

13

PHYSIQUE ET CHIMIE DE LA TERRE

Henri-Claude NATAF
Président

Catherine Chauvel
Véronique Gardien
Jean-Claude Germanique
Annie Gole
Marianne Greff
François Guyot
Dominique le Queau
Hervé le Treut
Bernard Marty
Valérie Masson-Delmotte
Herlé Mercier
Christophe Monnin
Michel Pichavant
Serge Planton
Michel Rabinowicz
Paul Raterron
Ginette Saracco
Joël Sommeria
Patrick Stoclet
Jean-Pierre Vilotte

L'exercice du rapport de conjoncture est un peu particulier pour la section 13 « Physique et chimie de la Terre » puisque c'est la seule section du Comité National qui disparaît dans le redécoupage. Créée lors du précédent redécoupage en 1991, la section 13 avait pour mission de contribuer à une approche plus quantitative des sciences de la Terre en favorisant la théorie, la modélisation, les simulations numériques et analogiques, la mesure et l'expérimentation.

Centrée à l'origine sur la géochimie et la géophysique interne et externe, elle s'est progressivement affirmée comme la section transversale « amont » de toutes les Sciences de l'Univers, et a ainsi largement contribué à l'essor de la prise en compte des couplages entre les différentes enveloppes de la Terre (magnétosphère, ionosphère, atmosphère, océan, surface continentale, croûte, manteau, noyau) ainsi qu'à l'ouverture vers les autres planètes et vers la dynamique interne des disques proto-planétaires.

Nous pensons que l'approche interdisciplinaire illustrée par la section 13 doit continuer à progresser, mais on peut estimer que la communauté qu'elle représente est maintenant assez forte et assez reconnue pour que ce travail se poursuive au sein de nouvelles sections centrées sur les différents objets des Sciences de l'Univers. Il faudra cependant veiller à ce que ceux qui constituaient la

composante la plus transversale de la section trouvent vraiment leur place dans les nouvelles sections. Il s'agit en particulier des géochimistes qui se sont ouverts à la cosmochimie ou à la biogéochimie, des mécaniciens des fluides géophysiques et astrophysiques, et des planétologues. Il faudra également que les thèmes transversaux émergents qu'aurait pu aider la section 13 se voient encouragés par d'autres dispositifs. On pense en particulier au couplage des géomagnétismes interne et externe, à l'influence de la structure interne des planètes dans la dynamique du système solaire, et au développement de modèles dynamiques de l'intérieur du soleil et des planètes géantes.

La disparition de la section 13 aura d'autres conséquences qu'il convient d'anticiper : ainsi, les laboratoires rattachés à des Départements autres que « Sciences de l'Univers » confiaient souvent à la section 13, la plus transversale, l'évaluation de leur activité interdisciplinaire en lien avec les Sciences de l'Univers.

Un enjeu important au carrefour de la modélisation et de l'observation réside dans l'émergence de véritables centres de données d'observation, intégrant les aspects de pérennisation et de navigation au sein d'un grand volume de données, souvent hétérogènes. Ces centres de données devront prendre en compte les avancées rapides dans les domaines des technologies et des systèmes d'information, en associant les ressources de calcul et de stockage pour des pré-traitements automatiques de plus en plus complexes, jusqu'à l'assimilation et l'inversion de données. Enfin, ces observatoires virtuels devront pouvoir intégrer, au côté des données d'observation, les résultats des simulations numériques.

Notons que dans le domaine de la modélisation numérique, la constante et rapide évolution des ressources informatiques et des algorithmes nécessitent le recrutement soutenu de jeunes chercheurs, et des efforts de formation. Du côté de l'expérimentation et de l'instrumentation, les interactions avec les autres disciplines sont essentielles, avec là aussi un volet formation indispensable.

Notons également qu'en Sciences de l'Univers comme dans d'autres disciplines, les chercheurs sont confrontés à des systèmes complexes qui nécessitent l'utilisation d'une palette de connaissances et de techniques de plus en plus large. Ces sciences voient également un fort accroissement de leur périmètre et une pression sociétale de plus en plus forte. L'enjeu est donc de taille, et il est clair que les pistes de prospective que nous explorons dans ce document ne pourront aboutir que dans le cadre d'une politique volontariste de soutien accru de ces thématiques, en postes et en moyens.

Fidèle à sa vocation transversale, la section 13 a choisi quatre thèmes pour développer son analyse de la conjoncture. Alors qu'il paraît que les connaissances humaines doublent tous les quatre ans, il ne nous est pas possible d'être exhaustifs, même dans le champ d'investigation de la section. Les thèmes que nous avons identifiés sont les suivants :

- modèles couplés des enveloppes externes ;
- microanalyse en Sciences de l'Univers ;
- écoulements polyphasés ;
- dynamique et sismologie.

Pour chacun des thèmes, nous avons cherché à analyser son positionnement au regard des critères de la modélisation numérique, des moyens d'observation et instrumentation, de l'expérimentation, de l'organisation du territoire et de l'Europe, des ressources humaines et de la formation, et enfin du tissu socio-économique

1 – MODÈLES COUPLÉS DES ENVELOPPES EXTERNES

Le développement de la modélisation des composantes externes de l'environnement terrestre, océan, atmosphère, glaciers, banquise, systèmes hydrologiques continentaux, constitue à la fois la mise en place d'un outil de recherche extrêmement novateur et l'occasion de développer des recherches fondamentales dédiées.

Une forte interdisciplinarité

Une évolution majeure au cours des dernières années a été le caractère de plus en plus fortement interdisciplinaire de ces modèles, qu'il s'agisse de l'apparition de modèles couplant plusieurs des milieux (couplage océan/atmosphère par exemple) ou de l'introduction de plus en plus fréquente de composantes chimiques ou biochimiques. Ces tendances ajoutent des besoins de recherche nouveaux, et font que le développement de l'outil de modélisation implique désormais pour les équipes concernées le maintien d'une variété de compétences de plus en plus large.

La modélisation numérique nécessite en amont des études de processus nombreuses, particulières à chacun des domaines ou milieux considérés. Un thème récurrent est de parvenir à mieux comprendre les problèmes des interactions entre échelles, spatiales ou temporelles, qui constituent le fondement du développement de paramétrisations comme de la notion de hiérarchie de modèles. Le développement de la multidisciplinarité a considérablement renouvelé ces besoins en études théoriques : la prise en compte de la biologie dans l'océan, l'étude des transports de polluants au travers de la tropopause, l'étude des couches limites polluées, le rôle des convections nuageuses sur le transport de particules, fournissent quelques exemples où une meilleure compréhension des écoulements atmosphériques ou océaniques à très petite échelle est devenue la

clef du progrès à l'interface entre disciplines. Le lien avec les aspects fondamentaux de la dynamique des fluides géophysiques continue donc d'être un moteur important et nécessaire de ces recherches.

Le développement de systèmes numériques très complexes a aussi suscité des recherches novatrices aux frontières des mathématiques appliquées : méthodes statistiques, analyse de rétroactions dans les systèmes non-linéaires. Le lien modèles/observations continue de susciter des développements importants dans le domaine de l'assimilation des données. L'ampleur des jeux de données qui sont nécessaires, qu'il s'agisse des outils de validation ou des résultats eux-mêmes, entraîne aussi un lien actif avec les études de définition de base de données (« observatoires virtuels »).

Des enjeux théoriques et appliqués

L'application des modèles à l'étude des systèmes naturels ouvre aussi des perspectives nouvelles. Les modes collectifs de variations du système climatique (El Niño Oscillation Australe, oscillations décennales dans l'Atlantique Nord, téléconnexions, pour ne prendre que quelques exemples) constituent des objets d'étude au même titre que les processus de petite échelle. Leur étude fait souvent appel à des hiérarchies de modèles de complexité variable, depuis les modèles « jouet » permettant d'isoler le rôle de quelques paramètres ou processus clef, jusqu'aux modèles les plus complexes, qui ont la vocation d'être réalistes.

Au bout du compte les modèles constituent un moyen d'aborder des problèmes plus appliqués, en réponse aux demandes de la société : depuis les questions de pollution, atmosphériques ou océaniques, se situant souvent à une échelle locale ou régionale, jusqu'aux grands enjeux planétaires (effet de serre, trou d'ozone) en passant par le problème de maintien des ressources (ressources en eau, halieutique, biodiversité, etc.) ou la mise en place d'outils de prévision opérationnels. Ces objectifs définissent ainsi des métiers nouveaux

combinant une part de recherche fondamentale – indispensable pour faire évoluer l’outil de modélisation et permettre une interprétation adéquate de ses résultats – et des liens actifs avec des organismes externes, publics ou privés.

2 – MICROANALYSE EN SCIENCES DE L’UNIVERS

La capacité d’obtenir des analyses géochimiques avec une résolution spatiale accrue constitue l’un des challenges analytiques des sciences de l’univers dans les prochaines années et promet des avancées scientifiques considérables. Cette capacité est dictée par plusieurs développements thématiques principaux.

De nouveaux thèmes

L’étude des interactions minéral-vivant à l’échelle micro- et nanométrique dans les domaines de l’environnement, des grands cycles géochimiques, de l’origine de la Vie, des biomarqueurs des roches terrestres très anciennes, et du développement de la Vie dans des environnements extrêmes. L’exploration et la modélisation de l’interface minéral-vivant sont nécessaires pour construire des modèles cinétiques réalistes de cycles biogéochimiques élémentaires et moléculaires ainsi que pour une meilleure compréhension des mécanismes d’apparition et d’enregistrement des voies métaboliques qui déterminent les cycles biogéochimiques globaux.

L’étude des minéraux finement divisés d’échelle nanométrique omniprésents dans l’environnement (sols, sédiments, eaux, atmosphère) ainsi que des traceurs environnementaux tels que les aérosols, les particules piégées dans la glace ou dans les sédiments. La modélisation de la stabilité de ces phases et

de leur rôle dans la dynamique et le stockage des éléments aux échelles globales et locales nécessite leur microanalyse géochimique fine.

L’étude de phases synthétisées en conditions extrêmes de température et de pression (par exemple, en enclume diamant) dont les dimensions sont limitées par le dispositif expérimental et par l’échelle caractéristique d’homogénéité des conditions de pression et température. Une modélisation appropriée de la Terre profonde et des intérieurs planétaires, compris dans toute leur complexité chimique, est la motivation de ces études.

L’étude des micro-échantillons extra-terrestres, encouragée par la nécessité d’analyser des phases énigmatiques de plus en plus petites (micrométéorites, grains lunaires, poussières interplanétaires) et celle d’être prêts pour les prochains retours d’échantillons qui seront de toute façon très petits (grains cométaires, poussières astéroïdales etc). L’exploration du système solaire va franchir une étape très importante dans la prochaine décennie avec le retour sur Terre d’échantillons de comètes, de planétésimaux et peut être de grains prélevés dans l’atmosphère de Mars.

De nouveaux outils

Aux outils traditionnels d’analyse tels que le microscope électronique à balayage et la sonde électronique s’ajoutent depuis une décennie de nouvelles techniques, destructives ou non, qui permettent d’effectuer des analyses structurales, chimiques, organiques, et isotopiques à l’échelle micrométrique à nanométriques. Ces outils sont principalement les suivants :

- **l’ablation laser** couplée à un spectromètre de masse à gaz, à thermoionisation, ou à une ICP-MS ;

- **la sonde ionique** haute résolution qui permet l’analyse d’éléments traces et de rapports isotopiques in situ avec une résolution spatiale de quelques microns et une précision, en mode multi-collection de quelques parties par dix mille sur les rapports isotopiques ;

– **les microscopes électroniques analytiques en transmission** de nouvelle génération qui permettent une nano-analyse de la structure cristalline, ainsi que les mesures quantitatives de composition chimique des majeurs et mineurs, de spéciation (par exemple degrés d'oxydation), et de distribution des éléments légers à une échelle nanométrique ;

– **le rayonnement synchrotron** utilisé en mode hautement focalisé sur les sources de troisième génération avec des applications en imagerie, mesures de composition chimique, de structure cristalline et de spéciation avec des résolutions spatiales de l'ordre du micromètre et éventuellement au travers de parois de réacteurs ou dans des inclusions minérales ou fluides en place ;

– **les sondes nucléaires et protoniques** très puissantes pour les profils de diffusion et les distributions d'éléments légers et pour lesquelles des progrès importants sont faits au niveau de la focalisation.

Les développements futurs vont aller dans deux directions. D'une part, **la précision analytique** va aller en croissant. Les méthodes basées sur l'ablation laser et la spectrométrie de masse voient un essor important du fait de la grande précision dans l'analyse isotopique (quelques 10^{-5}) que permettent les ICP-MS secteur nouvelle génération. En microscopie électronique analytique en transmission, le couplage systématique entre l'analyse des rayons X en dispersion d'énergie et la spectroscopie des pertes d'énergie devrait permettre d'aller vers des précisions analytiques multi-élémentaires accrues. D'autre part la résolution spatiale va être de plus en plus performante, avec notamment la mise en œuvre d'une nouvelle génération de sonde ionique, la nanosims fabriquée par une entreprise française, Cameca. Ces développements permettent l'analyse isotopique à l'échelle de quelques dizaines de nanomètres. Le couplage entre résolution spatiale, précision analytique et limites de détection permettant des analyses correctes de spéciation va s'améliorer sur les lignes synchrotron.

Mise en réseau des instruments

Les développements de ces nouvelles générations d'appareillages sont des opérations lourdes et coûteuses qui nécessitent le regroupement de moyens. Il est donc naturel que ces opérations soient centralisées dans des centres ayant les capacités scientifiques humaines et technologiques de les assumer, et que ces équipements soient ouverts à la communauté nationale. On rappelle qu'il existe déjà actuellement 6 instruments ayant le statut d'instrument national en géochimie : l'ICP-MS de l'ENS de Lyon, la microsonde nucléaire du laboratoire Pierre Sue de Saclay, le laboratoire ^{14}C de Saclay, le Rock-Eval d'Orléans, le service d'analyse des roches et minéraux (SARM) et la sonde ionique du CRPG de Nancy. Il est donc souhaitable que les nouvelles installations en microanalyse s'organisent sur ce modèle. Par ailleurs, les microscopes électroniques en transmission doivent être organisés en un réseau « facilité nationale » regroupant les microscopes de Lille (USTL) et Marseille (CRMC2), qui devrait à terme inclure Paris (LMCP et IPGP). Une ligne synchrotron en partie financée par l'INSU (FAME, ESRF Grenoble) est largement utilisée pour les études de géochimie (surtout de spéciation) et d'autres lignes peuvent jouer un rôle important en matière de microanalyse géochimique (ESRF, émergence de SOLEIL). Dans tous les cas, une ouverture sur des appareils européens doit être développée et encouragée.

L'installation d'une **sonde ionique nanosims au Muséum d'Histoire Naturelle de Paris**, qui pourrait fonctionner en réseau avec la sonde ionique ims 1270 de Nancy, serait la manière de répondre à de nouveaux défis instrumentaux et scientifiques. Étant donnée sa résolution spatiale élevée (latéralement jusqu'à 50 nm), cet outil sera couplé de manière très profitable à de la microscopie électronique analytique en transmission au travers des facilités nationales.

Bien que ne concernant pas directement la micro-analyse, mais que l'on devrait chercher à coupler systématiquement avec une caractérisation micro-analytique fine en géochimie, on mentionnera deux projets importants :

– un développement autour des processus d'érosion, de l'évolution des reliefs et de la tectonique récente, de la formation et de l'évolution des sols, nécessitant un outil de datation approprié comme l'est le ^{10}Be cosmogénique qui avec le ^{26}Al et le ^{36}Cl pourra être mesuré sur le futur accélérateur ^{10}Be du Cerege à Aix ;

– le développement, concernant la cosmochimie, la Terre profonde ou les cycles de surface, de mesures avec une grande précision de rapports isotopiques d'éléments jusqu'à présent quasiment hors d'atteinte analytiquement. L'installation d'une MC-ICP-MS à grand rayon à l'ENS de Lyon répondrait à ce besoin.

3 – ÉCOULEMENTS POLYPHASÉS DANS LES PLANÈTES TELLURIQUES

Les nombreuses recherches qui ont accompagné l'avènement de la tectonique des plaques ont démontré que les planètes telluriques se comportent à l'échelle des temps géologiques comme des « fluides » dont la dynamique explique l'évolution temporelle et spatiale des planètes ainsi que ses crises de mauvaises humeurs telles que des éruptions, des explosions de gaz, des nuées ardentes, des tremblements de terre, et des glissements de terrain.

Dans un premier temps, les travaux ont conduit à étudier l'évolution de chaque phase « fluide » indépendamment des autres. Par exemple, pendant les années 80 à 90, les géodynamiciens ont simulé la convection à l'intérieur des planètes en considérant le manteau comme un fluide, homogène et extrêmement visqueux, mis en mouvement à des vitesses de quelques centimètres par an par les sources de chaleur nées de la décroissance des éléments radioactifs à longue période. Les variations de concentration de ces éléments ainsi que les abondances en éléments traces

observées dans les roches volcaniques et les nodules de manteau retrouvées en surface de la Terre ont été utilisées comme traceur pour déterminer le brassage du manteau induit par la convection. À la fin des années 90, la détermination des anomalies de vitesse dans la propagation des ondes sismiques et les composantes non radiales du champ de gravité terrestre ont montré que l'interface du manteau avec le noyau est constitué de deux matériaux distincts : un matériau résultant de la différenciation du manteau primitif et un matériau constitué de roches basaltiques recyclées dans le manteau lors de la subduction des lithosphères océaniques. Des modèles rendant compte du mélange de la croûte et du manteau pendant la convection ont permis de rendre compte de certaines hétérogénéités décelées près de l'interface avec le noyau. De plus ils conduisent à prédire le développement d'un large courant chaud dans le manteau inférieur expliquant les anomalies de vitesse sismique sous l'Afrique et le soulèvement récent du continent autour de l'Afrique du sud.

Roches et magmas

Le manteau chaud remontant sous la lithosphère a tendance à fondre. Cette fusion n'est jamais complète. Des données de laboratoire ont montré que le magma produit en joints de grains migre dans le manteau et ceci même lorsque les concentrations en liquide sont extrêmement faibles : une fraction de un millième de pour cent en volume ! La présence de ce liquide en joint de grains dans les roches du manteau augmente la ductilité de la roche. La circulation du magma en joints de grains permet à celui-ci de se concentrer. Cette concentration résulte de la poussée verticale du magma liée à son écart de densité avec la roche et des contraintes dues à la circulation convective dans le manteau. La formulation des équations décrivant le couplage entre l'écoulement de la phase magmatique liquide et du manteau plastique est l'objet de discussions après, récentes, et non définitives. Des solutions approchées de ces équations

montrent que le magma a tendance à s'organiser en poches kilométriques dont les caractéristiques sont voisines de celles de certaines chambres magmatiques sous les dorsales et sous les points chauds. Lorsque les chambres magmatiques se refroidissent, la précipitation de cristaux conduit à la formation d'une bouillie dont les propriétés mécaniques se rapprochent singulièrement des roches partiellement fondues du manteau. Lorsque ces poches arrivent en sub-surface, des fluides riches en CO_2 et H_2O sont exsolvés. La dynamique des chambres devient alors triphasée : solide, magma, gaz. Les éruptions volcaniques résultent des différents régimes liés à la séparation dynamique de ces trois phases. De nombreuses études ont porté sur les lois régissant ces séparations de phases. Les études portent à la fois sur l'établissement des lois rhéologiques régissant les différentes suspensions : gaz-poussière, gaz-liquide magmatique, liquide magmatique-cristal. La résolution des équations couplées du mouvement entre phases tenant compte de ces équations d'état montre le développement catastrophique d'agrégats qui sont à l'origine d'explosions volcaniques et de nuées ardentes.

Interactions fluide – roche

En arrivant en sub-surface, le magma chauffe fortement les fluides aqueux prisonniers ou non des roches volcaniques et sédimentaires. L'échauffement induit des circulations hydrothermales dans le sol qui peuvent éventuellement conduire à des explosions lorsque les fluides chauds se mettent à bouillir. La modélisation de ces processus dynamiques d'écoulement polyphasé a fait l'objet d'études de plus en plus réalistes. Ces travaux ont été couplés à des études physico-chimiques rendant compte des dissolutions, du transport et de la précipitation des phases minérales pendant la circulation de ces fluides. Ces processus couplés jouent un rôle fondamental dans le contrôle du cycle sismique, dans la genèse des dépôts miniers, le transport de polluants, l'évolution de la composition chimique de l'océan et de l'atmosphère.

Ainsi se développe dans les domaines touchant la Terre solide la modélisation du transport réactif qui traite de la modification de l'écoulement par les changements de porosité/perméabilité liés à la dissolution et à la précipitation des minéraux. Cette approche nécessite l'acquisition de données sur les propriétés thermodynamiques des minéraux et des solutions aqueuses et sur la cinétique de dissolution et précipitation des phases solides. Cette nécessaire acquisition de données se fait en parallèle du développement des lois cinétiques et du calcul des diagrammes de phases des systèmes étudiés. Un exemple concret est fourni par le problème du stockage des gaz à effet de serre comme le CO_2 dans les milieux géologiques : c'est un problème liant l'écoulement polyphasique (une phase CO_2 supercritique et une phase aqueuse) de fluides complexes dans un milieu poreux plastique avec lequel ils réagissent.

Modéliser les processus couplés

En conclusion, notre décade a conduit au développement d'une géodynamique moderne alliant la modélisation des écoulements de fluides polyphasés, la modélisation en laboratoire des équations d'état décrivant l'interaction physique et chimique des phases et des études géologiques et géochimiques à toutes les échelles spatiales et temporelles. Les études et la modélisation des processus que nous réaliserons pendant la prochaine décade devront conduire à l'intégration de plus de processus couplés à l'origine des phénomènes observés. Ceci devrait nous permettre d'appréhender ce qui s'est passé dans le passé et ce qui se passera dans l'avenir. En effet notre Terre et les planètes telluriques ont une température interne qui évolue au cours des âges géologiques. Donc tous les équilibres entre phases changent au cours du temps et vont changer dans l'avenir. Les études volcaniques et géochimiques ont mis en évidence des périodes pendant lesquelles la lithosphère continentale était plus chaude, les éruptions volcaniques plus intenses, la fusion partielle du manteau plus prononcée, comment les expliquer ? Quelles

sont les différentes étapes et séparations de phases qui ont marqué la différenciation de la Terre et des planètes ? Quel est le devenir de notre planète, certes pas à l'échelle de la vie de l'homme et de l'humanité mais à l'échelle de l'âge de l'univers ? Comment prédire les catastrophes naturelles telles que celles induites par le volcanisme et la tectonique ? Toutes ces questions vont pouvoir être élucidées dans l'avenir à partir du travail collectif des géodynamiciens, pétrologues, géochimistes intéressés par l'étude des processus d'écoulement polyphasés dans la planète Terre et ces sœurs du système solaire.

4 – DYNAMIQUE ET SISMOLOGIE

On cherche de plus en plus à appréhender la dynamique complète des systèmes terrestres, avec toujours plus d'attention aux couplages entre les différentes enveloppes. On peut tout de même séparer l'étude de la Terre « solide » (manteau, lithosphère), celle de la Terre interne liquide (noyau), et celle de systèmes complexes qui occupent une place particulière en terme de risques : les séismes et les volcans.

4.1 STRUCTURE, DYNAMIQUE ET ÉVOLUTION DU MANTEAU

Dynamique

La détermination de l'organisation de la convection mantellique reste un grand défi, avec, au premier plan, la nécessaire réconciliation entre images tomographiques et données géochimiques. On notera les belles avancées dans le domaine de la convection thermo-compositionnelle, en particulier grâce aux expériences de laboratoire réalisées en France, qui permettent d'envisager une grande

richesse de comportements. On est tenté de la mettre en parallèle avec la grande diversité expérimentée par les planètes du système solaire, et d'en voir la signature dans l'évolution temporelle du régime convectif sur Terre.

L'autre grand défi reste la prise en compte complète et cohérente de la tectonique des plaques dans les modèles convectifs. Plusieurs pistes ont déjà été explorées, certaines bénéficiant des progrès réalisés dans la modélisation des écoulements polyphasiques (*Voir* § 3).

Les contributions françaises sont importantes, en particulier dans le domaine de la modélisation analogique, et dans les domaines plus théoriques. Les équipes de modélisation numériques sont plus nombreuses et leurs efforts plus dispersés.

De récents développements expérimentaux, issus du couplage d'appareils de haute pression au rayonnement synchrotron, permettent aujourd'hui d'obtenir des données sur les équilibres de phase et les propriétés thermoélastiques et rhéologiques des phases mantelliques dans les conditions du manteau terrestre. La communauté de minéralogie physique française est dans ce domaine très bien placée et les efforts d'installation et/ou de développement de ces équipements sur les lignes des grands synchrotrons de France (ESRF, et le futur SOLEIL) ainsi que leur couplage avec les nouveaux outils de microanalyse géochimiques (*Voir* § 2) devraient être soutenus.

Sismologie

Plus de cent ans après les premiers enregistrements de sismogrammes, et un quart de siècle après les premiers modèles tomographiques, la sismologie demeure la discipline reine de la géophysique interne. La situation actuelle est contrastée, faisant apparaître à la fois un énorme potentiel encore à exploiter dans l'énorme masse de données accumulées au fil des ans, mais aussi de gros efforts instrumentaux à réaliser pour couvrir mieux la surface (en particulier les océans) et pour s'attaquer à des cibles spécifiques : volcans, failles actives, structures profondes.

• **Modèles tomographiques :** Les modèles tomographiques du manteau ont maintenant atteint une résolution impressionnante, confirmant la présence de plaques lithosphériques plongeantes dans le manteau inférieur. Des questions demeurent quant à la signature des panaches mantelliques et des super-panaches. La couche D'' à la base du manteau et la zone de transition (660-400 km) soulèvent encore des interrogations. La tomographie de la lithosphère continentale révèle une structure complexe où les effets de variations thermiques et chimiques se combinent. Alors que la production des gros modèles tomographiques globaux est devenue une spécialité très américaine, la France occupe une bonne place dans les études plus ciblées (failles, volcans, lithosphère continentale), et dans des études thématiques. Elle continue à jouer un rôle important dans l'acquisition des données (réseau Géoscope), en instrumentation et en méthodes de traitement des données. Elle est également à l'origine d'une nouvelle technique très originale, basée sur la corrélation croisée des enregistrements de la coda sismique.

• **Avancées théoriques :** La sismologie est aussi une discipline à part entière avec ses développements théoriques et méthodologiques. On notera en particulier une meilleure prise en compte des effets de diffusion, et la belle percée dans la modélisation de la propagation des ondes grâce à la méthode des éléments spectraux et de ses dérivés.

Dans les deux cas, la France a été à l'origine de ces avancées, favorisées par des interactions avec d'autres domaines de la physique : acoustique, optique et mathématiques appliquées.

Du point de vue de l'organisation du territoire, on note un regroupement autour de trois gros pôles (Paris, Strasbourg, Grenoble) qui gèrent des parcs nationaux, entourées de plus petites équipes qui apportent des contributions souvent originales. De nombreux projets se déroulent à l'échelle européenne ou internationale.

L'objectif d'un modèle de Terre tri-dimensionnel de référence devrait occuper une place importante au cours des prochaines années.

Géochimie

Après les grandes percées et envolées des années 70, la géochimie est aujourd'hui une science mature. Tous les systèmes isotopiques radioactifs sont maintenant utilisés, et les améliorations analytiques sont permanentes (amélioration d'un facteur 10 pour les isotopes du plomb grâce à la technique « multispiké »). L'avènement des micro-sondes et nano-sondes permet l'accès aux processus de fractionnement (Voir §2) et les grandes avancées faites dans le domaine des spectromètres de masse à source plasma autorisent aujourd'hui l'étude des fractionnements isotopiques de nombreux éléments chimiques.

De nouvelles voies sont donc ouvertes dans le traçage des marqueurs entre enveloppes externes et internes de la planète. L'effet des processus ayant lieu à basse température dans les océans et l'atmosphère sur la composition du manteau terrestre devrait donc pouvoir être mieux évalué. De même l'origine des hétérogénéités chimiques observées dans les roches volcaniques devrait pouvoir être mieux cernée.

Au cours des 5 dernières années, la communauté géochimique française a cherché à rationaliser ses équipements, certains centres recevant un label national (Voir §2). Cet effort doit être poursuivi.

Champ de gravité et géodésie

C'est du côté des petites longueurs d'onde du champ de gravité que l'on attend des avancées, grâce aux satellites CHAMP et GOCE. Ces mesures, globales et précises, devraient apporter des contraintes importantes sur la dynamique de la lithosphère continentale, surtout si elles sont combinées à des modèles tomographiques. Les variations temporelles du champ de gravité (satellite GRACE) ouvrent également de nouvelles perspectives. Dans leur composante de variation séculaire, on pourra rechercher la signature de mouvements profonds et tenter d'estimer la part de dérive

du pôle qu'ils provoquent. Le grand défi est d'identifier et séparer les contributions des diverses enveloppes de la Terre (atmosphère, hydrosphère, manteau, noyau, etc).

4.2 STRUCTURE, DYNAMIQUE ET ÉVOLUTION DU NOYAU

Dynamique et modélisation

L'avènement, en 1995, des premiers modèles numériques 3D de dynamos convectives a sans conteste marqué un tournant dans l'étude du noyau et de l'origine du champ magnétique. Le succès de deux dynamos expérimentales quatre ans plus tard à Riga et à Karlsruhe a constitué une autre étape importante.

On sait donc à présent reproduire, numériquement et expérimentalement, ce phénomène physique omniprésent dans l'univers. Le succès de l'approche numérique est particulièrement frappant pour la Terre : les modèles reproduisent la géométrie dipolaire du champ magnétique terrestre et des inversions du champ ont pu être observées, au point que ces modèles peuvent servir de guide dans les études paléomagnétiques. Même si des progrès importants ont été réalisés dans la mesure des propriétés thermoélastiques et relations de phase des constituants du noyau par la communauté minéralogique, en particulier française, la poursuite de cette approche est nécessaire et doit être soutenue. D'autant que les paramètres utilisés dans les modèles sont très éloignés de ceux, hors d'atteinte, qui correspondraient au cas terrestre. On pense aujourd'hui que les modèles numériques ne fonctionnent pas dans le même régime dynamique que le noyau terrestre.

Les développements numériques et expérimentaux actuels visent donc à explorer les régimes dynamiques pertinents grâce à l'étude et la paramétrisation des phénomènes sous-maille. On ne sait encore que très peu de

choses sur les caractéristiques de la turbulence magnétohydrodynamique dans une sphère en rotation rapide. La France est active dans ce domaine mais la taille des équipes impliquées (à Grenoble et Paris) est encore sous-critique.

Les implications sont nombreuses : ré-évaluation du couplage noyau-manteau, avec d'importantes conséquences sur la dynamique du système solaire (interactions en cours entre géophysiciens et mécaniciens célestes), contraintes sur les bilans énergétiques, liens avec la circulation profonde dans les planètes géantes, et un fort potentiel de collaborations entre géophysiciens, physiciens, mécaniciens et astrophysiciens.

Observations

Du côté des observations, les perspectives les plus prometteuses résident dans les cartographies globales du champ magnétique réalisées grâce aux récents satellites Ørsted (danois) et Champ (allemand). On peut maintenant explorer les variations à petites échelles du champ. Le défi est désormais une meilleure séparation des effets magnétiques internes et externes, qui nécessitera une collaboration active entre spécialistes des deux communautés concernées. La France, à travers l'Institut de Physique du Globe de Paris, est bien positionnée et défend activement le projet européen Swarm (3 ou 4 satellites magnétiques sur des orbites couplées).

Pour autant, les avancées les plus originales ont été obtenues grâce aux données « classiques » d'observatoire : découverte des ondes de torsion et d'ondes de type Magnétique-Coriolis-Archimède, et propriétés (surprenantes) des secousses magnétiques. La question des mécanismes d'excitation de ces différentes ondes et de leur rôle dans la dynamo est maintenant posée.

Les données gravimétriques et géodésiques apportent également des contraintes sur la dynamique du noyau. La précision des données continue à s'améliorer, en particulier grâce à une meilleure prise en compte des effets

du à l'atmosphère et aux océans. L'identification des modes de Slichter (modes de translation de la graine solide dans le noyau liquide) reste un enjeu majeur. Pour autant, c'est l'étude de la réponse de la Terre aux forçages gravitationnels qui apporte les contraintes les plus importantes sur le couplage noyau-manteau. À noter la récente détermination de la taille du noyau liquide de Mars, grâce à l'analyse de ce type de données récoltées par Mars Orbiter. Ce qui fait d'autant plus regretter le coup d'arrêt donné par le CNES au programme martien de la France.

4.3 SYSTÈMES COMPLEXES ET RISQUES NATURELS : SÉISMES, VOLCANS

Séismes

L'étude des mécanismes de la rupture sismique a connu d'importantes avancées. L'observation que la redistribution des contraintes statiques provoquée par un tremblement de terre pouvait contrôler la localisation du déclenchement des séismes suivants a ouvert de nouvelles pistes où se combinent rôle des hétérogénéités et lois de friction. Un autre élément déterminant a été le rapprochement des physiciens, des mécaniciens et des géophysiciens autour de ces deux ingrédients. Ce rapprochement est particulièrement notable en France où il a été porté par plusieurs GdRs et Écoles. L'importance de lois de friction où interviennent l'histoire du contact où la vitesse de glissement s'est affirmée, et les conséquences sur le déclenchement dynamique des tremblements de terre sont en plein essor.

En parallèle, un grand programme français et européen s'est mis en place pour l'étude *in situ* des failles actives, avec le Golfe de Corinthe comme chantier privilégié. L'objectif est au travers d'une observation multiparamètres et multiéchelles d'étudier les processus pré-, co- et post-sismique. En particulier, un aspect fondamental est de comprendre et formuler le

rôle des fluides dans la mécanique des tremblements de terre.

Parallèlement, ces dernières années ont vu des avancées remarquables dans la modélisation et la simulation numérique de la rupture sismique et des interactions entre segments de failles, ouvrant la possibilité d'inversions dynamiques complètes. Les équipes françaises ont joué un rôle moteur dans ces domaines.

L'objectif à long terme est de parvenir à prédire les tremblements de terre, ce qui ne pourra se faire qu'en combinant une approche théorique rigoureuse et une surveillance fine des zones à risque.

Risque sismique

Si la prédiction des séismes reste un enjeu majeur, force est de constater que les succès les plus flagrants des sociétés humaines face à ces catastrophes résident dans une meilleure prise en compte de leurs effets sur les constructions.

Plusieurs ACIs ont favorisé l'émergence d'une approche complète du risque sismique, depuis la préparation et le déclenchement des tremblements de terre jusqu'aux conséquences sur les bâtiments et sur la société. Cet effort concerté a rassemblé les différents organismes de recherche, du plus fondamental au plus appliqué.

L'étude du risque sismique s'est ainsi renforcée. Le principal objectif est de prévoir ce que serait le mouvement du sol en tout point de la surface en cas d'un fort séisme. On sait que de fortes amplifications se produisent dans les bassins sédimentaires où sont souvent bâties les villes. On a pu montrer également le rôle des bâtiments eux-mêmes sur cette amplification. Beaucoup de ces études utilisent l'enregistrement du bruit de fond sismique pour cartographier les réponses du sous-sol. La France est bien engagée dans ces études, en particulier à travers le RAP, réseau accélérométrique permanent, piloté par les laboratoires universitaires en association avec des organismes opérationnels (LCPC, BRGM, CEA, IRSN).

Volcans

La prévision de l'aléa volcanique a sensiblement évolué avec d'une part l'augmentation des systèmes de surveillance structurés autour des Observatoires volcanologiques et, d'autre part, les progrès réalisés dans la modélisation des différents aspects de fonctionnement d'un volcan : stockage pré-éruptif, ascension des magmas dans les conduits et dégazage, stabilité des édifices. La validation de ces approches demande de concentrer les études sur un petit nombre de volcans en activité représentatifs des différents dynamismes et aléas associés. Il est également important d'aborder ces études

de façon multidisciplinaire en combinant les différents types d'approches méthodologiques : suivi du comportement mécanique des édifices, avec entre autres l'utilisation de techniques satellitaires, imagerie géophysique 3D, modélisation physique des éruptions, suivi géochimique des effluents (gaz, eaux, laves). La confrontation des informations apportées par ces différentes disciplines sur un même système volcanique permet l'établissement de scénarios éruptifs réalistes, complets et validés scientifiquement, les seuls à même de permettre à plus long terme une prévision du risque, et susceptibles d'être exportés vers d'autres volcans actifs.

ANNEXE

LISTE DES ACRONYMES

ICP-MS	Inductively coupled plasma-mass spectrometry
MC-ICP-MS	Multi Collection-Inductively coupled plasma-mass spectrometry
ENS	École Normale Supérieure
CRPG	Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques
USTL	Université des Sciences et Technologies de Lille
CRMC2	
LMCP	Laboratoire de Minéralogie-Cristallographie de Paris

IPGP	Institut de Physique du Globe de Paris
INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
ESRF	European Synchrotron Radiation Facility
ACI	Action Concertée Incitative
RAP	Réseau Accélérométrique Permanent
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
BRGM	Bureau des Recherches Géologiques et Minières
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique
IRSN	Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire