

Prospective Terre Solide

Proposition de plan définie en réunion de la CSTS 2-3 Avril 2024 à Sète

1. Préambule (1 page) :

Objectifs, méthode de réalisation, publics visés (document programmatique, mais aussi source d'information pour la communauté)

2. Définition : C'est quoi (la recherche en) Terre Solide? (1 page)

3. Etat des lieux (<10 pages = on s'en occupera après les défis):

3.1 Contexte scientifique

3.2 Contexte organisationnel

3.3 Contexte sociétal

A présenter sous forme d'infographies

- Données RH
- Paysage de la recherche TS en France (cartes)
- Programmes INSU & autres sources de financement
- Infrastructures de recherche
- Partenariats
- Formation

4. Défis

3-5 pages par défi. Afin de garder une certaine homogénéité dans le document, la présentation de chaque défi devra suivre autant que possible la structure suivante (ordre à discuter): Nature du défi (continuité, disruptif); Thématiques scientifiques; Verrous scientifiques et techniques; Lien avec les questions environnementales; Lien avec les questions de société; Contexte programmatique

4.1. La géodynamique au défi de la complexité

La compréhension de la dynamique interne de la Terre et des planètes, qui est au cœur de la recherche en Terre Solide, reste un défi majeur en géosciences, bien que plus de 50 ans ce soient écoulés depuis l'adoption de la tectonique des plaques en tant que paradigme structurant des Sciences de la Terre . Les principaux obstacles résident dans la complexité des processus physico-chimiques, qui s'étendent sur plus de 15 ordres de grandeur, aussi bien pour les échelles spatiales que temporelles, cad. de l'angstrom au millier de km (ou plus) et de la seconde au milliard d'années, avec des rétroactions complexes entre processus physiques et chimiques ayant lieu à différentes échelles spatiales et temporelles.

Pour progresser, il est crucial de se concentrer sur la caractérisation et la modélisation de ces rétroactions et sur une meilleure compréhension des processus hors-équilibre et transitoires. Les développements technologiques, aussi bien dans l'acquisition de données que dans les capacités de calcul, ouvriront certainement des nouvelles portes et lèveront des verrous fondamentaux. Toutefois, un changement dans notre façon d'aborder les questions géodynamiques est essentiel. Cet effort se traduira, en particulier, par de nouvelles approches de modélisation, notamment en quittant la 'zone de confort' de la simulation d'états stationnaires et en développant des approches permettant la prise en compte explicite des rétroactions entre échelles et/ou processus physico-chimiques et les phénomènes transitoires associés. Ces développements seront certainement menés en parallèle sur des questions « géodynamiques » aussi variées que le transport réactif dans les systèmes géologiques, la localisation de la déformation, l'évolution des corps planétaires depuis leur formation à nos jours, ou les interactions actuelles et passées entre dynamique interne et processus de surface, aussi bien sur Terre que d'autres planètes. La mise en commun de ces acquis sera donc un levier fondamental pour une avancée significative pour l'ensemble de la communauté. De plus, la masse de nouvelles connaissances

attendues dans les prochaines années sur d'autres planètes offrira des opportunités de généraliser et d'étendre nos connaissances sur la dynamique interne de notre planète.

4.2. Diversité dynamique des (exo)planètes

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 planétésimaux puis des corps planétaires avec leur structuration interne et externe. Sur Terre, le développement précoce d'un champ magnétique et, peut-être, la tectonique de plaques ont pu permettre le développement de la vie. Si la structure actuelle de la Terre est désormais bien connue grâce aux études géophysiques, son évolution reste toutefois débattue. Les interactions entre réservoirs à différentes échelles de temps et d'espace restent mal contraintes, tout comme les cycles des éléments et les propriétés de transport des matériaux qui les gouvernent. Or, ces cycles lient la dynamique interne à celle des surfaces planétaires, rendant la communauté TS un acteur clef dans la définition du concept d'habitabilité.

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 physique des matériaux, l'analyse minéralogique et géochimique des échantillons naturels, les modélisations numérique et analogique 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. Ces axes de recherche s'ouvrent vers les autres domaines de l'INSU et d'autres instituts (INC, INP, IN2P3, INSIS) du CNRS.

L'observation et l'étude des autres corps du système solaire viendront enrichir nos connaissances dans ce domaine. Des nombreux programmes d'exploration spatiale sont en cours et programmés (Mars 2020, BepiColombo, Artemis, Chang'E, VERITAS, EnVision, etc) et la forte dynamique internationale pour ramener des échantillons extra-terrestres ouvre des perspectives inouïes. Les grandes avancées des équipes françaises sur la dynamique des océans magmatiques, 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.

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

Les processus géodynamiques et les phénomènes géologiques associés à toutes les échelles sont de puissants facteurs de transfert d'éléments chimiques et chaleur entre l'intérieur de la Terre et ses enveloppes externes. Opérant sur des centaines de millions d'années, ces transferts ont façonné notre planète, contribuant à la formation et la diversité géologique des continents, des océans, et leurs diverses ressources. Des activités humaines ambitionnent d'exploiter, voire de domestiquer certains aspects des transferts telluriques impliquant le sous-sol et les fonds marins. Ceci passera par une vision unifiée du temps long de la Terre solide et du temps court de l'activité humaine.

Actifs des temps longs de la tectonique des plaques aux temps plus courts du volcanisme, les transferts telluriques vont au-delà du conventionnel cycle des roches contrôlé par la tectonique de plaques. Il s'agit de transferts réactifs multiphasiques permettant des migrations de matière et de chaleur en réponse à des gradients de perméabilité et de potentiels chimiques, et des interactions complexes avec biosphère dite "profonde". De nouvelles approches analytiques, expérimentales, et de modélisation permettent une compréhension plus précise des mécanismes physiques et chimiques de ces transferts. De nouvelles approches analytiques,

expérimentales, et de modélisation permettent une compréhension plus précise des mécanismes physiques et chimiques de ces transferts. Cependant des questions fondamentales comme la quantification des flux élémentaires d'origine tellurique que, tels que le bilan carbone global des processus géodynamiques, restent ouvertes. Or la connaissance de ces flux et de la complexité des interactions et rétroactions associées à toutes les échelles (dans la Terre solide, l'atmosphère et l'océan) est clé pour comprendre l'évolution géodynamique de notre planète au sens large. Elle revêt une importance sociétale majeure dans le contexte des changements anthropogéniques 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. L'étude de ces transferts est également la clé d'une compréhension plus fine des mécanismes de concentration élémentaires conduisant à la formation des ressources minérales et 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. Enfin, il nous faut comprendre les mécanismes, la faisabilité et optimiser la durabilité du stockage souterrain des gaz carbonés (CO₂, CH₄) et des déchets produits par nos activités industrielles (nucléaires en particulier).

Ce défi adresse la formation des réservoirs géologiques, la dynamique des flux les reliant et leur exploitation. Sur tous ces points, une connaissance fine du sous-sol et de sa diversité est une nécessité : géophysique, géochimie et géologie doivent mieux dialoguer pour imager les réservoirs et les flux opérant dans le sous-sol, ce continent invisible et surmonter les obstacles liés à l'intégration des échelles, à la diversité des processus physiques, chimiques et biologiques en jeu, et à leurs interactions. Il est aussi crucial de poursuivre dans la voie de l'interdisciplinarité en impliquant les sciences de la vie, l'océanographie, les sciences des sols et de l'atmosphère, mais aussi les sciences humaines et sociales.

4.4. 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 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 d'un continuum *aléas – événements extrêmes – histoire longue* est important pour s'affranchir de l'effet « focus » sur un événement donné. Il 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 focaliser des efforts sur des cas bien documentés sur lesquels l'ensemble de la communauté pourrait se rassembler, en revisitant les observations existantes de tous types, de l'échelle globale jusqu'à celle de l'affleurement, et si nécessaire, effectuant de nouvelles mesures.

4.5. Dynamique des enveloppes terrestres et interactions avec la biosphère: Crises et stases

La Terre et la Vie se sont influencées mutuellement au cours des temps géologiques, alternant des périodes de relative stabilité et de fortes perturbations, qui ont conduit au système Terre/Vie actuel. Les recherches sur ces interactions à différentes échelles de temps et d'espace nécessitent

d'associer aux expertises Terre Solide (telles que paléontologie, sédimentologie, magnétisme, géochimie, tectonique, géobiologie, modélisation des cycles biochimiques et du paléoclimat) à celles d'autres domaines (biologie, chimie, physique...). Ce défi multi- et transdisciplinaire est relevé par la mise en oeuvre d'une large gamme d'approches diversifiées et complexes unissant données de terrain, analyses et expériences de laboratoire, à différentes échelles (de la nanostructure des organismes aux écosystèmes), ainsi que de la modélisation numérique.

L'objectif principal est l'amélioration des connaissances des processus biotiques et abiotiques régissant la dynamique de la biodiversité et ses rétroactions sur le système Terre mais aussi, à l'inverse, celles des processus et des vitesses d'évolution du système Terre et ses impacts et rétroactions sur les écosystèmes. De nombreuses questions restent en suspens et des verrous majeurs sont encore à lever. Un enjeu important réside dans la caractérisation des facteurs, processus et seuils qui peuvent faire basculer le système Terre, ou un écosystème spécifique, d'une phase de relative stabilité initiale ('stase') vers une rupture majeure ('crise'), mais aussi ceux qui permettent de retrouver une nouvelle stabilité post-crise. Une attention particulière doit notamment être portée à la compréhension des processus biotiques et abiotiques des phases considérées comme « stables » et qui demeurent aujourd'hui encore peu contraintes. Un autre challenge se trouve dans la compréhension de la formation des enregistrements géologiques et paléontologiques ainsi que dans la caractérisation fine de leur qualité. La détection de nouveaux signaux permise par de récents développements technologiques et méthodologiques (par ex. en imagerie ou dans l'étude des biominéralisations) est en train de modifier en profondeur notre compréhension de l'origine et de la variabilité de ces processus. Ces avancées vont permettre l'évaluation de l'amplitude de déformation des signaux originels. La communauté nationale doit s'en emparer de façon ambitieuse afin de garder le leadership sur ces questions et approches innovantes. Un verrou majeur porte sur la résolution temporelle des études, leur représentativité et la possibilité d'effectuer des comparaisons pertinentes entre différents contextes géologiques. Enfin, l'augmentation en nombre et en résolution des modèles couplant le système Terre à la Vie, nécessite de se questionner suivant différents angles complémentaires, notamment comment et jusqu'à quel point le contexte moderne peut être utilisé pour appréhender l'histoire géologique et biologique, mais aussi comment transférer de façon pertinente les informations issues du temps profond pour de meilleures prévisions des changements globaux futurs. Au-delà d'améliorer nos connaissances sur le système Terre ou la biodiversité passée, les réponses à ce défi permettront de définir les enjeux de conservation prioritaire et de fournir aux collectivités/décideurs/acteurs politiques et citoyens des scénarios d'aide à la décision dans le contexte actuel de changements globaux.

4.6. Géologie de l'Europe: une cible fédératrice et prioritaire pour la communauté

TS

L'Europe, en tant que territoire, déploie une grande diversité de paysages et d'écosystèmes, tous sous-tendus par un héritage géologique riche dont témoignent la présence d'une centaine de Geoparcs labellisés par l'UNESCO. Ce territoire constitue aussi un lieu emblématique pour la recherche en géosciences, avec des découvertes majeures dans le domaine Terre Solide depuis son émergence au début du 19^{ème} siècle dans les bassins de Paris et de la Tamise. L'Europe est également un territoire largement et durablement façonné par les activités anthropiques et confronté à de nombreux aléas géologiques (sismiques, volcaniques, gravitaires ou même liés à la déglaciation), parfois en lien avec les changements globaux. Sa richesse géologique constitue un atout majeur dans le contexte de la transition énergétique.

Le choix d'une cible de recherche de proximité traduit aussi le souhait de la communauté Terre Solide de s'engager, avec le CNRS, dans une politique de sobriété et de réduction de l'empreinte carbone de ses activités de recherche scientifique, mais aussi d'une meilleure gestion des ressources du sous-sol. La cible de recherche européenne permettra une ouverture vers le grand public et les décideurs afin notamment de leur faire prendre davantage conscience de la richesse et de l'intérêt du patrimoine géologique européen. 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, cette mosaïque géographique et temporelle résonne en effet avec celle de l'Europe humaine, et du projet européen.

L'Europe et sa périphérie, y compris maritime, constitue une cible privilégié(e) par le domaine Terre Solide de l'INSU pour la mise en œuvre des défis scientifiques (cycle des éléments, forçage et dynamique des aléas telluriques, événements extrêmes et fluctuations environnementale, géodynamique), technologiques et méthodologiques des années à venir. Ce grand chantier commun permettra de revisiter des concepts géologiques à l'aune des développements technologiques et méthodologiques, permettra d'approfondir nos connaissances géologiques sur des échelles spatiales et temporelles nouvelles et favorisera l'émergence de concepts transdisciplinaires nouveaux.

4.7. Enjeux et défis autour de l'instrumentation, des modèles et de la gestion des données

En parallèle des grands axes thématiques du domaine Terre Solide, nous aborderons dans ce groupe une réflexion sur les moyens qui nous permettent de quantifier la dynamique de la planète et les différents processus qui l'affectent. Il s'agira de faire 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 (Epos-France, RéGEF, DataTerra, EMSO, ...) organisent et pilotent ces moyens en amont des observations et projets de recherche individuels (PEPR, ANR, TELLUS, etc ...). Cette réflexion s'organisera autour de quatre axes:

Quantification des processus par la géochimie-minéralogie, géochronologie, expérimentation, physique des roches ...: notamment les enjeux et avancées autour de la miniaturisation des instruments, de la précision des mesures, de l'imagerie élémentaire et isotopique, du couplage d'instruments de mesure et d'expérimentation, du challenge de la taille des charges expérimentales, etc. La gestion et la valorisation des collections d'échantillons, à la base de ces approches quantitatives, représente aussi un défi à relever pour la communauté TS.

Mesure de la dynamique terrestre par la géophysique, géodésie, approches spatial-satellites ... notamment les enjeux et avancées autour de la densification spatio-temporelle des mesures. A côté de la montée en puissance des nodes et capteurs bas coût, la France est à l'avant-poste du développement de nouveaux capteurs (fibre optique/DAS, drones, technologies à atomes froids et fond de mer, ...) qui donnera une ouverture importante sur l'instrumentation multidisciplinaire à l'interface avec OA, SIC et AA.

Modélisation analogique et numérique des processus. La structuration de la communauté des développeurs et utilisateurs d'outils numériques en TS a démarré via la labellisation de codes communautaires et le GDR NuTS. Il faut maintenant aller plus loin et trouver les leviers pour permettre une vraie mutualisation des efforts et aboutir à plus d'outils d'une envergure internationale. Une enquête sera lancée pour avoir une meilleure vision des évolutions des pratiques et des projets sur ce sujet depuis 2020.

Gestion, traitement et analyse de données et collections. L'afflux massif de données d'observation, stimulé par les développements instrumentaux et l'essor de la science ouverte, ainsi que les progrès dans la modélisation numérique des processus sont à la base de la production de nouvelles connaissances sur le domaine Terre Solide, à condition de relever un certain nombre de défis. Ainsi, la gestion (préservation, curation, mise à disposition) des données massives (issues par exemple de capteurs à bas-coût, de mesures sur fibre optique ou drones, de nouveaux satellites) nécessite parfois d'adapter leur cycle de vie et de faire évoluer nos modèles centralisés de stockage et de mieux les connecter aux moyens de calcul pour permettre l'analyse et la réduction des données. Des nouvelles expertises sont également nécessaires pour découvrir et combiner les données et permettre de les analyser avec de nouvelles méthodes d'IA. Enfin, la gestion des collections, avec une curation des échantillons physiques et des données et métadonnées associées, est toujours un défi.

- 5. Un futur désirable** (à travailler lors du colloque)
 - 5.1. Transition / Impact environnemental
 - 5.2. Nouvelles pratiques
 - 5.3. Pérennisation des moyens / recherche sur le temps long
 - 5.4. Lien avec la société / sciences participatives
 - 5.5. Formation des nouvelles generation (expertises) / décideurs

- 6. Conclusions (1 page)**