



**HAL**  
open science

## Rapport de conjoncture 2024 - Section 18 du CoNRS (mandat 2021-2025)

Elia D'acremont, Pierre-Yves Arnould, Julien Aubert, Laurence Audin, Sara Bazin, Helene Bureau, Gilles Chazot, Cécile Doubre, Flavien Choulet, Nadege Hilairet, et al.

### ► To cite this version:

Elia D'acremont, Pierre-Yves Arnould, Julien Aubert, Laurence Audin, Sara Bazin, et al.. Rapport de conjoncture 2024 - Section 18 du CoNRS (mandat 2021-2025) : Questions clés et défis en Sciences de la Terre et des planètes. rapport préliminaire à valider par le CNRS, CNRS. 2024. hal-04630442

**HAL Id: hal-04630442**

**<https://hal.science/hal-04630442>**

Submitted on 1 Jul 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0  
International License

# Rapport de conjoncture 2024 - Section 18

(mandat 2021-2025)

## *Questions clés et défis en Sciences de la Terre et des planètes*

### **Membres de la section 18 par ordre alphabétique :**

Elia d'Acremont, Pierre-Yves Arnould, Julien Aubert, Laurence Audin, Sara Bazin, Hélène Bureau, Gilles Chazot, Cécile Doubre, Flavien Choulet, Nadège Hilairet, Mireille Laigle, Oscar Laurent, Mélina Macouin, Anne Mangeney, Emanuela Mattioli, Tanguy Nebut, Jean-Arthur Olive, Christine Pailles, Guillaume Paris, Pascal Philippot, Antonin Richard, Christophe Sotin, Philippe Yamato

**avec la dessinatrice** Alice Varoquaux



## Glossaire

### Introduction

#### I - Terre et sociétés humaines face aux enjeux actuels

*Comment la connaissance de l'histoire de la Terre éclaire les enjeux actuels*

*Aléas telluriques et climatiques: compréhension, modélisation, surveillance, alerte et précurseurs*

*Ressources, énergie, impacts anthropiques sur environnement, santé et questions sociétales*

**ENCADRÉ 1. Mesure du temps et modèles de la Terre ancienne**

**ENCADRÉ 2. Nouvelles méthodes géophysiques et modélisation physique et numérique**

#### II. Coévolution de la Terre, de la vie, du climat et de l'environnement

*Formation du système solaire et des planètes*

*De l'Hadéen à l'oxygénation : premiers continents, début de la tectonique des plaques, émergence de la vie et évolution du système océan-atmosphère*

*Couplages tectonique-biosphère-environnements-paléoclimats ; données et modèles*

**ENCADRÉ 3. Nouvelle génération d'outils de caractérisation chimique et isotopique**

#### III. Dynamique de la Terre et des planètes

*La Terre profonde : du noyau au manteau*

*Nouveaux enjeux de la tectonique des plaques*

*De nouvelles rhéologies pour la Terre interne*

*Transferts magmatiques*

*Apports de la planétologie*

**ENCADRÉ 4. Grands instruments et conditions extrêmes.**

#### IV. Réflexions et recommandations

*Evolution du financement de la recherche*

*Structuration des communautés*

*Réduction de l'empreinte environnementale de la recherche*

*Solutions pour accroître l'efficacité, réduire les coûts et simplifier les procédures*

*Promotion de l'interdisciplinarité et des changements thématiques*

*Appui aux décideurs sur les risques*

#### V. Etat des lieux des ressources humaines

*Effectifs et statistiques*

*Recrutements dans les différents domaines correspondant aux parties I-III du rapport*

### Préambule

*Ce rapport s'adresse à un large public allant des chercheurs et ingénieurs dans nos disciplines et d'autres domaines, aux étudiants et aux décideurs. Il vise à donner un panorama à jour des recherches en Sciences de la Terre et des outils structurant notre communauté. Il se base sur l'analyse d'environ un millier de dossiers (concours, promotions, évaluations individuelles et de laboratoires) et d'auditions émanant des chercheurs et des candidats de la section 18, ainsi que des propositions de médailles et d'accueil en délégation CNRS. A partir d'une sélection d'illustrations schématisant des exemples représentatifs de changements de paradigme, sont présentées quelques **avancées réalisées ces dix dernières années et les défis scientifiques et méthodologiques**, sans pouvoir être totalement exhaustifs.*

## Introduction

Les dix dernières années de recherche en Sciences de la Terre ont conduit à des changements radicaux dans la compréhension des **processus complexes** qui régissent notre planète. **L'amélioration de la résolution spatio-temporelle** des observations et des mesures sur le terrain comme en laboratoire, mais aussi des méthodes d'analyse de données et de modélisation permettent désormais d'approcher voire d'atteindre les **conditions naturelles**. Ces nouvelles découvertes montrent que l'évolution et le fonctionnement de la Terre et des autres planètes du système solaire ne peuvent être compris sans prendre en compte les **hétérogénéités** présentes à toutes les échelles, les **variabilités temporelles** des systèmes hors équilibre, ainsi que les **interactions multiples entre les différents réservoirs** (noyau, manteau, croûte, océan, atmosphère, cryosphère, biosphère, etc.). Cette nouvelle vision des corps telluriques émane d'une recherche fondamentale de pointe conduite par l'ensemble des équipes des laboratoires de la section 18 et des observatoires de l'INSU-Terre Solide. Ces nouvelles mesures et modélisations amènent des changements de paradigmes dans notre vision des **processus mécaniques, physiques, chimiques et biologiques** et de leurs interactions. Elles impliquent également de nouveaux défis pour notre communauté en termes de **stockage et d'analyse de données massives**.

De nouvelles perspectives s'ouvrent désormais sur la caractérisation et la quantification des grands processus **géodynamiques**, et sur **l'évaluation des aléas géologiques**, indispensable à toute ambition de prévention des risques associés. Notre compréhension des dynamiques éruptives ou du fonctionnement des zones de failles sismiques a par exemple considérablement évolué, notamment grâce à des **modélisations mathématiques et numériques multi-échelles**. Nous sommes aujourd'hui en mesure d'évaluer la sensibilité des instabilités gravitaires, tectoniques ou volcaniques à des forçages environnementaux (ex: marées, chargements hydrologiques) pouvant être affectés par le changement climatique. Plus généralement, notre recherche rend aujourd'hui évident le **lien étroit entre dynamique de la Terre interne** (ex: activité volcanique, séismes) **et dynamique de la surface / hydrosphère**.

Des avancées analytiques majeures permettent aujourd'hui de dater et de caractériser avec une grande précision les événements géologiques ayant façonné notre planète à partir de très petits échantillons (météorites, minéraux anciens). Cette approche couvre une **très vaste gamme d'échelles de temps et de processus**, de l'accrétion des corps planétaires à la différenciation de leurs enveloppes (noyau, manteau, croûte), en passant par les prémices de la tectonique des plaques, qui conditionne l'évolution de l'océan et de l'atmosphère, et finalement **l'émergence de la vie**. S'il était naturel d'envisager un monde vivant impacté par les transformations environnementales et climatiques, il apparaît clairement que la biosphère elle-même a pu avoir des impacts importants et parfois sous-estimés sur notre planète à l'échelle des temps géologiques. Ces évolutions sont étroitement liées au **comportement physico-chimique et rhéologique** des matériaux impliqués, aux **cycles des éléments** à travers les différents réservoirs et à leurs interactions qui conditionnent l'habitabilité de la surface terrestre. Des avancées comparables ont été réalisées dans notre connaissance des objets extraterrestres (ex: corps et petits corps du système solaire, exoplanètes) grâce à l'essor des recherches dans le domaine du spatial et des méthodes expérimentales en conditions extrêmes (ex: expérimentations *in situ* associées aux grands instruments), qui nourrissent également notre compréhension de la Terre ancienne.

Ces enjeux nous montrent à quel point il est essentiel et urgent pour nous de renforcer les collaborations avec non seulement les autres sections de l'Institut Terre et Univers, mais également avec la Chimie, la Biologie, la Physique, la Mécanique, les Mathématiques, les Sciences du Numérique, les Sciences Humaines et Sociales, ainsi qu'avec les opérateurs de l'État et les décideurs locaux, nationaux et

internationaux. En effet, les **frontières entre disciplines se font de plus en plus perméables**, comme en témoigne par exemple le transfert d'outils traditionnellement appliqués aux intérieurs planétaires vers l'étude des processus de surface (ex: sismologie environnementale), et l'exportation de nos méthodes vers d'autres domaines comme la médecine ou la préservation du patrimoine culturel (ex: géochimie isotopique, caractérisation de géomatériaux aux rayons X).

Enfin, la compréhension toujours plus fine du fonctionnement de notre planète et de son histoire (extinctions, changements climatiques et environnementaux, cycles géochimiques) nous rappelle qu'il n'est plus possible d'ignorer notre rôle, en tant que chercheurs et chercheuses en Sciences de la Terre, dans **l'apport de connaissances fondamentales et leurs applications face aux défis actuels** concernant l'impact de l'activité humaine sur l'environnement et le climat. Il est aujourd'hui crucial de progresser dans l'identification des **causes, des conséquences, et des stratégies à mettre en place face à la crise environnementale** (incluant réchauffement, pollution, destruction des habitats, acidification des océans, augmentation des risques naturels, gestion des ressources en eau, minérales et énergétiques). L'étude des crises du passé entre en résonance avec l'impact sans cesse croissant de l'activité humaine sur l'environnement depuis plus d'un siècle. Notre communauté a ainsi un rôle clé à jouer dans la **sensibilisation du grand public et des décideurs** face à ces questions environnementales.

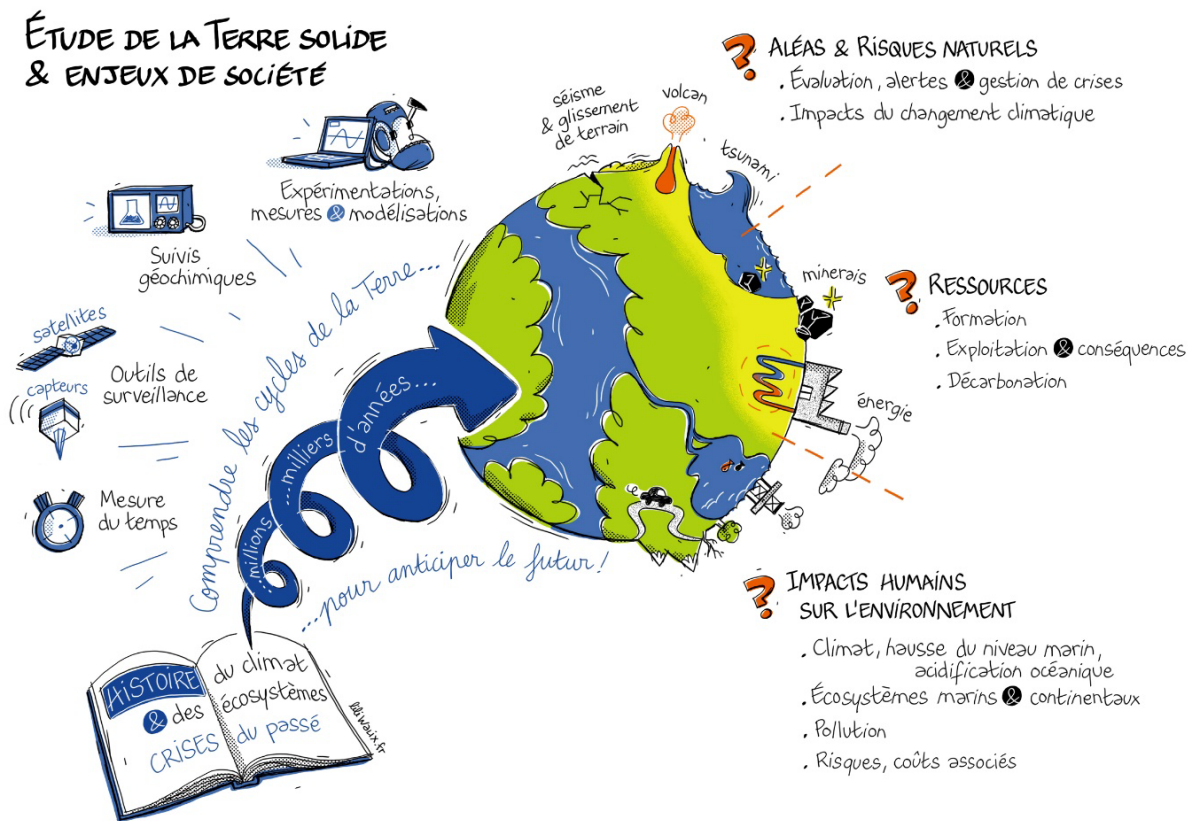
## **I - Terre et sociétés humaines face aux enjeux actuels**

### ***Comment la connaissance de l'histoire de la Terre éclaire les enjeux actuels***

L'étude des grandes crises passées, mais aussi des périodes plus stables, permet de comprendre à court et à long terme la résilience des écosystèmes, la dynamique du système climatique et des cycles biogéochimiques et leurs interactions. Malgré des temporalités parfois très différentes, le passé permet d'observer la réponse de la surface de la Terre à des **changements climatiques majeurs** et aux **crises biologiques** associées. Grâce aux outils de géochimie, géologie, paléontologie, géophysique et modélisation (Figure 1, voir partie II), les séries temporelles offrent le recul nécessaire pour contraindre les modèles d'évolution de la biogéosphère et **anticiper les changements futurs**. La modélisation de la biosphère passée nous renseigne sur les migrations animales et végétales et sur l'interaction environnement/biosphère, et la modélisation des climats anciens sur le fonctionnement d'une Terre plus chaude qu'actuellement, notamment au cours du Cénozoïque pré-quatenaire (avant -2.58 Ma).

L'identification de paléo-événements et la caractérisation des **dynamiques rapides dans le passé** (ex: érosion notamment côtière, climat, interactions entre cycles, grandes migrations ou extinctions animales) permettent de mieux comprendre leurs caractéristiques pour un climat donné ou lors d'un changement climatique (encadré 1). Les équipes des laboratoires de la section 18 contribuent également à comprendre les enjeux liés à l'acidification et à l'eutrophisation des océans et à la baisse de leur teneur en oxygène avec de nombreux travaux sur les **événements hyperthermaux, d'anoxie océanique** ou autres grandes crises environnementales. Les enjeux sont alors, entre autres, l'amélioration des reconstructions des **paléotempératures**, et des cycles biogéochimiques, notamment celui du carbone (ex: teneur en CO<sub>2</sub>, pH océanique, diagenèse et biominéralisation). Le développement de chronologies temporelles très fines permettent de capturer des événements courts et rapides, comme le réchauffement "rapide" de la limite Paléocène-Eocène (-56 Ma), d'une durée de l'ordre de la dizaine de milliers d'années, ou des épisodes de paléo-tempêtes et paléo-tsunamis, et le couplage entre cycles biogéochimiques et biosphère. L'étude de

ces analogues du réchauffement climatique en cours, permet d'appréhender le rôle joué par les hautes concentrations ou les variations rapides en CO<sub>2</sub> dans les crises.



**Figure 1.** L'ensemble des champs disciplinaires de la section 18 nourrit l'étude d'enjeux majeurs pour la société. L'étude de l'**histoire de la Terre** permet de préciser l'origine, la spécificité et l'évolution potentielle de la crise actuelle (partie II). Quelles sont les réponses de l'environnement à la hausse de CO<sub>2</sub> (températures de surface, cycle hydrologique, acidification de l'océan, migration des espèces) ? Comment améliorer les modèles climatiques et biologiques ? Comment améliorer la résolution temporelle des événements passés ? Pour ce qui est de la Terre actuelle, comment améliorer la connaissance, la surveillance et la prévention des **aléas telluriques** dont les séismes, tsunamis, volcans, glissements de terrain ? Les **géoressources** (métaux, matériaux ou sources d'énergie, capacité de stockages souterrains, ressources en eau) constituent un enjeu stratégique aux multiples facettes. Comment suivre le contenu en eau du sous-sol ? Comment se forment les géoressources et où sont les zones exploitables ? Quel est leur impact environnemental, économique et sociétal ? Les **impacts anthropiques** sur le climat, la pollution de l'air, de l'eau ou des sols, ou sur la biodiversité représentent des questions clés en Sciences de la Terre.

### ENCADRÉ 1. Mesure du temps et modèles de la Terre ancienne

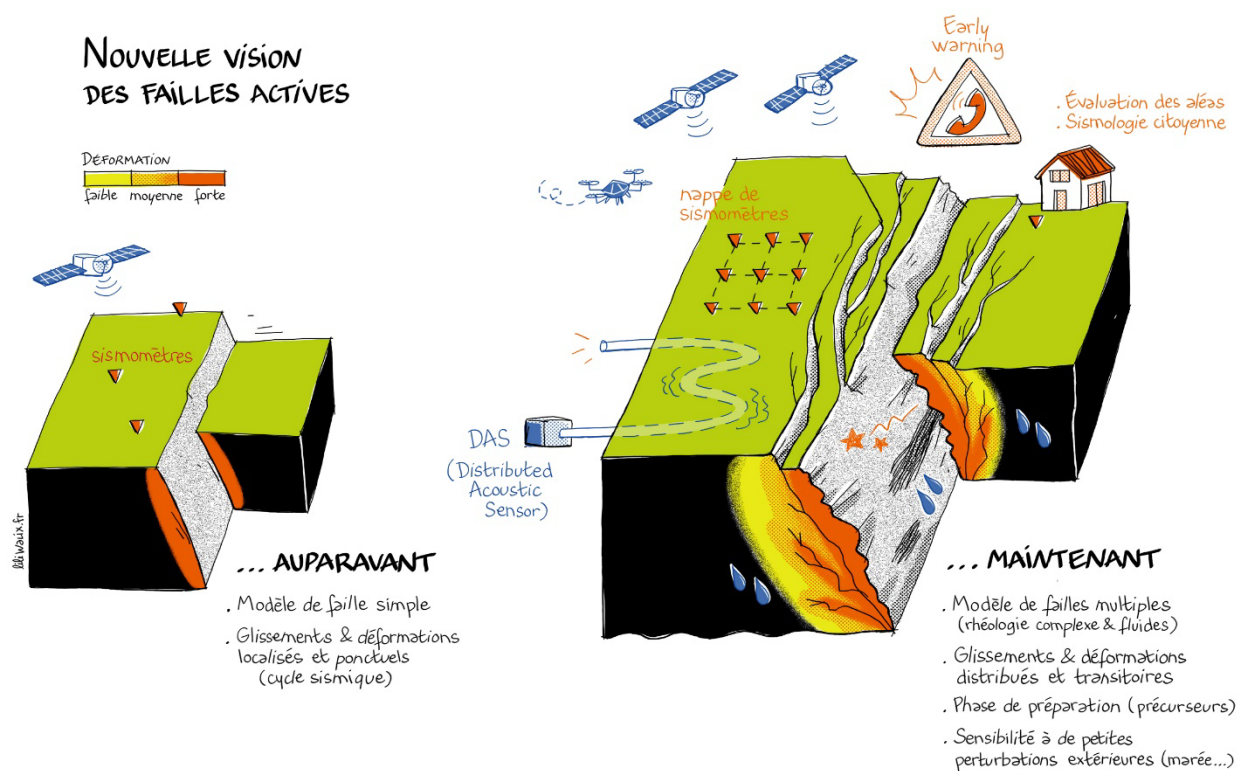
L'amélioration de la mesure du temps implique le développement de nouvelles méthodes de chronostratigraphie (utilisant géochimie, paléontologie, magnéto-, et cyclo-stratigraphie) et de radiochronologie pour extraire des informations de plus en plus fines du registre sédimentaire sur des échelles de temps comparables à la crise actuelle. Ces avancées récentes regroupent notamment l'étude des cycles orbitaux dits de Milankovitch sur plusieurs centaines de millions d'années et leurs liens avec le climat, l'estimation de taux d'accumulation sédimentaire, la corrélation de signaux géochimiques, ou encore de nombreux progrès en datation absolue. Par ailleurs, la communauté française est à l'avant-garde du développement d'outils pour simuler les climats et les cycles biogéochimiques à travers les ères

géologiques avec, par exemple, un modèle Système Terre incorporant des composantes biologiques détaillées de la végétation continentale et des écosystèmes marins et l'intégration de nombreux cycles biogéochimiques, dont le carbone, l'oxygène, le phosphore, le fer ou encore le soufre. La communauté française a également étendu ses capacités aux échelles de temps dites intermédiaires (mille à cent mille ans). Il sera bientôt possible d'étudier l'influence des paramètres orbitaux sur la formation du signal sédimentaire et l'évolution des fronts d'altération liés aux orogènes, permettant d'obtenir l'un des outils numériques les plus sophistiqués de la communauté *paléo*. Ces enjeux de modélisation et l'utilisation de ces modèles nécessitent des liens resserrés entre les chercheurs des sections 18, 19 et 30 notamment.

### ***Aléas telluriques et climatiques: compréhension, modélisation, surveillance, alerte et précurseurs***

L'un des cœurs de métier de la section 18 est l'étude, la quantification, l'anticipation et si possible la prévention des aléas telluriques mais aussi de certains aléas climatiques. Nos travaux peuvent également contribuer à comprendre comment l'activité humaine vient perturber certains de ces aléas, soit directement, soit par le biais des modifications du climat. Ces dix dernières années, un changement majeur de vision des **systèmes de failles actives** et de la **plomberie magmatique** s'est accompagné d'un changement de stratégie dans la modélisation de la complexité de ces systèmes. Les failles ne sont plus considérées comme une interface simple entre deux blocs sur laquelle se concentre un glissement relativement homogène, répondant à un cycle de chargement/déchargement pour accommoder le mouvement des plaques. Les systèmes de failles apparaissent maintenant comme un volume où failles mineures et inélasticité du milieu environnant sont impliqués dans la déformation (Figure 2). Leur évolution spatio-temporelle est complexe, mettant en jeu **fluage, glissement transitoire ou lent, sismique et/ou asismique**, ainsi que segmentation latérale et en profondeur. De même, l'alimentation en magma des systèmes volcaniques terrestres ou sous-marins est maintenant considérée comme contrôlée par la dynamique de **réservoirs largement cristallisés** ("mushes", voir partie III), en accord avec des observations géophysiques et géochimiques sur des systèmes actuels.

Ces avancées viennent de l'augmentation sans précédent de la **densification de mesures à terre et en mer**, de l'utilisation de données spatialisées satellitaires ou aéroportées, et du développement de nouvelles méthodes d'analyse de séries temporelles et de modélisation numérique (encadré 2). Ces mesures 4D (espace-temps) à haute résolution de la dynamique interne de la Terre et l'imagerie 3D des structures associées permettent de réaliser un suivi fin des événements et des périodes qui les succèdent (post-sismique, post-éruption), mais aussi de revisiter celles qui les précèdent pour détecter d'éventuels signaux **précurseurs**. La détection de changements dans la sismicité **plusieurs mois avant l'occurrence d'un grand séisme** est devenue possible grâce à l'établissement de catalogues de sismicité complets jusqu'à de faibles magnitudes, notamment via des méthodes d'intelligence artificielle. Ce changement peut par exemple être lié à l'endommagement de zones qui seront impliquées dans ce séisme, facilitant la propagation de la rupture. Ces observations pourraient à terme mener à une possible prédiction statistique de l'occurrence de forts séismes. L'effort de couverture vers le domaine marin doit être poursuivi. Les mesures 4D ont également conduit à améliorer la détection et le suivi de la dynamique des **glissements de terrain**, éboulements ou écoulements pyroclastiques mais aussi des déformations associées aux systèmes volcaniques ou hydrothermaux, notamment par le suivi et la modélisation de la déformation des édifices volcaniques aux petites et grandes échelles spatiales et temporelles. La sismologie associée parfois à la modélisation physique est également employée pour suivre et caractériser les processus environnementaux, **la dynamique des glaciers** et le vêlage d'icebergs, les vagues ou l'activité biologique dans **l'océan, les cyclones, ou les rivières**.



**Figure 2.** Un changement majeur dans la conceptualisation des failles actives a émergé grâce à une intensification et une diversification des mesures de terrain et à des avancées marquantes en modélisation et analyse des données. La zone impliquée dans le cycle sismique est beaucoup plus distribuée, avec un **réseau complexe de failles** intriquées qui peut s'étendre lors de l'endommagement engendré par le séisme et dont le glissement est activé non seulement lors de la rupture mais aussi lors de la **déformation lente** du milieu tout au long du cycle sismique (figure de droite). Cette nouvelle vision génère des questions clés : Quel est le rôle des déformations lentes du milieu dans le bilan d'énergie global lié au cycle sismique ? Quels sont les impacts en termes d'aléas ? Quel est le mode opératoire de cette déformation aismique hors et sur les failles ? Quel est le rôle de la circulation des fluides ? Comment améliorer la détection des événements et la mesure de l'évolution 4D du système ? Comment calculer les impacts sur les bâtis et contribuer à l'alerte précoce ?

Un des enjeux reste l'intégration des risques naturels tels que les éruptions volcaniques dans les scénarios d'évolution du climat et nécessite des liens plus forts avec la section 19. Évaluer la **sensibilité des aléas aux forçages externes** (ex: climatique, météorologique, sismique, volcanique, sédimentaire) est également crucial pour quantifier l'**impact du changement climatique** (pluies extrêmes, fonte du pergélisol, des glaciers, hausse du niveau des mers, fréquence des tempêtes) sur le déclenchement d'éruptions volcaniques et de glissements de terrain via l'altération des roches ou la modulation de la sismicité par l'hydrologie. Par ailleurs, des progrès importants ont été faits dans l'**alerte précoce** qui permet d'identifier les caractéristiques des séismes et d'évaluer leur potentiel tsunamigénique entre autres dès les premiers signaux des ondes sismiques, élasto-gravitaires ou ionosphériques. Un pas supplémentaire doit être fait pour rendre ces méthodes plus opérationnelles pour les acteurs du risque à l'échelle globale.

La question de la **rhéologie** (comportement mécanique) permettant de décrire les systèmes complexes de mouvements sur et hors failles reste également un défi même si les lois dites 'rate and state' sont largement utilisées sur les failles et permettent de reproduire en partie les observations. D'autre part, les



avancées en **mécanique des milieux granulaires et de la rupture** ont permis de réaliser des progrès conséquents sur la modélisation physique du déclenchement et de l'écoulement des glissements de terrain ou du transport de sédiments et de la déformation des dômes volcaniques. La rhéologie de ces instabilités gravitaires, et notamment le rôle de l'eau ou du gaz, restent des questions largement ouvertes au même titre que leur implémentation dans des modèles applicables à l'échelle du terrain. Malgré cela, les modèles développés sont utilisés pour l'évaluation des aléas et fournissent des informations bien plus précises que les lois d'échelles précédemment adoptées. Les nouvelles données bathymétriques, géophysiques et géologiques haute résolution ou l'étude des données historiques donnent un nouvel éclairage sur les **paléo-événements extrêmes** (paléo-tempêtes, cyclones, tsunamis, séismes, glissements de terrain) et permettent de construire des scénarii plus crédibles avec, notamment, des implications sur le potentiel tsunamigène des effondrements gravitaires. Des tentatives pour **coupler ces modélisations à des approches en Sciences Humaines** (ex: géographie, sociologie, économie, politique) et pour fournir des outils d'aide à la décision en coopération avec les **opérateurs de l'Etat** (dont BRGM, CEA, IFREMER) ou avec les **ministères** ouvrent la voie à de nouveaux champs interdisciplinaires avec de forts impacts sur le transfert de nos connaissances vers la société.

**ENCADRÉ 2. Nouvelles méthodes géophysiques et modélisation physique et numérique.** La croissance exponentielle des mesures spatialisées ou aéroportées, via la multiplication des satellites, drones, LIDAR etc. a conduit à des séries de mesures haute résolution spatiale (ex: <1 m pour certaines images optiques) et temporelle (6 jours pour certaines images RADAR). Par ailleurs, l'utilisation de la fibre optique et des réseaux denses de capteurs sismiques, le développement de nouveaux instruments dont les sismomètres rotationnels, gravimètres supra-conducteurs, micro capteurs faciles à déployer, et l'instrumentation des océans (sismomètres, hydrophones, capteurs physico-chimiques, géodésiques et de pression, instruments autonomes) ou ceux de la Flotte Océanographique Française multiplient les défis numériques de collecte, de stockage, de validation, de traitement et de diffusion des données et des produits. L'analyse de ces séries temporelles est donc réalisée de plus en plus à partir de méthodes systématiques de traitement du signal complet, y compris basées sur l'intelligence artificielle. La compréhension des processus physiques à partir de modèles analogiques en laboratoire implique d'intégrer des mesures mécaniques, optiques, électriques, acoustiques, et de modèles numériques prenant en compte des processus physico-chimiques, des rhéologies variées, des conditions aux limites ou des interfaces réalistes. Les applications sont multiples : endommagement, milieux poreux, écoulements de fluides complexes, réactions physico-chimiques, émission et propagation d'ondes, etc. Les développements méthodologiques en tomographie (approches bayésiennes, Full Waveform Inversion, homogénéisation) fournissent des images multi-paramètres de l'intérieur de la Terre à une résolution sans cesse accrue (ex: géométrie complexe des plaques en subduction ou panaches mantelliques). Ces modèles résolvant les équations de la mécanique des fluides ou des solides ou les modèles basés sur la description du mouvement et des interactions d'éléments discrets (ex. granulaires) décrivent une physique de plus en plus fine et requièrent des puissances de calcul toujours croissantes (High Performance Computing: clusters CPU et GPU) ainsi qu'une structuration de la communauté autour de ces besoins communs.

### ***Ressources, énergie, impacts anthropiques sur l'environnement, santé et questions sociétales***

Dans un monde qui cherche son chemin vers la **transition énergétique**, de nombreux travaux ont été menés pour mieux caractériser le potentiel des réservoirs profonds, les circulations de fluides associées et les interactions fluides-roches, aussi bien dans les systèmes actuels que fossiles. Par ailleurs, l'étude des cycles géodynamiques et des transferts de matière mis en jeu apporte un éclairage pertinent sur les conditions de **formation de certains gisements métallifères, essentiels à l'électrification du parc automobile et au développement des énergies renouvelables**. En plus d'établir les mécanismes de

concentration de différentes substances à fort intérêt sociétal (ex. hydrogène, métaux), ces résultats sont cruciaux pour définir des stratégies d'exploration et d'évaluation des ressources et optimiser la production **d'énergie décarbonée** et le stockage souterrain dans une politique d'usages croisés du sous-sol (ex. géothermie, ressources énergétiques et minérales) tout en **maîtrisant les risques environnementaux et sismiques**.

On peut citer par exemple les travaux sur la serpentinisation, ou autres processus couplant minéralisation de CO<sub>2</sub>, formation d'H<sub>2</sub> et transferts de métaux dans différents contextes géodynamiques (marges passives, dorsales océaniques, transformantes), ou encore les conditions de précipitation des carbonates (calcite, dolomite ou autres) qui aident à identifier les possibles usages et contributions de ces minéraux pour le piégeage et le stockage du CO<sub>2</sub>. La section 18 contribue également à l'analyse transdisciplinaire du cycle de vie des ressources. Enfin, il est nécessaire d'étudier les environnements soumis aux risques d'une exploitation déraisonnée de leurs ressources. Cette exploitation peut avoir lieu dans des **zones souvent fragiles ou riches en biodiversité** (grands fonds océaniques, littoraux, salars sud-américains, ou divers sites miniers). Ces zones sont généralement associées à des objets géologiques dont l'étude est nécessaire pour la compréhension de l'histoire de la Terre et de son fonctionnement, et leur étude est nécessaire pour contribuer à la compréhension globale de l'impact environnemental de nos activités. Par exemple, les travaux sur les fonds marins contribuent à la connaissance de ces espaces abritant des écosystèmes et des cycles complexes (cf. partie III) et souvent méconnus. L'exploration et l'exploitation actives ou potentielles des géoressources soulèvent également des **questions éthiques et géopolitiques**. Les sites et filières d'intérêt font l'objet de réflexions inter- et transdisciplinaires sur l'exploitation des ressources énergétiques et minérales, apportant un éclairage important à ces questions en intégrant les différentes parties prenantes concernées par ces sujets.

Au-delà des aspects décrits précédemment, la section 18 s'implique dans l'étude des conséquences des activités humaines sur l'environnement, via notamment l'utilisation des méthodes géochimiques et géophysiques pour l'étude du traçage des **pollutions**, le suivi du **contenu en eau du sous-sol**, le bilan de masse et la dynamique du **pergélisol**, des glaciers ou des aquifères. Enfin, de nouvelles méthodes sont parfois développées pour d'autres objectifs, comme par exemple l'utilisation de la reconnaissance automatique de micro-fossiles permettant de tracer les pollutions en plastiques d'origine anthropique.

Dans un tout autre registre, des recherches récentes à **impact sociétal fort** permettent le développement de diagnostic de maladies grâce à différentes approches isotopiques et métallomiques (encadré 3). L'étude biominéralisation ouvre également la voie à des développements importants en médecine ou en sciences de l'environnement. D'autres approches sont initiées à partir de méthodes traditionnellement développées en Sciences de la Terre, comme l'utilisation de la géochimie isotopique dans la lutte contre la prolifération nucléaire ou la contrebande, ou encore de nombreuses études **en lien avec l'histoire des Humains et de leurs sociétés** : paléo-anthropologie, paléo-géographie, géo-archéologie, datations, régimes alimentaires, archéomagnétisme, offrant des interactions dynamiques et originales entre différents champs disciplinaires.

De manière générale, la production de connaissances évolue avec le développement de **projets inter- et transdisciplinaires**, le renforcement des interactions avec le **monde industriel et les décideurs** et l'implication de la population via la science avec et pour la société (SAPS, par ex. collectes de météorites, sismicité, pollution urbaine, désirabilité et impact de l'exploitation des géoressources). A l'échelle individuelle, des unités de recherche, des réseaux nationaux ou des tutelles, un effort notable est également visible pour réévaluer les méthodes de production des connaissances en tenant compte de **l'impact environnemental de la recherche** elle-même et de ce qu'elle implique en termes de

consommation et de déplacements sur les émissions de CO<sub>2</sub> et la consommation de géoressources. Enfin, la section 18 estime que notre communauté se doit de rester vigilante pour garantir le **transfert de ces connaissances** vers les parties prenantes, particulièrement en cette période de flux croissant d'informations souvent incontrôlées ou de manipulations (notamment "fake news" et "greenwashing"). L'**engagement public** des chercheurs, la médiation et l'éclairage scientifique dans l'appui aux prises de décisions apparaissent toujours, et peut-être plus que jamais, essentiels.

## II. Coévolution de la Terre, de la vie, du climat et de l'environnement

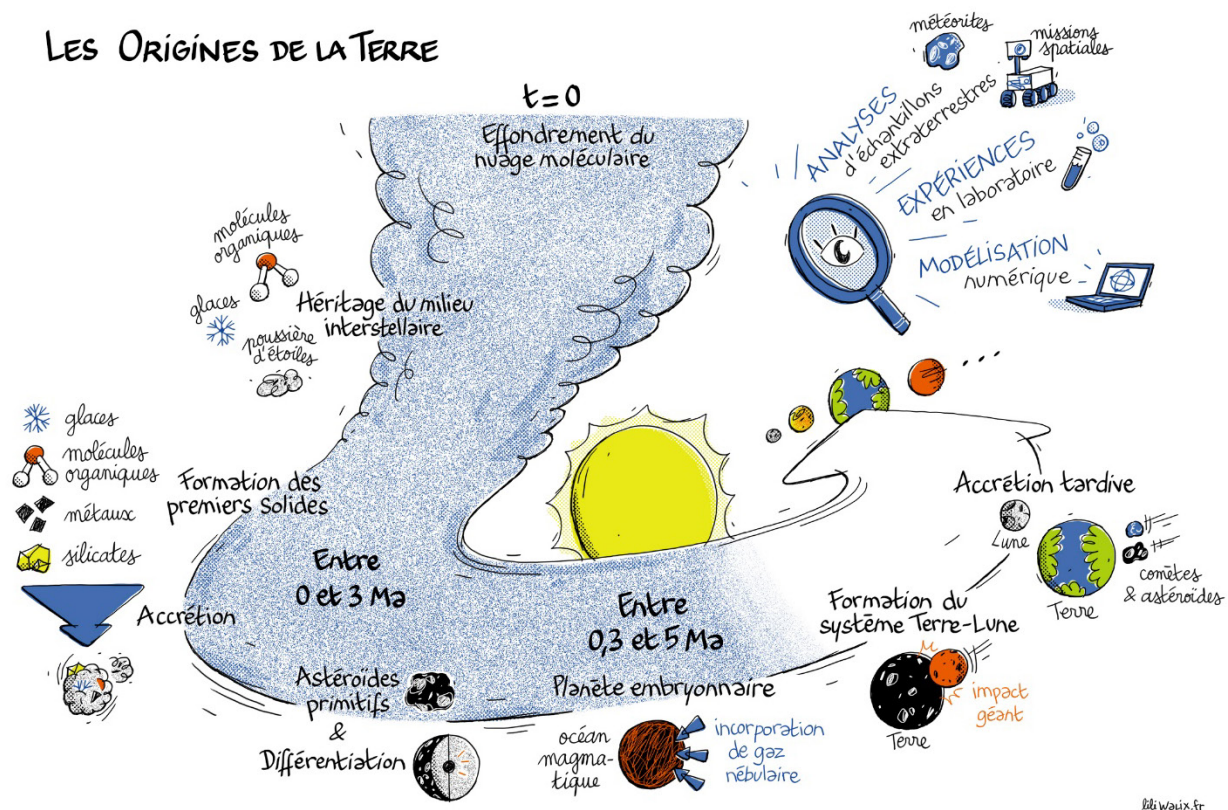
### *Formation du système solaire et des planètes*

L'étude du système solaire jeune et du disque protoplanétaire pose de nombreuses questions sur l'origine des éléments constitutifs de la Terre et des planètes du système solaire (Figure 3 et 4). Des progrès ont été réalisés sur la chronologie des premiers millions d'années du système solaire, avec par exemple la datation de la plus vieille andésite connue ou la chronologie de formation des chondres qui témoignent des premières étapes d'accrétion du système solaire (encadré 3). Un débat actif persiste sur l'**origine des composants dits volatils** (C, H, O, N, S, avec comme grande question l'origine de l'eau de la Terre). Ces "volatils" étaient-ils présents dans les roches qui ont fini par constituer les planètes telluriques, sont-ils issus du système solaire externe, ou proviennent-ils des gaz du disque protoplanétaire ? Ces espèces sont-elles restées ou se sont-elles échappées pendant l'accrétion et dans quelles proportions ? De nombreuses avancées ont eu lieu suite à la mise en évidence de la dichotomie isotopique NC/CC (Non Carbonaceous/Carbonaceous Chondrites) entre deux réservoirs distincts qui coexistent pendant les premiers millions d'années du système solaire. Séparés par une barrière physique, ils correspondent de fait au système solaire interne avec les chondrites NCs et les planètes rocheuses plutôt "sèches" d'une part et les chondrites carbonées riches en **eau** et autres espèces volatiles d'autre part. L'étude de la composition du rapport D/H, des gaz rares ou de la matière organique de différents objets extraterrestres (chondrites, comètes, astéroïdes) a permis de contraindre l'apport d'éléments volatils par les comètes, mais également de mettre en évidence la possibilité qu'une partie de l'eau terrestre a été présente dès, voire avant son accrétion, sous forme d'hydrogène dans le manteau. L'étude des météorites différenciées (achondrites) et sèches qui proviennent donc d'un ancien corps planétaire en formation, est ainsi un enjeu important pour **comprendre les processus de différenciation**. Les travaux sur ces objets anciens nécessitent également la compréhension des processus secondaires, des chocs aux altérations aqueuses, avec des progrès grâce aux échantillons extraterrestres, aux développements analytiques et aux expériences de laboratoire. Ces travaux sont nourris par les **missions spatiales** notamment européennes, japonaises et américaines. Par exemple l'exploitation des résultats de la mission Rosetta (ESA) a permis de mieux comprendre la signature cométaire de l'hydrogène et des gaz rares. La mission Hayabusa II (JAXA) a permis de confirmer que l'astéroïde Ryugu est bien reliée au groupe des chondrites carbonées (riches en volatils), en particulier du groupe CI (un des plus rares dans les échantillons de météorites sur Terre). La mission Osiris Rex (NASA) a rapporté, en septembre 2023, 120 g de l'astéroïde Bénou qui sont en cours d'analyse en particulier dans différents laboratoires français. Cet essor mondial des recherches en cosmochimie/planétologie/spatial soutient la naissance d'un **centre de conservation des échantillons extraterrestres** en France.

L'évolution précoce de la plupart des planètes telluriques est marquée par les impacts à l'origine de la formation d'un océan magmatique. Pour la Terre, l'impact avec Théia conduisant à la formation du système Terre-Lune est une étape essentielle. La compréhension des **interactions entre l'atmosphère primitive et l'océan magmatique** et de la différenciation d'un noyau métallique est critique pour déterminer les conditions initiales des modèles d'évolution à plus long terme. La formation du noyau

terrestre concentre plusieurs enjeux depuis la mise en place d'une dynamo primitive jusqu'au cycle des éléments volatils avec la question de l'incorporation d'éléments légers dans la fraction métallique. Les réponses à ces questions viennent des résultats de mesures sur les objets les plus primitifs, d'observations de nébuleuses par les télescopes, d'expériences en laboratoire dans des conditions d'océans magmatiques et des modèles numériques. Les modèles de l'évolution des océans magmatiques intègrent des facteurs jusqu'ici ignorés comme l'effet de la rotation planétaire ou la fugacité d'oxygène. La **vigueur de la convection de l'océan magmatique** terrestre a ainsi été réévaluée à la hausse, et sa durée de refroidissement (quelques millions d'années) à la baisse. L'intensité et la rapidité du mélange induit par cette convection sont de nature à effacer totalement les hétérogénéités chimiques primordiales, ce qui pose désormais la question de leur persistance dans certaines laves. Il reste possible que l'océan magmatique n'ait pas pu totalement dégazer avant sa cristallisation, or ce dégazage a permis l'évolution de l'atmosphère primitive. Les observations des atmosphères d'exoplanètes à océan magmatique par les télescopes au sol et spatiaux apportent de nouvelles contraintes sur les processus de formation des atmosphères primitives. La question de la cristallisation de l'océan magmatique est par ailleurs cruciale pour évaluer la persistance actuelle de **couches fondues à la base du manteau**. La présence de fusion partielle, évoquée, et débattue, pour la Terre, a été récemment mise en évidence grâce à l'observation des premières phases sismiques à l'interface noyau/manteau sur Mars, une planète sans tectonique de plaques, par la mission InSight.

## LES ORIGINES DE LA TERRE



**Figure 3.** Les premiers millions d'années du système solaire sont critiques pour comprendre la formation des planètes et l'origine des éléments volatils sur Terre. Quelle est la fraction de molécules héritées du nuage moléculaire? Quand sont apparus les premiers corps différenciés? A quelle vitesse se sont formées les planètes? D'où vient l'eau sur Terre? Les conditions permettant l'apparition de la vie sur Terre sont-elles uniques? Dans toutes ces questions, la comparaison avec d'autres corps du système solaire, la Lune ou Mars en première place, apporte des réponses essentielles.

***De l'Hadéen à l'oxygénation : premiers continents, début de la tectonique des plaques, émergence de la vie et évolution du système océan-atmosphère***

La compréhension des interactions physiques et chimiques entre les différents composants de la Terre Primitive, depuis la lithosphère jusqu'à l'hydrosphère, l'atmosphère et les premières traces de vie, est une thématique de recherche active au sein de la section 18. Ces travaux se basent en grande partie sur des études des terrains d'âge Archéen (-4.0 à -2.5 Ga) préservés sur Terre, en particulier dans le cadre de forages scientifiques réalisés en partenariat avec l'International Continental Drilling Program (ICDP). Les avancées dans notre compréhension de la différenciation planétaire précoce ont bénéficié du développement des techniques d'analyse (voir encadré 3), qui ont affiné l'interprétation des signatures géochimiques de l'enregistrement géologique primitif (par exemple, les mesures de plus en plus précises des anomalies isotopiques liées à des radioactivités éteintes; les compositions chimiques et isotopiques des minéraux accessoires Hadéens et Archéens et leurs inclusions vitreuses ou minérales). Le développement de nouveaux traceurs géochimiques notamment basés sur les compositions en isotopes stables ou la spéciation de certains éléments apporte également un éclairage neuf sur **l'évolution des conditions redox et les interactions entre l'hydrosphère et la lithosphère sur la Terre Primitive.**

En parallèle, l'élaboration d'expériences de laboratoire et de modèles numériques ont permis de mieux comprendre les environnements primitifs sur Terre. Les résultats démontrent notamment que les premiers noyaux continentaux à l'Hadéen et l'Archéen ont pu se former et évoluer dans des contextes tectoniques n'impliquant pas nécessairement une tectonique des plaques à l'échelle globale. A partir du début de l'Archéen, **l'initiation progressive de la tectonique des plaques** aurait eu lieu le long des marges de ces noyaux cratoniques primitifs. Cependant, les modalités de cette transition et son timing (entre 3.8 et 3.2 milliards d'années ?) restent très débattus et donc, l'objet de recherches actives. Enfin, une composante de recherche importante utilise les outils de la **planétologie comparée** pour mettre en regard cette évolution géologique précoce de la Terre avec celle de Mars en particulier où les conditions initiales, que l'on pense très similaires à celles de la Terre, n'ont pas été effacées par la tectonique des plaques.

**ENCADRÉ 3. Nouvelle génération d'outils de caractérisation chimique et isotopique**

Au cours des 5 dernières années, les spectromètres de masse à source plasma à mono- ou multi-collection ([MC-]ICP-MS pour [Multi-Collector] Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer) ont connu une avancée majeure avec l'arrivée de différentes cellules de collision (CC). En parallèle, l'amélioration des détecteurs a permis de repousser les limites de détection et d'améliorer la précision des analyses. Le couplage de spectromètres de masse avec des techniques d'analyse à petite échelle (dites "ponctuelles" ou "in situ", par sonde ionique ou ablation laser) permettent la quantification des concentrations et la mesure des compositions isotopiques, ainsi que la réalisation de cartographies chimiques et isotopiques, pour un très grand nombre d'éléments dans des minéraux ou des verres à une échelle de quelques dizaines de micromètres, jusqu'à la centaine de nanomètres. Enfin, le couplage de systèmes LA-ICP-MS avec la spectroscopie sur plasma induit par laser (LIBS pour Laser Induced Breakdown Spectroscopy) élargira les potentialités d'analyse à haute résolution spatiale à une gamme d'éléments chimiques habituellement inaccessibles par ICP-MS (éléments légers notamment). Des développements en cours équipent la communauté française de méthodes de pointe, comme les «clumped isotopes» ou la spectroscopie laser. Pour les outils nationaux, la SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometer) et la nanoSIMS ont été équipées de nouvelles sources permettant une résolution spatiale plus fine. La tomographie par sonde atomique, combinée à des préparations par Faisceaux d'Ions Focalisés (FIB), permet d'obtenir des cartographies chimiques et isotopiques en 3D sur des volumes de l'ordre de la nano-échelle (<0.01  $\mu\text{m}^3$ ). Les développements en microscopie électronique en transmission permettent, enfin, de sonder la chimie

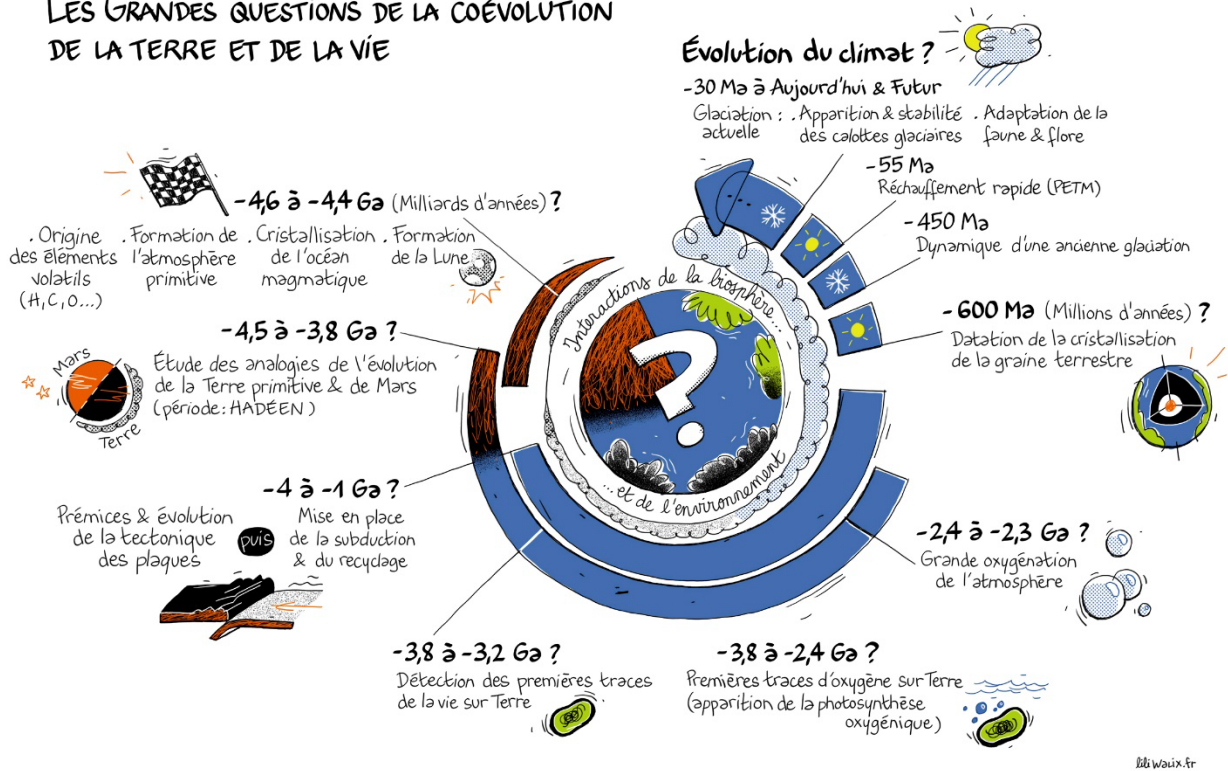
et les états d'oxydation des minéraux à l'échelle atomique. Ces instruments nationaux sont plébiscités par la communauté scientifique française et au-delà; ils nécessitent toutefois des investissements de mise à niveau ou de renouvellement et des ressources humaines pérennes.

Un autre enjeu majeur est de comprendre les **liens et rétroactions entre ces processus profonds et l'évolution des environnements de surface**, notamment pour quantifier leur influence mutuelle et comprendre comment, et sur quelles échelles spatiales et temporelles, la croissance crustale et l'émergence des surfaces continentales ont pu influencer l'évolution des grands cycles biogéochimiques et du climat, et vice-versa. Ainsi, en établissant les liens entre les états redox du manteau et des enveloppes externes, il est possible de remonter à la dynamique du recyclage des sédiments et de la croûte continentale au cours des temps géologiques, et donc à l'influence de la subduction sur les grands cycles bio-géochimiques. Par ailleurs, comprendre les environnements géodynamiques primitifs permet de comprendre où et comment est apparue la vie, par analogie avec des zones actuelles. Par exemple, les fumeurs noirs ou la biosphère profonde abritent des écosystèmes dans lesquels la photosynthèse n'intervient pas. Ces sites fournissent aussi d'excellents analogues de l'interface entre les noyaux réfractaires et les océans des satellites de glace de Jupiter et Saturne qui vont être étudiés par trois missions spatiales dont la mission Européenne JulCE.

Contourner la difficulté de **déterminer de manière non ambiguë la biogénicité** des plus anciennes traces de vie passe par une approche couplant travail de terrain, observations et analyses pétrographiques fines des sédiments et un travail expérimental sur la fossilisation (encadrés 1, 3 et 4). Ces études se focalisent à la fois sur le devenir des molécules organiques et sur le rôle des environnements de dépôt et de leur composition chimique (rôle des argiles, de la silice, ou d'autres éléments). De la même façon, contraindre l'existence d'eau liquide et d'océans sur la Terre jeune (et sur Mars) reste une question majeure liée à la présence des plus vieilles traces de vie. Enfin, l'étude d'environnements anoxiques modernes peut fournir des indications sur le **fonctionnement des écosystèmes de la Terre primitive** et des informations sur les signatures biogéochimiques retrouvées dans les sédiments anciens. Il est nécessaire de s'intéresser également à l'apparition de métabolismes clés, comme les photosynthèses, la méthanogenèse ou encore la réduction des sulfates, là aussi par l'étude de la préservation de molécules organiques diagnostiques ou de signatures isotopiques caractéristiques. En effet, ces métabolismes ont peu à peu contribué à façonner la composition chimique de l'océan et de l'atmosphère puis des surfaces continentales au cours de l'Archéen, pour culminer avec le premier événement majeur d'oxygénation de l'atmosphère ("Great Oxygenation Event" GOE). De nombreuses questions ont trouvé des réponses plus fines ces dernières années, notamment sur la chronologie du GOE et le traçage d'épisodes temporaires d'oxygénation avant 2,5 milliards d'années. Le GOE, suivi 2 milliards d'années plus tard par le NOE ("Neoproterozoic Oxygenation Event"), ne sont sans doute pas des épisodes uniques et irréversibles comme on le pensait, mais des transitions caractérisées par une évolution lente et accidentée.

L'étude de la vie sur Terre se couple à l'**étude de traces de vies potentielles sur Mars**, par les travaux en lien avec les rovers de la Nasa, équipés entre autres pour la spectroscopie in-situ, mais aussi par les approches expérimentales évoquées ci-dessus. Se pose là aussi la question de la biogénicité de marqueurs potentiellement observables à distance ou à l'avenir lors des retours d'échantillons martiens, ainsi que la question de la présence pérenne ou non d'eau liquide sur la planète rouge. Enfin, de nombreuses autres missions spatiales s'intéressent à l'habitabilité ailleurs que sur Terre, au sein du système solaire, voire plus loin, avec la question du développement des biosignatures atmosphériques.

## LES GRANDES QUESTIONS DE LA COÉVOLUTION DE LA TERRE ET DE LA VIE

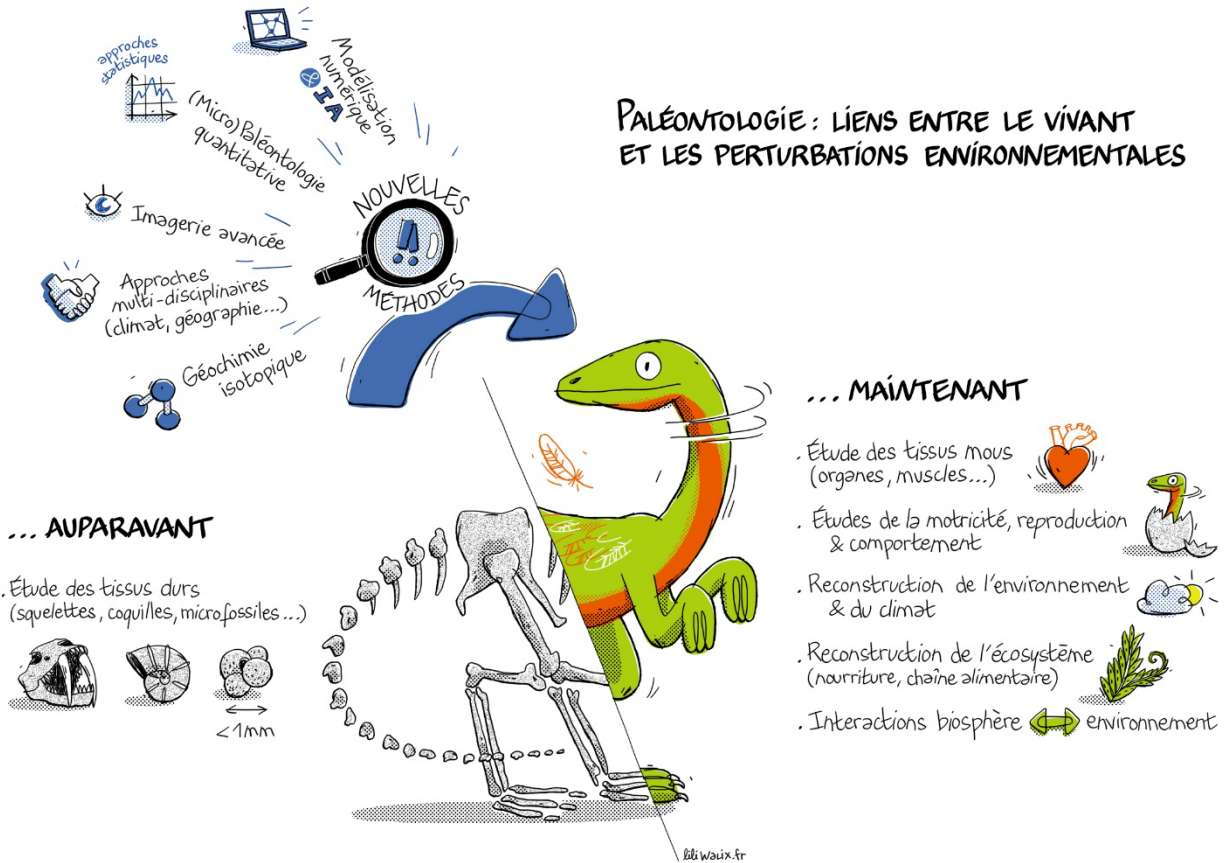


**Figure 4.** L'évolution de la vie et de ses interactions avec le système océan-atmosphère est un sujet de recherche structurant pour la communauté des Sciences de la Terre, avec de nombreuses questions clés sous-jacentes. Quand et comment sont apparus la vie et les différents métabolismes, notamment la photosynthèse oxygénique ? Quelles sont les étapes d'oxygénation de l'atmosphère, l'évolution et les contrôles de la teneur en CO<sub>2</sub> et méthane atmosphériques ? Peut-on mieux contraindre les **rétroactions biosphère-climat** qui jouent un rôle central dans l'évolution de la surface de la Terre ? La vie est-elle apparue sur Mars également ? La surface de Mars peut-elle nous renseigner sur les conditions qui régnaient à la surface de la Terre entre 4,4 et 3,8 Ga ? Cette évolution de la surface ne peut se comprendre qu'en lien avec l'**évolution de la Terre interne**. Quand sont apparues la subduction et la tectonique des plaques ? Quand s'est mis en place le recyclage sédimentaire et des éléments volatils ? Comment fonctionnait la dynamo primitive avant la formation de la graine ? Quel est l'âge d'apparition de celle-ci ? Comment a évolué le champ magnétique terrestre ? Enfin, sur les dernières centaines de millions d'années, étudier la coévolution biosphère-climat-tectonique-sédimentologie-cycles biogéochimiques lors des **alternances entre Terre "serre" et Terre "igloo"** est indispensable pour comprendre la mise en place des conditions environnementales de la Terre que nous connaissons actuellement. Quelles conséquences les glaciations-déglaciations ont-elles sur la biosphère et les cycles biogéochimiques ? Quels analogues du passé peut-on utiliser pour comprendre les perturbations en cours ? Comment fonctionne une surface terrestre à +2°C par rapport à l'Holocène ? Seules les **grandes échelles de temps** peuvent apporter des réponses à ces questions.

### Couplages tectonique-biosphère-environnements-paléoclimats ; données et modèles

Au cours de la dernière décennie, la connaissance des interactions entre climat, tectonique, biosphère et cycles biogéochimiques, et de leurs rôles respectifs dans le contrôle des paramètres critiques tels que les teneurs en CO<sub>2</sub> ou en O<sub>2</sub> du système océan-atmosphère, s'est considérablement affinée. La section 18 réaffirme son intérêt dans le développement de techniques et méthodologies novatrices qui permettent d'affiner la résolution du **registre fossile** (en termes de continuité stratigraphique et géographique, de révisions taxonomiques, d'exploitation des collections ou de nouvelles collectes de terrain) afin de mieux

appréhender les changements de biodiversité du Phanérozoïque en regard de facteurs abiotiques (et anthropiques pour les périodes les plus récentes). Dans ce contexte, l'étude des gisements de fossiles à préservation exceptionnelle (Lagerstätten), via la géochimie élémentaire et isotopique, permet de mettre en évidence les processus de préservation et d'identifier les biais de diversité introduits par la fossilisation. Des approches de taphonomie expérimentale se développent ainsi sur la **décomposition des organismes et leurs interactions avec le sédiment**. Enfin, la paléontologie est un outil majeur de corrélation stratigraphique et de mesure du temps (encadré 1).



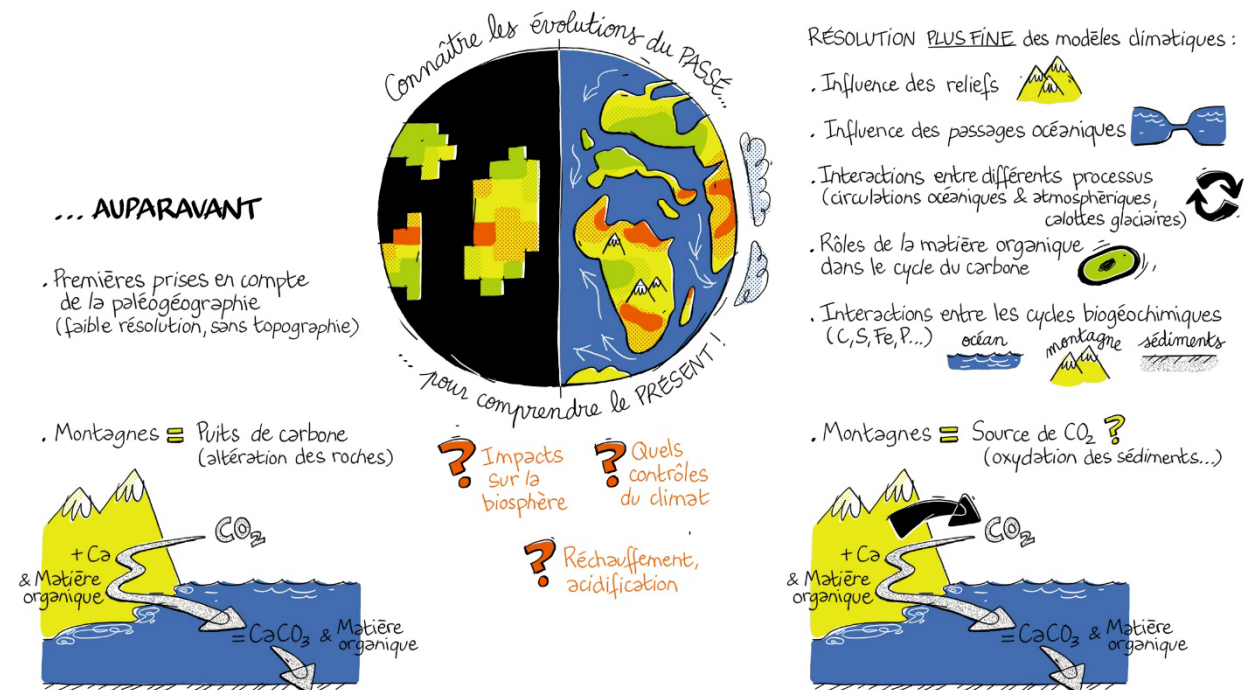
**Figure 5.** La mise au point de méthodes d'imagerie de plus en plus performantes permet de mettre en évidence l'(ultra)structure, à une échelle beaucoup plus fine, à la fois des tissus minéralisés et mous. En parallèle, l'application de différents rapports isotopiques (C, O mais aussi Ca, Sr, etc.) aux restes minéralisés d'organismes s'est développée. Les questions ont ainsi changé : Quelles sont les chaînes trophiques ? Quels sont les régimes alimentaires des vertébrés fossiles ? Quelle est leur physiologie, leur régulation thermique et leur mode de reproduction ? Pour ce qui est des microfossiles, l'introduction de l'IA pour la reconnaissance automatique permet d'étudier le rôle respectif de l'évolution et de l'environnement sur les changements de formes et de tailles.

**Les liens se renforcent entre paléobiologie, paléontologie et paléoenvironnements.** Ces dernières années ont vu l'essor du développement des approches géochimiques multi-proxies pour caractériser les milieux de vie, les relations trophiques, les métabolismes, ou encore l'endothémie ou la lactation des espèces anciennes. La caractérisation des structures internes minéralisées et des parties molles (organes) des fossiles bénéficie d'énormes progrès grâce à l'utilisation de la tomographie aux rayons X, en laboratoire ou sur synchrotron et les reconstitutions 3D qui en résultent (encadrés 3, 4 et Figure 5). Des traitements statistiques de plus en plus sophistiqués des grandes bases de données permettent d'établir de manière précise **l'évolution de la biodiversité au cours des temps géologiques**, ou les tendances lors



de grandes crises de la biodiversité en relation avec les bouleversements climatiques. L'utilisation de l'IA pour la reconnaissance automatique de microfossiles (nanofossiles calcaires, foraminifères, diatomées, palynomorphes, etc.), ouvre de nouvelles perspectives sur des processus évolutifs de changements morphologiques jusqu'alors cryptiques. Ainsi l'IA permet l'acquisition et le traitement de quantités de données inédites, avec une densité d'échantillonnage qui permet d'aborder les changements environnementaux du passé. En parallèle, l'importance des rétroactions des émergences et innovations biotiques (ex., photosynthèse oxygénique, terrestrialisation, biominéralisations, calcification pélagique) sur les environnements et sur les climats devient de plus en plus évidente.

## COMPRÉHENSION DU CLIMAT & DES CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES



blivieux.fr

**Figure 6.** Depuis le développement des premiers **modèles de climats passés**, l'amélioration de la résolution topographique des modèles de Terre ancienne permet une prise en compte de plus en plus fine de l'influence des configurations continentales et océaniques. Des questions fondamentales peuvent être revisitées ou de nouvelles questions posées: quelle est l'influence des reliefs et des nouveaux passages océaniques sur le climat ? Comment se forment les sols et quelle est leur influence sur l'altération et sur le climat ? Les modélisations des cycles biogéochimiques sont de moins en moins paramétrées. Comment modéliser les interactions nombreuses et complexes entre les éléments chimiques, le vivant et le climat ? Comment a évolué la concentration en oxygène dans l'océan lors des grandes crises du passé ? Comment expliquer les différentes glaciations majeures du passé lointain ? Les progrès en modélisation sont liés non seulement à la puissance de calcul croissante, mais également à **l'amélioration des reconstructions paléogéographiques** (position des continents, reliefs, etc.). Quel est le rôle des chaînes de montagne dans le cycle du carbone : sont-elles un **puits ou une source de CO<sub>2</sub>** ? Faut-il revoir notre vision des contrôles à long-terme de ce cycle ? En effet, l'altération est considérée comme un puits de CO<sub>2</sub> (il se retrouve piégé dans les sédiments sous forme de roches calcaires, CaCO<sub>3</sub>), alors que l'oxydation des sédiments (matière organique ancienne, pyrite) sont des sources de CO<sub>2</sub> plus importantes que l'on imaginait. Le rôle de l'érosion et de l'enfouissement de matière organique récente sur le stockage de CO<sub>2</sub> est de plus en plus souligné, tout comme les **processus biologiques dans les sédiments océaniques en formation ou dans la lithosphère**.

Des progrès récents (en lien avec les sections 19 et 30) sur l'étude du **cycle du carbone** soulignent que le rôle de la matière organique comme source (oxydation de la matière organique sédimentaire) ou puits (enfouissement de matière organique récente) de CO<sub>2</sub> à grande échelles de temps (plus de 100 ka) est aussi important que celui de l'altération des silicates (Figure 6), elle-même modulée par le cycle du soufre avec l'oxydation de la pyrite. Celle-ci libère de l'acide sulfurique qui contrebalance en partie la consommation de CO<sub>2</sub> lors de l'altération. Dans l'océan, les interactions entre biosphère et paramètres chimiques et environnementaux sont mieux comprises, grâce aux études sur les organismes biocalcifiants (notamment coccolithophoridés et foraminifères, mais aussi coraux, brachiopodes etc.) ou encore les microbialites et leur comportement face à l'acidification océanique ou d'autres perturbations des cycles biogéochimiques. Ainsi le vivant et l'inorganique sont de plus en plus étudiés comme un continuum, et la **biominéralisation** en général (notamment carbonates, phosphates, silice, oxydes de fer) constitue un axe important des recherches dans la section. Enfin, les cycles ne sont pas seulement étudiés à la surface des continents ou dans l'océan, mais également dans les **sédiments océaniques** (altération inverse, diagenèse, sulfato-réduction et méthanogenèse) et la **biosphère profonde**.

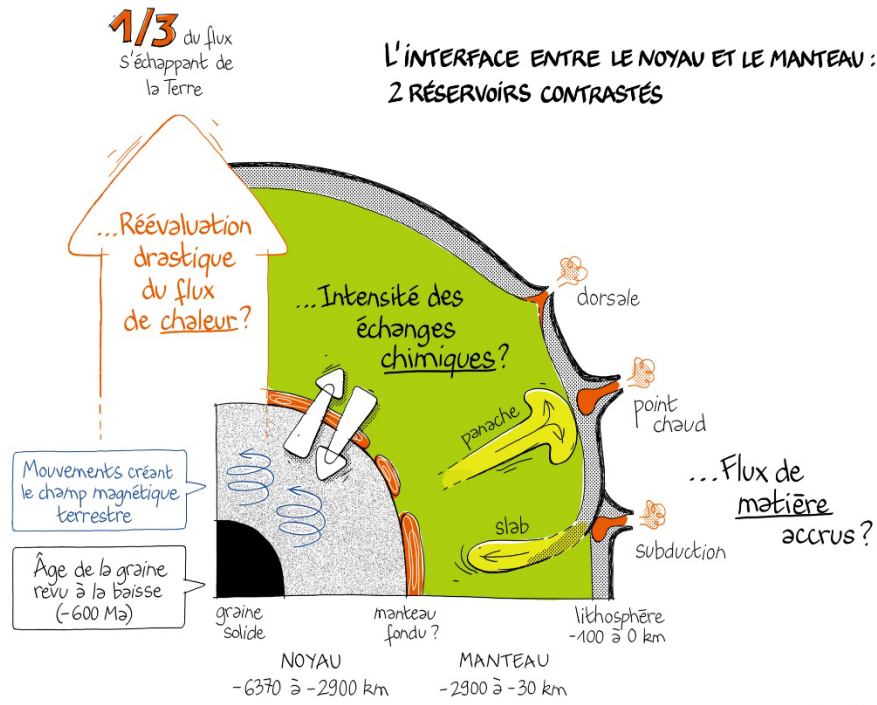
Les études se poursuivent sur les variations climatiques, les événements d'anoxie ou de la teneur en gaz à effet de serre et en O<sub>2</sub> de l'atmosphère au cours du Cambrien et du Phanérozoïque, avec des études de plus en plus poussées couplant les cycles biogéochimiques, l'évolution biologique, la géodynamique terrestre, les circulations paléo-océanographiques et recourant à des modélisations de plus en plus résolues et capables d'intégrer des processus de plus en plus complexes. Les modèles (encadré 1) permettent également de comprendre le couplage entre de nombreux cycles géochimiques (Figure 6). Au cours des périodes chaudes et notamment des événements **hyperthermiques**, les études portent également sur les crises de la calcification des organismes planctoniques et benthiques, dues à une sous-saturation en carbonates des eaux océaniques et à une remontée de la profondeur de compensation de carbonates (CCD), attestant du rôle majeur joué par les océans du passé dans l'absorption des excès de CO<sub>2</sub> atmosphérique. De manière générale, l'amélioration des méthodes d'analyse et des paléochronomètres permet d'atteindre une résolution temporelle inédite et de se rapprocher des échelles de temps mises en jeu dans les crises actuelles (encadré 1). L'affinement des **modèles numériques** couplant **paléogéographie, cycles biogéochimiques et climat** ont permis d'étudier par exemple la glaciation Ordovicienne, les refroidissements Cénozoïque et Néogène, l'impact de la tectonique himalayenne sur la mousson asiatique, le cycle du carbone, et la dispersion des populations animales. Enfin, de plus en plus de recherches pluri-, voire interdisciplinaires, permettent d'intégrer sédimentologie, tectonique, géochimie, (micro)paléontologie, palynologie et modélisation pour aborder ces enjeux complexes.

### III. Dynamique de la Terre et des planètes

#### *La Terre profonde : du noyau au manteau*

Quantifier les **échanges thermo-chimiques** entre noyau et manteau de la Terre moderne demeure un enjeu majeur, et un champ de recherche en profonde transformation depuis quelques années (Figure 7). La **réévaluation drastique de la conductivité thermique** du noyau par les expériences à haute pression et les modèles ab-initio a notamment eu plusieurs implications de premier plan. Le flux de chaleur du noyau vers le manteau pourrait ainsi représenter plus du tiers des pertes thermiques de la Terre interne, et ainsi constituer le moteur dominant de la convection mantellique, notamment de l'initiation des panaches, sources du volcanisme de points chauds. **L'âge de la graine solide** au centre du noyau est également **revu à la baisse**, à environ 600 millions d'années. Enfin, le sommet du noyau est vraisemblablement stable vis-à-vis de la convection thermique, une situation difficile à réconcilier avec les observations

géomagnétiques actuelles, ainsi qu'avec la présence d'une géodynamo avant la formation de la graine. La clé pourrait se trouver dans les **échanges chimiques au travers de la frontière noyau-manteau**. Les progrès de la détermination expérimentale des coefficients de partage des éléments légers (O, Si, H, C, S, Mg...) entre alliages métalliques et silicates permettent d'évaluer ces échanges de manière plus précise, éclairant ainsi leurs implications dynamiques. L'intensité de ces échanges semble par ailleurs modulée par les couplages entre ces éléments, qui ne peuvent plus être considérés indépendamment, ainsi que par la présence de fusion partielle à la base du manteau.



**Figure 7.** La frontière noyau-manteau, à l'interface de deux réservoirs ayant le plus grand contraste de densité à l'intérieur des planètes telluriques, est l'objet de nombreux travaux. De grandes questions persistent, notamment : Quelle est la composition en éléments légers du noyau ? Si l'existence d'une couche liquide à l'interface noyau-manteau est maintenant admise, qu'en est-il de ses dimensions, de sa composition et de son rôle potentiel de filtre chimique pour des échanges élémentaires entre les deux réservoirs ? Les contrastes de température, de densité, de composition et d'état (solide/liquide) et les flux correspondant (thermiques, compositionnels) à cette

interface déterminent la dynamique et la chimie de l'ensemble de la Terre silicatée et de son noyau.

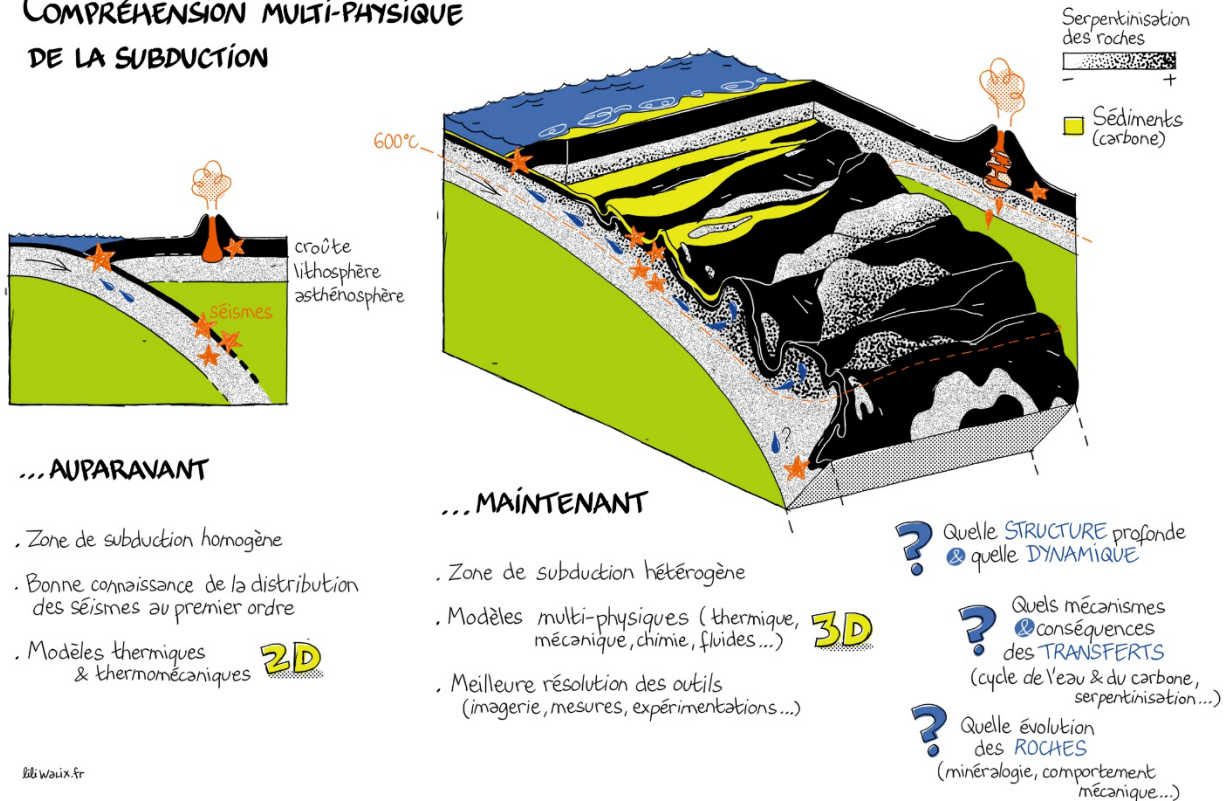
Les minéralogies du manteau sub-lithosphérique, de la zone de transition et du manteau inférieur sont toujours étudiées. Les dernières années ont renforcé la vision d'un **manteau actuel plus riche en eau et autres espèces volatiles** que ce qui était envisagé auparavant. Les questions de sa composition ainsi que d'une stratification des éléments volatils en profondeur restent d'actualité. Notamment, le rôle de l'état redox sur l'efficacité de leur recyclage via la subduction, leur transfert et stockage en profondeur, et sur leurs bilans globaux, est toujours investigué.

### Nouveaux enjeux autour de la tectonique des plaques

La dynamique de la lithosphère, l'enveloppe la plus superficielle de la Terre solide, conditionne l'évolution à long terme de notre planète tout en façonnant sa surface et en occasionnant des risques sismo-volcaniques majeurs. La tectonique des plaques apparaît aujourd'hui comme un phénomène indissociable de la convection mantellique, dans lequel la couche limite lithosphérique se morcelle en fragments animés de mouvements relatifs divergents, convergents, et transformants. S'il est possible depuis une vingtaine d'années, de faire émerger ce régime dynamique dans les modèles globaux de convection, ceux-ci se basent toujours sur des rhéologies simplifiées, parfois difficiles à réconcilier avec les données expérimentales. Un défi majeur pour le futur est d'intégrer de manière plus complète le **couplage entre plaques lithosphériques et dynamique mantellique** dans un modèle sphérique global, en utilisant des lois

rhéologiques plus réalistes, tout en permettant la formation spontanée de reliefs. Néanmoins, les modèles actuels nous permettent déjà de mieux comprendre les forces motrices des plaques tectoniques et leur capacité à se réorganiser subitement, engendrant ainsi des événements tectoniques d'ampleur mondiale ou régionale.

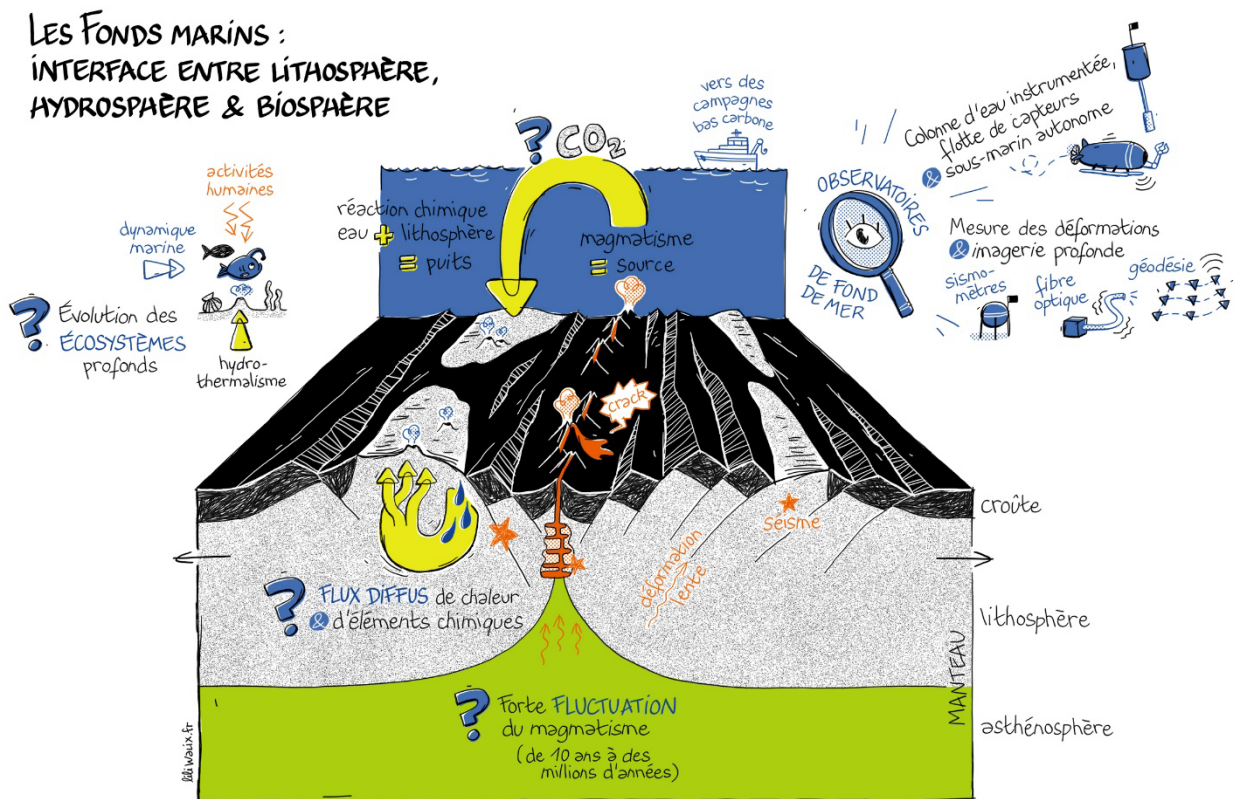
## COMPRÉHENSION MULTI-PHYSIQUE DE LA SUBDUCTION



**Figure 8.** Les progrès dans les outils d'imagerie, les modèles numériques et les études intégrant observations de terrain et expériences de laboratoire ont permis une meilleure caractérisation des processus impliqués dans les zones de subduction, notamment à l'interface entre le panneau plongeant et la plaque supérieure. Les recherches mettent en évidence l'**hétérogénéité des zones de subduction** aussi bien en termes de structure 3D qu'en termes de processus (métamorphisme, circulation de fluides) régissant la déformation des roches. Les **interactions physico-chimiques** multiples et complexes qui s'y produisent sont des éléments essentiels dans la compréhension de la sismicité par exemple. Des questions cruciales restent à élucider comme: Comment se transforment les roches lorsqu'elles sont enfouies en profondeur au sein des zones de subduction ? Quel impact mécanique cela peut-il engendrer? Par ailleurs, les zones de subduction sont le siège d'échanges importants entre la surface et le manteau et constituent donc des cibles d'études privilégiées pour comprendre le **cycle de l'eau et du carbone**. Là encore restent des questions majeures: Comment se font les transferts de matières entre le panneau plongeant, le manteau et la surface, et sur quelles échelles de temps? Les travaux sur ces thématiques permettent déjà d'étudier certains de ces couplages mais la route est longue avant l'obtention d'un modèle multi-physique complet permettant d'inclure dans le futur ces processus essentiels à des échelles spatio-temporelles pertinentes.

Les grandes frontières de plaques tectoniques comme les zones de subduction (Figure 8), les rifts et les dorsales océaniques (Figure 9) sont de plus en plus étudiées comme des systèmes complexes où la déformation localisée permet des **échanges thermo-chimiques** de première importance **entre le manteau profond et l'atmosphère/hydrosphère**. Les mouvements verticaux de la croûte et du manteau (exhumation aux rifts, aux marges passives et dorsales, recyclage au sein des zones de subduction), le magmatisme et les circulations de fluides sont autant de vecteurs pour ces échanges.

De plus en plus de travaux menés au sein de la section 18 s'attachent à **quantifier ces flux** à l'actuel, mais aussi au cours de l'histoire terrestre, en développant une compréhension plus fine des processus de déformation et des transformations minérales associées au niveau des zones de subduction par exemple (Figure 8). Une attention particulière est aujourd'hui portée au rôle des grandes frontières de plaques passées et actuelles dans les **cycles biogéochimiques** qui modulent le climat terrestre et l'évolution de la biosphère. L'ampleur du dégazage de CO<sub>2</sub> causé par le magmatisme des rifts, des dorsales, et des zones de subduction est par exemple à contraster par rapport à l'efficacité du piégeage du CO<sub>2</sub> par les réactions d'altération de la lithosphère exhumée par les processus tectoniques (Figure 9). Enfin, la dynamique des domaines intraplaques, caractérisée par des déformations lentes mais pouvant toutefois connaître une activité sismique et volcanique marquée, continue à recevoir une attention particulière.



**Figure 9.** Si la structure de la lithosphère océanique, qui constitue ~2/3 de la surface terrestre, est de mieux en mieux comprise, son rôle dans les grands cycles biogéochimiques reçoit de plus en plus d'attention. Des questions cruciales néanmoins persistent: Les dorsales océaniques sont-elles des sources nettes de CO<sub>2</sub> par leur activité volcanique, ou l'altération des lithologies ultramafiques qu'elles portent à l'affleurement en fait-elle des puits de carbone? Quelle est l'étendue et la vigueur des circulations hydrothermales, profondément liées à l'activité tectono-magmatique, qui fluctue à toutes les échelles de temps ? Nous commençons à peine à comprendre la diversité des manifestations de l'activité hydrothermale, qui est certainement beaucoup plus diffuse que précédemment envisagée. L'activité hydrothermale comme volcanique, ainsi que la dynamique des écosystèmes associés, sont aujourd'hui étudiées via des observatoires de fond de mer caractérisant la sub-surface comme la colonne d'eau. Ces observations in-situ sont essentielles pour comprendre la sensibilité des systèmes abyssaux aux perturbations géologiques, océanographiques et anthropiques. Ce contexte d'exhumation de matériels profonds et de fluctuation de l'activité magmatique sert d'analogie pour la compréhension des processus de fin de rifting, début d'océanisation et de mise en place des marges passives.

#### **ENCADRÉ 4. Grands instruments et conditions extrêmes.**

Les mises à jour récentes ou en cours des synchrotrons européens et français, avec des faisceaux plus intenses, cohérents et/ou submicroniques, ont ouvert la voie à des études jusqu'ici impossibles par diffraction et tomographie de rayons X et par une large gamme de spectroscopies (fluorescence et absorption X, Raman, FTIR, etc.). Ces avancées technologiques permettent à présent d'aborder, à de très hautes pressions et températures, la détermination de nouvelles phases, de phases riches en éléments légers C-H-O-N, de produits de fusion, l'étude d'équilibres de phases en temps réel, et la caractérisation dynamique des fabriques et des microstructures des roches. Les développements des mesures expérimentales de conductivité thermique et électrique à hautes pressions et températures, de génération des ondes élastiques et de leurs vitesses de propagation, et des propriétés d'atténuation, en conditions profondes, fournissent des données d'entrée de modèles numériques, thermodynamiques et de comparaison aux observables sismiques ou aux retours d'échantillons de missions spatiales. Enfin, les techniques de compression par laser génèrent aujourd'hui des conditions de pressions et températures similaires à celles de la Terre, d'autres planètes et exoplanètes, et couvrent des domaines thermodynamiques différents de ceux des expériences statiques. Leur couplage avec les sources de rayons X de 4<sup>ème</sup> génération (X-ray Free Electron Laser) ouvre la porte à l'étude des intérieurs planétaires avec des mesures femtoseconde affranchies des limites cinétiques.

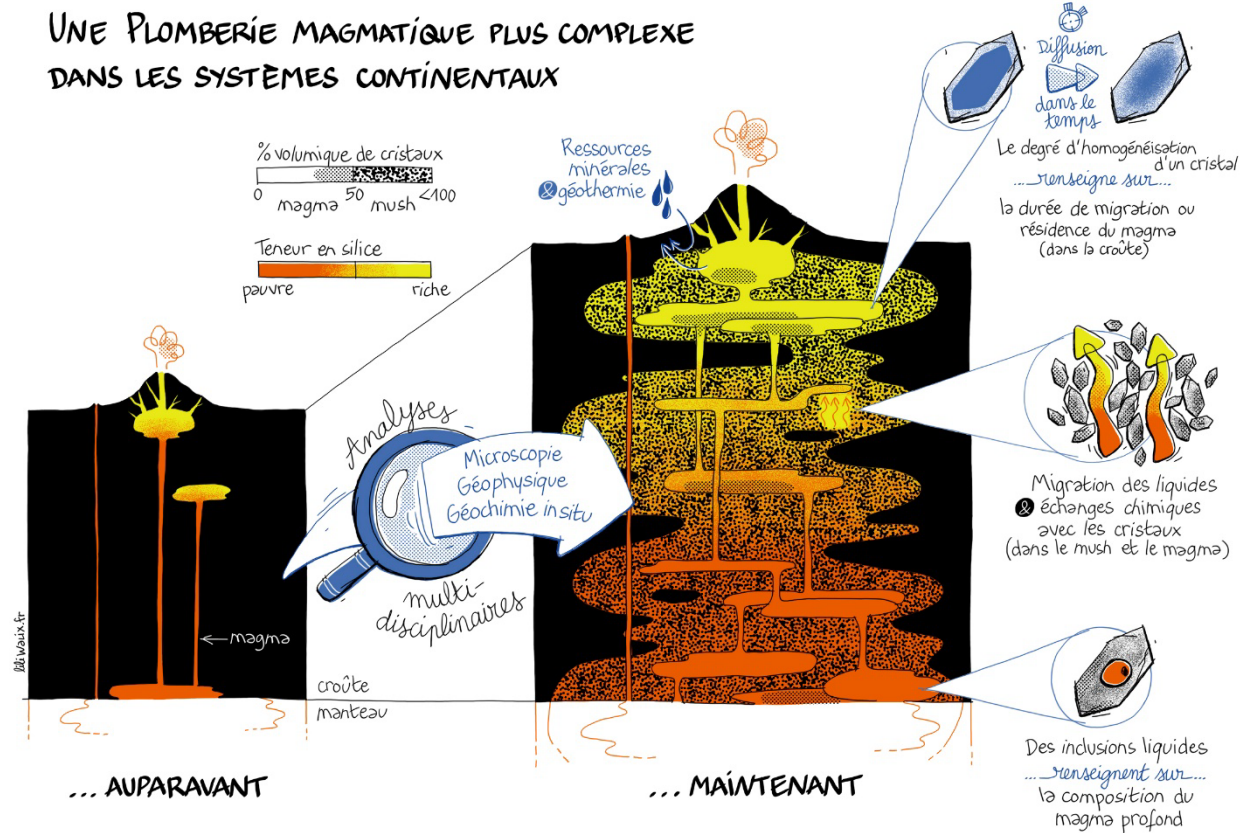
#### ***De nouvelles rhéologies pour la Terre interne***

Les simulations numériques des grands processus géodynamiques continuent de s'appuyer sur des lois rhéologiques déterminées en laboratoire, malgré les très grandes différences d'échelles spatio-temporelles qu'elles recouvrent. Il devient ainsi crucial de comprendre comment s'opère ce **saut d'échelle**, ce qui ne peut se faire qu'en combinant approches expérimentales, théoriques, numériques et mesures sur le terrain. Quantifier la réponse de la Terre solide à des forçages allant des marées à des chargements géologiques lents, en passant par le rebond post-glaciaire, permet ainsi de **calibrer des lois rhéologiques aux différentes échelles de temps**. Ces lois doivent être formulées afin de rendre compte également de la physique des processus de déformation à l'échelle des minéraux. L'influence des **réactions métamorphiques**, et de leurs **cinétiques** ainsi que le **rôle des fluides** sur la rhéologie doivent être quantifiés et leurs mécanismes hiérarchisés. Ces défis majeurs sont une étape indispensable à l'élucidation de problèmes de premier plan, comme l'émergence de plaques tectoniques dans la convection mantellique, ou l'évolution des grands systèmes de faille qui façonnent les paysages. Ils sont tout aussi essentiels à l'élaboration de modèles reliant la déformation à long-terme de la surface terrestre, hautement inélastique, à sa manifestation à l'échelle humaine: des glissements transitoires sur des failles chargées élastiquement.

#### ***Transferts magmatiques***

Ces dernières années, l'imagerie géophysique de plus en plus résolue et les progrès de la pétrologie magmatique ont conduit à revisiter notre vision du **transfert des magmas** à travers la croûte continentale et leurs mécanismes de différenciation. En particulier, dans les systèmes produisant des magmas différenciés, la vision unique de la plomberie magmatique où des conduits verticaux connectent les chambres infra- et supracrustales où les magmas évoluent chimiquement par cristallisation fractionnée a évolué vers un **modèle de connectivité plus complexe** (Figure 10). Celui-ci est marqué par l'existence de poches de magmas largement liquides et potentiellement éruptibles, au sein d'un important volume de magma largement cristallisé ("mush"). Le transport du magma peut se faire de façon chenalisée, mais aussi d'une manière plus diffuse à travers le mush selon des modalités physiques encore mal comprises (ex. ondes de porosité). Les magmas se différencient non seulement au sein des chambres intermédiaires,

mais également par le biais des **interactions entre liquide et cristaux** au cours de la percolation dans les zones de mush (transport réactif).



**Figure 10.** Les transferts de magmas à travers la croûte continentale, depuis le manteau jusqu'à la surface, ont toujours été difficiles à appréhender par manque d'observations directes des zones de stockage et d'évolution de ces magmas. Des questions fondamentales n'ont obtenu pendant longtemps que des réponses partielles : À quelle profondeur les magmas sont-ils stockés ? Quelle est la taille des réservoirs magmatiques crustaux ? Combien de temps les magmas peuvent-ils séjourner dans un réservoir avant de repartir vers la surface ? Les réponses à ces questions ont des implications tant économiques (mise en place de systèmes hydrothermaux et formation de gisements associés), que sociétales (surveillance des volcans actifs, prévision des éruptions volcaniques et impact sur les populations). La combinaison d'études pétrologiques détaillées à l'échelle du minéral, assistées de techniques analytiques "ponctuelles" de plus en plus précises et de modèles thermodynamiques plus performants permet de proposer des modèles plus complexes de la plomberie magmatique sous les grandes provinces volcaniques continentales. La **présence de magmas largement cristallisés à différents niveaux de la croûte**, mais au sein desquels le liquide peut circuler, interagir et éventuellement s'accumuler localement, présente un cadre conceptuel en bon accord avec les données de plus en plus précises qu'offre la géophysique sur la localisation des séismes (signaux volcano-tectoniques, séismes longue-période, et tremors) et la distribution du liquide silicaté sous les volcans. Les **temps de résidence des magmas** dans ces réservoirs estimés à partir des modèles de diffusion des éléments dans les cristaux sont maintenant confrontés aux observations volcanologiques de surface.

Dans ce contexte, les **hétérogénéités de composition** à l'échelle intra-cristalline sont devenues les archives privilégiées des processus magmatiques. L'étude de ces hétérogénéités permet de déterminer l'évolution chimique des liquides, dont la composition peut également être préservée directement au sein d'inclusions de liquide magmatique (par exemple les liquides primitifs d'origine mantellique, piégés au sein des cristaux précoces). Enfin, sur la base des propriétés de diffusion des éléments dans les cristaux, il

devient possible de **contraindre les modalités** (par pulse) et la **durée** (plus courte) des processus de transferts de magmas. Ces études reposent sur le développement des outils de micro-analyse élémentaire et isotopique "ponctuelles", dont la résolution spatiale et la précision sont en continuelle amélioration, et sur des cartographies chimiques en éléments traces de plus en plus précises (voir encadré 3). Plus généralement, cette nouvelle vision des systèmes magmatiques continentaux a permis à son tour une meilleure compréhension de la formation des ressources minérales et géothermiques associées à ces environnements magmatiques.

### **Apports de la planétologie**

À l'aune d'importants développements méthodologiques et instrumentaux en physique des minéraux (voir encadré 4), et de l'horizon des missions spatiales de la prochaine décennie, la recherche consacrée en section 18 aux intérieurs planétaires se déplace aussi vers d'autres objets. L'expérimentation à haute pression et haute température s'élargit vers les conditions des **objets telluriques exoplanétaires** (super-Terres), afin de déterminer les minéralogies et d'estimer des propriétés physiques fondamentales nécessaires à la modélisation de leur évolution dans le temps. La modélisation dynamique des océans de sous-surface des satellites de Jupiter se développe aussi, avec en ligne de mire savoir si leur dynamique peut être sondée par mesure magnétique, d'une manière inspirée par le géomagnétisme terrestre.

## **IV – Réflexions et recommandations**



### **Evolution du financement de la recherche**

Depuis quelques années, des financements massifs et ciblés sur des personnes (**ERC**), des laboratoires (**LabEx**) ou des thématiques (**PEPR**) ont donné une **forte dynamique à certaines équipes** mais ont induit une forte hétérogénéité de moyens. La communauté est impliquée dans plusieurs PEPR, soit directement (Origins, Sous-sol bien commun, IRIMA, Grands fonds marins), soit à la marge (FairCarbon, OneWater, Ville durable, Recyclage, BRIDGES, Math-VIVES, TRACCS). Le pilotage de ces PEPR apparaît souvent flou pour la communauté et chronophage pour les responsables. **L'efficacité des PEPR ne semble pour l'instant pas évidente** en regard des appels d'offres ouverts tels que l'**ANR qui apparaît sous-dotée** (à comparer avec ~39% en Suisse, ~28% en Angleterre, etc.). Les faibles taux de réussite aux projets ERC, qui sont de formidables outils d'accélération, génèrent une désillusion pour les candidats non retenus, notamment parmi les jeunes. De plus, l'écriture de ces projets mobilise un temps de travail énorme. Nous pensons qu'**un soutien de base élargi en parallèle de ces appels à projet** permettrait un meilleur équilibre entre production scientifique et recherche de financement. Par ailleurs, ces projets forment parfois des personnes aux profils similaires, pouvant générer un goulot d'étranglement pour le recrutement dans certaines thématiques. Une réflexion est à mener pour articuler l'acquisition d'équipements, via ces projets, avec les stratégies nationales en termes d'instruments, de ressources humaines associées, permettant d'**assurer la pérennité des plateformes**.





### **Structuration des communautés**

La **communauté est maintenant organisée pour répondre rapidement en cas de crise** liée à un séisme (ex. les séismes en Turquie et en Syrie en 2023) ou à une éruption volcanique. Par exemple, suite à la crise sismo-volcanique qui a débuté en 2018 à Mayotte, le consortium REVOSIMA (Réseau Sismologique et Volcanologique de Mayotte) a été formé. Il permet de surveiller l'évolution de l'activité sismique et volcanique grâce au déploiement d'instruments autonomes et à des campagnes multi-disciplinaires. Des **GdR** se sont constitués autour des besoins clés de la communauté comme le numérique (NuTS), le rift est-africain (RIFT), l'interaction Math-Géophysique (MatGeoPhy), le milieu marin (OMER), les paléoenvironnements (Clim2Past). Des liens forts existent avec des GdR d'autres instituts et réseaux de la MITI (Lasers énergétiques "LEPICE", Technologies des Hautes Pressions). Ces outils, tout comme les **écoles thématiques**, peuvent agir comme de formidables catalyseurs et espaces d'échanges. L'apparition récente de RéGEF permet une mise en réseau des outils expérimentaux et géochimiques et contribue à des échanges entre responsables de plateforme à travers la France, avec cependant un risque de redondance vis-à-vis des structures locales.



### **Réduction de l'empreinte environnementale de la recherche**

Notre communauté doit s'impliquer pour **réduire l'empreinte environnementale de la recherche**. Notre empreinte carbone globale est dominée par les achats, suivis par l'empreinte énergétique des bâtiments et instruments de recherches, les missions et trajets domicile-travail. Un effort doit donc être mené pour économiser, mutualiser, valoriser et assurer la **jouissance des équipements existants** et réfléchir au coût énergétique de leur utilisation, rationaliser les missions et la consommation d'énergie des bâtiments ainsi que leur rénovation éco-responsable. L'exploitation et le partage des données existantes devraient également être prioritaires et le **travail collaboratif encouragé et valorisé** (voir déclaration San Francisco DORA), en particulier sur les publications. Les appels d'offres locaux, nationaux et internationaux doivent **favoriser le financement de projets utilisant des données existantes**, impliquant des collaborateurs locaux à faible empreinte environnementale. La complexité sans cesse croissante des procédures d'achats et des marchés empêche toute flexibilité. Des **réformes doivent être mises en place offrant plus de liberté aux acteurs**, comme la possibilité d'acheter hors marchés, la mise en œuvre de bourses de matériels et de structures de recyclage, la longévité des budgets dont la courte durée occasionne des gaspillages inutiles. Tout cela nécessite de **changer nos critères de financement et d'évaluation** de la recherche et, pour les tutelles et le ministère, de **miser sur la confiance** en donnant plus de liberté aux chercheurs pour favoriser l'éco-responsabilité de leurs missions, équipement et fonctionnement.



### **Solutions pour accroître l'efficacité, réduire les coûts et simplifier les procédures**

Nous partageons le ressenti d'un **écrasement administratif**, comme beaucoup de personnels du secteur public. Plusieurs solutions simples sont pourtant envisageables pour accroître l'efficacité de notre travail et réduire les coûts. Les personnels devraient pouvoir **réserver leurs billets de transport et leur hébergement hors marché** (coût moins élevé que le marché, flexibilité), afin d'éviter aux agents d'augmenter la durée des missions pour trouver un transport abordable, ou de devoir se loger loin du lieu de mission. Les réservations internationales de transport en train - à ce jour problématiques - sont à privilégier par rapport à l'avion malgré le prix souvent plus élevé. **Nous proposons que le CNRS et les universités maintiennent un plafond de remboursement qui reste le même dans ou hors-marché, en généralisant la carte achat professionnelle**. Nous proposons que les tutelles fassent confiance aux agents

concernant leurs repas et n'imposent pas de fournir toutes les factures, ce qui libérerait un temps significatif pour tous. D'autre part, il nous semble fondamental d'**augmenter les salaires** et de faciliter les progressions de carrières des **personnels administratifs et des personnels d'appui à la recherche**. Cet aspect représente un véritable obstacle pour les recrutements et leur pérennisation.



### **Promotion de l'interdisciplinarité et des changements thématiques**

Les recherches de la section 18 nécessitent des travaux interdisciplinaires par exemple en mécanique, chimie, mathématiques, numérique, ingénierie, sciences humaines et sociales ou encore biologie. Soutenir cette interdisciplinarité nécessite de **changer certaines pratiques et critères d'évaluation**. Pour une prise en compte pertinente de l'impact de l'implication des chercheurs et chercheuses dans l'interdisciplinarité, de leurs changements de thématiques, il apparaît nécessaire de pouvoir **demandeur un avis ponctuel à un membre d'une autre section** lors des évaluations et des concours. Actuellement, une telle demande n'est pas envisageable, car elle impose à ce membre d'assister à tout le concours. La réalisation de travaux pluridisciplinaires implique que le **nombre et/ou l'ordre des auteurs** soient flexibles, ce qui suggère de ne pas mettre trop de poids sur ces critères lors des évaluations, **favorisant ainsi les travaux collaboratifs**.



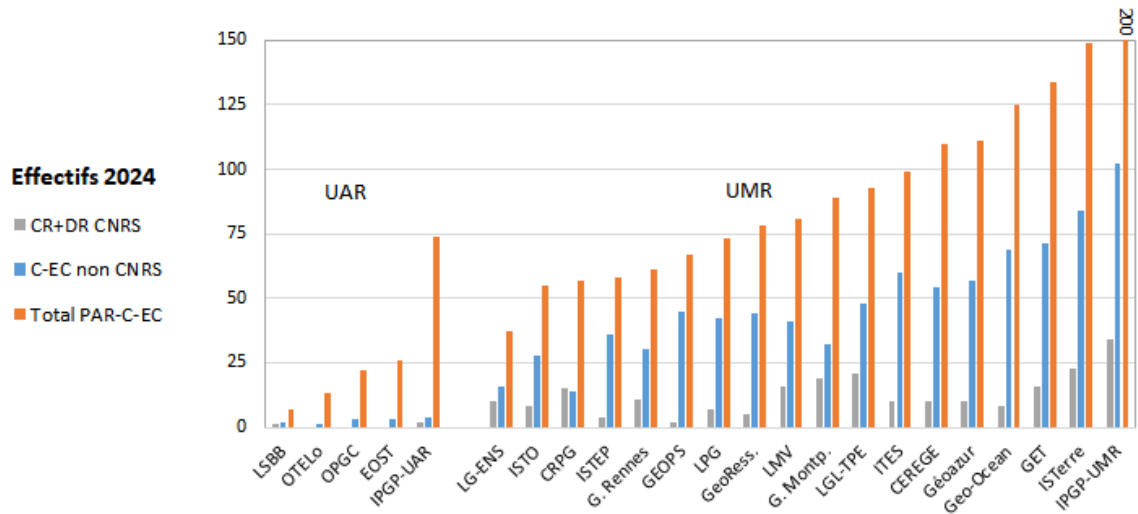
### **Appui aux décideurs sur les risques**

Les nombreuses recherches et outils développés au sein de la section 18 pourraient encore plus bénéficier aux opérateurs de l'État et aux ministères comme **appui à la politique publique**, notamment dans l'évaluation des aléas. Notre communauté n'est pas assez identifiée, nous proposons qu'un **annuaire des chercheurs et chercheuses** avec recherche par mots clés soit mis en place et disponible pour les acteurs du risque et que des **financements spécifiques** soient mis en place, **avec comme condition une collaboration académique/ autres organismes de l'État** (par ex. BRGM, CEA, IFREMER, INRIA, INERIS).

## **V – Ressources humaines : état des lieux**

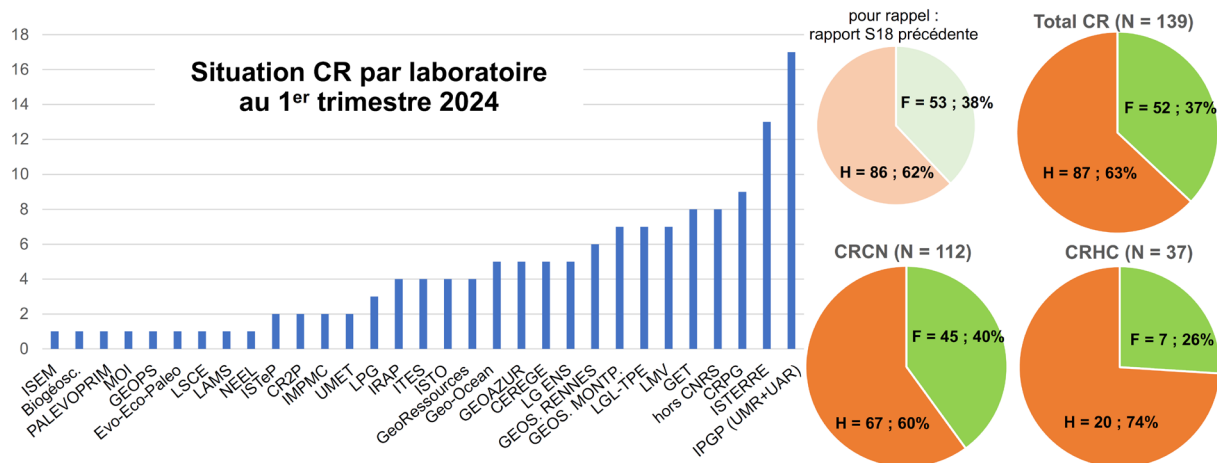
### **Effectifs et statistiques**

Au premier semestre 2024, la section 18 compte 409 chercheurs et chercheuses dont 139 CR (27 CRCH et 112 CRCN) et 270 DR. 47 Unités Mixte de Recherche et 1 Unité Propre de Recherche sont rattachées à la section 18, dont 18 en rattachement principal (Figure 11). Les 18 laboratoires en rattachement principal comptent 3125 personnes dans leurs effectifs, dont 1446 « permanents » dont 1118 chercheurs et chercheuses incluant 232 CR et DR rattachés au CNRS. Cinq unités (GET, ISTerre, Géoazur, CEREGE, LMV) ont aussi pour tutelle l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Les cibles géographiques de l'IRD dans notre domaine sont les pays andins, l'Indonésie, l'Afrique de l'ouest, l'Inde, le Liban et l'Algérie, offrant ainsi un accès à des sites uniques tout en développant des collaborations avec les chercheurs de ces pays. En plus des tutelles universitaires locales, nous comptons le Muséum National d'Histoire Naturelle (CR2P et IMPMC), le CNES (LPG et GET), le BRGM (ISTO), l'INRAE (CEREGE), l'ENGEES (ITES), l'IFREMER (Geo-Ocean) et l'Observatoire Côte d'Azur (Géoazur) comme co-tutelles. L'UMR Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) est la seule unité du grand établissement éponyme. Un total de 19 UAR (Unités d'appui à la recherche) est rattaché à la section, dont 12 Observatoires rattachés à des OSU. Ces OSU regroupent de manière générale plus de deux UMR, à l'exception de l'EOST et de l'IPGP-UAR qui n'en comptent chacun qu'une.

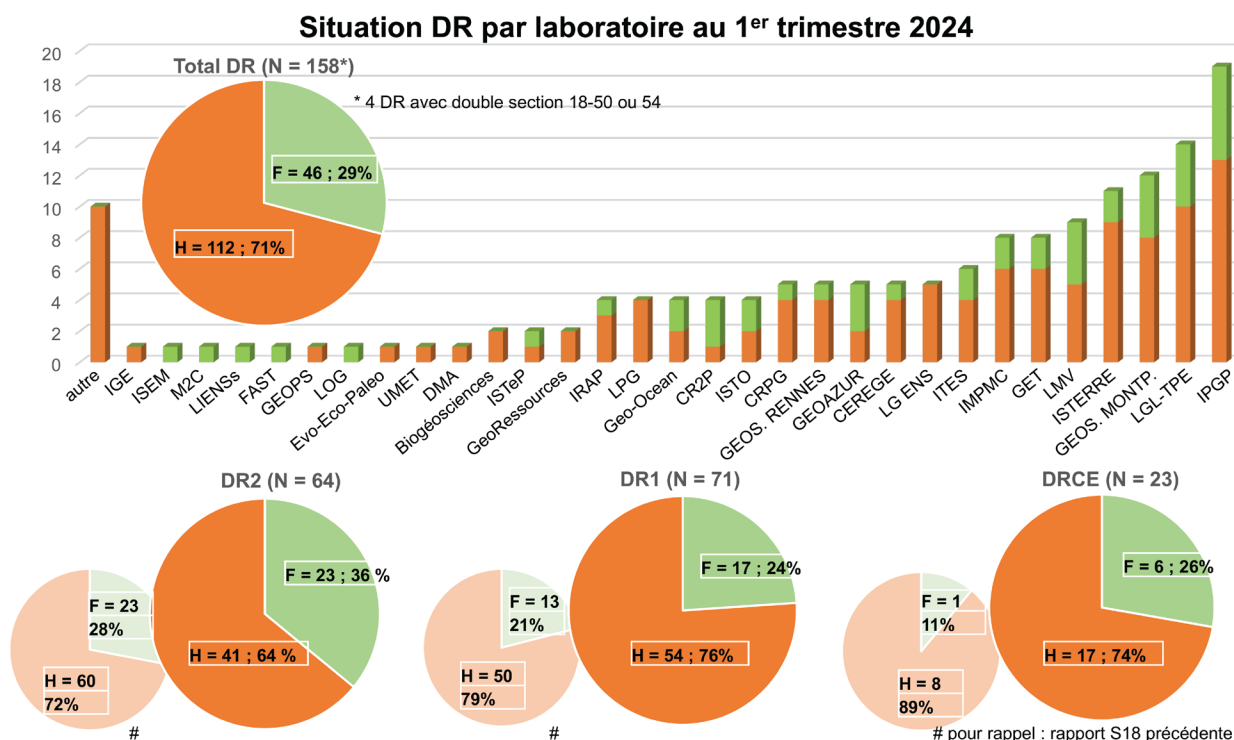


**Figure 11.** Effectifs 2024 des unités en rattachement principal section 18. UAR et UMR sont distinguées, et les unités sont classées en fonction du nombre total de permanent.e.s (C+EC+PAR). L’axe des ordonnées est tronqué pour une meilleure lisibilité, l’IPGP (UMR) abritant un total de 200 agent.e.s.

La section 18 est particulièrement sensible à l’égalité hommes/femmes et attache une attention particulière à combattre les possibles biais d’évaluation des curricula. Les Figure 12 et 13 illustrent de manière simple les chiffres relatifs à la population de chercheurs et de chercheuses dans nos unités de recherche. Depuis 5 ans, la proportion F/H du corps des CR a très légèrement baissé (de 38.1 à 37.4 %), ce qui s’explique en grande partie par l’évolution notable du corps des DR (passé de 23.4 à 29.1 % de femmes). Nous avons constaté que, en moyenne, l’âge de recrutement CR des actuels DR est comparable entre H et F. L’écart se creuse pour le passage DR auquel les femmes accèdent en moyenne 4 ans plus tard que les hommes. L’écart se réduit dans la catégorie DR1 et surtout pour DRCE1. Même si le chemin est encore long, les concours récents, basés sur l’excellence scientifique, ont naturellement amélioré la parité comme l’illustre la comparaison avec les données de la mandature précédente qui montre une tendance à la réduction des écarts F/H et ce dans les différents grades



**Figure 12.** Situation du corps des chargées et chargés de recherche de la section 18 en 2024. Les données du rapport de la précédente mandature sont rappelées en petit à gauche des données actuelles. N représente le nombre total de personnel (Homme (H) + Femme (F)).



**Figure 13.** Situation du corps des directeurs et directrices de recherche de la section 18 en 2024.

**Recrutements dans les différents domaines correspondant aux parties I-III du rapport**

**Recrutements CR (2022-2024)** (bleu géophysique, vert géochimie-HP, violet géologie-géomorphologie)

**Partie I:** Modélisation des ondes sismiques, imagerie et inversion des sources (IPGP Paris, 2022); Modélisation des hétérogénéités et des déformations des zones de faille (ISterre Grenoble, 2023); Failles et séismes par expérimentations en laboratoire (LG-ENS, 2024); Métaux et évolution de la croûte continentale (GeoRessources Nancy, 2023);

**Partie II:** Origines de la matière organique dans les sédiments paléochéens (LGL-TPE Lyon, 2022); Paléoclimat quaternaire, transitions glaciaires et interglaciaires, milieu continental, géochimie (CRPG Nancy, 2022); Les volatils dans la formation de la Terre et des planètes (IMPMP Paris, 2023); Les volatils des planètes du système solaire (CRPG Nancy, 2023); Histoire des volatils terrestres, géochimie et expérimentations haute pression (ISTO 2024); Archives sédimentaires, glaciations du passé, géomorphologie (Géosciences Rennes, 2023); Interactions environnement-biosphère, crises du Mésozoïque, ammonites (CR2P, 2024); Géodynamo primitive et mélange dans les océans de magma (LGL-TPE, 2024); Formation des planètes, champ magnétique et métallographie extraterrestre (CEREGE, 2024);

**Partie III:** Transferts d'eau dans la Terre profonde, déformation du manteau et circulation de fluides réactifs (Géosciences Montpellier, 2022); Flux de matière et d'énergie des systèmes de circulation de fluides (Geo-Ocean Brest, 2023); Évolution des surfaces planétaires, morphologie glaciaire (LPG Nantes, 2022); Eau et magmatisme océanique profond (Géosciences Montpellier, 2024).

**Recrutements DR (2022-2024)**

**Partie I:** Détection ionosphérique des aléas naturels (IPGP Paris, 2023); Modélisation physique des déformations, systèmes volcaniques (LMV Clermont-Ferrand, 2023) ; Modélisation des tremblements de terre, risques sismiques et de tsunami (LG-ENS, 2024); Histoire thermique et chimique des océans passés, interactions gaz magmatiques et systèmes hydrothermaux (IPGP, 2024); Précurseurs géochimiques sur les volcans à systèmes hydrothermaux (IPGP, 2024).

**Partie II:** Géo- et cosmochimie à l'échelle submicrométrique par NanoSIMS (IMPMC Paris, 2022); Paléontologie et géochimie, impact du climat sur l'écologie des reptiles (LGL-TPE Lyon, 2023); Biosignaux dans les roches anciennes pour déchiffrer les archives fossiles (IMPMC Paris, 2023); Etat redox de l'océan Archéen (CRPG Nancy, 2023); Paléoclimats au Cénozoïque, paléo-reliefs, analyses polliniques (ISEM Montpellier, 2022). Eléments légers et gaz rares dans les météorites et les chondrites (CRPG 2024); Croûte continentale, début de la tectonique des plaques, habitabilité de la Terre (Géosciences Montpellier, 2024).

**Partie III:** Champ géomagnétique et dynamique dans le noyau Terrestre (ISTerre Grenoble, 2022); Géodésie et dynamique du noyau terrestre (ITES Strasbourg); Géodynamique chimique des éléments volatils dans la terre (LMV Clermont-Ferrand, 2022); Origine et évolution du système solaire, météorites, et expériences de laboratoire (IRAP Toulouse, 2022) ; Métaux, métalloïdes et sélénium dans les systèmes magmatiques et hydrothermaux (IPGP-OVSG, 2023); Cycle des métaux dans la lithosphère et origine des gisements (GeoRessources Nancy, 2024); Rôle de la glace dans l'évolution des paysages des surfaces planétaires (LPG Nantes, 2024).