont les intérêts étaient plus éloignés se sont rapprochées des questions posées par la géophysique du noyau. Citons à titre d'exemple les nombreuses équipes rassemblées au sein du GDR Dynamo, issues de laboratoires de physique, astrophysique, et géophysique, et qui s'intéressent aux questions soulevées par le problème de la génération de champs magnétiques macroscopiques dans les milieux naturels. C'est dans ce contexte que des projets ambitieux de dynamos fluides expérimentales sont ainsi en cours de développement.

Ces progrès expérimentaux, ont été accompagnés de progrès tout aussi importants en matière d'observations. 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. Soulignons, en passant, que 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, qui a repris en 1999 (avec le lancement des satellites Oersted et Champ) après une première mission exploratoire dans les années 1980 (MAGSAT), a notamment permis de confirmer la présence d'une dynamique très riche à l'échelle décennale, qu'il importe de continuer à observer en détail. Ces efforts d'observations se poursuivent à travers le projet ESA Swarm, à laquelle la France

participe à l'initiative de l'IPGP et avec le soutien du CNES. Cette mission sera lancée en 2010 pour prendre la relève de la mission Champ.

Ces programmes expérimentaux et observationnels sont très complémentaires. Mais cette complémentarité ne peut être pleinement exploitée sans le développement, en parallèle, d'approches numériques. Dans ce domaine également, d'importants progrès ont été réalisés ces dernières années. Des modèles numériques de fluides en convection rapide existent désormais, qui permettent de simuler de nombreuses situations. Ces simulations ont permis de valider numériquement le concept de dynamo fluide, pertinent pour la géodynamo. Elles ont également permis l'interprétation des résultats expérimentaux, et guident donc aujourd'hui les choix dans ce domaine. Des progrès doivent cependant encore être faits, notamment parce que les régimes de paramètres que ces simulations sont capables d'atteindre sont encore loin d'être ceux dont on aurait besoin pour véritablement simuler la géodynamo dans toute sa complexité. Par ailleurs, il est également important d'être en mesure de mener des simulations sur des durées suffisamment longues pour permettre l'interprétation fine de l'évolution du champ magnétique terrestre sur toute la gamme de temps couverte par les données paléomagnétiques, et mieux comprendre par exemple, les rôles joués par l'apparition et la croissance de la graine, ou l'évolution des conditions aux limites imposées par la convection lente du manteau terrestre. L'augmentation de la puissance des moyens de calcul et le recours à des techniques avancées de paramétrisations, ouvrent cependant, là encore, des perspectives de progrès importants. À terme, enfin, ces mêmes progrès devraient permettre de développer des approches de type « assimilation de données » grâce auxquelles une prédiction à court et moyen terme de l'évolution du champ magnétique terrestre pourrait être envisagée.

10 – VOLCANOLOGIE

La volcanologie en France présente des spécificités. C'est, d'une part, une communauté petite mais bien reconnue sur le plan international pour ses recherches fondamentales notamment. D'autre part, la charge de surveillance des volcans actifs du territoire (Piton de la Fournaise à la Réunion, Soufrière de Guadeloupe, Montagne Pelée de Martinique) requiert le développement de compétences nationales aussi bien dans la recherche sur le fonctionnement de ces volcans que dans le développement d'outils de surveillance. Ces deux aspects doivent servir de cadre pour la définition des enjeux futurs de cette discipline.

Une priorité devrait être le renforcement des méthodes d'étude des volcans à distance, telles que celles permettant la quantification des paramètres physiques lors d'une éruption (radar Doppler, données acoustiques, spectroscopie infra-rouge, etc.), ainsi que les méthodes de télédétection appliquées aux champs de déformation ou aux états thermiques des édifices, que ce soit au moyen de données satellitaires (interférométrie radar, imagerie thermique) ou au sol (radar sol, lidar, etc.). La France doit jouer un rôle moteur dans l'évolution de ces techniques et, en particulier, pour des utilisations combinées de plusieurs techniques.

Le fonctionnement des volcans reste insuffisamment compris, et donc mal prévisible. L'identification et l'interprétation des précurseurs d'une éruption nécessitent une capacité de modélisation du système magmatique et du système hydrothermal généralement associé. La physique – mal maîtrisée – des milieux poreux déformables est importante à ce stade. La formation, l'évolution et la destruction des chambres magmatiques restent des questions en grande partie ouvertes, dont les réponses nécessitent des modèles plus élaborés que les actuels. 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 des prérequis pour la gestion des risques naturels et devraient faire l'objet de soutiens financiers récurrents.

La connaissance (1) de l'histoire éruptive, (2) des événements d'instabilité gravitaire (et tsunamis associés), et (3) des processus de remontée et du stockage des magmas dans les volcans français complète le champ d'investigation. La comparaison des données recueillies à l'occasion de campagnes de forages, sur 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 les volcans des Antilles françaises restent une cible prioritaire, en raison de leur activité potentiellement dangereuse, La Réunion est un cas d'étude de référence internationale pour le volcanisme de point chaud. En plus des diverses données des investigations géologiques et géophysiques classiques, des données de grande qualité sur la dynamique du Piton de la Fournaise sont acquises par L'Observatoire Volcanologique. Ces dernières sont encore insuffisamment prises en compte et exploitées par la communauté. Des études pétrologiques, géochimiques et isotopiques plus détaillées permettront d'obtenir des informations sur l'évolution de la source du point chaud, sur l'évolution des réservoirs magmatiques, et sur la cinématique de la remontée des magmas dans les conduits.

11 – INSTRUMENTATION EN GÉOPHYSIQUE

La nécessité de collecte d'observables géophysiques doit s'appuyer sur des outils ou équipements nationaux sous la responsabilité de l'INSU. Une programmation pluri-annuelle est indispensable pour tenir à jour la carte des grands équipements scientifiques. Un comité ORE/Service d'observations, mis en place par l'INSU, s'occupe des problèmes concernant

l'ensemble des observatoires (labellisation, suivi des activités, prospective). La coordination entre les demandes d'équipements lourds mutualisés (parcs et outils nationaux) et les demandes propres des laboratoires doivent être améliorées et c'est au groupe des « milourds » géophysique de veiller à préserver un équilibre dans ce domaine.

En premier lieu, il faut maintenir nos réseaux d'observatoires permanents au sol (en France le RENASS/BCSF en sismologie, le RAP en accélérométrie et les Observatoires volcanologiques, auxquels s'ajoutent les stations géophysiques déployées en France et à l'étranger qui sont intégrées aux réseaux INTERMAGNET (en magnétisme), GEOSCOPE/IRIS (en sismologie) et GGP (réseau international des gravimètres supraconducteurs). Nos observatoires ont souvent un rôle très important dans les grands réseaux mondiaux par leur localisation géographique (en particulier les stations en Antarctique et dans les territoires sub-antarctiques). Le développement de ces observatoires, en particulier dans l'hémisphère Sud, reste primordial. La priorité en sismologie va à la création d'un réseau permanent de sismomètres à 3 composantes large bande qui fait actuellement défaut en métropole. Il faut également pérenniser le réseau géodésique national qui centralise les données de nombreuses stations GPS permanentes en France. Un des rôles qui incombe aux observatoires est de mettre à disposition des mesures qui servent à la validation des missions satellites sachant qu'un effort sans précédent a été entrepris dans la décennie en cours pour suivre les variations spatio-temporelles du champ de pesanteur et du champ magnétique terrestres depuis l'espace ; cette nécessité de validation concerne notamment le cas des missions actuelles ou futures en gravimétrie (CHAMP, GRACE, GOCE) et en magnétisme (CHAMP, OERSTED, SWARM). Il faut aussi souligner le caractère indispensable des mesures permanentes au sol car toute une gamme de phénomènes géophysiques rapides (par exemple ceux de période inférieure à la dizaine de jours en gravimétrie) est hors d'atteinte des observations satellitales. De plus, certains processus qui relèvent de la géophysique profonde (vibra-

tions propres à très basse fréquence) ont des signatures gravifiques très faibles (10^{-12} g!) qui ne peuvent être observées qu'avec des instruments de haute technologie installés dans des sites à très faible bruit.

En second lieu, il faut pouvoir mettre en œuvre des réseaux mobiles d'instruments dans le cadre des divers programmes ou chantiers scientifiques en cours. C'est le rôle des parcs d'équipement nationaux (SISMAGE et RISC en sismologie terrestre, OBS en sismologie fond de mer, parc GPS, parc de gravimètres relatifs, parc de magnéto-tellurique) dont toutes les études prospectives montrent qu'ils sont notablement insuffisants en taille. Le couplage entre observations en sismologie, GPS haute fréquence et imagerie radar (SAR temporel) est très prometteur pour les études de sismo-tectonique. De même, le couplage entre observations en gravimétrie et positionnement géodésique reste incontournable pour mieux comprendre les transferts de masse en jeu dans certains processus tectoniques ou des phénomènes de charge superficielle (glaciologie, hydrologie, océanographie). En gravimétrie, un des besoins identifiés est l'acquisition de gravimètres supraconducteurs (trans)-portables qui permettraient de suivre de manière continue l'évolution temporelle du champ de pesanteur sur des cibles hydrologiques ou tectoniques spécifiques et qui viendraient en complément de mesures épisodiques de gravimétrie absolue (2 outils nationaux disponibles à ce jour). Il est à noter que des résultats récents sur les variations de l'inclinaison du sol (grâce à des inclinomètres hydrostatiques à longue base développés à l'IPGP) montrent clairement l'intérêt de ce type de mesures pour le suivi d'aquifère en hydrologie, le suivi de la fonte actuelle des glaciers dans les régions polaires ou des problèmes de tectonique (Corinthe).

12 – MINÉRALOGIE, PÉTROLOGIE ET GÉOCHIMIE DES ROCHES BASALTIQUES ET MANTELLIQUES

La dynamique interne de la planète Terre peut être reconstituée par l'étude des roches mantelliennes et crustales, les laves basaltiques correspondant aux traceurs les plus faciles à utiliser puisqu'étant largement majoritaires à la surface de la terre et dans les autres planètes telluriques du système solaire. Comprendre les relations entre leur composition et la convection dans le manteau est un objectif que pétrologistes, géochimistes et géophysiciens poursuivent depuis plusieurs dizaines d'années. Une interprétation fiable du message véhiculé par les roches mantelliennes passe toutefois par une bonne compréhension de la fonction de transfert manteau-surface c'est-à-dire de l'ensemble des processus pétrologiques à l'origine de leur signature géochimique.

Modéliser de manière plus réaliste les transferts de matières et d'énergie à l'intérieur du globe nécessite une connaissance précise des lois de comportement qu'il s'agit de superposer au champ thermique convectif. Cette remarque est évidente pour la modélisation du transfert des éléments majeurs et traces. Elle concerne également les signatures isotopiques. Celles-ci sont, certes, insensibles aux fractionnements pétrologiques mais ne s'expriment qu'en réponse au comportement de leurs phases « porteuses ». Il est donc indispensable de déterminer quels sont ces porteurs (qui peuvent prendre des formes aussi variées qu'une péridotite, un rubanement de pyroxénite ou tout autre hétérogénéité lithologique, voire une phase carbonatée ou sulfurée ou encore une phase fluide) et quelles sont leurs caractéristiques thermodynamiques et leur mode d'extraction du manteau. Les modèles de géodynamique chimique ont, jusqu'à présent, minimisé l'importance de ce type de « détails ». Connaître la nature du porteur est pourtant fondamental pour interpréter correctement une signature isotopique en terme d'objet géo-

physique (grands domaines du manteau *versus* hétérogénéités locales, par exemple). Il faut pour cela que chaque donnée géochimique puisse être replacée dans son « environnement pétrographique », au sens le plus large du terme c'est-à-dire incluant également les environnements minéralogiques et géophysiques susceptibles de caractériser les anisotropies des propriétés physiques des différentes géosphères. Cette proposition, qui aurait pu paraître utopique il y a quelques années, devient un projet réaliste grâce à l'accroissement des performances des outils d'analyse *in situ* des éléments traces et des rapports isotopiques (sonde ionique, ICP-MS-laser, MC-ICP-MS-laser, etc.) ainsi qu'au développement des techniques d'imagerie 3-D qui permettent des déplacements depuis l'échelle cristalline, permettant de mieux visualiser les relations mutuelles des phases, jusqu'à l'échelle planétaire (Tomographie). Il devient donc envisageable de déterminer de plus en plus précisément le comportement des éléments traces et des couples isotopiques que l'on utilisait en aveugle, faute de mieux. Les problématiques liées à ces nouvelles techniques relancent l'intérêt pour l'étude des échantillons du manteau et de la croûte profonde ainsi que les comparaisons avec les différentes classes de météorites. Les efforts devraient porter sur l'étude d'objets naturels parallèlement au développement de modèles convectifs adaptés à la modélisation de la production des magmas dans l'ensemble du manteau supérieur afin de pouvoir préciser les apports mantelliennes encore plus profonds.

13 – PROCESSUS DE DÉFORMATION DANS LA LITHOSPHERE

L'étude des processus géodynamiques au sens large est l'un des grands axes de recherche en tectonique. Les progrès futurs dans ce domaine demandent une meilleure

compréhension des processus physiques de déformation ainsi que des relations entre géométrie, déformation et propriétés physiques mesurables par les méthodes de la géophysique.

Un aspect central de cette problématique est celui des relations mécaniques (couplage ou pas) entre enveloppes (voir les sections de ce rapport sur la géodynamique interne et les géosciences marines). La question des couplages entre croûte supérieure fragile et croûte inférieure ductile, et entre croûte et manteau est loin d'être résolue. En fait les processus de déformation du manteau sous le Moho sont encore peu connus : les déformations y sont-elles localisées ou diffuses, cohérentes ou non avec celles de la croûte ? À l'aide d'observations géophysiques (tomographie, anisotropie sismique, etc.) combinées avec des études tectoniques, il faut identifier les cas où un couplage est probable et ceux où il ne l'est pas. Il faut aussi développer une expérimentation permettant de comprendre mieux le comportement du manteau dans la zone de couplage. Plus haut dans la croûte, nous comprenons mal les relations géométriques, mécaniques et temporelles entre les déformations de la croûte fragile et celles de la croûte ductile. Y a-t-il des « boucles de contrôle » (dans le temps et dans l'espace) entre rupture dans la croûte supérieure et fluage en profondeur ? La profondeur de cette transition dépend-elle du seul géotherme ? de la présence de fluides ? des ruptures dans la zone sismogène ? Ces problèmes peuvent être contraints en associant observations de terrain, mesures physiques, géochronologiques et géochimiques, et modélisation.

La répartition de la déformation dans la lithosphère est encore mal connue et demande des développements géophysiques. Déterminer et localiser l'anisotropie résultant de cette déformation est une approche unique. Anisotropie sismique et anisotropie de conductivité sont des observables directement corrélables avec la déformation. Ces méthodes demandent toutefois des développements théoriques et/ou méthodologiques : intégration des approches en fréquences finies pour la détection de l'anisotropie sismique, développement des

fonctions de transfert anisotropes, etc. La cause de l'anisotropie de conductivité est encore mal comprise et résiste aux modèles actuels. Un travail fondamental (expérimental, modélisation, etc.) est nécessaire dans ce domaine.

Un autre champ important à défricher est celui des effets des interactions fluides-roches sur la déformation. Ces interactions concernent aussi bien les fluides aqueux que les magmas. Nous ne savons pas comment évaluer la quantité et la localisation « instantanée » (et non cumulée) de fluides (en particulier de magmas) dans le milieu. Nous connaissons mal l'effet des réactions sur le comportement mécanique de la partie solide. Un travail d'expérimentation couplé aux observations de déformations naturelles ainsi qu'à une approche géochimique devrait permettre des avancées importantes.

Enfin, il est devenu indispensable de prendre en compte les comportements non-stationnaires dans la modélisation de la déformation de la lithosphère (par exemple la modification de la microstructure et de la texture des roches, l'entrée des fluides dans le système, les réactions pétrologiques ou les modifications de la distribution des contraintes/vitesses de déformation dues au fonctionnement propre du système). Cela demande bien entendu d'être capable de paramétrer au mieux ces comportements (expérimentation, étude de cas naturels, etc.) afin de rendre possible des modélisations réalistes.

14 – FAILLES ACTIVES ET RISQUE SISMIQUE

La problématique plus spécifique des failles actives et du risque sismique associé fait appel à de nombreuses spécialités des Sciences de la Terre : Tectonique, sismologie, géodésie, physique des roches, géochimie, hydrologie, etc., 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 volcanique pour certains) significatif, en particulier aux Antilles ; or 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'événements futurs implique d'arriver d'abord à une meilleure compréhension des séismes et du fonctionnement des failles. Trois axes majeurs de travail doivent pour cela être approfondis :

– i) nous devons 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 (sols mous ou liquéfiables, topographies complexes, etc.) qui peuvent considérablement amplifier les mouvements du sol 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 et les discriminer. La possibilité d'interventions rapides sur le terrain après un grand séisme, associant mesures tectoniques, sismologiques, et géodésiques de haute résolution, sont essentielles 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 (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. Leur compréhension et leur quantification nécessitent de densifier les mesures fines de déformations 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 ;

– ii) 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 très court terme par isotopes « cosmogéniques » ^{36}Cl et ^{10}Be notamment, de mettre au point de nouvelles méthodes d'identification des ruptures passées ;

– iii) enfin, 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 haute résolution, datation fine des marqueurs géologiques décalés par les failles).

Dans leur ensemble, 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 (de longue durée), temporaires (de courte durée) et urgents (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 important 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 recherche et la mesure des 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 : Réseaux de GPS continus permanents enregistrant à haute fréquence, sismomètres très large-bande, réseaux 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. Enfin, 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 plomberies 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.

15 – RELIEFS ET ÉROSION

L'approche pour mieux comprendre la dynamique d'évolution des reliefs et son interaction avec les paramètres de forçages tectoniques et climatiques a connu une évolution récente importante. Cet aspect des Sciences de la Terre est maintenant de plus en plus abordé de façon intégrée par une approche qui rallie à nouveau des disciplines comme la tectonique, la géomorphologie, la sédimentologie, la géochimie et (bien entendu) la modélisation des processus physiques, qui avaient été segmentées par l'évolution « technique » qu'a connue la Géologie ces trente dernières années. Si l'on se permet de comparer la maturation de cette évolution dans la communauté Française par rapport à son équivalent aux USA, il est clair que nous avons encore du retard. Cependant les choses évoluent vite et la communauté Française se situe sur une très bonne dynamique qui se construit actuellement autour de quelques chercheurs et de quelques centres déjà très bien reconnus internationalement.

Un aspect récent très positif de cette évolution a été la création du programme National de l'INSU « Reliefs de la Terre », dont le bilan après deux années de fonctionnement à l'automne 2006 a clairement montré l'impact positif et fédérateur pour la communauté. Au-delà de simplement fédérer et créer de l'animation et émulation scientifique autour de ces questions scientifiques, l'apport de ce programme National a été essentiel pour le financement d'études qui n'étaient pas toujours très bien reçues ailleurs, et qui a permis à cette communauté en renouvellement et développement de pouvoir exister.

Le développement récent de cette approche, nationale et internationalement, a été aussi basé en grande partie sur la mise au point de nouvelles méthodes et techniques de quantification des processus (thermochronologie basse température, isotopes cosmogéniques, paléo-altimétrie, expérimentation et modélisation, etc.). La communauté Française va notamment bénéficier de la mise en route cette année

de l'accélérateur ASTER implanté au CEREGE (Aix-en-Provence), qui permettra grâce à un fonctionnement en service national de fournir plus de données cosmogéniques (^{10}Be et ^{36}Cl) aux équipes travaillant dans le domaine de la géomorphologie quantitative. Si pour cet aspect de la quantification la situation va probablement devenir satisfaisante, il n'en est pas de même en ce qui concerne la thermochronologie basse température (U/He notamment). Très peu de laboratoires en France ont encore développé ces mesures, et aucun n'a jamais été réellement financé dans ce sens. Que ce soient les géomorphologues demandeurs, ou les géochimistes actuellement fournisseurs et développeurs, tous sont d'accords pour mettre en avant le manque d'un service national dédié à la géochronologie U/He implanté dans un des laboratoires qui aura les moyens techniques de le mettre en place et d'en assurer le fonctionnement. Des moyens dédiés et concertés importants sont donc nécessaires rapidement pour éviter toute dispersion contre-productive comme nous avons pu le voir dans le passé pour d'autres aspects de la géochronologie.

Bien que fortement dépendante de ces aspects technologiques, l'émergence et la maturation de cette discipline, en tant que telle, est aussi freinée, comme une partie des approches concernant la dynamique de la lithosphère, par la raréfaction des chercheurs capables d'appréhender les objets naturels à notre disposition dans le système Terre. Il est très important que la communauté des Sciences de la Terre sache préserver, dans son évolution à venir, une bonne proportion entre spécialistes et généralistes. La question de leurs implantation et de la mixité entre centres de « mesure » et « d'investigation » est aussi posée et doit être débattue, car elle est centrale pour l'optimisation de la recherche dans le domaine de la dynamique des reliefs et de l'érosion, qui se situe à l'interface entre plusieurs disciplines spécialisées.

16 – APPROCHES SPÉCIFIQUES AUX GÉOSCIENCES MARINES

L'océan couvre les deux tiers de la Planète, et plusieurs 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 communes de modélisation. 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 cette prospective. À l'image de la communauté océanographique physique, chimique et biologique, la communauté des Géosciences Marines est maintenant largement structurée autour de grands programmes, qu'ils soient nationaux (ANR/Catastrophes telluriques et tsunامي, GDR Marges, DyETI, Reliefs, etc.) ou internationaux (MOMAR, IMAGES, IODP, etc.). Par ailleurs, l'intégration européenne progresse au travers de la mise en place d'Eurocores (structures ESF) comme EuroMargins et Euromarc ou le montage de projets financés par la Communauté Européenne, par exemple HERMES, ECORD et ESONET. Nous reprenons ici pour une bonne part la partie Sciences de la Terre de la prospective scientifique réalisée en juin 2006 sous mandat de l'INSU, l'Ifremer, l'IRD et de l'IPEV par le Groupe de Travail pour l'Évolution de la Flotte (GTEF).

Avant de détailler les trois axes principaux de prospective en Géosciences Marines, il faut insister sur leur approche commune de suivi temporel des processus: l'approche observatoire fond de mer. Cette approche, qui permet de suivre dans le temps les évolutions du milieu (physique, chimique, géologique, biodiversité, écosystèmes, cycles biogéochimiques), nécessite des technologies spécifiques (développement de capteurs et de

la technologie nécessaire à leur gestion et maintenance). Cet aspect du travail de recherche associe des collaborateurs industriels et a un fort potentiel en termes de retombées économiques puisqu'il se situe à la frontière des développements en technologies marines. La France est bien placée au niveau européen grâce aux équipes de recherche scientifique et technologique de l'Ifremer et à plusieurs unités du CNRS (chantiers MoMAR et Mer Ligure qui sont des composantes du réseau européen ESONET, dont l'ambition, outre des objectifs de recherche fondamentale, est d'être une des contributions européennes au réseau GOOS – Global Ocean Observing System -).

Trois axes principaux de prospective en Géosciences Marines sont identifiés :

– structure et dynamique de l'intérieur de la Terre. Que ce soit pour étudier la dynamique du manteau convectif ou la tectonique des plaques, il y a nécessité de poursuivre et développer des campagnes de géophysiques et d'échantillonnage de roches, de déployer des parcs de sismomètres fond de mer OBS, de développer des outils de mesure magnétique près du fond, etc. Certains chantiers actuels (Antilles, MoMAR, Nankai) devraient développer une dimension d'observatoire fond de mer ;

– aléas sismique, volcanique, gravitaire et tsunamis. En France, les zones côtières les plus exposées sont les Antilles et la Côte D'azur (chantier Ligure), mais tendre à une meilleure compréhension des processus nécessite aussi des études sur d'autres chantiers (Méditerranée orientale et occidentale, mer de Marmara, marge Andine, Sumatra, etc.). Cerner l'aléa sismique dans ces régions nécessite des études sismotectoniques fines dont une partie, en complément des réseaux sismologiques déployés à terre, doit être réalisée en mer (sismologie, cartographie haute résolution, imagerie géophysique, mesures géotechniques sur le fond, géochimie des fluides) ;

– ressources énergétiques et minérales. La contribution académique en ce domaine porte sur des recherches fondamentales en amont de la prospection. Le développement récent de parcs d'OBS conséquents, à l'Ifremer, à l'INSU et à l'IRD permet ainsi d'imager les structures géologiques superficielles et profondes associées aux différentes étapes de l'évolution des marges continentales. Le développement de méthodes de prospection adaptées à la recherche d'amas sulfurés fossiles dans les domaines abyssaux (magnétisme fond de mer, électromagnétisme) est un enjeu important pour un partenariat industrie-recherche dans les prochaines années.

