

Défi 2. Diversité dynamique des (exo)planètes

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

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

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

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

2.1 Thématiques scientifiques

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

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

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

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

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

2.1.2. Système solaire interne et ceinture d'astéroïdes

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

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

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

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

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

2.1.3. Système solaire externe

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

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

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

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

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

2.1.4. Exoplanètes

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

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

2.2 Verrous scientifiques et techniques

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

Maintenir une expertise forte et disposer d'un parc instrumental de dernière génération sont les priorités pour garder nos relations à l'international et assurer à la France un partenariat durable avec les agences spatiales internationales. Le PEPR investit dans la conception de nouveaux instruments mais le CNRS Terre&Univers devra être vigilant à maintenir un parc existant performant. Outre les

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

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

2.3 Lien avec les questions environnementales

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

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

2.4 Lien avec les questions de société

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

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

2.5 Contexte programmatique

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

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

Le lancement de plusieurs nouveaux réseaux thématiques montre la volonté de la communauté à mieux se structurer tout en favorisant la pluridisciplinarité des recherches. Le réseau **Mécanique Des**

