



PROSPECTIVE

TERRE SOLIDE 2021-2025

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS

Bilan et Prospective 2021-2025 de la Commission spécialisée Terre Solide de l'Institut National des Sciences de l'Univers

**SYNTHÈSE DES ATELIERS, DES FORUMS PRÉPARATOIRES ET DU COLLOQUE
DE PARIS 19-21 OCTOBRE 2020**

Sous la coordination de Bruno Scaillet, Président de la CSTS, Eric Humler puis Stéphane Guillot,
Directeur Adjoint Scientifique du domaine TS-INSU

Photo de couverture : vue sur la vallée de l'Indus, une fenêtre sur la Terre © S. Guillot

SOMMAIRE

Préambule	4
Introduction : contexte de la prospective et méthode	6
Le domaine Terre Solide	8
Les enjeux scientifiques et techniques en Terre Solide	12
Les outils en Terre Solide	18
Instrumentation	19
Calcul et analyse de données	22
Les Actions Nationales d’Observation (ANO) / Services Nationales d’Observation (SNO)	24
Infrastructures de Recherche (IR) –Très Grandes Infrastructures de Recherche (TGIR)	27
Archives et pôles de données	29
Les relations entre Terre Solide et les autres domaines de l’INSU et les instituts du CNRS	32
Les partenaires académiques de Terre Solide	36
Les partenaires industriels de Terre Solide	40
Les besoins en formation en Terre Solide	44
Annexes	46
Rapport d’analyse des groupes de travail TelluS et PNP-TS	47
Rapport de conjoncture 2019 de la Section 18 du CoNRS	59
Description et statut des différentes infrastructures de recherche en TS	68
Europe et International	71
Liste des Groupes de Travail et des participants	73
Liste des acronymes	75

Préambule

BRUNO SCAILLET : Président de la Commission Spécialisée « Terre Solide »

ERIC HUMLER : Directeur Adjoint Scientifique « Terre Solide »

Ces dernières années, les succès des activités scientifiques du domaine Terre Solide (TS) de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU) sont évidents. On peut citer par exemple, les 51 financements de l'European Research Council (ERC) obtenus depuis 10 ans (40% de l'ensemble des ERC attribués à l'INSU) ou encore les nombreux contrats/coopérations/programmes engagés avec des partenaires industriels majeurs. Notre visibilité au niveau national et international a été amplifiée grâce, entre autres, au succès récent de la mission InSight sur la planète Mars ainsi que par les nombreux prix décernés à nos chercheurs et enseignants-chercheurs, ingénieurs et techniciens. L'INSU-TS a su également, grâce à ses laboratoires, être présent sur le terrain (ou en mer) en temps réel lors de crises sismologiques et volcaniques (Italie, Pérou, Mayotte, etc). Au cours de ces trois dernières années, la communauté a su s'imposer dans les appels d'offres de la mission pour les initiatives transverses et interdisciplinaires (MITI) du CNRS puisque nous sommes maintenant le deuxième institut (ex-aequo avec l'Institut de Chimie (INC) et juste derrière l'institut des sciences biologiques (INSB) en nombre de projets lauréats. Par ailleurs, le premier Cristal collectif du CNRS a été décerné, en 2018, au réseau des litho-préparateurs de France. Ces nombreux succès témoignent du dynamisme, de la qualité, de la pertinence, et de la reconnaissance internationale des recherches menées en France dans le domaine TS.

Historiquement, notre communauté a participé à la découverte de la tectonique des plaques et elle est restée jusqu'aux années 1980 dans l'écume de ce bouleversement sans doute comparable à la révolution héliocentrique de Copernic. Sans abandonner nos objets d'étude premiers, l'arrivée de nouvelles techniques performantes telles que l'imagerie sismique à partir du bruit, les micro- et nano-cartographies chimiques, optiques ou magnétiques, la mesure de isotopes non conventionnels ou encore les détecteurs, robots, nano-satellites et capteurs modernes ouvrent de nouvelles perspectives. De même, comme dans beaucoup de domaines de recherche, TS est impacté de plein fouet par la révolution du numérique: les possibilités de calcul au sens large ont augmenté de façon exponentielle, permettant des simulations numériques des processus géologiques et de leurs couplages chaque jour plus abouties. En parallèle, l'augmentation des capacités de mesure et

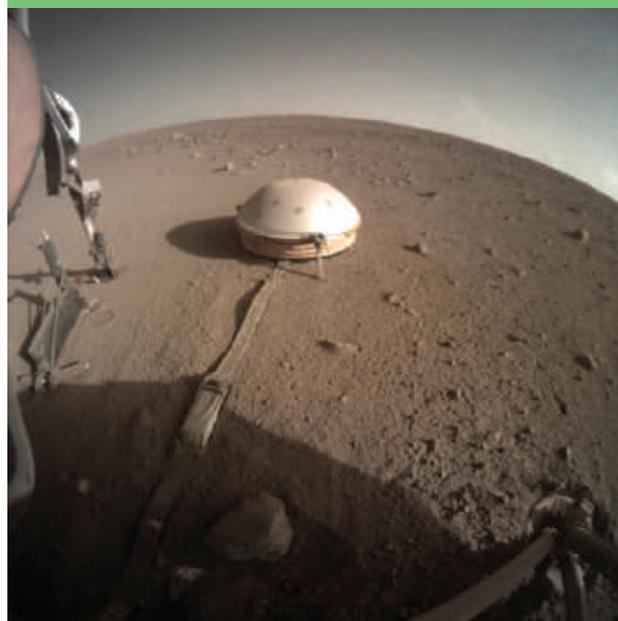


Image du sismomètre SEIS recouvert par son écran WTS (Wind and Thermal Shield) prise par la caméra embarquée ICC (Instrument Context Camera) le 30 décembre 2019 au Sol 388 de la mission InSight

© NASA/JPL-Caltech

d'observation alimentent des bases de données de plus en plus complètes et complexes, bases qu'il convient d'exploiter, notamment au travers de leur intégration dans les approches modélisatrices multi-paramètres.

Ces nouvelles méthodes et outils mis au point ou utilisés par la communauté TS lui permettent de progresser rapidement sur des champs de connaissance encore vierges ou naissants, tout en interagissant fortement avec d'autres communautés. Ainsi, les géochimistes utilisent les isotopes dits « non conventionnels » pour identifier dans le sang ou les tissus humains des « fractionnements » liés au développement de différentes maladies telles que des cancers ou la maladie d'Alzheimer. De même, à la suite d'un séisme,

l'atmosphère vibre avec la Terre et en connaissant les propriétés physiques de cette vibration, on peut la reconvertir en mouvement du sol et ainsi transformer les radars en « sismomètres atmosphériques ». Ces recherches pourraient contribuer à terme à la prévention des risques liés aux séismes et aux tsunamis. Si de nombreux radars couvrent déjà des zones océaniques inaccessibles aux sismomètres classiques, d'autres capteurs adaptés, embarqués sur satellites, pourraient permettre, à terme, de couvrir entièrement les océans ou de détecter des séismes en observant l'atmosphère des planètes du système solaire comme Vénus. Enfin, aujourd'hui, la planétologie comparée devient réalité avec très certainement, dans l'année qui vient, les premières images sismiques de la structure interne de Mars grâce à la mission InSight.

D'une façon générale, l'aventure spatiale (Rosetta, retour d'échantillons de Mars, retour sur la Lune, exoplanètes...), coeur de métier de la communauté Astronomie – Astrophysique (AA), implique directement la communauté TS, nourrissant ses thématiques au travers des interrogations qu'elle pose sur l'évolution des corps planétaires. Ces quelques exemples illustrent clairement la forte interdisciplinarité des actions de recherche menées en TS et la multiplicité de leurs domaines applicatifs.

Ces avancées ou nouvelles voies de recherche vont de pair avec une structuration grandissante de la communauté. Ainsi, les réseaux internationaux qui visent à construire des infrastructures européennes distribuées en Europe sont maintenant un exercice obligé, fortement encouragé par notre ministère de tutelle, le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI). Dans le domaine TS, une des principales infrastructures européennes est la plateforme EPOS (European Plate Observing System), dont l'objectif est de fournir un accès coordonné à des données ou produits de données, des services et des installations harmonisés de haute qualité issus de communautés thématiques multiples des sciences de la Terre, ainsi qu'à des outils d'analyse et de modélisation. C'est l'infrastructure de recherche (IR) RESIF (Réseau sismologique et géodésique français) qui a permis à la France d'intégrer EPOS. Bâti sur cet exemple, RéGEF (Réseau Géochimique et Expérimental Français) verra prochainement le jour en tant que nouvelle infrastructure de recherche. Ces deux réseaux garantiront, entre autres, la bonne coordination à l'échelle nationale des moyens techniques implémentés par TS. De même, ils permettent d'identifier clairement au niveau national (MESRI) et international les deux piliers instrumentaux fondamentaux de nos activités scientifiques.

Deux facteurs appellent à une grande vigilance de notre part : aujourd'hui, les thématiques TS sont en général mal perçues par le grand public car souvent associées à des

pratiques industrielles polluantes (mines, pétrole). A cette mauvaise perception s'ajoute un déficit de présence de la communauté au sein des instances missionnées par le MESRI pour définir les grandes orientations stratégiques dans le domaine scientifique, en particulier les Alliances. Ce constat a amené la création d'un groupe de travail Terre Solide à l'Alliance pour l'environnement (AllEnvi) en 2019. Il est important de rappeler qu'au sein du CNRS, l'INSU (en particulier TS et AA), tout comme l'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules (IN2P3) et une partie de l'Institut de Physique (INP), conduisent des recherches sur les « temps longs » : origine et évolution de l'univers, de la Terre et des planètes, origine et évolution de la vie... Il faut prendre garde à ce que ces thématiques fondamentales ne soient pas fragilisées par une recherche positionnée sur les temps « courts » pour ne pas dire « immédiats », plus souvent mise en avant par les Alliances.

La combinaison des facteurs précités représente, à moyen terme, par les choix politiques qu'elle peut induire, un risque pour la communauté TS en France. Il convient au travers de cette prospective de le combattre. Au-delà des questions fondamentales récurrentes et légitimes propres au domaine TS, des besoins socio-économiques majeurs font que la recherche en TS doit être soutenue à son plus haut niveau. D'une part, l'émergence de nouvelles technologies nécessaires à la transition énergétique (évolution vers des énergies décarbonées : H₂, géothermie...) et l'explosion des besoins en ressources alimentant les technologies de communication (métaux rares...), qui impliquent une exploitation raisonnée des ressources du sous-sol, et donc une connaissance accrue des propriétés et de la constitution de celui-ci. D'autre part, la prévention des risques telluriques (séismes, volcanismes, glissements gravitaires, tsunamis, évolution du champ magnétique...) est un enjeu socio-économique majeur dans un contexte de croissance démographique et d'échanges de toutes sortes à l'échelle du globe. Les progrès dans ces deux domaines socio-économiques sont indissociables des progrès issus de la recherche en TS.

Le risque tellurique concerne au premier plan la communauté TS, et impose une clarification de son rôle dans la chaîne d'évaluation de l'aléa et du risque associé et sur les tâches d'observation menées par la communauté. Ces dernières sont trop souvent confondues avec un rôle de surveillance opérationnelle en relation directe avec les acteurs de la sécurité civile, rôle pour lequel la communauté académique TS n'est pas missionnée, ne disposant pas de surcroît des moyens pour y répondre. S'ajoute à cela une participation grandissante de la société civile à l'élaboration de la recherche (science participative) via les réseaux sociaux qui nécessite une adaptation de nos approches et pratique, notamment dans le suivi des crises telluriques.

Le contexte de cette prospective est marqué par les profonds changements qui ont affecté le monde académique au cours de la dernière décennie, en particulier le lancement des Programmes d'Investissements d'Avenir (PIA1 et 2, PIA3 en cours), au travers desquels différents objets de financement de la recherche ont été installés. Parmi ceux-ci, les Laboratoires d'Excellence (LabEx) et les Equipements d'Excellence (EquipEx) ont le plus souvent directement concerné les unités mixtes de recherche (UMR), qui constituent l'ossature principale de la recherche académique en France. Environ 1/3 des unités de recherche en TS ont pu bénéficier de ces nouvelles sources de financement.

Lors de la dernière prospective TS tenue à Cabourg en novembre 2014, seuls les LabEx et les EquipEx étaient en exercice. Depuis lors, les Initiatives d'Excellence (IdEx) et les Initiatives Sciences – Innovation – Territoires – Economie (I-SITE) ont été installées dans le paysage, dans une logique d'émergence d'un nombre réduit de pôles de recherche de masse critique, visibles, et donc *a priori* compétitifs, à l'échelle internationale. Comme pour les LabEx et les EquipEx, toutes les unités TS n'ont pas pu en bénéficier, et il y a des sites universitaires où l'avenir des activités de recherche en TS demandera probablement un accompagnement renforcé de la part de l'INSU. Ces opérations de structuration et de financement se sont accompagnées par une réduction du budget de l'ANR, qui s'est mécaniquement traduite par une perte de ressources propres pour les laboratoires, tous domaines confondus. En parallèle, les actions programmatiques à l'échelle de l'Europe n'ont pas souvent concerné les thèmes qui sont le « cœur de métier » TS. Seul l'ERC est resté fidèle à la notion de programme blanc, tel que la communauté scientifique l'a connu lors du lancement de l'ANR. Comme détaillé ci-après, l'excellence de la recherche effectuée au sein de la communauté TS a permis à cette dernière d'être particulièrement efficace dans la levée des fonds ERC et, en retour, de maintenir une recherche de qualité, en tous cas dans certains domaines.

Il est encore trop tôt pour dire quelle sera l'effet « final » des actions de structuration de l'espace académique en France, mais il en est un qui se fait d'ores et déjà ressentir : celui de l'attractivité pour les jeunes. Ce dernier peut en particulier s'apprécier au travers des recrutements opérés par le CNRS, certains laboratoires étant clairement plus attractifs que d'autres. La prochaine prospective se déroulera dans un cadre probablement différent de celui que nous connais-

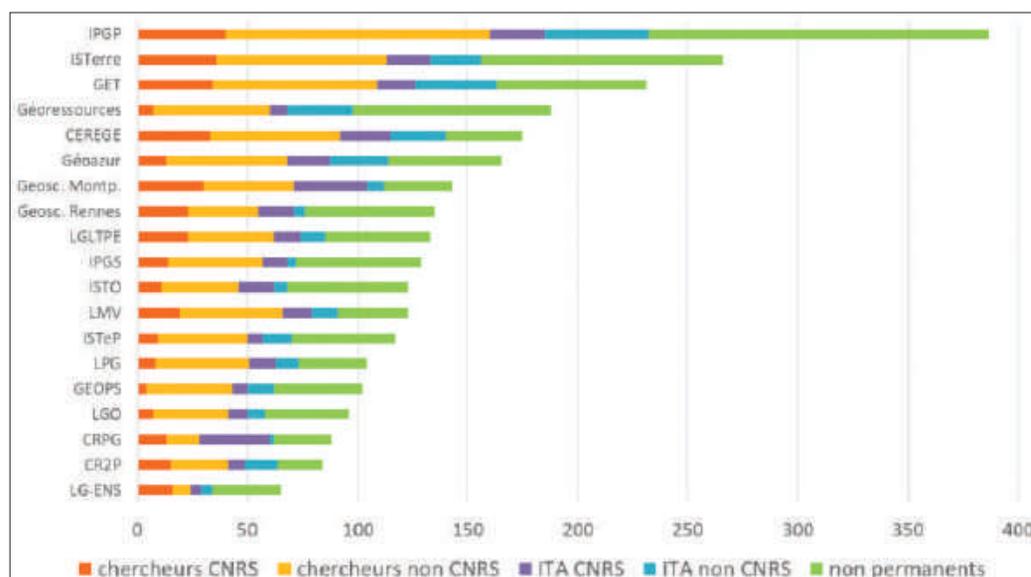
sons depuis une quinzaine d'années, période au cours de laquelle le nombre de laboratoire TS est resté globalement stable (hors regroupement structurel).

La méthode suivie pour élaborer le document présent a consisté à combiner les efforts de plusieurs groupes de réflexion : en premier lieu ceux constitués par les membres de la commission spécialisée du domaine TS (CS-TS), auxquels se sont ajoutés des experts extérieurs quand cela s'est avéré nécessaire. En deuxième lieu, le document s'est nourri du rapport de conjecture produit par la section 18 du Comité National de la Recherche Scientifique (CoNRS) fin 2018. Ces deux ensembles permettent d'avoir une vision exhaustive des axes de recherche actifs au sein des différentes UMR TS. Des éléments de réflexion supplémentaires proviennent de la prospective menée par le Conseil Scientifique de l'INSU, ainsi que de la prospective transverse mise en place par la direction scientifique de l'INSU visant à faire émerger des axes de recherche inter-domaines, inter-instituts et inter-institutions.

Au-delà des aspects concernant la recherche, la CS-TS a également, comme il est de coutume, considéré les aspects relevant de la structuration d'ensemble de la communauté, des outils dont elle dispose, et de ses relations partenariales avec d'autres entités académiques, mais également avec le monde industriel. À l'inverse, une fois n'est pas coutume, un groupe de travail s'est également attaché à dégager certains éléments clés dans le domaine de la formation adossée à la recherche. Ce dernier point n'est traditionnellement pas abordé dans les prospectives de domaine, mais il nous a semblé important d'essayer d'établir un bilan des forces et faiblesses de TS au niveau des masters en Sciences de la Terre, des Planètes et de l'Environnement (STPE) en particulier, principale source d'étudiants en thèse TS, afin d'esquisser des pistes pour les formations des chercheurs de demain.

Le rapport qui suit volontairement fait la place aux enjeux plus qu'au bilan, dans l'espoir de produire un document allant à l'essentiel et d'où se dégagent quelques lignes directrices utiles à la définition des priorités futures par les différentes institutions concernées.

LE DOMAINE TERRE SOLIDE



Répartition des chercheurs, enseignant-chercheurs, ITA-BIATSS et des non permanents dans les principaux laboratoires TS

© Rapport de conjoncture de la section 18 du CoNRS

À ce jour, 32 Unités Mixtes de Recherche (UMR) sont rattachés à la section 18, dont 19 en rattachement principal et 7 en rattachement secondaire. Les 19 UMR en rattachement principal comptent 2817 personnes dans leurs effectifs (sur environ 9700 au total pour l'INSU), dont 1226 chercheurs « permanents », comprenant 326 chercheurs CNRS.

Le budget TS (hors masse salariale) est resté globalement stable au cours des 6 dernières années aux alentours de 13 M€/an, dont environ la moitié finançant les IR-TGIR et l'autre moitié le Fonctionnement – Equipement – Investissement (FEI) des OSU et UMR, le programme TelluS, les services nationaux d'observation (SNO), les plateformes instrumentales, et des réseaux issus d'accords contractuels entre l'INSU-TS et des programmes internationaux tels que l'International Continental Scientific Drilling Program (ICDP) ou l'International Ocean Discovery Program (IODP). Dans cette enveloppe, le programme TelluS a bénéficié d'un soutien annuel d'environ 1.1 M€, répartis sur les actions SYSTEM, INTERRVIE, ALEAS, CESSUR, PNP, pré- et post-campagne à la mer et l'organisation de colloques. Le FEI (soutien de base des UMR en provenance du CNRS) représente 1.8 M€/an (+0.4 M€ pour les OSU). Ce soutien de base est globalement doublé par des soutiens versés par les autres tutelles des UMR, en premier lieu les universités mais aussi d'autres établissements (IRD, BRGM, CNES...).

Le nombre de UMR en TS a diminué au cours de la dernière décennie du fait de restructurations en grosses unités (IPG Paris, ISTerre Grenoble, Géosciences Environnement Toulouse, Géosciences Montpellier...). Ces regroupements permettent une mutualisation des ressources financières, des équipements et fonctions support, et augmentent le poids des Sciences de l'Univers sur les sites universitaires, ainsi que leur visibilité auprès des collectivités régionales. Le

dernier regroupement a eu lieu en 2020 à Strasbourg entre l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (section 18) et le Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie de Strasbourg (LyGHeS) (section 30) donnant lieu à l'Institut Terre-Environnement de Strasbourg (ITES). En revanche, notre communauté reste assez dispersée sur le site de Lille (3 unités) et dans une moindre mesure à Toulouse (GET et IRAP) et Nancy (Géoresources et CRPG).

Toutes les UMR TS ont une tutelle universitaire. L'autre partenaire important en TS est l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) avec 62 chercheurs IRD permanents affectés à cinq unités (GET, ISTerre, Géoazur, CEREGE, LMV; à comparer aux 167 chercheurs CNRS et 307 enseignants chercheurs dans ces 5 laboratoires). Les cibles géographiques de l'IRD en TS sont les pays andins, l'Indonésie, l'Afrique de l'ouest, l'Inde, l'Asie du SE et le pourtour méditerranéen. La cotutelle CNRS-IRD offre l'accès à des sites d'étude uniques et à des collaborations étroites avec les chercheurs de ces pays. Les autres institutions tutelles de UMRs TS sont le Muséum National d'Histoire Naturelle – MNHN (CR2P et IMPMC), le Centre National d'Etudes Spatiales – CNES (LPG et GET), le Bureau de Recherches Géologiques et Minières – BRGM (ISTO), l'Institut National de Recherche pour Agriculture, l'alimentation et l'Environnement – INRAE (CEREGE), l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux – IFSTTAR qui a rejoint l'Université Gustave Eiffel (ISTerre), et l'Institut National de l'information Géographique et forestière – IGN (IPGP). Enfin, notons le statut particulier de l'UMR Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), seule unité du grand établissement éponyme.

Les 19 UMRs avec un rattachement principal TS ont une bonne production : à titre d'exemple, 2579 articles ont été publiés en 2017 selon ISI Web of Knowledge, soit 2.1 ar-

ticles par chercheur. Ces 19 laboratoires cumulent 105 000 citations fin 2019, ce qui confirme la large visibilité et valorisation de notre travail au niveau international. Cette reconnaissance est aussi attestée par les 25 médaillés des deux grandes sociétés savantes de notre domaine, à savoir l'American Geophysical Union (AGU) et l'European Geosciences Union (EGU). Notons aussi les 38 AGU Fellows de nos laboratoires qui font de la France le premier pays étranger primé par l'AGU. Le classement de Shanghai, dans le domaine « Earth Science » fait apparaître 5 universités françaises dans le top 50 (classement 2020), par exemple l'Université de Paris (IPGP) à la 12^e place et l'Université Grenoble Alpes (ISTerre) à la 25^e place. En ce qui concerne les financements, notre communauté a été lauréate de plus de 50 ERC cette dernière décennie. Ces projets d'excellence permettent de dynamiser les questionnements scientifiques dans les laboratoires, de maintenir des équipements de pointe et de financer des jeunes chercheurs.

Du point de vue du CoNRS, la communauté TS dépend principalement de la section 18 « Terre et Planètes Telluriques: structure, histoire modèles ». Dans le détail, 17 des 32 UMR s'inscrivant en section 18 émergent aussi en section 30 « Surface continentale et interfaces » (section commune entre l'INSU et l'Institut Ecologie et Environnement (INEE)), couplant dans leur recherche « processus profonds » et « processus de surface » et partageant méthodes et questionnements. Ainsi, sur les 19 unités en rattachement principal en section 18, 9 ont pour rattachement secondaire la section 30. Notons que plus de 50 chercheurs de la section 18 sont dans une unité ayant la section 30 comme section principale de rattachement. La structuration en OSU (Observatoire des Sciences de l'Univers) dans la majorité des sites favorise naturellement les liens scientifiques entre les communautés de l'INSU et de l'INEE, ou avec d'autres instituts du CNRS (INC, INSIS, INP, INSHS, INSB), tout en permettant de renforcer le lien formation-recherche, bien qu'à des degrés divers selon les sites.

Les couplages sont aussi forts avec la section 19 « Système Terre: enveloppes superficielles » (8 unités en commun), illustrant les nombreuses interactions entre Terre solide et enveloppes fluides, ou encore notre intérêt commun pour les évolutions climatiques. Les laboratoires impliqués en paléontologie (7 UMRs) sont aussi rattachés à la section 29 « Biodiversité, Evolution et Adaptations Biologiques: des macromolécules aux communautés » (rattachée à l'INSB) qui s'intéresse à l'évolution du monde vivant. Notons enfin un tropisme fort vers les sections 9 « Mécanique des Solides. Matériaux et structures. Biomécanique. Acoustique » et 10 « Milieux Fluides et Réactifs: transports, transferts, procédés de transformation » (rattachées à l'INSIS) pour les techniques d'acoustique, de mécanique du solide et des fluides (3 et 3 unités respectivement). Étonnamment, seules deux UMRs (LPG et IRAP) assurent un lien structurel avec la section 17 « Système Solaire et Univers Lointain » du domaine AA de l'INSU, et ceci principalement autour de la planéto-

Dans le détail, la section 18 compte environ 325 chercheurs avec autant de chargés de recherche (CR) que de directeurs de recherche (DR). Ce nombre s'est érodé cette dernière décennie (baisse de l'ordre de 10%, tendance générale au CNRS). La proportion de femmes est de l'ordre de 30% sur l'ensemble de la section, 35% dans le corps des CR et 25% dans celui des DR. Concernant les recrutements, la section 18 a recruté 64 chargés de recherche (dont 18 femmes soit 28% des recrutements CR) depuis 2009, soit de l'ordre de 6 postes/an en moyenne (5.8), avec une répartition géographique en lien avec la taille et le dynamisme/l'attractivité des laboratoires (15 à Paris, 8 à Toulouse, 6 à Lyon, Grenoble et Nancy, 4 à Lille et Clermont-Ferrand...). À noter que ces chiffres ne tiennent pas compte des mutations essentiellement dans le sens Paris -> Province.

Ces chiffres doivent être mis en regard des chiffres des sections CNU 35 et 36 (Conseil National des Universités) qui réunissent les enseignants-chercheurs (EC) de nos disciplines, totalisant environ 900 EC. L'effectif global de ces deux sections a augmenté de 4% sur les 20 dernières années, mais il ne comprend qu'un ratio de 26% de femmes (ce ratio descend à moins de 15% dans le corps des professeurs). Au cours de la dernière décennie, le recrutement des EC a été impacté de façon très diverse selon les difficultés financières rencontrées par les Universités, conséquence de la loi sur l'autonomie financière des établissements. Ainsi, certains sites ont dû geler la totalité des recrutements plusieurs années de suite, alors que d'autres parvenaient à maintenir une capacité de renouvellement de leurs effectifs. Pour le domaine TS, les postes mis au concours chaque année en 35-36^e section du CNU sont de l'ordre de 4-5 en moyenne par an sur les 5 dernières années, soit un nombre équivalent aux recrutements en section 18.

Le corps des CNAP (Corps National des Astronomes et des Physiciens) alimente également les recherches en TS, au travers des recrutements de la section TS dédiée qui pourvoit en postes les différents services d'observation labellisés par l'INSU (environ 3-4 postes/an depuis 6 ans). Il y a aujourd'hui 5 actions nationales d'observation (ANO) labellisées en TS, auxquelles sont affectés 82 CNAP (dont 12 en détachement/disponibilité, dont le poste reste affecté à l'OSU de départ pour des recrutements CDD). Environ la moitié des postes CNAP-TS est affectée à l'IPGP, principalement sur le Service National d'Observation en Volcanologie (SNOV). Il est à noter que le nombre de CNAP reste largement insuffisant pour assurer le fonctionnement des ANO-TS, qui dépend fortement de l'implication de plus d'une centaine de chercheurs CNRS et enseignant-chercheurs ainsi que des ITA CNRS et universitaires.

Sur le plan de la coopération internationale institutionnalisée, plusieurs projets TS émergent aux différentes catégories d'instruments financés par le CNRS: 12 PICS (Projet International de Coopération Scientifique), et 8 PRC (Projet de Recherche Conjoint), suivant l'ancienne classification des outils de collaborations internationale du CNRS, et 7 IRP (International Research Project) et 1 IRN (International Research Network), suivant l'actuelle. Compte-tenu de l'évo-

lution des outils de coopération internationale du CNRS et du lancement d'initiatives communes du CNRS avec de grandes institutions de recherche à l'international, il est évident que la communauté Terre Solide doit continuer à se saisir de ces outils. Malgré les montants relativement modestes alloués à chacun de ces projets (entre 5 et 15 K€), principalement dédiés à de la mobilité, l'effet de levier auprès de nos partenaires est indéniable, tant sur le plan financier que sur l'accès à des terrains d'étude difficiles ou d'échantillons exceptionnels.

LES ACTIONS PROGRAMMATIQUES EN TS

Les actions programmatiques TelluS et le Programme National de Planétologie (PNP), constituent les principaux outils d'animation scientifique et programmatique de la communauté académique TS. Ils permettent de renouveler les problématiques scientifiques et de tester de nouvelles méthodes avant de les mettre en œuvre dans le cadre de projets plus vastes. Une priorité est donnée aux jeunes chercheurs et aux projets collaboratifs entre unités de recherche, mais c'est surtout l'aspect émergent des demandes et la possibilité que les recherches entreprises débouchent sur des questions ou des méthodes fondamentales nouvelles qui est privilégié. En effet, les appels d'offre de grande ampleur, en privilégiant des travaux dont l'issue est certaine ou au moins largement anticipée, ne favorisent pas nécessairement la prise de risques. Le programme TelluS comporte 4 sous-thèmes (SYSTEM, INTERRVIE, CESSUR, ALEAS) et finance également des actions post-campagnes océanographiques et l'organisation de colloques. Les discussions menées au sein de la CS-TS ont abouti à recommander la reconduction de l'articulation actuelle de TelluS pour la période 2021-2025. PNP est co-géré par les domaines TS et AA. Le détail de ces actions est donné en annexe.

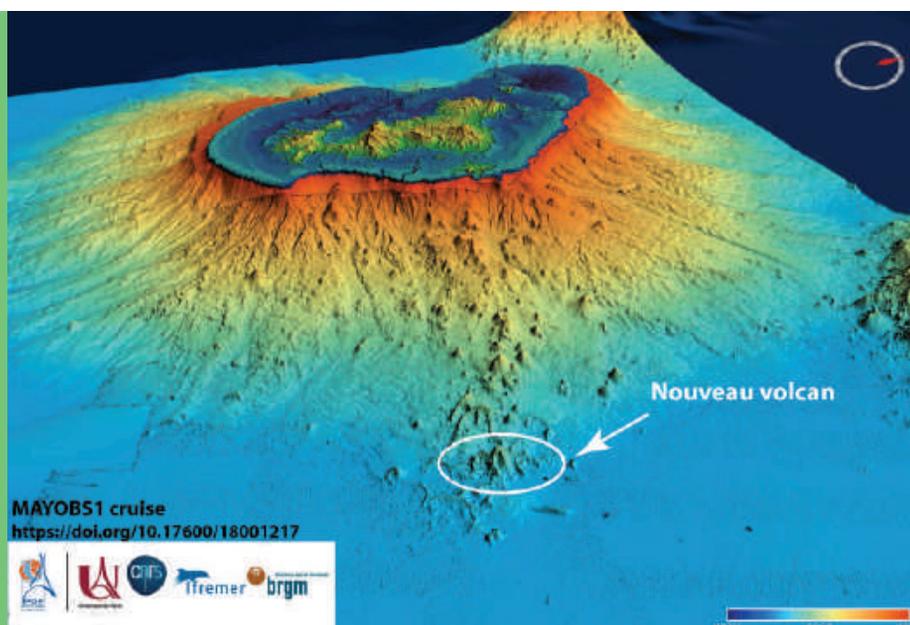
Entre 20 et 100 projets sont déposés à chaque sous-programme TelluS chaque année avec un taux de succès d'en-

viron 50% sur le nombre de projets financés et d'environ 35% sur les sommes demandées, avec des financements de 5-10 k€ en moyenne par projet. Pour PNP les taux de succès sont plus élevés (respectivement ~90% et ~60%), dû au co-financement du programme par le CNES. Les projets étaient jusqu'en 2020 financés pour un an, renouvelable un an après réévaluation. Pour chaque sous-programme, un comité de 10-20 personnes, renouvelées d'un tiers tous les 2 ans, classe les projets sur la base de 2 évaluations au minimum. Dans le sous-programme SYSTEM, compte tenu de la variété des approches et des objets étudiés, la procédure d'évaluation requiert une participation de membres extérieurs. Ce fonctionnement permet de maintenir active la notion de communauté en Sciences de la Terre, et c'est probablement là le rôle le plus important du programme TelluS. D'ailleurs, la communauté TS a bien identifié le programme TelluS comme fondamental pour le domaine, car, par son large contour, il permet à de nombreux chercheurs aux profils variés de maintenir une activité de recherche innovante en dépit de la compétitivité croissante des appels d'offre de plus grande ampleur (ERC, ANR) et de la stagnation du soutien de base des UMR. L'expérience montre que l'effet levier de TelluS concerne tous les différents couplages et échelles de temps concernés par l'appel d'offre.

En plus de ces actions récurrentes, TelluS instruit des Appel d'Offres (AO) ciblés tel celui (0.42 M€) consécutif à la crise volcano-tectonique de Mayotte, initiée en 2018 et toujours en cours fin 2020 (ci-dessous). Cette action a été renforcée par un AO de la Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires du CNRS (MITI) sur les risques naturels en partenariat avec l'IRD (0.3 M€). D'autres AO impliquant de nombreuses équipes TS ont été instruites par la MITI, en particulier l'action Rift (0.31 M€), qui est un chantier géographique en Afrique de l'est en partenariat avec l'INSHS et l'INEE, qui a évolué en 2020 vers un GDR (Groupement de Recherche), et une action méthodologique portant sur l'utilisation des isotopes (ISOTOP 2019, 0.28 M€ pour TS) sur les processus biotiques et abiotiques.

Vue 3D de l'île de Mayotte et des fonds océaniques environnants, montrant la localisation du point d'émission des laves associées au nouveau volcan sous marin

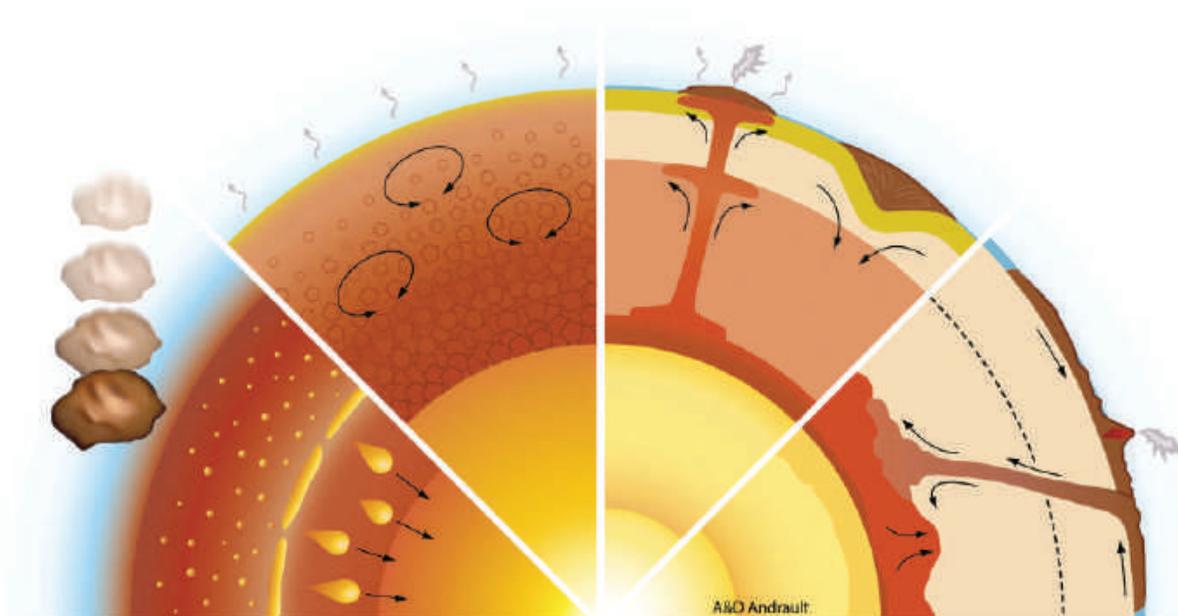
© N. Feuillet, IPGP



LES ENJEUX SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES EN TERRE SOLIDE

Schéma conceptuel de l'évolution de la structure de la Terre depuis les stades d'accrétion et de la formation du noyau, l'océan magmatique, jusqu'à la mise en place de plumes mantelliennes et des systèmes de subduction modernes

© http://lmv.uca.fr/wp-content/uploads/2014/12/Image_CoolEarth_AA2.jpg



La lecture des deux derniers exercices de prospective TS, celui d'Aussois (2008-2013) et celui de Cabourg (2014-2020), couvrant donc une période de plus de 10 ans, montre la stabilité des grandes questions scientifiques qui structurent la recherche dans notre domaine. Ainsi les questions comme l'origine de la vie sur Terre, la naissance de la tectonique des plaques, l'évolution de la composition chimique de l'atmosphère, l'origine de la Lune, le fonctionnement de la dynamo terrestre, l'origine des grandes crises environnementales, la compréhension de la rupture sismique, pour ne citer que quelques thématiques, sont autant d'exemples de questions fondamentales, déjà largement présentes en 2008 et encore d'actualité.

La réponse à ces questions nécessite de prendre en compte le couplage entre les différentes enveloppes fluides et solides de notre globe, et plus généralement le système terre dans sa globalité, voire au-delà pour les étapes précoces (système solaire). La complexité des processus et systèmes étudiés, en particulier par leur diversité d'échelles de temps et d'espace, explique naturellement le caractère pérenne des questionnements. À cela s'ajoute l'accroissement exponentiel des observables, grâce aux développements instrumentaux de tous genres (satellitaires, de terrain, en laboratoire). Ces nouvelles données remettent en question les modèles conceptuels, ou en tous cas permettent d'en tester les limites, et nécessitent également la mise en œuvre de nouvelles approches (big data, intelligence augmentée) et donc de nouveaux métiers.

UN EXEMPLE D'INTERDISCIPLINARITÉ : L'AVENTURE SPATIALE

Notre communauté n'est pas limitée à l'objet Terre uniquement, mais scrute attentivement les autres planètes et objets du système solaire. La compréhension des mécanismes opérant sur notre planète fournit un cadre conceptuel d'interprétation des données spatiales au sens large (exemple de la géomorphologie), en termes d'évolution des corps solides notamment, mais l'inverse est également vrai. Un exemple est la découverte de la croûte anorthositique sur la Lune suite aux missions Apollos dans les années 1960. Cette découverte a abouti à l'émergence du concept de l'océan magmatique, dont on pense aujourd'hui qu'il caractérise les stades précoces d'évolution de nombre de corps rocheux du système solaire, y compris la Terre. Ce concept a des conséquences fondamentales pour notre compréhension de l'évolution de la composition des atmosphères planétaires et fait l'objet de nombreuses recherches de la part d'équipes « TS » en France et de par le monde (figure). De même, la découverte en nombre chaque jour grandissant d'exoplanètes fournit autant d'exemples d'application de concepts « terrestres » aux objets extra-solaires, s'agissant de la compréhension de leur dynamique interne (ex : tectonique des plaques sur les super Terres) ou externe (ex : comment l'atmosphère des exoplanètes renseigne sur l'évolution de la nôtre). Un autre exemple de retombée « terrestre » de l'exploration spatiale est bien sûr la sonde Rosetta, qui

a observé et analysé la comète 67P/Tchouryumov-Gerasimenko, fournissant de nombreuses données (encore en cours d'exploitation) sur les éléments volatils portés par ces objets, potentiellement pourvoyeurs de l'eau sur Terre. L'arrivée de la sonde InSight sur Mars en 2019 ouvre également une nouvelle ère: la sismologie des planètes du système solaire, après celles de la Terre et de la Lune, va sans nul doute apporter son lot de surprises concernant la structure interne de ce corps (et donc de son évolution) et, par conséquence, de celle d'autres planètes. Enfin, un dernier exemple montrant à la fois le dynamisme et l'implication sociétale des recherches menées en TS est la découverte du signal gravitationnel associé aux grands séismes terrestres qui, parce qu'il se propage à la vitesse de la lumière, pourrait servir de précurseur d'alerte des tsunamis associés.

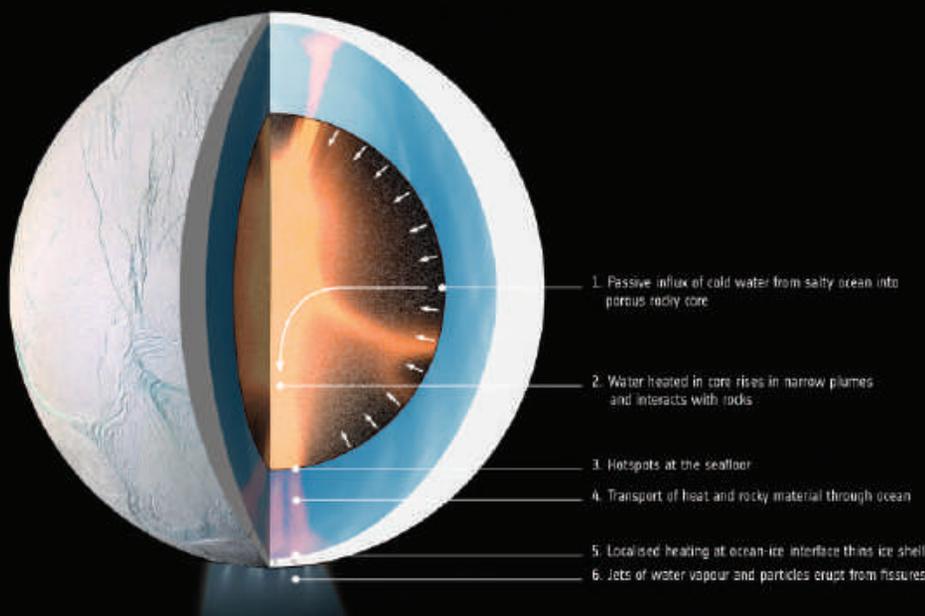
Ces quelques exemples illustrent plusieurs points essentiels de la recherche en TS. En premier lieu, la nature résolument interdisciplinaire des travaux menés: dans les cas cités ci-dessus, c'est le couplage effectif et efficace entre les domaines TS et AA qui est à l'œuvre. Ils illustrent également le fait que l'instrumentation de pointe, dans toutes ses dimensions, est un élément indispensable de la recherche en TS aujourd'hui. Ces instruments coûtent de plus en plus cher et demandent des organisations en réseaux (ex: RESIF, RéGEF), jusque-là peu développées en TS, appelant une évolution des pratiques et mentalités de notre communauté. Enfin, ils montrent aussi que les nouvelles frontières de la communauté, au sens du renouvellement de nos questions scientifiques, se situent entre autres à l'extérieur de notre globe.

L'ÉTUDE DE LA TERRE RESTE D'ACTUALITÉ

L'étude de notre planète n'est pas pour autant achevée. Plusieurs raisons à cela. Tout d'abord les profondeurs de la Terre restent encore très largement mal connues, notam-

ment du point de vue de la géométrie des structures et objets, ou de leur composition, et l'imagerie par les méthodes géophysiques, couplée avec les données géochimiques, l'expérimentation et la modélisation restent plus que jamais nécessaires. Dans le même ordre d'idée, l'étude des fonds océaniques, dont des pans entiers restent peu connus ou mal caractérisés, nécessitera encore des travaux d'exploration/d'observation, d'échantillonnage et d'analyse, afin de définir au mieux la dynamique d'évolution des domaines océaniques. Par ailleurs, la compréhension de l'évolution de notre planète reste le meilleur standard avec lequel interpréter les nouvelles données spatiales et il est indispensable de maintenir l'aller-retour, ne serait-ce que sur le plan conceptuel, entre observations spatiale et terrestre (ci-dessous).

Enfin, la communauté TS est directement concernée par deux grands volets sociétaux: les ressources et le risque associé aux phénomènes telluriques, comme déjà évoqué. Historiquement la communauté TS a été impliquée dans l'exploration des ressources métalliques et des combustibles fossiles, aujourd'hui largement décriés du fait de leurs impacts négatifs sur l'environnement. Cependant, de par son expertise et connaissance des processus impliqués dans la production de ces ressources, la communauté TS est idéalement placée pour participer à la transition énergétique visant au développement d'une économie respectueuse de l'environnement et dé-carbonée: nombre de vecteurs énergétiques alternatifs aux combustibles fossiles sont en effet largement issus de la terre profonde (H₂, géothermie, métaux critiques pour la production d'énergie d'origine éolienne ou solaire, etc.). Caractériser ces sources/vecteurs est un des défis majeurs que doit relever la communauté au cours des années prochaines, en concertation étroite avec les autres acteurs en R&D (cf § 7). S'agissant des risques naturels, TS est logiquement en première ligne pour la définition des signaux précurseurs utilisables lors de crises telluriques de plus ou moins longue durée et également pour la compréhension du fonctionnement à



Vue d'artiste de la structure interne d'Encelade, satellite glacé de Saturne, déduite de l'observation spatiale et qui pourrait héberger des systèmes hydrothermaux actifs, semblables à ceux connus sur la Terre

© Nasa, JPL-Caltech, Space Science Institute et LPG-CNRS, U. Nantes, U. Angers, ESA

moyen et long terme des systèmes générateurs de l'aléa. Les connaissances acquises dans ce domaine sont par ailleurs indispensables pour pouvoir distinguer les processus d'origine naturelle de ceux induits par l'activité humaine (ex : relation entre sismicité et exploitation géothermique).

LES DÉFIS DU NUMÉRIQUE ET DE LA SCIENCE OUVERTE

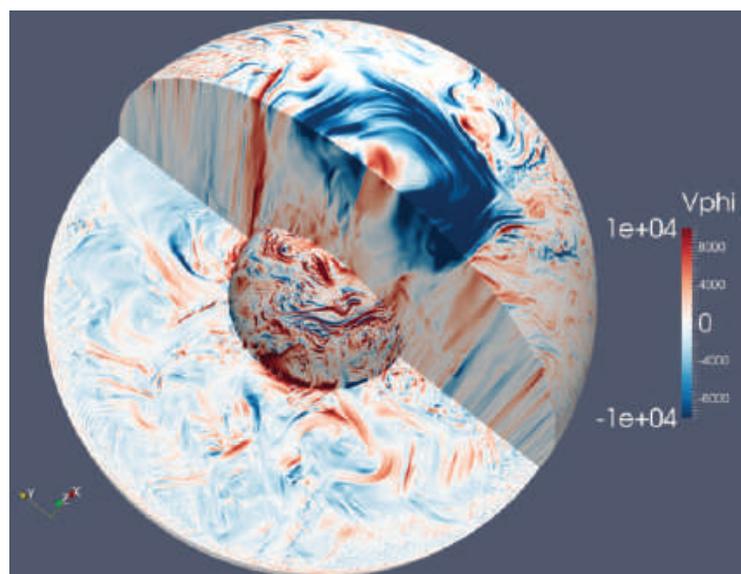
Au-delà des défis instrumentaux « classiques » abordés dans le chapitre 4.1, la communauté TS est confrontée, comme toutes les autres, à la révolution numérique. Les activités de recherche en TS, par leurs observations de phénomènes complexes sur de longues durées, génèrent des quantités de données en croissance exponentielle, qui nécessitent des traitements via des méthodes numériques chaque jour plus élaborées, ainsi qu'une ré-organisation en profondeur des moyens afférents (calcul, traitement, stockage) et de leur distribution. Ainsi, comme d'autres communautés, TS est en route vers l'exascale, pour atteindre des puissances de calcul exaflopiques (1018 d'opérations à virgule flottante par seconde) tout en consommant une puissance électrique raisonnable (cf défi 17 de l'INSU).

L'utilisation de l'Intelligence Augmentée (IA) pour, d'une part, extraire de la connaissance à partir de données d'observation et de simulation et, d'autre part, accélérer les simulations multi-physiques et multi-échelles, l'inversion et l'assimilation de données, est en pleine expansion dans tous les domaines scientifiques. Elle bénéficie aujourd'hui, au niveau national, des moyens ciblés du plan Villani (par ex. le calculateur national Jean Zay et les instituts 3IA). Si la communauté TS s'approprie de plus en plus ces méthodes, l'évaluation de leur potentiel disruptif requiert une analyse approfondie et un accompagnement substantiel qui sont abordés dans le chapitre 4.2.

Enfin, le développement de la Science Ouverte, l'accès ouvert aux données scientifiques, à leurs produits dérivés, et aux logiciels (codes, bibliothèques, outils) est également une évolution majeure, largement encouragée par les agences de financement de la recherche aux niveaux européen et français. Celle-ci requiert des transformations importantes des habitudes de travail, qui doivent être accompagnées. Dans ce contexte, le déploiement d'e-infrastructures de services sur les données, enclenché depuis plusieurs années, reste une tendance forte aussi bien au niveau national (par ex. ForM@Ter, DataTerra), qu'europpéen (par ex. EPOS, Copernicus). Ces aspects, qui dépassent le domaine TS, sont au centre du défi 14 de l'INSU.

LES GRANDES QUESTIONS ET/OU DOMAINES D'ÉTUDE

Les thématiques ou domaines stratégiques de recherche dont les grandes lignes sont résumées ci-dessous sont issus des réflexions de deux groupes principaux : d'une part la section 18, et d'autre part des différents sous-groupes de la CS-TS, coordonnés par les responsables des actions TelluS et PNP-TS. Ces groupes, en particulier via l'évaluation des projets soumis chaque année par l'ensemble de la communauté TS et au-delà (SIC, OA, AA, INEE...), mais également les discussions menées au sein de la CS-TS, sont les plus à mêmes d'identifier les lignes directrices fortes de l'activité actuelle, nécessaire assise de celle à venir. Le détail de chaque item se trouve dans le rapport de conjecture de la section 18 et en annexe pour ce qui concerne l'analyse des groupes de travail de la CS-TS.



Modélisation de la convection dans le noyau liquide des planètes

© Schaeffer et al. (2017)

La diversité des planètes telluriques et la dynamique de la terre interne : Caractériser la diversité des planètes et des processus planétaires dans le système solaire pour mieux comprendre comment les planètes telluriques se sont formées et évoluent, et ainsi identifier les spécificités de la planète Terre. S’agissant de la Terre, le couplage noyau-manteau, abordé au travers de l’imagerie géophysique, la modélisation 3D (figure p. 15), et de l’expérimentation à très haute pression et température, reste un secteur d’étude clé de la communauté TS.

L’exobiologie, l’habitabilité des planètes, l’origine du vivant, son évolution sur terre : L’origine de la vie est devenue une thématique à part entière, partagée entre TS et AA, avec la recherche de traces de vie (bio-signatures) terrestres et extraterrestres. La complexification grandissante des écosystèmes, vue par le registre fossile, la diversité des crises les affectant, leur répartition spatio-temporelle et leur sélectivité sont autant de questions d’étude fondamentales pour les années à venir.

Les domaines océaniques : Il s’agit ici d’un chantier stratégique qui nécessite la mise en œuvre de plusieurs approches, ainsi qu’un partenariat Européen et international, en continuité de ceux déjà opérationnels, à l’image de ce qui se fait dans le domaine spatial. L’enjeu est ici la compréhension des processus à l’œuvre dans la fabrication des fonds océaniques et leur cortège d’implications sociétales (énergétiques, risques...) et environnementales.

La déformation lithosphérique et aléas telluriques : L’étude des processus à l’œuvre dans les déformations lithosphériques et des aléas telluriques (séismes, éruptions volcaniques, glissements gravitaires et tsunamis) repose sur des enjeux à la fois fondamentaux, sociétaux et économiques. Identifier le détail des processus physiques et chimiques profonds permettant à notre planète d’être un objet « vi-

vant », c’est-à-dire évoluant dans le temps du fait de son activité interne, reste une priorité pour la communauté TS.

Les couplages internes-externes. De la même façon que l’étude des couplages entre noyau et manteau est importante, celle des interactions entre manteau et réservoirs superficiels, notamment pour ce qui concerne la genèse de la croûte continentale et l’établissement et la préservation des conditions habitables de surface, reste essentielle. La question du maintien du bouclier magnétique, garant de la préservation de l’atmosphère et de l’habitabilité de notre planète, demeure une autre interrogation de premier ordre.

Le relief, l’érosion et le routage sédimentaire : l’effet sur les cycles biogéochimiques de l’érosion d’une chaîne de montagnes, la mesure et la modélisation de la dénudation, le transport gravitaire profond ou la modélisation analogique et numérique du couple érosion/sédimentation, sont les thèmes principaux de cette thématique.

La dynamique des climats et écosystèmes anciens : En lien avec les deux précédents items, l’étude des climats et des environnements anciens nous renseigne sur le fonctionnement et les perturbations des enveloppes superficielles du système Terre. Leur archivage dans les couvertures sédimentaires océaniques et continentales permet d’explorer les impacts et les rétroactions des forçages biologiques, climatiques et géodynamiques au cours des temps géologiques (figure ci-contre).

L’âge et durée des processus géologiques : La datation des processus reste un impératif absolu en TS, en allant des temps longs aux temps courts : mieux connaître les caractéristiques temporelles des dynamiques des planètes telluriques pour mieux comprendre notre planète d’aujourd’hui, ainsi que son passé, et d’une façon générale, l’évolution dans le temps des corps planétaires « échantillonnables ».



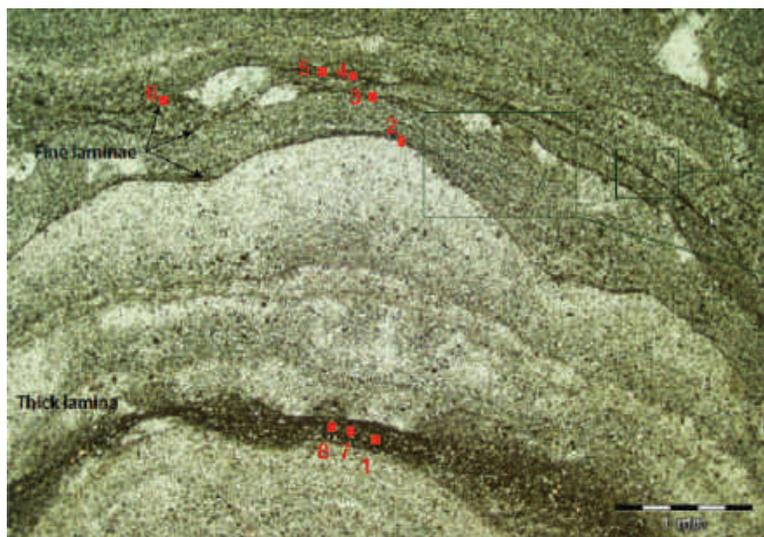
Volcan Tungurahua, Équateur

© B. Scaillet

Le calage temporel est par ailleurs indispensable lorsqu'il s'agit de décliner/tester les modèles à des fins prédictives, avec des implications socio-économiques immédiates (risques, exploitation de la ressource du sous-sol...).

L'apport des sciences de la Terre dans la transition énergétique et écologique. Il s'agit en particulier de l'imagerie 3D à haute résolution des croûtes continentale et océanique (tomographie électrique, bruit sismique...), de la prédiction de la localisation des sédiments et le dimensionnement des hétérogénéités associées, de la description pétrophysique et géomécanique des roches réservoirs ou sièges d'interaction avec des fluides, de l'étude et la compréhension des interactions minéral-vivant, qui sont autant de domaines d'étude nécessaires pour effectuer cette transition.

En parallèle de ces axes traditionnels, des thématiques inter-instituts ont muri, au travers desquelles l'expertise technique développée par les équipes TS est mise à profit sur des questions transverses. En particulier, la **géochimie des isotopes non-traditionnels** (i.e. tous les systèmes isotopiques à l'exclusion de C, H, N, O et S) apporte un nouveau regard sur les processus biologiques et leurs dérégulations pathologiques avec des applications en paléobiologie ou dans le domaine des géosantés. La mesure des compositions isotopiques est typiquement une expertise de l'INSU, dont les laboratoires sont le creuset d'actions spontanées qui veulent élucider des questions de société liées à la santé ou plus fondamentales en relation avec l'évolution de la vie terrestre. **De même, la géobiologie**, thématique en émergence, entend répondre aux questions posées par des géologues via les outils de la biologie (en partie) adaptés aux objets minéralogiques/pétrologiques, combinés aux outils classiques des sciences de la Terre (microscopies, spectroscopies, spectrométries de masse, mesures magnétiques, etc...) qui eux doivent être adaptés aux objets biologiques. Ces deux derniers axes sont développés en annexe.



Analyse *in situ* par NanoSIMS (carrés rouges) des isotopes du soufre de nanopyrites présentes dans des lamelles carbonées (5 à 20 microns d'épaisseur) enduites à la surface de stromatolithes de la Formation Tumbiana (Australie occidentale) âgée de 2,7 Ga. L'étude confirme une origine biotique des nanopyrites en accord avec une participation active de la réduction microbienne du sulfate dans le cycle biogéochimique du soufre au Néoarchéen.

D'après la figure 1 de Marin-Carbonne et al. (2018)

LES OUTILS EN TERRE SOLIDE

Instrumentation

Dans le domaine des Sciences de la Terre Solide, les développements instrumentaux jouent un rôle crucial pour atteindre ou simplement maintenir, un niveau d'excellence scientifique. Deux grands domaines scientifiques (pétrologie-géochimie-pétrophysique et géophysique au sens large) sont fortement dépendants de techniques analytiques et d'instruments de pointe. Les communautés se sont donc organisées pour mettre en place des infrastructures de recherche, mettant en réseau ces équipements au niveau national. La communauté des géochimistes, minéralogistes, pétrologistes, et pétrophysiciens est regroupée au sein du réseau RéGEF (240 chercheurs, 235 IT, 117 M€ d'équipement, coûts complets 21.7 M€/an avec 15.3 M€ de frais de personnel) et la communauté des géophysiciens est réunie au sein de l'infrastructure de Recherche « RESIF » (70 chercheurs, 90 IT, 12 M€ d'équipement, coûts complets 7.8 M€/an avec 3.6 M€ de frais de personnel). Les orientations futures des réseaux d'instrumentation RéGEF et RESIF sont présentées ci-dessous. Les besoins instrumentaux concernant le calcul scientifique au sens large et les aspects d'archivage et stockage de données sont traités explicitement par la suite (§4.2 et §4.5).

INSTRUMENTATION EN GÉOCHIMIE, PÉTROPHYSIQUE ET PÉTROLOGIE EXPÉRIMENTALE

Les progrès des deux dernières décennies dans l'expérimentation et l'analyse apportent des gains substantiels en termes de précision et rapidité de mesures. L'expérimentation permet maintenant de reproduire et contrôler les conditions physicochimiques complexes typiques des systèmes géologiques. Les mesures *in situ*, en développement croissant, et *post mortem* sont utilisées de façon complémentaire pour décrypter le comportement des échantillons en 4D (espace et temps). On observe une augmentation constante de la diversité des méthodes analytiques utilisées (ex. spectroscopie et tomographie rayons-X en synchrotron, cartographie cristallographique haute-résolution) pour caractériser la réponse des matériaux soumis aux conditions expérimentales ou géologiques. La comparaison entre charges expérimentales et échantillons naturels se fait à des échelles de plus en plus fines, ce qui nécessite un développement constant des outils de caractérisation par imagerie (microscopie électronique, tomographie), spectroscopie (ex. absorption infrarouge en cavité optique) et analyse chimique.

L'analyse géochimique profite d'innovations technologiques majeures dans les domaines de la spectrométrie de masse (ex. *Time of flight*, *Fourier-transform ion spectrometry*). Le parc analytique du réseau RéGEF, qui inclue les instruments nationaux du domaine TS-INSU, aura besoin d'être renouvelé pour permettre à la communauté de relever de nombreux défis en produisant des mesures toujours plus précises sur (I) des échantillons plus petits et (II) des grandes séries, mais aussi (III) en développant une instrumentation *in situ* hors de nos laboratoires (c'est-à-dire installée de façon pérenne sur des sites remarquables). Ce dernier point est fondamental car il va permettre aux données géochimiques d'acquies la même dynamique que les données géophysiques pour décrire les événements discrets liés aux aléas sismiques et volcaniques, et ainsi participer à leur compréhension et contribuer aux opérations de surveillance.

Optimisation d'un spray d'injection pour spectromètres de masse à source plasma (ICP-MS) grâce à l'utilisation d'une caméra haute fréquence montée sur binoculaire. Cette mise au point analytique permettra de réaliser des analyses isotopiques, multi-élémentaires et nanoparticulaires à faible débit sur de très faibles volumes d'échantillon (quelques dizaines de microlitres seulement). © C. Chauvel



Dans le domaine de l'innovation technologique, la collaboration entre les équipes de RÉGEF et celles des autres instituts du CNRS est certainement à encourager et à formaliser par des actions interdisciplinaires d'instrumentation (auprès de la MITI et de collaborations avec des constructeurs) pour permettre de lever d'autres verrous analytiques. L'extrême complexité des échantillons impose souvent des études avec des techniques de pointe ayant une très haute résolution spatiale, permettant d'accéder simultanément à des informations structurales et chimiques. Ceci a été mis en œuvre au travers de grands instruments en service national (lignes de lumière, sondes ioniques, microscopes électroniques...) qui devront être modernisés pour maintenir et faire évoluer leurs performances. Le parc devra aussi suivre les innovations technologiques récentes qui permettent d'envisager un saut vers l'échelle nanométrique grâce aux développements (I) des MET corrigés couplés à des spectromètres de perte d'énergie à ultra-haute résolution spectrale permettant de se rapprocher des performances des synchrotrons, et (II) des sondes atomiques

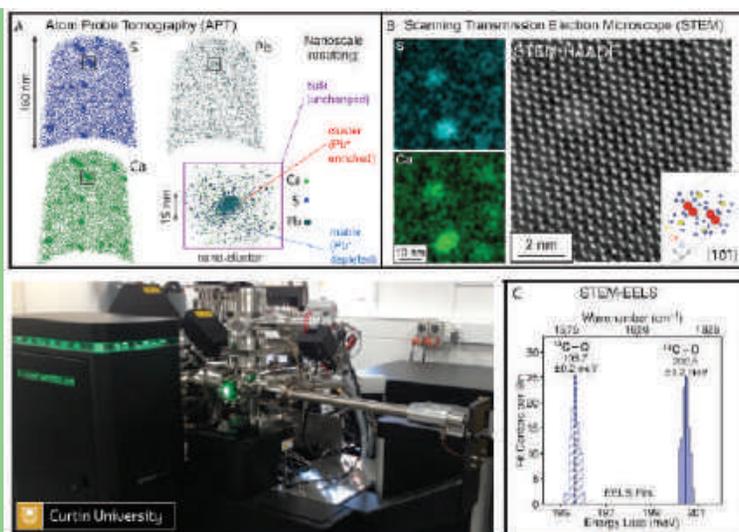
tomographiques (APT, figure ci-dessous) et ToF-SIMS, qui permettent l'accès aux informations isotopiques à l'échelle nanométrique. Ces évolutions nécessitent des plateformes nationales puissantes et évolutives, accessibles à tous et largement ouvertes aux thématiques des divers acteurs de notre communauté, ainsi que le renforcement des outils et des compétences dans les laboratoires, pour maintenir leur compétitivité au niveau des exigences internationales. Ces évolutions ne pourront se faire que grâce à un personnel qualifié suffisant comportant à la fois des chercheurs de haut niveau international et des ingénieurs et techniciens aux expertises pointues.

INSTRUMENTATION EN GÉOPHYSIQUE

Les recherches dans le domaine Terre Solide de l'INSU requièrent à la fois des instruments de laboratoire et des instruments de terrain. Qu'ils soient fixes ou mobiles, ces instruments doivent être adaptés aux enjeux scientifiques actuels qui nécessitent notamment, en sus des moyens d'observation traditionnels :

- Une meilleure couverture du domaine océanique et de la transition Terre-Mer (continuité et homogénéité des observations) *via* le développement d'observatoires fond de mer, ponctuels (ex.: le volet français de l'European Multidisciplinary Seafloor and water column Observatory – EMSO-France) ou plus étendus, sous forme d'antennes multi-physiques en sismologie et géodésie, et couplés à des levés in-situ haute résolution.
- Un continuum entre la mesure localisée in-situ et la mesure spatialisée satellitaire *via* des systèmes embarqués (avions, drones, bateaux, engins sous-marins...) dont le mouvement doit pouvoir être finement caractérisé.
- Des observations multi-paramétriques (dont environnementales) à l'échelle de réseaux d'observation permanents ou de sites dédiés à fort intérêt scientifique (zone de faille, volcan, site géothermique, bassin versant, ...), afin de mieux séparer les différents phénomènes qui produisent les signaux mesurés.
- Une réponse rapide lors de crises *via* une instrumentation terrestre et fond de mer adaptée, disponible à la communauté, et facilement déployable.
- Une instrumentation de pointe en laboratoire permettant une meilleure compréhension de la cause des variations de paramètres physiques tels que, par exemple, le magnétisme et son enregistrement au cours des temps géologiques.

Ces instruments géophysiques doivent détecter des signaux de faible amplitude, en particulier pour l'étude de phénomènes transitoires, et autoriser, en cas de besoin, une forte densité spatio-temporelle des mesures en ne mobilisant qu'un nombre réduit d'opérateurs. Ils doivent être adaptés à des environnements extrêmes ou complexes (fonds marins, forages profonds, zones montagneuses, environnements glacés, zones urbaines...) tout en étant économes en énergie, et permettant l'acquisition sur des temps longs, le cas échéant. Des ruptures technologiques viennent progressivement relever ces défis en termes d'instrumentation.



A-B: L'étude combinée de monazite par sonde atomique tomographique (APT; A) et Microscope Electronique en Transmission corrigé sonde (STEM; B) ouvre la voie vers la nanogéochronologie et la possibilité de tracer des processus indétectables à plus grande échelle. Notez la présence de nano-clusters riches en CaSO_4 (A-B) dans lesquels du Pb radiogénique (A) a été piégé 100 Ma durant. En APT, chaque « point » correspond à un atome (le volume total analysé ici correspond à 20 Millions d'atomes; A). L'image MET à haute résolution (STEM-HAADF; B) permet de visualiser les atomes lourds (Ce) bien ordonnés dans la monazite.

D'après Seydoux-Guillaume *et al.*, 2019

C: Les MET de dernière génération (STEM-EELS) permettent d'associer une ultra-Haute résolution spectrale (<6 meV) à une excellente résolution spatiale (~ 1 nm) et, par exemple ici, de distinguer les signatures isotopiques en C^{12} et C^{13} , différentes de 4.8 meV seulement, dans les spectres vibrationnels (stretching C-O) de la L-alanine ouvrant des possibilités gigantesques proches des analyses par synchrotron.

D'après Hachtel *et al.*, 2019

De nouveaux concepts émergent, limitant voire supprimant complètement la partie mécanique de la mesure. Citons en particulier les systèmes reposant sur la fibre optique pour mesurer des déformations statiques et plus récemment des mouvements dynamiques où chaque élément d'une fibre standard devient un capteur sismologique. La fibre est également à la base de systèmes portables autorisant la mesure du champ de rotation sismique qui était jusqu'alors inaccessible aux sismologues. En gravimétrie, des systèmes utilisant la chute d'atomes froids permet des mesures absolues innovantes du champ de pesanteur au moyen d'instruments portables (*Absolute Quantum Gravimeter* financé par l'EquipEx RESIF-CORE, qui fournit des enregistrements continus à une précision de 10^{-9} g) ou embarqués sur des plateformes mobiles (instrumentation ONERA pour des mesures du champ statique entre les domaines marins et terrestres). À plus long terme, les gains de précision des horloges atomiques laissent envisager une détermination directe du géoïde sur de grandes distances et le suivi de ses variations temporelles.

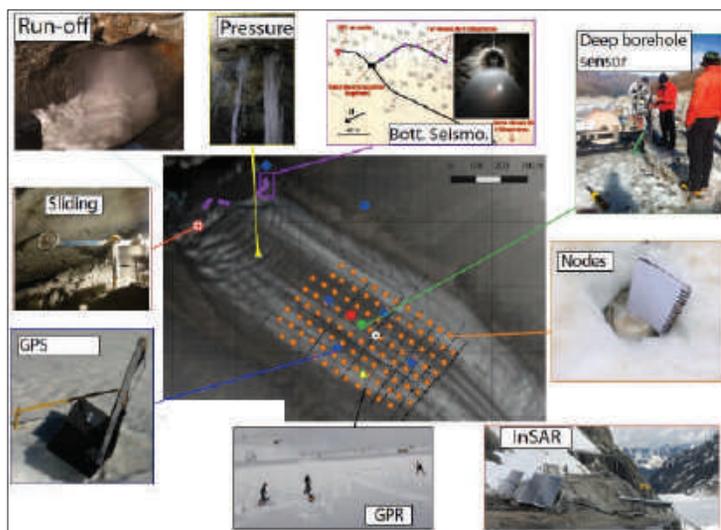
Une autre tendance forte réside dans la migration progressive des systèmes instrumentaux d'un mode centralisé d'enregistrement à un mode distribué reposant sur des modules unitaires, miniaturisés et souvent à coût réduits : « nodes » sismiques (figure ci-dessous), MEMS, récepteurs GPS mono-fréquence, puces RFID, bouées dérivantes type Mermaids, hydrophones... De tels systèmes distribués apportent des avantages considérables en termes de flexibilité, modularité et fiabilité, et autorisent le déploiement de réseaux hyper-denses sur des cibles dédiées. Les défis résident dans I) la capacité à enregistrer et à transmettre de grands volumes de données simultanément, II) l'autonomie en énergie permettant une prise de mesures dans la durée, et III) la maîtrise de leurs coûts sans réduire la qualité des données. La création de parcs constitués de centaines à milliers d'unités génère également de nouveaux besoins quant à la gestion et à l'analyse des énormes flux de données. L'intelligence artificielle doit apporter des solutions pour la fouille des données brutes et, lorsqu'elle est embarquée dans les unités, la transmission d'informations pertinentes issues de traitement en temps réel. En outre, l'internet des objets ouvre le champ à un contrôle système à distance,

avec ou sans l'intervention d'un expert, permettant à la machine de prendre des décisions stratégiques de bas niveau au cours de l'évènement. Cela étant, l'autonomie croissante des instruments ne pourra se faire que grâce à l'implication de nombreux chercheurs et ingénieurs qui conçoivent les instruments et les traitements de données adaptés.

Plus globalement, des actions transverses au CNRS sont à encourager pour faire émerger des instruments novateurs, comme ce fut le cas, par exemple, pour la tomographie muonique. Les collaborations entre les entreprises innovantes françaises de ces domaines et les unités du CNRS-INSU doivent être maintenues voire amplifiées. Enfin, la communauté doit rester partie prenante dans la préparation des futures missions spatiales (suites envisagées de GRACE, InSight, mission de retour d'échantillons martiens) qui sont, au-delà des enjeux scientifiques propres, à la source de progrès instrumentaux à larges retombées.

DIVISION TECHNIQUE (DT)

La DT est traditionnellement moins sollicitée par les équipes TS que dans les domaines Atmosphère-Océan-Atmosphère (OA) ou Astronomie-Astrophysique (AA), en particulier parce que les instruments nécessaires à la recherche dans notre domaine sont généralement disponibles commercialement mais aussi par manque d'anticipation d'un plan de charge et de précisions des demandes de crédit sur les aspects techniques, ou encore par manque d'expertise de la DT dans certains domaines précis (domaine des hautes pressions par exemple). Pour faciliter la collaboration, il faudrait plus de contacts informels entre la communauté TS et la DT, comme ceux créés depuis la mise en place de RESIF pour le projet de d'extension du Réseau Large Bande Permanent et la gestion des parcs mobiles disponibles pour la communauté à terre (GPSmob, SISmob, Gmob) et en mer (OBS). Le parc « marin » doit d'ailleurs être développé pour intégrer des instruments complémentaires en analogie aux parcs à terre. La réflexion qui a été menée au sein de la DT dans le cadre de sa prospective (automne 2020) a confirmé que la communauté TS sollicite peu les capacités de la DT en termes de R&D.



Déploiement de 100 nodes sismiques et 5 stations GPS des parcs mobiles INSU sur le glacier d'Argentière dans le cadre du projet RESOLVE (PI F. Gimbert et P. Roux, <https://resolve.osug.fr/>), complété par des mesures de glissement au fond du glacier (sliding), GPR (Ground Penetrating Radar), InSAR sol, des forages profonds, des sismomètres sur le lit du glacier (bott.seismo.), des piézomètres (pressure) et des mesures de débit (runoff).

Calcul et analyse de données

Il existe une très grande variété des applications scientifiques de la communauté TS dans le domaine du calcul et de l'analyse de données. En particulier, il existe un spectre continu entre les applications traditionnelles du HPC (High-Performance Computing) – simulation numérique, inversion et assimilation de données – et celles qui relèvent du domaine du Big Data et de l'IA, regroupées dans le terme HDA (High-end Data Analytics) depuis le traitement jusqu'à l'analyse statistique des données. Les modes d'organisation de ces activités et les ressources humaines en soutien, en particulier pour le développement, varient selon les sources de financement: depuis des profils individuels, en passant par des équipes de recherche ou des organisations transversales de laboratoire, des groupes-projets locaux (par ex. financés par l'ERC) ou nationaux (structurés autour de financements ANR), jusqu'à des collaborations internationales (par ex. SPECFEM) et des consortiums industriels (SEISCOPE, RING). Cette hétérogénéité est révélatrice d'une grande diversité de thématiques, d'expertises, et de pratiques de recherche, mais également d'une forme de fragmentation qu'il est important de mieux analyser et de corriger.

Les enjeux scientifiques concernent des questions liées à la Terre Solide (e.g. imagerie et dynamique des enveloppes internes, minéralogie, analyse de la déformation associée aux failles) et au-delà (environnement de surface proche, santé, enveloppes superficielles). Ils sont adossés à un nécessaire double enrichissement: enrichissement de l'outil de modélisation (augmentation de la résolution, physique augmentée par incorporation de processus supplémentaires = approches multi-physiques, couplage de méthodes, couplage d'échelles) et enrichissement de l'information utilisée pour asservir cette modélisation (modèles conceptuels, plus grands flux de données, données multi-sources et multi-échelles et pour certains d'origines très variées incluant les données *in-situ*, spatiales, et d'expériences de laboratoire). Concernant le traitement et l'analyse de données, dans certains domaines le traitement va entraîner la manipulation de plusieurs centaines de To (par ex. monitoring des déformations produites par l'InSAR, analyse de séries temporelles d'images spatiales, recherche de signaux faibles dans les banques de données sismologiques et satellitaires, émergence des données de fibre optique). Un autre enjeu important en lien avec la quantification de l'aléa est la gestion et la quantification des incertitudes le long des chaînes d'analyse/traitement. Ces enjeux soulignent la convergence entre HPC et HDA pour notre communauté.

OBSTACLES ET LACUNES

L'analyse de la prospective sur les aspects numériques fait apparaître un certain nombre d'obstacles, certains partagés par l'ensemble des communautés scientifiques, et de lacunes qui, elles, sont plutôt spécifiques à la communauté TS. Un premier obstacle concerne la complexité technique des plateformes de calcul dites convergées, capables d'héberger des applications HPC et HDA, qui intègrent des technologies variées (CPU, accélérateurs) et une mémoire distribuée de façon complexe et hiérarchique. L'exploitation efficace de ces infrastructures, qui émergent avec l'essor de l'exascale, est un obstacle pour l'ensemble des communautés, y compris TS. En effet, même si peu d'équipes ont mis en avant le besoin d'une puissance exaflopique pour un ou quelques calculs disruptifs de taille exceptionnelle, il existe des perspectives d'utilisation des ressources exaflopiques pour la résolution d'un grand nombre de problèmes de taille intermédiaire, afin par exemple de quantifier les incertitudes via des ensembles de simulations ou pour aborder des problèmes inverses de façon probabiliste. Plusieurs obstacles méthodologiques ont également été identifiés, notamment sur les modélisations multi-physiques et multi-échelles, sur les approches probabilistes et stochastiques et sur l'utilisation de l'IA pour accélérer les simulations et les inversions ou assimilations de données.

Un certain nombre de lacunes existent sur le développement de services autour des données d'observation et de simulation. Tout d'abord, le développement logiciel autour du traitement de données apparaît comme découplé des infrastructures de données et également des services ou actions d'observation. Le mode de développement logiciel dans la communauté (cela concerne aussi le domaine de la simulation) est encore généralement trop dépendant des infrastructures utilisées. La mutation vers le développement de services déployés sur des infrastructures interopérables n'est pas encore engagée. Par exemple, les outils de conteneurisation des logiciels pour les rendre indépendants des plateformes, ou encore les outils de workflow pour construire des chaînes de traitement complexes ne sont pas encore adoptés systématiquement par la communauté TS. Ces lacunes concernent également la gestion des produits dérivés des données qui semble encore dans un état embryonnaire.

RECOMMANDATIONS

Les activités autour du calcul et de l'analyse de données concernent une composante assez importante de la communauté TS qui gagnerait à mieux s'organiser et se structurer pour (I) développer une compréhension commune sur l'ensemble du cycle d'utilisation des données et traversant les domaines HPC et HDA, (II) relever les défis (scientifiques, technologiques et organisationnels) dans les meilleures conditions, et (III) développer des collaborations de recherche avec d'autres communautés (par ex. mathématiques, physique, recherche informatique) autour de ces défis. Cette communauté TS numérique (au sens large entendu ici) doit être inclusive (i.e. ne pas être restreinte aux développeurs).

Un certain nombre d'actions pluri-annuelles pourraient être menées dans le cadre d'une structure de type GDR pour diffuser et soutenir les bonnes pratiques de développement logiciel, l'animation scientifique et technique, incluant des collaborations de recherche multi-disciplinaire, l'organisation de formations sur les aspects scientifiques et techniques associés à l'utilisation des données, du calcul et de l'analyse de données en TS, en ciblant notamment les nouvelles générations de doctorants, participer à des actions transverses HPC et HDA à l'échelle INSU, lancer une Action Nationale INSU Transverse sur le HPC visant à développer une stratégie nationale face aux enjeux de l'exascale.

ÉVOLUTION DES INFRASTRUCTURES

L'analyse fait ressortir le rôle stratégique des infrastructures numériques de proximité, en particulier des niveaux appelés Tier-3 (laboratoire et OSU) et Tier-2 (mésocentre), et le besoin de les faire évoluer pour répondre à l'augmentation des volumes de données utilisées et à la convergence entre HPC et HDA. Par conséquent les recommandations suivantes sont faites :

- Veiller à conserver un degré de souplesse suffisant dans l'exploitation des infrastructures numériques de proximité pour permettre le développement logiciel et le traitement et l'analyse des données. Cela nécessite de développer et de cultiver un dialogue autour des activités du calcul et de l'analyse de données au niveau des laboratoires et au sein des OSUs, d'encourager les chercheurs et ingénieurs de la communauté TS à s'impliquer dans le pilotage scientifique des mésocentres et de valoriser cet engagement ;
- Soutenir le développement de plateformes de services ouverts et interopérables de données et de calcul distribués et intégrant les différents niveaux, nationaux, régionaux et les OSUs (Défi 17). Ces plateformes pourraient constituer une contribution de l'INSU au développement de l'EOSC. Elles permettraient d'accélérer la logistique des données et des calculs entre ces différents niveaux et nécessitent d'améliorer le débit des réseaux numériques entre OSUs, plateformes de données et de calcul en se coordonnant avec Renater et avec les autres acteurs nationaux dont le CNES ou d'autres acteurs en TS (BRGM).

INTELLIGENCE AUGMENTÉE EN TS

L'utilisation des méthodes d'IA est en fort développement dans la communauté TS, en particulier dans le domaine de l'analyse des données d'observations, et a donné lieu récemment à des recrutements de jeunes chercheurs avec un haut niveau d'expertise, notamment via la CSS5 de l'IRD. Il est nécessaire de :

- Soutenir le développement de la thématique IA, afin de construire et diffuser une expertise spécifique à l'INSU et au domaine TS, et également pour étendre dans le domaine TS le champ d'applications de l'IA afin d'accélérer les simulations multi-échelles et multi-physiques, l'assimilation ou l'inversion des données ;
- Développer des actions pour promouvoir et développer des collaborations de recherche multi-disciplinaire autour des enjeux scientifiques TS associant chercheurs TS et chercheurs en IA au sein du CNRS (par ex. INS2I, INSMI) et avec d'autres organismes (par ex. INRIA) : i.e., projets de formations à créer ou renforcer, projets de recherche ciblés IA à amorcer via la Mission Interdisciplinaire du CNRS. Cet objectif a été également identifié dans les conclusions et recommandations du défi 13 de la prospective INSU.

LA SCIENCE OUVERTE

Les acteurs du numérique dans la communauté TS sont en grande majorité favorables au partage des objets digitaux (codes, workflows, bibliothèques, outils) et des produits de données dérivés (simulation, analyse de données) mais la politique d'ouverture et de gestion de ces données reste encore très hétérogène et peu soutenue. Il faut donc :

- Développer et soutenir une action pluri-annuelle pour structurer, rendre visibles et accessibles les outils numériques développés par la communauté TS : codes, logiciels, produits de simulation et d'analyse de données ;
- Accompagner et valoriser les efforts effectués pour ouvrir les outils numériques à la communauté. Par exemple via des critères explicites lors du recrutement et de l'évaluation des chercheurs et ingénieurs et des unités.

MOYENS HUMAINS

Il existe un réel besoin de renforcer les expertises en calcul scientifique dans la communauté TS avec des postes permanents d'ingénieurs de recherche. Ces ressources doivent être affectées au soutien du développement des applications et travailler en relation avec les experts HPC ou HDA des mésocentres, centres nationaux, ou autres structures pertinentes (par ex. maison de la simulation).

Il existe un réel besoin de nouveaux profils de chercheurs, par ex. data et computer scientists, dans la communauté TS. Ces nouveaux profils doivent pouvoir être pris en compte dans les commissions du CNRS et des universités.

Il existe un besoin de soutien (support et formation) sur les aspects génie logiciel, et pour la FAIR-isation des données numériques (ouverture des codes et des données de simulation). Ces expertises peuvent être mutualisées à l'échelle d'un OSU ou d'un mésocentre.

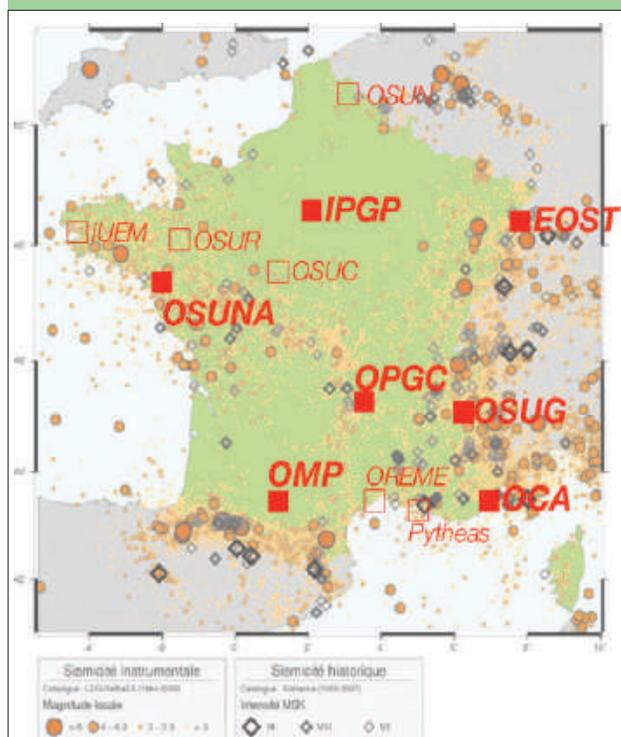
Les ANO/SNO

Depuis 2016, la stratégie et la structuration de l'INSU en matière de « Services Nationaux d'Observation » (SNO) ainsi que les grands principes qui leur sont associés sont décrits dans une note de cadrage (<https://www.insu.cnrs.fr/fr/les-services-nationaux-dobservation>). Cette note de cadrage rappelle que les SNO sont labélisés par la direction de l'INSU pour répondre au besoin de documenter sur le long terme la formation, l'évolution, la variabilité des systèmes astronomiques et des milieux terrestres, et de faire progresser les connaissances dans ces domaines. Elle rappelle également que les SNO, portés par les OSU ont vocation à apporter un service à la communauté scientifique. Les décisions de création de nouveaux SNO, de renouvellement, d'évolution ou de suppression de SNO existants, sont prises par la direction de l'INSU, après évaluation scientifique par les commissions spécialisées de chacun des domaines de l'INSU (CSAA, CSOA, CSSIC, CSNO du domaine TS).

Dans un objectif de structuration et de pilotage, les SNO sont désormais rassemblés par l'INSU au sein d'Actions Nationales pour l'Observation (ANO). Ces regroupements en ANO permettent à l'INSU d'afficher une logique de structuration qui soit en lien avec d'autres actions nationales (SOERE, IR et TGIR du Ministère de la Recherche) ou internationales (ESFRI ou organisations internationales) existantes ou en préparation. Ils doivent également permettre de mieux partager objectifs et savoir-faire entre SNO d'un même domaine. Notons qu'en TS il y a équivalence stricte entre ANO et SNO.

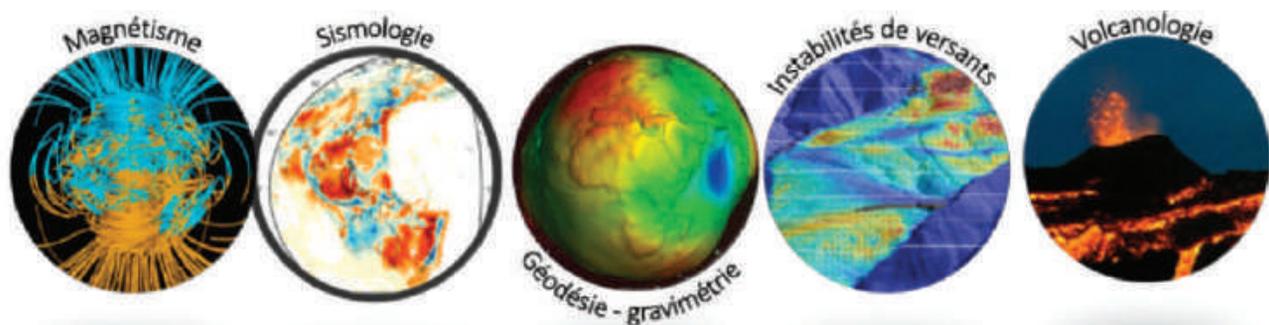
En TS il existe 5 Actions Nationales pour l'Observations (ANO) qui rassemblent les Services Nationales d'Observation (SNO) labélisés par l'INSU, ayant un coordinateur et partenaires et s'appuyant sur les OSUs (Fig. 13) :

Les principaux OSU impliqués dans les ANO/SNO en Terre Solide



- ANO-1 : Volcanologie (45 ETP)
 - SNOV : Services national d'Observation Volcanologique (IPGP, OPGC)
- ANO-2 : Sismologie (31 ETP)
 - BCSF-RéNaSS : Bureau Central Sismologique Français – Réseau National de Surveillance Sismique (EOST, OSUG, OMP, OCA, OSUNA, OPGC)
 - GEOSCOPE (IPGP, EOST)
 - RAP : Réseau Accélérométrique Permanent (OSUG, OMP, EOST, OPGC, OCA, IPGP, OSUNA)
 - RLBP : Réseau Large Bande Permanent (EOST, OSUG, OMP, OCA, OSUNA, OPGC, OREME, IPGP)
- ANO-3 : Géodésie et Gravimétrie (13 ETP)
 - RéNaG : Réseau National GNSS Permanent (OREME, EOST, OSUG, OCA, OMP, OPGC, OSUR, OSUNA, THETA)
- ANO-4 : Magnétisme (10 ETP)
 - BCMT : Bureau Central de Magnétisme Terrestre (IPGP, EOST)
 - SIIG : Service International des Indices Géomagnétiques (EOST)
- ANO-5 : Instabilités de Versants (4 ETP)
 - OMIV : Observatoire Multi-Disciplinaire des Instabilités de Versants (EOST, OSUG, OCA, THETA, OREME)
- Section Terre Interne (TI) du Conseil National des Astronomes et Physiciens (CNAP)

<http://www.obs.univ-bpclermont.fr/lmv/CNAP-TI/>



Les cinq ANO en Terre Solide

En 2020 une action a été lancée afin de créer un 6^e ANO centré sur les observations satellitaires au sens large, afin de répondre à la croissance exponentielle des données acquises par ce vecteur et concernant les processus telluriques.

En plus des Services Nationaux, il existe un label «Site Instrumenté» de l'INSU pour des projets limités dans le temps, requérant un meilleur suivi de phénomènes exceptionnels, et impliquant des interactions entre disciplines, des projets de recherches spécifiques ainsi qu'un déploiement en dehors du territoire français. Au cours de la dernière décennie, plusieurs sites ont été instrumentés, chacun fonctionnant à un niveau d'intensité adapté au phénomène observé: Corinth Rift Laboratory (CRL), European multidisciplinary seafloor observatory (EMSO), Laboratoire souterrain à bas bruit (LSBB), Observatoire hydroacoustique de la sismicité et de la biodiversité (OHASIS-BIO), Sites instrumentés pour l'étude des processus sismogéniques et de l'aléa sismique des zones de subduction (Chili et Mexique), Volcans explosifs - laboratoires indonésiens (VELI).

Le budget de fonctionnement annuel attribué par l'INSU aux 5 ANO est de 1 M€ (intégrant la part RESIF). Les ANO bénéficient également de financements extérieurs du MESRI, du BRGM, du CNES ou des collectivités territoriales. Ces 5 services d'observation diffèrent dans leur taille, leur fonctionnement et leur impact scientifique pour la communauté. Cela s'explique en grande partie par la nature des observations qui y sont effectuées. Ils peuvent être regroupés en deux grands groupes:

Groupe 1: Sismologie, Gravimétrie-Géodésie, Magnétisme
Ces 3 services d'observation ont en commun de produire des données concernant directement des phénomènes globaux: sismicité globale, structure de la Terre, forme de la Terre, champ de pesanteur, champ géomagnétique, etc.. De ce fait, ces services sont directement intégrés à des organisations mondiales échangeant des données, produisant des modèles, etc. Il s'ensuit une synergie scientifique et technique qui rend ces services d'observation visibles et scientifiquement productifs.

Groupe 2: Instabilité de versants et Volcanologie
Ces deux services ont en commun de travailler sur des sites instrumentés sièges de processus «remarquables» dont les données conduisent à des études que l'on peut qualifier

de « locales » pouvant être considérées comme des laboratoires naturels. L'intégration de ces services d'observation dans des synergies internationales est moins évidente que pour ceux du groupe 1 et passe nécessairement par une diffusion la plus large possible des données afin de susciter des collaborations et des études citant les services concernés.

Pour chaque ANO, l'INSU-CNRS (en concertation avec d'autres tutelles comme l'IPGP pour le SNOV) nomme un responsable qui gère les moyens et les financements, propose les priorités de recrutement en s'adossant à un conseil scientifique représentatif. La mission première est d'acquiescer et diffuser des données, dans le respect des normes internationales, accessibles simplement à toute la communauté scientifique (données niveau 1, 2...). Le responsable veille à maintenir l'interaction recherche-observation. Chaque ANO est évalué régulièrement (5 ans) par un comité indépendant, le CSNO, au regard de la pertinence des observations faites par rapport à la problématique scientifique, l'évolution de celle-ci et des méthodes d'observation et traitement des données et les potentialités futures.

Les données obtenues par chaque ANO doivent être rendues disponibles à la communauté (Science Ouverte). Certaines ANO ont une longue tradition d'archivage et de diffusion des données. C'est le cas de celles qui contribuent à l'étude de phénomènes d'ampleur planétaire comme l'évolution du champ géomagnétique, du champ de pesanteur ou la sismologie. Le magnétisme est intégré au programme InterMagnet et les données de l'observatoire de Chambon-la-Forêt sont diffusées en temps réel. Ce service contribue également à la diffusion de modèles de référence (IGRF) et de données spatiales. La gravimétrie bénéficie de la présence du Bureau Gravimétrique International sur notre territoire. La communauté des sismologues a, depuis quelques années, structuré ses procédures d'archivage et de distribution des données avec la mise en place de RESIF. Les ANO «Instabilités» et «Volcanologie» ont des sites de diffusion propres, hébergés et maintenus par les OSUs porteurs du service (EOST/OSUG et IPGP, respectivement).

Les moyens humains mobilisés par les différents services au cours de la dernière décennie sont restés globalement

constants. La part des CNAP est également stable. Depuis 2014, la section CNAP-TI a recruté en moyenne 2 Physiciens et 2-3 Physiciens Adjointes par an, tous affectés à l'un des cinq ANO. Malgré cet apport, tous les ANO demandent l'intervention croissante de personnels non CNAP (CNRS, EC...) en raison, entre autres, de l'augmentation continue de la technicité des mesures effectuées et de l'évolution du contour des ANO (changement de leur périmètre d'observation et/ou de la nature des observations faites). Ainsi le SNOV a intégré un 4^e volcan actif, avec la naissance du volcan sous-marin à Mayotte, rattaché à l'Observatoire du Piton de la Fournaise à la Réunion (IPGP). Cet évènement exceptionnel a nécessité une mobilisation non moins exceptionnelle de la communauté TS, dans le cadre d'une mission pilotée par l'IPGP qui a assuré la coordination entre tous les partenaires institutionnels impliqués (CNRS-INSU, BRGM, IFREMER), ainsi que l'interface avec les autorités politiques nationales et régionales au travers du Réseau de Surveillance Volcanologique et Sismologique de Mayotte (REVOSI-MA) et en lien direct avec la Mission Interministérielle créée à cet effet.

Les ANO TS sont par nature orientés sur l'observation de processus d'origine tellurique, qui se déroulent sur des temps longs, mais dont les manifestations en surface peuvent être catastrophiques. Les risques naturels associés à l'aléa font que l'observation en TS rejoint inévitablement la notion de surveillance, ce qui place la communauté TS dans une position d'experts vis-à-vis des pouvoirs publics. Le point clé qu'il convient absolument de traiter en anticipation de toute situation de crise/catastrophe naturelle est la définition précise de la chaîne de communication, et plus particulièrement de la position de la communauté académique le long de cette chaîne. Cet aspect est traité en détail dans le livre blanc édité en 2019 par le CNRS (Quand la Terre tremble, CNRS Editions coordonné par C. Grappin et E. Humler). Les évolutions futures peuvent concerner la nature ou le périmètre des objets (exemple de Mayotte) ou paramètres mesurés, mais également la participation d'autres partenaires institutionnels (ex BRGM, IFREMER, CEA, IRSN, CEREMA...) comme évoqué dans le chapitre 6 ci-après.

Infrastructures de Recherche - Très Grandes Infrastructures de Recherche

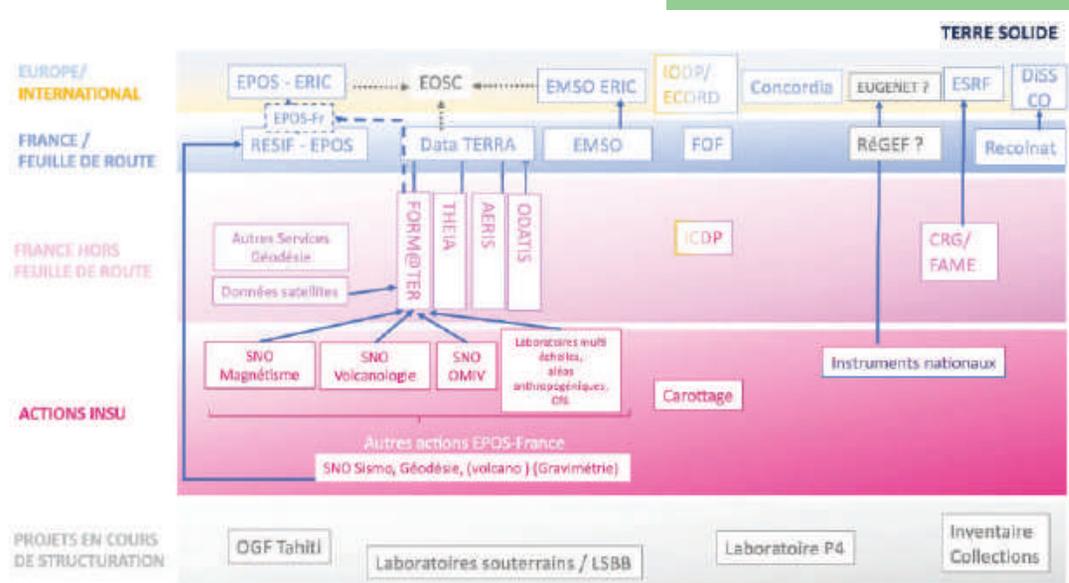
ÉTAT DES LIEUX

La communauté TS est maître d'œuvre de, ou émerge à, plusieurs IR-TGIR (figure) labellisées par le MESRI. La figure ci-dessous présente les principales IR-TGIR en lien avec le domaine Terre Solide ainsi que leurs liens avec les autres actions structurantes du domaine. Les projets en cours de structuration sont indiqués en gris en bas du schéma, sans distinguer ni le degré de maturation ni la priorité. Le détail de chaque instrument est donné en annexe.

On distingue les programmes internationaux, avec ECORD/IODP (une TGIR inscrite sur la feuille de route nationale) pour les forages océaniques et ICDP pour les forages continentaux. Au niveau européen, la communauté TS est fortement impliquée dans plusieurs ERIC (European Research Infrastructure Consortium) : d'une part dans l'infrastructure distribuée EPOS (European Plate Observing System) qui est inscrite sur la feuille de route ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures) et d'autre part dans EMSO (European Multidisciplinary Seafloor and water column Observatory) pour les observatoires et mouillages océaniques. Ces IR européennes ont leur miroir français EMSO-Fr et EPOS-Fr. L'infrastructure EMSO-Fr est portée par

un consortium IFREMER-CNRS et représente la contribution française à l'ERIC EMSO. Cette infrastructure nationale sert les domaines TS et OA et fournit également des données utilisées par des laboratoires de l'INEE et de l'IN2P3. EPOS-Fr est structuré autour de la TGIR Resif-Epos, une infrastructure nationale, et représente la plus forte contribution de la communauté TS à EPOS mais leurs contours ne sont pas identiques, certaines disciplines de RESIF ne contribuant pas à EPOS et inversement plusieurs activités françaises contribuant à EPOS sont hors RESIF ce qui nécessitera dans les années à venir une homogénéisation de la structuration française par rapport à la structuration européenne. La communauté TS contribue également via le pôle de données et de services ForM@Ter à l'infrastructure Data Terra rassemblant les données et services du système Terre et constituant un point d'entrée dans le futur cloud européen EOSC (European Open Science Cloud), en complément des services offerts par les infrastructures européennes du domaine de l'environnement (dont EPOS et EMSO). Il faut aussi mentionner que la communauté TS est très impliquée dans les lignes de lumière de l'ESRF et notamment des lignes CRG et dans une moindre mesure dans la gestion des collections de Paléontologie (ReColNat/Dissco), et la station franco-italienne Concordia.

Organigramme des IR/TGIR du domaine TS et leur lien avec les structures européennes



Au niveau national, les scientifiques du domaine Terre Solide sont impliqués dans la Flotte Océanographique Française (FOF), opérée par IFREMER.

PROJETS D'INFRASTRUCTURES

Parmi les projets de IR, le Réseau Géochimique et Expérimental Français (RÉGEF) est le plus avancé. Cette IR constituera le pendant de RESIF pour la géochimie-pétrologie-pétrophysique avec l'objectif d'une inscription sur la feuille de route du MESRI en 2021.

Avec la montée en puissance de la science ouverte et du « big data », le besoin de référencement et de gestion des collections d'échantillons est posé et pourrait être étudié en liaison avec les initiatives nationales et européennes portées par le MNHN (ReColNat et DiSSCO).

La question de la mise en place d'un Observatoire Géodésique Fondamental à Tahiti (OGFT) en collaboration avec la NASA est posée depuis quelques années. Cet observatoire serait positionné à l'interface entre astronomie et géophysique. Soutenu par le CNES, il contribuerait à la réponse française à la résolution de l'ONU sur l'importance du repère de référence géodésique mondial pour le développement durable. Le projet est prêt techniquement et permettrait des avancées dans la précision du repère de référence terrestre, de la rotation terrestre, et de l'orbitographie des satellites, ainsi que de la mesure du niveau de la mer.

La prospective CNES recommande la mise en œuvre d'un laboratoire de haute sécurité de type « P4 » où pourraient être confinés et analysés les échantillons extraterrestres provenant notamment de la planète Mars (Receiving facility du Programme « Mars Sample Return » à l'horizon 2030). Un tel laboratoire en Europe, et potentiellement en France, offrirait un lieu indépendant pour analyser les échantillons exceptionnels prélevés sur la planète Mars et permettrait aux scientifiques européens moteurs sur le sujet de rester au même niveau que leurs collègues américains. Comme pour l'observatoire de Tahiti (OGFT), le montant de l'investissement nécessaire et le modèle de fonctionnement restent à définir.

Enfin, EMSO-Fr et RESIF sont partenaires avec ILICO, l'IPGP, IFREMER et l'IRD du projet MARMOR, retenu dans le cadre du PIA3. Il permettra à échéance de 3 à 5 ans l'installation d'un observatoire marin à Mayotte, qui rejoindra, avec des conditions spécifiques liées aux missions d'observatoire volcanologique, l'IR EMSO-Fr. Des équipements mobiles innovants pour la géodésie et sismologie sous-marine intégrés à RESIF compléteront le dispositif. Les données seront standardisées et interopérables grâce à l'expertise acquise dans la mise en œuvre de EPOS.

EUROPE ET INTERNATIONAL

La campagne pour la prochaine feuille de route de l'European Strategy Forum on Research Infrastructures (ESFRI) a été lancée en octobre 2019 pour une publication en 2021. Une infrastructure sur le littoral et côtier dont l'Infrastructure de recherche Littorale et Côtière (ILICO) sera le miroir français et devrait être portée par la France. Les appels d'offres ont été lancés en 2020. La communauté TS profite de cet appel d'offre pour compléter la structuration au-delà de EPOS, par exemple pour la communauté des géochimistes/minéralogistes rassemblée dans RÉGEF.

Archives/pôles de données

Le domaine Terre Solide a une longue tradition de collecte de données, sous forme d'échantillons physiques (200 ans d'historique pour ce qui concerne le rassemblement de matériel dans les collections universitaires françaises de paléontologie/géologie), d'observations dans nos observatoires, de mesures lors de campagnes de terrain, océanographiques ou aéroportées, d'exploitation de missions satellitaires, d'analyses ou d'expériences en laboratoire.

Le partage des données (sous ses différentes formes) est un enjeu majeur pour une recherche de pointe. Historiquement, ce partage de données est une nécessité pour une grande partie des recherches en Terre Solide ou, encore, pour les recherches basées sur des données acquises en des lieux difficilement accessibles comme, par exemple, des carottes des forages des grands programmes internationaux, les échantillons ou les mesures acquis sur d'autres planètes (cf., ChemCam et Seis, le « géologue » et le « sismologue » martiens).

De la même manière que les recherches menées aujourd'hui (au XXI^e siècle) dans une discipline de la Terre Solide (TS) nécessitent souvent des données ou produits provenant d'autres disciplines de TS, d'autres domaines de l'INSU (astronomie-astrophysique, océan-atmosphère, et surfaces continentales) et d'autres disciplines scientifiques, les données du domaine TS intéressent aujourd'hui une communauté bien plus vaste que celle des laboratoires TS. Les données doivent donc être accessibles et utilisables (FAIR) y compris pour les non-spécialistes de la discipline.

Transformer des données analogiques en données numériques devient maintenant également une priorité. Il ne s'agit plus non seulement de numériser des enregistrements historiques mais de pouvoir à terme créer/fédérer des lithothèques et paléothèques virtuelles (figure ci-contre). Il est aussi indispensable d'avoir des archives pérennes et communes au niveau national et/ou international, structurellement via les services d'observation, des infrastructures de recherche nationales et/ou européennes, ou des structures internationales.



Un exemple d'archive de données très riche nécessitant une mise en réseau national : les collections paléontologiques dans les différentes universités et musées

© e-ReColNat

Certaines données présentes dans les laboratoires sont plus ou moins bien archivées localement. Toutefois, il n'existe encore aucun dépôt d'accueil et de distribution/partage de la donnée au niveau national. La première motivation de partage des données doit avant tout être scientifique, mais les financeurs, voire les revues scientifiques, imposent maintenant de fortes contraintes de publication/accessibilité des données, impliquant la mise en place d'outils adéquats par les tutelles. Les entrepôts de données doivent d'être pérennes et reconnus, un des moyens étant l'acquisition d'une certification internationale. Nous devons donc organiser, optimiser et construire les services d'accès aux nombreuses données TS. Ceci est en particulier le rôle des pôles de données et de services sur le système Terre (ForM@Ter pour la Terre Solide) fédérés dans l'IR Data Terra.

QUELQUES INITIATIVES REMARQUABLES EXISTANT DÉJÀ DANS LE DOMAINE TS

- Le recensement et la coordination de l'ensemble des archives de données du domaine Terre Solide (y compris la géodésie) sont largement avancés via ForM@Ter, qui fait partie de l'IR Data Terra ;
- Les archives nationales, internationales ou connectées internationalement, dont le CNRS est le coordinateur principal, sont notamment reliées à l'infrastructure de recherche RESIF-EPOS (European Plate Observation System – Réseau sismologique et géodésique français, centre de données sismologique, centre de données géodésique, BGI) et à ECORD-IODP. Les activités françaises associées à EPOS sont regroupées au sein de EPOS-France. En plus de l'activité RESIF, EPOS-France comprend: ISGI (International Service of Geomagnetic Indices, SNO, EPOS TCS magnétisme), le centre de données IPGP (EPOS TCS volcanologie), le centre de données VO-OPGC (partie d'un SNO, EPOS TCS volcanologie), et le centre de données pour la géothermie (EPOS TCS aléas anthropogéniques) ;
- La cyber-carothèque de la DT INSU ;
- Les archives des forages océaniques profonds sont basées hors du territoire national, en Allemagne, dans le cadre de IODP-ECORD ;
- D'autres archives coexistent au niveau national dans des domaines scientifiques spécifiques: SNO Bureau Central de Magnétisme Terrestre, SNO Observatoire Multidisciplinaire des Instabilités de Versant (données sismologiques disponibles sur RESIF), Sonel (niveau des mers)... ;
- Trans'Tyfpal (Inventaire des Types et Figurés Paléontologiques conservés en France) et l'infrastructure eReCol-Nat (Réseau des Collections Naturalistes françaises) qui mettent à disposition des collections naturalistes numérisées dont les données fossiles. Ces deux programmes sont actuellement arrêtés, mais les données compilées sont

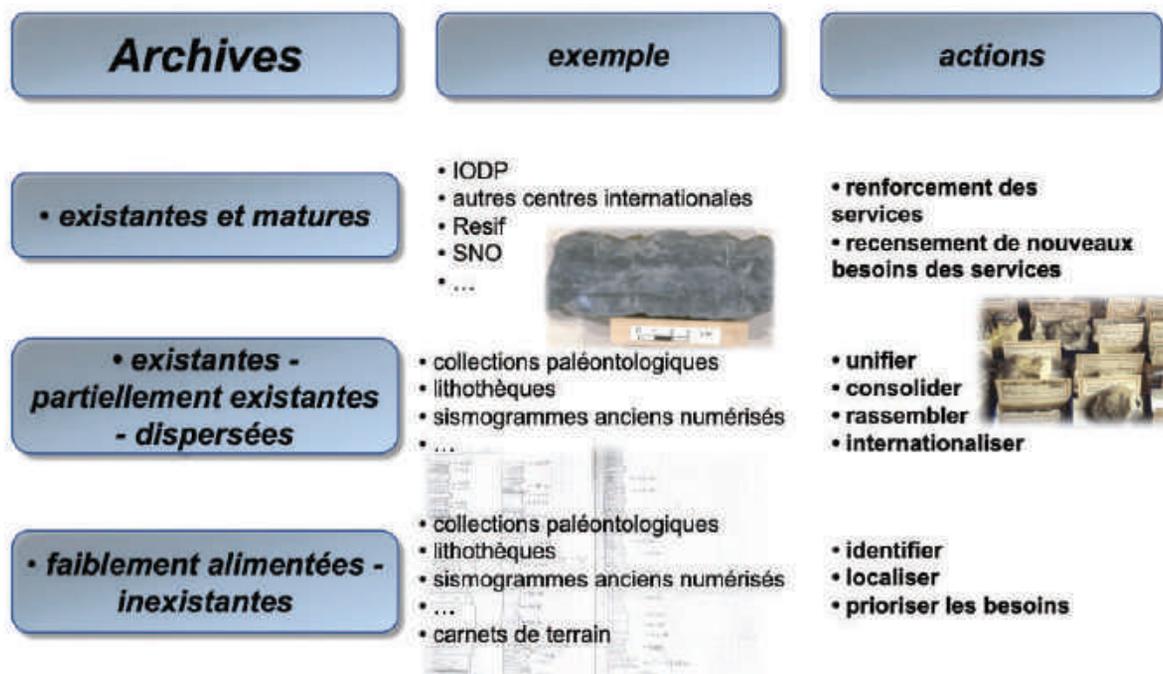
disponibles. Elles sont toutefois incomplètes et il conviendrait d'assurer l'interopérabilité avec d'autres projets qui pourraient voir le jour ;

- DiSSCO (Distributed System for Scientific Collections), infrastructure de recherche Européenne en cours de construction dont il conviendra de suivre le développement pour les actions nationales relatives aux données de collections.

Il existe également plusieurs centres de données dans le domaine TS dont le coordinateur/coordonateur principal n'est pas le CNRS, qui sont :

- IGN data center (plusieurs archives, dont ILRS, Doris et le RGP) ;
- BRGM: Données de forage, données sur le sous-sol français (qui font partie de EPOS-France) ;
- SHOM: données marégraphiques SONEL, données marines ;
- EMSO-France (IFREMER) ;
- CNES pour des données satellitaires (ex: PEPS pour les données Sentinel).

Un point commun à nombre de ces archives est une très forte insertion internationale. En pratique, cela veut dire que l'archive est internationale et reconnue par une structure internationale, typiquement une association de l'UGGI/IUGG, tel que AIG/IAG, AIGA/IAGA (par ex. le BGI ou ISGI), techniquement interconnectée avec d'autres centres de données (comme par exemple RESIF), et avec une base d'utilisateurs scientifiques internationaux. Cette internationalisation impose des contraintes extérieures comme, par exemple, des procédures de management et de fonctionnement durcies ou, encore, des formats imposés de données et de services. L'impact scientifique est néanmoins largement augmenté. À titre d'exemple, au cours d'une année le centre de données sismologiques de RESIF achemine environ 100 To de



Besoins de la communauté TS dans le domaine de la constitution d'archives de toutes natures (roches, fossiles, données numériques ...) et de leur pérennisation

données à environ 2 000 utilisateurs dans le monde au travers d'environ 20 millions de requêtes.

Les conditions de réutilisation des données sont un point important mais dont le cadre réglementaire reste flou et traité de manière hétérogène. Pour toute analyse quelle qu'elle soit (géochimie, tomographie, etc.) sur des spécimens de collection, il devient important d'archiver les informations et les données des expériences et d'y associer les spécimens/échantillons de collection concernés pour éviter des redondances d'analyses invasives qui endommagent les échantillons. L'interopérabilité des systèmes d'archivage est donc cruciale pour lier l'ensemble des informations. Si ces données sont accessibles, les conditions de réutilisation doivent être formalisées. À titre d'exemple, le travail sur la « Heritage Data Reuse Charter » qui se fait dans le cadre de l'infrastructure européenne sur les arts et humanités DARIAH est un modèle d'inspiration assez intéressant en particulier sur les principes de réciprocité, d'interopérabilité, de gestion, de citation et d'ouverture.

Les besoins de la communauté TS se déclinent selon la taille, la maturité et l'organisation des systèmes actuels (figure ci-contre).

- Archives existantes et matures. IODP, les centres reconnus internationalement ainsi que la majorité des archives dans RESIF ou basés sur des SNO sont dans ce cas. Pour ces centres, le premier défi est actuellement associé au renforcement des services, puisque le nombre d'utilisateurs et les quantités et volumes des requêtes augmentent, mettant ces archives sous des fortes contraintes de fonctionnement. Au fur et à mesure de l'augmentation des volumes de données digitales, de nouveaux besoins de service émergent pour permettre aux utilisateurs scientifiques d'obtenir des données prétraitées et réduites en volume (comme c'est déjà le cas de nombreuses données spatiales);
- Archives existantes ou partiellement existantes sur une même thématique mais dispersées, et travail de compilation non finalisé. On peut ici donner comme exemple les collections paléontologiques ou sismogrammes anciens numérisés. Pour cette catégorie, la priorité dans l'immédiat doit être d'unifier, consolider, rassembler, et internationaliser les archives pour une optimisation des efforts et pour un impact scientifique maximal. L'hébergement des données est un point crucial. À l'échelle des établissements, des solutions existent parfois (ex. 3Dthèque au MNHN) mais au sein des laboratoires les solutions de stockage restent plus fragiles;
- Archives existantes mais faiblement alimentées par les chercheurs ou archives encore inexistantes. Il est urgent d'identifier et prioriser les besoins. Les nouvelles archives devront être créées selon les besoins des utilisateurs, et dans une vision à long-terme et internationale. Il apparaît important de recueillir et discuter des besoins des utilisateurs lors de grandes réunions nationales (ex. RST). Des informations quant à ces archives pourraient être demandées directement aux directeurs d'unités et Observatoires en se basant sur le patrimoine existant des universités.

MOYENS HUMAINS ET TECHNIQUES NÉCESSAIRES À L'ÉLABORATION DE SYSTÈMES D'ARCHIVES RÉPONDANT AUX BESOINS ET PRATIQUES DE LA COMMUNAUTÉ TS

Le CNRS – INSU peut avoir un rôle clef à jouer dans ces actions, sous des formes diverses. Tout d'abord, sous forme d'organisation et de structuration des communautés, afin de capitaliser au mieux l'existant et de prioriser les besoins en moyens pour un résultat optimal en termes d'impact scientifique. Cette structuration peut prendre diverses formes. Notamment, l'INSU doit se doter de moyens de soutien aux actions de structuration autour des archives, en liaison avec l'IR Data Terra (par exemple sous forme d'un Appel d'Offre dédié pour la mise en place de la structuration – colloques, workshops). Il faut pour chaque type de données identifier clairement les partenaires institutionnels potentiels des actions, et garder comme priorité l'impact scientifique et l'internationalisation des services, sous les formes diverses que cela peut prendre selon le type de données.

Clairement, les développements de l'archivage et de la mise à disposition de données et de services opérationnels associés, y compris dans le cadre d'engagements européens ou internationaux, nécessitent des ressources humaines dédiées. L'INSU l'a bien compris via son implication dans les IR nationales et européennes et la création en décembre 2019 de l'UMS « Coordination Pôles de données et de services pour le Système Terre ».

ACTIONS RECOMMANDÉES

- La plupart des collections étant gérées au niveau local, il apparaît important de renforcer le partenariat du CNRS avec les projets des universités concernant le patrimoine. En effet, ce sont les universités qui pourront assurer la mise à disposition des locaux adaptés pour les collections;
- Les supports en personnels ITRF/BIATSS restent indispensables pour assurer une bonne gestion des collections. La politique des postes devrait être discutée entre CNRS et universités;
- Lorsque la gestion des collections est assurée par un personnel universitaire et non un conservateur, la reconnaissance de ces activités devrait être reconnue sous forme de décharge horaire, comme cela se pratique déjà dans certaines universités;
- Les universités et le CNRS devraient prendre en considération les besoins de formation des personnels sur les questions d'archivage, stockage, et de partage de données.

**LES RELATIONS
ENTRE TERRE
SOLIDE
ET LES AUTRES
DOMAINES INSU
ET INSTITUTS
DU CNRS**

Le domaine Terre Solide (TS) partage avec les autres domaines de l'INSU l'étude de la Terre et des planètes. Il met en œuvre une approche scientifique reposant sur l'observation, l'expérimentation et la modélisation. Ses objectifs visent à caractériser les évolutions passées et les processus géodynamiques internes ou externes qui les contrôlent, ainsi que les évolutions récentes qui incluent les processus anthropiques.

Ces objectifs nécessitent des études conjointes ou complémentaires de celles menées dans les domaines OA, AA et SIC et la mise en œuvre de techniques de mesure et d'analyse ou d'outils communs. En effet, l'étude de l'histoire, de la structure et du fonctionnement de la Terre implique aujourd'hui de tenir compte des interactions ou rétroactions avec les processus se déroulant en surface et dans les enveloppes fluides. La communauté d'intérêts avec le domaine AA est également large et variée. Elle est aussi ancienne puisqu'elle a conduit à la création de l'INAG il y a plus d'un demi-siècle (en 1967), devenu l'INSU en 1985.

Les sujets de recherche abordés nécessitent des interactions fortes avec d'autres disciplines et avec des chercheurs de laboratoires rattachés aux autres instituts du CNRS et avec ceux de nombreux organismes et établissements de recherche comme avec les universités.

La réponse aux défis majeurs que sont la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la transition vers des énergies bas carbone nécessite une synergie augmentée des acteurs concernés. La transition énergétique demandera d'autres matières premières que les hydrocarbures, notamment de métaux, mais aussi d'eau, d'énergies non carbonées (géothermie, H₂...). Elle demandera aussi de maîtriser les techniques de stockage durable du CO₂, H₂ et de déchets comme les déchets nucléaires. Les géosciences doivent renforcer les collaborations existantes avec d'autres instituts sur ces sujets : l'INEE pour les aspects environnementaux; l'INSHS pour les aspects économie des ressources et les impacts sociétaux; l'INSMI pour l'analyse et la gestion de données (analyse des flux de matière et d'énergie au niveau mondial) et le développement de modèles dynamiques adaptatifs; l'INSIS pour les liens entre ressources et énergie et les nouveaux matériaux; l'INC pour les techniques extractives, le stockage d'énergie, la biorémédiation, la décarbonation des hydrocarbures, etc. Au-delà du CNRS, de nombreux autres établissements participant aux alliances AllEnvi et Ancre, sont concernés: ADEME, BRGM, IRD, CEA, IFREMER, INERIS, CNES, IRSN, IGN...

SUJETS COMMUNS

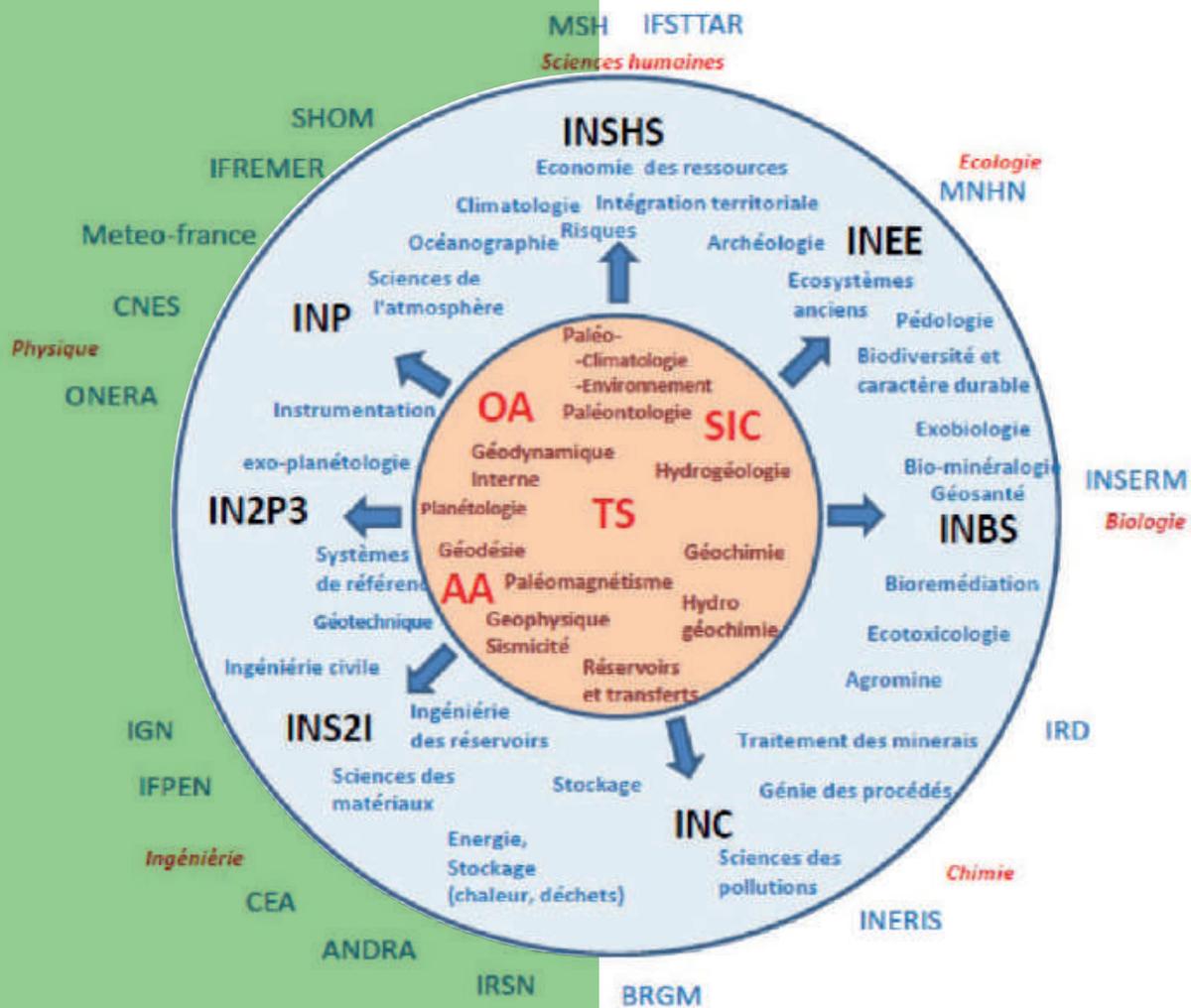
De nombreux objets ou sujets d'études, propres au domaine TS ou pour lesquels TS apporte une contribution indispensable, nécessitent des approches pluridisciplinaires. On peut citer la dynamique du littoral, les cycles de l'eau et du carbone, les risques telluriques (volcans, tsunamis, mouvements de terrain), la météorologie de l'espace, les ressources, l'énergie... Ils sont donc par définition trans-domaines. De même, plusieurs thématiques sont à l'intersection entre le domaine TS et d'autres champs disciplinaires, comme la géodésie, la planétologie, la paléoclimatologie, l'étude des écosystèmes anciens, l'érosion, les cycles biogéochimiques... et bien évidemment les traitements et curation (gestion) des données et la modélisation numérique. La figure suivante présente une cartographie de ces sujets et des interactions :

OUTILS/INFRASTRUCTURES COMMUNES

Le domaine TS pilote ou est partie prenante d'infrastructures de recherche, d'infrastructures et de très grandes infrastructures de recherche en commun avec les domaines OA, AA et SIC : IODP, la Flotte Océanographique Française, EMSO, Data Terra, ILLICO, RéGEF. Il utilise également de très grands équipements tels que les lignes de lumières (à l'ESRF ou Soleil) ou des plateformes nationales (LMC14, Aster...). Il en est de même pour les dispositifs d'observation. Le réseau GNSS de RESIF est utilisé par la communauté Océan-Atmosphère et inversement la communauté TS utilise les marégraphes de cette communauté. La communauté TS est aussi utilisatrice de moyens communs tels que les avions ou les centres de calcul. Enfin elle traite et analyse des données provenant de missions satellitaires (optique, radar, magnétisme, gravimétrie) qui intéressent également des équipes relevant des autres domaines de l'INSU.

LE PARTENARIAT

Les chercheurs du domaine TS mènent des travaux en partenariat avec de nombreux organismes qui tous ont des interactions avec les autres domaines de l'INSU. Certains de ces organismes sont cotutelles à côté des universités et grands établissements de nos UMR. Les relations avec ces partenaires ont aussi évolué. L'INSU ne s'occupe plus exclusivement de recherche amont et étiquetée fondamentale.



Le domaine TS dans son écosystème scientifique

En parallèle, les organismes de recherche plus finalisée mènent eux-mêmes des travaux fondamentaux et doivent faire face à des contraintes dues à leurs spécificités (missions, statut, mode de financement). Cela crée parfois des incompréhensions. Enfin, les équipes du domaine TS sont aussi en interaction avec certains organismes pour des aspects opérationnels liés par exemple aux risques telluriques. Ces relations sont grandement simplifiées dans les unités où les organismes impliqués sont cotutelles. Cela n'est cependant pas le cas pour les thématiques interdisciplinaires émergentes (ex. relations avec l'INSERM en géosanté). Il y a également des relations fortes avec des partenaires privés, parfois communes avec d'autres domaines de l'INSU, comme des entreprises liées à l'énergie, aux ressources carbonées, et à la demande récente d'énergie non carbonée (géothermie, stockage CO₂, H₂...) ou encore dans l'instrumentation de pointe (Sodern par exemple).

QUELQUES PISTES POUR LE FUTUR

- Systématiser la reconnaissance conjointe des ANO/SNO intervenant dans plusieurs domaines de l'INSU (ex les ANO sur le géodésie et les instabilités de versants pourraient être co-portées avec SIC);
- Renforcer et étendre des programmes co-gérés, à l'image de ce qui se fait au PNP, voire au PNTS. Les programmes CESSUR et ALEAS de TelluS pourraient être portés au niveau de l'institut;
- Renforcer la présence de TS dans les réponses aux AO de la mission pour l'interdisciplinarité (MITI);
- Augmenter implication de l'INSU dans les CID, et inciter les candidatures de CRCN à plusieurs sections du CNRS, notamment à celles ne relevant pas de l'INSU;
- L'interdisciplinarité évoquée en préambule demande à ce que des appels d'offres multi-organismes sur des sujets comme les ressources, ou l'utilisation du sous-sol, soient lancés, comme il existe des programmes dans le domaine du stockage des déchets nucléaires (ex NEEDS: Nucléaire, Energie, Environnement, Déchets, Société). Ceci permettrait, entre autres, de renforcer des collaborations avec les EPIC dont l'activité n'est pas nécessairement toujours bien articulée avec celle des équipes de l'INSU.

LES PARTENAIRES ACADÉMIQUES DE TERRE SOLIDE

A travers la prospective du domaine Terre Solide, une cartographie des objectifs stratégiques des différents organismes éventuellement partenaires permet à la communauté TS et INSU de s'appuyer plus pertinemment et fortement sur les spécificités de ces organismes (alertes environnementales, liens avec les territoires en métropole, pour le développement des pays du Sud, etc) dans l'atteinte de ses propres objectifs stratégiques. Les organismes académiques partenaires (IRD, CNES, BRGM, IFREMER, ANDRA, SHOM...) sont représentés à la CS-TS. Les partenaires participent aussi à la prospective de TS via les contributions demandées aux UMR ou via des chercheurs impliqués le plus souvent *intuitu personæ* (Conseil Scientifique de l'INSU et la section 18 du CoNRS) et non en tant que représentants de leur établissement. Certains partenaires (CEA/DAM, CNES) ont été sollicités pour des prospectives plus ciblées (Livre Blanc des Risques ou dans le domaine spatial). En 2018, un Comité Inter-Organismes auquel participent plusieurs organismes a été mis en place et s'est réuni à deux reprises pour faire le point sur la prospective inter domaines de l'INSU en cours.

Il est important de noter que les actions concertées entre l'INSU et ses partenaires académiques vont au-delà de l'action scientifique stricte. Ainsi, depuis plusieurs années, un stand France à l'AGU Fall Meeting est tenu conjointement par l'INSU, le BRGM, l'IRD et depuis peu l'IRSTEA, afin de faire mieux connaître la recherche française à la communauté internationale.

D'une façon générale, il est utile de distinguer la prospective scientifique proprement dite (identification de sujets émergents...), qui s'appuie évidemment sur les scientifiques plus que sur les organismes, de la partie structurelle (infrastructures de recherche, évolution des moyens d'observation, paysage européen et mondial, relations aux industriels...). Les organismes partenaires sont demandeurs d'une association plus étroite aux prospectives INSU pour les aspects structurels: IR, moyens d'observation, relations internationales ou avec les industriels.

La CS-TS est probablement un organe adapté à cette évolution, pouvant être un lieu opérationnel pour une première déclinaison des priorités stratégiques entre les organismes (programmes inter-organismes, SNO... voir ci-après). De façon plus large, il sera important d'assurer une bonne coordination de la CS-TS avec les groupes thématiques AllEnvi concernés, en particulier le groupe Terre Solide (co-animé par le BRGM et le CNRS), ou avec certains Grands Enjeux

Transversaux (par ex. Risques naturels et environnementaux), afin d'assurer une bonne représentativité des thématiques TS au niveau national. Dans ce qui suit, les différents instruments ou domaines de coopération sont passés en revue.

LES PROGRAMMES INTER-ORGANISMES

Pour le domaine TS, le Programme National de Télédétection Spatiale (PNTS) est actuellement le seul programme INSU cofinancé par plusieurs organismes (CNES, l'IGN, l'IRD, alors qu'il existe plusieurs programmes inter-organismes dans les domaines SIC et OA (EC2CO, LEFE). Dans le passé les chantiers MISTRALS et ARCTIQUE ont aussi été cofinancés par plusieurs organismes. Ces programmes INSU permettent d'amorcer, d'une part, des projets de recherche qui peuvent ensuite répondre à des appels d'offre plus ambitieux et, d'autre part, de développer des recherches qui ne peuvent pas se justifier immédiatement en termes de résultats scientifiques. Les développements instrumentaux et méthodologiques pour des observations émergentes pourraient ainsi s'appuyer des programmes existants dont on élargirait l'approche mais aussi sur des partenariats (INS2I, IFREMER, etc.).

Cependant, pour la plupart des organismes, les contraintes budgétaires ne permettront pas de multiplier ce type de participation à des programmes communs, mais mènera plutôt à un recentrage sur des appels ciblés thématiquement, à l'exemple de ce qui s'est fait par le passé pour SYSTER (2006-2010, participation du SHOM) ou pour l'Action Marges (participation BRGM). Les collaborations récentes ont en effet plutôt privilégié l'élaboration de programmes communs structurants (e.g. Référentiel Géologique de la France « RGF », OROGEN) hors TelluS. Un autre exemple est l'appel à projet interdisciplinaire « Défi Risques naturels » cofinancé par le CNRS et l'IRD via le MITI (Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires, INSU, INSHS, INEE...).

Évolution souhaitée

À l'avenir, plusieurs organismes pourraient s'investir dans des programmes thématiques comme aléas et risques environnementaux (renouvellement de l'APP « Défi Risques naturels » en 2021 en impliquant éventuellement d'autres organismes – des échanges sont en cours avec le BRGM, INRAE...) ou sur les ressources au sens large : notion de résér-

voir (stockage, géothermie, eau souterraine...), origine de la lithosphère continentale et ressources associées, thématiques à la limite avec les secteurs SIC ou OA (ressources en eau, zone critique...).

LES INFRASTRUCTURES DE RECHERCHE

Les infrastructures de recherche (TGIR et IR, voire détail en annexe) sont par définition des infrastructures multi-organismes qui permettent aux scientifiques de la communauté française d'avoir accès à des instruments de très haut-niveau. Pour TS, les IR-TGIR concernées (voire détail en annexe) sont RESIF, RéGEF, la FOF, Data Terra (Form@Ter), EPOS-France, EMSO-France, ECORD. La plupart des partenaires TS y sont associés.

Évolution souhaitée

Même si les TGIR et IR sont exemplaires associant dès leur genèse la plupart des partenaires l'ensemble actuel paraît complexe avec des redondances ou des superpositions (cf chapitre 4.4). Par exemple les dispositifs RESIF, EPOS-France et Form@Ter seraient plus lisibles (au niveau européen) avec un pilotage scientifique mieux coordonné. Une simplification et une meilleure adéquation avec les dispositifs européens faciliteraient la lisibilité du dispositif. Il est aussi souhaitable de faire évoluer ces IR dans le temps (évolution de RESIF, au départ un réseau d'instruments terrestres, vers les outils marins).

Les moyens techniques nationaux sont plus larges que les moyens d'acquisition et d'observation. Ils comprennent également des moyens numériques, et notamment des chaînes de calculs produisant de la donnée en routine (services scientifiques internationaux en géodésie, par exemple). Le positionnement de ces moyens numériques n'est pas encore stabilisé dans la construction actuelle du paysage (exemple du rattachement des services scientifiques de géodésie spatiale à ForM@Ter).

En l'absence d'une coordination et de moyens nationaux pour le stockage et la gestion de bases de données d'échantillons géologiques, plusieurs initiatives en parallèle sont en cours. IFREMER a mis en place, avec la participation du SHOM, un Centre de Ressources en Échantillons et Archives Marins (CREAM) dont les échantillons sont labélisés selon les standards internationaux. La construction de bases de données nationales interopérables, accessibles à l'ensemble de la communauté, est sans conteste un enjeu majeur pour TS (cf chapitre 4.5).

LES SERVICES NATIONAUX D'OBSERVATION (SNO)

L'INSU a mis en place depuis les années 1990 un processus de labellisation des services d'observation ayant un caractère national (ReNaSS, Renag, RAP, etc) ou international (Geoscope, Intermagnet, etc.). En règle générale et malgré la participation des partenaires académiques au CSNO, les partenaires sont peu impliqués dans les ANO/SNO-TS (à l'exception de l'IGN en gravimétrie, du CEA/LDG et du CEREMA qui interviennent en sismologie et plus récemment du CNES dans IsDeform) alors qu'ils sont assez fortement impliqués dans les SNO des domaines SIC, OA voire AA (IRD, IGN...).

Évolution souhaitée

Une réflexion sur l'évolution des ANO/SNO est souhaitée par les partenaires: simplification d'une organisation historique, ouverture vers des domaines nouveaux (observation sous-marine, géodésie spatiale...), vers des espaces hors-métropole (par exemple les sites instrumentés comme VELL...). Dans les années à venir, l'enjeu pour les ANO/SNO sera aussi de mettre à niveau les moyens de diffusion de leurs observations (via Data Terra et l'UMS CPST: Coordination des Pôles de données système Terre) ce qui va demander un investissement assez lourd en temps ingénieur développeur.

LES PROGRAMMES INTERNATIONAUX

L'INSU-TS est impliqué dans EPOS (European Plate Observing System) *via* les IR RESIF et d'autres communautés formant EPOS-France (<https://www.epos-france.fr/>); dans l'observatoire européen multidisciplinaire des fonds marins et de la colonne d'eau EMSO (European Multidisciplinary Seafloor and water column Observatory, <http://emso.eu/>); dans ECORD, le consortium européen pour le forage océanographique (European Consortium for Ocean Research Drilling; <https://www.ecord.org/>), dans ICDP (International Continental Drilling Scientific Drilling Program; <https://www.icdp-online.org/>) et plus marginalement (pour TS) dans MISTRALS, le programme de recherche consacré à l'étude du bassin méditerranéen et de son environnement. L'IFREMER participe activement au développement de EMSO et ECORD-IODP. L'implication du BRGM dans le programme GeoERA (Establishing the European Geological Surveys Research Area) de l'Europe représente un atout pour TS.

Évolution souhaitée

Une meilleure coordination par l'INSU, ou éventuellement par d'autres organismes, de la participation française à des programmes internationaux permettrait une présence plus forte et plus visible de la France dans ces dispositifs.

GIEC ET CHANGEMENT GLOBAL

Les chercheurs TS sont traditionnellement peu impliqués dans le GIEC, qui n'est pas à proprement parler un programme international et concerne principalement les secteurs OA et SIC, et plus largement sur les aspects changements climatiques. Cependant, la communauté TS possède des compétences dans certaines approches géophysiques indispensables à la modélisation du climat global. Ainsi la compréhension/modélisation de l'évolution du niveau de la mer nécessite une estimation précise de l'épaisseur des glaciers à terre, laquelle est accessible à partir l'analyse de données satellitaires globales en gravimétrie acquises au cours des dernières décennies.

Il faut noter que la faible visibilité du domaine TS par rapport aux enjeux climatiques est à corriger, notamment dans le domaine des risques où des confusions sur le rôle du climat sur les enveloppes TS sont parfois faites. *A contrario*, certains domaines TS (paléosismologie) abordent aujourd'hui des périodes de temps dépassant les cycles sismiques accessibles et où les interactions avec le climat deviennent moins négligeables : le rôle des cycles de glaciation sur l'état de contraintes dans la croûte en est un exemple. Le renforcement de la visibilité de TS dans le domaine du changement climatique mais aussi du changement global et des objectifs du développement durable (liens avec FUTURE EARTH, BELMONT FORUM, etc) est un enjeu pour notre futur et celui de notre planète.

LES UMR ET LES OSU

Un certain nombre de partenaires sont impliqués dans les UMR, voire dans les OSU (IRD, CNES, INRAE, BRGM) qui représente la forme la plus intégrée de la collaboration entre les organismes et l'INSU.

Évolution souhaitée

Plusieurs organismes ont enclenché une dynamique de participation plus formelle aux UMR TS. Sur le site de Brest, une action est en cours pour réunir les sciences de la terre (Laboratoire Géosciences Océan et l'Unité IFREMER Géos-

science Marine) dans une nouvelle UMR. Le BRGM, fort de son expérience sur le site d'Orléans (ISTO), envisage de renforcer les liens sur d'autres pôles. Le CEREMA structure sa recherche en une dizaine d'équipes qui ont vocation à intégrer des UMR (e.g. Géoazur Nice). Enfin, le renforcement des liens du SHOM avec le monde universitaire se traduit par la mise en place de chercheurs associés, quoique cela reste encore ponctuel avec 2 chercheurs associés à l'unité IFREMER - LGO à Brest.

COFINANCEMENTS DE THÈSES OU DE POST-DOCTORATS

Le cofinancement de thèses sur des sujets difficilement éligibles à l'ANR ou à l'Europe peut être un appui intéressant pour les unités. Le CNES, le BRGM, le CEA/LDG, le SHOM ou l'IRD financent ou co-financement des bourses de doctorat, le plus souvent dans le cadre de grands programmes (ex. RGF - Référentiel Géologique de la France).

Évolution souhaitée

Mieux cibler les sujets de thèse en fonction des priorités, des programmes inter-organismes, envisager le financement de post-doctorants...

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'INSU a un rôle d'animation national du secteur TS fort avec de nombreuses actions de coordination entre les organismes de recherche et l'INSU-CNRS/Universités, étant cependant de moindre intensité qu'en SIC ou en OA dans certains secteurs comme l'observation.

Il paraît important que la CS-TS se positionne par rapport au Groupe Thématique - Terre Solide d'All'Envi et que le secteur TS s'ouvre plus, en particulier aux interfaces avec les secteurs SIC et OA de l'INSU.

Il faut renforcer la présence de TS dans le domaine du changement global et de l'approche scientifique des objectifs du développement durable.

LES PARTENAIRES INDUSTRIELS DE TERRE SOLIDE

Le domaine Terre Solide entretient depuis sa création des relations étroites avec le monde industriel, que ce soit avec les grands opérateurs des secteurs pétrolier ou minier (Total, ORANO, IMERYS...), les sociétés de services (CGG, Schlumberger...), les équipementiers, développeurs de technologie, de logiciels... Les entreprises de ces secteurs sont actuellement en profonde mutation, sous la pression de la transition énergétique, mais aussi des interrogations de la société civile sur la soutenabilité et l'impact environnemental de l'exploitation des ressources naturelles, qu'elles soient énergétiques ou minières. Dans ce contexte particulier, les acteurs de la recherche se doivent accompagner les industriels dans leur évolution en leur proposant des actions de recherche collaborative correspondant à leurs besoins, créatrices de valeur et de différenciation, et ouvrant de nouveaux marchés. Plus globalement, il s'agit de renforcer les actions de valorisation des compétences et des actifs de la recherche, au bénéfice de cette transformation sociale majeure qu'est la transition énergétique ou écologique.

LE CONTEXTE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE FAIT ÉMERGER UNE SÉRIE DE QUESTIONNEMENTS

Le contexte de la transition énergétique est l'occasion d'un débat élargi sur l'exploitation des ressources énergétiques et minières du sous-sol. La communauté scientifique doit y contribuer à éclaircir plusieurs enjeux.

La légitimité des filières sous-sol doit être discutée et établie au regard d'objectifs globaux de transition énergétique ou de développement durable, mais aussi de facteurs plus locaux comme le développement territorial ou les conditions locales de réalisation des projets. En effet, même si tous les scénarios montrent que les ressources énergétiques (production de chaleur et d'électricité renouvelable par géothermie, hydrogène naturel), minières (sable, granulats, métaux, terres rares...) et les usages (stockage d'énergie ou de CO₂), du sous-sol sont essentiels à l'effort de transition énergétique, leur mise en œuvre n'en demeure pas moins questionnée par de nombreux acteurs de la société civile, en particulier pour des raisons d'impact environnemental.

L'enjeu suivant est double et concerne l'optimisation de la performance opérationnelle et la maîtrise des risques. Le premier est surtout industriel et vise à assurer la viabilité

techno-économique des projets, le second vise à répondre aux interrogations de la société civile sur les conditions d'implémentation des projets et sur leurs impacts sur les écosystèmes (e.g. pollutions et rejets atmosphériques, sismicité induite), qui demande un droit de regard sur ces aspects. En réponse à ces exigences, les opérateurs modifient leurs pratiques, renforcent les contrôles et s'ouvrent à la concertation, voire même à la co-construction.

Enfin, après un certain nombre de catastrophes récentes, une attention de plus en plus grande est portée à la *vulnérabilité des infrastructures aux événements catastrophiques naturels*, en particuliers aux séismes et aux éruptions volcaniques.

Ces quelques thèmes n'épuisent pas la totalité des actions de recherche à visée applicative menées dans le domaine TS: les services pour la géotechnique (imagerie) ou les recherches sur les procédés de synthèse minérale...

DES COLLABORATIONS ACTUELLES MARQUÉES PAR LE DYNAMISME ET LA DIVERSITÉ

Les collaborations actuelles sont nombreuses et prennent différentes formes :

- De grands programmes de recherche collaborative multi-partenaires (e.g. OROGEN), portant sur des actions de bas TRL (Technology Readiness Level) dans le domaine de l'exploration pétrolière et gazière, et dans lequel le CNRS joue un rôle de premier plan ;
- Des participations à des programmes de recherche collaborative sur les usages du sous-sol pour la transition énergétique au sein de consortiums public-privés (projets Géodénergies en France ou Horizon 2020 au niveau Européen) ;
- De nombreux projets de recherche bilatéraux sur des sujets spécifiques.

Enfin, plusieurs Structures de Recherche Communes ont été mises en place au cours des deux dernières années, tels le LabCom Fractory avec la société Itasca, le LabCom Geo3i-Lab avec la société Géolithe, et la chaire industrielle Carb3E avec Total.

L'objectif principal de ces prochaines années est de définir collectivement le potentiel et les conditions d'exploitation des ressources et des usages du sous-sol, au bénéfice de la transition énergétique des territoires. Ce travail de réflexion sera informé par les résultats d'actions de recherche collaborative, et devra se faire en collaboration avec tous les acteurs du sous-sol (recherche académique, EPICs, indus-

triels, agences de l'état...). Trois grands axes d'actions se dégagent plus particulièrement :

1- Une réflexion stratégique et programmatique sur les enjeux liés au sous-sol

Les acteurs de la recherche doivent contribuer au débat collectif sur le rôle possible du sous-sol dans l'économie du monde de demain. La dynamique créée autour du projet d'évolution du GIS (Groupement d'Intérêt Scientifique) Géodénergies a permis d'engager une première série de réflexions impliquant un nombre élargi de parties-prenantes, effort qui se poursuit actuellement dans les discussions sur le rapprochement de Géodénergies avec le pôle Avenia (Pôle de compétitivité sur les Géosciences). C'est toute la communauté des acteurs du sous-sol qui doit s'organiser pour dialoguer avec les services de l'état, avec un objectif double :

- Inclure les potentialités du sous-sol dans le plan français de transition énergétique et dans les déclinaisons territoriales de ce plan ;
- Établir des feuilles de route de développement technologique pour favoriser le développement des filières et la réalisation des projets, notamment de démonstration.

2- Des actions de Recherche & Développement collaboratives en soutien aux filières

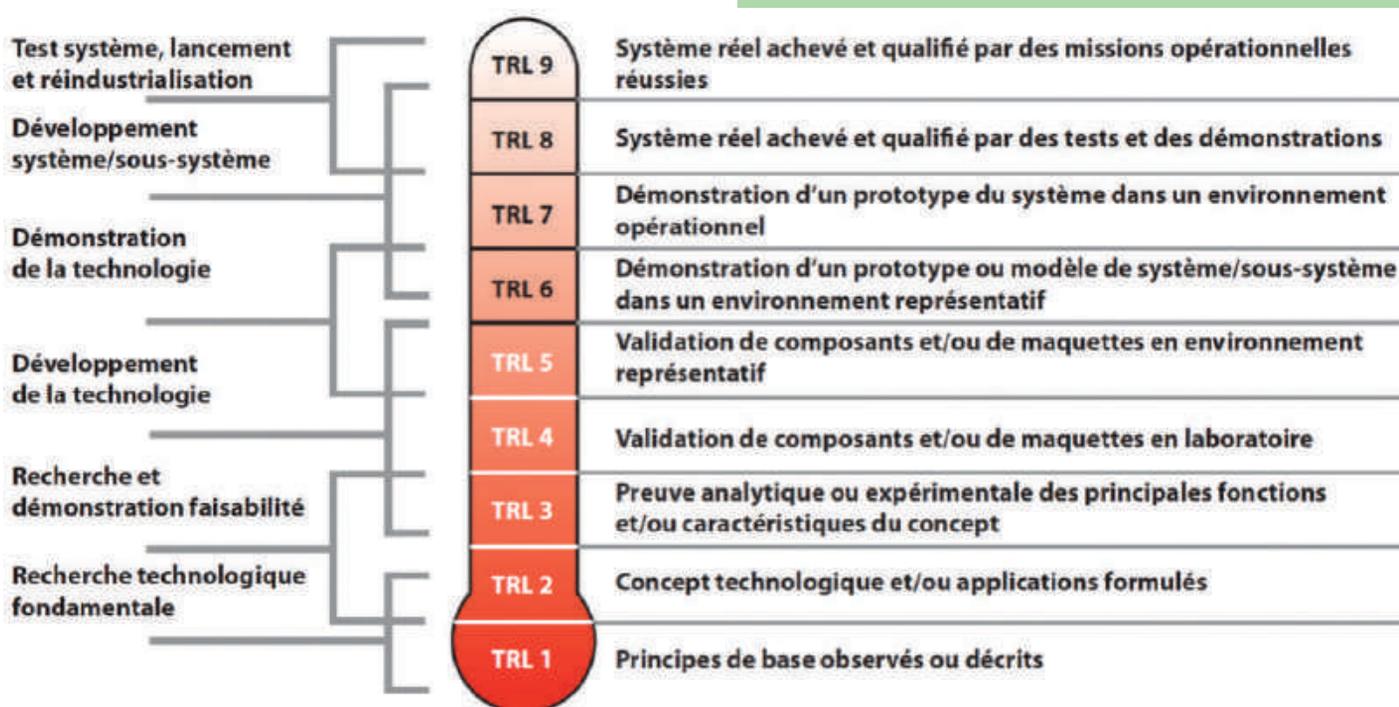
La vision stratégique doit se compléter par la mise en place de programmes de recherche, visant à soutenir les filières retenues, qu'elles soient émergentes ou déjà constituées. Plusieurs séries d'actions permettront de renforcer l'impact

de la recherche en facilitant le transfert vers l'applicatif :

- Adapter les offres de R&D pour répondre aux besoins des industriels, en renforçant les échanges avec les industriels pour être en capacité de co-construire le cadre et le contenu de projets collaboratifs capitalisant sur la complémentarité des compétences des laboratoires et s'inscrivant dans les feuilles de route industrielles ;
- Renforcer notre présence dans les actions de R&D collaboratives de TRL 4 (Validation de composants et/ou de maquettes en laboratoire) et TRL 5 (Validation de composants et/ou de maquettes en environnement représentatif), visant la réalisation de pilotes ou de démonstrateurs, pour permettre aux équipes de mieux identifier les verrous opérationnels sur lesquels faire porter des actions de recherche. Ce type de collaboration favorisera en outre le transfert des résultats de nos recherches vers l'applicatif. Les Appels à Projets visés ici sont ceux de l'ADEME, d'Horizon Europe ou des ERANET comme ACT ou Geothermica. Les actions de recherche collaborative menées au sein des Instituts Carnots ou avec les EPICs pourront aussi être renforcées. De tels projets collaboratifs donneront aussi la possibilité aux laboratoires de rentrer sur de nouveaux sujets, comme le stockage d'énergie souterrain ;
- Développer les Structures de Recherche Communes, par exemple les Laboratoires Communs (LabCom) qui permettent de renforcer une collaboration avec un industriel

L'échelle des TRL (Technology Readiness Level) permettant d'évaluer le degré de maturité atteint par une technologie

D'après le plan stratégique de recherche & développement de défense et de sécurité (DGA 2009)



en l'inscrivant dans le moyen-terme (4-5 ans). Cette collaboration est circonscrite à un thème donné et suit une feuille de route de développement technologique négociée au préalable (mais révisable). Enfin, les projets de LabCom avec les PME/ETI peuvent s'inscrire dans le cadre de l'Appel à Projet de l'ANR et recevoir une subvention de l'Agence ;

- *Développer les collaborations internationales* avec d'autres industriels, surtout européens, pour augmenter notre capacité d'impact sur le développement de filières non-existantes ou à potentiel de déploiement limité en France (stockage de CO₂, production d'hydrogène naturel, stockage d'énergie...).

Ces actions pourraient se déployer dans le cadre d'un Programme Prioritaire de Recherche sur le sous-sol comme bien commun, rassemblant tous les acteurs (recherche académique, EPICs, industriels) pour agréger la pluralité de disciplines et de compétences nécessaires à la réalisation de projets liés à l'exploitation des ressources et aux usages du sous-sol pour soutenir la transition énergétique des territoires.

3- Des actions de promotion de l'innovation et de valorisation au bénéfice de la société

Enfin et en complémentarité des actions de recherche, nous nous efforcerons de valoriser les compétences et les actifs de nos unités, en encourageant notamment l'innovation créatrice de valeur économique et sociale. Plusieurs pistes sont identifiées.

- *Transformer les idées nouvelles en innovations à fort impact sociétal* en utilisant davantage et mieux les outils mis en place par le CNRS tel le programme de prématuration ou le programme RISE, et en améliorant notre interfaçage avec les SATTs ;
- *Favoriser l'accès aux plateformes analytiques et expérimentales, ainsi qu'aux sites instrumentés*, dans le cadre de collaborations de recherche permettant la montée en TRL. Ainsi, le CNRS devrait rejoindre l'infrastructure européenne ECCSEL qui rassemble les plateformes dans le domaine du Captage, Stockage et Utilisation du CO₂ (CCUS) ;
- *Accroître la visibilité de nos laboratoires par des publications sur des sujets stratégiques ou émergents*, par exemple l'impact des différents scénarios de transition énergétique ou l'hydrogène naturel ;
- *Développer la médiation scientifique sur les enjeux de l'exploitation du sous-sol* en particulier pour contribuer à améliorer l'acceptabilité sociale des technologies et des filières du sous-sol.

Par leurs actions de recherche et leurs contributions au débat général dans un esprit d'indépendance, les laboratoires du domaine TS ont la capacité d'être des acteurs transformants de la transition écologique, en s'attachant à définir les conditions pour une exploitation et un usage du sous-sol durables, au bénéfice des territoires.

LES LIENS FORMATION- RECHERCHE

Dans ce domaine plusieurs constats s'imposent, en partie liés à la généralisation des OSU comme structure de dialogue entre le CNRS et les Universités. Tout d'abord, les OSU ont permis de renforcer le lien formation-recherche, au moins sur certains sites, là où la composante héberge des parcours, en général au niveau Master, mais parfois dès la licence. Ensuite, cette structuration, si elle favorise l'immersion des étudiants dans les laboratoires de recherche très tôt dans leur parcours universitaire a, comme pendant négatif, celui de l'extraction des Sciences de la Terre des composantes UFR Sciences et Techniques traditionnelles hébergeant la physique, chimie, mathématique et biologie, ce qui rend difficiles les approches pluridisciplinaires dans le montage des formations. Le résultat général est la formation d'étudiants possédants de bonnes bases en sciences de la Terre, mais ayant souvent de fortes carences en sciences physiques, chimiques et mathéma-

tiques, c'est à dire les sciences permettant les approches quantitatives des processus en TS. Les sites de recherche adossés à de grandes écoles sont moins confrontés à ce problème structurel inhérent au paysage académique universitaire en France.

En 2019/2020, d'après le site www.trouvermonmaster.gouv.fr et ses portails des formations, on dénombre 24 masters Mention Sciences de la Terre et des Planètes, Environnement (STPE), et 5 Masters Mention Géoressources, Géorisques, Géotechnique (3G). Certains parcours des mentions « Risques et Environnement (R&E) », « Sciences de l'eau » ou « Gestion de l'environnement » ou, plus marginalement, « Sciences et génie de l'environnement » proposent des parcours ouverts (entre autres) aux diplômés de licence en Sciences de la Terre, notamment dans le domaine de l'environnement. Le portage administratif des masters est généralement assuré par les UFR ou Facultés des Sciences

des établissements. Les mentions STPE des universités de Aix-Marseille, Orléans, Rennes et de l'Observatoire de Strasbourg et de l'IPGP sont portées par les OSU. L'enquête s'est concentrée sur les masters STPE, 3G, et quelques parcours de R&E, qui portent l'essentiel de la formation dans le domaine TS.

D'une façon générale, on observe une inflation des mentions (et parcours) dans le domaine de l'environnement au sens large et à finalité « professionnalisante » (i.e. ne débouchant pas sur une thèse). De plus les formations dans le domaine de l'environnement s.l., mais aussi, par exemple, de l'hydrogéologie ou du risque tellurique sont déclinées dans plusieurs mentions (5 mentions, au moins). Le déchifrage de cette offre complexe reste difficile pour l'étudiant.

Les capacités d'accueil des masters sont en STPE ~ 1120 étudiants, en 3G ~140 étudiants et en R&E ~150 étudiants (auxquels ils convient d'ajouter >150 étudiants provenant de l'ENSG, ENS, Lassalle Beauvais etc.). Ces chiffres sont à comparer aux 1226 chercheurs « permanents » des UMR-TS ou aux 6 000 géologues exerçant en France (rapport Varet, 2006). Ce dernier chiffre correspond à un taux de remplacement de 150 postes/an et donc à une ouverture de postes équivalente à au moins le double/triple des effectifs (compte tenu des départs vers d'autres emplois en cours de carrières ou autres causes).

Les tendances recueillies sur la plupart des sites indiquent une chute des effectifs étudiants et ce dès la Licence, des étudiants souvent peu motivés par la réalisation d'une thèse (manque de débouchés) et des parcours de plus en plus orientés à une sortie à bac+5. Ceci est cohérent avec le taux de remplissage (> 90%) de la jeune mention 3G, plutôt professionnalisante.

On observe que 20% des étudiants de M2 2018/2019 en master STPE sont inscrits en thèse en 2019/2020. Ce taux est une limite inférieure, puisque de nombreux étudiants s'inscrivent en thèse en année n+1. Il n'y a pas de lien systématique entre la capacité d'accueil de la mention (~taille de l'établissement) et le nombre de thèses. Sur la base des informations reçues (151 thèses au total), les domaines d'exercice prépondérants des thèses concernent la géodynamique, métallogénie, ressources minérales, et dans un second temps, hydrogéologie, réservoirs, environnement, géophysique.

Parmi les évolutions envisageables à moyen terme il y a en particulier la sortie de la logique de site qui prévaut depuis plus de 10 ans dans la construction des parcours LMD, avec la création de Masters recentrés thématiquement, soit inter-établissements soit au niveau européen. Ceci permettrait entre autres d'offrir des parcours ayant une très forte identité, et donc visibilité, tant au niveau national qu'international. Bien sûr cela requiert un minimum de coordination entre les Universités, rôle qui, dans les domaines de l'INSU, peut/doit être bien évidemment assuré par les OSU.

S'agissant du contenu des formations, afin qu'elles préparent au mieux les chercheurs de demain, il est indispensable qu'elles intègrent les éléments propres à l'urgence climatique, et ceux liés à l'impact de l'accélération de la transition énergétique en Europe (Green Deal). La crise pandémique de la covid-19 a illustré la nécessité d'un contrôle européen des systèmes de production dans le domaine de la santé, exemple que l'on peut étendre à la production de métaux ou d'énergie (relocalisation des systèmes de production?). Par ailleurs, en sus des approches reposant sur des méthodes d'analyse et de simulation quantitatives, les éléments développés précédemment dans ce rapport montrent que de nouveaux métiers centrés sur l'utilisation de données en quantité massives vont nécessairement émerger. Il s'agira de produire des profils TS classiques (géophysique, géochimie...) en y adjoignant les compétences numériques, statistiques, IA etc. Cette évolution est déjà en grande partie enclenchée en géophysique, mais demandera à être généralisée à d'autres sous disciplines en TS, en particulier la géochimie.

ANNEXES

Rapport d'analyse des groupes de travail TelluS et PNP-TS

Les éléments donnés en annexe pour chaque sous-programme TelluS n'ont pas vocation à être exhaustifs, car le caractère incitatif d'un appel d'offres tel que TelluS est précisément de permettre l'ouverture vers des recherches nouvelles sur des questions émergentes. La participation de cette recherche fondamentale à des questions sociétales qui requièrent le savoir-faire de notre communauté, et les efforts dans ce sens, doivent également être maintenus dans le futur.

SYSTER

L'action SYSTER du programme TelluS encourage toute nouvelle approche d'analyse des couplages entre les processus géodynamiques au sein du manteau profond et de la lithosphère et les mécanismes superficiels qui façonnent les reliefs de la Terre et régissent les échanges biogéochimiques avec les enveloppes externes. Ceci est particulièrement vrai dans les cycles inorganiques et organiques du carbone, par exemple (ci-dessous). La composante temporelle, qu'elle soit courte (cycle sismique) ou longue (tectonique des plaques), est également au cœur des problématiques abordées afin d'intégrer l'effet des couplages sur l'évolution des (paléo)environnements terrestres.

Voici quelques exemples de projets qui ont démarré avec l'aide de financements SYSTER: transferts des fluides et du carbone en zone de subduction (ERC 2020 A. Vitale Brovarone); variations du cycle du carbone associées aux changements climatiques des oscillations glaciaires-interglaciaires en Himalaya (ANR G. Galy); relations entre climat et altération (ANR 2017 C. Gautheron); géomorphologie et événements catastrophiques (ERC 2018 P. Steer) ou encore *Development and effect of inelastic deformation in the subduction earthquake cycle* (Emergence, Ville de Paris, 2020, J.-A. Olive). Les développements obtenus sur les outils isotopiques et la datation ont permis une revisite des océans mésozoïques (ANR 2018 G. Suan) ou le traçage, à partir de zircons, de l'initiation de la tectonique des plaques aboutissant à une planète habitable (ERC 2018 B. Dhuime). Il est intéressant de noter que des projets initialement fondamentaux sur les transferts de matière au sein de la lithosphère ont également pu aboutir à des projets plus appliqués aux ressources (ANR 2016 L. France sur les gisements de REE; ANR 2018 M. Godard sur le stockage du carbone en Oman). Dans ce dernier cas, SYSTER a ainsi contribué au soutien symbolique à un très gros projet de forage continental international (ICDP Oman) dans lequel plusieurs membres la communauté française se sont investis. Pour finir, l'allocation de financements INSU conditionnant aussi parfois l'accès à des instruments nationaux (ex. sismomètres), des « pe-

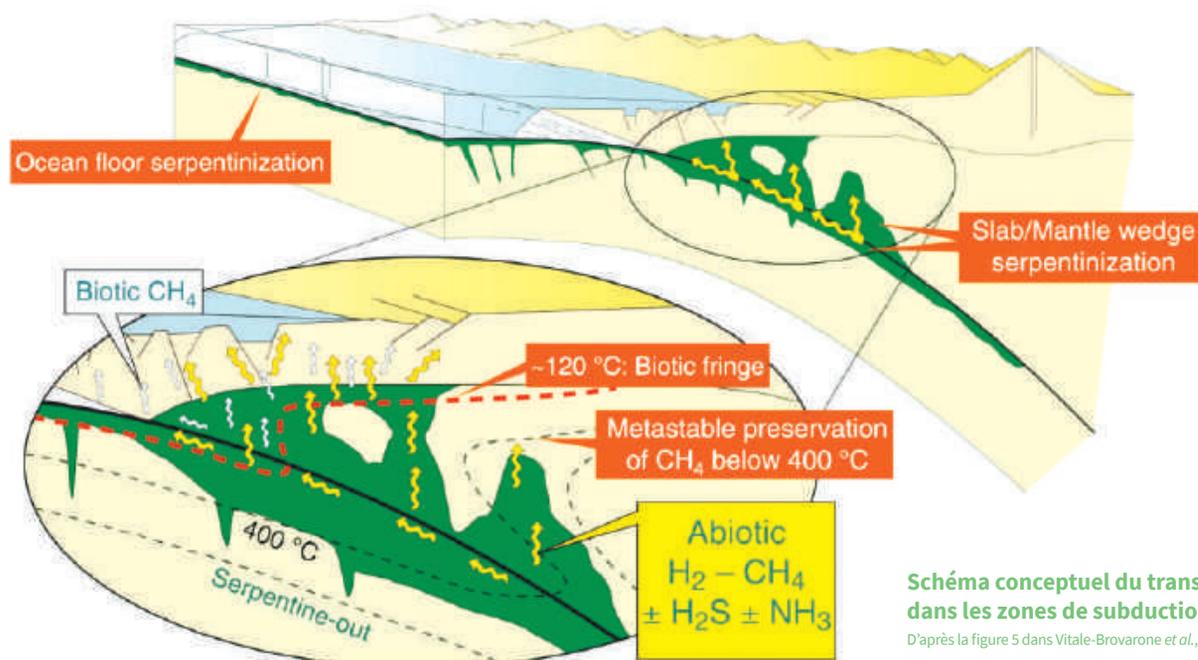


Schéma conceptuel du transfert du C dans les zones de subduction

D'après la figure 5 dans Vitale-Brovarone et al., (2020)

tits» projets innovants du type de ceux financés par SYSTER permettent de débloquer la réalisation d'une mission de terrain ou d'analyses. En résumé, SYSTER est un programme qui joue parfaitement son rôle d'incubateur d'idées et de méthodes, soutenant une recherche fondamentale de qualité, sur des thèmes pouvant être éloignés d'appels d'offre plus spécifiques ou pouvant conduire vers des projets en recherche appliquée.

Enjeux futurs. Voici quelques exemples de problématiques qui devraient prendre de l'ampleur au cours des années à venir: l'enregistrement minéralogique, géochimique, et structural des phénomènes qui contrôlent les événements transitoires mis en évidence par la géophysique (ex. séismes lents); les couplages entre géochimie, thermodynamique et physique dans les processus géodynamiques, par exemple

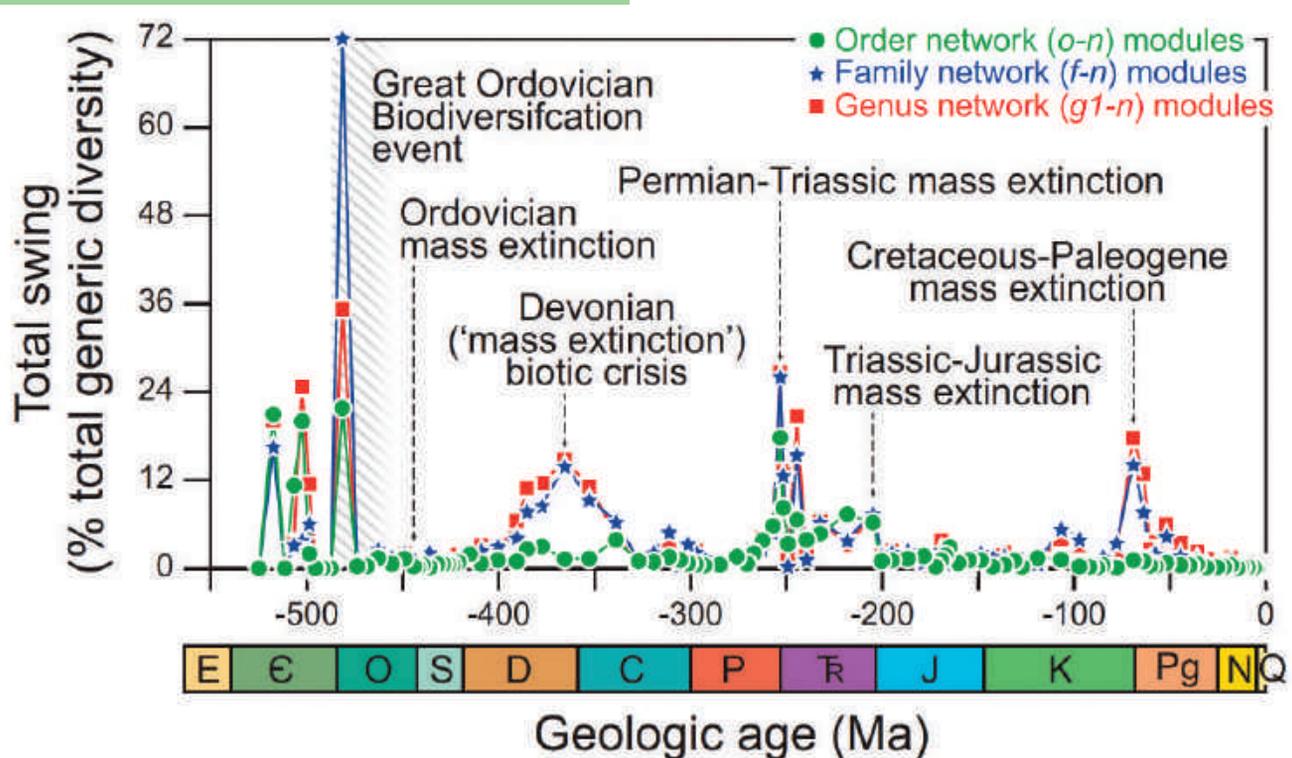
en contexte de subduction, et leur modélisation; les couplages entre phénomènes superficiels et profonds et une meilleure compréhension des chaînes d'interactions et de rétroactions entre climat, altération, érosion, qui devient primordiale dans le contexte d'urgence climatique actuel... Enfin, une question qui revient très souvent porte sur les moyens mis à notre disposition pour la virtualisation et le développement de bases de données pérennes (terrain, collections paléontologiques, fonds de mers etc.) et pour la visualisation des données (capitale non seulement pour l'interprétation scientifique mais également pour la communication vers le grand public). Ces derniers points nécessitent une prise en compte allant au-delà de TelluS et sera probablement évoqué au cours des prospectives regroupées par défis au sein de l'INSU.

INTERVIE

L'action INTERVIE du programme TelluS s'attache à favoriser les études intégratives des interactions actuelles et passées entre géosphère et biosphère afin de mieux comprendre comment la Terre et la vie se sont influencées mutuellement au cours des temps géologiques, conduisant au système Terre-Vie actuel. L'objectif majeur est d'inciter la communauté à entreprendre des études novatrices et pluridisciplinaires associant des disciplines telles que paléontologie, sédimentologie, géomicrobiologie, géochimie, biologie moléculaire, bioinformatique, chimie ou physique, dans des approches couplées de terrain, d'analyses en laboratoire, et de modélisation.

Intensité des crises biologiques au cours du Phanérozoïque

© Muscente et al., 2018



Nouveaux enjeux. Seuls certains de ces défis, qui se situent dans la continuité de l'action INTERRVIE et s'appuient sur les travaux géobiologiques de fond, sont présentés ci-dessous.

- Déterminer les processus biotiques et abiotiques régissant les phases de stabilité de la biosphère et les points de rupture menant aux crises de biodiversité. Les grandes crises peuvent se définir comme des ruptures d'équilibres géobiologiques menant à un changement global et irréversible de la biosphère. Afin de mieux comprendre ces réactions brèves, quasi-instantanées à l'échelle des temps géologiques, il est essentiel de mieux appréhender les périodes de stabilité ou de diversification de la diversité marine ou continentale, ainsi que les processus inhérents à ces équilibres ;
- Mieux comprendre les effets d'échelle dans les fluctuations de la biodiversité. La biodiversité est souvent abordée comme un ensemble homogène. Or, il est de plus en plus évident que les événements ne s'enregistrent ni de façon synchrone, ni de façon similaire à différentes latitudes, climats, milieux. Un des enjeux pour la communauté « Paléo » est de mieux comprendre cette disparité spatiale (paléogéographique) et ses contrôles ainsi que leur évolution et influence réciproque. À cet effet spatial s'ajoute la nécessité d'une meilleure connaissance de l'effet d'échelle temporelle de l'enregistrement des crises (effet de filtre de l'enregistrement fossile qui doit être mieux cerné, notamment par des études taphonomiques ; tendances à différentes échelles contrôlées par différents processus) ;
- Passer d'une approche comptable à une approche fonctionnelle de la biosphère. Chaque écosystème type se caractérise par une dynamique propre dans laquelle interagissent un réseau trophique et des facteurs physico-chimiques. Les différents écosystèmes n'ont pas la même résilience et ne répondent pas de la même façon aux variations environnementales (crises sélectives). Toute espèce n'a pas la même importance fonctionnelle dans le maintien d'un écosystème (notion d'espèce ingénieure et espèces clé de voûte). Un enjeu majeur, d'ailleurs commun aux néo- et paléo-écologues, consiste donc à compléter l'approche globale de la biodiversité par une approche fonctionnelle des écosystèmes (modélisation des paléo-écosystèmes, identification et caractérisation des espèces clés et ingénieures, etc.) ;
- Évaluer la biomasse, la productivité primaire, et les effets de l'évolution de la biosphère dans les grands cycles biogéochimiques terrestres. La biosphère intervient dans les différents cycles qui caractérisent notre système Terre et constitue une composante essentielle du climat (production et captage de carbone organique ; processus de captage et stockage par biominéralisation). Comprendre l'impact de l'évolution de la biosphère (apparition et disparition de grands clades, notamment végétaux, variation de productivité, etc) sur les cycles terrestres à partir du registre fossile représente ainsi un verrou scientifique majeur.

Afin de permettre de lever ces verrous, des transferts mutuels de connaissance sont nécessaires, notamment au travers de développement de réseaux porteurs de recherches novatrices. On peut citer parmi ces derniers les réseaux de collaboration suivants :

- Réseaux de collaborations entre paléontologues, écologues et biologistes de l'évolution afin d'accélérer les transferts réciproques de méthodologies et de connaissances. (par exemple : effets des traits d'histoire de vie sur la dispersion et la distribution géographique des organismes ; modélisations en écologie, approches statistiques et quantitatives des écosystèmes actuels ; modélisations de la biomasse actuelle ; mais aussi apport pour les écologues des approches biogéochimiques de caractérisation des transferts de biomasse au sein des réseaux trophiques utilisés par la communauté « paléo ») ;
- Collaboration au sein de l'INSU pour le développement et le perfectionnement de l'échelle des temps géologiques. La communauté scientifique française comporte des spécialistes reconnus dans les domaines concernés (chimiostratigraphie, cyclostratigraphie, géochronologie, biostratigraphie, magnétostratigraphie), mais n'est pas assez structurée pour exercer un réel lobbying dans les programmes internationaux. Ce champ de recherche demeure un vecteur de progression important de nos connaissances par un meilleur calibrage des événements enregistrés (écologiques, macroévolutifs) et leur corrélation (ex. entre les domaines marins et continentaux, à différentes échelles spatiales).

L'approche scientifique à différentes échelles actuelle encourage une stratégie de différenciation de la collecte de données. Ces dernières années ont favorisé une approche globale de la diversité via des bases de données globales (souvent incomplètes et biaisées). Une approche plus systémique de la diversité nécessite une démarche plus locale à régionale qui se fonde sur un important travail pluridisciplinaire de terrain (paléontologie, sédimentologie, géochimie, etc.). La richesse des collections paléontologiques et lithologiques françaises est également une source d'information sous-exploitée dans nos approches, quelle que soit leur échelle. Ces collections, dispersées et aux statuts divers bénéficieraient d'une mise en réseau, et d'un appui national pour l'enrichissement et le suivi d'une base de données physiques nationale afin de constituer une véritable infrastructure de recherche visible à l'international et valorisable auprès du grand public.

ALEAS

L'action ALEAS de TelluS s'intéresse à la compréhension des processus à l'origine des risques telluriques. La mitigation de ces risques tels que les séismes, les éruptions volcaniques ou les glissements de terrain, ainsi que les tsunamis associés nécessite de soutenir des projets de recherche allant de l'étude fondamentale des processus ayant un impact direct sur ces manifestations telluriques (à toute échelle de temps) jusqu'à l'évaluation de l'aléa naturel.

Les objectifs sont de comprendre le fonctionnement des systèmes géologiques générateurs d'aléas et de caractériser l'évolution de ces systèmes à différentes échelles spatiales et temporelles. Le graal ultime est la détection et quantification robuste de précurseurs physico-chimiques pour aller vers la prédiction. À un terme plus proche, l'objectif est la traduction des observations et des modèles physiques en termes d'aléas quantifiés. Quel que soit le type d'aléa considéré, ceci passe par le développement de deux axes principaux: la collecte et l'analyse de données permettant de décrire l'évolution des systèmes sous différents angles (tectonique, sismologie, imagerie géophysique géodésie, télédétection, physique des roches, pétrologie, géochimie, géochronologie, hydrogéologie, etc.) et l'élaboration d'expériences et de modèles physiques ou statistiques pour mieux comprendre le fonctionnement de ces systèmes et fournir un cadre théorique pour l'interprétation.

- **L'acquisition de données** dédiées passe par le développement de nouveaux instruments ou méthodes de mesures (moins chers, plus précis, nouveaux observables...) et par la mise en place de nouvelles mesures dédiées et complémentaires (multi-senseurs, variabilité spatio-temporelle, différents observables) sur des objets-cibles. Quel que soit le système considéré (volcan, faille, instabilité gravitaire, tsunami), les approches pluridisciplinaires sont à encourager afin de caractériser les liens entre les différents observables. En cas de crise, des moyens doivent pouvoir être débloqués rapidement pour faciliter des interventions sur site.

- Dans ce contexte, il est bien sur critique **d'assurer la pérennité des observations** continues existantes sur les laboratoires naturels où la France a investi (SNO), en proposant des financements long-terme pour la maintenance et le fonctionnement des réseaux d'observation sur certains sites remarquables. La sauvegarde et la mise à disposition des données acquises par les financements publics constituent également un enjeu clé (FAIR data: Findable, Accessible, Interoperable, Reusable). C'est un point particulièrement critique pour la recherche ayant trait aux aléas naturels. Les avancées de la communauté seront d'autant plus importantes si les données sont bien archivées, documentées et librement accessibles aux chercheurs. Sur le territoire national, RESIF assure cette tâche d'archivage et de pérennisation des données géodésiques et sismologiques, tout en organisant l'interaction entre l'ensemble des acteurs de l'étude des aléas (chercheurs, praticiens



Rupture de surface associée au séisme de Norcia (Italie, Oct. 2016)

© L. Benedetti

des aléas, ingénieurs) et permettant la production de modèles d'aléa. Il semble important de garantir également un archivage pérenne pour les données acquises hors de France par des financements publics, et de progresser en direction d'un accès ouvert à ces données, comme ce qui se fait par exemple aux USA pour les données acquises dans le cadre de projets NSF.



Un volcan dormant sous une calotte glaciaire en contexte d'extension : l'Oraefajokull en Islande

© B. Scaillet

- Toujours dans le domaine des données, il est stratégique de soutenir la communauté pour le développement de méthodes de traitement des données et pour l'exploitation des flux massifs de données générés par les réseaux d'observation existants, certaines expériences dédiées ou les satellites d'observation de la Terre. Ces données constituent une opportunité scientifique majeure dont la communauté « Aléas » doit s'emparer. L'analyse systématique de ces données, couplée à des méthodologies innovantes, permettra de découvrir des signaux qui étaient jusque-là cachés dans le bruit des acquisitions ponctuelles et offre la perspective d'explorer en routine les variations spatiales et temporelles de ces signaux, et donc par exemple de caractériser systématiquement la phase qui précède une instabilité (éruption, séisme, glissement de terrain, et tsunamis associés). L'ERC a d'ailleurs financé plusieurs projets sur ces thématiques. L'exploitation systématique de ces flux de données pose les enjeux du « big data » comme l'archivage et la gestion de bases de données, la capacité de traitement de jeux de données massifs, ou le développement de méthodes innovantes pour l'analyse de données et l'extraction des signaux (dont le machine-learning et autre méthodes issues des « sciences de la donnée »).

De manière similaire, des enjeux liés à la modélisation des processus et à l'expérimentation existent :

- La prise en compte de la complexité naturelle est nécessaire pour comprendre et modéliser les systèmes géologiques générateurs d'aléas. Cette complexité peut être liée au système lui-même ou à son encaissant (géométrie complexe des objets, rhéologie mal connue et variable, l'hétérogénéité des matériaux, fragmentation du milieu, effets thermiques, rôle des fluides, processus dissipatifs, réponse non linéaire du milieu, effets de sites locaux...). Des effets en cascade peuvent également intervenir entre les différents processus ;

- L'expérimentation en laboratoire (physique des roches, pétrologie expérimentale en température-pression, modélisation analogique) ou *in situ* doit également être soutenue car elle permet d'établir un lien direct entre les observables et les paramètres physico-chimiques qui les génèrent ;

- Enfin, des efforts doivent aller vers la prédiction, en développant des outils d'analyse en temps quasi-réel, des modèles statistiques ou des modèles d'assimilation de données intégrant l'état de l'art de la compréhension des processus et les données acquises sur un objet donné.

Besoins identifiés :

- Renforcer les financements de base des laboratoires, et de appels d'offres INSU et ANR sur ces thématiques ;
- Accroître le nombre de contrats de doctorants et post-doctorants sur ces thématiques ;
- Accroître le nombre d'ingénieurs sur ces thématiques pour maintenir des observatoires de haut niveau international, pour organiser l'archivage, l'accessibilité et le traitement des données de plus en plus massives, pour développer de nouvelles technologies de mesure à terre, en mer et depuis l'espace ;
- Accroître la participation des enseignants-chercheurs dans ces activités d'observation et de recherche en les déchargeant d'une part des activités d'enseignement ;
- Renforcer les moyens alloués aux projets et initiatives qui promeuvent les interactions entre le monde de la recherche, l'environnement institutionnel et la société, assurant le transfert des produits scientifiques vers une meilleure mitigation ou prédiction des aléas ;
- Renforcer le soutien au développement de nouveaux instruments pour les aléas telluriques (capteurs fond de mer, capteurs optiques...) ;
- Débloquer des moyens rapidement pour faciliter des interventions sur site en cas de crise.

CESSUR

L'Action CESSUR du programme TelluS vise à l'émergence, la consolidation, la mise en place d'actions structurantes aux frontières des mondes académiques et industriels sur deux axes principaux :

1- RESSOURCES MÉTALLIQUES POUR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

L'évolution rapide des technologies et des choix concernant la transition énergétique et de réduction des gaz à effets de serre nécessite de maîtriser l'évolution dans le temps des besoins en matières premières, en particulier des métaux dits « critiques » nécessaires aux batteries des voitures électriques (Li, Mn, Ni, Co, C), à l'énergie éolienne (Nd, Dy) ou certaines techniques photovoltaïques (Ga, Sb, In, Te) mais également les substances de grand intérêt économique comme les métaux de base (Cu, Al) qui sont également nécessaires à cette transition. À ces métaux, s'ajoute également d'autres éléments nécessaires à l'amélioration des alliages (Nb, Ta, W), à l'allègement des structures métalliques (Sc), et aux nouvelles technologies de la communication et de l'informatique (Ge, In...).

La situation de probables futurs déficits dans la disponibilité en métaux stratégiques (analyse mondiale et UE) encourage une exploration accrue, car en période de croissance

de la consommation, même un recyclage complet ne serait pas suffisant pour alimenter les besoins, et les ressources primaires seront nécessaires. Un développement des recherches sur le cycle des métaux stratégiques, les facteurs de concentration, de préservation ou de dispersion dans l'environnement, est plus que vital. Par ailleurs, l'analyse du contexte social, économique et environnemental de l'exploitation des métaux est une des clés de l'intégration territoriale des futures exploitations.

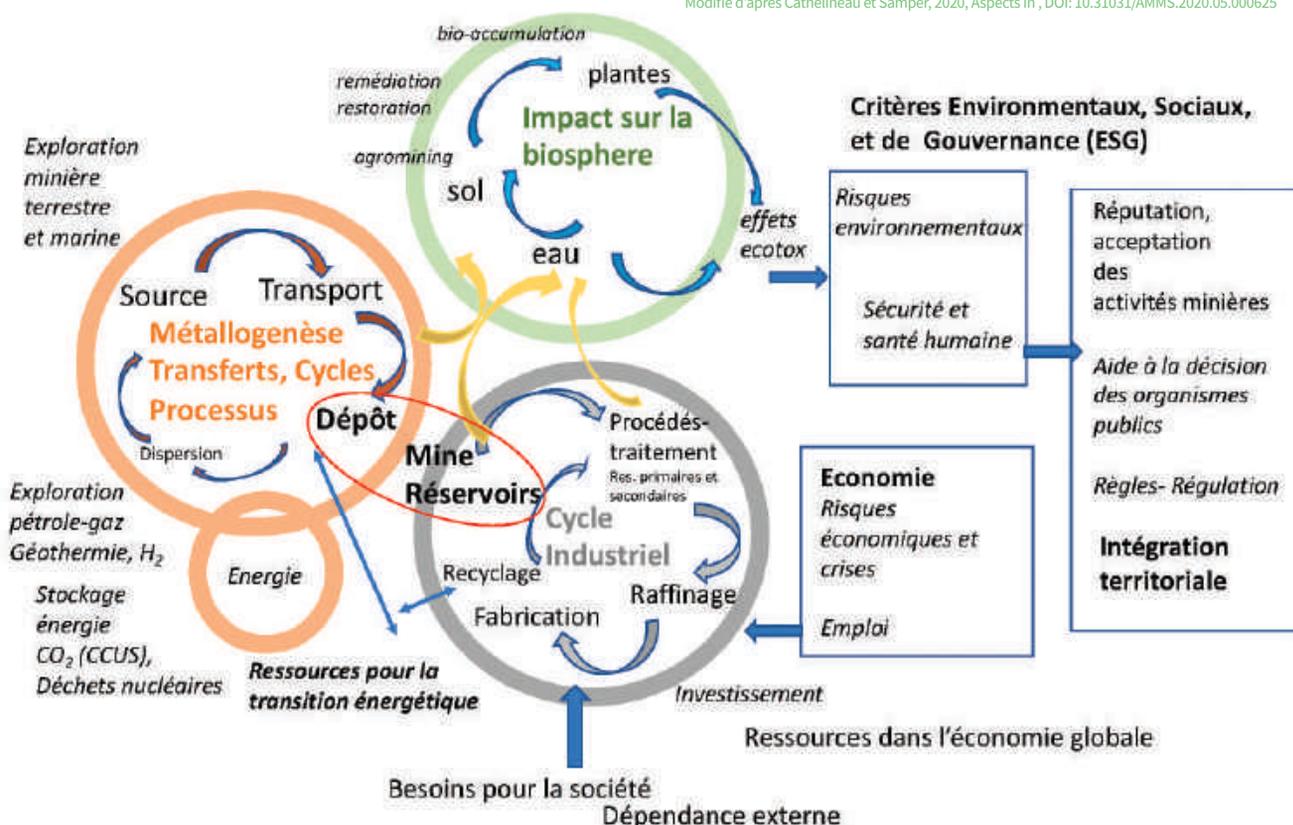
L'étude des métaux devient donc une approche multidisciplinaire, transverse, intégrée qui met en jeu tout le savoir depuis la géologie, en passant par les aspects ingénierie (technologies de l'exploitation, génie minier, génie minéral et chimique) jusqu'à la mise en œuvre de tous les savoirs dans le domaine environnemental (de la restauration des sols jusqu'à l'écotoxicologie), ceci dans un contexte de mondialisation, ce qui exige d'appréhender le contexte et les conséquences sociales et économiques (schéma ci-dessous). Dans ce cadre, deux thématiques sont centrales :

1a. Métallogénèse - innovation dans l'acquisition des paramètres contrôlant mobilité et dépôt des métaux :

L'objectif est de mieux comprendre les processus de transport-dépôt des métaux depuis les roches sources jusqu'au piégeage par des approches intégrées, faisant le lien entre les observations et la modélisation soit numérique soit expérimentale des processus de formation des gisements métalliques, afin d'obtenir des clés pour la découverte de

L'économie circulaire et les relations entre les différents cycles de la matière et la société, dans le cadre des évolutions récentes, notamment de la transition énergétique

Modifié d'après Cathelineau et Samper, 2020, Aspects in , DOI: 10.31031/AMMS.2020.05.000625



nouveaux gisements. Les relations entre phases de migrations de fluide, leurs causes, et l'âge de ces événements nécessitent toujours une exploration approfondie. Des nouvelles méthodes (datation *in situ*, thermochronologie, isotopie, notamment clumped isotopes) ont été développées ces dernières années, mais appliquées surtout aux bassins pétroliers. Leur application aux problématiques liées à la genèse des gisements devrait être encouragée afin de mieux déterminer les cycles des métaux critiques et générer des modèles plus réalistes et fiables. Les principaux enjeux concernent: I) le cycle géochimique des métaux critiques (facteurs de transport, concentration et dispersion), II) la datation des processus et leurs relations avec les événements géodynamiques (rifts, convergence, paléoclimats), III) la modélisation numérique du transport réactif et du dépôt à différentes échelles (du bassin ou du socle à l'échelle de la fissure ou du réservoir, IV) la détermination de l'origine des fluides (et magmas) à l'origine du transport/dépôt/dispersion des métaux et des causes de leur migration (flux de chaleur profonds, intrusions...)

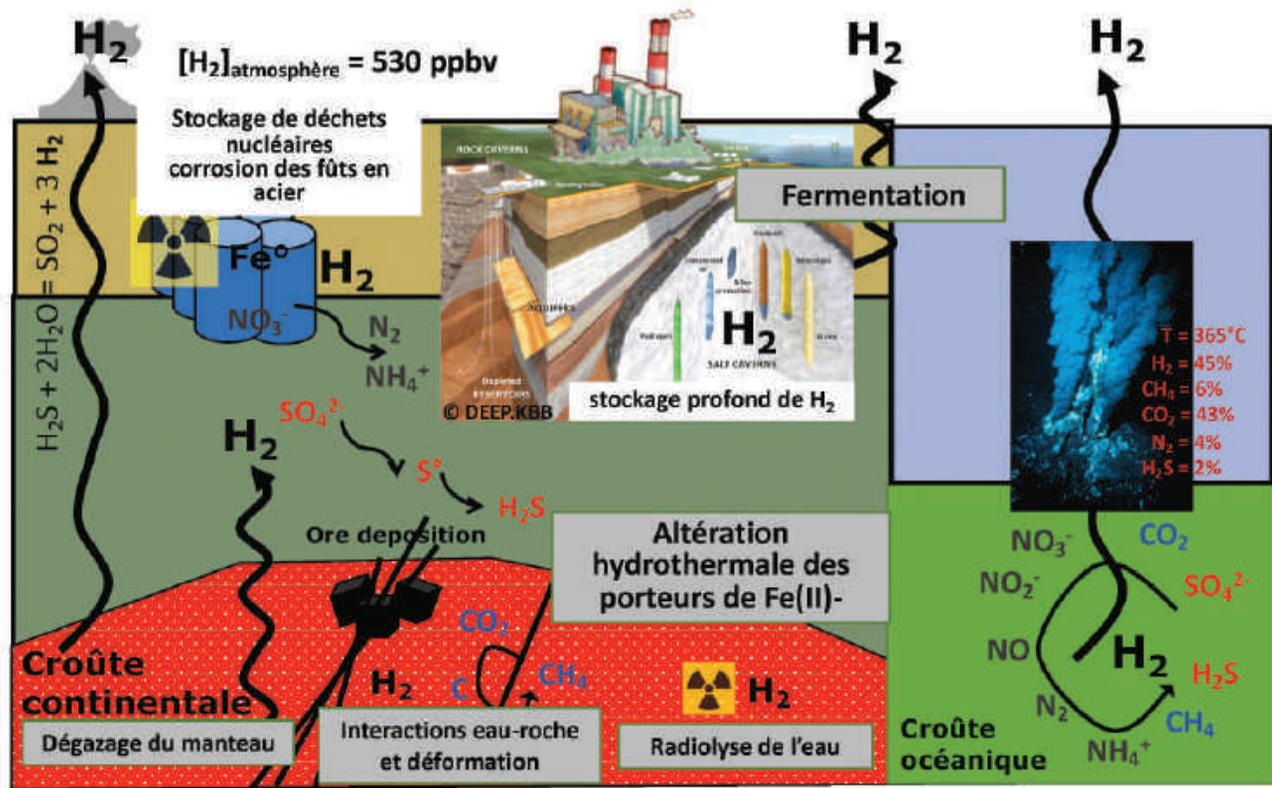
1b. Le cycle des matières premières depuis l'exploration jusqu'au recyclage. Des recherches à l'interface entre Géosciences, Sciences de l'Ingénieur et Chimie sont absolument nécessaires pour optimiser et réduire l'impact environnemental (consommation d'énergie et d'eau, rejet de gaz à effets de serre) lors de l'extraction et la séparation des matières premières. Grâce à la maîtrise et l'expérience acquise sur des milieux naturels complexes, les géologues peuvent développer une connaissance approfondie des porteurs des ressources primaires mais aussi secondaires (stériles, résidus). L'ensemble des savoir-faire dans la détermination de la spéciation des éléments chimiques dans les solides et les fluides de l'échelle de l'échantillon jusqu'à l'échelle du gisement devrait être mobilisé dans le domaine de la géométaballurgie, ou les connaissances de la distribution des métaux à toutes échelles est un préalable à tout choix de traitement (séparation, extraction/enrichissement par pyrométaballurgie ou hydrométaballurgie, abiotique ou bio-contrôlée).

Estimer l'impact environnemental de ces métaux sur les écosystèmes lors d'une dissémination d'origine naturelle ou anthropique et trouver de nouvelles méthodes de remédiation des milieux perturbés (agromine, utilisation des sols anthropisés) et de son suivi (capteurs environnementaux biogéochimiques) sont des préalables à toute nouvelle exploitation. Un programme de recherche interdisciplinaire entre Sciences de la terre, Sciences de la biodiversité et de l'écologie, Sciences de l'homme, de la Santé et du Droit pour construire un Observatoire de la Mine en milieu fragile de dimension internationale reste complètement d'actualité

2- ÉNERGIES NON CARBONÉES : L'EXPLOITATION DES RÉSERVOIRS SOUTERRAINS POUR LA GÉOTHERMIE, LE STOCKAGE D'ÉNERGIE (H₂, CHALEUR), ET LE STOCKAGE DU CO₂

2a. Réservoirs : Les stimulations chimiques et physiques du sous-sol liées à l'exploitation des réservoirs (interactions fluides-roches, modifications physiques, sismicité induite...) doivent être mieux suivies et contraintes. Cette thématique, transverse aux différentes utilisations des réservoirs profonds, soulève de nombreuses questions scientifiques: I) Quelle est l'aptitude des modèles à reproduire la complexité des transferts de chaleur et de matière dans des aquifères, notamment caractérisés par des discontinuités (socle fracturé par exemple) ou par exploitation simultanées de deux (ou plusieurs) systèmes/aquifères? II) Comment gérer, simuler, prédire et réduire les conflits potentiels d'utilisation de la ressource en eau (eau potable *versus* eau chaude ou stockage)? III) Comment améliorer le changement d'échelle entre (1) les données sur échantillons de carottes/plugs parfois observées à l'échelle micrométrique (minéralogie, porosité, perméabilité, données pétrophysiques, géophysiques), (2) les données issues des diagraphies, (3) l'échelle du fonctionnement d'un doublet géothermique et (4) d'une province géothermique? IV) Les fluides géothermiques, sources d'énergie, pourront-ils être aussi source/gisement d'éléments chimiques susceptibles d'être utiles à la transition énergétique (lithium en premier lieu)?

2b. L'hydrogène comme ressource énergétique: Les réserves d'hydrogène naturel qui semblent actuellement limitées sont probablement sous-estimées en raison d'une exploration balbutiante et de l'absence de concepts sur les mécanismes de diffusion ou d'accumulation. Les difficultés technologiques de la récupération constituent le deuxième verrou à lever pour l'exploitation de l'hydrogène. Les recherches devraient être accentuées sur les mécanismes de production, les indicateurs de migration, les bilans de production, les taux de conversion de H₂ en méthane lors d'interactions avec des hydrocarbures, et enfin l'évaluation des risques liés à l'utilisation de la fracturation hydraulique dans cadre de telles exploitations (schéma page suivante).



Le cycle de l'hydrogène naturel et anthropique

D'après la figure 2 de Truche et al., (2020)

PNP-TS

2c. « Décarbonation » - Stockage du CO₂ en réservoir profond : Au niveau mondial, les grands projets comme *Carbon capture, use and storage* (CCUS) ont été mis en place au Canada ou aux États-Unis dans le cadre de la récupération assistée du pétrole ou du gaz. En Europe seulement trois projets sont pleinement opérationnels (Norvège, mer du Nord et Islande). De nombreux projets industriels ou pilotes ont été abandonnés. Toutefois le regain d'intérêt récent en raison de l'impérieuse nécessité de stocker le CO₂ à proximité des grands centres de production nécessite de développer des recherches suivant les axes suivants : I) La maîtrise des risques (sismicité, effondrements...) notamment dans le domaine du monitoring (surveillance sismique, monitoring des gaz) et dans l'analyse des risques (fuites, blow-out, fracturation et sismicité), II) réexaminer les sites en fonction de leur lithologie, du caractère offshore ou on shore, les modes de séquestration (dissolution en aquifère salin peu fiable ou minéral en contexte basique et ultrabasique plus pérenne), III) impliquer la dimension économique en collaboration avec les SHS.

De manière générale, le Programme National de Planétologie (PNP) s'attache à stimuler les travaux entre les domaines scientifiques Astronomie-Astrophysique, Terre Solide et Océan-Atmosphère autour de la diversité des objets planétaires présents dans l'Univers. L'interdisciplinarité et les échanges entre communautés sont des points centraux de la réussite de ce programme. 41% des scientifiques CNRS contribuant au PNP relèvent de la section 18 et 5% de la section 19. Concernant les scientifiques relevant du CNU, la section 35 est la plus représentée avec 41% des enseignants-chercheurs.

Systèmes exoplanétaires

Les 5 dernières années ont permis des nouvelles détections et nouvelles mesures qui ont contribué à l'élargissement de la base de données des exoplanètes connues. Par exemple, on peut noter la détection du système de sept planètes telluriques, de masses proches de celle de la Terre, la plupart situées dans la zone habitable, dans le système TRAPPIST-1. Cette détection est venue s'ajouter aux découvertes précédentes de plusieurs autres planètes telluriques situées dans la zone habitable autour de leur étoile-hôte. Les années qui viennent doivent permettre à la communauté Terre Solide de contribuer aux débats à travers des modèles/expériences thermodynamiques et géochimiques de l'intérieur des planètes extrasolaires et des modèles de leur évolution couplée interne-externe.

Les Petits Corps du Système Solaire

La mission *Rosetta* a constitué l'une des plus grandes attractions scientifiques et médiatiques des 5 dernières années (*Breakthrough of the Year* en 2014 pour le magazine américain *Science*). *Rosetta* a démontré la richesse élémentaire et moléculaire d'une comète en identifiant une soixantaine de composés différents, dont des organiques complexes, ou encore l'oxygène moléculaire dont l'origine fait toujours débat. La mesure des rapports isotopiques de plusieurs atomes permet à la fois de déterminer la contribution du milieu interstellaire à la composition de la comète et de contraindre la contribution cométaire à la composition terrestre. Enfin, l'étude de la morphologie et de la composition de la surface, l'étude de l'activité cométaire, en gaz et poussière, sur une longue période temporelle, permet de mieux comprendre les mécanismes de l'activité cométaire, notamment l'origine de sursauts d'activité. Particulièrement notables sont les résultats de l'instrument Rosina sur les gaz rares dans la comète 67P, d'une part pour le rôle primaire joué par des scientifiques français, d'autre part pour leur aspect exemplaire de la synergie naturelle entre géo/cosmochimie et planétologie, observations et modèles, qui caractérise la communauté PNP. Les géochimistes avaient depuis longtemps conclu que la composition isotopique en Xénon de l'atmosphère terrestre, avant fractionnement dû à l'échappement partiel de ce gaz, était distincte de celles du Soleil ou des chondrites. Les résultats de Rosina ont montré que la Terre aurait accréte assez tardivement quelques millièmes de sa masse par le biais des comètes.

La mission *DAWN* de la NASA vers Cérès a eu une forte participation française, avec des résultats importants sur l'interprétation de la géochimie de surface de l'astéroïde et l'éla-

laboration d'un modèle de formation des taches blanches dans le cratère de Occator.

Dans le système solaire externe, la sonde américaine *New Horizons* a montré que Pluton est un monde glacé extrêmement actif, montrant à sa surface toutes les facettes de l'évolution géologique (cryo-volcanisme, écoulement glaciaire, érosion, transport atmosphérique), ainsi qu'une diversité moléculaire aussi riche que celle de Titan dans son atmosphère.

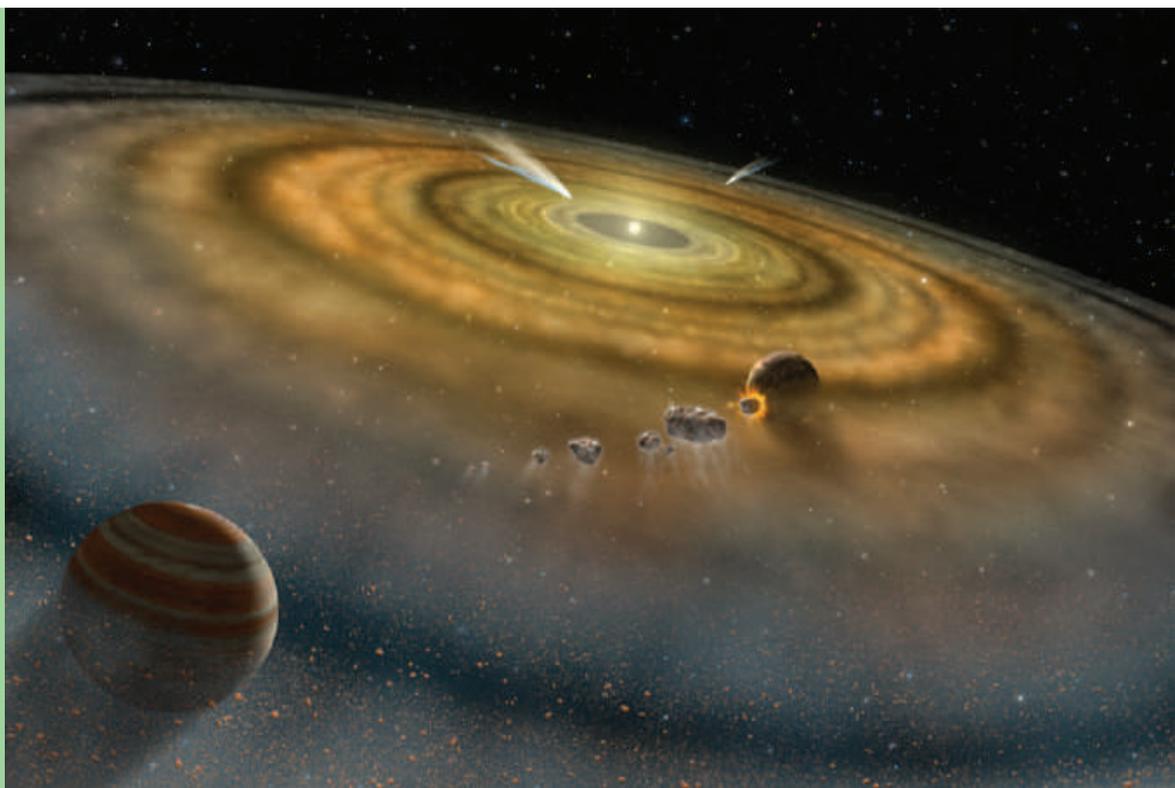
L'étude des petits corps a fait des grands pas en avant et les données ont fait un saut d'échelle, qui sera encore exploité au cours des prochaines années.

Formation des systèmes planétaires

Pendant longtemps, la diversité des rapports isotopiques et des molécules organiques présents dans les météorites a été interprétée comme la signature de l'incorporation directe de composants synthétisés dans le milieu interstellaire. Des expériences de laboratoires récentes montrent qu'il est tout à fait possible d'expliquer les rapports isotopiques mesurés pour différents atomes par des processus d'irradiation par le soleil jeune, tandis que la diversité de la matière organique peut être expliquée par l'hydrothermalisme dans les corps parents des chondrites carbonées. D'autres études montrent que les chondres pourraient s'être formés à partir de collisions entre objets partiellement différenciés plutôt qu'à partir de grains dans la nébuleuse proto-planétaire. L'ensemble de ces résultats suggère que différents processus physico-chimiques ont joué un grand rôle dans la composition des objets actuels du Système Solaire et que les petits corps ne sont peut-être pas si primitifs que ce qui est généralement supposé.

Vue d'artiste de la formation d'un système planétaire avec une étoile centrale

© NASA/FUSEL/Lynette Cook



Ces travaux de cosmochimie mis en relation avec les modèles de formation planétaire vont permettre de mieux connaître l'évolution précoce des systèmes planétaires. La communauté compte sur les missions de retour d'échantillons d'astéroïdes primitifs dans lesquelles elle est impliquée. L'étude des météorites va se poursuivre, notamment sur les aspects isotopiques et chronologiques qui sont cruciaux pour améliorer les modèles sur l'origine du Système Solaire. Sur cet axe de recherche, l'interdisciplinarité du PNP reste un atout considérable.

Structure interne des planètes et Terre primitive

La communauté scientifique française est présente au plus haut niveau et depuis des années sur l'ensemble des thématiques « Terre profonde ». Elle a pris part à de multiples percées à la fois observationnelles, expérimentales et numériques concernant la dynamique présente et passée du manteau et du noyau terrestres. On notera par exemple le rôle moteur des scientifiques français en matière d'assimilation des données magnétiques, nécessitant une profonde synergie entre paléomagnéticiens et modélisateurs.

On signalera aussi la présence toujours au premier plan des groupes d'expérimentation en conditions extrêmes, simulant les intérieurs planétaires, qui dans un contexte concurrentiel continuent à proposer des contributions novatrices et originales, telles que par exemple un nouveau modèle de génération du champ magnétique passé par exsolution de composants mantelliques. Enfin, l'approche expérimentale de la dynamique de la Terre profonde reste l'une des signatures de la communauté française qui participe à son rayonnement international, notamment en matière de dynamique convective dans la graine et le manteau.

La dynamique de la Terre primitive a émergé comme espace de synergie scientifique et la France a un certain leadership dans ce domaine. Ce dernier s'étend à l'étude des environnements primitifs de la Terre, en lien avec la croissance crustale et l'origine de la vie, impliquant la biogéochimie.

Il faut noter également que le PNP a permis de développer une collaboration fructueuse entre les communautés terrestre et planétaire pour l'étude des intérieurs planétaires, qui se concrétise notamment par le développement du modèle d'intérieur d'Encelade le plus performant (voir Fig. 6) et réaliste pour reproduire les observations de la sonde Cassini. Le développement de la tomographie anisotrope des ondes sismiques, l'inversion conjointe des données sismiques et des mesures gravimétriques, et l'obtention de nouvelles données de laboratoire et la simulation numérique des propriétés physiques des minéraux présents en profondeur, permettent aujourd'hui de réaliser une imagerie 3D de la Terre à haute résolution, qui bénéficie à une large communauté. Les géophysiciens sont aujourd'hui à l'œuvre sur les données InSight pour découvrir l'intérieur de Mars. Cette dernière mission constitue une opportunité exceptionnelle pour que la communauté monte encore en puissance sur la fédération de ses forces pluridisciplinaires.

Mars

La combinaison d'observations satellitaires et de l'exploration robotique à la surface permet maintenant d'affirmer que Mars était vraisemblablement habitable entre 3 et 4 milliards d'années. En télédétection, les traces d'érosion hydraulique et les traces de tsunami montrent que l'eau était présente en quantité considérable en surface durant les premiers âges de Mars. Les étapes de la formation de



Vue d'artiste de la mission InSight sur Mars avec le sismomètre déployé au sol

© NASA/JPL-Caltech

la surface actuelle, en particulier du dôme Tharsis, se précisent. En parallèle, les mesures *in situ* de Curiosity par les instruments ChemCam et SAM, à contribution française, révèlent dans les sédiments martiens les conditions physico-chimiques des solutions aqueuses il y a quelques milliards d'années et détectent également la présence de molécules organiques. La découverte de séries magmatiques évoluées dans les roches ignées peut suggérer les prémices d'une formation continentale. Au cours des années à venir, Mars focalisera encore l'attention avec des attentes autour des missions InSight, Mars2020 et ExoMars. La communauté devra apprendre à confronter la « vérité terrain » locale apportée par l'exploration robotique et les futurs retours d'échantillon avec la réalité globale apportée par les missions orbitales.

Pour terminer...

Du côté de Mercure et son champ magnétique, il faudra attendre l'arrivée de BepiColombo en 2025. La France est très impliquée dans cette mission. Puis ce sera au tour des satellites de Jupiter qui seront les objets d'études de la mission JUICE de l'ESA à forte participation française, qui arrivera dans une décennie, et se focalisera en partie sur le champ magnétique de Ganymède. D'ici là, les missions sur la Lune, quasi-annuelles au niveau mondial devraient se succéder et apporter des données riches, au moins pour sa surface. Les cinq ans qui arrivent connaîtront l'impact de l'arrêt récent des missions Cassini, Rosetta, ou Venus Express, mais préparent des missions plus approfondies d'exploration lointaine.

DOMAINES OCÉANIQUES

Cette thématique ne fait pas l'objet de financement sur appel à projets comme pour celles qui précèdent, en raison des spécificités des campagnes à la mer. Le programme TelluS intervient sur du « post-campagne », la logistique et financement des campagnes relevant d'actions le plus souvent internationales, ou en tous cas multi-organismes, avec des calendriers d'évaluation et d'exécution non synchrones d'autres appels d'offre et programmation sur plusieurs années. Réaliser des observations en domaine océanique hauturier reste un défi à la fois technique et logistique. L'accès à plusieurs Infrastructures de Recherche nationales ou européennes (FOF, IODP- ECORD, EMSO...) et le développement/extension de réseaux (ex: OBS fond de mer) sont indispensables. Malgré ces difficultés, les domaines océaniques restent un territoire d'exploration très active en France pour des nombreuses raisons, ne serait-ce que par l'étendue des domaines maritimes sous administration française. Les enjeux liés à la connaissance des océans avec une approche TS sont multiples et très importants. La crise actuelle en cours à Mayotte illustre parfaitement les implications sociétales s'agissant du risque.

L'océan est également un pourvoyeur potentiel de ressources (métaux, H₂...) et il est important de connaître la structure profonde du plancher océanique ainsi que les mécanismes d'évolution et d'interactions avec la biosphère. La communauté TS investie dans les missions à la mer vit une période particulièrement riche et stimulante, que ce soit dans le cadre de programmes internationaux comme IODP ou en réalisant 50% des campagnes hauturières de la FOF (Flotte Océanographique Française). Il en découle l'émergence de nouveaux questionnements dictés à la fois par la recherche fondamentale et par les défis sociétaux. Parmi les plus emblématiques :

- Quel est le rôle du vivant, dont celui de la biosphère dite « profonde », sur les processus gouvernant les échanges entre la terre solide et l'océan, et donc sur la composition des différentes enveloppes de la planète (lithosphère, océan, atmosphère) ?
- Comment l'étude et le monitoring des processus géologiques en zone active permettent-ils de progresser dans la prévision et la prévention des risques naturels d'origines diverses ? Comment cette compréhension des systèmes actifs permet-elle de mieux interpréter les archives du passé que sont les roches ou les sédiments, leur composition et leur structure ?
- Comment la connaissance des processus de concentration et du taux de renouvellement des géo-ressources sous-marines permet-elle aux scientifiques d'en proposer un mode d'exploitation raisonné, respectueux de l'environnement et de la biodiversité ?

En parallèle, certaines questions anciennes mais fondamentales en géosciences marines, n'ont reçu des réponses que très récemment. Ainsi, l'échantillonnage de roches de la croûte océanique inférieure formée en contexte de dorsales rapides a demandé à revoir les modèles de fonctionnement des chambres magmatiques et formation de la croûte océanique, mettant en exergue le rôle des systèmes hydrothermaux jusqu'au manteau, avec des conséquences immenses pour les échanges géochimiques globaux. Une évolution des concepts aux conséquences similaires a également été initiée suite à la découverte des « oceanic core complexes » en contexte de dorsales lentes et ultra-lentes.

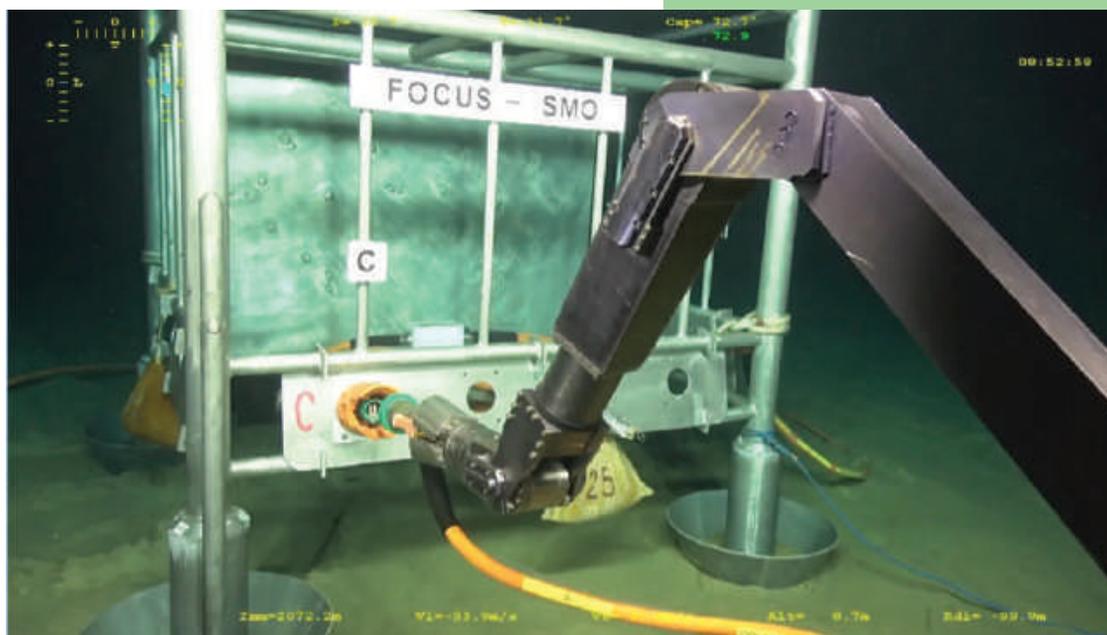
L'acquisition de séries temporelles de plus en plus longues et continues aux observatoires fond de mer, lors de missions récurrentes sur des chantiers, ou par le biais des carottes longs du N/O Marion Dufresne (et bientôt par des engins d'exploration autonome) commence à porter ses fruits. Cet investissement sur le long terme est fondamental pour corrélérer entre eux différents événements (sismiques, géochimiques, climatiques, gravitaires etc.), approche essentielle pour comprendre les systèmes géologiques (dorsale, zone de subduction, marge riftée, etc.) dans leur globalité. Le développement d'une capacité de suivi temporel des processus sous-marins est aussi nécessaire pour traiter la composante marine de crises volcaniques dans le cadre des observatoires volcanologiques. La crise volcano-sismique actuelle à Mayotte en est la parfaite illustration.

À l'avenir les avancées technologiques et le développement de nouveaux instruments permettent d'envisager un suivi des déformations actives en domaine sous-marin (e.g. me-

sures des déplacements relatifs par distancemètres) avec une résolution proche de celle obtenue à terre. La géodésie fond de mer, bien qu'encore balbutiante, devrait révolutionner notre connaissance de la déformation inter-sismique des marges de subduction. Une réévaluation des risques volcanologiques et tectoniques sera alors possible notamment le long des frontières de plaques dont 80% sont immergées.

Connexion du câble optique de 6 km de long par le ROV Victor à 2000 m de profondeur, au large de la Sicile, au cours de la campagne FocusX1 (N/O Pourquoi Pas?) en octobre 2020. Ce câble permettra de détecter les déplacements, même de faible ampleur (1-2 cm), de la faille «Alfeo Nord». L'activité de cette faille et le risque qu'elle pose aux populations riveraines seront ainsi mieux estimés.

© Marc-André Gutscher



L'amélioration des techniques d'imagerie des fonds océaniques, de la précision de la navigation et des capacités des instruments d'observations sur le fond (ROV/HROV/AUV) va également permettre un changement d'échelle dans l'observation géologique en fond de mer (en résolution comme en extension géographique) et ouvrir de nouvelles perspectives dans la compréhension de l'initiation de nombreux processus dont le fonctionnement reste obscur. Comment s'initie une subduction ou un plateau océanique, comment se déclenche l'accrétion océanique, comment le forçage cinématique réactive-t-il les marges continentales et les zones de fractures, qu'est ce qui contrôle l'émergence des failles d'exhumation, comment se déclenchent les glissements gravitaires, les crises telluriques et volcaniques en mer (e.g. la crise au large de Mayotte), sont autant de questions qui restent en suspens.

Il convient ainsi de soutenir, à l'INSU, le développement de ces nouvelles technologies spécifiques aux Géosciences Marines de manière complémentaire à ce qui est entrepris par l'IFREMER mais aussi de participer à la définition des besoins en nouveaux capteurs et engins au sein de la Flotte Océanographique Française.

Les obstacles qui doivent être levés ne sont pas seulement technologiques mais aussi institutionnels. La multiplicité des guichets (INSU, ERC, ANR...) auxquels il faut s'adresser pour obtenir des moyens suffisants de travail est un frein qui va à l'encontre de la valorisation correcte et rapide des données de géosciences marines. À l'instar de l'Allemagne, un guichet unique qui donnerait accès à une campagne en

mer, des moyens de traitement et d'analyse ainsi qu'à des moyens humains (thèses), lèverait un énorme handicap dans la course avec nos collègues à l'international. *A minima* il faut absolument qu'il y ait une meilleure synchronisation des moyens. Il s'agit d'arriver à un niveau de financement suffisant pour valoriser les données collectées en mer non seulement pendant un an comme dans l'AO post campagne actuel mais aussi à plus long terme.

Il convient aussi de susciter et soutenir le recrutement de jeunes chercheurs/chercheuses ayant la motivation pour s'investir dans le montage de nouveaux projets de campagnes en mer. La communauté des chercheurs se réduit en raison d'un manque de recrutement mais aussi en raison des difficultés de financement de la recherche liée aux campagnes et de la trop faible valorisation de cet investissement au service de la communauté pour le déroulement des carrières.

Pour l'avenir, il est impératif de permettre à la communauté des géosciences marines de poursuivre cette dynamique de décloisonnement aussi bien des disciplines (e.g. géochimie, géobiologie, tectonique, sédimentologie...) que des objets d'études (e.g. croûte, failles, chambre magmatique, champs hydrothermaux, bassins, strates, etc.). Cela passe par la programmation de campagnes aux objectifs pluridisciplinaires, mais implique également une prise en compte de cette démarche intégrée dans l'évaluation des projets de recherche.

Rapport de conjoncture 2019 de la Section 18 du CoNRS

SECTION 18. TERRE ET PLANÈTES TELLURIQUES : STRUCTURE, HISTOIRE, MODÈLES

Philippe CARDIN (président de section); Etienne DELOULE (secrétaire scientifique); Denis ANDRAULT; Pierre-Yves ARNOULD; Vincent BALTER; Nicolas BELLAHSEN, Frederick BOUDIN; Pierre CARTIGNY; Marcia MAIA; Stéphanie DUCHENE; Anne DUPERRET; François GUILLOCHEAU; Caroline MARTEL; Elise NARDIN; Tanguy NEBUT; Séverine ROSAT; Philippe ROUX; Violaine SAUTTER; Martine SIMOES; Gabriel TOBIE; Emmanuel TRIC

Notre planète est devenue habitable au cours de son histoire. Quelles sont les raisons qui expliquent son évolution, différente de celle des autres planètes telluriques? Pouvons-nous prédire l'habitabilité des exoplanètes? Questions ouvertes qui nous imposent de continuer à observer, étudier, non seulement les planètes telluriques mais aussi les archives de notre passé pour proposer une histoire contrainte qui explique la structure et la composition actuelle du globe, le fonctionnement de sa lithosphère et de ses reliefs, l'émergence et l'évolution de la vie, et le contrôle des divers processus, reliant l'intérieur du globe à sa surface. L'acquisition de données de terrain, géophysiques et géochimiques et l'utilisation d'algorithmes numériques d'analyse de données sont nécessaires. Cependant, ces informations ne seront comprises que si elles sont intégrées dans des modélisations conceptuelles et physico-chimiques contraintes, qui, en retour, éclairent les morceaux de puzzle manquants de l'histoire de la Terre. Cette démarche est celle à l'œuvre dans la prédiction, non suffisamment performante à ce stade, de l'évolution des systèmes naturels telluriques (séismes, volcans, instabilités gravitaires, tsunamis, orages magnétiques...), d'autant plus qu'ils présentent un risque pour nos sociétés. Des progrès sont attendus même si la physique complexe, multi-échelles et multi-paramètres, alliant temps courts et temps longs, reste un défi. Enfin, la connaissance des sous-sols, de leurs ressources (minerais, hydrocarbure, géothermie, stockage...), de leur formation et évolution ne doit pas être négligée à cause des implications économiques, sociales et politiques.

INTRODUCTION

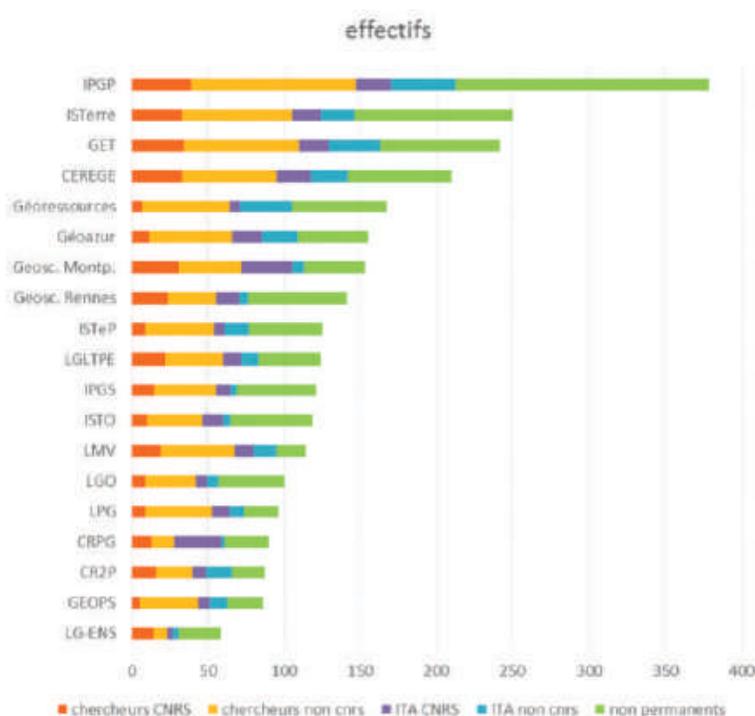
La section 18 s'attache à développer les connaissances scientifiques sur le système Terre / planètes telluriques. Elle se place dans une longue tradition qui s'intéresse à la description et à la compréhension du monde qui nous entoure, de l'échelle microscopique à l'échelle planétaire. Ce travail est – par nature – pluridisciplinaire, intégrant observations naturalistes, mesures géophysiques, analyses géochimiques, expérimentation pétrologique, modélisations

physiques et mathématiques, ainsi que l'exploration spatiale des autres planètes telluriques.

De tout temps, nos disciplines ont contribué à l'essor de nos sociétés par l'identification de ressources minérales et énergétiques, l'évaluation des aléas telluriques, et plus fondamentalement en découvrant le fonctionnement du système Terre et de son histoire. Notre quête a aussi permis de développer de nombreuses méthodes ou concepts – tels que l'analyse géochimique isotopique ou l'inversion de données – qui ont très largement bénéficié à d'autres disciplines.

Aujourd'hui¹, 32 laboratoires (Unités Mixte de Recherche) sont rattachés à la section 18, dont 19 en rattachement principal et 7 en second rattachement. Les 19 laboratoires en rattachement principal comptent 2817 personnes dans leurs effectifs, dont 1226 chercheurs « permanents », comprenant 326 chercheurs CNRS.

1- Les chiffres datent de décembre 2018



Le nombre de laboratoires de la section 18 a diminué au cours de la dernière décennie du fait de restructurations en grosses unités (IPG Paris, ISTerre Grenoble, Géosciences Environnement Toulouse, Géosciences Montpellier...). Voulu par les tutelles, cette restructuration permet de mutualiser plus facilement les ressources financières, les équipements et les fonctions support, ainsi que d'assurer une certaine visibilité à nos recherches. Un regroupement est en cours à Strasbourg entre l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg (section 18) et le Lyghes (section 30). En revanche, notre communauté reste assez dispersée sur le site de Lille (3 unités) et dans une moindre mesure à Toulouse (GET et IRAP) et Nancy (Géoresources et CRPG).

Cinq unités (GET, ISTerre, Géoazur, CEREGE, LMV) ont aussi pour tutelle l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD), comprenant 62 chercheurs permanents IRD à comparer aux 167 chercheurs CNRS et 307 enseignants chercheurs. Les cibles géographiques de l'IRD dans notre domaine sont les pays andins, l'Indonésie, l'Afrique de l'ouest, l'Inde, le Liban et l'Algérie, offrant ainsi bien souvent l'accès à des sites uniques tout en développant des collaborations avec les chercheurs de ces pays.

En plus des tutelles universitaires locales, nous comptons le Muséum National d'Histoire Naturelle (CR2P et IMPMC), le CNES (LPG et GET), le BRGM (ISTO), l'INRA (CEREGE) et IFSTTAR (ISTerre). Enfin, notons le statut particulier de l'UMR Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP), seule unité du grand établissement éponyme.

Notre communauté scientifique s'appuie principalement sur deux sections puisque 17 des 32 unités s'inscrivent en section 18 émargent aussi en section 30 (section commune entre l'INSU et l'INEE), couplant ainsi « géologie profonde » et « géologie de surface », et partageant de ce fait méthodes et questionnements. Plus précisément, sur les 19 unités en rattachement principal de notre section, 9 ont pour rattachement secondaire la section 30. Notons que plus de 50 chercheurs de la section 18 sont dans une unité ayant la section 30 comme section principale de rattachement. Enfin, la structuration en OSU (Observatoire des Sciences de l'Univers) dans de nombreux sites favorise naturellement les liens scientifiques entre les communautés de l'INSU et de l'INEE, même si la reconnaissance des OSU par les universités hôtes est variable selon les sites.

Les couplages sont forts avec la section 19 (8 unités en commun), illustrant les nombreuses interactions entre Terre solide et enveloppes fluides, ou encore notre intérêt commun pour les évolutions climatiques.

Les laboratoires impliqués en paléontologie (7 unités) sont aussi rattachés à la section 29 (rattachée à l'InSB) qui s'intéresse à l'évolution du monde vivant.

Notons enfin un tropisme fort vers les sections 9 et 10 (sciences de l'ingénieur) pour les techniques d'acoustique, de mécanique du solide et des fluides (3 et 3 unités respectivement).

Étonnamment, seules deux unités (LPG et IRAP) assurent un lien structurel avec la section 17 d'astrophysique, et ceci principalement autour de la planétologie.

Les 19 unités principales de la section 18 ont une bonne production puisque 2579 articles ont été publiés en 2017 selon ISI WoK, soit 2.1 articles par chercheur. Ces 19 laboratoires cumulent 100 000 citations fin 2017 et assurent une large visibilité et valorisation de notre travail au niveau international. Cette reconnaissance est mesurable grâce aux 25 médaillés des deux grandes sociétés savantes de notre domaine, à savoir l'American Geophysical Union (AGU) et l'European Geophysical Union (EGU). Notons aussi les 38 AGU fellows de nos laboratoires qui font de la France le premier pays étranger primé par l'AGU. Le classement de Shanghai, dans le domaine « Earth Science » fait apparaître 6 universités françaises dans le top 50 (classement 2018), par exemple l'université Paris 7 (IPGP) à la 12^e place et l'université Grenoble Alpes (ISTerre) à la 18^e place. En ce qui concerne les financements, notre communauté a été lauréate de 50 ERC cette dernière décennie. Ces projets d'excellence permettent de dynamiser les questionnements scientifiques dans les laboratoires, de maintenir des équipements de pointe et de financer des jeunes chercheurs.

Notre section compte un peu plus de 300 chercheurs avec autant de chargés de recherche (CR) que de directeurs de recherche (DR). Ce nombre s'est érodé cette dernière décennie (baisse de l'ordre de 10%). La proportion de femmes est de l'ordre de 30% sur l'ensemble de la section, 35% dans le corps des CR et 25% dans celui des DR. Ces chiffres doivent être mis en regard des chiffres des sections CNU 35 et 36 qui réunissent les enseignants chercheurs de nos disciplines. Alors que l'effectif global de ces deux sections a augmenté

de 4 % sur les 20 dernières années, il ne comprend qu'un ratio de 26 % de femmes (ce ratio descend à moins de 15 % dans le corps des professeurs). Fait assez rare, nous venons de promouvoir une directrice de recherche à la classe exceptionnelle en section 18.

Concernant les recrutements, la section 18 a recruté 64 chargés de recherche (dont 18 femmes) depuis 2009, soit de l'ordre de 6 postes/an en moyenne (5.8), avec une répartition géographique en lien avec la taille et le dynamisme des laboratoires (15 à Paris, 8 à Toulouse, 6 à Lyon, Grenoble et Nancy, 4 à Lille et Clermont-Ferrand...). Depuis 2009, 72 personnes (dont 23 femmes) ont été promues directeur de recherche, soit 6,5/an.

Bien qu'en partie subjective, nous avons classé les 305 chercheurs de la section en trois groupes thématiques significatifs de notre histoire: Géophysique (42%), Géologie (30%) et Géochimie (28%). La Géophysique comprend la sismologie, la géodésie, la gravimétrie, le géomagnétisme, la minéralogie haute pression et la géodynamique globale. La Géologie comprend la tectonique, la pétrologie, la volcanologie, la paléontologie, la stratigraphie et la sédimentologie. La Géochimie inclut aussi la cosmochimie et la géochronologie. Ces nuances correspondent à des métiers dont l'excellence est nécessaire pour faire avancer nos questionnements scientifiques, qui eux, ne se posent plus en termes de sous-disciplines mais en termes de description et de fonctionnement du « système planète ». C'est d'ailleurs de cette manière que nous avons décidé de présenter une sélection de nos thématiques de recherche les plus actives et intégratives.

AGE ET DURÉE DES PROCESSUS PLANÉTAIRES

Des temps longs aux temps courts: mieux connaître les caractéristiques temporelles de la dynamique terrestre pour mieux comprendre la planète d'aujourd'hui.

Les enjeux liés au changement climatique, à l'épuisement des ressources fossiles ou aux risques naturels volcaniques et sismiques imposent de travailler à une échelle de temps d'observation et d'anticipation qui est celle du siècle. Face à l'accélération des bouleversements environnementaux, les géosciences apportent une vision à une échelle de temps toute autre, celle de la durée de vie de la Terre. Tout au long de son histoire, la Terre a subi de nombreuses crises et transitions, dont il est important de mesurer les âges, les durées et les fréquences pour pouvoir en analyser les mécanismes et les conséquences.

Le développement des techniques de datation *in situ* a permis de gagner en précision spatiale pour atteindre des échelles micrométriques voire nanométriques et ainsi distinguer des événements proches, par exemple les différentes phases de la croissance d'un minéral. Le développement continu de la thermochronologie et de la datation des surfaces par les isotopes cosmogéniques et par luminescence dynamise l'étude des reliefs. Dans le domaine de la tectonique et de la déformation active, les méthodes d'observation spatiale (GNSS, INSAR, imagerie optique) permettent d'évaluer les déplacements horizontaux et verticaux de la lithosphère à partir de banques de données cou-

vrant plusieurs décennies et avec une fréquence croissante, ce qui permet de déceler des mouvements de plus en plus lents et petits, et d'améliorer notre connaissance de leur cyclicité. Tous les domaines des géosciences sont concernés par la recherche des paramètres temporels, mais on peut retenir parmi les sujets d'actualité les exemples suivants.

De la vitesse des processus tectoniques à l'activité sismique. L'activité sismique se déroule sur des temps courts, mais répond au déplacement lent et en partie asismique des plaques tectoniques sur le long terme. Or, l'estimation des vitesses de déformation passées est un verrou persistant, qu'il faut s'attacher à lever par la datation des marqueurs de la déformation ou des minéraux dans les zones de failles (micas, calcite).

Persistance des réservoirs magmatiques et vitesse des processus de recharge et de vidange. Une éruption volcanique est un événement catastrophique de dégazage et d'ascension de magma dont la durée s'exprime en heures ou en jours, mais qui est en lien avec des processus plus longs de recharge ou de vidange des réservoirs magmatiques en profondeur (en mois ou milliers d'années). D'autre part, la durée de vie des systèmes sources des magmas, la fusion partielle en base de croûte et dans le manteau, qui s'étale sur des millions d'années, est mal connue. Expliciter les processus qui s'emboîtent dans ces sauts d'échelles de temps et d'espace est un enjeu.

La formation des ressources, un processus lent et incertain. La genèse des ressources minérales ou énergétiques est l'aboutissement d'un long enchaînement d'événements de temps caractéristiques divers. La récurrence des événements minéralisateurs à l'échelle régionale et leur distribution dans l'histoire de la Terre restent souvent mal connues. Dater les différentes étapes de la formation des pétroles ou des ressources minérales et définir la durée de chaque étape est une suite de défis à relever.

Vitesses des changements environnementaux du passé. La réaction des enveloppes superficielles aux forçages naturels et aujourd'hui anthropiques est au cœur des enjeux environnementaux. La détermination de la durée des crises et du retour à l'équilibre ou de la durée des phases de transition dans les périodes récentes ou plus anciennes se pose dans de nombreux domaines: les crises biologiques, les variations des paramètres climatiques, l'évolution de la chimie de l'atmosphère et de l'hydrosphère ou encore les variations du niveau des mers.

Durée des processus d'accrétion et de différenciation planétaire. Si la chronologie de la différenciation noyau/manteau des corps parents des météorites peut être abordée de manière directe, celle de la planète Terre reste un champ d'exploration. À la lumière des données géochronologiques et isotopiques récentes, l'âge et la vitesse d'extraction de la croûte terrestre sont toujours sujets à débat.

DIVERSITÉ DES PLANÈTES TELLURIQUES

Caractériser la diversité des planètes et des processus planétaires pour mieux comprendre comment les planètes se forment et évoluent, et ainsi identifier les spécificités de la planète Terre.

Caractérisation des intérieurs planétaires : Malgré les avancées majeures de l'exploration spatiale au cours des deux dernières décennies, la structure interne des planètes telluriques reste mal contrainte. Difficile, par exemple, de quantifier précisément la taille des noyaux de Vénus ou de Mars, sans parler de la taille de la graine quand celle-ci existe. Ce sont pourtant des informations cruciales pour discuter de leurs conditions de formation (composition chimique, état thermique), de leur dynamique interne et leur évolution à long terme, et de les comparer avec la Terre.

Le premier sismomètre martien développé par la France est opérationnel depuis début 2019 et ses résultats sont attendus pour définir un modèle complet de la structure interne de Mars. En parallèle, la découverte d'exoplanètes de taille terrestre motive le développement de nouvelles équations d'état pouvant être appliquées à des conditions de pression, de température et de composition sensiblement différentes de celles rencontrées sur Terre. Une grande diversité de structures internes, associée à des évolutions géodynamiques variées (mode de convection, dynamique de la lithosphère, géodynamo) sont en cours d'études.

Étudier l'ensemble des planètes dans notre système solaire et au-delà permettra de mieux comprendre les facteurs clés contrôlant l'histoire géodynamique d'une planète et de mieux comprendre les spécificités de notre planète.

Les premiers instants des planètes : L'analyse de météorites et d'échantillons lunaires apportent des contraintes clés sur les premiers instants du système solaire. Une variété de traceurs géochimiques nous renseigne sur les processus de formation des embryons planétaires, puis des planètes, à partir des briques élémentaires. Pourtant, le développement de modèles physiques cohérents reste un défi. Notre compréhension des processus de fractionnement dans les disques proto-planétaires, ainsi qu'au cours des étapes successives de la formation et de la différenciation planétaire, a besoin d'être affinée, ce qui implique l'acquisition de données géochimiques et la réalisation d'études expérimentales toujours plus pointues.

La collision entre des objets de taille planétaire, qui, sur Terre, a entraîné la formation de la Lune, est un processus crucial. Reproduire expérimentalement et numériquement les conditions extrêmes atteintes pendant ce processus demeure un défi majeur. Ceci est nécessaire pour mieux quantifier les conséquences des océans magmatiques et de la cristallisation du manteau sur la ségrégation des grands réservoirs planétaires.

Couplage planétaire et habitabilité : L'évolution planétaire est modulée par d'importants couplages externes, à savoir des impacts planétaires, des interactions avec les enveloppes externes et les mouvements orbitaux et rotationnels. Les interactions de marée ont, par exemple, joué un rôle clé dans l'évolution de Mercure, de Vénus, du couple Terre-Lune, d'une grande partie des lunes du système solaire externe, et dans la plupart des exoplanètes que l'on découvre actuellement. Entre autres, les forçages mécaniques dus aux impacts et aux forçages de marées pourraient jouer un rôle important dans l'apparition et le maintien du champ magnétique.

Comprendre comment les couplages entre la dynamique interne et les enveloppes externes contrôlent l'évolution de

la Terre et des autres planètes est un grand enjeu du futur. En particulier, quantifier ces interactions dans des contextes planétaires autres que celui de la Terre est crucial pour évaluer les conditions d'habitabilité. Forte de sa connaissance approfondie du système Terre, notre communauté joue un rôle majeur dans ce défi, en proposant des modélisations numériques et des mesures expérimentales de dernière génération.

EXOBILOGIE, HABITABILITÉ DES PLANÈTES ET ORIGINE DU VIVANT

L'origine de la vie, question interdisciplinaire par excellence, est devenue une thématique à part entière en Sciences de la Terre et de l'Univers avec la recherche de traces de vie (bio-signatures) terrestres et extraterrestres. La géo-microbiologie est une nouvelle discipline à la croisée de la minéralogie, géochimie et microbiologie, englobant de nombreuses thématiques : cosmo-biochimie, exobiologie et microbiologie archéenne. L'implication française sur les missions spatiales *in situ* (ex. : Rosetta sur la comète 67P/Churyuov_Gerasimenko), les missions de retour d'échantillons cométaires et interstellaires (ex. : Genesis Stardust), et dans l'étude de la matière organique extra-terrestre (chondrites carbonées et micrométéorites) a permis de mieux appréhender la diversité des précurseurs prébiotiques.

Sur Mars, les recherches actuelles ont montré qu'elle a été habitable. L'implication française dans les missions spatiales en orbite (Mars express) et *in situ* (Curiosity, MSL) a contribué à faire évoluer le paradigme « *follow the water* » vers celui de « *follow the carbon* ». Sur les lunes glacées, la communauté française a joué un rôle majeur dans la découverte d'océans profonds, et prépare la future vague d'explorations qui testeront leur potentiel exobiologique.

Sur Terre, l'identification de biosignatures dans les roches archéennes, implique aussi l'étude d'analogues actuels des procaryotes primitifs en milieux extrêmes (salinité, température, PH, etc.), sous-marins (EMSO, Nautelle), lacustres (lacs Pavin, Tanganika) ou souterrains, ainsi que par l'expérimentation géo-microbiologique, le développement de nouveaux traceurs et l'utilisation des rayonnements synchrotron.

Grandes questions

D'une façon générale, comment distinguer les paramètres physiques des empreintes réellement biologiques, et comment démontrer la biogénicité sur des bases plurielles (morphologie, composition moléculaire et isotopique) ?

Plus spécifiquement :

- Quelles sont les sources de matière organique primitive terrestre et extra-terrestre ?
- Quelles sont les conditions limites de l'habitabilité ?
- Quelles traces de vie est-on susceptible de trouver sur Mars et sur les satellites glacés ?
- Comment préserver ces traces de vie après des milliards d'années, d'irradiation, de métamorphisme et d'altération ?

- Quelles sont les plus anciennes traces de vie microbiennes dans les roches terrestres ? Où et dans quel type d'environnement (hydrothermal, marin peu profond, continental, souterrain) se sont-elles développées ?
- Quelle est la base métabolique de ce vivant, son impact sur l'environnement ? Il s'agit de savoir comment le vivant a pu influencer l'évolution de la planète, comment le repérer à travers les transformations qu'il a induites.

Prospective

L'objectif le plus consensuel aujourd'hui reste la recherche de biosignatures dans des roches anciennes archéennes terrestres et roches extraterrestres via le retour d'échantillons. Plusieurs observables clés, telles que la caractérisation de matière organique non dégradée, devraient être permises par l'étude d'échantillons d'astéroïdes et de Mars. Les thèmes d'habitabilité et de planétologie comparée demandent à être approfondis en prenant en compte le caractère extrême (les lunes de glace et Mars) des conditions physiques au regard du référentiel terrestre.

Le thème de biosignature doit lui aussi évoluer en prenant en compte la diversité des métabolismes connus et leur évolution au cours des temps géologiques, et s'enrichir des contraintes données par la microbiologie, la chimie prébiotique et la biophysique. Un effort devra être fait sur la caractérisation des modifications minéralogiques et géochimiques que le vivant exerce sur son environnement minéral proche. L'approche expérimentale ainsi que l'exploration d'environnements modèles trouvent ici tout leur intérêt.

RELIEF, ÉROSION ET ROUTAGE SÉDIMENTAIRE

Durant les années 90, la communauté des Sciences de la Terre s'est réapproprié l'étude des reliefs de la Terre et des processus d'érosion associés. De nouveaux concepts, concernant notamment l'effet sur les cycles biogéochimiques de l'érosion d'une chaîne de montagnes, la mesure et la modélisation de la dénudation, le transport gravitaire profond ou la modélisation analogique et numérique du couple érosion/sédimentation, ont été introduits.

La notion de **topographie à l'équilibre**, très discutée, reste peu illustrée par des données naturelles. Le défi actuel est de quantifier les paramètres morphologiques des reliefs et les vitesses/bilans d'érosion associée en confrontant temps courts et longs, petits et grands bassins versants.

Comment améliorer les lois d'érosion et de transferts des sédiments sur les temps longs ? Les principaux défis concernent (1) l'érosion chimique, en y intégrant notamment le rôle des micro-organismes et en comprenant les relations entre érosions chimique et physique dans des contextes tectoniques et climatiques différents, (2) l'érosion glaciaire, (3) l'érosion éolienne, ou encore (4) l'érosion sous-marine.

Évolution du routage sédimentaire dans le temps. Il s'agit de quantifier et de prédire la réponse du système érosion-transfert-sédimentation à des sollicitations tectoniques et climatiques au travers (1) d'une mesure des bilans

érosion-sédimentation sur des systèmes complets (actuel, ancien) et (2) le développement de modèles numériques couplés incluant érosion-transfert-sédimentation des bassins versants aux dépôts ultimes sur la croûte océanique.

Ces approches intégrées ont pour objectifs de quantifier les **temps caractéristiques de réponse** de l'érosion à un forçage tectonique ou climatique ou celle des temps de transfert des sédiments (comme par exemple le rôle tampon des bassins versants ou les transferts latéraux dus à la circulation océanique).

La réponse de l'érosion et du routage sédimentaire aux **forçages brefs** est une question majeure, après deux décennies focalisées sur les interactions déformations, climats, reliefs sur les temps longs. À l'échelle du *cycle sismique*, la contribution (positive ou négative) des séismes à l'érosion des reliefs, intégrant le temps de transfert post-sismique des sédiments des pentes vers l'exutoire et, en retour, la modification de l'état de contraintes sur les failles actives du fait des transferts de masses en surface (érosion, sédimentation), sont des thèmes de recherche émergents. Concernant le climat, les effets des *événements hyperthermaux* sont à établir, avec la question de l'importance relative de l'eustatisme, des flux terrigènes (érosion) et de la production de sédiments.

Le rôle de l'**érosion dans les cycles biogéochimiques** demeure énigmatique. Une des inconnues concerne le *bilan du carbone enfoui* dans les sédiments, y compris dans les systèmes subactuels. La mesure (directe ou par proxys) du carbone enfoui et la compréhension des mécanismes régulant cet enfouissement devraient éclairer cette question.

Les chaînes de montagne et les reliefs anorogéniques (70% des reliefs terrestres) partagent en commun une forme de relief mal connue, les **surfaces d'aplanissement**. Quel est leur mode de formation ? Sont-ils signifiants comme marqueurs du déplacement vertical d'origine tectonique, en particulier, dans les chaînes de montagne ? Au-delà de ces objets, c'est toute la question des processus et des contrôles (notamment par la dynamique du manteau) des reliefs anorogéniques qui est posée.

D'un point de vue méthodologique, la quantification des **paléoaltitudes** reste en suspens : les approches paléobotaniques et isotopiques doivent encore faire l'objet de développements et être intercalibrées. La mesure de la dénudation a beaucoup progressé (traces de fission, U-Th/He, isotopes cosmogéniques, OSL), mais la prise en compte de la complexité passe par une compréhension des processus élémentaires (diffusion intra- et inter-granulaire, interactions dans un système hétérogène...).

DYNAMIQUE DES CLIMATS ET ÉCOSYSTÈMES ANCIENS

L'étude des climats et des environnements anciens nous renseigne sur le fonctionnement et les perturbations des enveloppes superficielles du système Terre. Leur archivage dans les couvertures sédimentaires océaniques et continentales permet d'explorer les impacts et les rétroactions des forçages biologiques, climatiques et géodynamiques au cours des temps géologiques. Si l'étude

des crises et transitions est fondamentale et abordée de longue date par la section 18, la compréhension de la stabilité du système Terre devrait l'être tout autant.

Le développement de chronomètres, de traceurs environnementaux (salinité, état redox, température...), la reconstruction des conditions physiques (bathymétrie, volume des océans et des calottes glaciaires...) et l'acquisition de données de terrain (à terre et en mer) nous semblent essentiels pour mieux appréhender la répétabilité des crises, les transitions et la stabilité du système Terre, en partant de questions fondamentales comme:

Comment reconstruire les impacts des processus géologiques et leurs rétroactions sur le climat et l'environnement dans les temps anciens? Ces processus sont, entre autres, les variations orbitales, l'altération continentale et les reliefs, la circulation océanique et la pompe biologique, l'hydrothermalisme, le volcanisme et le dégazage de la Terre...

Comment caractériser les événements extrêmes passés? Comment distinguer les perturbations des transitions climatiques? Il s'agit ici, notamment, d'étudier les hyperthermaux, la dynamique de la cryosphère et de l'hydrosphère, et les périodes de type *greenhouse* et *icehouse*. La comparaison de ces événements et de leurs enregistrements géologiques, à différentes périodes du Phanérozoïque mais également au Précambrien, est à envisager.

Comment connecter la dynamique de la paléobiosphère avec l'évolution des climats et environnements anciens?

Cette question concerne les liens réciproques entre les processus géologiques sous-jacents aux variations environnementales, les climats et l'évolution des écosystèmes, pendant les périodes de stabilité et de perturbations. Le socle fondamental concerne les études de la composition et de l'évolution de la biosphère ainsi que celles du fonctionnement des écosystèmes dans le passé.

Comment relier les études sur les analogues actuels à celles des environnements anciens? Les biais associés aux fonctions de transfert entre la colonne d'eau, les organismes et les sédiments, et leur application aux sédiments anciens doivent être mieux contraints. Les travaux aux temps modernes complèteront le développement des traceurs géochimiques/isotopiques et l'instrumentation *in situ*.

Comment optimiser les couplages données - modèles et intégrer la complexité biologique et géochimique dans les modèles couplés océan/atmosphère? Des efforts seront à mener, entre autres, sur l'intégration de processus hétérogènes, de données spatialisées, des masses d'eau continentale, de la végétation et de la (micro-)biosphère dans les modèles.

L'hétérogénéité des types de données et de leur distribution spatio-temporelle devra être pleinement intégrée pour évoluer d'une vision multi-1D à une vision 4D nécessaire à la compréhension de l'évolution du système Terre. L'élaboration de bases de données mutualisées et évolutives nécessitera des innovations mais sera essentielle pour évoluer vers une paléogéographie interactive et intégrative. Un effort important devra être poursuivi sur la datation des événements en maintenant les outils stratigraphiques et sur les caractérisations paléoenvironnementales par l'amélioration des

outils naturalistes, analytiques et numériques.

Le défi majeur de ces futures années sera de conduire des démarches intégratives en combinant les approches mentionnées. Des interactions constructives entre les différentes communautés faciliteront l'intégration de données disparates et spatialisées dans les modèles numériques. Les explorations des couplages des processus biotiques et abiotiques, de la confrontation de leurs échelles de temps spécifiques induiront la caractérisation objective de la dynamique des environnements, climats et écosystèmes dans les temps anciens.

COMMENT L'INTÉRIEUR DE LA TERRE CONTRÔLE-T-IL LES CONDITIONS DE SURFACE ?

- **Quel est le rôle des interactions entre manteau et réservoirs superficiels dans la genèse de la croûte continentale et dans l'établissement et le maintien des conditions habitables de surface ?**
- **Comment mieux intégrer les données géophysiques, géochimiques et de la pétrologie expérimentale dans la modélisation de la dynamique de la Terre interne ?**
- **Comment se maintient le bouclier magnétique garant de la préservation de l'atmosphère et de l'habitabilité de notre planète ?**

La Terre archéenne hostile

Après l'impact lunaire, la cristallisation de l'océan magmatique a laissé une Terre très chaude à toutes profondeurs, au moins 300 degrés au-dessus du géotherme actuel. La dynamique interne au cours de l'Archéen reste méconnue, alors qu'elle reste déterminante même pour l'état actuel de notre planète. Par exemple, le champ magnétique s'est établi rapidement, mais les causes primaires de son établissement et de son maintien jusqu'à aujourd'hui restent controversées.

La vie s'est développée dès l'Archéen, malgré une atmosphère anoxique dominée par le CO₂. Des procaryotes ont évolué à travers des révolutions paléo-environnementales largement inconnues. Quelle était la dynamique de la lithosphère durant l'Archéen? Alors que des traceurs géochimiques démontrent la préservation de réservoirs mantelliques distincts et que les komatiites témoignent de la fusion du manteau archéen profond, comment sont nés les premiers continents?

De l'archéen au protérozoïque : La grande transition

La Terre entière subit des mutations majeures il y a environ 2.5 Ga, marquées par la grande oxygénation de son atmosphère, point de départ du développement exceptionnel de la biosphère qui mènera progressivement aux eucaryotes multicellulaires. À la même période, l'établissement progressif de la tectonique des plaques associée se fait suite à un changement de dynamique du manteau. Comment la fusion partielle du manteau aux dorsales océaniques, le recyclage dans les zones de subduction, l'établissement du

cycle interne des éléments volatils (en particulier du carbone et de l'hydrogène), la croissance continentale et l'orogénèse, ont-ils contribué à cette grande transition ?

Par exemple, les mécanismes de croissance et destruction des continents restent très discutés. Se situent-ils principalement dans les zones de subduction ou bien à la base de la croûte dans les contextes collisionnels ou intraplaques ? De même, comment la dynamique mantellique influence-t-elle le champ magnétique et sa stabilité ? Quel est l'âge de la graine et quel impact cela a-t-il sur le champ magnétique ? Y a-t-il ou y a-t-il eu des couches stratifiées à l'intérieur du noyau liquide ? Si oui, quels sont les alliages qui les constituent ? De fait, le maintien de la géodynamo jusqu'à aujourd'hui reste une énigme.

La Terre moderne

Bien plus récemment, la dislocation de la Pangée (-200 Ma) a créé l'environnement tectonique global moderne. L'observation de la Terre actuelle par des méthodes géophysiques et géodésiques, couplée à des contraintes apportées par la pétrologie expérimentale et la géochimie permet de développer des modèles de convection qui permettent d'apprécier le rôle du manteau dans le fonctionnement actuel de la surface. Par exemple, le lien entre l'évolution géodynamique, la topographie dynamique et l'évolution du vivant, durant le Phanérozoïque y compris au Quaternaire, est un domaine très actif.

La prise en compte des processus métamorphiques, hydrothermaux et volcaniques dans tous les contextes tectoniques (zones de subduction, lithosphère océanique, zones de collision et domaines intraplaques), contraints par l'expérimentation en laboratoire, rend possible la modélisation des cycles des éléments volatils (carbone, oxygène, soufre, etc.) et complète ainsi notre connaissance des liens fondamentaux entre cycles internes, cycles externes et les relations entre monde minéral et monde organique.

DÉFORMATION ET ALÉAS TELLURIQUES

L'étude des déformations lithosphériques et des aléas telluriques (séismes, éruptions volcaniques, glissements gravitaires et tsunamis) repose sur des enjeux à la fois fondamentaux, sociétaux et économiques. Observer, expérimenter et modéliser constituent un triptyque classique mais nécessaire à la compréhension de ces processus pour prédire leur évolution. L'ingénierie instrumentale de plus en plus précise et l'afflux de données massives issues de nos observations poussent notre communauté à remettre en cause les concepts classiques et à intégrer des développements nouveaux comme l'intelligence artificielle afin de relever des défis de demain et conduire nos territoires à être plus résilients face à ces aléas naturels.

Déformation lithosphérique : vers une rhéologie augmentée

Depuis plusieurs décennies, un des défis en Sciences de la Terre est la compréhension unifiée de la déformation de la

lithosphère à court, moyen et long terme. Les hautes résolutions spatiales et temporelles des données géologiques, géophysiques et géochimiques actuelles nous amènent à changer de paradigme et à questionner les mécanismes de la déformation active. En effet, la déformation de la lithosphère et aux interfaces des plaques (notamment inter-sismique) apparaît comme une succession de phénomènes transitoires illustrés notamment par les séismes et glissements lents, les trémors non-volcaniques, etc. On observe aujourd'hui un spectre complet depuis le glissement continu jusqu'aux grands séismes. Les déformations transitoires sont actuellement envisagées comme contrôlées par le chargement tectonique, les injections de fluide, les transformations de la roche et leur cinétique – et de ce fait les changements de résistance, de volume et de contraintes associés. Un des défis actuels est de **relier les signaux géophysiques à des observations géologiques** (pétrologiques, géochimiques, structurales notamment) des zones déformées fossiles et exhumées (zones de cisaillement cassant et/ou ductile).

L'expérimentation en laboratoire vient enrichir cette approche en caractérisant l'impact des transformations minéralogiques, des changements de phase et de la fusion partielle sur la rhéologie. Ceci afin de mieux appréhender les processus responsables de la localisation de la déformation sur les temps longs mais aussi ceux à l'origine des signaux transitoires. Ces nouvelles données naturelles et expérimentales permettront d'alimenter et de calibrer des **modèles thermo-mécaniques avec des lois rhéologiques réalistes** (fluage et friction).

Actuellement, grâce à l'essor sans précédent des moyens de calcul, les modèles thermo-mécaniques permettent la modélisation de la déformation long-terme de la lithosphère à très haute résolution spatiale, en 3D et en prenant en compte les couplages entre processus superficiels et profonds. Par ailleurs, si les modèles de cycle sismique actuels reproduisent de manière satisfaisante les données dont nous disposons sur les déformations co-, inter- et post-sismiques, une nouvelle génération de modèles (qui commence à voir le jour) prendra en compte de manière plus réaliste la rhéologie de la lithosphère (et son évolution sur le court et le long-terme) par le biais des nouvelles lois de friction et de fluage. Ces développements récents montrent que l'étude et la modélisation globale de la déformation de la lithosphère à l'échelle du cycle sismique sera possible, tout en intégrant la déformation à plus grande échelle de temps et d'espace.

Volcanologie : rôle du couplage profond-surface sur la dynamique éruptive

En volcanologie, l'objectif est de comprendre les processus profonds (transferts de masse, conditions de stockage des magmas, cristallisation, dégazage) responsables des différents dynamismes éruptifs observés en surface, et de **proposer des modèles prédictifs aidant à la gestion des crises volcaniques**. Les questionnements scientifiques restent nombreux : mécanismes et échelles de temps des processus (ex remplissage et vidange des réservoirs), détection de signaux pré-éruptifs, rôle du système hydrothermal, relations

tectonique-sismique-volcanisme, lien avec les ressources minérales et géothermie, influence des volcans sur le climat, etc. Pour que les collectivités territoriales s'emparent pleinement des modèles prédictifs, l'analyse de l'aléa volcanique doit maintenant intégrer les risques associés tels que **les déstabilisations de flanc et les tsunamis**, ce qui requiert une évolution vers une stratégie multidisciplinaire (i.e. une imagerie fonctionnelle associant géophysique et géochimie des magmas, fluides et gaz).

Les éléments de réponse passeront par des développements (I) techniques des méthodes géophysiques permettant de repousser les limites actuelles des résolutions spatiales et temporelles et, de fait, une imagerie plus fine des structures profondes du système magmatique, (II) analytiques, donnant accès à des résolutions chimiques et géochronologiques traçant des évolutions extrêmement fines des processus, (III) expérimentaux en laboratoire simulant de manière de plus en plus réaliste (en pression, température, décompression ou déformation) la dynamique des processus pré- et syn-éruptifs, et (IV) une démarche résolument interdisciplinaire (sismologie, géodynamique, métallogénie, climatologie, etc.).

Instabilités gravitaires : vers des modèles intégratifs des données de terrain et de laboratoire

L'un des défis majeurs de l'étude des instabilités gravitaires réside dans l'établissement de lois rhéologiques d'endommagement, de rupture et de lois de transport des masses impliquées. Chacune doit prendre en compte la diversité et la complexité naturelles du système instable (interface terre-atmosphère ou terre-mer). D'autres paramètres doivent également être pris en compte, tels que les effets de sollicitations sismiques, volcaniques et/ou climatiques, la fragmentation du milieu, les effets thermiques, ou encore le rôle des fluides dans la rupture, l'écoulement, l'érosion/dépôt, l'hétérogénéité des matériaux et le temps.

À titre d'exemple, si des relations de causalité ont été décrites à terre et en mer entre l'action d'un fort séisme ou la circulation de fluides et le déclenchement de glissements de terrain, le rôle de ces sollicitations externes sur la dégradation des matériaux géologiques reste à définir. La communauté doit (I) poursuivre les actions de surveillance de sites par la mesure des paramètres environnementaux (pression interstitielle, nature des fluides, accélération d'un sol...), de suivi par mesures récurrentes (photogrammétrie, satellite, etc.), de manière à détecter les facteurs déclencheurs du glissement et son évolution; (II) utiliser les séries long-terme afin d'identifier des signaux précurseurs, (III) améliorer les modèles de rupture et d'écoulement pour une meilleure prédiction des événements, grâce au développement de réseaux de mesures (géophysiques, géologiques et hydrologiques) et d'expérimentation en laboratoire.

Big Data : le défi de l'intelligence artificielle.

Les deux dernières décennies ont vu apparaître au niveau mondial de nouvelles capacités d'observation et de mesures soutenues par le développement de réseaux denses au sol, en mer et dans l'espace. Il en découle un afflux de

données massives avec une continuité en temps et en espace. La qualité des observables a suivi cette progression et permet d'affiner les modèles développés pour mieux appréhender les processus de déformation, les signaux transitoires et précurseurs des événements.

L'enjeu de la prochaine décennie est donc de faire face aux défis proposés dans le domaine des « *Big Data* » tout en améliorant la précision des réseaux d'observation et en conservant les questionnements scientifiques propres aux Sciences de la Terre.

Au niveau des observations, les réseaux multi-observables peuvent évoluer par l'amélioration des précisions notamment en géodésie avec des déplacements submillimétriques ou en sismologie sur les variations relatives de vitesse de l'ordre de 10^{-5} ; mais aussi en milieu extrême par l'apparition de technologies innovantes utilisant par exemple la fibre optique sur les volcans à terre ou en mer avec l'apparition d'observatoires sous-marins sur le long terme, proches des failles majeures générant des grands séismes potentiellement tsunamigéniques.

Deux tendances se distinguent et se complètent dans l'utilisation des *Big data*. D'un côté, le traitement massif de données (spatiales et temporelles) permet de réduire la variance sur les observables et, par là même, d'améliorer l'identification des marqueurs de la déformation. Ce travail interdisciplinaire nécessite des efforts importants et continus en particulier dans l'inversion jointe ou combinée de données de diverses natures (par exemple sismologique, géodésique, électromagnétique), chacune d'elles apportant une information, une résolution et une précision différentes sur les processus étudiés.

De l'autre, l'intelligence artificielle nous démontre que des techniques d'apprentissage permettent de détecter des précurseurs là où les analyses précédentes ne voyaient que du bruit. La création récente en France d'un réseau composé de quatre Instituts Interdisciplinaires d'Intelligence Artificielle (3IA) montre clairement que la communauté des géosciences doit se mobiliser autour de cette question interdisciplinaire pour apporter de nouvelles approches et relever de nouveaux défis. Nous n'en sommes qu'aux prémices mais nul doute que le développement de l'IA sera la prochaine révolution dans notre domaine.

Que ce soit *via* le traitement massif de données ou l'intelligence artificielle, l'enjeu principal est de permettre d'accéder à la fois à la donnée et aux moyens de traitement mis en jeu *via* des portails dédiés et des espaces de stockage au sein des infrastructures nationales. L'étape suivante est l'adaptation des plateformes de calcul actuelles permettant le partage open source de codes évolutifs. Ces objectifs rejoignent de près ou de loin les travaux démarrés depuis quelques années dans le domaine de la science ouverte avec comme défi de rendre accessible au plus grand nombre les produits dérivés des données.

APPORT DES SCIENCES DE LA TERRE DANS LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE ET ÉCOLOGIQUE

Les Sciences de la Terre ont connu une accélération dans la première moitié du XIX^e siècle avec la révolution industrielle pour la recherche du charbon, puis dès le début du XX^e siècle, pour celle du pétrole et du gaz. La consommation intensive (et excessive) de ces ressources énergétiques ont gravement endommagé l'environnement terrestre avec une augmentation du CO₂ atmosphérique ayant pour conséquence un réchauffement climatique rapide et unique dans l'histoire de la Terre. Les Sciences de la Terre ont donc été actrices du changement climatique mais se retrouvent impliquées maintenant dans la remédiation de ces effets (compréhension du cycle du CO₂, stockage géologique du CO₂, etc.). Le futur énergétique de l'humanité passe par une diminution drastique des énergies carbonées employées au profit d'énergies renouvelables, les biocarburants et essentiellement l'électricité produites par diverses sources (éolien, solaire, énergie des vagues et marées, géothermie, mais aussi nucléaire, même si cette dernière pose des questions sociétales importantes). Le développement de l'humanité (une dizaine de milliards d'habitants en 2050 pour 7,6 milliards en 2020) requiert également l'utilisation d'autres ressources géologiques, comme (I) les métaux critiques dont notamment les Terres Rares (même si l'augmentation des capacités de recyclage devrait amoindrir cette nécessité) et (II) les matériaux de construction, notamment le sable qui fait actuellement crucialement défaut dans des régions en fort développement.

Les contributions des Sciences de la Terre à cette transition énergétique vers un monde au développement durable doivent être multiples et les meilleures équipes du CNRS doivent s'emparer de ces questions à haut potentiel de recherche fondamentale et à fortes applications sociétales. Nous présentons ici 4 défis parmi de nombreux autres.

L'imagerie 3D à haute résolution des croûtes continentale et océanique (tomographie électrique, bruit sismique) pour la localisation des porteurs de métaux (dont les Terres Rares) et des ressources en matériaux de construction.

La prédiction de la localisation des sédiments et le dimensionnement des hétérogénéités associées (au niveau des réservoirs/aquifères et couvertures/aquitards) afin de pouvoir construire des modèles pour le stockage géologique des énergies renouvelables ou du CO₂, la recherche de nouveaux types de gisement de sable.

La description pétrophysique et géomécanique des structures de porosité et des interactions fluides-roches (eau, air, H₂, CO₂) pour décrire, comprendre et modéliser la distribution et les circulations des fluides profonds, pour une gestion durable des aquifères profonds, l'exploitation des ressources géothermiques ou modéliser la mobilité d'éléments tels que le lithium ou l'uranium.

L'étude et la compréhension des interactions minéral-vivant pour identifier les rôles joués par la biosphère profonde dans la croûte océanique ou continentale, par les interactions bactéries-fluides roches dans la diagénèse et la métallogénèse, ou pour leur utilisation dans les procédés de remédiations des sites industriels ou miniers.

Pour répondre aux questions et aux défis posés, il sera indis-

pensable de développer les interactions avec les sciences économiques et sociales pour l'estimation des besoins futurs et la modélisation des réserves, et avec les sciences chimiques et de l'ingénieur pour améliorer les procédés de développement industriel pour aller au-delà des ressources minérales et prendre en compte aussi les ressources énergétiques, la durabilité ou le recyclage des matériaux.

CONCLUSION

La Terre et, plus globalement, les planètes telluriques sont sources de questionnements scientifiques fondamentaux. Ces questions ont évolué avec le temps (l'âge de la Terre et la tectonique des plaques sont aujourd'hui bien établis) mais de nombreuses interrogations demeurent sur le fonctionnement de notre planète et son histoire. La section 18 en a sélectionné et documenté brièvement quelques-unes, qui nous sont apparues d'actualité via le travail des chercheurs que nous avons pu évaluer, promouvoir ou recruter. Nos questions couvrent l'ensemble du spectre de la connaissance, du savoir le plus fondamental sur la formation et le fonctionnement des planètes telluriques jusqu'aux applications sociétales comme le risque et l'exploitation des géoressources. Les approches diverses s'étendent des théories abstraites jusqu'au savoir-faire technologique de l'instrumentation, ou du prélèvement d'échantillons en milieu extrême au repérage de traces infimes témoignant de l'histoire des planètes. Ces continuums sont consubstantiels de la recherche que nous menons. C'est bien l'objet « planète » qui fonde notre unité scientifique, et notre recherche est par nature pluridisciplinaire et multi-échelles. La complexité des problèmes, la diversité des approches et le mode de financement de la recherche, nous amènent de plus en plus à travailler de manière structurée et collaborative, localement, nationalement et internationalement. Dans cet esprit, on peut citer l'effort international sur le partage des données géophysiques, la structuration nationale des outils et équipements en géochimie, le pilotage et l'exploitation des missions spatiales.

Comprendre au mieux le monde qui nous entoure et son histoire pour nous y adapter, connaître les conditions qui ont permis l'émergence et l'évolution de la vie ; savoir où nous habitons et anticiper les autres mondes où nous pourrions habiter... voilà nos moteurs de recherche, voilà la quête du géologue moderne.

Description et statut des différentes infrastructures de recherche en TS

L'European Consortium for Ocean Research Drilling (ECORD) qui cadre la participation européenne à l'International Ocean Discovery Program (IODP) est la seule TGIR du domaine Terre Solide. Les engagements et les partenariats sont très stables, avec des partenariats par périodes de 5 ans au sein du consortium ECORD. Le nouveau Memorandum of Understanding (MoU) d'ECORD pour la période 2019-2023 a été ratifié par l'ensemble des 15 membres d'ECORD. Le programme actuel IODP, qui compte 23 membres, s'achèvera en 2023. Le travail pour le développement d'un nouveau programme au-delà de 2023 a débuté par la tenue de workshops internationaux au cours de l'année 2019 pour préciser les orientations scientifiques du futur programme et les intentions des différents partenaires. Le programme scientifique qui concerne les trois prochaines décennies (jusqu'en 2050) a été publié au cours de l'été 2020 (<http://www.iodp.org/2050-science-framework>). Les différents partenaires d'IODP établiront le fonctionnement du futur programme au travers de plans opérationnels quinquennaux. Le navire américain « JOIDES Resolution » arrive en fin de vie en 2028 au plus tard, mais la communauté scientifique américaine, soutenue par la communauté internationale d'IODP, s'organise pour demander à la National Science Foundation (NSF) le budget nécessaire pour son remplacement. Outre les 3 opérateurs actuels (USA, ECORD, Japon), la Chine se propose de devenir le 4^e opérateur dans le cadre du futur programme de forages océaniques. Un rapprochement avec ICDP s'est avéré souhaitable et naturel du fait des convergences scientifiques entre les deux programmes. IODP et ICDP ont conjointement procédé à une simplification des procédures concernant l'évaluation de transects Terre-Mer dont la réalisation impliquera la réalisation conjointe de forages en mer et de forages à terre. Le rapprochement entre IODP et ICDP s'était auparavant déjà exprimé pour différentes activités scientifiques, éducatives et de communication. Par ailleurs, dans plusieurs pays – dont la France (bureau IODP-ICDP à Toulouse) – un même bureau national gère l'animation scientifique des deux programmes.

ICDP. La France est un des 22 représentants de l'International Continental Drilling Program. Sa participation est formalisée sous la forme d'un Memorandum of Understanding (MoU) renouvelé tous les 5 ans. Un nouveau MoU pour la période 2020-2025 a été finalisé en février 2020 et un nouveau programme scientifique pour la période 2020-2030 publié le 30 septembre 2020. La nouveauté de ce plan est l'accent mis sur la lithosphère continentale comme unique mémoire des grandes révolutions géodynamiques, clima-

tiques, environnementales et biologiques qui ont émaillé l'histoire de notre planète. Le document intitulé Billions of Years of Earth Evolution se décline en 4 thèmes principaux : Geodynamic Processes, Geohazards, Georesources et Environmental Change. Il s'agit également de promouvoir le développement de nouvelles techniques d'instrumentation et de gestion des données et de renforcer les coopérations avec plusieurs autres programmes de forage, en particulier avec IODP dans le cadre de projets Land-to-Sea (L2S). Un accord de coordination des comités scientifiques des deux agences et d'harmonisation des modalités de rédaction et d'expertise des projets L2S a été établi courant 2020.

EPOS (European Plate Observing System) est une jeune infrastructure européenne (ERIC: European Research Infrastructure Consortium) signé en 2018, construite par une approche « bottom-up », qui s'appuie sur des structures nationales existantes. EPOS-France est la contribution nationale à l'ERIC EPOS. La contribution française est très importante avec l'hébergement notamment des Services Intégrées (BRGM (FR), BGS (UK) et GEUS (DK) pour les données) et des contributions à la majorité des services thématiques, *via* l'infrastructure RESIF-EPOS, historiquement et structurellement liée à EPOS-France, *via* DATATerra et ForM@TER, *via* les services nationaux d'observation (SNO), mais aussi *via* d'autres initiatives structurantes comme par exemple le laboratoire de géothermie de Soultz ou le Corinth Rift Laboratory. La France participe à l'essentiel des tâches de EPOS à des degrés divers. EPOS est une structure en évolution et de nouveaux services pourront être inclus dans le futur. Avec le recul, l'effet de structuration de RESIF et EPOS est manifeste et peut servir de modèle pour d'autres communautés scientifiques. Ces infrastructures ont permis une progression de la qualité des services (distribution de données, impact international) et des travaux scientifiques pour les disciplines impliquées.

L'European Multidisciplinary Seafloor and water column Observatory (**EMSO-France**) gère la contribution française à l'EMSO-ERIC, un réseau d'observatoires de point fixe couvrant le fond de mer et la colonne d'eau. EMSO-France est un consortium CNRS-IFREMER qui concerne des objectifs TS mais aussi OA. Deux sites sont situés en France, en Mer Ligure, l'un près de Nice (avec une composante câblée proche de la côte dédiée principalement à l'étude des déstabilisations de pentes, et une composante autonome en haute mer couplant sismologie et objectifs OA), l'autre (couplant

sismologie, géomicrobiologie et objectifs OA) co-localisé avec le télescope neutrino ANTARES/KM3NET. Trois autres sites sont situés sur la dorsale Médio-Atlantique au Sud des Açores (tectonique, volcanisme, hydrothermalisme et monitoring des panaches et dynamique des masses d'eau), à Molène (technologie principalement), et en mer de Marmara (géodésie et sismologie, expériences mais pas de dispositif permanent). Un gros chantier en cours, soutenu par la communauté européenne d'infrastructures de recherche en environnement ENVRI, concerne la qualification et la mise à disposition des données, ainsi que leur valorisation sous forme de « data products », en lien avec RESIF-EPOS pour les données sismologiques, le pôle de données et de services Odatis, Copernicus et Seanoe pour les autres données. En perspective, le savoir-faire d'implantation d'une infrastructure de mesure en fond de mer pour suivre en mer des phénomènes telluriques terrestres (par exemple instabilités de pente et processus volcaniques dans les îles volcaniques, failles actives...) et pour la validation d'observations satellitaires, pourra être valorisé pour d'autres projets. Les infrastructures nationales RESIF, EPOS-France et EMSO-France se sont ainsi associées pour proposer un projet d'instrumentation sous-marine innovant focalisé notamment sur les phénomènes volcaniques et sismiques en cours à Mayotte et intégré dans le projet MARMOR retenue à l'appel d'offre PIA3.

Data Terra et EOSC

Le terme « données » concerne aussi bien les données numériques que les échantillons. Les réseaux français (souvent associés à des SNOs) contribuent pour la plupart à des réseaux internationaux, dont certains établis de longue date et avec des normes bien définies. Le schéma d'organisation français avec l'IR DATA TERRA est proche du schéma européen qui fait intervenir des « clusters » comme ENVRI et se différencie de la structuration classique par thématiques ou domaines des infrastructures. Data Terra réunit les quatre pôles de données et de services dédiés au système Terre et des dispositifs transversaux. Le domaine Terre Solide y est partie prenante au travers du pôle ForM@Ter. Data Terra donne un point d'entrée unique très visible sur les données et les services. Data Terra porte, avec deux autres infrastructures de recherche : CLIMERI (Infrastructure de recherche nationale de modélisation du système climatique de la Terre) et le PNDB (Pôle National de Données de Biodiversité), le projet Gaia Data retenu à l'appel d'offres PIA3. Le but est de développer et mettre en œuvre une infrastructure/plateforme intégrée de données et services distribués pour l'observation, la modélisation et la compréhension du système Terre, de la biodiversité et de l'environnement. Cela concerne l'ensemble du cycle de la donnée, de son acquisition jusqu'à des usages multiples. Les retombées attendues, scientifiques et logistiques, pour le domaine Terre Solide sont extrêmement importantes.

Autres programmes, infrastructures nationales et internationales utilisés par la communauté TS

La communauté Terre Solide a été jusqu'à présent pas ou peu impliquée dans le développement et l'utilisation des services COPERNICUS. Cependant, en complément de l'uti-

lisation très importante des données de la mission radar Sentinel via les services de ForM@Ter, un service COPERNICUS dédié à la déformation du sol (EGMS) se met en place. ForM@Ter est là aussi l'interlocuteur pour la communauté académique française.

Un upgrade significatif de l'ESRF vient de s'achever. Les performances accrues notamment la plus grande brillance demandent une mise à niveau des installations spécifiques pour la communauté française (lignes CRG FAME et FAME-UHD). Le projet d'EQUIPEX+ MAGNIFIX a été conçu pour assurer un fonctionnement optimisé de ces lignes pour les nouvelles caractéristiques de faisceau. Après la mise à niveau de l'ESRF, la réflexion porte maintenant sur un upgrade de SOLEIL.

RéGÉF

Dans le paysage des infrastructures de recherche et de la structuration des communautés qui y est associée, l'absence d'initiative autour des moyens analytiques et expérimentaux en géochimie, pétrologie et pétrophysique a mené au montage du projet RéGÉF à l'issue de la dernière prospective. L'inventaire des plateformes instrumentales fait apparaître la nature transverse de RéGÉF vis à vis des différents domaines de l'INSU (ST, OA, SIC) et au-delà (autres instituts du CNRS dont INC, INEE, INSHS...). Une centaine de plateformes se sont engagées autour de 12 réseaux pour organiser la production de données et l'innovation technologique dans le futur, incluant en tête de pont les 12 instruments nationaux de l'INSU. Le transfert d'expertise, l'optimisation du fonctionnement et l'archivage des données sont les premiers chantiers de RéGÉF. L'ajout de métadonnées sur les analyses du SARM (Service d'Analyse des Roches et des Minéraux) permettra de proposer cet instrument comme première démonstration d'un service de données et d'archivage. L'objectif de cette trajectoire est de conduire RéGÉF vers une reconnaissance en Infrastructure de Recherche par le MESRI, structure qui regrouperait plusieurs autres organismes (IRD, CEA, IFREMER, BRGM...) et une vingtaine d'Universités.

Projets

L'Observatoire Géodésique Fondamental de Tahiti est un projet transverse en Terre Solide et Astronomie/Astrophysique visant à installer à Tahiti un observatoire géodésique fondamental rassemblant en un même lieu les différentes techniques (VLBI, DORIS, GPS, télémétrie Laser).

Le Laboratoire souterrain à bas bruit (LSBB) situé à Rustrel offre un environnement unique pour les études en milieu souterrain. Plusieurs thèmes scientifiques d'intérêt pour la communauté TS y sont abordés : sismologie naturelle et induite, stockage du CO₂, gravimétrie avec notamment l'EQUIPEX MIGA, hydrologie, météorologie en lien avec le CEA et l'IRISN.

Laboratoire P4 pour la conservation et l'analyse d'échantillons extra-terrestres (ET) provenant de Mars et d'autres corps du système solaire. Les cosmochimistes, qui selon

le système français, relèvent de TS, sont demandeurs d'accès aux échantillons extraterrestres sur la base de projets sélectionnés selon l'excellence scientifique. Une « curation facility » située en Europe serait un énorme atout pour la communauté de cosmochimie européenne qui est la meilleure du monde. De tels échantillons proviendront de Mars mais aussi d'autres corps du système solaire, les grandes agences spatiales préparant des missions de retour de matière ET (Japon, Chine, USA). Pour l'instant seuls les échantillons provenant de Mars nécessitent un laboratoire P4. Le plan actuel est que les échantillons martiens reviendront dans une facilité de curation internationale située aux USA. Le choix se porte entre la mise en œuvre de ce laboratoire P4 uniquement aux USA, avec le risque que les échantillons n'en sortent pas (car comment être sûr que toute forme de vie ET a été détruite), et la construction d'une deuxième facilité P4 en Europe, capable d'accueillir quelques tubes qui seront ramenés de Mars : si un ou plusieurs pays, dont la France décident d'une telle action, il est très probable que la curation de quelques-uns des tubes ramenés de Mars lui soit confiée. La localisation en France ou en Europe (e.g. ESTEC-ESA) n'est pas décidée. Quant au budget, des estimations vagues sur le coût d'une telle facilité le situent à environ 200 M€, avec 10 M€/an de fonctionnement. Il n'y a pas aujourd'hui de plan de répartition des coûts entre pays ou agences. Une telle facilité hébergerait l'ensemble des techniques d'analyses, organiques et inorganiques (par ex, gaz, poussière, pétrologie, cristallographie) pour une caractérisation la plus complète de ces échantillons. Même si cette facilité ne se fait pas, il faudra prévoir d'équiper les laboratoires ou infrastructures français et européens en vue de l'analyse des échantillons ET après la phase de quarantaine. Au niveau géopolitique, l'exploration de Mars est un prélude à celles d'autres corps du système solaire, susceptibles également d'abriter une activité biologique. Dans ce contexte rester autonome pour l'analyse et la conservation de matière ET est un objectif stratégique pour l'Europe, et apparaît à ce titre dans les recommandations du séminaire de prospective du CNES. La Chine par exemple a des ambitions martiennes, et ne travaille pas avec les USA.

Autres domaines scientifiques

Pour compléter le paysage national et européen, certains domaines scientifiques relevant de TS n'ont pas d'infrastructure nationale. Par exemple, sur la question des risques et ressources, certaines actions sont menées à travers EPOS (sismicité induite, monitoring en lien avec les gaz de schistes, géothermie), mais elles n'ont pas forcément encore pris une ampleur suffisante pour atteindre le niveau infrastructure.

Europe et International

Résultats ERC

La mobilisation de la communauté TS sur les appels ERC a porté ses fruits depuis plusieurs années. Au niveau de l'INSU, la communauté Terre Solide, avec AA, compte 51 lauréats ERC¹ en 2019. Le nombre de candidatures en Terre Solide (panel ERC PE10: Earth Sciences) est constant d'appel en appel et se traduit par de bons résultats, autant sur le volet jeunes chercheurs (Starting et Consolidator Grant) que pour les chercheurs seniors (Advanced Grant). Une augmentation du budget ERC a été annoncée pour Horizon Europe, notamment pour abonder les appels Synergy, relancés en 2018 après un pilote en 2012-13, et qui sont encore extrêmement compétitifs. La communauté aurait à gagner à se mobiliser sur ces appels, qui constituent actuellement le plus important budget « blancs » au niveau européen (10 à 14 millions d'euros sur 6 ans).

ESFRI

Le Forum stratégique européen sur les infrastructures de recherche est un instrument stratégique pour développer l'intégration scientifique de l'Europe et renforcer son rayonnement international. La campagne pour la prochaine feuille de route ESFRI a été lancée en octobre 2019 pour une publication en 2021. Une infrastructure sur le littoral et côtier dont ILICO est le miroir français est portée par la France pour une inscription comme projet. Les derniers appels sur les infrastructures européennes ont eu lieu en 2020. La communauté TS pourra tirer parti de certains appels pour compléter sa structuration au-delà de EPOS, par exemple pour la communauté en géochimie-pétrologie-pétrophysique rassemblée dans RÉGEF.

Horizon Europe

Le futur programme-cadre pour la recherche et l'innovation (2021-2027) de l'Union Européenne se prépare dans la continuité d'Horizon 2020. La structure en trois piliers: L'excellence scientifique; Les défis globaux et la compétitivité industrielle européenne; L'Europe innovante, et les programmes les plus emblématiques seront maintenus: ERC, bourses Marie Skłodowska-Curie, instrument PME, défis sociétaux (désormais appelés clusters). Il s'ajoute un pilier transverse: Élargir la participation et renforcer l'Espace Européen de la Recherche. Le budget d'Horizon Europe reste encore en discussion; la Commission et le Parlement ont proposé une augmentation, à hauteur d'environ 85 milliards et de 120 milliards d'euros respectivement, par rap-

port à Horizon 2020, doté de 77 milliards d'euros sur 7 ans. Il faut aussi noter un changement de l'organisation du financement des activités de recherche et donc des appels à projet européens dans le nouveau programme cadre.

Par ailleurs, le programme Horizon Europe poursuit l'effort initié par Horizon 2020 en mettant l'accent sur la science ouverte et l'accès aux résultats et aux données des recherches par les différentes parties prenantes. Cet accent se concrétise par la création du partenariat EOSC (European Open Science Cloud) et de la fondation de l'association EOSC pour en assurer la gouvernance. L'ambition est de fournir des ressources et des services pour la communauté scientifique européenne, qui couvrent l'ensemble des aspects permettant le stockage, la curation, la gestion, l'analyse et les usages multiples des données de recherche au sein d'une infrastructure en nuage européenne, EOSC. Une structure dédiée (EOSC secretariat) comporte des groupes de travail sur les différents aspects du projet. Une organisation française se met en place pour coordonner la participation de la France à EOSC, le CNRS faisant partie des membres fondateurs de l'association européenne EOSC.

Le deuxième pilier – Les défis globaux et la compétitivité industrielle européenne – est organisé en six clusters (Santé - Culture, créativité et société inclusive – Sécurité civile pour la société - Numérique, industrie et espace – Climat, énergie et mobilité – Alimentation, bioéconomie, ressources naturelles, agriculture et environnement).

Une des nouveautés du programme Horizon Europe est la création de 5 missions, qui concerneront notamment le deuxième pilier et dont l'objectif est de mieux articuler les réponses aux grandes problématiques sociétales en générant des solutions et des initiatives dans une logique de co-construction ou de co-conception avec les acteurs de la société. Les domaines de ces cinq missions sont:

- 1 - Adaptation au changement climatique et transformation sociétale
- 2 - Santé des océans, des mers ainsi que des eaux côtières et continentales
- 3 - Cancer
- 4 - Villes intelligentes et neutres en carbone
- 5 - Santé des sols et alimentation

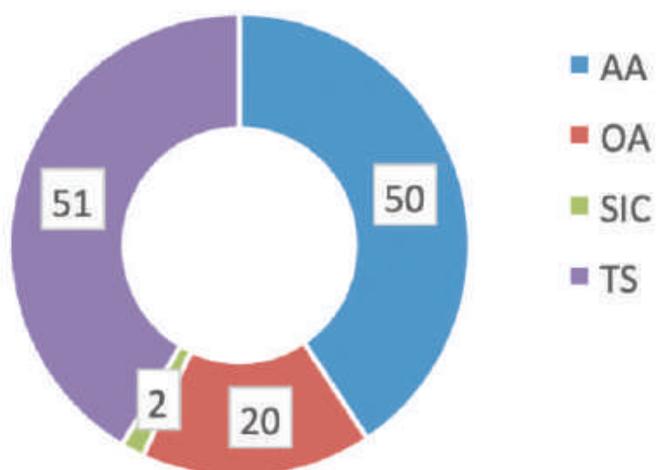
1- Tous organismes d'accueil confondus – Proof of Concept exclus – chercheurs hors INSU de la section 18 inclus – données 2019 incomplètes

Un conseil européen de l'innovation sera également créé (European Innovation Council, EIC) constitutif du pilier III de Horizon Europe, en parallèle avec le conseil européen pour la recherche, ERC.

Parmi les appels ciblés du pilier II (clusters), les enjeux pour la communauté Terre Solide sont principalement de deux ordres :

- Les risques naturels: le cluster 3 « Civil security for society » du pilier II d'Horizon Europe prévoit un sous-thème sur les sociétés résilientes aux catastrophes, qui inclut une meilleure compréhension et une meilleure gestion des risques géologiques, des séismes, éruptions volcaniques et tsunamis. La communauté TS a tout intérêt à se mobiliser sur ces thématiques, quasiment absentes dans Horizon 2020.
- Les ressources/matières premières: le cluster 4 « Digital, industry and space » inclut un volet sur les matières premières, visant à identifier les solutions et conditions pour une exploration, extraction et transformation durables des matières premières. Il faut noter que l'EIT² Raw Materials a été clairement identifié dans la liste des partenariats candidats pour Horizon Europe. L'ERANET Co-Fund ERAMIN 2 est actif jusqu'en 2021, on peut donc s'attendre à ce que de futurs appels conjoints puissent intéresser la communauté.

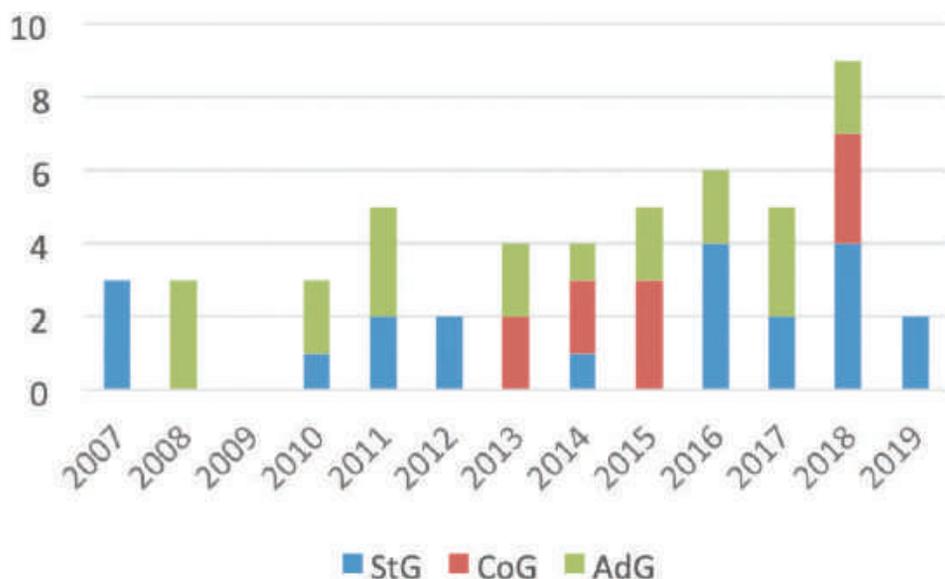
Répartition des lauréats ERC INSU par domaine 2007-2018 (+StG 2019)



Horizon Europe est décrit sur les pages du gouvernement: <https://www.horizon2020.gouv.fr/cid145004/presentation-programme-horizon-europe-2019.html>

2- European Institute of Innovation and Technology: organisme européen indépendant regroupant des industriels, universités et organismes de recherche, et visant à stimuler la compétitivité de l'Europe dans un domaine donné

Evolution du nombre de lauréats ERC TS par type de bourse



Liste des Groupes de Travail et des participants

PILOTAGE

Bruno Scaillet : Président sortant de la Commission Spécialisée « Terre Solide »
Andréa Tommasi : Présidente de la Commission Spécialisée « Terre Solide »
Eric Humler : Directeur Adjoint Scientifique sortant « Terre Solide »
Stéphane Guillot : Directeur Adjoint Scientifique « Terre Solide »
France Lagroix : Chargée de Mission « Terre Solide »

Mise en page

Alain Bonaventure : Page B

GRUPE ARCHIVES – PÔLES DE DONNÉES

Emanuela Mattioli (animatrice)
Sylvie Bourquin
Michel Diament
Fabienne Giraud
Helle Pedersen
Isabelle Rouget

GRUPE INSTRUMENTATION

Catherine Chauvel (animatrice)
Denis Andrault
Valérie Ballu
Olivier Charade
Gauthier Hulot
Pierre Kern
Raphaël Pik
Catherine Truffert
Isabelle Panet
Jérôme Vergne
Andrea Walpersdorf

GRUPE EUROPE IR/TG-IR

Maryvonne Gerin (animatrice)
Gilbert Camoin
Mathilde Cannat
Michel Diament
Gilles Ohanessian
Helle Pedersen
Pascal Philippot
Raphaël Pik

GRUPE GÉOSCIENCES MARINE

Daniel Sauter (animateur)
Georges Ceulenner

GRUPE OSUC/CNAP

Alessia Maggi
Anne Le Friant

GROUPE CALCUL ET ANALYSE DE DONNÉES:

Emmanuel Chaljub (animateur)
Harsha Bhat
Romain Brossier
Yann Capdeville
Razvan Caracas
Guillaume Caumon
Marie-Pierre Doin
Thibault Duretz
Alexandre Fournier
Thomas Gastine
Muriel Gerbault,
Lætitia Le Pourhiet
Antoine Lucas
Roland Martin
David Michéa
Vadim Monteiller
Michel Peyret,
Andrea Tommasi
Jean-Pierre Vilotte

GROUPE PARTENAIRES ACADÉMIQUES:

Philippe Charvis (IRD, animateur)
Pierre Nehlig (BRGM)
Antonio Cattaneo (IFREMER)
Miora Manda (CNES)
Olivier Jamet (IGN)
Frédéric Plas (ANDRA)
Bruno Garcia (IFP-EN)
Hélène Hebert (CEA)
Philippe Guegen (IFFSTAR)
Thierry Garlan (SHOM)
Hélène Kirchner (INRIA)
Naaim Mohamed (INRA-IRSTEA)
Anne-Marie DUVAL (CEREMA)

GROUPE RELATIONS TS/AA-OA-SIC ET AUTRES INSTITUTS:

Michel Diament (animateur)
Vincent Balter
Sylvie Bourquin
Michel Cathelineau
Olivier Vidal

GROUPE PARTENAIRES INDUSTRIELS:

Laurent Jammes

GROUPE FORMATION RECHERCHE:

Gaëlle Prouteau
Cécile Robin

GROUPE PROGRAMMES TELLUS ET PNP:

Muriel Andreani (SYSTER)
Yannick Donnadiou (SYSTER)
Joseph Martinod (SYSTER)
Anne Socquet (ALEAS)
Lucilla Benedettit (ALEAS)
Markus Aretz (INTERRVIE)
Sébastien Clausen (INTERRVIE)
Michel Cathelineau (CESSUR)
Maud Boyet (PNP)
Nicolas Coltice (PNP)

ACRONYMES

4MOST	4-metre Multi-Object Spectrograph Telescope
AI	Assistant Ingénieur
ALMA	Atacama Large Millimeter Array
ANO	Action Nationale d'Observation
ANR	Agence Nationale de la Recherche
ARIEL	Atmospheric Remote-Sensing Infrared Exoplanet Large-survey
ArTÉMIS/ArINCA	Architectures de bolomètres pour des Télescopes à grand champ de vue dans le domaine sub-Millimétrique au Sol/ ArTeMiS INstrument for SPICA
AS	Action Spécifique
ASHRA	Action Spécifique Haute Résolution Angulaire
ASOV	Action Spécifique Observatoires Virtuels
ATHENA	Advanced Telescope for High ENERGY Astrophysics
BAP	Branche d'Activité Professionnelle
CCAT	Cerro Chajnantor Atacama Telescope
CDD	Contrat à Durée Déterminée
CDI	Contrat à Durée indéterminée
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives
CFHT	Canada-France-Hawai'i Telescope
CFIS	Canada-France Imaging Survey
CHEOPS	CHaracterising ExOPlanets Satellite
CID	Commission Inter-Disciplinaire
CIFRE	Convention Industrielle de Formation par la REcherche
CIO	Comité Inter-Organismes
CMB-S4	Cosmic Microwave Background-Stage 4
CNAP	Conseil National des Astronomes et Physiciens
CNES	Centre National d'Études Spatiales
CNRS	Centre Nationale de la Recherche Scientifique
CNU	Conseil National des Universités
ComUE	Communauté d'Universités et Établissements
CONCERTO	CarbON CII line in post-rEionisation and ReionisaTiOn epoch
CRPG	Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques

CS	Conseil Scientifique	INS2I	Institut des Sciences de l'Information et de leurs Interactions
CSAA	Commission Spécialisée Astronomie Astrophysique	INSB	Institut des Sciences Biologiques
CTA	Cherenkov Telescope Array	INSHS	Institut des Sciences Humaines et Sociales
DAS AA	Directeur Adjoint Scientifique Astronomie-Astrophysique	INSIS	Institut des Sciences de l'Ingénierie et des Systèmes
DOR	Dialogue Objectifs Ressources	INSMI	Institut National des Sciences Mathématiques et de leurs Interactions
EAI	European Astrobiology Institute	INSU	Institut National des Sciences de l'Univers
EAS	European Astronomical Society	INSU/OA	INSU/Océan Atmosphère
ED	École Doctorale	INSU/TS	INSU/Terre Solide
EFISOFT	ELT French Instrument control SOFTWARE team	IR	Ingénieur de Recherche
ELT	Extremely Large Telescope	IR/TGIR	Infrastructure de Recherche/Très Grande Infrastructure de Recherche
EquipEx	Équipement d'Excellence	IRAM	Institut de Radio-Astronomie Millimétrique
ERC	European Research Council	ITA	Ingénieur Technicien Administratif
ESA	European Space Agency	ITN	Innovative Training Network
ESFRI	European Strategy Forum on Research Infrastructures	JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
ESO	European Southern Observatory	JUICE	Jupiter Icy Moons Explorer
ESPaDOnS	Echelle SpectroPolarimetric Device for the Observation of Stars	JWST	James Webb Space Telescope
EST	European Solar Telescope	KM3NeT	Cubic Kilometre Neutrino Telescope
EUR	École Universitaire de Recherche	LabEx	Laboratoire d'Excellence
FAIR	Findable, Accessible, Interoperable, Re-useable	LIDAR	Light Detection and Ranging
GIS PARADISE	Groupement d'Intérêt Scientifique Plateformes pour les Activités de Recherche Appliquée et de Développement en Instrumentation au Sol et Embarquée	LISA	Laser Interferometer Space Antenna
GRAND	Giant Radio Array for Neutrino Detection	LiteBIRD	Lite (Light) satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection
H2020	Horizon 2020	LOFAR	LOW Frequency ARray
HabEx	Habitable Exoplanet Observatory	LPR	Loi de Programmation de la Recherche
HARMONI	High Angular Resolution Monolithic Optical and Near-infrared Integral field spectrograph	LSST	Legacy Survey of Space and Time
HCERES	Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur	LUVOIR	Large UV/Optical/Infrared Surveyor
HIRES	High REsolution Spectrograph	MAORY	Multi-conjugate Adaptive Optics RelaY
HPC	High Performance Computing	MATISSE	Multi AperTure Interferometry and SpectroScopic Experiment
HPDA	High Performance Data Analytics	MAVIS	MCAO-Assisted Visible Imager and Spectrograph
IA	Intelligence Artificielle	MESRI	Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'innovation
IdEx	Initiative d'Excellence	METIS	Mid-infrared ELT Imager and Spectrograph
IE	Ingénieur d'Études	MICADO	Multi-Adaptive Optics Imaging CameraA for Deep Observations
IN2P3	Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules	MITI	Mission pour les Initiatives Transverses et Interdisciplinaires
INC	Institut de Chimie	MOONS	Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph
INEE	Institut Écologie et Environnement	MOSAIC	Multi-Object Spectrograph for Astrophysics, Intergalactic-medium studies and Cosmology
INP	Institut de Physique	MSE	Maunakea Spectroscopic Explorer
INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique		

MUSE	Multi Unit Spectroscopic Explorer	TBL	Télescope Bernard Lyot
NASA	National Aeronautics and Space Administration	TESS	Transiting Exoplanet Survey Satellite
NenuFAR	New Extension in Nançay Upgrading LOFAR	THEMIS	Télescope héliographique pour l'étude du magnétisme et des instabilités solaires
NOEMA	NOrthern Extended Millimeter Array	THESEUS	Transient High-Energy Sky and Early Universe Surveyor
NRT	Nançay Radio-Telescope	UMR	Unité Mixte de Recherche
NTE	Nordic Optical Telescope Transient Explorer	VISTA	Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy
OHP	Observatoire de Haute Provence	VLT	Very Large Telescope
ONERA	Office National d'Études et de Recherches Réospatiales	VLTl	Very Large Telescope Interferometer
OSIRIS-REx	Origins-Spectral Interpretation-Resource Identification-Security-Regolith Explorer	VRO	Vera Rubin Observatory
OSU	Observatoire des Sciences de l'Univers	WEAVE	WHT Enhanced Area Velocity Explorer
PCMI	Programme national de Physique et Chimie du Milieu Interstellaire	WFIRST	Wide Field Infrared Survey Telescope
PCS	Planetary Camera and Spectrograph	X-IFU	X-ray Integral Field Unit
PIA	Programme d'Investissement d'Avenir		
PLATO	PLAnetary Transits and Oscillations of stars		
PN	Programme National		
PNCG	Programme National Cosmologie et Galaxies		
PNGRAM	Programme National Gravitation, Références, Astronomie, Métrologie		
PNHE	Programme National des Hautes Énergies		
PNP	Programme National de Planétologie		
PNPS	Programme National de Physique Stellaire		
PNST	Programme National Soleil-Terre		
R&D	Recherche et Développement		
R&T	Recherche et Technologie		
REFIMEVE	Réseau Fibré Métrologique à Vocation Européenne		
RH	Ressources Humaines		
SARM	Service d'Analyses des Roches et des Minéraux		
SF2A	Société Française d'Astronomie et d'Astrophysique		
SKA	Square Kilometer Array		
SOXS	Son Of X-Shooter		
SPHERE	Spectro-Polarimetric High-contrast Exoplanet REsearch		
SPICA	SPace Infrared telescope for Cosmology and Astrophysics		
SPIRou	SPectropolarimètre InfraRouge		
SPV	Service Partenariats Valorisation		
SVOM	Space Variable Objects Monitor		
TARANIS	Tool for the Analysis of RAdiation from lightNING and Sprites		

NOTES

A series of horizontal dashed lines for taking notes.

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS

Centre National de la Recherche Scientifique
3, rue Michel-Ange 75016 Paris
www.insu.cnrs.fr

