

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

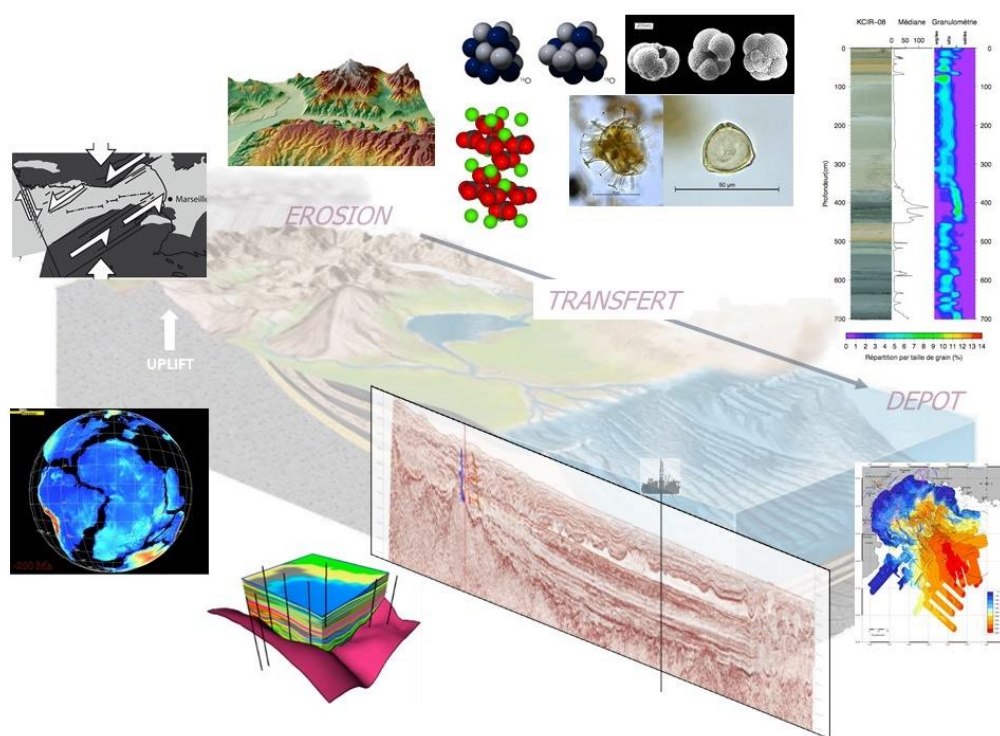
La nécessité d'une échelle des temps géologiques la plus précise possible est une priorité sans laquelle aucune étude de la dynamique du système ou de ses composantes, n'est possible. L'enjeu est essentiel pour connaître la vitesse des changements identifiés, des corrélations fines pour différents signaux.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

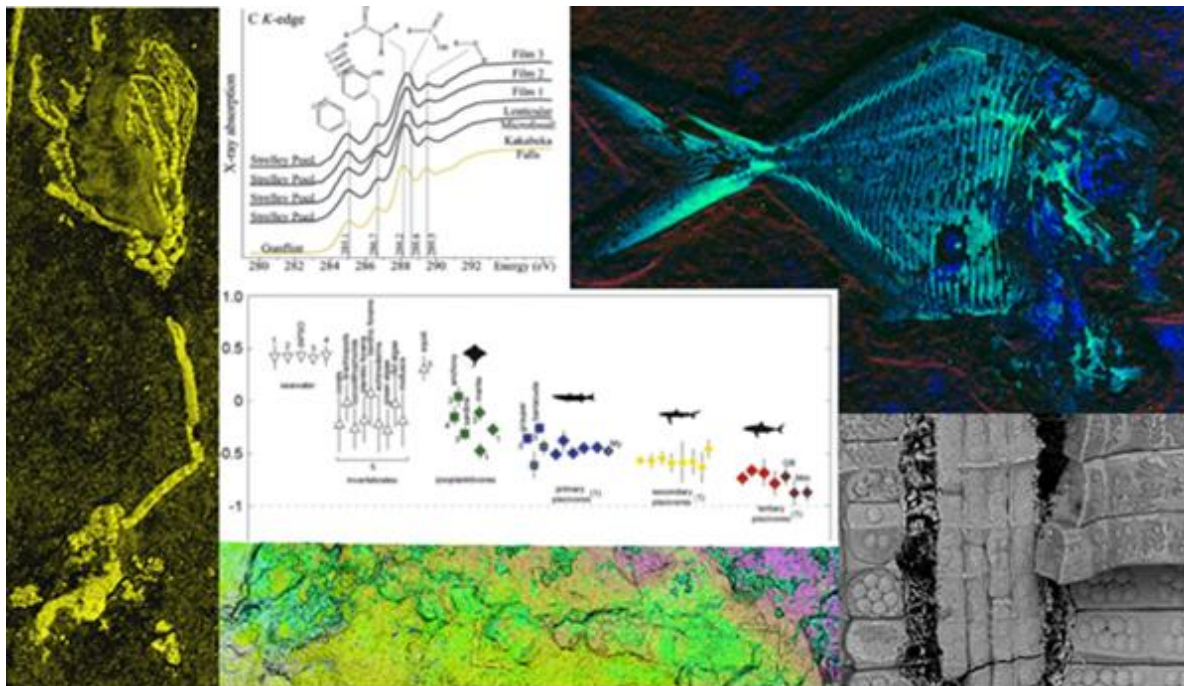
massive en cas de perturbation volcanique, biologique (par ex. empoisonnement bactérien), ou bien d'impact météoritique, représentent aujourd'hui des enjeux majeurs.

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.