

PLANÈTE TERRE : STRUCTURE, HISTOIRE ET ÉVOLUTION

Jean BESSE
Président

Jean-Philippe Amans
Nicolas Arnaud
Maurice Brunel
Fabrizio Cecca
Jérôme Dymont
Rémi Eschard
Christian France-Lanord
Christophe Lecuyer
Jacques Malavielle
Denis Mangin
Jean Marcoux
Catherine Mevel
Florentin Paris
Franck Poitrasson
Jean-Patrick Respaut
Patrick Schibler
Jean-Claude Soula
Paul Tapponnier
Pascal Tarits
Jean Virieux

Le regard et la compréhension que nous avons de la Terre se sont profondément modifiés depuis plus de trente ans, avec l'émergence de la tectonique des plaques et d'idées nouvelles qui ne cessent d'ailleurs de progresser sur la formation et la dynamique de la Terre depuis 4,5 milliards d'années.

Cette vision globale du fonctionnement de notre planète, et la mise en évidence de très nombreux couplages entre les différents réservoirs et enveloppes, ont profondément modifié les méthodes des Sciences de la Terre. Les recherches de pointe commencent aujourd'hui à étudier la dynamique interne et la mettre en relation avec celle des enveloppes externes, atmosphère, océan et biosphère, ou encore à étudier avec des outils des sciences de la terre solide les autres corps du système solaire. Les études multidisciplinaires sont déjà largement généralisées et sont ouvertes sur la biologie ou la physique, anticipant les « découvertes » récentes d'action voulues par les directions scientifiques. Chaque communauté contribue en effet à développer des scénarios cohérents et quantifiables reliant les changements majeurs de l'environnement terrestre aux différentes causes possibles qu'elles soient internes ou externes.

Les progrès sont sans aucun doute liés aux avancées méthodologiques et instrumentales, de la nanno-sonde jusqu'aux données satellitaire,

qui permettent des observations de plus en plus sophistiquées. Les progrès en matière de calculateurs permettent maintenant de proposer des modèles performants qui permettent d'étudier la sensibilité de réponse d'un système à des paramètres physiques, par exemple pour le climat, l'étude de la convection ou la dynamo terrestre. Si une meilleure compréhension des systèmes terrestres internes ou externes résulte de cette démarche, jamais la modélisation ou le choix d'observatoires de mesure n'ont eu autant besoin d'être confrontés aux observations, et contraints par une histoire rigoureuse de notre planète, confortant donc des opérations de terrain ciblées sur ces nouvelles exigences et des problèmes scientifiques bien posés.

Une partie environnementale importante incombe à notre communauté : il s'agit des recherches sur les risques naturels comme le risque volcanique et sismique ou les risques dits « géomorphologiques » comme les glissements de terrain. Nous apportons également de nombreuses réponses sur les problèmes de déchets nucléaires et leur stockage, ou de pollutions diverses. Depuis plusieurs années, une démarche clef pour l'étude des risques consiste à étudier, de façon systématique, des sites choisis au plan mondial non seulement pour leur intérêt scientifique propre, mais aussi pour leur fort potentiel de risque. Il s'agit là d'une démarche essentielle pour mieux comprendre les mécanismes fondamentaux de déclenchement des catastrophes naturelles et contribuer à en amoindrir les effets.

Nous adopterons ici un plan montrant en fonction des champs disciplinaires de la section 11 les grandes questions scientifiques ou de politique scientifique à affirmer. Un colloque de prospective à Vulcania a été organisé par l'INSU à l'automne 2002. Il n'est donc pas surprenant de voir une large partie des thématiques retenues dans ce colloque comme programme ou futur programme développées ici, et souligne de façon exemplaire la réactivité et l'efficacité d'un couplage étroit entre institut de programmation et département du CNRS lorsqu'il fonctionne bien.

Enfin, nous ne pouvons nous contenter

d'indiquer des pistes scientifiques sans s'intéresser à l'organisation humaine et reprendrons les conclusions de l'ancienne section 11 car aucun progrès n'a été établi.

– la section 11 du Comité national est très préoccupée par les sérieux risques de pertes de compétence, notamment en géologie de terrain, voire de disparition de métiers ;

– une politique d'emploi et de promotion de techniciens et d'ingénieurs est un enjeu majeur des années à venir pour nos disciplines ;

– les collections constituent une référence essentielle pour de nombreux axes de recherche actuels et futurs. Leurs conditions de préservation et d'accès sont souvent déplorables. Il faut dégager des moyens afin de préserver et de rendre accessible ce patrimoine scientifique irremplaçable.

1 – DYNAMIQUE INTERNE DE LA PLANÈTE : DE LA GRAINE À LA SURFACE

1.1 APPROCHE GÉOPHYSIQUE ET TECTONIQUE

L'imagerie haute résolution : une priorité absolue

• L'accès à la structure intime de notre planète via la détermination de la distribution spatiale de paramètres physiques ou chimiques (vitesses sismiques, anisotropie, atténuation, densité, aimantation, conductivité électrique) reste une des grandes priorités, du noyau à la surface. Les techniques et les outils actuels doivent donc permettre d'atteindre une résolution de plus en plus grande et ce à toutes

les échelles, conduisant à aborder de nouvelles questions tant sur le plan méthodologique (modélisation de la physique des milieux très hétérogène) que sur le plan thématique :

- à l'échelle du noyau, structure et nature de la dynamique ;

- à l'échelle du manteau, caractérisation des réservoirs physico-chimiques, traçage du recyclage mantellique ;

- à l'échelle de la croûte (profonde et superficielle) sur la nature et l'origine des zones sismogènes, des failles actives, de la plomberie des volcans ;

- en subsurface, la caractérisation des modes de transport des fluides et des solides dans des encaissants (nappe, réservoir, volcans, failles).

- Un effort sans précédent est donc en cours dans plusieurs pays pour se donner les moyens d'obtenir des images haute résolution des structures terrestres. On en mesure l'importance lorsqu'on constate par exemple comment la tomographie sismique a profondément bouleversé notre vision encore récente de la convection mantellique à grande échelle.

Cet effort **est insuffisant** en France. Les parcs de stations géophysiques (sismique, GPS, autre) sont encore pauvres en regard d'autres pays comme l'Allemagne ou la Grande-Bretagne. La voie européenne, qui nous est souvent rappelée, n'est viable que si nous pouvons intervenir avec un poids scientifique (sans trop de problème) et technologique (insuffisant) équivalent aux autres partenaires (Allemagne, UK) se trouvant aussi dans un effort collectif européen. **Un TGE géophysique serait certainement à considérer.**

- L'objectif est donc pour ces prochaines années **de tout mettre en œuvre** pour réaliser **une réelle imagerie haute résolution** en se concentrant sur un petit nombre de chantiers dans lesquelles des nappes de capteurs doivent être déployées. Plusieurs chantiers ont été définis dans les programmes passés et les ACI ou sont en gestation dans les prochains programmes. Cet effort doit s'accompagner

d'une implication accrue dans la modélisation de la physique des milieux très hétérogènes, une étape essentielle pour l'analyse et l'interprétation de hautes densités de données.

- Enfin, comme il a été souvent souligné dans des prospectives antérieures, il est indispensable de développer une approche multidisciplinaire via l'analyse quantitative conjointe de données géophysiques hétérogènes. Quoique souvent mentionnée dans les prospectives passées, cette approche reste insuffisamment développée. Il semble que nous ayons maintenant les moyens de progresser significativement dans cette direction grâce à de bons modèles de propriétés physiques basées notamment sur les expériences de laboratoire et dans certains cas une densité comparable de données de différentes nature (sismologique et sismique, gravimétrique, magnétotellurique, magnétique, géochimiques) conduisant à des avancées certaines sur la structure de la lithosphère et de la croûte notamment dans les zones de failles actives.

- L'approche pluridisciplinaire ne doit pas rester purement géophysique. Il est impératif d'y adjoindre des approches variées comme la modélisation physique et chimique du manteau (voir ci-dessous), qui imposent la connaissance des propriétés thermodynamiques des minéraux, afin de déterminer les caractéristiques géophysiques des matériaux crustaux et mantelliques (par exemple vitesses sismiques, dépendance T, P). Un soutien particulier doit être apporté au maintien au meilleur niveau des équipes qui travaillent sur ces sujets, tant du point de vue expérimental que de la modélisation. Cette caractérisation doit aussi s'appliquer à la compréhension des processus physico-chimiques élémentaires dans les assemblages cristallins et multiphasés.

- Des efforts particuliers doivent être entrepris :

- en zone de subduction afin d'apporter des éléments structuraux sur le problème du recyclage en liaison avec les études physico-chimiques et de mieux résoudre la structure de zone sismogène ;

– dans le manteau océanique et les régions d'interaction panache/lithosphère : un pan entier du manteau terrestre reste peu ou mal connu. Les outils commencent à se développer (stations géophysiques sous-marines pour les études tectonique et sismo-tectoniques, cartographie gravimétrique haute résolution, étude et mesure de la déformation) ;

– dans l'étude des processus géodynamiques (accrétion, subduction, circulations de fluides chauds ou froids etc.) et leurs conséquences en termes de risque sur les régions côtières (risque sismique, tsunamis, etc.) grâce aux données de micro-bathymétrie, de réflectivité acoustique haute résolution, de magnétisme et de gravimétrie fond de mer, de géodésie sous-marine, voire de sismique tractée près du fond, et aux développements des technologies de positionnement et d'imagerie géophysique sous-marines. Il faut continuer à développer de nouveaux vecteurs capables de porter ces technologies (ROV, AUV, etc.). Une telle approche implique le choix de chantiers ciblés sur lesquels seront menées des observations récurrentes, voire l'installation d'observatoires fond de mer. La focalisation croissante des cibles, consécutive à la meilleure résolution des différentes techniques géophysiques, ne doit pas conduire à écarter a priori l'exploration, lorsque la majeure partie des fonds sous-marins demeure inexploree ;

– dans l'étude de la lithosphère continentale, notamment sous les chaînes de montagne : le futur est clairement dans l'intégration de données multiples dans l'interprétation structurale et dynamique (observations géologiques, géochimiques, modélisation de la rhéologie) ;

– dans l'implication de techniques géophysiques haute résolution vers l'étude des failles actives, qui reste très insuffisante. Le développement d'un parc sismique à cet effet est de bon augure pour l'avenir, mais il est très clair que les techniques d'imageries développées pour les études environnementales s'appliquent directement à ce problème et beaucoup reste à faire. Entre l'échelle de la tranchée et l'échelle du segment de faille imagé en période co-sismique, il reste une

échelle entre 10 m et 100 m très mal connue et pour laquelle nous disposons des outils nécessaires. Il faut promouvoir cette approche indispensable à une meilleure estimation de l'aléa sismique ;

– sur les volcans : l'implication des techniques géophysiques de haute résolution réclame dans le contexte volcanique des démarches très spécifiques. De la surveillance (quelques capteurs d'alarme) à l'observation, il y a un seuil quantitatif à franchir de manière à mettre à niveau la démarche géophysique à celle effectuée par la géochimie. La caractérisation et le suivi des réservoirs, la stabilité des édifices, les déplacements de magma et des contenus en fluides hydrothermiques sont des problèmes clef. Pour cela, il est préférable de se concentrer sur des objets peu nombreux sur lesquels un effort important sera effectué. Il est certain que cette démarche ne permet pas la comparaison de systèmes géologiques mais elle est nécessaire si nous voulons comprendre la mise en place des volcans, leur évolution, voire la prédiction des éruptions volcaniques et l'étendue de leur impact ;

– en géophysique spatiale, où plusieurs satellites en magnétisme et gravimétrie/géodésie fournissent des données ou sont en instance de lancement. Il est cependant regrettable que l'investissement limité des équipes ST dans le spatial nous empêche d'être leaders dans des nouveaux projets. Par contre, la communauté est assez impliquée dans les mesures génériques (radar, GPS) mais pas suffisamment à l'interface de la physique de la mesure, essentielle pour progresser dans la résolution des données et dans les interprétations sous-jacentes. Un aspect très important est la détermination des mouvements verticaux qui nécessite de s'impliquer dans la physique de la donnée GPS en liaison avec l'étude de l'atmosphère et des couvertures végétales. C'est avec la prise en compte de l'ensemble des paramètres affectant la donnée GPS que l'on pourra progresser avec une précision maintenant nécessaire de quelques mm.

Une approche dans l'espace et dans le Temps

Le suivi temporel de l'évolution de certaines caractéristiques physiques des milieux géologiques et hydrologique est un domaine où l'approche géophysique est fondamentale. Ce suivi temporel se caractérise par des échelles de temps inférieures à la seconde (séismes) jusqu'à plusieurs milliards d'année (tomographie, paléo-champ magnétique) et recouvrent des thématiques importantes comme :

- l'évolution des nappes en hydrologie (caractérisation des réservoirs naturels et artificiels), et plus généralement en environnement la surveillance des zones à risque de glissement de terrain et l'étude des mécanismes de déclenchement ;

- l'étude de la déformation et des mouvements instantanés à l'échelle régionale et à l'échelle des plaques à partir du GPS qui doivent être combinés à l'étude tectonique et géomorphologique à grande échelle ;

- l'étude des déformations récentes et des risques géologiques naturels dans les régions de tectonique active et de volcanisme : il faut privilégier l'analyse spatiale (cartographie avec télédétection métrique), temporelle (avec prise en compte de la non-stationarité) et comparaison systématique du court terme (100 ans) avec le long terme (10 000 ans et plus). En aval se situent tous les débouchés modernes sur les études de risques volcaniques et sismiques. La combinaison de techniques complémentaires est un « must » : âges des mouvements (entre autres datations cosmogéniques), InSar, corrélation images optiques haute résolution, réseaux denses de stations GPS continues, MNT haute résolution, etc. La dynamique de la naissance et de la propagation des failles ou des ruptures à diverses échelles de temps est une partie essentielle de cette action ;

- l'étude systématique des liens étroits entre les activités du noyau, du manteau, de la lithosphère, et des enveloppes externes (y compris la biosphère), de l'évolution du climat à la tomographie pour tenter de répondre quantitativement aux nombreuses questions

concernant l'origine, le devenir, le mode de fonctionnement de systèmes internes ou externe. Avec, en complément, la réalisation et l'utilisation de modèles de circulation globale internes et externes ;

- l'étude du champ magnétique terrestre à toutes les échelles spatiales et temporelles : On suspecte en effet depuis longtemps que les conditions aux limites hétérogènes et lentement variables imposées par le manteau en convection aient pu influencer la dynamique du noyau et donc le comportement au long terme du champ géomagnétique. Les résultats récents de la simulation numérique ont contribué à conforter cette hypothèse. Le paléomagnétisme doit continuer à apporter des éléments de réponses pertinents à la question de l'évolution du champ magnétique au long terme, avec un effort pour documenter l'évolution de l'intensité du champ au même titre que sa direction, préciser les mécanismes d'inversions, rechercher la trace de la « naissance » de la graine dans les données archéennes. Ces deux derniers points adressent directement une partie de l'histoire et de l'évolution de la convection terrestre.

La planétologie : des apports fondamentaux

Nous soulignons tout l'intérêt de la planétologie comparée, c'est-à-dire d'une approche comparative entre la Terre, Mars et également la Lune et les satellites de Glace des planètes géantes. Ainsi on peut tester sur ces corps planétaires les théories développées pour la formation et l'évolution géologique de la Terre.

Les récentes missions d'exploration de Mars de la NASA, Mars Global Surveyor, en orbite depuis 1997, puis Mars Odyssey, en orbite depuis 2001, ont renforcé l'hypothèse que Mars et la Terre étaient probablement très semblables il y a 4 milliards d'années. Champ magnétique interne, atmosphère dense et relativement chaude, et peut-être même, tectonique des plaques étaient donc probablement

présents sur les deux planètes à cette époque. L'intérêt de la communauté des Sciences de la Terre porte donc majoritairement sur la planétologie comparée, l'étude de Mars et de la Lune mais aussi avec celle de Mercure et des satellites des planètes géantes, et sur l'origine du système solaire avec l'analyse d'échantillons des différents corps du système solaire. Ainsi on peut tester sur ces corps planétaires les théories développées pour la formation et l'évolution géologique de la Terre :

- pour la Lune, trois missions compléteront les retours d'échantillon des missions Apollo et Luna des années 1970 ;

- deux missions orbitales permettront une cartographie complète de la minéralogie lunaire, de la subsurface avec un radar pénétrant et du champ de gravité sur les deux faces de la Lune. La mission sismologique permettra de caractériser la taille du noyau de la Lune ;

- pour la communauté des Sciences de la Terre, et également pour le groupe Système Solaire du CNES, la mise en place d'un réseau Géophysique à la surface de Mars reste donc la première priorité de toutes les missions NASA et ESA vers Mars ou Mercure ;

- une autre révolution se prépare progressivement avec la multiplication de retours d'échantillons des petits corps ou de vents solaires. Une mission de retour d'échantillon est ainsi prévue par la NASA d'ici 10 ans pour la Lune. Ces missions vont profondément marquer notre vision de l'exploration du système solaire.

L'intérêt de la communauté des Sciences de la Terre pour une forte participation à ces missions martiennes, lunaire ou à l'analyse d'échantillons est énorme. Malheureusement, le 30 avril 2003, le CNES décidait d'abandonner à la fois le leadership de la mission NetLander et ses contributions techniques à la mission. La crédibilité des scientifiques français sera fortement affectée si le désengagement du CNES après 15 ans d'efforts en exploration martienne se confirme alors que les objectifs scientifiques initiaux de Mars 1996 (en particulier ceux des petites stations) ne sont toujours pas réalisés.

Avec le CNES, elle peut et doit jouer un rôle semblable en participant activement à la mise en place progressive d'un Observatoire Géophysique et Météorologique sur Mars en collaboration avec l'ESA et la NASA.

Enfin, un afflux récent de données spectrales et de géochimie orbitale concernant la Lune, Mars et certains astéroïdes relancent également l'engouement pour la planétologie comparée. Interpréter la fantastique masse de données que constitue la couverture globale minéralogique et chimique d'une surface planétaire en terme de processus pétrologiques implique donc, au-delà des traitements automatisés, un effort conceptuel important pour lequel les pétrologues devraient avoir un rôle moteur.

1.2 APPROCHE GÉOCHIMIQUE ET PÉTROGRAPHIQUE

En géochimie/pétrologie les progrès thématiques des 5 dernières années auront été marqués par le développement de l'étude des couplages entre les diverses enveloppes terrestres, le calcul de bilans globaux, et la maîtrise du paramètre « temps », transversal dans notre section. Deux lieux de couplage auront été particulièrement développés : le manteau avec les zones de dorsale et de subduction et la surface avec la construction des chaînes de montagne et le début de calculs de bilans masse dus à l'altération et à l'érosion (en relation avec les cycles géophysiques externes), en rassemblant une communauté large venue d'horizons très divers, et souvent d'autres sections que la section 11. Les développements méthodologiques ont été marqués par le développement considérable de la micro-analyse notamment par ablation laser couplée à l'ICP-MS ou aux spectromètres de masse, et l'analyse de nouveaux éléments ou de nouveaux isotopes impliqués dans l'étude des couplages entre enveloppes, notamment ceux de l'Hf et ceux du Pb (analysés maintenant avec une précision inégalée jusqu'à présent), les isotopes cosmogéniques Be et Al, l'hélium, et

les métaux. Parallèlement des progrès considérables ont été accomplis en géochimie théorique sur la compréhension des systèmes physico-chimiques, notamment les systèmes complexes multiphasés, au prix d'études méthodologiques et expérimentales difficiles. En résumé, au terme de ces 5 années, on analyse mieux et on comprend mieux ce que l'on analyse.

Ces progrès, tant méthodologiques que thématiques, sont allés de pair avec une caractérisation pétrologique de plus en plus fine des matériaux géologiques. La pétrologie, qui s'est à l'origine fixée pour but de comprendre la genèse des roches et de rendre compte de leur diversité, a eu le souci croissant d'intégrer l'étude des roches dans une réflexion plus large, englobant l'évolution et la dynamique de la planète. Associée à la géochimie, la pétrologie permet de développer une approche géodynamique chimique et s'est fixée pour objectif de quantifier les transferts entre de grands réservoirs élémentaires et isotopiques d'extension planétaire (croûtes acides et basiques, noyau, différents « domaines mantelliques », etc.). Il nous semble légitime d'affirmer que la pétrologie est indispensable pour comprendre le premier ordre géologique lui-même. Le paysage scientifique et technologique a beaucoup évolué ces dernières années si bien que certaines études, qui pouvaient sembler utopiques il y a cinq ans, deviennent tout à fait envisageables. Dans la mise en œuvre de ces nouvelles techniques l'observation en lame mince est un passage obligé pour des raisons pratiques évidentes mais aussi parce qu'une analyse ponctuelle n'est interprétable que replacée dans son environnement pétrographique (paragenèses, zonations, relations texturales, etc.).

Les moyens expérimentaux de la pétrologie ont beaucoup évolué et notre base de données de propriétés thermodynamiques et cinétiques ne cesse de croître. Les techniques de caractérisation 3-D des formes cristallines permettent de mieux visualiser les relations mutuelles des phases dans les paragenèses rocheuses, et donc de mieux appréhender certains aspects des réactions pétrogénétiques.

Rôle majeur de la Géochronologie

Nous continuons à affirmer que la mesure du temps en géosciences est d'une importance capitale. Durant ces quatre années la géochronologie a été marquée par le développement analytique des méthodes d'échantillonnage ponctuel (sonde laser en $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, micro-carottages et sonde ionique en U/Pb), de progrès sur les bruits de fonds analytiques (notamment un U/Pb conventionnel), et sur l'analyse d'un grand nombre d'isotopes (MC-ICPMS), notamment des métaux, analysés à présent avec une précision jusque là inégalée. Parallèlement des efforts méthodologiques ont été accomplis pour comprendre le fonctionnement des chronomètres isotopiques considérés comme des systèmes physico-chimiques complexes, notamment en K/Ar s.l. et U/Pb. Il faut poursuivre les études méthodologiques permettant de comprendre le comportement physico-chimique des chronomètres et affiner notre compréhension de la notion de température de fermeture.

Propriété physico-chimique du manteau et de la croûte, Cinétique des processus

La mise en perspective 4D (x, y, z et temps) des images géophysiques et géochimiques de la Terre est bien sûr un pré requis pour passer à l'échelle d'un modèle global de type tectonique des plaques. Ce modèle est intégré sur une multitude d'échelles spatiales dont la première et la plus importante est l'évolution de l'échantillon dans le référentiel (Pression/Température). C'est en effet le seul référentiel terrestre qui influence, à travers profondeur et gradient géothermique, les propriétés extrinsèques des échantillons géologiques. Ce repérage (P,T,t) se fait à travers l'étude chimique et texturale des échantillons qui se conjugue en :

- thermobarométrie : calage P, T de l'échantillon ;
- pétrologie métamorphique : succession relative des étapes P, T ;

– géochronologie : calage temporel absolu des successions P, T ;

– caractéristiques géophysiques des matériaux crustaux et mantelliques (par exemple vitesses sismiques, dépendance T, P).

Ces quatre directions complémentaires doivent être soutenues toutes les quatre, notamment la pétrologie métamorphique qui a souffert d'un déficit de recrutement depuis quelques années. Les approches sont autant expérimentales, méthodologiques qu'appliquées, notamment en géochronologie. Elles ont aussi largement bénéficiées des progrès fait dans la compréhension des processus physico-chimiques à l'échelle du cristal et des nouveaux moyens d'analyse ponctuels.

Dynamique et composition du manteau actuel : approche en Géochimie

La cartographie géochimique 4D des rides, plateaux basaltiques (considérés comme la trace de l'initiation de panaches) et des OIB (évolution des panaches) sont déjà de vieux problèmes, mais toujours partiellement énigmatiques et surtout à la portée des nouvelles méthodes de caractérisation géochimique, notamment par l'analyse d'éléments chimiques (MC-ICPMS) jusqu'ici non mesurables mais importants pour étudier les échanges chimiques. Parmi les questions importantes à résoudre dans l'étude du manteau nous identifions :

– la dualité entre signature/définition thermique et/ou chimique des panaches mantelliques ;

– les interactions panaches/rides ;

– la subduction comme source essentielle du recyclage dans le manteau, quel matériel est subducté et en quelle quantité ? L'analyse très précise d'éléments tels que les isotopes du Hf et du Nd sera essentiel ;

– la composition du noyau via la composition du manteau (anomalies en ^{186}Os) ;

– la distribution radiale des éléments dans le manteau (manteau inférieur en particulier) pour les éléments radioactifs, l'eau et le carbone.

Croissance crustale, recyclage des matériaux crustaux, et origine du manteau lithosphérique sous-continental

Comment se forme la croûte continentale, et notamment la première croûte à l'Archéen ? Il n'y a toujours pas de réponse complète à cette question, ni sur l'évolution collatérale du manteau sous-continental. L'étude de nouveaux éléments chimiques et de nouveaux isotopes très fractionnés par la création de la croûte devrait permettre de répondre à ces questions. L'étude des Large Igneous Province (LIPS), déjà largement développée, pourra contribuer à ces réponses.

Que deviennent ensuite la croûte continentale et le manteau lithosphérique ? Peuvent-ils être recyclés, et comment ? Quels sont les marqueurs géochimiques de cette évolution (collisions et subduction continentale, érosion chimique et délamination). Une attention particulière devra être portée à la construction et l'évolution des cratons, l'âge et la composition de leurs racines et les raisons de leur stabilité.

La Terre primitive

La Terre primitive doit être étudiée tant du point de vue planétologique, de l'évolution d'un corps de taille moyenne caractéristique, mais aussi de ce qui fait son unicité (pour l'instant) : l'existence de la vie, largement liée à celle d'une atmosphère. La Terre primitive doit donc être abordée du point de vue géologique/géochimique, mais aussi du point de vue de la composition et de la différenciation des enveloppes externes, biosphère comprise, et notamment dans le couplage entre apparition/développement de la vie primitive et son évolution géologique. Une grande part

de l'étude géologique est déjà prise en compte par l'étude du manteau et de la croûte, de leur origine et de leur évolution. Parmi les questions importantes on note :

- histoire de l'accrétion (planétésimale différenciée vs. indifférenciée) ; comparaison planétaire ;

- l'étude des MORB et panaches au Protérozoïque et à l'Archéen reste essentielle, notamment avec les nouveaux outils/éléments accessibles ;

- quand et comment la différenciation initiale de la Terre s'est-elle produite, et quels ont été les mécanismes à l'œuvre dans le transfert de Fe vers le noyau ou le manteau inférieur ? Extraction du Noyau, quand et en combien de temps ?

- état du manteau primordial : homogénéité, convection thermo-chimique. Y a-t-il eu un océan magmatique sur la Terre ?

- la différenciation initiale est-elle à l'origine d'une partie des caractéristiques géochimiques des basaltes actuels ou archéens ?

- l'étude du comportement rhéologique et des mouvements avec une attaque couplée tectonique et géochronologique du Précambrien ancien ;

- comment l'évolution géologique a-t-elle influencé l'apparition de l'atmosphère primordiale, et quel a été le dégazage de la Terre ?

- comment l'évolution biologique se calait-elle sur les grandes étapes géologiques, sujet pour lequel l'interaction avec les paléontologues est essentielle ?

2 – ENVIRONNEMENT, RESSOURCES, DÉCHETS

2.1 MÉTALLOGÉNIE

La métallogénie demeure le parent pauvre de la communauté géochimique. Largement délaissée par les instituts miniers elle a du mal à émerger dans la communauté scientifique. Pourtant elle offre par excellence la vision de couplages entre enveloppes (croûte et manteau) et entre phases (fluides et solides). Des progrès méthodologiques notamment largement issus d'approches expérimentales permettent à présent de mieux comprendre les processus physico-chimiques élémentaires et devraient relancer l'intérêt de l'étude de la métallogénie pour caractériser les couplages entre enveloppes dans leur cadre géodynamique. De plus les évolutions physico-chimiques de ces métaux sont un analogue naturel extraordinaire des problèmes de pollution qui deviennent un élément prépondérant de l'étude de l'évolution des surfaces continentales anthropisées. La section pense donc qu'il faut à l'avenir soutenir les efforts de cette communauté pour se moderniser, et s'ancrer dans des cadres géodynamiques et des cadres économiques en rapports avec la pollution. Dans chacun de ces domaines nous recommandons d'insister sur :

- situer les transferts de fluides par rapport à la déformation crustale, à la rhéologie et à l'évolution thermomécanique de la croûte supérieure. Il faut relier les phases de migration précisément à l'histoire géologique (uplift, délamination crustale, magmatisme) grâce à un calage chronologique absolu (qui manque en général) et au développement de techniques nouvelles de datation sur les objets étudiés. Il y a là matière à une collaboration étroite avec des géophysiciens et des modélisateurs ;

- le cycle des éléments métalliques, depuis la source jusqu'au gisement (dissolution, transport, dépôt), mieux caractériser les sources des métaux notamment à travers des

traçages isotopiques, les mécanismes de préservation des gisements, et de dispersion ou stabilisation des concentrations. La collaboration et l'accès à certaines techniques analytiques (microsonde ionique, ablation laser-ICP-MS avec excellente discrimination en masse) sont fondamentaux ;

– l'acquisition de données thermodynamiques sur les complexes métalliques reste incontournable pour une meilleure compréhension et modélisation numérique du transport/dépôt des métaux à toutes températures.

2.2 MÉTALLOGÉNIE ET POLLUTION

Divers enseignements peuvent être tirés du comportement supergène des métaux à proximité de concentrations métalliques naturelles (mines, carrières), et de leur remaniement anthropique éventuel. En particulier la dispersion naturelle des métaux, leur séquestration dans des phases minérales néoformées, le transport sous forme de complexes organiques, inorganiques ou de particules (colloïdes ou particules de plus grande taille). Une grande partie des processus gouvernant l'altération des phases minérales primaires est contrôlé par les activités bactériennes. Il paraît logique de s'intéresser à la quantification du rôle des bactéries sur la dissolution des phases notamment sulfurées ou arséniées, et leur aptitude à modifier les systèmes (sulfato-réduction, néoformation de gaines silico-alumineuses, et piégeage de métaux par adsorption sur des minéraux finement divisés issus de l'activité bactérienne).

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

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

2.3 STOCKAGE DES DÉCHETS

Parmi les risques de nature anthropique, les problèmes de stockage de déchets est l'un des problèmes majeurs du début du siècle pour lequel les laboratoires de recherche en Sciences de la Terre sont de plus en plus sollicités. Le stockage des déchets radioactifs en formations géologiques profondes ouvre un vaste champ de recherches qui concerne directement de nombreux laboratoires en Géosciences. L'entreposage en surface ou en subsurface et la recherche de nouvelles matrices de confinement intéresse également plusieurs laboratoires en Géosciences pour les aspects « nouvelles matrices » (obsidiennes, apatite, monazite, néphéline, sphène, zirconolite, zircon, etc.).

Par ailleurs, les problèmes environnementaux liés au stockage souterrain de tous les types de déchets industriels, aux injections de fluides, et, d'une façon générale, à l'exploitation des réservoirs d'hydrocarbures, sont des domaines où de nombreux laboratoires en Sciences de la Terre sont amenés à investir dans les années à venir et à augmenter le partenariat avec les industries ou organismes concernés.

3 – PALÉO-ENVIRONNEMENTS

Les paléo-environnements sont un lieu de rencontre pour presque toutes les disciplines qui relèvent de la section 11. C'est de plus une thématique au cœur des préoccupations actuelles sur l'évolution des surfaces et interfaces continentales, de l'évolution à diverses échelles du climat et bien sûr de l'apparition et évolution de la vie sur Terre. Il est clair que ces travaux permettront de fournir également aux analystes de l'actuel des informations capitales susceptibles d'alimenter ou de valider les modèles prédictifs. La variabilité du système Terre dans le passé (climat, productivité, bilan du carbone, couplages, etc.) est à cet égard fondamental.

3.1 ÉVOLUTION ÉPISODIQUES EXTERNES ET INTERNES, GRANDS CYCLES :

L'étude de l'impact climatique des forçages externes et internes. À la variabilité naturelle du climat du Quaternaire (cycles glaciaires-interglaciaires et théorie de Milankovitch) s'ajoutent des forçages majeurs internes (volcanisme, tectonique, dégazages de méthane et de CO₂ etc.) et externes (astéroïdes) qui peuvent expliquer les changements de l'environnement du passé.

D'une part, l'évolution paléogéographique horizontale (distribution des surfaces continentales) et verticale (position des chaînes de montagne et des plateaux) influence le climat en jouant sur les circulations atmosphériques. D'autre part, l'ouverture des bassins et la paléo-bathymétrie modifient la circulation océanique. Ce sont donc des éléments clefs de la compréhension du contrôle de l'environnement terrestre. L'évolution géologique de la Terre détermine les conditions régnant à sa surface et il est assez clairement démontré par exemple que les changements paléogéo-

graphiques liés à la tectonique des plaques (et donc également à la dynamique terrestre interne) modifient profondément le paléo-environnement. Le rôle des cycles orogéniques ou du volcanisme est de plus en plus débattu en particulier en ce qui concerne leurs interactions avec le cycle du carbone.

Les recherches dans ce domaine sont bien sûr fondées sur les archives géologiques classiques, par exemple le message sédimentaire ou le paléomagnétisme, mais également sur d'autres disciplines non attendues il y a seulement cinq ans comme la sismologie (tomographie sismique).

Les modélisations climatiques géochimiques ou géophysiques aux échelles de temps longues apportent des tests de sensibilité aux divers processus de forçage. Ils sont largement fondés sur notre connaissance du fonctionnement de la Terre actuelle. Ainsi, la « référence actuelle » continue à constituer un élément fondamental pour ce domaine. Il est donc essentiel d'associer l'étude actuelle ou subactuelle des couplages entre climat – érosion et sédimentation à leurs reconstitutions géologiques.

3.2 CYCLE DU CARBONE

La question centrale reste de déterminer si la pression de CO₂ atmosphériques a varié sous l'influence de processus géologiques et a engendré certaines des grandes variations climatiques terrestres. À ce jour, nous n'avons pas de réponse claire même pour le Cénozoïque. De plus la connaissance des processus géologiques de contrôle du cycle du carbone est un élément important pour la maîtrise du cycle moderne du carbone même si les flux mis en jeu apparaissent faibles face aux flux anthropiques. Enfin de nouveaux éléments alimentent le débat comme les épisodes de dégazage de méthane. La recherche autour du cycle du carbone aux échelles de temps longues mobilise une communauté très diverse de chercheurs comprenant quasiment l'ensemble des disciplines des Sciences de la Terre. Les

principaux efforts réalisés tant à travers le programme ECLIPSE que le PNSE ont contribué à améliorer notre connaissance des mécanismes de contrôle du cycle du carbone et à étudier certaines périodes remarquables de l'histoire géologique. Si des résultats importants ont été obtenus, nous avons aussi pu mieux mesurer la difficulté de la tâche qui reste à accomplir pour réellement tester les hypothèses de contrôle du climat par le cycle du carbone.

Sur le plan des avancées, l'étude détaillée de grands bassins de rivières actuels a permis de mieux comprendre l'importance des divers paramètres de contrôle de l'érosion (température, tectonique, lithologie, climat etc.). Ces données servent à l'élaboration de modélisations géochimiques du cycle du Carbone aux échelles de temps géologique. Ainsi, les relations entre flux d'altération des silicates et température, relief ou érosion physiques ont largement progressé. En particulier, la connaissance de l'érosion des formations basaltiques et son rôle en tant que puits de carbone rapide est maintenant bien mise en lumière. L'étude de certaines périodes remarquables comme le Néo-Protérozoïque, le Néogène ou le Crétacé permettent de tester divers mécanismes de forçages géologiques du climat à travers le couplage des informations climatiques, géographiques, sédimentaires et des modélisations climatiques et géochimiques. La encore des questions demeurent :

– comment déterminer, et quels ont été les paléo-pressions de CO₂ atmosphérique ?

– comment déterminer le flux de CO₂ volcanique ? La recherche de meilleures reconstitutions tant sur le flux que sur le type de volcanisme est nécessaire. De même le potentiel flux de CO₂ métamorphique reste une énigme ;

– comment déterminer le flux d'érosion ? Pour des approches moins globales, l'utilisation des accumulations sédimentaires détritiques apporte des informations assez précises desquelles il est même possible de déduire des flux absolus. Cette approche nécessite cependant l'acquisition de bases de données adaptées. Enfin, l'érosion actuelle comporte encore bien

des zones d'ombre. La principale est que nombre des études reposent sur des données très ponctuelles dans le temps sur les grands bassins de rivières et des données de flux plus ou moins fiables. En particulier les flux particuliers de bassins majeurs tels que l'Amazone, le Gange-Brahmapoutre ou le Yangtse restent mal connus. Il serait essentiel sur quelques bassins :

1. d'acquérir des données sur le long terme (dizaine d'année) ;

2. d'étudier la variabilité glaciaire-interglaciaire.

Enfin des mécanismes tels que l'altération inverse, les flux des nappes continentales aux océans ou les processus d'échanges dans les zones deltaïques sont autant d'inconnues qui limitent la qualité des modèles ;

– comment déterminer le flux de précipitation des carbonates et d'enfouissement de carbone organique ? L'essentiel de notre connaissance dans ce domaine provient d'inventaires des dépôts sédimentaires. Les mécanismes de contrôles restent là aussi largement méconnus. Les relations avec les flux de nutriments, la température ou encore les flux détritiques sont mal maîtrisés. Le problème général du contrôle de la préservation de la matière organiques dans les sédiments est encore largement ouvert ;

– quelle est l'importance des processus biologiques ?

3.3 ÉROSION ET RELIEF DE LA TERRE

La topographie continentale est très importante pour la reconstitution des paléoenvironnements car elle contrôle pour une large part les flux sédimentaires et une partie des circulations atmosphériques. Elle est pourtant très difficile à reconstituer. Au premier ordre, la topographie de la terre est directement contrôlée par le mouvement des plaques lithosphériques et la dynamique interne qui contrôlent à la fois les mouvements verticaux et les variations

eustatiques à long terme. Notre compréhension de l'évolution des reliefs au cours du Plio-Pléistocène a toutefois beaucoup évolué ces dernières années. Les années quatre-vingt-dix ont vu émerger une communauté française de modélisateurs en géomorphologie, issue des Sciences de la Terre dures, peu nombreuse (Grenoble, Paris, Nancy, Rennes essentiellement), mais efficace. Nous sommes passés de l'étude des processus d'érosion à l'échelle locale et leurs conséquences en termes de forme à une compréhension plus générale de la dynamique des systèmes, grâce à l'élaboration d'outils très performants en modélisation. Les principales questions abordées concernent :

- les relations entre lois d'érosion et les dynamiques du relief à grande échelle ;
- les rétro-actions du climat sur la tectonique via l'érosion ;
- l'impact des forçages tectoniques et climatiques et les temps de réponse caractéristiques des systèmes sédimentaires à ces perturbations ;
- la dynamique des flux de matière, et notamment, le traçage des sources sédimentaires en amont des bassins sédimentaires et la détermination des temps de transport et de résidence.

Ces approches géomorphologiques couplent théorie, modélisation (numérique et expérimentale), hydrologie et géochimie de bassins et analyse des topographies naturelles, chronologie des surfaces et thermochronologie. Elles interagissent logiquement avec l'étude de l'altération actuelle des bassins. Ces données sont fondamentales pour l'interprétation des archives sédimentaires en termes de paléo-environnement.

3.4 GÉOCHIMIE DU CLIMAT

La géochimie a largement contribué à l'étude du climat, notamment à travers des sujets développés dans d'autres sections ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dans

la glace par exemple). La section 11 s'est plutôt intéressée au climat dans son aspect forçage par la vie géologique de la planète. Parmi les directions à suivre on devra être particulièrement vigilant sur les suivants :

- l'étude des lois d'altération en fonction des forçages climatiques et tectoniques, notamment en poursuivant l'étude des grands bassins pour établir les constantes de temps de réactivité des systèmes (acquisition de suivis temporels), et l'étude de processus mal quantifiés (altération inverse, estuaires, glaciers, rôle de la végétation sur l'altération) ;
- développement des traceurs bio-géochimiques, isotopes stables – biologie, expérimentation, micro-analyse) : paléo- PCO_2 , paléo-pH, isotopes stables de Li, Mg, Ca (MC-ICPMS). Ces approches devront être couplées au développement des analyses in-situ et à l'expérimentation en association avec les biologistes et les paléontologues ;
- acquisition et préservation des compositions isotopiques ;
- géochronologie fine des enregistrements sédimentaires.

4 – PALÉONTOLOGIE

Riche des thématiques paléo-environnementales et de la caractérisation géochimique de nombreux processus calés dans le temps, de nouvelles directions prometteuses vont être entreprises par l'approche paléontologique.

Les fossiles font partie de la lithosphère dans laquelle ils sont incorporés à travers un ensemble de processus sédimentaires et diagénétiques qui en affectent l'enregistrement dans les archives géologiques. Le matériel paléontologique nous restitue des signaux de l'évolution des espèces et de la biosphère en général car les fossiles sont des marqueurs indispensables du temps et de l'évolution

des paléoenvironnements. Les modalités des interactions entre les diverses étapes de l'histoire de l'évolution du vivant avec les phénomènes climatiques, géologiques et paléogéographiques ne sauraient être appréhendées qu'à travers une approche nécessairement interdisciplinaire.

L'étude des restes fossiles des êtres vivants peut se définir selon deux orientations majeures :

- une biologique qui touche à l'évolution des espèces ;

- une géologique qui replace les organismes dans leurs biotopes.

Cette orientation paléoenvironnementale donne accès à la compréhension du système Terre et de son histoire d'une part, à la compréhension du monde biologique (biodiversité), de l'organisation spatio-temporelle des peuplements en fonction de paramètres externes ou internes d'autre part.

4.1 APPROCHE PALÉOENVIRONNEMENTALE

C'est récemment, grâce aux programmes du CNRS, par exemple ECLIPSE, que se sont développées en France des approches qui intègrent les différentes disciplines de la paléontologie et de la paléogéographie dans le dessein de mieux retracer et quantifier les variations paléoenvironnementales et paléoclimatiques. Les grandes questions scientifiques dans les 5 années à venir sont les suivantes :

- reconstitution des conditions paléocéanographiques, fondamentales pour la compréhension du système climatique global : les microfossiles marins permettent les reconstitutions de paramètres physico-chimiques, ou de la paléoproduktivité ;

- réponses biologiques aux changements abrupts : crises climatiques, événements catastrophiques internes ou externes ;

- dynamique de l'édification des grands biotopes ou biomes terrestres et marins en réponse aux changements paléogéographiques et paléoclimatiques, à travers les études paléobiogéographiques (exemple : conséquences de la formation de la Pangée, de la fermeture de la Téthys, etc.) ;

- quantification des paramètres de l'environnement (saisonnalité, salinité, etc.).

4.2 MESSAGE SÉDIMENTAIRE

Le message sédimentaire constitue l'enregistrement détaillé de l'histoire du système Terre depuis 600 Ma et au-delà, le témoin de nombreux processus physico-chimiques actifs dans les enveloppes externes et le seul enregistrement de la biodiversité. Le but de l'étude du message sédimentaire est de fournir les bases nécessaires à la reconstitution de l'histoire sédimentaire des enveloppes externes de la Terre, de son évolution, voire de son futur. Le décryptage des différents signaux de nature sédimentologique, tectonique, géochimique, minéralogique, paléontologique, géomorphologique et de leur cause tectonique, eustatique, climatique, etc. en tenant compte des effets de filtre les affectant (fonctions de transferts) est plus que jamais fondamental.

Par ailleurs, s'agissant de la compréhension de l'enveloppe terrestre en tant que support de la vie, l'impact du message sédimentaire dans ces aspects qualitatifs et quantitatifs est évident sur : la protection de l'environnement ; la compréhension et la prévision des risques naturels ; la gestion/prédiction des ressources en eau et des ressources minérales, par une meilleure connaissance des potentialités réservoirs (circulations fluides dans les bassins, minéralogie et compaction, diagenèse).

4.3 ÉVOLUTION DE LA BIODIVERSITÉ

Si le programme CRISEVOLE a mis l'accent sur les périodes de crises et sur les phénomènes de recolonisation et de reconquête qui les suivent, il n'existe pas à ce jour de théorie générale de la biodiversité dans le temps et dans l'espace. Il s'agit d'un axe potentiellement fédérateur dans le cadre de notre section. Plusieurs approches sont à prendre en compte. C'est également un domaine où nous sommes en retard et qui devrait constituer une priorité.

Le signal de la fluctuation est à établir :

- à travers les approches taxinomique (diversité) ;

- la morphologie (quantification de la disparité ; s'appuyer aussi sur le GDR « Morphométrie et évolution des formes ») ;

- l'écologie (structure des paléocommunautés).

Le signal doit être testé en relation avec les paramètres paléoenvironnementaux (température, salinité, etc.) et les fluctuations paléoclimatiques. Une approche biogéographique est également indispensable car les fluctuations de la paléobiodiversité dans le temps doivent tenir compte du taux d'endémisme et ne pas se limiter à l'effet surface/biodiversité (par exemple variations du niveau marin) et/ou de la température seulement. De plus, l'endémisme des biotas pélagiques et les liens avec les facteurs de contrôle sont totalement à éclaircir, surtout de manière quantitative.

L'établissement des gradients de biodiversité aux différentes périodes géologiques est un thème de recherche pratiquement « vierge ». Il est difficile de croire que la pente du gradient actuel soit une caractéristique pérenne de la biosphère. Cette étude n'a jamais été effectuée, malgré ses perspectives en termes de modélisation et d'applications à des programmes de conservation de la nature. Une interaction avec le paléomagnétisme (reconstructions en paléolatitudes) et la géochimie (traceurs de paléotempérature) est indispensable.

4.4 PALÉONTOLOGIE, GÉNÉTIQUE ET BIOLOGIE DU DÉVELOPPEMENT (VERS LES SCIENCES DE LA VIE)

Les recherches en génétique et biologie du développement ont amené un nouveau regard sur les relations génotype/phénotype, par exemple la compréhension de l'origine de certains organes et des processus de canalisation et de stabilité dans l'élaboration du phénotype, etc. De nouvelles voies d'investigation auparavant inaccessibles sont en train de se constituer. Si ces questions requièrent les compétences des morphologistes et des phylogénéticiens, le monde fossile apporte une chronologie des événements et, surtout, des données anatomiques originales sur des êtres vivants aujourd'hui disparus. La paléontologie se doit d'être active et à même de nourrir et de se nourrir des recherches en biologie-génétique. Mieux, elle est en position privilégiée pour souligner les interrogations fondamentales qui restent à lever et participer ainsi à orienter les recherches. Les reconstitutions phylogéniques établies par les méthodes paléontologiques et moléculaires (test paléontologiques des horloges moléculaires) ont donné d'importants résultats et devront être encouragées.

4.5 LES GISEMENTS FOSSILIFÈRES À PRÉSERVATION EXCEPTIONNELLE « LAGERSTÄTTEN »

En termes de nouveauté des résultats et de progrès scientifique l'étude de Lagerstätten a toujours abouti à des retombées capitales en Paléontologie (Burgess, les gisements chinois, etc.) Les programmes de recherche sur ces sites exceptionnels doivent constituer une priorité car les études de ces sites se prêtent à l'approche.

4.6 LA VIE DANS LES MILIEUX EXTRÊMES, EXOBIOLOGIE

Depuis la découverte et les nombreuses études sur les communautés hydrothermales les biologistes ont de plus en plus démontré la réalité et les adaptations de la vie dans les milieux extrêmes. En ce qui concerne la paléontologie dite « classique » des analogues fossiles des communautés hydrothermales ont été décrits (par exemples : en France à Beauvoisin, Jurassique ; dans les Apennins en Italie, Miocène etc.) mais en Europe il n'y a pas eu de véritable développement de ce sujet. La vie bactérienne, la plus fréquente dans ces milieux, ne semble pas avoir fait l'objet d'études paléontologiques percutantes.

Pourtant, cette étude pourrait avoir des retombées dans :

- l'origine de la vie et le développement de la vie primitive sur Terre ;
- l'origine des cycles d'échange entre biosphère et lithosphère (exemple : carbone) ;
- exopaléontologie, au cas où des traces de vie étaient découvertes sur des planètes comme Mars qui a connu (et connaît) des conditions pour nous extrêmes mais pas plus extrêmes que celles de milieux analogues sur Terre. Sans parler des traces (vraies ou fausses ?) de bactéries dans les météorites.

Les couplages sont évidents (voir aussi GDR « Exobiologie ») et impératifs avec la géochimie, l'étude du magnétisme terrestre (rôle de protection du vent solaire), géochronologie « absolue », etc.