

Prospective INSU Terre Solide 2026-2030

Textes préliminaires présentant les défis préparés par les groupes de travail de la Commission Spécialisée Terre Solide

Préambule

En 2024, l'INSU a lancé une nouvelle prospective dédiée aux enjeux, outils et moyens de la recherche dans le domaine Terre Solide (et ses interfaces avec les autres domaines) pour la période 2026-2030. La Commission Spécialisée Terre Solide (CSTS) de l'INSU a été mandatée pour coordonner ce travail. Cette dernière a donc défini en Avril 2024 la structure pour le document de prospective et créé des groupes de travail pour coordonner les différents volets de la prospective. Ces groupes de travail ont défini 7 défis scientifiques et technologiques et produit une première présentation courte de ceux-ci, qui a été présentée aux DUs. Ceci s'est suivi d'une consultation en ligne autour de ces textes et de questions associés. A partir des retours à cette consultation, les groupes de travail ont développé les textes décrivant les défis. Ces textes, qui vous sont présentés ci-dessous, sont la base pour le travail collectif qui sera réalisé lors du colloque et, une fois enrichis par les discussions et des recommandations produites par celui-ci, constitueront la base du document de prospective.

Défi 1. La géodynamique au défi de la complexité

Composition du groupe de travail : N. Coltice, A. Tommasi, Ph. Agard, Ph. Goncalves, A. Davaille, M. Moulin

1.1 Nature du défi

La compréhension de la dynamique interne de la Terre et des planètes reste un défi central des Sciences de la Terre, malgré le paradigme structurant de la tectonique des plaques établi depuis plus d'un demi-siècle. Les processus gouvernant cette dynamique extrêmement complexe s'étalent sur plus de 15 ordres de grandeur, à la fois en termes d'échelle spatiale (de l'ångström au millier de kilomètres) et temporelle (de la seconde au milliard d'années). Ils associent phénomènes physiques et chimiques fortement couplés, souvent hors-équilibre, nécessitant d'intégrer dans l'analyse leur caractère dynamique et parfois irréversible et la quantification de leurs cinétiques. La dynamique terrestre met ainsi en jeu des rétroactions entre échelles et entre processus qui ne peuvent être correctement appréhendées dans des descriptions « stationnaires » ou découplées, et qui jouent un rôle fondamental dans l'évolution des systèmes géologiques.

Pour progresser significativement, il faut caractériser et modéliser ces rétroactions multi-échelles et multi-physiques ou physico-chimiques. Pour cela, nous devrons (i) lever des verrous d'observation, d'expérimentation et de simulation, en déployant des nouveaux protocoles d'analyse et de traitement des données et en tirant parti des progrès technologiques récents (nouveaux capteurs et méthodes analytiques permettant l'acquisition de données à haute résolution spatiale et temporelle, nouvelles capacités de calcul, IA...), (ii) repenser nos stratégies d'observation des systèmes naturels sur "le terrain" et au-delà, en privilégiant des approches intégrées et l'acquisition d'observables permettant de caractériser l'ensemble de processus physico-chimiques, et (iii) développer des approches de modélisation qui intègrent des dynamiques hors-équilibre et transitoires, ainsi que des représentations efficaces des couplages inter-échelles.

Ces progrès devront s'appliquer à l'ensemble des questions géodynamiques. Ces questions couvrent l'ensemble des Sciences de la Terre et sont, pour beaucoup, transverses entre ce Défi et les autres définis dans cette Prospective. La synthèse et la mise en commun des connaissances issues des différentes disciplines (sismologie, géochimie, expérimentation, pétrologie, modélisation) seront des leviers essentiels pour des avancées significatives dans notre compréhension des systèmes géodynamiques dans leur globalité.

1.2 Thématiques scientifiques

Les priorités scientifiques pour les prochaines années doivent viser à révéler et comprendre les rétroactions multi-échelles et multi-physiques ou physico-chimiques qui gouvernent la dynamique interne de la Terre et ses couplages avec les enveloppes externes.

Il convient donc de faire émerger une recherche convergente sur les **rétroactions entre déformation, transport (chaleur, fluides, matière), réactions chimiques, changements de phase et évolution microstructurale, qui ont lieu essentiellement aux échelles allant du micron (grain) au mètre (l'affleurement) et les effets de ces rétroactions sur la dynamique terrestre aux échelles régionales et globales.** Un des principaux objectifs sera de comprendre comment ces boucles de

rétroaction contrôlent les dynamiques planétaires, et peuvent, par exemple, produire la forte localisation de la déformation, qui caractérise la Tectonique de Plaques sur Terre. La compréhension de ces rétroactions est aussi essentielle pour déchiffrer l'évolution de la dynamique terrestre au cours du temps et la diversité d'évolutions planétaires dans le système solaire et au-delà (question à l'interface avec le Défi 2). Elle est aussi fondamentale pour avancer sur la caractérisation des cycles géochimiques, où les transports réactifs, souvent modulés par la déformation, jouent un rôle fondamental dans la formation d'hétérogénéités et la longévité des réservoirs géologiques et contrôlent les flux de matière entre ces réservoirs (question à l'interface avec le Défi 3). Enfin, les rétroactions entre processus physico-chimiques à petite échelle jouent aussi un rôle essentiel dans les échanges entre la Terre Solide et les enveloppes externes et donc, dans les interactions entre la dynamique terrestre et le vivant (questions à l'interface avec le Défi 5).

La compréhension des boucles de rétroaction exige le développement de cadres théoriques et numériques capables de représenter des écoulements multiphasiques avec des couplages réactifs (magmas-fluides-roches) et des lois rhéologiques dépendantes de l'histoire de déformation, ainsi que de stratégies numériques innovantes pour la représentation des couplages entre échelles. Elle appelle aussi un couplage accru entre expérimentations physico-chimiques ciblées et modélisation numérique permettant de combler le gap d'échelles temporelles et spatiales entre les conditions atteignables en laboratoire et celles qui prévalent dans la nature (par ex. vitesses de déformation). L'observation des systèmes naturels reste la source ultime de contraintes sur ces couplages. Parmi ces observations, les études dites « de terrain » gardent une place centrale, car elles sont la seule source d'informations directes sur les échelles intermédiaires – allant de la dizaine de mètres au kilomètre – inaccessibles à l'expérimentation et le plus souvent négligées dans les simulations numériques. Toutefois, des stratégies pluridisciplinaires, axées sur les processus, doivent être développées et déployées pour déconvoluer ce signal complexe.

Une autre priorité ambitieuse est l'**étude explicite des processus hors-équilibre et transitoires** : cycles sismiques, épisodes rapides de dégazage, instabilités locales et ruptures crustales ou lithosphériques, transitions de phase et réactions, changeant significativement le comportement mécanique et/ou libérant et mobilisant des volumes significatifs de fluides. Ces processus évoluent sur des échelles de temps courtes, mais ont des conséquences à long-terme. Comprendre ces phénomènes demande (1) de s'éloigner progressivement des approximations stationnaires pour concevoir des protocoles observationnels, expérimentaux et des approches numériques dédiés aux phénomènes avec une évolution rapide dans le temps et (2) d'élaborer des stratégies de couplages entre échelles temporelles. Ces stratégies doivent permettre de relier les observations en laboratoire (cinétiques, microstructures) aux échelles géologiques, mais aussi de représenter dans des modélisations géodynamiques ces phénomènes aux cinétiques rapides et ainsi de quantifier leurs conséquences à long-terme. Les expérimentations caractérisées *in situ* (synchrotron, imagerie temps-réel) ainsi que les avancées récentes dans l'acquisition de données géophysiques à haute résolution spatiale et temporelle doivent aussi être mises au service de cet axe de recherche.

La dynamique du noyau et les processus produisant la dynamo sont un système avec une dynamique très différente de celle du manteau et croûte, mais pour lequel la question des couplages entre échelles et processus se pose aussi pleinement. Comprendre les mécanismes d'inversion du champ magnétique, la variabilité temporelle de la dynamo et le rôle de la graine exigera des efforts conjoints de modélisation électro-magnéto-hydrodynamique, l'obtention de données paléomagnétiques à haute résolution, et des développements expérimentaux pour contraindre les propriétés des alliages métalliques aux conditions extrêmes du noyau. Cette thématique appelle des simulations à la frontière des capacités actuelles et des campagnes de mesures paléomagnétiques finement datées pour contraindre l'évolution temporelle des inversions.

1.3 Verrous scientifiques et techniques

Les principaux verrous résident dans l'intégration, non-seulement de données, mais aussi de "pratiques de recherche" provenant de différentes disciplines de recherche en Terre Solide. Un renforcement quantitatif et, surtout, qualitatif du dialogue dans le triptyque observation des systèmes naturels - expérimentation - modélisation est aussi essentiel.

L'observation directe des systèmes naturels – le terrain – reste le seul outil que nous possédons pour contraindre les processus intervenant sur Terre et ce, à toutes les échelles spatiales et temporelles. Ces observations demeurent toutefois limitées par le fait que nous n'avons accès qu'à des états finaux, qui intègrent le résultat d'un grand nombre de processus pendant des longues périodes temporelles, et à une préservation incomplète des enregistrements. Pour déconvoluer ce signal, il est essentiel de coupler ces observations aux contraintes physico-chimiques provenant de l'expérimentation en laboratoire et à la modélisation. Un autre verrou important concernant les observations géologiques est

le manque criant d'un cadre harmonisé pour le partage des données : il faut créer une ou plusieurs plateformes de dépôt capables d'assimiler la grande variété de types d'observations, établir des vocabulaires contrôlés et centraliser la distribution de ces données au niveau national via Formater. De même, il faut définir, partager et mieux valoriser les chantiers géologiques, qui sont les plus à même de nous fournir les informations critiques. Les observations doivent être réalisées là où l'enregistrement des différents processus géodynamiques est le mieux préservé et exposé. Enfin, les observations géologiques ont un coût financier et environnemental (bilan carbone), et sont contingentes à la géopolitique. Il est donc essentiel d'organiser les collections provenant des nombreuses campagnes d'échantillonnage passées afin que celles-ci puissent être réutilisées, à l'instar de ce qui est déjà la norme pour les campagnes en mer.

Les avancées récentes en **imagerie géophysique de l'intérieur de la Terre** (réseaux sismologiques denses, mesures DAS, capteurs rotationnels, l'utilisation de l'IA en sismologie, tomographie par forme d'onde et méthodes d'inversion complète, capables d'intégrer anisotropie et atténuation) permettent de cartographier hétérogénéités compositionnelles et thermiques, ainsi qu'anisotropie (et donc directions d'écoulement) dans les couches profondes de la Terre avec des résolutions spatiales et temporelles accrues, rendant possible l'étude de phénomènes transitoires comme la production et le transport de fluides dans les zones de subduction. Ces données peuvent être combinées avec les données spatiales — gravimétrie satellitaire, InSAR et GNSS, pour contraindre les redistributions de masse, le soulèvement vertical et la déformation de surface en réponse à des flux mantelliques, crustaux, ou même de surface. L'intégration de ces jeux de données hétérogènes appelle toutefois le développement d'algorithmes d'assimilation multi-échelle et la **définition de métriques d'incertitude** partagée entre disciplines, indispensables pour leur utilisation en inversion ou en analyse statistique. Aussi important, l'exploitation de ces données nécessite le développement ou le raffinement de **modèles pétrophysiques contraignant les relations entre observations géophysiques, processus physico-chimiques, propriétés des roches et observations géophysiques**.

En géochimie, l'essor des nouveaux **traceurs isotopiques** ouvre la porte à des diagnostics inédits sur l'origine de différents types de magmas, le recyclage crustal, et l'évolution du manteau et de la croûte. Toutefois, ces approches restent souvent à l'état de preuve de concept. Pour développer pleinement leur potentiel, ces approches nécessitent des campagnes ciblées de collecte d'échantillons dans un cadre spatial embrassant l'ensemble de échelles pertinentes, de développements méthodologiques permettant de gagner en résolution et précision, et d'une **connaissance accrue des phases minéralogiques porteuses de ces éléments et, à partir de celle-ci, du rôle des différents processus pétrologiques (réactions, et donc contraintes thermodynamique, redox...) et du transport des fluides dans les fractionnements isotopiques**. Sans ces contraintes, les hétérogénéités géochimiques mises en évidence par ces traceurs restent sujettes à des interprétations ambiguës. Le renforcement du couplage géochimie-pétrologie et la prise en compte accrue des interactions magma-roche, mène, par exemple, à une révision du rôle du manteau lithosphérique, qui devient une couche active, réservoir et filtre, où des échanges importants ont lieu, dans les cycles géochimiques.

L'expérimentation haute pression/haute température connaît elle aussi un essor, avec des dispositifs *in situ* capables de suivre des transformations de phase et contraindre leurs cinétiques dans des conditions proches du manteau supérieur, ainsi que réaliser des expériences avec des fluides réactifs. Ces résultats offrent une fenêtre unique sur les processus transitoires et hors équilibre. L'expérimentation est aussi fondamentale pour la paramétrisation des lois rhéologiques, essentielles pour la modélisation de la dynamique terrestre. Dans tous ces cas l'extrapolation à l'échelle géologique reste toutefois délicate. La différence d'échelle de temps et de taille, la reproductibilité limitée et la calibration complexe des dispositifs expérimentaux, auxquels s'ajoutent pour les expériences avec des fluides les contraintes thermodynamiques inhérentes à ces systèmes, constituent des verrous majeurs. **Le couplage entre expérimentation et modèles** doit être renforcé : faire dialoguer systématiquement résultats expérimentaux et simulations permettra de construire des lois constitutives robustes et transférables à de multiples échelles et objets géologiques. L'expérimentation sur des **matériaux analogues**, comme les expériences de mécanique des fluides avec rhéologies complexes, offrent des possibilités exceptionnelles pour l'étude *in situ* des couplages entre évolution microstructurale et localisation de la déformation, mais restent encore difficiles à caractériser.

La **modélisation numérique** est au cœur de ce Défi, mais plusieurs verrous se présentent. Les codes géodynamiques ont intégré des formulations adaptatives, capables de traiter en 3D la dynamique du manteau et la déformation des plaques lithosphériques. On observe aussi un essor de routines ou de paramétrisations pour simuler des processus à micro-échelle comme l'évolution des tailles et des orientations de grains ou les changements de phase, mais ces dernières sont soit trop simplifiées soit trop coûteuses en temps de calcul et mémoire. Coupler de manière robuste la mécanique des solides

(rupture, endommagement), l'écoulement visqueux, et des processus pétrologiques, comme des réactions ou le transport réactif de fluides ou magmas dans ces systèmes reste un défi majeur. La modélisation de la localisation de la déformation ou des mélanges multiphasés nécessite des lois constitutives fiables aux différentes échelles spatiales et temporelles. Or l'expérimentation ne fournit que des contraintes sur le comportement mécanique à l'échelle des agrégats cristallins, et ceci pour des vitesses de déformation et tailles de grain plusieurs ordres de magnitude inférieures à celles des systèmes naturels. La prise en compte de l'hétérogénéité des systèmes naturels aux échelles inférieures à celles des mailles des modèles géodynamiques reste un verrou majeur, empêchant en particulier une modélisation auto-cohérente de la localisation de la déformation ductile. L'usage de modèles de substitution (« surrogates ») ou d'apprentissage profond pour représenter des processus à des échelles micro ouvre la voie à une exploration plus large des espaces de paramètres, mais soulève des questions de fiabilité.

La dynamique du noyau impose, elle, des simulations électromagnéto-hydrodynamiques extrêmement coûteuses et sensibles à des paramètres mal connus (conductivité, turbulence), ce qui freine la compréhension des mécanismes d'inversion du champ magnétique et du rôle de la graine interne. Le lien entre données massives et modélisation s'accompagne de nouveaux verrous méthodologiques. Les méthodes d'assimilation de données (ensembles, approches variationnelles) commencent à être appliquées, mais leur adaptation à des modèles non-linéaires, couplés et fortement coûteux en mémoire et temps de calcul reste très limitée.

La multiplication des données et l'augmentation de la complexité des codes exige des formats standardisés, des pipelines robustes de stockage et de partage, et surtout un renouvellement régulier des capacités de calcul, notamment via GPU et architectures hybrides. L'absence de stratégie coordonnée menace de fragmenter les efforts en une série d'initiatives locales difficilement interoperables. Il faut promouvoir le développement de codes partagés et 'scalables', capables de fonctionner sur architectures hybrides (GPU + CPU) et d'être intégrés dans des boucles d'inversion et d'assimilation. Le développement de « jumeaux » physiques interprétables et de techniques d'auto-différentiation pour l'optimisation doit s'accompagner de la construction de pipelines d'incertitude robustes, afin que les modèles produisent non seulement des scénarios plausibles mais aussi des estimations d'incertitude utilisables pour tester des hypothèses géodynamiques.

Pour tous ces développements, le développement de **l'infrastructure scientifique et de compétences** transverses est indispensable. Il faut développer des ressources numériques partagées, des plateformes d'expérimentation mutualisées et des programmes de formation inter-disciplinaires (sismologie, géochimie, expérimentation, HPC, IA) pour former une nouvelle génération de chercheurs aptes à travailler à l'interface entre les différentes disciplines de la Terre Solide.

1.4 Liens avec les questions environnementales et sociétales

La recherche en géodynamique répond tout d'abord à un besoin fondamental : comprendre le fonctionnement de la planète sur laquelle nous vivons. Même si les processus-moteurs de cette dynamique, comme la convection mantellique, ont lieu à des échelles temporelles allant du million au milliard d'années, la dynamique de la Terre Interne gouverne le fonctionnement quotidien de la planète. Les avancées en géodynamique comportent donc des retombées sociétales indirectes pour la société : meilleure compréhension des risques naturels (séismes, volcans), des processus de formation de ressources naturelles... Cette recherche fondamentale mène aussi à des transferts technologiques (développement d'instruments, de techniques analytiques d'haute précision et de l'expérimentation sous des conditions extrêmes, calcul intensif) vers d'autres disciplines et retombées en formation et en industrie.

Les enjeux liés à la prévention des risques et à la gestion durable des ressources rendent la géodynamique pertinente pour les territoires et les citoyens. À plus long terme, l'étude des transitions planétaires (ex. grande oxygénation, perte d'eau) éclaire les mécanismes de changements environnementaux drastiques et enrichit notre regard sur la résilience des systèmes terrestres. L'ouverture au grand public et l'intégration de sciences humaines et sociales (perception du risque, gouvernance des données, acceptabilité des infrastructures) doivent être renforcées pour optimiser l'impact sociétal, et corriger le regard porté par le grand public sur nos disciplines, trop souvent associées à l'extraction problématique (ou l'épuisement) des ressources du sous-sol.

1.5 Contexte programmatique

La recherche en géodynamique, *sensu stricto*, en particulier les travaux sur la dynamique globale de la planète, dépend fortement de programmes non-fléchés. L'ERC et le programme Blanc de l'ANR jouent donc un rôle fondamental dans le financement de ce Défi. TelluS joue aussi pleinement son rôle d'incubateur. La pluridisciplinarité et le développement de nouvelles approches d'analyse de données,

expérimentation et modélisation étant au cœur de ce Défi, les programmes interdisciplinaires de l'INSU, comme les appels à projets PNP, IIT, SUN et PNTS, et du CNRS, comme la MITI sont aussi des sources de financement.

Plusieurs questions fondamentales pour ce Défi sont à l'interface avec les autres défis de cette Prospective qui ont de nombreuses sources de financement "fléchées". Les organismes partenaires jouent aussi des rôles fondamentaux. Le CNES fournit des données spatiales en géodésie, gravimétrie et magnétisme essentielles pour l'imagerie de la structure et de la dynamique (noyau) de la Terre. L'IRD et l'IFREMER via les unités mixtes jouent des rôles importants dans l'étude des subductions et aléas associés et de la dynamique des plaques océaniques. Le BRGM offre des moyens et un support pour une étude renouvelée des observables et des terrains.

L'acquisition de données dépend essentiellement des infrastructures de recherche nationales Epos-France, RéGEF, EMSO, ECORD, FOF, et pour certaines observables géophysiques des services nationaux d'observation. L'accès à ces infrastructures ainsi qu'aux moyens de calcul nationaux et régionaux est fondamental. Le Réseau thématique Numérique en Terre Solide (NuTS) joue actuellement un rôle important dans la structuration et formation de la communauté numérique.

Recommandations

Structuration et coordination nationale : créer/designer un réseau thématique « Géodynamique multi-échelle » pour coordonner observations géologiques et géophysiques, mesures géochimiques, expérimentations et modélisation, favoriser la mutualisation des infrastructures et des bases de données et définir les priorités d'investissement (par ex. pour la conception et le déploiement de capteurs nouveaux, ou de plateformes analytiques innovantes pour la géochimie de haute résolution).

Formation et interdisciplinarité : encourager formations croisées (géologie, géochimie, géophysique, expérimentation, modélisation numérique) et échanges avec d'autres domaines et disciplines.

Programmes : tirer parti des dispositifs nationaux et européens (PEPR Origins, ANR, ERC, CNRS-CNES collaborations) pour financer instruments, campagnes d'échantillonnage et projets de modélisation ambitieux.

Calcul et données : renforcer/pérenniser le RT NuTS pour structurer la communauté et favoriser le développement de codes communautaires et produits numériques réutilisables, ainsi que l'accès de la communauté à des moyens de calcul avancés (HPC) et nouvelles approches numériques (outils d'assimilation/inversion multi-physique, IA...).

1.6 Conclusion

Répondre au défi « La géodynamique au défi de la complexité » exige une transformation méthodologique et organisationnelle : combiner observations géologiques, mesures géophysiques denses et multi-méthodes, analyses géochimiques à très haute résolution et contraintes pétrostructurales, expérimentation, et modèles numériques multi-physiques intégrant rétroactions entre échelles. Cette ambition nécessite des investissements ciblés (instrumentation, infrastructures de calcul et d'expérimentation, plateformes analytiques) et une structuration de la communauté pour favoriser le partage, la reproductibilité et l'interdisciplinarité. Les prochaines années offrent une fenêtre d'opportunité : des nouvelles capacités observationnelles, expérimentales et numériques peuvent permettre des avancées de rupture à condition d'adopter dès maintenant des approches qui 'capturent' la complexité des processus géodynamiques.

Défi 2. Diversité dynamique des (exo)planètes

Composition du groupe de travail : M. Boyet, A. Davaille, S. Conway, A. Fournier, F. Gaillard, C. Sanloup

La Terre est l'unique planète du système solaire qui abrite la vie. Bien que les recherches se soient intensifiées pour détecter la présence d'eau liquide ou d'anciennes traces de vie passée sur Mars ou sur les satellites glacés, aucune présence de vie extra-terrestre, présente ou passée, n'a été identifiée à ce jour. Avec le lancement de nouvelles missions spatiales et l'identification d'exoplanètes qui ont des caractéristiques proches de la Terre et sont situées dans la zone nommée « habitable », les recherches de potentielles détections de vie ailleurs s'intensifient.

Comprendre la diversité des planètes et la spécificité de la Terre nécessite de remonter à l'évolution précoce du système solaire, de la nébuleuse primitive à la formation des premiers solides, des planétésimaux puis des corps planétaires avec leur structuration interne et externe. Cette structuration, gouvernée par des processus multiples (cristallisation des océans magmatiques, différenciation noyau-manteau, impacts, dégazage des atmosphères, convection mantellique, tectonique), influence directement leur évolution climatique et leur potentiel habitable. La géophysique comparative (Terre/planètes telluriques du système solaire/exoplanètes) éclaire ainsi les conditions uniques ou universelles menant à des environnements propices à la vie.

Ces thématiques de recherche animent la communauté Terre Solide depuis toujours. Des avancées majeures sont attendues du couplage d'expertises de la communauté Terre Solide telles que les études expérimentales et théoriques des propriétés chimiques et physiques des matériaux, l'analyse minéralogique et géochimique des échantillons naturels, les modélisations numériques et analogiques de la dynamique du manteau et du noyau et de leur couplage avec les enveloppes externes (océans, atmosphère), et les observations géomorphologiques et géophysiques à des échelles toujours mieux résolues. Sur ces sujets, les collaborations se renforcent vers les autres domaines de l'INSU et d'autres instituts (INC, INP, INSB, IN2P3, INSIS). Enfin, les années futures seront marquées par la levée de certains verrous technologiques soutenue par le PEPR Origins, des programmes de retour d'échantillons extraterrestres, des missions spatiales pour affiner notre connaissance des surfaces et structures internes des planètes et petits corps, des observations faites avec les télescopes au sol ou spatiaux.

2.1 Thématiques scientifiques

2.1.1. Formation du système solaire, origine et évolution de la Terre

La Terre, située dans la zone habitable, est la seule planète régie par la tectonique des plaques et dotée depuis au moins 3 Ga et d'un champ magnétique. Sa structure interne est bien connue, mais son origine et son évolution restent débattues. Les recherches ont précisé la chronologie de formation des objets (premiers condensats, chondrules, noyaux et des croûtes sur les embryons planétaires, etc) et la durée des processus (vitesses de refroidissement, cristallisation des océans magmatiques). Les modèles d'évolution du disque protoplanétaire considèrent désormais des réservoirs distincts avec des astéroïdes non-carbonés dans les zones internes et astéroïdes carbonés dans les zones externes. Malgré ces avancées, des divergences persistent sur les modèles d'accrétion, la formation de chondres, le rôle du gaz ou l'origine des éléments volatils nécessaires à la vie (par exemple H, C, N).

La différenciation précoce de la Terre est mieux contrainte grâce aux expériences haute pression/température qui nous renseignent sur la composition et les propriétés des réservoirs profonds, la densité des phases (liquides, solides) et donc permettent de reconstruire les séquences de cristallisation des océans magmatiques et identifier de potentielles zones qui conduiraient à des instabilités gravitaires. Les approches analogiques et numériques suggèrent également la possible préservation des hétérogénéités chimiques dans un manteau convectif. Cependant, les interactions entre réservoirs à différentes échelles de temps et d'espace, les cycles des éléments et les propriétés de transport restent mal connus, alors qu'ils conditionnent la dynamique interne et la notion d'habitabilité. Le développement et le déploiement à grande échelle (70% de la surface de la Terre) d'un nouveau type de capteur géophysique (capteurs sismiques de fonds de mer autonomes) va conduire à une amélioration radicale de l'imagerie de l'intérieur profond de la Terre. Les nouvelles données issues de missions européennes de gravimétrie (MAGIC, ESA/NASA) et magnétisme (NanoMagSat, ESA, dynamique du noyau et courants électriques induits dans le manteau) vont également permettre d'améliorer nos connaissances sur structure et la dynamique de la Terre interne.

Les analyses des roches anciennes (Hadéen-Archéen) révèlent des changements majeurs dans la dynamique de la lithosphère (couvercle stagnant évoluant vers une tectonique des plaques), de caractériser la composition de la croûte terrestre au cours du temps (une composition mafique évoluant

vers des compositions à dominante felsique) et d'identifier des changements majeurs dans la compositions des océans et de l'atmosphère. Le grand événement d'oxygénation autour de 2.4 Ga joue un rôle fondamental pour l'évolution des métabolismes microbiens et la diversité biologique. Cependant les processus mis en jeu, les âges et les échelles de temps sont toujours largement débattus. Les questions concernant l'origine de la matière organique et des phases d'eau, l'apparition de la vie et la détection de biosignatures sont très importantes dans le but de comprendre l'origine de la vie et de pouvoir détecter des traces de vie sur d'autres corps du système solaire ou sur une exoplanète.

2.1.2. Système solaire interne et ceinture d'astéroïdes

La compréhension de l'évolution, différente pour chaque corps, des planètes du système solaire interne reste une étape fondamentale pour mieux évaluer notre histoire terrestre, et interpréter les données des exoplanètes. Une question cruciale reste les évolutions divergentes de Mars, Vénus et la Terre, faisant de ces trois planètes telluriques sans doute relativement similaires au départ des mondes actuellement radicalement différents: glacé pour Mars, infernalement chaud pour Vénus, et habitable sur Terre.

Les missions orbitales et in situ ont profondément transformé notre compréhension de Mars. La stratification de la planète a été déterminée, faisant apparaître en particulier une couche de manteau fondu juste au-dessus d'un noyau liquide, grâce aux données du sismomètre français de la mission InSight, associées à des modélisations géodynamiques de dernière génération. Les rovers Curiosity et Persévérance, dotés d'instruments français, ont confirmé la présence durable d'eau et permis une analyse fine des paléo-environnements, renforçant l'hypothèse d'une habitabilité passée. Par ailleurs, le couplage des données in situ et orbitales avec les modèles climatiques a permis des avancées dans la compréhension des cycles atmosphériques actuels. Enfin, l'essor de l'apprentissage automatique ouvre de nouvelles perspectives pour l'analyse des données massives issues de la télédétection. Ces résultats soulèvent de nouvelles questions sur l'évolution de l'habitabilité martienne et la dynamique interne de la planète. Toutefois, seule une mission de retour d'échantillons pourra confirmer l'existence éventuelle de biosignatures. Le retour d'échantillons martien est à ce jour incertain mais la mission MMX va ramener un échantillon de Phobos, un des deux satellites naturels de Mars, en 2031.

Pour Vénus, les modèles récents couplant géodynamique interne et dynamique atmosphérique donnent pour l'instant deux scénarios opposés, avec soit une sortie de l'Océan de Magma tardive donnant une planète déjà asséchée et à la surface très chaude, soit une sortie plus rapide vers un monde habitable, qui serait devenu infernal par assèchement de ses océans d'eau liquide bien plus tard. Les 3 missions programmées par l'ESA (EnVision) et la NASA (VERITAS avec 2 co-I français, et DaVinci+) dans la prochaine décennie devraient apporter les données capables de départager les modèles, et affiner notre compréhension de Vénus et son climat. A noter les interactions de plus en plus fréquentes entre géophysiciens TS et atmosphériciens.

Avec les missions sur la Lune (Chang'E, Artemis), l'étude de nouveaux terrains permettra de mieux comprendre la formation de la Lune (scénario impact géant), sa structuration précoce et sa dynamique interne à long-terme. Tandis que la mission BepiColombo va permettre d'affiner les scénarios d'évolution de Mercure.

L'étude des petits corps du système solaire, fondamentale pour l'identification des briques élémentaires des planètes, ou encore des véhicules de l'eau et de la matière organique, s'accélère, avec le renforcement des synergies entre astronomes et cosmo/géochimistes. Si les météorites étudiées dans les laboratoires provenaient de corps la plupart du temps inconnus, les échantillons sont maintenant collectés sur des objets choisis, identifiés, et les stratégies de collectes sont établies après exploration préalable du corps par différentes techniques de télédétection.

2.1.3. Système solaire externe

Le système solaire externe, au-delà de la ceinture d'astéroïdes, recèle des mondes d'une diversité remarquable qui révolutionnent notre compréhension de l'habitabilité planétaire. Les satellites glacés des planètes géantes - Europe, Ganymède, Encelade, Titan - possèdent des cryosphères complexes abritant des océans souterrains dont les volumes dépassent largement celui de tous les océans terrestres réunis. Ces "mondes océaniques" représentent aujourd'hui les cibles privilégiées dans la recherche de conditions propices à la vie au-delà de la Terre. Les glaces se trouvent aussi sur les surfaces planétaires sans océan en sous-surface, comme la planète naine Pluton et sa lune Charon, les petits lunes de Saturne ou Neptune, des comètes, ou objets dans la ceinture de Kuiper comme Arrokoth (observé par New Horizons). Dans ces contextes la glace (H₂O, CO, CO₂, N₂...) nous donne des informations sur la répartition des substances volatiles lors de la formation de notre système solaire pour contraindre les modèles astrophysiques. L'origine et la formation de matière organique sont également fortement débattus. Est-elle d'origine interstellaire, c'est-à-dire formée dans un nuage

moléculaire ou formée dans les zones froides du disque protoplanétaire? Enfin quel rôle joue l'irradiation de la glace à la surface des petits corps dans la production de matière organique.

Les défis instrumentaux et méthodologiques sont considérables. L'exploration par les missions Galileo et Cassini-Huygens a révélé la complexité de ces systèmes, mais les missions JUICE et Europa Clipper devront relever des challenges technologiques inédits : sonder des océans cachés sous plusieurs dizaines de kilomètres de glace, discriminer les signatures magnétiques induites des processus de dynamo interne, caractériser la chimie des panaches et geysers avec une précision suffisante pour détecter d'éventuelles biosignatures, comprendre comment la géomorphologie de surface nous révèle la dynamique interne quand la géomorphologie est façonné par des glaces (eau mais aussi d'autres composants, par ex. azote ou méthane) que l'on connaît moins bien que les surfaces silicatées.

Comprendre le fonctionnement de ces cryosphères exige d'intégrer des processus physiques opérant sur des échelles temporelles et spatiales drastiquement différentes : du chauffage par marée aux cycles géochimiques millénaires, des transferts moléculaires aux circulations océaniques globales. Les modèles numériques haute performance doivent désormais incorporer simultanément la mécanique des fluides, la rhéologie complexe des glaces à hautes pressions et hautes températures, la thermodynamique des changements de phase, la géochimie des interactions eau-roche et la magnétohydrodynamique - un défi qui nécessite des approches interdisciplinaires inédites.

Les signaux attendus - variations subtiles du champ magnétique, spectroscopie de traces gazeuses, topographie sub-kilométrique - devront être déconvolués de multiples processus concurrents. Cette complexité exige de nouveaux paradigmes d'analyse, intégrant intelligence artificielle et modélisation inverse, pour extraire des contraintes robustes sur l'habitabilité de ces environnements extrêmes et redéfinir notre compréhension des conditions d'émergence de la vie dans l'univers.

2.1.4. Exoplanètes

Enfin, la diversité des exoplanètes détectées pose des questions fondamentales sur la structure interne de ces objets. Les relations taille-densité des exoplanètes détectées occupent un espace continu allant de corps presque exclusivement constitués de métal riche en fer à des corps dominés par des silicates + gaz et/ou eau. Les questions scientifiques majeures concernent la formation des exoplanètes, leur croissance et leur évolution, la formation des premières atmosphères en interface avec des océans de magma, la prépondérance des super-Terres et mini-Neptunes, l'existence avérée ou non des mondes océans. Les avancées émergeront de collaborations entre les domaines Astronomie Astrophysique et Terre Solide au sein du CNRS Terre&Univers, et physique de la matière condensée en conditions extrêmes du CNRS Physique.

En particulier, les grandes avancées des équipes françaises sur la dynamique des océans magnétiques, leur transition vers un manteau solide et son couplage avec la dynamique atmosphérique, ouvrent un nouveau champ de collaborations avec les astronomes sur les planètes extrasolaires qui seront observées pour la première fois directement avec les télescopes spatiaux JWST et PLATO. Ces travaux s'inscriront plus largement dans l'étude de la diversité des systèmes planétaires et la détection de potentiels signes de vie dans l'univers.

2.2 Verrous scientifiques et techniques

Les avancées scientifiques sont largement liées aux améliorations technologiques qui visent à repousser les limites de détection et augmenter les précisions. Le PEPR Origins va permettre de lever certains verrous avec le développement d'instruments innovants. Deux axes de recherches concernent le domaine TS. Le premier est consacré à l'analyse chimique et isotopique des échantillons. Ces instruments vont permettre une imagerie hyperspectrale infrarouge à l'échelle nanométrique, une amélioration significative des mesures élémentaires et isotopiques à l'échelle nanométrique avec la sonde atomique, et la caractérisation des compositions moléculaires de la matière organique soluble ou macromoléculaire à l'échelle du micromètre. Enfin en collaboration avec le CNES et l'Institut Pasteur, une réflexion est menée pour réaliser des analyses ou diagnostics préliminaires d'échantillons extraterrestres. Ceci nécessite des installations de conservation, des dispositifs de confinement, de surveillance, de manipulation ou de transport spécialisées. Avec la création d'un Centre national de la matière extraterrestre au Muséum national d'histoire naturelle, la France prend un rôle de leader dans ce domaine. Le deuxième axe s'intéresse à l'évolution de l'intérieur de la Terre et des avancées sont attendues grâce au déploiement de capteurs sismiques de fonds de mer autonomes.

Maintenir une expertise forte et disposer d'un parc instrumental de dernière génération sont les priorités pour garder nos relations à l'international et assurer à la France un partenariat durable avec les agences spatiales internationales. Le PEPR investit dans la conception de nouveaux instruments

mais le CNRS Terre&Univers devra être vigilant à maintenir un parc existant performant. Outre les avancées dans les caractérisations multi-échelles (du cm au nm) des échantillons, il faut également poursuivre leur multi caractérisation sur un même volume d'échantillon, idéalement avec un ensemble de sondes non destructives, pour aboutir à une cartographie 2D ou tomographie 3D complète (concentrations élémentaires et isotopiques, spéciation, minéralogie et structure cristalline, propriétés magnétiques, etc). Pour y parvenir, la réussite de la jouvence du synchrotron Soleil est un réel enjeu, tout comme l'accès de la communauté aux derniers modèles de microscope électronique à transmission (MET), et la combinaison des approches basées sur faisceaux d'électrons et faisceaux de lumière (infra-rouge, Raman, optique, rayons X) en travaillant sur des porte-échantillons communs et sur un meilleur accès pluri-techniques sur ces infrastructures. D'autres équipements phares (ex. sonde ionique) sont vieillissants et des investissements devront être planifiés. La mise en place de l'infrastructure de recherche REGEF devrait permettre une meilleure vision des équipements et personnels techniques et ainsi faciliter la définition des besoins prioritaires pour un accompagnement par le CNRS.

Côté modélisation, la physique des milieux et écoulements diphasiques, ainsi que la convection et le mélange dans des environnements très turbulents, restent des verrous importants pour la compréhension du passage à un manteau solide, des dynamos planétaires ou encore des satellites glacés.

2.3 Lien avec les questions environnementales

Les questions sur la formation et l'évolution des planètes, en identifiant les conditions du développement ou de la disparition d'environnements habitables (e.g. eau liquide en surface, cycle du CO₂, etc...), ont des implications directes pour les questions environnementales actuelles. Ainsi, les conditions du grand épisode d'oxygénation à 2.4 Ga, comme celles de la disparition d'eau liquide sur Mars ou de l'absence actuelle d'eau sur Vénus peuvent nous renseigner sur les modalités d'un changement climatique drastique. D'autre part, on peut relier l'émergence de conditions propices à la vie à la formation de la zone critique.

Enfin, certaines méthodologies TS s'appliquent directement à des questionnements environnementaux, par nature pluri-disciplinaires. L'étude des verres par exemple est à la croisée de celle des magmas et de celle des matériaux avec des applications couvrant l'immobilisation de polluants et radionucléides dans le cadre de verres de stockage de déchets. La communauté TS continuera aussi d'améliorer notre connaissance des ressources en minerais via ses compétences dans le suivi in situ des processus de concentration des éléments à haute température et haute pression (e.g. Li, métaux lourds), comme de la production d'hydrogène et de méthane dans la lithosphère océanique serpentinisée, que ce soit via des processus de hautes pressions en zone de subduction ou par hydrothermalisme.

2.4 Lien avec les questions de société

L'acquisition de nouvelles connaissances qui caractérise la recherche fondamentale s'appuie sur des développements techniques, expérimentaux et théoriques. Les développements dépassent clairement le cadre des études menées sur la diversité dynamique des planètes avec des retombées à moyen et long terme sur le savoir-faire technologique national, la santé et l'environnement. Les matériaux planétaires peuvent aussi être des matériaux d'intérêt industriel (exemple des verres et magmas), leur caractérisation de plus en plus fine et le développement de nouveaux matériaux géosourcés sont indissociables. Reproduire les conditions des intérieurs planétaires peut aussi amener à concevoir des matériaux ayant des propriétés remarquables (ex. matériaux superdurs).

Améliorer notre connaissance sur la formation des planètes, comprendre leur évolution à différentes échelles de temps et remonter à l'origine de la vie sont des thèmes qui intéressent fortement le grand public. Le projet PEPR Origins intègre également un volet sciences humaines et sociales pour apporter un regard réflexif sur la construction des savoirs interdisciplinaires sur la vie et sur leurs impacts sur les sociétés contemporaines.

2.5 Contexte programmatique

Les recherches dans ce thème sont soutenues par de nombreux programmes: le programme national de planétologie (CNRS-CNES), l'appel blanc du PEPR Origins, le CNES, l'ANR et l'ERC.

Les missions spatiales en cours et celles programmées sont présentées dans la figure 1. Ces missions sont soutenues par plusieurs agences spatiales française (CNES), européenne (ESA) et internationales (liens forts avec la NASA et la JAXA). Elles ont vocation à améliorer notre connaissance des objets du système solaire interne et externe et d'imager plus précisément l'intérieur de la Terre pour mieux comprendre son fonctionnement.

Le lancement de plusieurs nouveaux réseaux thématiques montre la volonté de la communauté à mieux se structurer tout en favorisant la pluridisciplinarité des recherches. Le réseau **Mécanique Des fluides géophysiques et astrophysiques** regroupe la communauté des modélisateurs en hydrodynamique des fluides travaillant sur les objets planétaires et stellaires. Les sujets concernent la dynamique et la circulation des atmosphères planétaires et exoplanétaires, la circulation dans les noyaux et manteaux des planètes telluriques, l'océanographie physique des satellites glacés des planètes géantes (Europe, Ganymède, Encelade), l'hydrodynamique des disques protoplanétaires dans lesquels se forment planètes, exoplanètes, et petits corps. Le réseau **NuTS** (Numérique pour la Terres Solide) a pour objectif de structurer, rendre visibles et accessibles les outils numériques développés par la communauté Terre Solide (codes, logiciels, produits de simulation et d'analyse de données), en faisant le lien avec l'offre de services ForM@Ter/DataTerra. Il s'intéresse également à soutenir le développement de l'intelligence artificielle afin d'accélérer les simulations multi-échelles et multi-physiques, l'assimilation ou l'inversion des données. Le groupement de recherche **PILSE** (Pôle inter-laboratoires de supports expérimentaux pour le développement de missions spatiales) réunit des scientifiques dans les domaines de l'astrophysique, de l'astrochimie et de l'astrobiologie. Enfin un nouveau réseau en construction propose de rassembler la communauté qui analyse les échantillons anciens afin de favoriser leur multi-caractérisation par les différents laboratoires.

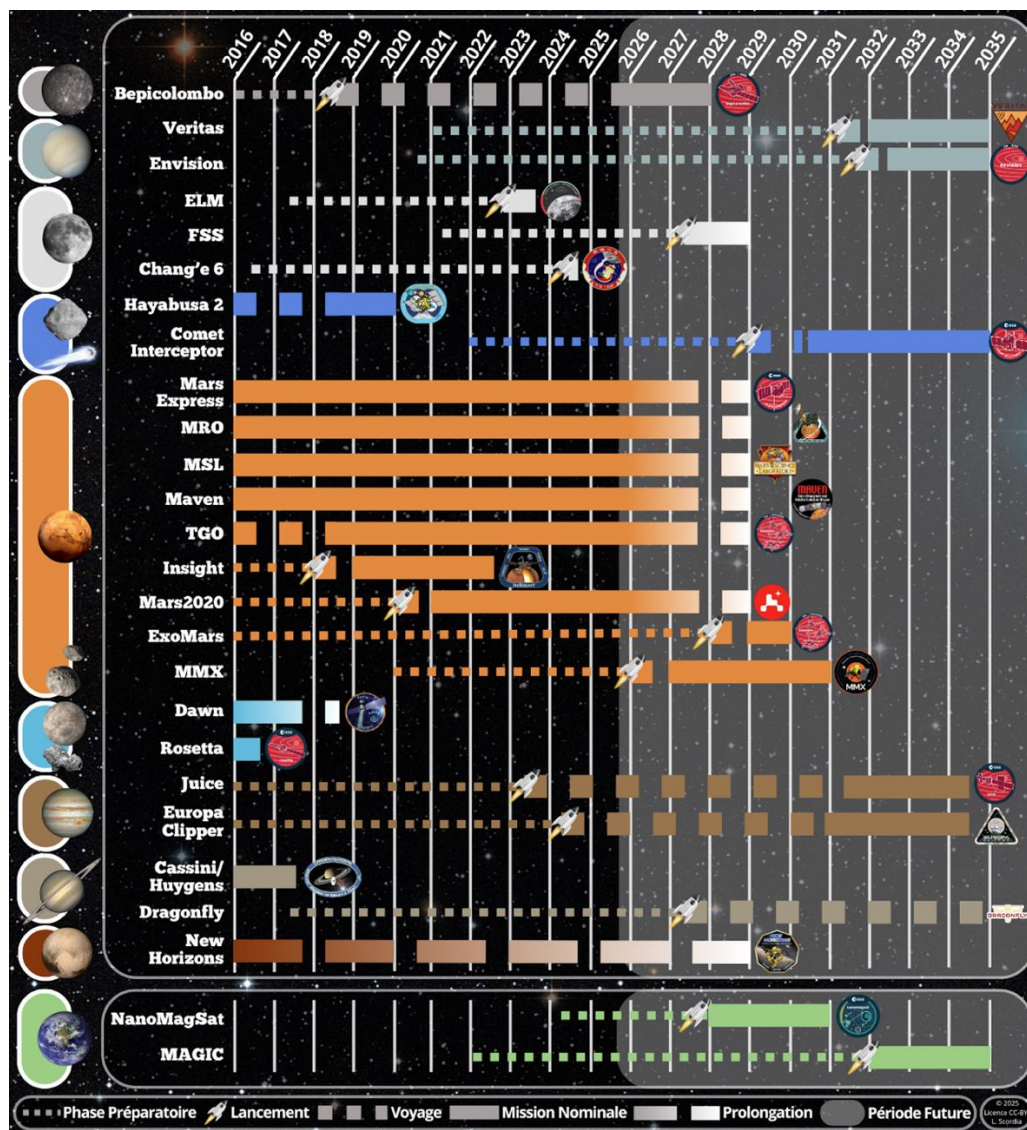


Figure 1. Missions spatiales en lien avec INSU Terre Solide depuis 2016 dont les équipes et ou chercheurs français sont impliquées, soit dans la construction, conception, opération de la mission. Les corps cibles sont indiqués à gauche.

Défi 3. Transferts de chaleur et de matière entre l'intérieur de la Terre et ses enveloppes externes : Des processus géologiques aux activités humaines

Composition du groupe de travail : Mathilde Cannat, Fabrice Gaillard, Julien Mercadier

3.1 Nature du défi

Les processus géodynamiques et les phénomènes géologiques associés, à toutes les échelles, font des fluides (magmas, fluides aqueux et gazeux) de puissants facteurs de transferts d'éléments chimiques et de chaleur entre l'intérieur de la Terre et ses enveloppes externes. Opérant sur des durées extrêmement variables pouvant atteindre plusieurs millions d'années, ces transferts façonnent notre planète en contribuant à sa diversité géologique, en établissant des réservoirs thermiques et chimiques ou en jouant un rôle clé pour son habitabilité. Les activités humaines modifient rapidement et exploitent certains de ces réservoirs, des continents aux fonds marins. Fondé sur ces problématiques, ce défi Terre solide fixe un cap vers le déploiement d'approches de recherche capables de mieux comprendre ces transferts, leurs rôles et impacts sur l'évolution de la Terre, et leur potentiel en termes de ressources, en intégrant temps longs de la Terre solide et temps courts des activités humaines. Il s'agit donc d'aller au delà de l'approche actuelle des recherches sur ce thème, pourtant déjà porteuse de nombreux succès, pour mieux définir et prendre en compte la complexité des processus, les rétroactions et les échanges aux interfaces terre solide, hydrosphère, atmosphère et biosphère. La portée de ce défi sera dépendante de la capacité de mener ces recherches dans un cadre disciplinaire plus large que celui de l'INSU TS.

3.2 Thématiques scientifiques

Les transferts telluriques dans la terre solide recouvrent des transferts réactifs multiphasiques liés aux migrations de matière et de chaleur en réponse à des processus tectoniques, magmatiques, hydrothermaux ou sédimentaires, souvent associés à des gradients de perméabilité et de potentiel chimique, dans le cadre d'interactions complexes avec la biosphère, l'hydrosphère et l'atmosphère. De nouvelles approches analytiques, expérimentales, et de modélisations permettent une compréhension plus précise des mécanismes physiques, chimiques, et comme on le découvre de plus en plus, biochimiques de ces transferts. Ils dépendent par exemple des conditions tectoniques et magmatiques moteurs des éruptions volcaniques et des circulations hydrothermales, des processus métamorphiques et d'altération des roches, de processus de transfert latéral de matière tels que les dynamiques érosives et sédimentaires, les panaches volcaniques dans l'atmosphère et les plumes hydrothermaux dans l'océan, et actuellement dans de nombreux cas, de forçages anthropogéniques. A l'échelle globale et sur les temps longs, ils influent sur l'évolution chimique de la Terre solide, l'état thermique et la rhéologie du manteau, de la lithosphère, la composition de l'atmosphère et de l'hydrosphère. La connaissance de ces flux et de la complexité des interactions entre réservoirs et rétroactions associées à toutes les échelles est donc une clé pour comprendre l'évolution géodynamique de notre planète au sens large. Elle revêt une importance sociétale particulière dans le contexte des changements environnementaux en cours, étant une composante de la ligne de base pour analyser les signaux anthropogéniques et, plus généralement, pour informer les actions de préservation de l'habitabilité de notre planète. C'est aussi une condition pour améliorer nos connaissances sur les cycles des éléments d'intérêt pour les développements actuels et futurs des sociétés humaines.

Les dernières décennies ont permis des avancées significatives dans la compréhension de ces transferts, par l'acquisition de nouvelles données de terrain et de monitoring in-situ, le traçage géochimique et géochronologique, l'expérimentation en laboratoire ou la modélisation. Ces résultats éclairent en particulier l'importance des interactions fluides-magmas-roches et le rôle du vivant sur les transferts chimiques actifs dans les niveaux superficiels, perméables, de la lithosphère. De nouvelles approches ont également permis l'intégration de ces transferts dans des modèles géodynamiques de plus en plus sophistiqués (lien avec le défi 1). Cependant, des questions aussi fondamentales que celle du bilan carbone global des processus géodynamiques restent ouvertes, ainsi que, plus généralement, la quantification des flux élémentaires d'origine tellurique. Il s'agit aussi de mieux connaître les relations entre flux élémentaires telluriques, paramètres physico-chimiques des milieux et biodiversité, à l'actuel ou dans le passé de la Terre. De ce point de vue, outre les gaz à effet de serre et les aérosols volcaniques, on peut envisager de cibler les nombreux éléments impliqués dans le métabolisme des organismes vivants (par exemple le fer et les oligo-éléments mobilisés par les systèmes hydrothermaux, ou l'hydrogène généré par l'oxydation d'espèces minérales réduites), et dans la formation de concentrations chimiques potentiellement utiles pour nos sociétés humaines.

L'étude des transferts telluriques est en effet également la clé d'une compréhension plus fine des mécanismes de concentrations élémentaires conduisant à la formation de ressources potentielles pour

les sociétés humaines: métaux dans les roches et les fluides, gaz non carbonés (hydrogène, hélium) et énergies géothermales. Ces phénomènes opèrent sur des centaines de milliers voire des millions d'années pour constituer des ressources exploitées à l'échelle de la durée de vie humaine. La nécessaire transition énergétique repose en partie sur le développement de nouveaux vecteurs énergétiques et sur les capacités à les stocker dans le milieu géologique, et booste la demande d'éléments chimiques clés pour l'abandon des énergies carbonées. Etudier les processus et les contextes géologiques qui favorisent des flux importants de chaleur, de fluides concentrateurs de ces éléments clés, les mécanismes physiques ou chimiques de leur accumulation et de leur préservation, et prévoir les impacts d'une exploitation éventuelle sont donc des priorités. Ceci passera par des recherches à la croisée de questions fondamentales sur les processus, de questions de géo-ingénierie et de questions en lien avec la prise en compte des besoins des parties prenantes et des risques environnementaux. Le potentiel géothermique de haute et basse températures doivent devenir une cible prioritaire de recherche, sur l'exemple du site volcanique expérimental de Krafla en Islande. L'évaluation du potentiel de l'hydrogène tellurique comme source d'énergie est également à la croisée de questions fondamentales sur les grands cycles redox et les échanges eau-roche en contexte de réservoirs géologiques et de problématiques d'ingénierie du sous-sol. Enfin, la problématique du stockage souterrain de ressources et des déchets produits par nos activités industrielles (gaz carbonés et nucléaires en particulier) exige d'aborder conjointement des questions fondamentales sur les mécanismes qui contrôlent leur mobilité, et des questions d'ingénierie pour évaluer la faisabilité et optimiser la durabilité des solutions proposées.

3.3 Verrous scientifiques et techniques / adaptation des outils et de l'organisation pour les lever

Verrou 1. Renforcer la connaissance et l'intégration des échelles spatiales et temporelles au sein et entre réservoirs

Approche : Mettre les questions de changements d'échelle et d'interactions entre processus et acteurs au centre des problématiques de recherche. Développer des démarches de type observatoire interdisciplinaire permettant d'intégrer plusieurs processus sur plusieurs échelles de temps courtes et d'espace

Verrous spécifiques : manque d'instruments capables d'effectuer des mesures sur le long (observatoire) ou le très court termes, ou à des échelles spatiales variées (en particulier pour la géochimie et la géophysique) et difficultés pour maintenir les équipements en condition opérationnelle. Dans les deux cas les solutions passent par une coordination inter-organismes et du soutien de moyen à long terme.

Verrou 2. Améliorer la connaissance et quantification des processus physiques, chimiques, biologiques et anthropogéniques en jeu, l'intégration des interactions entre réservoirs et les retro-actions potentielles

Approche : Privilégier une interdisciplinarité fondée sur le développement de programmes financièrement ambitieux et portant des questions scientifiques communes sur cette problématique avec OA, SIC, les biologistes et les SHS pour le vivant humain.

Verrou 3. Continuité des outils de modélisation à travers l'espace des paramètres.

Approche : Des conditions du magmatisme à la géothermie basse température, les équations thermodynamiques et mécaniques ont des espaces de validité fragmentés, avec des *terra incognita* liées à des systèmes en conditions extrêmes tels que les fluides magmatiques très chauds, denses, salés, des fluides hyperacides, insaisissables, mais jouant pourtant des rôles clés dans les transferts élémentaires et de chaleurs. Renforcer les liens avec les autres champs disciplinaires (mathématiques, physique) afin d'améliorer ou créer les outils de modélisation de demain.

Verrou 4. Capturer les tempos des transferts et formations des réservoirs géologiques.

Approche : Les modèles numériques doivent viser à prédire ces vitesses et des mesures types monitoring sur le temps long, s'appuyant sur des chronomètres, des indicateurs isotopiques ou minéralogiques. Cette approche numérique doit être aussi réfléchie pour intégrer les processus de temps courts (nucléation cristalline, sismicité, ...) et contextes physico-chimiques à leur origine, souvent peu quantifiable via mesure ou expérimentation. Cette approche ne pourra aboutir que si l'interdisciplinarité est assurée comme précédemment

mentionné, c'est à dire que si le dialogue prédiction numérique – observation – expérimentation est efficace. Les approches analogiques doivent être plus prises en compte.

Verrou 5. Identifier et définir le rôle de la biosphère profonde et les liens/retro-actions entre biosphère et les grands réservoirs et flux

Approche : Améliorer les connaissances de cette biosphère spécifique par le soutien aux missions (terre et mer) ou par le développement et conceptualisation d'approches analogiques

Verrou 6. Capturer les réactivités fluides-roches-magmas et leur impact(s) sur les propriétés des réservoirs.

Approche : Poursuivre les développements sur la thermodynamique et la mécanique des systèmes multiphasés applicables pour les conditions du sous-sol, Mieux comprendre et intégrer les conditions d'états d'équilibre et hors équilibre (stabilité vs. instabilité des réservoirs et flux)

Verrou 7. Améliorer la résolution et notre compréhension de l'imagerie géophysique du sous-sol et sa traduction en nature géologique/minéralogique/géochimique.

Approche : Comment convertir vitesse sismique, donnée gravimétrique, résistivité électrique, propriété magnétique, en nature et propriété des roches du sous-sol géologique ? Lever ce verrou nous permettra de voir à travers l'écorce terrestre, de lire les systèmes hydrothermaux dans la lithosphère continentale et sous les océans, et de décrypter les drains que sont les systèmes failles. La géophysique, le laboratoire et le terrain doivent poursuivre leurs échanges et travaux.

3.4 Liens avec les questions environnementales et sociétales

Ce défi est au cœur de questions environnementales et sociétales prioritaires dans le contexte global du changement climatique en action, des impacts environnementaux de plus en plus criants qu'il entraîne et des nécessaires changements à mettre en œuvre par nos sociétés humaines pour limiter nos impacts et nous adapter. Ces liens sont directs avec la volonté d'apporter de connaissances sur ces questions, mais aussi indirectes sur la capacité de les expliquer et transférer aux différentes parties prenantes pour éclairage dans les prises de décision collective et politique. Une liste d'enjeux est indiquée ci-dessous :

Enjeu 1. Participer à l'évolution en cours des pratiques de recherche pour prendre en compte les questions d'éthique environnementale et les rapports sciences/politiques

Approche : organiser des ateliers de réflexion et de formation sur les questions d'éthique environnementale et sur les rapports sciences/politiques (remise en cause du personnage du savant expert, prise en compte des notions de complexité et d'incertitude pour la décision politique...). Intégrer autant que possible ces questions aux objectifs de recherche (dans les appels à projet...), en développement la multidisciplinarité et les échanges avec la société civile.

Enjeu 2. Prendre en compte le vivant (humain et non-humain), pas seulement comme participant à certains mécanismes de transfert, mais aussi comme partie prenante des recherches.

Approche : mettre la question de l'habitabilité au centre des problématiques de recherche, tant pour le choix des cibles à privilégier (par exemple le choix des éléments à étudier pour les cycles globaux, ou l'évaluation de potentielles ressources), que pour les rendus (livrables) des projets.

Enjeu 3. Enoncer les problématiques et transférer les connaissances sur les ressources du sous-sol aux différentes parties prenantes, en évitant l'écueil de possibles parti pris ou de prise de position

Approche : Communication/passage des connaissances aux sphères politiques et publiques, éclairage du scientifique vers le monde socio-économique et politique, nécessité de formation pour maîtrise du discours et adaptation en fonction des publics

3.5 Contexte programmatique

Le contexte programmatique est assez diversifié avec différents types de programme de taille, durée et financement différents.

a) Ce défi de la prospective est par exemple directement en adéquation avec des questions et objectifs prioritaires de deux PEPR des PEPR GFM (Grands Fonds Marins : connaissances pour fonder

des usages et une protection durable) pour le milieu océanique et SOUS-SOL BIEN COMMUN pour le milieu continental.

Le défi 3 de la prospective répond très clairement au défi 2 du PEPR GFM intitulé " Transferts de matière et d'énergie entre terre solide, biosphère et colonne d'eau : le rôle des grands fonds pour l'habitabilité de la planète". Ce PEPR lancé pour 9 ans en octobre 2024 est piloté conjointement par le CNRS, l'Ifremer et l'IRD et prévoit deux appels à projet gérés par l'ANR pour un total de 35 M€, dont le premier sera ouvert en 2026. Voici le paragraphe introductif de ce défi dans le document de cadrage du PEPR : *"Les transferts de matière et d'énergie de la terre solide et des communautés vivantes des grands fonds vers la colonne d'eau, et depuis la surface, à travers la colonne d'eau, jusqu'aux environnements benthiques et au substratum, sont encore très mal connus. Qu'il s'agisse de chaleur, de matière organique, d'autres composés chimiques, d'origine anthropique ou non, ou d'organismes vivants, ces transferts contribuent aux équilibres, ou aux déséquilibres, environnementaux aux échelles régionales et globales. Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible, sauf de façon très parcellaire, d'évaluer ces contributions. Ce défi vise à mieux contraindre les processus physiques, chimiques, biologiques et géologiques qui contrôlent ces transferts, afin de les caractériser, de les quantifier, de les suivre, et de les prendre en compte de manière adaptée en fonction des échelles, du niveau local à l'échelle planétaire. Ces travaux, qui reposent sur l'approche intégrée des différents processus aux différentes échelles, s'appuieront sur l'analyse de données et d'échantillons in-situ, incluant des séries temporelles, sur des approches expérimentales et sur la modélisation. Ils fourniront des données et des indicateurs pour surveiller et évaluer les effets des politiques publiques et fonder des options de gouvernance des grands fonds marins."*

Ce défi répond au PEPR « sous-sol bien commun » : « Dans un contexte de demande croissante en ressources du sous-sol, et le risque à terme de conflits d'usage, le Programme et équipements prioritaires de recherche (PEPR) Sous-sol, bien commun vise à évaluer la demande nationale future en ressources et usages du sous-sol, à caractériser ses potentiels, à étudier les impacts environnementaux des usages, la politisation du sous-sol, et les aspects juridiques. Financé dans le cadre du plan France 2030 et copiloté par le CNRS et le BRGM, il est doté d'un budget d'aide de 71,4 millions d'euros sur 7 ans et rassemble plus de [30 institutions et laboratoires partenaires](#). Le PEPR Sous-sol, bien commun s'articule autour de **3 axes scientifiques** et regroupe [13 projets de recherche ciblés](#), dont 8 projets et 5 chantiers régionaux »

b) Les problématiques proposées dans ce défi et les mots clés associés rentrent dans deux des appels à projet de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR Axe A.1. « Terre Solide et Enveloppes fluides» et Axe G1 « planétologie, structure et histoire de la terre ») ainsi que ceux du programme Horizon Europe offre - Science d'excellence et les financements ERC, les Doctoral Networks, et fellowships Marie Curie. Pour l'ERC le défi s'intègre dans le domaine disciplinaire Physical Sciences & Engineering et sous-domaine scientifique PE10 Sciences du Système Terre.

c) Les problématiques proposées rentrent aussi dans les problématiques scientifiques abordées par le programme TELLUS du CNRS-INSU, suivant au moins 4 des 6 actions thématiques (SYSTER, INTERVIE, post-campagne à la mer, IODP)

Défi 4. Forçage et dynamique des événements telluriques extrêmes

Composition du groupe de travail : L. Benedetti, A. Hildenbrand, et R. Cattin

Ce document préliminaire est issu d'un travail de synthèse réalisé par L. Benedetti (CEREGE), A. Hildenbrand (GEOPS), et R. Cattin (GM). La présentation de ce défi a été initialement rédigée par ces trois collègues (voir paragraphe suivant « présentation initiale du défi 4 »), puis distribuée à l'ensemble de la communauté. Une quinzaine de retours ont été reçus. Les chercheur(ses) ayant participé à la consultation pour ce défi proviennent de laboratoires variés à l'échelle nationale : ISTerre, EDYTEM, Geo-OCean, LPG, GM, Géoazur, GEOPS et le LMV. Leurs domaines d'expertise couvrent l'ensemble des champs thématiques du défi 4: aléas sismiques, volcaniques et gravitaires. Il n'est pas rare que ces chercheu(r)ses se positionnent « à cheval » sur plusieurs disciplines et combinent de fait des approches multiples.

Présentation initiale du défi 4

Forçage et Dynamique des Aléas Telluriques - Les sociétés humaines sont menacées par un certain nombre d'aléas telluriques à fort potentiel destructeur : séismes, éruptions volcaniques, glissements gravitaires, tsunamis. Ces processus peuvent être générés ou influencés par des sollicitations internes (déformations tectoniques, mouvements verticaux, circulations de fluides) comme externes (ouragans, crues éclairs), et /ou se produire en cascade (éruptions et séismes, séismes et glissements de terrain, tsunamis induits). Les recherches de la communauté pour mieux caractériser ces aléas doivent à la fois porter sur l'identification de potentiels signaux précurseurs et plus généralement viser à contraindre la contribution des différents facteurs favorisant/déclenchant, afin d'améliorer la prévision et/ou la mitigation de ces phénomènes. Les deux principaux défis concernent (1) l'identification de ces signaux précurseurs potentiellement très faibles et souvent mélangés à des signaux pouvant être associés à des perturbations de surface ou à des forçages externes par la cryosphère ou l'érosion et (2) l'étude des événements « catastrophiques » très brefs qui s'insèrent dans une histoire plus longue (du siècle à plusieurs dizaines de milliers d'années). Le développement de continuum aléas – événements extrêmes – histoire longue est important pour s'affranchir de l'effet « focus » sur un événement donné, et permettra d'identifier l'origine des signaux observés hors des périodes de crise et de mieux comprendre le rôle de ces processus catastrophiques instantanés dans une évolution à plus long-terme. Une approche pourrait consister à étudier des sites instrumentés ou des cas bien documentés sur lesquels l'ensemble de la communauté pourrait se rassembler, en collectant de nouvelles mesures tout en revisitant les observations existantes de tous types, de l'échelle globale jusqu'à celle de l'affleurement.

4.1 Nature du défi

Au cours de la dernière décennie, la thématique axée sur les forçages et la dynamique des événements telluriques extrêmes a fait l'objet de nombreuses études. Les observations de plus en plus diverses et précises, les approches multi-échelles et pluridisciplinaires, ainsi que l'accès à des moyens de calcul conséquents ont permis des avancées scientifiques majeures. Cependant, la compréhension des mécanismes contrôlant l'occurrence de ces événements reste parcellaire. Pour relever ce défi, de nombreux axes de recherche existants doivent être renforcés et des ruptures thématiques doivent être envisagées.

4.1.1. Renforcement des recherches actuelles

Le continuum entre source, propagation, impacts ainsi que l'intégration de la démarche probabiliste sont indispensables afin de prédire ou de gérer/anticiper les aléas telluriques. Pour ce faire, assurer la fiabilité et la distribution des données d'observatoire est essentiel. Au-delà des épisodes de crise, la pérennité des mesures permet en effet de prendre en compte des aléas modérés qui contribuent significativement aux pertes cumulées. Une telle approche permet également d'observer plus fréquemment et ainsi de mieux contraindre les forçages et la dynamique des événements extrêmes.

De façon générale, les études tentant de relier des données tectoniques, sédimentologiques, pétrophysiques, géochimiques et géophysiques doivent être soutenues. Seule une démarche multi-approche permettra de décrypter les mécanismes complexes responsables du déclenchement des événements extrêmes.

4.1.2. Soutien à des thématiques de rupture

En termes d'instrumentation, de nombreuses approches innovantes sont en cours. Elles vont sans doute dans les années à venir modifier fortement nos démarches pour documenter les événements telluriques extrêmes. On peut notamment mentionner:

- La mise en œuvre de multi-capteurs satellitaires, aéroportés, en mer ou au sol.
- L'utilisation de câbles sous-marins équipés de fibres optiques, qui offre une capacité unique pour détecter des signaux spécifiques dans des environnements marins profonds et éloignés, offrant ainsi de nouvelles perspectives pour l'étude et la quantification des catastrophes naturelles sous-marines.
- Le déploiement de nanocapteurs ou de drones autonomes dotés de capteurs à échelle nanométrique pourrait révolutionner la mesure des gaz volcaniques. Ces technologies permettraient une précision accrue, notamment pour détecter des espèces gazeuses en très faibles concentrations, souvent inaccessibles avec les outils actuels.

Task force : Les instruments actuels et futurs doivent pouvoir être mobilisables rapidement : en avance lorsque la crise peut être prévue, durant une crise en cours, ou juste après lorsque ces instruments permettent d'apporter des informations décisives, mais dont les traces sont souvent éphémères. Cette capacité d'intervention rapide collaborative, qui peut être trans-laboratoire et même trans-nationale, impose essentiellement la mise en place d'une Task Force scientifique et technique par domaine, impliquant les capteurs disponibles au moment de la crise et les personnels volontaires. Pour le CNRS et l'ensemble des organismes de recherche, cela nécessite la mise à disposition de crédits dédiés (ou l'assurance par les labos d'être remboursés) et une aide à l'acheminement des matériels et personnels. Outre les retombées scientifiques, de telles interventions contribuent au rayonnement de l'Institut et du pays.

En termes de modélisation numérique, les approches utilisées restent souvent trop simples face à la complexité des processus. Une caractérisation haute-résolution des zones sources (imagerie des failles, des édifices volcaniques, des mouvements gravitaires), une meilleure intégration des cycles de déformations et des états critiques, ainsi qu'une prise en compte de la propagation et de l'étendue des événements extrêmes sont indispensables. La prise en compte de rhéologies plus réalistes apparaît également comme un défi majeur nécessitant de mieux contraindre les paramètres physiques et les taux de déformation. L'ensemble de ces approches gagnerait à intégrer l'utilisation de l'intelligence artificielle, notamment dans la prédiction des événements extrêmes.

Globalement, les thématiques en rupture sont associées à la prise en compte de la dynamique des systèmes complexes. À titre d'exemple, on peut mentionner :

- Les forçages externes - internes et leurs couplages. L'impact des événements climatiques extrêmes sur l'aléa gravitaire ou l'effet des éruptions sur le climat sont aujourd'hui bien documentés et avérés. Cependant, même si plusieurs études ont récemment proposé de potentiels liens entre séismes et climat, ces couplages restent mal compris. Plusieurs pistes pourraient être envisagées, notamment en augmentant significativement la période d'observation. Les approches couplant sismologie et géodésie permettent aujourd'hui d'observer les phénomènes lents et long-terme sur plusieurs décennies. Le recours à la paléosismologie via les archives sédimentaires continentales et marines doit également être renforcé, permettant d'accéder à des observations sur plusieurs millénaires.
- En volcanologie, une nouvelle direction pourrait consister à se concentrer sur les gaz nobles (He, Ne, Ar, Xe) et les isotopes rares pour tracer l'origine des volatiles dans les magmas. Ces recherches offriraient une meilleure compréhension des sources mantelliques profondes et des interactions croûte-magma. En complément, le couplage de plusieurs éléments chimiques (dont Li, Cl, B, F) impliqués dans les cycles géologiques permettrait de reconstituer en temps quasi-réel les dynamiques magmatiques modulo des temps de transferts, notamment les épisodes de recharge magmatique et les interactions au sein des zones de mush, la vitesse d'ascension du magma et les mécanismes de dégazage associés.

4.2 Thématiques scientifiques

Plusieurs thématiques et disciplines sont identifiées pour le défi 4, dont certaines dépassent le cadre de l'INSU - Terre Solide.

4.2.1. Au sein l'INSU - Terre Solide

- Thématiques - liens : Dynamique des systèmes complexes (à toutes échelles d'espace et de temps), mécanismes de la sismicité, enregistrement sédimentaire, séismes/ éruptions/ tsunamis/ glissements sous-marins (avalanches de débris, turbidites...), aléas et risques en milieu anthropisé, interactions et rétroactions entre tectonique-volcanisme-climat, impacts

environnementaux et sur les écosystèmes, reconstruction historique, mesure du temps et récursivité.

- Disciplines : géodynamique, géodésie, géochimie, géochronologie, géophysique, géomorphologie quantitative, géologie structurale/tectonique, (paléo-)sismologie, géomécanique, volcanologie (sl), modélisation (analogique et numérique), pétrologie endogène, sédimentologie, sciences atmosphériques et climatologie, thermodynamique, physique, mathématiques, archéologie et histoire.

4.2.2. Au sein l'INSU, autres domaines concernés

Le défi 4 ne peut pas être exclusivement limité aux contours du domaine Terre Solide. En effet, de nombreux processus impliqués dans la dynamique des événements extrêmes, notamment aux forçages externe - interne au niveau de la surface de la Terre, sont davantage étudiés dans les domaines « Océan-Atmosphère » et « Surface et interfaces continentales ».

4.2.3. Autres instituts du CNRS concernés

Le défi 4 est focalisé sur les processus qui conduisent à l'évaluation de l'aléa. La définition des risques associés implique une prise en compte de la vulnérabilité et des enjeux sociétaux et environnementaux. Les instituts « Écologie et Environnement » et celui des « Sciences Humaines et Sociales » ont donc une part importante à prendre dans ce défi.

4.3 Verrous scientifiques et techniques / adaptation des outils et de l'organisation pour les lever

4.3.1. Verrous techniques

La capacité de l'INSU à mobiliser des moyens observationnels rapidement, juste avant, pendant, ou juste après une crise reste limitée. Pour lever ce verrou, il serait nécessaire de mettre en place l'organisation collective d'une force d'intervention (par domaine thématique par exemple), avec des facilités financières et organisationnelles particulières de la part du CNRS pour les urgences (message d'alerte scientifique, fret matériel, transport des personnels, gestions douanières, accords transporteurs).

Le manque de données géophysiques en milieu marin limite la caractérisation des risques liés aux aléas. Œuvrer pour lever ces verrous avec l'accès à plus de câbles pour l'utilisation des technologies de mesures sur fibre optique permettrait une amélioration des systèmes d'alertes. Un autre point concerne la sensibilité et la dynamique des mesures associées aux instruments DAS qui sont encore trop limitées. Par exemple, dans la cadre de la sismologie, ces aspects inhibent encore l'efficacité des instruments DAS pour une surveillance sismique complète et précise.

Concernant les systèmes magmatiques les verrous concernent les limites analytiques. Les techniques actuelles (par exemple SIMS, LA-ICP-MS) nécessitent des améliorations pour atteindre une résolution isotopique et chimique plus fine, particulièrement pour les éléments légers comme le Li, le B ou le Cl. De plus, le lien entre signaux géophysiques (sismicité, déformation) et les processus chimiques reste difficile à établir en l'absence d'outils intégrés.

4.3.2. Verrous observationnels

Un premier verrou concerne l'accès limité aux processus profonds. Les données directes sont rares, et les reconstructions reposent souvent sur des proxies tectoniques, géochimiques et géophysiques. Ainsi, les échantillons volcaniques et magmatiques disponibles sont souvent fragmentaires et ne reflètent qu'une partie des processus en jeu. De même, les observations géodésiques, sismologiques ou gravimétriques ne permettent d'obtenir qu'une image floue des structures et des déplacements en profondeur.

Comme mentionné dans la section 1.2., un second verrou est lié à la temporalité des phénomènes. Plusieurs pistes peuvent être envisagées pour documenter des échelles de temps allant de quelques minutes à plusieurs milliers d'années. Au-delà des observations actuelles (minutes à quelques décennies), on peut mentionner l'accès à des enregistrements qui permettent de reconstituer la fréquence des événements sur le long terme avec une très bonne contrainte chronologique. Par exemple des carottes sédimentaires longues via le Centre de Carottage Français qui pourrait être renforcé pour obtenir des séquences sédimentaires riches et mutualisables.

4.3.3. Verrous conceptuels

Pour les systèmes magmatiques, les processus (ascension, mélange, dégazage, différenciation), sont interconnectés de manière complexe, rendant leur décomposition et leur modélisation difficile. De même, pour les séismes et les glissements gravitaires, les liens directs entre observations et processus devraient être explorés davantage. Relier les données géochimiques, pétrologiques, géodésiques ou géophysiques pour reconstruire la dynamique des événements extrêmes en temps réel reste un défi majeur.

Plus généralement, les modèles numériques sont encore limités dans leur capacité à reproduire des conditions naturelles complexes. La mise en place de jumeaux numériques est sans doute une piste à explorer, à la fois pour leurs capacités à assimiler des données sur des sites instrumentés et pour leur caractère prédictif (simulation, anticipation) sur des glissements gravitaires, des failles, ou des édifices volcaniques. Ces approches pourraient être développées sur des sites expérimentaux prioritaires pour une large communauté.

4.4 Liens avec les questions environnementales et sociétales

Le défi 4 est étroitement lié à des questions sociétales et environnementales.

4.4.1. Implication sociétale

Mieux anticiper les aléas telluriques, en relevant les défis associés aux signes précurseurs, aux événements extrêmes, mais aussi aux processus déclencheurs ou à la caractérisation/imagerie de leur état critique permettrait de mieux anticiper et réduire les impacts pour la société. De plus, la distinction des aléas et des conséquences associées qui sortent du cycle naturel serait essentielle pour répondre à la recherche de responsabilité lors de pertes ou de gênes.

Ce défi scientifique est avant tout focalisé sur les processus et les aléas. La médiation scientifique et l'amélioration des systèmes d'alerte sont certes importantes. Cependant, pour accroître fortement l'impact sur la société des recherches menées, il faudrait ouvrir les recherches et les questions scientifiques aux autres disciplines du CNRS, incluant les SHS, et les sciences de l'ingénieur et encourager les dispositifs de recherche-action avec les acteurs des territoires, tout en gardant un volet de recherches fondamentales. Des recherches centrées sur des territoires ou chantiers spécifiques, où les scientifiques de disciplines diverses pourraient interagir avec des acteurs locaux pour contribuer à répondre aux besoins du territoire pourraient être une façon d'aborder cette question de la recherche transformante pour la société en lien avec les aléas (e.g. GDR Rift).

4.4.2. Questions et transition environnementales

Les liens du défi 4 avec la société sont principalement liés aux questions environnementales. Ils posent la question de l'impact environnemental des projets de recherche et de la pertinence des thématiques de recherche associées aux questions environnementales.

4.4.2.1. Privilégier une recherche sobre

Il apparaît important de privilégier l'information et la sensibilisation des coûts des projets de recherche. Un bonus qualité pour l'évaluation des projets sobres pourrait être mis en place. Le calcul du bilan carbone semble une étape indispensable dans les laboratoires, permettant d'optimiser les achats, de réfléchir aux missions utiles, et de mutualiser des achats d'instruments ou de serveurs. Parallèlement, les tutelles doivent investir massivement dans la rénovation des bâtiments, notamment en termes d'isolation thermique.

4.4.2.2. Contributions scientifiques

Avant de présenter les liens entre le défi 4 et les questions environnementales, il est important de repreciser la notion d'événements telluriques extrêmes. En effet, le système Terre doit être considéré dans sa globalité. Les événements telluriques doivent donc, non seulement inclure les phénomènes endogènes (séismes, tsunamis, glissements gravitaires et éruptions volcaniques), mais également exogènes (crues, tempêtes, activités anthropiques). Dans ce cadre, les liens sont souvent complexes, multi-échelle temporelle et spatiale et incluant de nombreuses boucles de rétroaction.

L'impact environnemental des événements telluriques extrêmes est déjà bien documenté. On peut citer notamment l'accident de Fukushima, les cyclones tropicaux aux Antilles re-mobilisant, via l'érosion, le Chlordécone stocké dans les sols, ou le couplage entre gaz-volcans avec le système atmosphérique global. L'objectif est ici de proposer quelques pistes où la communauté « Terre solide » peut, en partenariat avec les collègues travaillant sur l'océan, l'atmosphère et les sciences humaines, contribuer à une meilleure compréhension et gestion du système Terre :

- Le lithium, en tant que métal clé pour les batteries rechargeables et la transition énergétique, est d'un intérêt stratégique mondial. Les environnements volcaniques et hydrothermaux

constituent des sources potentielles de lithium, mais leur genèse et leur exploitation durable nécessitent une meilleure compréhension des processus géologiques impliqués. Les études sur le comportement du Li dans les systèmes magmatiques et hydrothermaux contribuent à mieux localiser les gisements exploitables. Elles permettent également de proposer des méthodes d'extraction plus respectueuses de l'environnement, réduisant ainsi l'impact écologique de l'exploitation minière.

- Le continuum aléas – événements extrêmes – histoire longue, souvent utilisé par la communauté « Terre solide » permet d'aborder les événements extrêmes dans un cadre plus large, comme dans le cas des glissements de terrain ou des essaims de séismes superficiels associés à des tempêtes (par exemple crue, glissement de terrain et essaims de séismes déclenchés par la tempête Alex de 2020).
- La détermination du terme source des éruptions volcaniques explosives induit une connaissance affinée des quantités de cendres fines, aérosols, et gaz émis par les volcans. Que les éruptions soient récurrentes et de faible intensité ou rares et catastrophiques, ces produits contaminent les ressources à proximité (sols, agriculture, eau), et surtout contribuent à la pollution atmosphérique locale et régionale et ont des effets sur le climat global. Parallèlement, dans les régions très volcaniques comme l'Indonésie, les produits éruptifs (cendres et dépôts pyroclastiques notamment) contribuent également à fertiliser les sols (permettant jusqu'à 3 récoltes de riz par an). Du coup, les populations sont souvent réticentes à s'éloigner des volcans, malgré les aléas importants. Les enjeux environnementaux sont donc importants. Un des multiples enjeux concerne par exemple une précision accrue de certains paramètres d'entrée des modèles prévisionnistes du climat.
- Prévention des risques telluriques et résilience environnementale. Les éruptions volcaniques, les séismes ou les glissements de terrain présentent des risques directs pour les populations et les écosystèmes environnants. Les avancées (1) dans la compréhension des processus magmatiques grâce aux traceurs géochimiques, (2) dans le suivi des glissements lent et asismique le long des failles et (3) dans la surveillance géochimique/géophysique des glissements de terrain permettent d'améliorer les prévisions en identifiant de potentiel signaux précurseurs ; d'élaborer des stratégies d'alerte et de gestion des risques plus efficaces, minimisant les impacts sur les populations et les écosystèmes vulnérables.

4.5 Contexte programmatique

4.5.1. Bilan du « tout appel d'offre »

La logique d'appel d'offre empêche la réalisation de grandes initiatives. La création de l'ANR a permis le développement de projets spécifiques, préparant cette logique pour les appels d'offres européens. Après plus de 20 ans, le « tout appel d'offre » a bridé en partie le développement ou/et le pilotage de grands programmes qui pourraient être confiés à des instituts (en particulier le CNRS mais pas que). Les exemples des PEPR illustrent ce problème majeur, où les moyens sont confiés à quelques pilotes avec parfois un manque de logique de développement communautaire concerté. Les programmes devraient être pilotés (en particulier) par le CNRS sur des projets communautaires, avec des moyens significatifs. Ainsi, le PEPR IRIMA traitant des questions d'aléa est bien trop restrictif et ne se focalise que sur certains types d'événements dans certaines régions. Par exemple, dans les Antilles françaises, de nombreux aléas sont présents (séismes, tsunamis, cyclones tropicaux, éruptions volcaniques) mais seulement un de ces aléas (sismo-volcanique) est étudié dans le cadre de ce programme. Ce qui est extrêmement regrettable car une approche plus holistique aurait pu être mise en place. Comment par exemple, oublier d'étudier les cyclones tropicaux dans ce secteur, alors que l'on sait que cet aléa augmente avec le changement climatique global ? D'autre part, quels impacts immédiats ou différés ces événements climatiques extrêmes peuvent-ils avoir sur les éruptions-séismes-glissements de terrain ?

4.5.2. Empreinte carbone

De plus, les moyens doivent privilégier la sobriété tout en maintenant une performance scientifique indispensable pour résoudre les défis auxquels la communauté doit faire face. Il apparaît indispensable de maintenir et renforcer les services d'observation (la plus belle mutualisation des efforts et des besoins) et les moyens de stockage des données rattachés aux producteurs de données qui en ont l'expertise. Si le bilan carbone est un indicateur important à intégrer dans les stratégies de recherche, il ne doit cependant pas être vu comme une fin en soi. Toute action de recherche a inévitablement des impacts environnementaux immédiats, mais peut à contrario permettre des économies substantielles de moyens, de ressources et donc d'émission de carbone à moyen et long-terme.

4.5.3. Futur contexte programmatique

Pour une approche plus communautaire, plusieurs programmes et structures devraient être renforcés : les GDR ou les structures fédératives internationales équivalentes, les liens avec la MITI, la mise en place de projets européens type cluster / consortium.

Ce défi devrait également pouvoir s'intégrer dans des programmes européens portés par les IR. Les communautés sont déjà structurées nationalement autour des SNO impliqués, et internationalement autour des services des IR. Pour les mobiliser, il apparaît nécessaire de les soutenir et de leur donner une autonomie programmatique annuelle, suivant une feuille de route scientifique définie et s'appuyant sur les principes d'amélioration continue de la qualité.

Plusieurs actions spécifiques sont également à soutenir. Par exemple, le Groupement Français de Recherche pour la mesure sur fibres Optiques en Géosciences (G-FROG) sous la tutelle d'Epos-France est une initiative qui regroupe la communauté française de chercheurs travaillant avec les mesures sur fibre optique. Les thématiques de ce défi associées à la fibre optique sont donc très pertinentes pour ce groupe. La recherche participative a montré qu'elle permettait des choses impossibles autrement dans certains contextes (comme la surveillance sismique en Haïti par un réseau citoyen, alors que le pays est complètement bloqué). Cette démarche nécessite de renforcer les liens avec les SHS.

Enfin, la communauté souligne l'importance de poursuivre les programmes TelluS qui permettent d'initier des projets et tester leur faisabilité, avant d'envisager de monter des projets d'envergure de type ANR. Les programmes PEPR apparaissent comme fermés pour une large partie de la communauté, et les ERC souvent inaccessibles aux enseignants-chercheurs de part le temps nécessaire. Il apparaît essentiel que le CNRS redevienne un institut qui pilote des orientations et des transformations via des programmes long-termes avec des moyens conséquents.

Défi 5. Dynamique des enveloppes terrestres et leurs interactions avec la biosphère : Crises et stases

Composition du groupe de travail : M. Aretz, A. Brayard, E. Pucéat, M. Rabineau

5.1 Nature du défi

Le système climat-géo-biosphère a connu des périodes de fortes perturbations à différentes échelles de temps et d'espace entrecoupées de périodes de relative stabilité au cours de l'histoire de la Terre, conduisant à son état actuel. Les recherches sur les facteurs de forçage, le fonctionnement et les interactions au sein de ce système complexe nécessitent la combinaison d'expertises variées associant des disciplines nombreuses au cœur du domaine Terre Solide (telles que paléontologie, sédimentologie, géochimie, tectonique, géobiologie, modélisation des cycles biochimiques, du paléoclimat et de la paléocéanographie) et fait aussi appel à des disciplines et des collaborations avec d'autres domaines SIC et OA en particulier et d'autres instituts du CNRS (INC, INSB, INP, INEE...). Associées à ce défi multi- et transdisciplinaire, ces thématiques de recherches se basent aussi sur une large gamme d'approches diversifiées et complexes unissant données de terrain, campagnes océanographiques, forages profonds, analyses et expériences de laboratoire, modélisation numérique, et ce, à différentes échelles spatio-temporelles (par ex. de la nanostructure des organismes aux écosystèmes ; du grain de sable au paysage jusqu'à des périodes très anciennes).

L'objectif principal est l'amélioration des connaissances des processus biotiques et abiotiques régissant l'ensemble du système climat-géo-biosphère et les interactions entre ses composantes, tels que les processus intervenant dans la dynamique de la biodiversité et ses rétroactions sur le système Terre ou encore les processus intervenant sur les vitesses d'évolution du système Terre et ses impacts et rétroactions sur les écosystèmes terrestres et marins. De très nombreuses questions restent en suspens et des verrous restent encore à lever. En particulier la caractérisation des facteurs, processus et seuils qui peuvent faire basculer le système climat-géo-biosphère, ou l'une de ses composantes, d'une phase de relative stabilité initiale ('stase') vers une rupture majeure ('crise', par exemple de la biodiversité, climatique, géodynamique ...), mais aussi ceux qui permettent de retrouver une nouvelle stabilité post-crise ou de modifier les capacités de résilience ou d'atteindre un nouvel état de base. Une attention particulière doit être portée à la compréhension des processus biotiques et abiotiques des intervalles considérés comme « stables » et qui demeurent aujourd'hui encore peu contraints et sans consensus quant à leur existence même.

5.2 Thématiques scientifiques

5.2.1. Calendrier à haute résolution et intégration de données à toutes les échelles spatio-temporelles

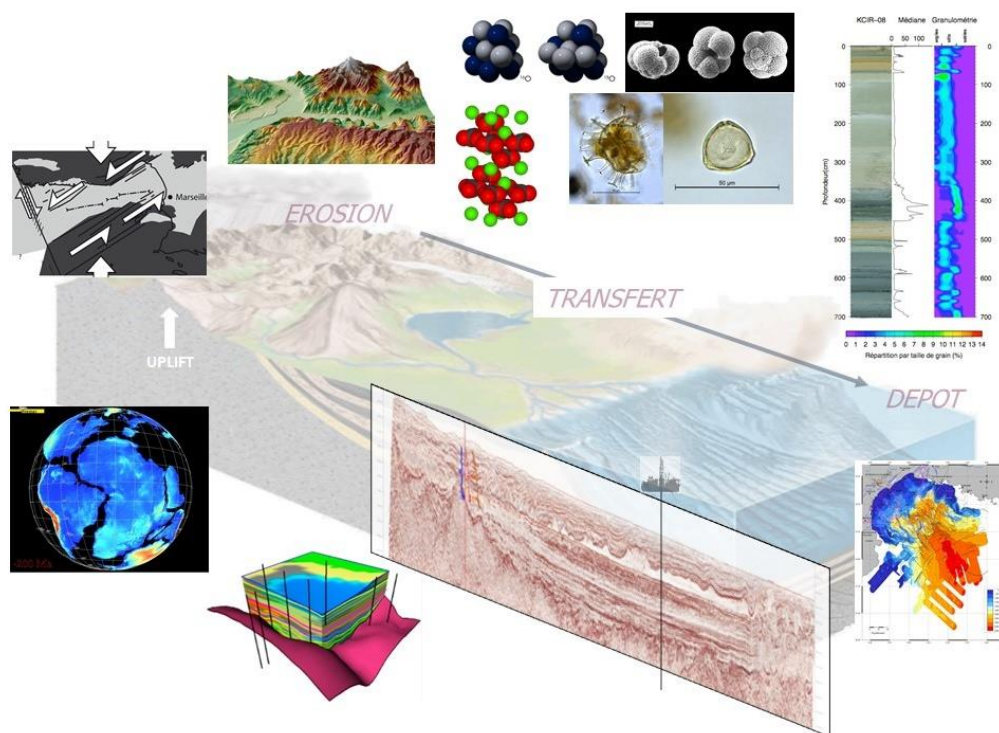
La nécessité d'une échelle des temps géologiques la plus précise possible est une priorité sans laquelle aucune étude de la dynamique du système ou de ses composantes, n'est possible. L'enjeu est essentiel pour connaître la vitesse des changements identifiés, des corrélations fines pour différents signaux. L'évaluation des processus impliqués dans les périodes de stase, est aussi un enjeu majeur.

Les notions d'échelles spatio-temporelles peuvent être très différentes et appréhendées de façon contrastée entre disciplines (par ex. les notions d'insularité, d'endémisme et d'invasion depuis l'assemblage et les environnements locaux jusqu'aux domaines océaniques ou continentaux, ou bien encore la notion d'instantanéité entre événements climatiques ou bien biotiques). Ceci est d'autant plus important que des sites d'étude trop circonscrits peuvent être plus sensibles aux crises ou aux facteurs environnementaux locaux. Des questions fondamentales telle que l'existence de motifs et processus éventuellement en commun dans les entrées en crise, ainsi que leur échelle spatio-temporelle d'action, restent aussi ouvertes. Concernant la biosphère, il en est de même pour l'identification de refuges potentiels face aux crises ou permettant une récupération plus rapide et un retour à la stabilité. Une caractérisation fine de leur environnement et leur suivi temporel devient ainsi cruciale pour comprendre leur mise en place et maintien. D'un point de vue paléoécologique, des questions s'attellent à déterminer les espèces clé de voûte et la diversité fonctionnelle des assemblages, ou bien encore le rôle des invasions dans la déstabilisation ou la résilience des écosystèmes sont encore trop peu abordées. C'est pourquoi la communauté nationale doit s'y investir pleinement. Étudier ce type de dynamiques paléoécologiques en phase de crise, de diversification et lors de stases permettra de mieux contraindre la part des facteurs biotiques dans la résilience et le rebond des communautés à des échelles spatiales variées, et pourrait notamment donner des pistes sur l'évolution future de la biodiversité face aux perturbations actuelles d'origine anthropique, mais aussi permettre des projections plus fines des récupérations écosystémiques suite aux exploitations humaines et à leurs déprises.

5.2.2. Rôle des cycles biogéochimiques et sédimentaires dans le système climat-géo-biosphère

Le système climat-geo-biosphère est constitué d'objets dynamiques extrêmement complexes résultant du couplage entre les processus internes, profonds mais aussi superficiels et externes. L'enregistrement sédimentaire traduit les interactions entre des processus profonds (tectoniques ou thermiques induisant subsidence ou soulèvement) et les processus de surface (incluant le climat, le niveau marin, l'hydrodynamique et la biodiversité). Le décryptage fin de cette archive doit permettre une reconstitution en 4D de l'histoire géologique et dynamique de notre planète. Cependant plusieurs points restent mal explicités et mal compris et nécessitent d'envisager de nouvelles approches.

Tout d'abord, notre compréhension de l'ensemble des processus de la source à l'archive sédimentaire (approche "source-to-sink") reste très limitée. Deux exemples de verrous persistants : la qualification et quantification des flux initiaux (issus de l'érosion-altération) mais aussi la compréhension de leur devenir dans les bassins sédimentaires, en prenant mieux en compte les processus hydrodynamiques liés aux grands courants océaniques (dans les modèles en particulier) qui peuvent redistribuer latéralement les dépôts (et donc perturber la logique "source-to-sink"). De grandes inconnues demeurent autour du transport de particules et du carbone organique particulaire par les rivières, ou des poussières atmosphériques. Des incertitudes restent aussi autour des flux dissous et de l'altération continentale, de ses contrôles (ex. le rôle des sulfures), et de son impact sur la productivité primaire et carbonatée. Une piste pour progresser dans ces directions est l'étude de systèmes continentaux fermés, tels que les bassins endoréiques ou lacustres d'un côté et la généralisation des études véritablement Terre-Mer pour inclure l'intégralité du système sédimentaire et son histoire au cours du temps.



Si notre connaissance des grandes caractéristiques des cycles biogéochimiques de certains éléments majeurs comme C, Ca, O s'est largement améliorée, la quantification des réservoirs de ces éléments dans le passé et leur évolution au cours du temps, ainsi que des flux entre les réservoirs représente aujourd'hui encore une thématique à explorer (ex. quantification de la biomasse, marine ou continentale, formation de pyrite, de carbonates, ...). Pour d'autres éléments majeurs tels que S, P, N, ou Si, de larges progrès restent encore à effectuer pour améliorer notre compréhension des cycles actuels et pouvoir les transférer dans les reconstructions de leurs perturbations dans le registre géologique et comprendre leur signification (ex. sur les flux de ces éléments des rivières aux océans, ou encore les flux impliqués lors de la diagenèse). D'autre part, pour certains éléments tels que Ca, As, Fe, Ge, Hg, Li, métaux (co-enzymes : Mo, V, Mn, Fe), des effets de seuil biologiques peuvent exister, notamment eu égard à leur statut double de "bio-nécessaire" et toxique, sont encore mal appréhendés. L'identification et l'intégration dans les modèles de ces seuils et les conséquences de leur émission

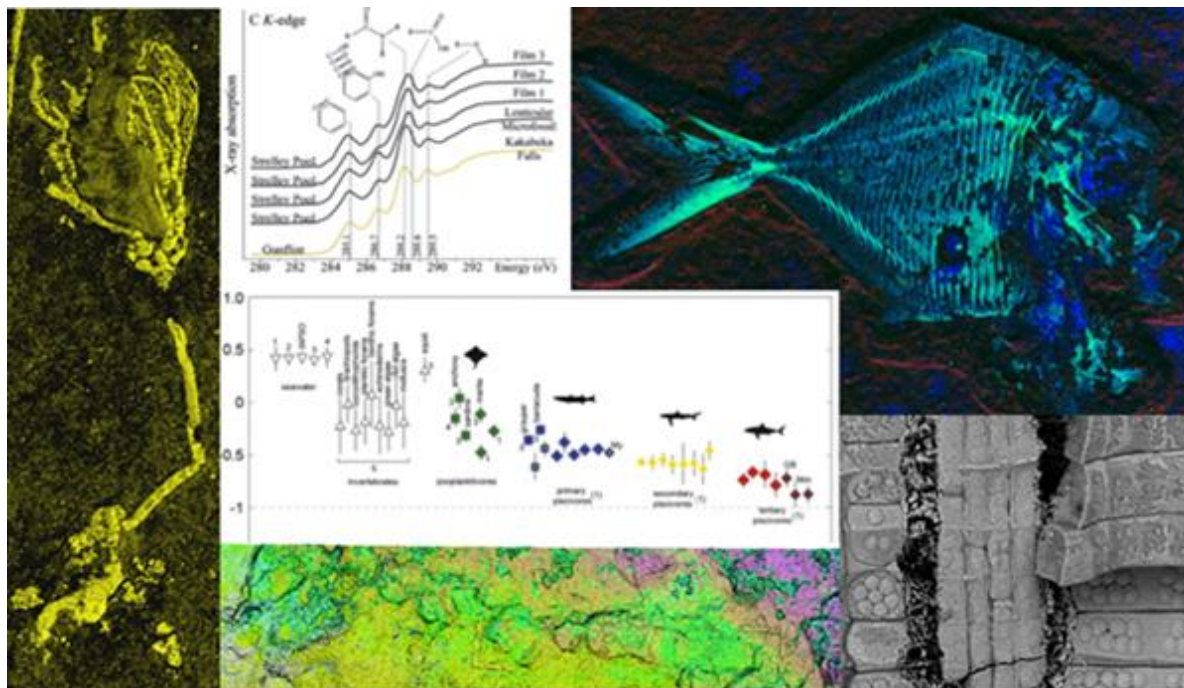
massive en cas de perturbation volcanique, biologique (par ex. empoisonnement bactérien), ou bien d'impact météoritique, représentent aujourd'hui des enjeux majeurs.

D'autres points globaux restent critiques. D'une part, l'influence de l'histoire géodynamique et tectonique de la Terre sur le climat, les transferts sédimentaires et les cycles biogéochimiques est toujours débattue et doit être traitée par la communauté nationale de façon ambitieuse. Par exemple, le budget net en carbone lié aux événements orogéniques demeure à ce jour un débat : puits de CO₂ (altération, enfouissement de matière organique, apport d'éléments pour production organique dans l'océan) ou source de CO₂ (métamorphisme, oxydation de carbone organique fossile) ? Ou bien encore comment contraindre l'évolution des flux associés aux processus de subduction ? Par ailleurs les effets de la diagenèse sur les cycles biogéochimiques sont encore peu contraints et les flux associés sont parfois mal identifiés pour l'actuel comme l'ancien (e.g. formation d'argiles et carbonates authigènes, production/consommation d'alcalinité, réduction microbienne des sulfates).

5.2.3. Comprendre la formation et la transformation des signaux paléoécologiques et paléoenvironnementaux

Un autre challenge réside dans la caractérisation fine de l'intégrité de préservation des enregistrements géologiques et paléontologiques. Les processus taphonomiques et diagénétiques sont par nature complexes et multi-phasés, représentant un biais d'enregistrement crucial déformant de façon plus ou moins importante et à différentes échelles spatio-temporelles les signaux primaires, qu'ils soient paléontologiques, sédimentologiques ou géochimiques. Ces processus étaient jusqu'à très récemment peu étudiés en détail. Cependant, la détection de nouveaux signaux permise par de récents développements technologiques et méthodologiques (par ex. imagerie Ct-Scan/ μ XRF, spectroscopie, génomique, protéomique) est en train de modifier en profondeur notre compréhension de l'origine et de la variabilité de ces processus et vont permettre l'évaluation de l'amplitude de déformation des signaux originels. La communauté nationale doit donc s'en emparer de façon ambitieuse afin de garder la maîtrise sur ces questions et approches innovantes, comme cela est par exemple le cas dans le cadre des études sur les gisements fossilifères à conservation exceptionnelle. L'identification de ces nouvelles signatures peuvent par exemple nous informer sur l'origine d'un tissu biologique, ses potentielles transformations et altérations, et ainsi conduire à de nouvelles approches pouvant être utilisées dans la caractérisation anatomique, développementale ou bien écologique d'un organisme, mais aussi de son environnement. Ces signatures offrent ainsi de nombreuses opportunités de mener des analyses exploratoires avec de nouvelles approches morphométriques et de valider sur des organismes actuels et fossiles une taxonomie biogéochimique, mais aussi de caractériser finement leurs (micro)environnements, et de discriminer leurs éventuelles voies de dégradation et décomposition des organismes et leurs trajectoires taphonomiques. Ces nouvelles signatures ravivent les études taphonomiques et diagénétiques en apportant des informations jusque-là inconnues ou peu contraintes au cœur des thématiques de la communauté TS (par ex. rapidité d'enfouissement, circulations de fluides, minéralisations et diffusion d'éléments, ouvertures de failles). Une question clé réside cependant dans notre capacité à comprendre l'origine de ces signaux et de leurs contrastes, notamment physico-chimiques, mais aussi à déterminer jusqu'où ces signatures demeurent pertinentes (par ex. spécimens paléontologiques incomplets, mal préservés ou bien issus de contextes géologiques différents).

Ici aussi, ces thématiques font appels aux questionnements sur les notions cruciales d'échelles spatio-temporelles car ces techniques innovantes peuvent s'appliquer de la nanostructure minérale au bassin sédimentaire, de la cellule à l'écosystème, ces sauts d'échelle compliquant l'interprétation des observations. La caractérisation fine des différentes phases de ces processus réclame aussi des datations précises ainsi que l'estimation fiable de la durée des différents stades/cycles de transformation. L'étude de la continuité des enregistrements à différentes échelles spatio-temporelles est donc aussi à mettre en avant, notamment l'évaluation des hiatus temporels dans ces processus ainsi que la mise en évidence des hétérogénéités locales du signal, par exemple lors d'études nano- ou microstructurelles. Plusieurs sujets particuliers restent aussi très mal compris et nécessitent une évaluation complète tels que les rééquilibrages isotopiques ou les transformations « solide-solide » (sans modification morphologique macroscopique). Les processus post-échantillonnage, se déroulant dans les laboratoires ou dans les collections, sont aussi bien souvent peu pris en compte.



5.2.4. Les approches terrain et collections : une stratégie à affirmer

La multiplicité des thématiques et approches à différentes échelles spatio-temporelles encouragent une stratégie de différenciation de la collecte de données. Ces dernières années ont souvent favorisé des approches globales via des bases de données qui restent souvent incomplètes et biaisées, malgré les progrès et efforts. La richesse des collections paléontologiques, sédimentologiques et pétrographiques françaises demeure une source d'informations encore trop peu exploitée même si notre communauté a commencé à se mobiliser sur ce point ces dernières années lors de la mise en place de certaines Infrastructures de Recherche comme ReColNat ou Regef qui ont permis de démarrer un état des lieux, une identification, numérisation et bancarisation de ces données. Cependant, ces efforts doivent être poursuivis et complétés par de nouveaux échantillonnages de terrain. Plusieurs récentes découvertes majeures et inattendues ont démontré le potentiel toujours important en partie caché sur le territoire national ou à l'étranger. De ce fait, notre communauté doit aussi de nouveau explorer et exploiter ce type d'archive qui participe activement à la valorisation scientifique de notre sous-sol mais aussi de nos disciplines. Cette initiative doit s'accompagner non seulement par des moyens financiers adéquats, mais aussi par une reconnaissance accrue de ces travaux par nos instances, que ce soit dans les évaluations ou bien les appels à projets. Le travail terrain doit redevenir une activité majeure et non plus annexe, ainsi qu'une expertise de premier plan. Malgré un focus sur le sous-sol et patrimoine national, il est aussi indispensable de continuer les missions de terrain à l'étranger dans cette période trouble car ce type d'activité permet de tisser et de garder des liens collaboratifs sur le long terme. Nos connaissances ne s'arrêtant pas aux frontières, ces activités garantissent ainsi une excellente visibilité de notre communauté à l'internationale.

5.3 Verrous scientifiques et techniques

Concernant les questions d'échelles spatio-temporelles, un verrou majeur porte sur la résolution temporelle des études, leur représentativité et la possibilité d'effectuer des comparaisons pertinentes entre différents contextes géologiques. L'obtention d'échelles temporelles de plus en plus précises et permettant des corrélations robustes à la plus grande échelle spatiale possible, ainsi que l'intercalibration d'analyses extrêmement variées, hétérogènes et n'ayant pas la même résolution, est plus que jamais nécessaire. Ce problème est d'autant plus prégnant si nous voulons envisager de comparer des contextes temporels ou mécanismes géologiques différents. Le développement d'échelles intégrées utilisant la biostratigraphie, géochimie, cyclostratigraphie et les datations radiométriques devient toujours plus indispensable. Cette tâche nécessitera une meilleure structuration de la communauté nationale avec un soutien accru du CNRS INSU à cet effort et pour l'ensemble des disciplines concernées, nécessitant peut-être la mise en place d'un groupe spécifique.

La question de la durée des hiatus dans les enregistrements sédimentaires représente aussi un challenge qu'il est nécessaire d'adresser en encourageant le développement de nouvelles techniques pour mesurer plus finement les taux de sédimentations et leur variabilité (e.g. développement de traceur

par $^3\text{HeET}$, approches de datation orbitales...). Les améliorations de méthodes de datations radiogéniques (e.g. U/Pb dans les carbonates, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dans les téphras et laves, ...) et de modèles permettant la calibration astronomique des temps géologiques doivent être mobilisées, développées et croisées avec les autres méthodes. Par exemple, si l'enregistrement sédimentaire marin est relativement continu (hors des surfaces d'érosion), le problème des échelles temporelles se trouve exacerbé dans le cas des faciès continentaux qui présentent souvent de nombreux hiatus et discontinuités. Les propositions de corrélations affinées entre ces deux domaines (Terre et Mer) doivent être encouragées. Un autre verrou majeur concerne la détection de crises plus 'instantanées', locales à régionales, dans les archives sédimentaires. Il peut s'agir par exemple de tsunamis, d'inondations, de séismes, de phénomènes saisonniers, de cyclones ou bien encore de tempêtes dont les critères d'identification demeurent encore imparfaits. A cela s'ajoute la question cruciale de savoir si de tels événements ont bien eu la capacité d'être préservés et si la résolution temporelle des études actuelles permet réellement leur détection. Déterminer également la variabilité des signaux (par exemple, magnitude et fréquence des événements extrêmes) autour de leur état de base doit aussi constituer un nouvel objectif.

Le développement constant et l'amélioration des techniques géochimiques analytiques avec une quantité de plus en plus restreinte de matériel, à partir d'archives variées incluant l'investigation de nouveaux traceurs géochimiques (ex. $\delta^7\text{Li}$, $\delta^{138}\text{Ba}$, isotopes triples de l'oxygène, ...), permettent d'accéder à un nombre croissant de données paléontologiques et paléoenvironnementales mais aussi d'aborder un large spectre de processus impliqués dans le système climatique, dans les processus de surface, ou encore dans les processus métaboliques au sein des organismes. Ces développements ouvrent de nouvelles voies pour explorer les interactions complexes entre altération des continents, paléoproduktivité, précipitations minérales et climat. De plus, ils permettent d'aborder sous un nouvel angle les questions relatives à la physiologie et aux habitudes de vie d'organismes éteints (ex. identification du sexe ratio, de la vitesse de croissance, de la position dans la chaîne trophique, ...). Ces développements passent par l'amélioration des techniques d'analyses, par l'acquisition de nouvelles données dans des contextes climatiques et géodynamiques variés, mais aussi par des expérimentations de culture d'organismes pour calibrer les différents traceurs environnementaux ou tracer les effets vitaux. Enfin, un développement de systèmes expérimentaux pérennes sur du moyen et long terme de fossilisation/minéralisation en milieux contrôlés ou naturels, une voie suivie par de nombreux autres pays, serait souhaitable et fournirait d'excellentes bases de comparaison avec les processus géologiques.

L'intégration des traceurs en développement dans de nouveaux modèles numériques, géochimiques et climatiques combinés, doit également être poursuivie. Cette nouvelle génération de modèle doit permettre une comparaison directe des données des traceurs géochimiques et les sorties de ces modèles pour explorer les effets de seuils et la non-linéarité de la réponse du système climat-géo-biosphère face à différents forçages. Cette approche couplée modèles-données doit être fortement encouragée car elle permet tout particulièrement une évaluation quantitative de l'impact de certains forçages sur différents réservoirs, compartiments et flux impliqués dans l'évolution du système climat-géo-biosphère. Un challenge actuel pour la communauté française des modélisateurs se situe également dans le maintien de versions basse résolution, plus appropriées pour l'exploration des climats anciens. En effet, la tendance actuelle est au développement de modèles avec une résolution spatiale de plus en plus fine pour répondre aux questionnements relatifs à la prédiction des climats futurs. Cela induit une augmentation toujours plus conséquente du temps de calcul, de moins en moins compatible avec la réalisation de simulations longues nécessaires pour l'étude de climats dans des conditions très différentes de la configuration actuelle. Les efforts accrus ces dernières années de dialogue entre modélisateurs et la communauté des collègues produisant ou utilisant des données de terrain sont aussi à poursuivre.

Du côté de la paléontologie et de la sédimentologie, les techniques d'imagerie ont connu des progrès récents spectaculaires (par exemple, CT Scan, Synchrotron, spectrométrie, multispectral, photogrammétrie, LIDAR) et constituent aujourd'hui un levier essentiel pour l'exploration et l'analyse des organismes fossiles ou des archives sédimentaires. Celles-ci ont ainsi considérablement élargi les possibilités d'investigation de structures fragiles ou invisibles à l'œil nu, et ce à différentes échelles spatiales (du nano au macroscopique plein champ). Néanmoins, malgré ces avancées significatives, plusieurs verrous persistent et limitent encore la pleine exploitation de ces outils. Certaines contraintes résident directement dans le matériel géologique étudié et son hétérogénéité complexe (entre échantillons, à l'intérieur d'une ultrastructure, entre préservations et altérations différentes...) ainsi que dans sa rareté et fragilité. De surcroît, la valeur scientifique et patrimoniale de certains échantillons restreint les possibilités d'analyses parfois en partie destructives. Ce type d'enjeux doit être mieux appréhendé en multipliant les explorations et tests à différentes échelles spatiales sur les échantillons.

Par ailleurs, l'accès à certaines infrastructures de pointe, comme les synchrotrons, demeure en partie limité par rapport aux nombres de projets éventuels. Une solution potentielle réside dans un accès groupé de la communauté à ces instruments pour effectuer des phases de tests ou de développements méthodologiques. Les acquisitions effectuées par ces nouvelles techniques d'imagerie génèrent aussi des volumes de données massifs, dont le traitement nécessite des capacités de calculs et stockage considérables. Certaines techniques restent aussi tributaires d'interventions manuelles parfois longues et subjectives. Pour résoudre en partie ces problèmes, le développement d'outils basés par exemple sur l'Intelligence Artificielle et la mise en place d'infrastructures informatiques adaptées constitueront un enjeu considérable.

Au final, la levée d'une partie de ces verrous impliquera le développement d'approches combinées, nécessitant l'amélioration des algorithmes de traitement et la production de données interoperables et visualisables sur des logiciels uniques capables de les interpréter toutes ensemble.

5.4 Liens avec les questions environnementales et sociétales

Les informations issues des questionnements de ce défi participent toutes à caractériser et reconstruire l'évolution des environnements et écosystèmes anciens, du climat et de la géodynamique permettant ainsi d'avancer dans notre compréhension du fonctionnement du système terre et favorisant l'obtention d'un référentiel pour la compréhension de l'évolution future des environnements et écosystèmes face aux changements globaux actuels. Les archives fossiles et sédimentaires éclairent notamment les grandes phases de crises ainsi que les réponses des organismes face à différents stress environnementaux. Elles permettent ainsi d'identifier les éventuels facteurs de vulnérabilité ou de résilience du système à ces perturbations et sont donc utiles pour proposer des scénarios potentiels pour la crise actuelle climatique et de la biodiversité (facteurs causaux et échelles auxquelles ils opèrent ; même si la durée de ces événements n'est pas entièrement comparable), et, par conséquent, anticiper des priorités de conservation de certains organismes ou zones protégées. La plupart des thématiques abordées dans ce défi sous-tendent ces questions urgentes, lesquelles constituent actuellement la priorité absolue pour la plupart des décisions politiques/économiques gouvernementales et pour les politiques de conservation écologique non gouvernementales. Ce dernier thème correspond aussi à certains défis majeurs mis en avant dans le cadre des ODD du CNRS.

5.5 Contexte programmatique

Les projets menés à bien par la communauté impliquée dans ce défi sont essentiellement soutenus par des financements CNRS TELLUS (INTERRVIE & SYSTER) ou MITI, servant souvent de tremplin à l'obtention d'ANR de plus grande ampleur. Sans le soutien de TELLUS une grande partie de la communauté ne pourrait poursuivre ses recherches, cette dernière ne bénéficiant pas actuellement de PEPR dédié. De plus, dans le cadre des appels à projets d'envergure nationaux de type ANR ou internationaux, notre communauté s'inquiète de plus en plus de la disparition de nos mots-clefs, et donc de nos thématiques d'études noyées de façon grandissante dans des problématiques globales, sociétales et/ou appliquées (par exemple : changements globaux, intelligence artificielle). Préserver un espace pour ce type de recherche fondamentale, dont les retombées sociétales ou économiques ne sont pas prévisibles ou immédiatement identifiables, représente pourtant la clé des innovations véritablement disruptives de demain. Pour préserver notre originalité scientifique et capacité d'innovation, nos travaux et trajectoires scientifiques devront ainsi trouver le juste équilibre entre questionnements fondamentaux, orientations nationales et demandes sociétales. Pour peser aussi sur les futures politiques, nos projets devront aussi fédérer et coordonner de larges parts de notre communauté pour la valoriser tout en veillant à éviter que de nombreuses expertises, aujourd'hui en danger, ne disparaissent.

Défi 6. L'Europe : une cible fédératrice et prioritaire pour la communauté Terre Solide (de l'espace à la terre interne)

Composition du groupe de travail : P. Goncalves, M. Grégoire, J. Mercadier, P. Agard, P. Nehlig

Contributeur : A. Paul, S. Guillot

6.1 Nature du défi

L'Europe est aujourd'hui confrontée à des défis sans précédents pour garantir son autonomie stratégique et économique et atteindre la neutralité carbone tout en maintenant sa compétitivité industrielle. Les récentes tensions géopolitiques ont accentué ces défis. La diversité géologique du sous-sol européen est désormais reconnue comme un atout stratégique essentiel pour relever ces défis. Les récents développements politiques européens reflètent cette reconnaissance : la réglementation sur les matières premières minérales critiques (CRM Act) et celle sur les émissions de carbone (Net zero Industry Act) créent des exigences explicites en matière d'expertise géologique fondée sur une meilleure connaissance du sous-sol ; de même, la nouvelle directive sur les sols (en cours d'adoption) reconnaît que ceux-ci sont les fondements de la sécurité alimentaire et de la biodiversité et nécessitent aussi une bonne connaissance de leur substrat géologique.

Le sous-sol est un environnement physique qui s'étend de la zone critique aux profondeurs accessibles de la croûte. Il est au cœur de plusieurs priorités stratégiques simultanées, car il fournit des ressources essentielles telles que l'eau potable, les matières premières et l'énergie. Les systèmes géologiques offrent une capacité cruciale pour l'atténuation du changement climatique et le déploiement des énergies renouvelables et sont le lieu d'implantation d'infrastructures souterraines, principalement en milieu urbain. À mesure que les recours au sous-sol s'accroissent, la concurrence pour cet espace géologique limité s'intensifie. Il en résulte des conflits d'usage et des défis complexes en matière de gestion des ressources et des utilisations, qui dépassent les frontières nationales.

La richesse géologique de l'Europe constitue un atout majeur pour répondre à ces enjeux environnementaux et sociétaux. Ce territoire constitue aussi un lieu emblématique pour la recherche fondamentale en géosciences, avec des découvertes majeures dans le domaine Terre Solide depuis son émergence au début du 19^{ème} siècle. Comprendre le fonctionnement de la Terre Solide, quantifier les processus mis en jeu dans la dynamique de la Terre Solide et ses couplages avec les enveloppes externes de la géosphère et de la biosphère restent au cœur des problématiques de la communauté Terre Solide. L'Europe et sa périphérie, y compris maritime, constituent une cible privilégiée du domaine Terre Solide de l'INSU pour la mise en œuvre des défis scientifiques de la prospective (géodynamique, cycles des éléments, aléas, dynamique des enveloppes externes et interactions avec la biosphère), et des enjeux et défis autour de l'instrumentation, la modélisation et la gestion des données. Ce grand chantier doit commun permettre de revisiter des concepts à l'aune des développements technologiques et méthodologiques, d'approfondir nos connaissances géologiques sur des échelles spatiales et temporelles nouvelles et favoriser l'émergence de concepts transdisciplinaires nouveaux. Au-delà de l'objectif scientifique, ce défi a aussi vocation à contribuer à la structuration de la recherche à l'échelle européenne, en partenariat avec nos homologues académiques européens et les parties prenantes intéressées dont les services géologiques, pour faire émerger une communauté transnationale sur des chantiers européens et des questions scientifiques générales.

La géologie n'a pas de frontières. Notre capacité à établir 1) des réseaux de collaborations scientifiques transnationaux, pour partager des compétences et expertises, 2) des infrastructures de recherches et leurs données, et 3) des méthodologies, permettra de répondre à des questions scientifiques et enjeux environnementaux et sociétaux majeurs.

6.2 Thématiques scientifiques - L'Europe, un environnement riche pour répondre à des enjeux scientifiques et sociétaux critiques

Toutes les thématiques scientifiques du domaine Terre Solide, de l'espace à la terre interne, sont concernées par le défi 6. Ce défi constitue avant tout une cible fédératrice et prioritaire pour le développement de recherches collaboratives nationales et internationales. Véritable palimpseste géologique façonné par diverses orogénèses successives, parfois mal appréhendées et qu'il importe de revisiter à l'aide des concepts et méthodes développés au cours des 50 dernières années sur d'autres cibles géodynamiques, cette mosaïque géographique et temporelle résonne en effet avec celle de l'Europe humaine, et du projet européen. Ce défi a aussi pour vocation à favoriser des approches multidisciplinaires afin de faire de ce territoire un objet d'étude innovant pour répondre à des enjeux scientifiques, sociétaux et environnementaux majeurs.

L'Europe, à l'exception du bouclier baltique d'âge archéen à Paléoproterozoïque, est constituée d'une lithosphère relativement jeune, principalement post-Protérozoïque. Elle est caractérisée par une succession d'événements géologiques majeurs qui ont contribué à son édification et sa structuration et

façonné les paysages actuels. Parmi les plus marquants, on peut citer les orogénèses cadomienne, varisque et alpine, l'ouverture de l'océan Atlantique et les dépôts sédimentaires qui l'accompagnent, le rifting ouest européen, l'activité volcanique localisée mais continue depuis l'Oligocène jusqu'à aujourd'hui, ainsi que les événements climatiques du quaternaire (glaciations et isostasie post-glaciaire) qui ont profondément remodelé les paysages.

L'âge relativement jeune de la lithosphère européenne est une des raisons pour laquelle l'Europe a un historique minier limité, si l'on exclut la révolution industrielle et l'exploitation du charbon, par rapport à des régions essentiellement constituées de terrains Archéens et Paléoprotérozoïque (Afrique, Canada, Australie...) où sont concentrées une très grande majorité des gisements de fortes teneurs et fort tonnage de métaux de base (Fe, Cu, Pb, Zn...). Cependant, les transitions énergétiques, environnementales, numériques et technologiques dans lesquelles l'Europe souhaite s'engager toujours davantage, s'accompagnent d'une évolution des besoins, en particulier en métaux critiques et stratégiques (Li, Co, REE, graphite, V, In...). Cette évolution conduit l'Europe à réévaluer le potentiel minier de son sous-sol à l'aune de l'évolution de ses besoins. Parallèlement, une recherche fondamentale de haut niveau, alliant observation, expérimentation et modélisation, est nécessaire pour mieux comprendre le comportement de ces substances dans la grande diversité d'environnements et processus géologiques rencontrés (interactions fluide / roche, magma/roche sur le territoire européen. Ces travaux, en lien avec le Défi 3, s'appuieront sur les instruments et compétences du réseau géochimique et expérimental français (RéGEF).

Pour appréhender pleinement les systèmes métallogéniques, il est essentiel de replacer les processus minéralisateurs dans un cadre géodynamique global (lien avec le Défi 1) et plus particulièrement celui de l'orogène varisque, riche d'une grande diversité de ressources. Une approche renouvelée de la géodynamique varisque est attendue. Elle devrait dépasser la vision paléogéographique historique, pour se concentrer sur les processus à des échelles spatiales et temporelles aussi larges que possible. Par ailleurs, le caractère polyphasé de la lithosphère européenne impose de considérer le rôle de l'héritage et son influence sur la répartition des ressources. Ces travaux de recherche pourront s'appuyer sur la grande diversité de données (géologiques, géophysiques, géochimiques, forages...) issues des services géologiques nationaux et mises à disposition à l'échelle européenne par l'Association des Services géologiques européens dans le cadre de l'European Geological Data Infrastructure (EGDI). L'intégration des données géophysiques disponibles et de grande qualité permettront notamment une imagerie de la lithosphère avec une résolution de 20-25 km (horizontalement) sur l'essentiel du territoire européen. Répondre aux questions scientifiques spécifiques aux ressources, nécessitera le déploiement de réseaux sismologiques multi-échelles (stations autonomes de type « nodes »).

+ ECRIS, volcanisme et géothermie

L'Europe est exposée à une grande diversité d'aléas géologiques, conséquence directe de sa complexité géodynamique et de la variabilité de ses environnements climatiques. Les recherches menées sur les événements telluriques extrêmes (lien avec le Défi 4), tels que la sismicité et les mouvements de terrains, concentrés principalement sur le pourtour méditerranéen et dans la chaîne alpine doivent être poursuivies afin d'affiner la compréhension des mécanismes de déclenchement et forçage. Il est tout aussi crucial de mieux comprendre les aléas modérés, moins spectaculaires mais pouvant avoir des impacts significatifs sur les populations et les infrastructures. L'origine de la sismicité modérée et/ou profonde en dehors des zones actives, par exemple, interroge sur le rôle de l'héritage tectonique et lithologique. Dans cette perspective, plusieurs pistes de recherche spécifique à l'Europe méritent d'être développées telles que l'analyse multi-échelles et multidisciplinaires des hétérogénéités lithosphériques anciennes (Varisque) et leur rôle sur la localisation de la sismicité diffuse mais occasionnellement importante.

+ Mouvements de terrain

+ Europe et dynamique du système climat-géo-vie : crises et stases (lien avec Défi 5)

6.3 Liens avec les questions environnementales et sociétales

Le Défi Europe s'inscrit pleinement dans les grandes orientations environnementales définies à l'échelle du continent. Les recherches menées dans le domaine Terre Solide sur le territoire européen ont vocation à alimenter directement les politiques publiques en matière de neutralité carbone, d'adaptation au changement climatique, de réduction des risques naturels et de gestion durable des ressources du sous-sol. En concentrant l'effort scientifique sur des terrains proches, la communauté Terre Solide affirme sa volonté de contribuer à une transition écologique cohérente, responsable et exemplaire.

Ce choix traduit en outre l'engagement du CNRS et de ses chercheurs dans une politique de sobriété et de réduction de l'empreinte carbone de ses activités de recherche scientifique. Limiter les

missions de terrains lointaines, privilégier l'usage des infrastructures de recherche locales contribuera à la réduction de l'empreinte carbone de la recherche. L'Europe dispose par ailleurs d'un réseau dense et performant de transport terrestres, qui facilite le recours à des modes de déplacement à plus faible impact environnemental.

L'Europe se caractérise aussi par une diversité géologique remarquable qui a façonné des écosystèmes tout aussi variés et fragiles. En renforçant la connaissance de la dynamique de la Terre Solide à l'échelle européenne, les chercheurs contribuent directement à une meilleure préservation et gestion des milieux naturels et de leur biodiversité.

6.4 Liens avec les questions sociétales

Le recentrage des recherches en sciences de la Terre sur le territoire européen présente des bénéfices directs pour les sociétés européennes.

L'Europe, en tant que territoire, se distingue par une grande diversité de paysages et d'écosystèmes, hérités d'une histoire géologique particulièrement riche, dont témoignent la centaine de Geoparcs labellisés par l'UNESCO. Cette diversité offre un cadre unique pour renforcer le dialogue entre la communauté scientifique, les décideurs et le grand public, notamment de leur faire prendre davantage conscience de la richesse et de l'intérêt du patrimoine géologique européen.

Le tracé de l'orogène varisque, par exemple, offre à l'Europe un fondement autant qu'une sorte de colonne vertébrale et de trait d'union, à l'origine d'un modelé et d'une déclinaison de cultures et de sociétés qu'il pourrait être utile de populariser auprès des citoyennes et citoyens européens : un objectif que les services géologiques européens peuvent reprendre à leur compte et auquel la communauté scientifique doit contribuer.

L'Europe est également un territoire largement et durablement façonné par les activités anthropiques et exposé à de nombreux aléas géologiques (sismiques, volcaniques, gravitaires...), parfois en lien et amplifiés par les changements globaux. Les recherches menées par la communauté Terre Solide contribuent directement à une meilleure anticipation et gestion des risques naturels. En approfondissant la connaissance des dynamiques internes de la Terre et de leurs manifestations en surface, la communauté scientifique participe activement à la réduction de la vulnérabilité des territoires.

La connaissance et la maîtrise des ressources du sous-sol constitue également un atout essentiel pour la transition énergétique et la souveraineté européenne. Les recherches menées dans le domaine Terre Solide, contribueront à réduire la dépendance vis-à-vis de ressources importées, tout en garantissant un haut niveau de responsabilité environnementale et sociale.

Enfin, en développant une recherche coordonnée et ancrée sur le territoire européen, les chercheurs feront de l'Europe un laboratoire naturel d'excellence, au service de la recherche mais aussi de la formation des générations futures et la diffusion d'une culture scientifique partagée avec la société.

6.5 Contexte programmatique

Les recherches menées dans le cadre de ce défi Europe ont pour ambition de contribuer à la construction de l'espace européen de la recherche, en fédérant et en structurant des communautés nationales et internationales. L'objectif est de répondre au besoin urgent d'accroître la connaissance des grands systèmes géologiques européens, qu'ils soient terrestres ou marins, en lien direct avec les défis sociétaux et environnementaux du XXI^{ème} siècle. Pour atteindre cette ambition, plusieurs instruments de financement et infrastructures de recherche pourront être mobilisés et articulés entre eux.

Le programme Horizon Europe offre à travers son pilier « Science d'excellence » et notamment les financements ERC, les Doctoral Networks, et fellowships Marie Curie, un soutien essentiel pour le financement de projets de recherche exploratoires et fondamentaux. Les clusters #5 et #6, consacrés respectivement aux thématiques « Climat, énergie et mobilité » et « Alimentation, bioéconomie, ressources naturelles, agriculture et environnement », qui pourraient mobilisés pour traiter en priorité les enjeux sociétaux et environnementaux liés aux géosciences.

Sur le plan national, l'Agence Nationale de la Recherche, constitue un outil de financement incontournable, en suscitant notamment des projets internationaux bi- ou multilatéraux. Le programme de recherche PEPR sous-sol, bien commun apporte une structuration forte à travers ses projets ciblés, ses futurs appels ouverts et son ouverture européenne et internationale, qui sera renforcée lors du prochain Appel à Manifestation d'Intérêts. Le programme scientifique du Référentiel Géologique de la France s'inscrit également dans cette dynamique, avec son approche par grands chantiers régionaux et ses perspectives transfrontalières, par exemple dans le futur chantier Varisque/Massif Central.

La création de réseaux de collaborations scientifiques trans-nationaux s'appuiera sur les programmes existants tels que le programme Staff exchange d'Horizon Europe et les International Research Networks (IRN) du CNRS. Les Partenariats Hubert Curien, en particulier dans la zone Europe,

facilitent les échanges internationaux et le financement de missions. En les combinant avec les programmes nationaux TelluS-SYSTER et TelluS-Intervie, qui apporteraient les moyens nécessaires au fonctionnement, des réseaux multinationaux pourront être structurés. Les alliances européennes d'université constituent aussi des outils importants pour la création de réseaux.

Ce défi s'appuiera sur un ensemble d'infrastructures et de réseaux déjà solidement établis. Les Services géologiques nationaux, associés à leur réseau européen des Services géologiques nationaux et régionaux : EuroGeoSurveys, constituent un maillage institutionnel stratégique.

Les grandes infrastructures de recherche scientifiques européennes, telles que l'European Plate Observing System (EPOS), l'European Multidisciplinary Seafloor and Water-column Observatory (EMSO), l'Integrated Carbon Observation System (ICOS) offrent des outils d'observations pérennes. A l'échelle nationale, les projets de recherche pourront s'appuyer sur l'expertise et les outils analytiques du Réseau Géochimique et Expérimental Français (RéGEF), et les Service Nationaux d'Observation (SNO) des Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU).

Défi 7. Enjeux et défis autour de l'instrumentation, des modèles et de la gestion/exploitation des données et échantillons

Composition du groupe de travail : CS-TS : Yann Capdeville, Emmanuel Chaljub, Aude Chambodut, Alexandre Fournier, Hélène Hébert, Raphaël Pik, Andrea Walpersdorf

Autres rédacteurs : Raphaël Grandin, Erwan Pathier, Claudio Satriano, Christophe Scheffer

7.1 Nature du défi

En parallèle des grands axes thématiques du domaine Terre Solide (TS), ce chapitre aborde une réflexion sur les moyens qui nous permettent de quantifier la dynamique de la planète et les différents processus qui l'affectent. Il fait le point sur les avancées et les enjeux autour de l'instrumentation, la modélisation et la gestion des données qui sont produites, en positionnant ces réflexions dans le contexte actuel où les Infrastructures de Recherche afférentes organisent et pilotent ces moyens en amont des observations et projets de recherche individuels (PEPR, ANR, TELLUS, etc ...).

Les Infrastructures de recherche d'Observation (Epos-France, EMSO, OZCAR, ILICO), d'Équipements transversaux (RéGEF, ECORD, ...) et la E-infrastructure (Data Terra et son pôle FormaTerre pour la TS) constituent au niveau national un véritable continuum indispensable à la conduite de la recherche en Terre Solide et au développement des relations transversales pour optimiser son fonctionnement.

7.1.1. La quantification des processus par les mesures de géochimie-minéralogie, géochronologie, expérimentation, et physique des roches, est à la base d'un pan essentiel de la description et de notre compréhension du système Terre. Ces mesures sont mises en œuvre majoritairement sur des échantillons en laboratoire à l'aide d'instruments et de protocoles non compatibles avec un déploiement sur le terrain. Depuis des dizaines d'années ces instruments de laboratoire ont connu un développement et des optimisations remarquables, passant d'instruments pionniers peu nombreux dans les années 70-80 à un parc analytique actuel extrêmement développé et distribué sur le territoire dans les OSU et les UMR. Ce parc permet une production de données de plus en plus importante en soutien à la recherche et à l'observation. Le paysage de cette instrumentation s'est graduellement organisé autour d'infrastructures de recherche locales, à l'échelle des sites et des OSU (i.e. Panoply, Pari, ANATELO, ...), et nationales, comme les très grands instruments que sont les synchrotrons (i.e. SOLEIL et les lignes FAME & FAME-UHD), ou comme l'infrastructure distribuée RéGEF, qui regroupe maintenant la quasi-totalité des instruments de géochimie-minéralogie-expérimentation du périmètre de l'INSU (et d'autres instituts CNRS).

Ces différents types d'**infrastructures** sont **indispensables** à un développement cohérent et à une utilisation optimisée de l'instrumentation analytique et expérimentale. La stabilisation de leur périmètre et de leurs interactions avec les OSU et UMR représente un enjeu fondamental des prochaines années. Ceci passera notamment par la montée en puissance de l'action stratégique de l'infrastructure RéGEF, via son Comité de Pilotage inter-organismes et ses relais sur les sites. Un enjeu fort à court terme pour RéGEF sera d'accompagner et d'assurer la cohérence des futurs CPER ou d'autres plans majeurs potentiels d'investissement (type Equipex +). L'action intégrante et transversale régionale/nationale de l'infrastructure est aussi fortement attendue en appui des sites et des tutelles pour aider à la mise à dispositions des moyens et notamment des ressources humaines. Plus généralement, l'objectif pour RéGEF sera d'asseoir une cohérence de maintien/jouissance des équipements et des besoins RH associés, de partage et harmonisation des pratiques, ainsi que la mise à disposition d'une offre claire et optimisée vis-à-vis de l'accessibilité des instruments et services. Dans ce nouveau paysage les Instruments Nationaux de l'INSU (20% des moyens analytiques du parc de l'IR) gardent leur place et leur importance, en proposant un accès à des moyens analytiques et expérimentaux rares (et souvent onéreux) mis en œuvre autour d'infrastructures exceptionnelles, dans le cadre d'un service national. L'ouverture du parc d'instruments de RéGEF et son accessibilité sont des points importants de son statut d'Infrastructure de Recherche nationale, qui seront renforcés dans le futur par une mission de service national confiée à chacun des 12 réseaux internes.

Un tel fonctionnement stratégique optimisé de l'IR RéGEF pourrait permettre aussi de réduire **l'impact carbone du parc** et de l'activité de recherche associée. Actuellement, ~ 50 % du parc analytique et expérimental a plus de 10 ans, et ~30 % plus de 15 ans. L'ensemble de la communauté est sensible à la nécessité de prendre en compte dans la prospective instrumentale de RéGEF lancée en 2024 la question d'éco-responsabilité et de travailler sur un équilibre entre le maintien de nos équipements, l'exploitation optimale de nos données et le développement raisonné de nouvelles méthodes et technologies. Au-delà de l'optimisation des achats de nouveaux instruments, il existe aussi un défi pour augmenter la longévité du parc en améliorant la maintenance et la « réparabilité » des équipements. Pour ceci, il sera nécessaire de discuter et de trouver des compromis avec les industriels

pour la mise en place et le coût des contrats de maintenance. De forts enjeux existent aussi autour du maintien de compétences techniques sur les sites capables d'intervenir en mécanique, électronique ou encore en informatique, l'obsolescence des logiciels d'exploitation étant un des problèmes criants qui bride la longévité des instruments.

Le financement de telles jouvences et mises à niveau du parc existant représente un enjeu majeur et un défi. Il est paradoxalement aujourd'hui plus difficile de trouver des financements pour des opérations de maintenance que pour l'achat d'équipements nouveaux. Pour accompagner ceci il va être nécessaire de **clarifier les guichets de financement** et les interactions entre les différents acteurs, notamment la place et le rôle de l'IR RéGEF dans l'écosystème. Il existe un enjeu complémentaire très fort sur **le niveau de financement de l'infrastructure RéGEF**, qui idéalement devra être significativement plus élevé pour permettre de mener à bien une mission stratégique efficace à l'échelle de toute la communauté. La question du renouvellement des très gros équipements (> 2 M€, SIMS, Nano-SIMS, AMS, MET, ...) représente aussi un défi de taille dans le contexte budgétaire actuel et devra être réfléchi entre tous les acteurs au sein de l'infrastructure.

Le fonctionnement intrinsèque des plateformes analytiques et expérimentales est aussi en forte mutation, dans un paysage où **la mise à disposition de moyens RH** pérennes est de plus en plus limitée au profit de soutiens temporaires CDD. Cette évolution est inquiétante pour le maintien de l'expérience au sein des plateformes. Elle implique par ailleurs un modèle économique adapté capable de capitaliser les fonds nécessaires, qui n'est pas toujours en adéquation avec la politique des unités hébergeantes et de leurs tutelles. Une réflexion majeure devra certainement être mise en place autour de ces problématiques pour permettre de faciliter et harmoniser le fonctionnement des plateformes analytiques et expérimentales dans le futur.

Au-delà du maintien de la production de routine d'un grand nombre de données, **l'instrumentation nationale va devoir relever des enjeux technologiques majeurs** dans les années à venir. L'amélioration de la résolution et de la précision des mesures reste un enjeu de premier ordre pour faire avancer notre connaissance et permettre de mieux comprendre les processus en investiguant plus finement les compositions élémentaires et isotopiques des matrices minérales et organiques. Pour ceci les investissements futurs se tourneront vers les nouvelles générations commerciales d'instruments (Cellules de collision, MS-MS, QToF, TIMS-ToF, Orbitrap, ...) et leur couplage avec des systèmes d'extraction/conditionnement performants (laser, cryo, ...). Les progrès constants en imagerie de nos instruments représentent une autre voie prometteuse d'investigation pour mieux appréhender les processus. En parallèle de la mise en œuvre de ces nouvelles possibilités d'imagerie sur les différents types d'instruments, un défi de taille à relever concerne la fusion de toutes ces données et documentations spatiales pour pouvoir disposer d'une information corrélative combinée complète et puissante (par exemple. EPMA-RAMAN-FTIR-EBSD, ou MEB-FIB/TOF-SIMS). Des questionnements fondamentaux sur les hétérogénéités et les équilibres pourront être abordés par de telles avancées technologiques.

D'autres **voies plus exploratoires** pourront aussi être envisagées autour des potentialités très fortes de nouvelles méthodes analytiques comme celle basée sur les principes de la spectroscopie avec confinement laser (Atom Trap Trace Analysis, ATTA), ou la nouvelle génération d'instruments de spectroscopie laser infrarouge (CRDS/IRIS). La **conception et le développement** ou co-développement avec des industriels (i.e. Thermo, Cameca) de nouveaux types d'instruments représente aussi une voie de progression technologique adaptée à nos besoins et questionnements scientifiques, et devra être encouragée en lien avec les structures adaptées de **l'écosystème institutionnel (CSIIT, MITI)**. La miniaturisation des instruments est un aspect particulier de ces enjeux technologiques qui permet à l'investigation géochimique de « quitter » le laboratoire pour être déployée sur le terrain et ainsi pouvoir mesurer en continu certain signaux importants pour l'observation et la surveillance des milieux (i.e. environnements sensibles, volcans, zones sismiques, ...). Ce champ prometteur possède une très forte marge de progression à court et moyen terme et méritera d'être plus organisé au niveau national dans le futur en croisant les besoins et expériences des différentes communautés scientifiques (nouveau réseau de RéGEF ?). Dans ce contexte de développements instrumentaux spécifiques, un des verrous et défis majeurs concerne l'augmentation de la taille des charges expérimentales pour pouvoir mieux les documenter (i.e. éléments en faibles concentrations, compositions isotopiques) et pour qu'elles soient plus représentatives. Le couplage des manipes expérimentales à haute température et pression élevée avec une documentation fine in-situ et in-operando reste un des défis majeurs à relever pour mieux documenter les processus magmatiques et pétrologiques et pouvoir aborder de nouvelles thématiques de recherche (i.e. vitesses d'ondes sismiques).

Le traitement des données complexes fournies par les différentes méthodes de spectroscopie/chromatographie, ou les volumes de données importants générés par les sources de

rayons X modernes nécessiteront de développer de nouveaux outils et méthodologies pour les analyser, notamment en utilisant les potentialités de codes basés sur l'intelligence artificielle en collaboration avec les groupes experts nationaux (i.e. RT NuTS).

Il existe des enjeux et défis importants sur la gestion intégrée des données dites de « longue traîne » mesurées sur les échantillons et produites par RéGEF dans des domaines scientifiques extrêmement variés. Plusieurs initiatives mises en œuvre dans le cadre du Groupe de Travail « échantillons et données » (missionné par l'INSU en 2023) vont permettre des avancées significatives à court et moyen terme avec : (i) la mise en place d'un cadre qualité commun pour les données produites au sein de chacun des 12 réseaux de RéGEF, (ii) la déclaration systématique et documentée (i.e. IGSN) des échantillons et de leurs métadonnées, (iii) la gestion des échantillons dans des collections physiques sur les différents sites (OSU et autres) dans le cadre d'une géothèque virtuelle nationale commune. Des réflexions restent cependant encore à mener au sein du GT, en lien étroit avec l'IR DataTerra, pour déterminer une stratégie nationale globale d'archivage de ces données, avec notamment la question de l'opportunité d'un entreposage commun et d'un CDOS dédié, pour favoriser l'accès par la communauté scientifique INSU aux données et échantillons multi-documentés, dans un souci de Sciences Ouvertes et d'optimisation de l'information scientifique, ainsi que dans un souci de modération du cout carbone de notre recherche.

7.1.2. La mesure de la dynamique terrestre, à travers la géophysique, la géodésie et les approches spatiales satellitaires, est essentielle pour sonder les mouvements incessants de notre planète, des échelles les plus fines de surface aux dynamiques globales profondes.

La densification spatio-temporelle des mesures pour capter les phénomènes géophysiques avec plus de précision à toutes les échelles se révèle un enjeu important. Des réseaux locaux densifiés, comme les "nodes" et les capteurs à bas coût, sont déployés pour combler les lacunes entre la précision sur le très long terme *des mesures in-situ* ponctuelles et la couverture globale, mais sur de courtes fenêtres temporelles, *des observations satellitaires*. Ces outils révèlent des dynamiques inédites ou encore inexplorées en affinant notre vision des processus terrestres à toutes les échelles.

Les données satellitaires ont montré leur complémentarité par rapport aux données in-situ, notamment en termes de résolution spatiale, temporelle ou de couverture géographique. L'essor des missions satellitaires d'observation de la Terre (imagerie radar et optique, gravimétrie, magnétisme) et la politique de libre accès des agences ont conduit à une large augmentation dans le volume des données, tout particulièrement en imagerie, ce qui représente un défi majeur mais aussi une opportunité, par exemple (mais pas uniquement) pour le développement de méthodologies innovantes basées sur les techniques d'Intelligence Artificielle. Si l'intégration des données des nouvelles missions est fondamentale, des retraitements homogènes, revisités par de nouvelles méthodes d'analyse, de données d'archives d'anciennes missions ne doivent pas être négligés, d'autant que l'expertise sur certaines données anciennes peut se perdre rapidement. L'augmentation de la diversité des instruments d'observation de la Terre par satellite sur des périodes de temps communes offre des perspectives d'améliorations significatives de notre compréhension des processus géophysiques et de notre capacité à séparer leurs contributions respectives. La fusion d'information de série temporelles de données issues de différents capteurs satellitaires est un axe de recherche important dans les années à venir sur lequel l'IA a un gros potentiel. La modélisation multi-physique permettant de relier des observables complémentaires doit aussi être encouragée, et requiert des collaborations rapprochées entre modélisateurs et experts de la donnée. L'exploitation de ce potentiel repose sur trois piliers : l'accès aux données, la capacité de traitement, de visualisation et d'analyse de ces données volumineuses, et la standardisation et la FAIRisation des produits. Concernant l'accès aux données, tous les acteurs du spatial ne sont pas sur un modèle de libre accès aux données. L'émergence rapide d'acteurs commerciaux, le lancement de missions satellitaires sur un modèle dual (civil et militaire) et la politique d'accès restrictives de certaines agences spatiales, vont nécessiter un travail coordonné au niveau national, européen, et international, pour avoir plus de poids pour obtenir un accès large répondant aux besoins des scientifiques. Ces dernières années, la structuration nationale autour de l'utilisation des images satellite pour l'observation de la Terre s'est faite par l'IR Data Terra. Pour la communauté Terre Solide, en ce qui concerne la mesure de la déformation du sol, cette structuration s'est faite conjointement avec la création en 2021 du Service National d'Observation ISDeform et au niveau européen avec l'implication dans EPOS. L'ensemble de ces actions a permis l'automatisation des chaînes de traitements et leur déploiement sur des infrastructures de calcul de type mésocentre, sous forme de services à la communauté opérés au niveau national par FormaTerre et le CNES, ainsi que la standardisation des données/produits sur le principe FAIR. Ces dernières années, la structuration nationale autour de l'utilisation des images satellite pour l'observation de la Terre s'est faite par l'IR Data Terra. Pour la communauté Terre Solide, en ce qui concerne la mesure de la déformation du sol, cette

structuration s'est faite conjointement avec la création en 2021 du Service National d'Observation ISDeform et au niveau européen avec l'implication dans EPOS. L'ensemble de ces actions a permis une meilleure mutualisation des chaînes de traitement, le développement de services de calcul basés sur des chaînes de traitement expertes opérés au niveau national par FormaTerre et le CNES, ainsi que la standardisation des données/produits sur le principe FAIR. Un défi sera de poursuivre ces efforts en veillant à l'interopérabilité entre les données satellitaires, les données aéroportées (avion, drones, ballons, ...) et les données in-situ issues des réseaux instrumentaux. Ce travail devra se faire à l'interface entre l'IR d'observation Epos-France et l'e IR FormaTerre (composante TS de DataTerra).

Une opportunité notable réside dans la recherche basée sur la **fibre optique**, où la France est actuellement en première ligne au niveau européen. En particulier, la technique du Distributed Acoustic Sensing (DAS) qui mesure la déformation dynamique, entre sismologie et géodésie, progresse très rapidement. La structuration de la communauté française utilisatrice de cette technique, à terre comme en mer, est primordiale pour avancer efficacement et garder une position de leader au niveau international. Un cadre exceptionnel pour faire évoluer les techniques de mesure et d'analyse de données optiques est fourni par le PIA3+ Marmor. Premièrement, des instruments optiques (inclinomètres, sismomètres, extensomètres, pressiomètres) robustes sont développés pour un déploiement en bout de fibre, adapté aux environnements les plus hostiles. Deuxièmement, un câble permanent marin entre Monaco et Savonne est instrumenté avec un DAS (la première installation permanente DAS en France) pour l'enregistrement continu des déformations dynamiques tout le long de cette fibre. Un câble optique va également être déployé à Mayotte pour un suivi continu et temps réel de l'activité tellurique en lien avec la naissance du nouveau volcan Fani Maoré.

Des progrès en **géodésie de fond de mer** (GNSS-acoustique mono-balise, capteurs de pression non-dérivants, ...) permettront de combler la quasi-absence de mesures géodésiques en mer et de lever ce verrou concernant l'étude des aléas telluriques et des ressources. Les **développements en gravimétrie**, eux, seront notamment focalisés sur la technologie quantique, les mesures embarquées et les gradiomètres, au travers des collaborations entre des scientifiques et des partenaires privés français performants qui assureront que ces avancées technologiques bénéficieront aussi à la société française. Ainsi, la France est porteuse du projet EQUIP-G, soumis en réponse à l'appel à projets Horizon Europe « Developing and deploying a network of quantum gravimeters in Europe », et qui a été sélectionné pour financement. Il constitue la première étape de la mise en place du segment terrestre de l'infrastructure paneuropéenne de gravimétrie quantique, qui s'articulera autour d'une installation d'instrumentation partagée.

Une contribution particulière de **l'infrastructure d'observation Epos-France** sont ses parcs d'instruments nationaux à disposition de la communauté scientifique. Ils couvrent actuellement la sismologie, la géodésie GNSS, la gravimétrie et la sismologie de fond de mer. L'IR continuera à favoriser la **mutualisation d'instruments**. Pour assurer l'approche multidisciplinaire et pour fournir à la communauté des instruments qui correspondent à la pointe de la technologie, de nouveaux parcs mutualisés seront à créer (e.g. drones, DAS, magnéto-tellurique, géodésie fond de mer...). La construction et l'évolution de ces parcs doivent également pouvoir répondre aux enjeux sociétaux qui demandent un déploiement opérationnel d'instruments multiples en cas de crise.

L'**instrumentation multidisciplinaire** est un défi crucial. Elle permet, grâce aux différentes sensibilités des instruments, d'augmenter la résolution de nos mesures par la séparation des sources (internes, externes), et de contraindre des signaux de faible amplitude par le croisement des données indépendantes. Des outils utilisables aux interfaces disciplinaires pour des applications transversales (TS/OA, TS/AA, TS/SIC) sont développés pour briser les silos entre les domaines, permettant ainsi d'aborder la complexité des systèmes terrestres sous de nouveaux angles et de générer des avancées inédites grâce à la synergie des compétences et des méthodes.

L'**augmentation spectaculaire des volumes de données**, générées par l'imagerie satellitaire ou par les nouveaux capteurs innovants, est un défi logistique pour les données, leurs gestions et traitements. Ainsi, en complément du déploiement de capteurs sismologiques compactes large-N, la fibre optique et le DAS (*Distributed Acoustic Sensing*) transforment l'acquisition de données sismiques. Les drones permettent des levés haute résolution. La technologie à atomes froids permet de développer des gravimètres embarqués (bateau, avion, ballon) qui généreront des mesures de gravité de volume conséquent.

Un enjeu majeur dans la recherche en sciences de la Terre est d'**explorer efficacement ces grandes masses de données** qui sont un atout pour une meilleure compréhension de la complexité de la Terre. Ces grands volumes de données, résultant de densités spatiales (y compris par satellite) et/ou temporelles, ou encore de très longues séries temporelles acquises par un grand nombre d'instruments classiques, contiennent des informations encore non-exploitées pour la connaissance de la Terre. L'intelligence artificielle et d'autres outils de fouille de données seront essentiels pour identifier

des phénomènes transitoires de très faible amplitude et pour en découvrir de nouveaux types. La recherche française est internationalement reconnue pour ses développements en fouille de données, et l'IR d'observation Epos-France a l'ambition de continuer à fournir des données en appui à ces recherches.

L'évolution majeure de l'IR Epos-France dans les années à venir est l'élargissement de ses contours disciplinaires. Au démarrage du Consortium Epos-France en 2023, seules les Actions Spécifiques et Transverses en sismologie, géodésie GNSS et gravimétrie faisaient partie des activités de l'IR. Aujourd'hui, l'ensemble des activités françaises contribuant à l'ERIC EPOS a vocation à intégrer l'IR Epos-France sous forme d'Actions Spécifiques et Transverses, groupées en thématiques scientifiques en cohérence avec les TCS d'EPOS auxquels elles contribuent, et selon un processus et des critères d'intégration définis par le Comité Directeur du Consortium Epos-France. À l'image de la science actuelle très pluridisciplinaire, Epos-France soutient et promeut le décloisonnement disciplinaire par la création d'actions multidisciplinaires. L'élargissement thématique d'Epos-France, en cohérence avec le contour disciplinaire d'EPOS, est le projet scientifique et structurel majeur à mener dès le démarrage d'Epos-France. Un des objectifs importants concerne la maintenance/jouissance des réseaux et parcs, afin d'éviter de redevenir aveugle à la sismicité modérée française, et le développement de nouvelle instrumentation. Un enjeu important est la pérennité et l'évolution de l'ERIC EPOS avec qui Epos-France est fortement liée, la gestion des grandes masses de données et le développement de services interdisciplinaires en collaboration avec Data Terra. Les missions et les perspectives de l'IR d'observation sont indissociables des ressources humaines à notre disposition et qui font cruellement défaut dans l'ensemble des UARs et UMRs contributrices à Epos-France.

7.1.3. La modélisation, analogique ou numérique, est au cœur de la compréhension des processus terrestres. Alors que la communauté scientifique en TS a déjà amorcé une structuration de ses outils numériques via la labellisation de codes et la création du Réseau thématique NuTS (Numérique en Terre Solide), l'objectif est désormais d'aller plus loin. Une véritable mutualisation des efforts et des ressources est nécessaire pour développer des outils d'envergure internationale, mais plusieurs obstacles financiers, techniques et méthodologiques persistent dans un contexte de volonté croissante d'utilisation responsable et raisonnée des ressources numériques.

L'intégration de **l'intelligence artificielle (IA)** dans la recherche suscite des avis partagés. Si elle offre des avantages clairs, comme l'accélération des calculs, l'exploration de paramètres et l'amélioration de la gestion des grandes bases de données (notamment en modélisation atomistique et en géophysique), son rôle est perçu différemment selon les domaines. Dans des contextes où les données sont rares ou les processus excessivement complexes, l'IA est davantage vue comme un complément aux méthodes traditionnelles. Quand les données sont abondantes, l'IA permet des progrès très importants et rapides. Par ailleurs, des questions se posent quant à sa compatibilité avec une utilisation éco-responsable des ressources, un point de vigilance pour la communauté. Bien que des consolidations soient à prévoir, comme ailleurs, l'IA est là pour rester et devient un outil majeur de la recherche en TS,

Les avancées en modélisation multi-échelles pour les systèmes complexes ont été significatives, notamment grâce aux technologies comme les GPU. Cependant, le manque de financement pour le portage de codes sur ces architectures limite leur adoption généralisée. Bien que la modélisation géophysique en bénéficie déjà, leur intégration reste embryonnaire dans d'autres disciplines nécessitant des approches multi-physiques. Ce frein est exacerbé par le manque de moyens humains et financiers, ainsi que par la diversité méthodologique et thématique de la communauté. L'arrivée des calculateurs Exascale génère un intérêt mitigé en raison des défis techniques liés à l'adaptation des codes existants aux architectures multi-GPU.

La gestion et le stockage des données de modélisations analogique et/ou numérique représentent un défi majeur. Les solutions actuelles (centres de calcul, disques durs) sont souvent temporaires et ne garantissent ni la pérennisation ni l'accessibilité requises. La communauté modélisatrice exprime un fort besoin pour l'établissement de règles claires pour la gestion et la valorisation de ses données selon les principes FAIR.

Recommandations : La structuration des actions autour du numérique doit continuer ; à ce titre, il faut accroître l'intérêt pour les collègues développeurs d'entrer dans un processus de labellisation des codes communautaires TS. Des financements doivent suivre pour être efficaces. L'AAP d'amorçage SUN va dans le bon sens. Il faut maintenant des AAP récurrents avec des fonds importants sur le modèle de l'AAP Quadrant de l'INRIA pour que la communauté ait la capacité d'être compétitive. Cela concerne à la fois l'IA et les méthodes classiques, pour être à même de tirer parti des futures architectures exascales.

7.1.4. La gestion, le traitement et l'analyse combinée des données d'observation, des sorties de modèles ou de plateformes analytiques est indispensable pour transformer l'afflux massif d'informations en avancées scientifiques majeures. La communauté Terre Solide produit aujourd'hui une grande quantité et diversité de données issues de réseaux denses de capteurs à bas coût ou d'instrumentation innovante (sismologie large-N, mesures drones, mesures DAS sur fibre optique), d'imagerie satellitaire à haute résolution, d'instruments analytiques en laboratoire ou encore de campagnes de terrain multi-sources.

Ces données sont générées par une pluralité de producteurs allant des projets scientifiques aux infrastructures de recherche d'observation et d'équipements transversaux. Cette diversité de contextes et de formats pose des défis nouveaux pour leur gestion FAIR, leur partage et leur valorisation et nécessite des moyens humains non négligeables.

C'est le cas des données dites de « longue traîne », parfois fragmentées et insuffisamment documentées, mais qui présentent un potentiel de réutilisation scientifique considérable. Leur gestion intégrée – via des référentiels communs, une description normalisée technique et sémantique, et des infrastructures de conservation pérennes – est indispensable pour qu'elles puissent être découvertes, réutilisées et croisées avec d'autres sources. Cela passe par la mise en place de métadonnées normalisées et enrichies, y compris de métadonnées sémantiques permettant la découverte a posteriori. La recherche a en effet de plus en plus besoin de croiser des données multi-disciplinaires et de différents compartiments du système Terre (océan, atmosphère, surfaces continentales), ce qui suppose de décrire non seulement les données elles-mêmes mais aussi l'information scientifique qu'elles portent et les outils pour les exploiter.

Les infrastructures de recherche numériques doivent être capables de s'adapter à cette production diverse et distribuée des données et elles doivent proposer des services intégrés de découverte, d'accès, de visualisation, de traitement et d'analyse de données multi-sources. Les services de traitement et d'analyse doivent être capables d'exploiter des moyens de calcul en mode cloud, c'est-à-dire en masquant la complexité d'accès aux ressources aux utilisateurs. Ils doivent également s'appuyer sur les développements logiciels de la communauté TS et les encourager. Les environnements virtuels de recherche, comme les notebooks interactifs, en sont un exemple concret : ils permettent de combiner l'accès aux données, l'exécution de codes communautaires et le partage de workflows reproductibles.

Un enjeu particulier concerne la préparation des données pour l'analyse par intelligence artificielle : alignement de bases hétérogènes, enrichissement par de nouvelles caractéristiques, contrôle qualité systématique. Ces étapes, indispensables à l'efficacité et à la robustesse des méthodes d'IA, nécessitent elles-mêmes des environnements de calcul spécialisés, notamment l'accès à des architectures GPU et à des bibliothèques logicielles dédiées.

Au niveau national, le projet Equipex+ GAIA Data (2021-2028) joue un rôle clé en construisant avec l'ensemble des organismes de recherche un environnement intégré de services aux données déployés sur une infrastructure distribuée de stockage et calcul. Il constitue un cadre structurant pour fédérer les efforts de la communauté, en particulier TS, en connectant les infrastructures productrices de données à des plateformes où l'accès, l'analyse et la valorisation des données – qu'elles soient massives ou de longue traîne – sont pensés de manière intégrée, interopérable et pérenne. La coordination du développement et de l'opération de ces services aux niveaux européen et international est particulièrement importante pour prolonger la dynamique de construction d'un environnement ouvert de partage et d'analyse des données, dans laquelle la communauté TS est engagée de longue date.

Dans ce paysage, le rôle de FormaTerre est de développer et de construire, avec les producteurs de données, les chemins d'accès aux données et produits issus des services d'observations, et de développer des services de haut niveau (découverte, visualisation, traitement, analyse) nécessitant une interopérabilité entre des données de formats/origines diverses, en respectant les principes FAIR. Le cœur de la collaboration entre les différentes IRs repose sur la construction et le pilotage des CDOS (Centres de Données d'Observation et de Services), dont le rôle est d'implémenter l'interopérabilité des données et d'opérer les services aux données pour les besoins de thématiques et d'enjeux scientifiques du domaine TS. Une attention particulière est portée à la simplification des parcours utilisateurs, à une gouvernance légère et cohérente entre Infrastructures de recherches, et à la réduction des redondances organisationnelles.