

Défi 1. La géodynamique au défi de la complexité

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

1.1 Nature du défi

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

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

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

1.2 Thématiques scientifiques

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

Il convient donc de faire émerger une recherche convergente sur les **rétroactions entre déformation, transport (chaleur, fluides, matière), réactions chimiques, changements de phase et évolution microstructurale, qui ont lieu essentiellement aux échelles allant du micron (grain) au mètre (l'affleurement) et les effets de ces rétroactions sur la dynamique terrestre aux échelles régionales et globales**. Un des principaux objectifs sera de comprendre comment ces boucles de rétroaction contrôlent les dynamiques planétaires, et peuvent, par exemple, produire la forte localisation de la déformation, qui caractérise la Tectonique de Plaques sur Terre. La compréhension de ces rétroactions est aussi essentielle pour déchiffrer l'évolution de la dynamique terrestre au cours du temps et la diversité d'évolutions planétaires dans le système solaire et au-delà (question à l'interface avec le Défi 2). Elle est aussi fondamentale pour avancer sur la caractérisation des cycles géochimiques, où les transports réactifs, souvent modulés par la déformation, jouent un rôle fondamental dans la formation d'hétérogénéités et la longévité des réservoirs géologiques et contrôlent les flux de matière entre ces réservoirs (question à l'interface avec le Défi 3). Enfin, les rétroactions entre processus physico-chimiques à petite échelle jouent aussi un rôle essentiel dans les échanges entre la Terre Solide et les enveloppes externes et donc, dans les interactions entre la dynamique terrestre et le vivant (questions à l'interface avec le Défi 5).

La compréhension des boucles de rétroaction exige le développement de cadres théoriques et numériques capables de représenter des écoulements multiphasiques avec des couplages réactifs (magmas-fluides-roches) et des lois rhéologiques dépendantes de l'histoire de déformation, ainsi que de stratégies numériques innovantes pour la représentation des couplages entre échelles. Elle appelle aussi un couplage accru entre expérimentations physico-chimiques ciblées et modélisation numérique permettant de combler le gap d'échelles temporelles et spatiales entre les conditions atteignables en laboratoire et celles qui prévalent dans la nature (par ex. vitesses de déformation). L'observation des systèmes naturels reste la source ultime de contraintes sur ces couplages. Parmi ces observations, les

études dites « de terrain » gardent une place centrale, car elles sont la seule source d'informations directes sur les échelles intermédiaires – allant de la dizaine de mètres au kilomètre – inaccessibles à l'expérimentation et le plus souvent négligées dans les simulations numériques. Toutefois, des stratégies pluridisciplinaires, axées sur les processus, doivent être développées et déployées pour déconvoluer ce signal complexe.

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

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

1.3 Verrous scientifiques et techniques

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

L'observation directe des systèmes naturels – le terrain – reste le seul outil que nous possédons pour contraindre les processus intervenant sur Terre et ce, à toutes les échelles spatiales et temporelles. Ces observations demeurent toutefois limitées par le fait que nous n'avons accès qu'à des états finaux, qui intègrent le résultat d'un grand nombre de processus pendant des longues périodes temporelles, et à une préservation incomplète des enregistrements. Pour déconvoluer ce signal, il est essentiel de coupler ces observations aux contraintes physico-chimiques provenant de l'expérimentation en laboratoire et à la modélisation. Un autre verrou important concernant les observations géologiques est le manque criant d'un cadre harmonisé pour le partage des données : il faut créer une ou plusieurs plateformes de dépôt capables d'assimiler la grande variété de types d'observations, établir des vocabulaires contrôlés et centraliser la distribution de ces données au niveau national via Formater. De même, il faut définir, partager et mieux valoriser les chantiers géologiques, qui sont les plus à même de nous fournir les informations critiques. Les observations doivent être réalisées là où l'enregistrement des différents processus géodynamiques est le mieux préservé et exposé. Enfin, les observations géologiques ont un coût financier et environnemental (bilan carbone), et sont contingentes à la géopolitique. Il est donc essentiel d'organiser les collections provenant des nombreuses campagnes d'échantillonnage passées afin que celles-ci puissent être réutilisées, à l'instar de ce qui est déjà la norme pour les campagnes en mer.

Les avancées récentes en **imagerie géophysique de l'intérieur de la Terre** (réseaux sismologiques denses, mesures DAS, capteurs rotationnels, l'utilisation de l'IA en sismologie, tomographie par forme d'onde et méthodes d'inversion complète, capables d'intégrer anisotropie et atténuation) permettent de cartographier hétérogénéités compositionnelles et thermiques, ainsi qu'anisotropie (et donc directions d'écoulement) dans les couches profondes de la Terre avec des résolutions spatiales et temporelles accrues, rendant possible l'étude de phénomènes transitoires comme la production et le transport de fluides dans les zones de subduction. Ces données peuvent être combinées avec les données spatiales — gravimétrie satellitaire, InSAR et GNSS, pour contraindre les redistributions de masse, le soulèvement vertical et la déformation de surface en réponse à des flux

mantelliques, crustaux, ou même de surface. L'intégration de ces jeux de données hétérogènes appelle toutefois le développement d'algorithmes d'assimilation multi-échelle et la **définition de métriques d'incertitude** partagée entre disciplines, indispensables pour leur utilisation en inversion ou en analyse statistique. Aussi important, l'exploitation de ces données nécessite le développement ou le raffinement de **modèles pétrophysiques contraignant les relations entre observations géophysiques, processus physico-chimiques, propriétés des roches et observations géophysiques**.

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

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

La **modélisation numérique** est au cœur de ce Défi, mais plusieurs verrous se présentent. Les codes géodynamiques ont intégré des formulations adaptatives, capables de traiter en 3D la dynamique du manteau et la déformation des plaques lithosphériques. On observe aussi un essor de routines ou de paramétrisations pour simuler des processus à micro-échelle comme l'évolution des tailles et des orientations de grains ou les changements de phase, mais ces dernières sont soit trop simplifiées soit trop coûteuses en temps de calcul et mémoire. Coupler de manière robuste la mécanique des solides (rupture, endommagement), l'écoulement visqueux, et des processus pétrologiques, comme des réactions ou le transport réactif de fluides ou magmas dans ces systèmes reste un défi majeur. La modélisation de la localisation de la déformation ou des mélanges multiphasés nécessite des lois constitutives fiables aux différentes échelles spatiales et temporelles. Or l'expérimentation ne fournit que des contraintes sur le comportement mécanique à l'échelle des agrégats cristallins, et ceci pour des vitesses de déformation et tailles de grain plusieurs ordres de magnitude inférieures à celles des systèmes naturels. La prise en compte de l'hétérogénéité des systèmes naturels aux échelles inférieures à celles des mailles des modèles géodynamiques reste un verrou majeur, empêchant en particulier une modélisation auto-cohérente de la localisation de la déformation ductile. L'usage de modèles de substitution (« surrogates ») ou d'apprentissage profond pour représenter des processus à des échelles micro ouvre la voie à une exploration plus large des espaces de paramètres, mais soulève des questions de fiabilité.

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

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

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

1.4 Liens avec les questions environnementales et sociétales

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

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

1.5 Contexte programmatique

La recherche en géodynamique, *sensu stricto*, en particulier les travaux sur la dynamique globale de la planète, dépend fortement de programmes non-fléchés. L'ERC et le programme Blanc de l'ANR jouent donc un rôle fondamental dans le financement de ce Défi. TelluS joue aussi pleinement son rôle d'incubateur. La pluridisciplinarité et le développement de nouvelles approches d'analyse de données, expérimentation et modélisation étant au cœur de ce Défi, les programmes interdisciplinaires de l'INSU, comme les appels à projets PNP, IIT, SUN et PNTS, et du CNRS, comme la MITI sont aussi des sources de financement.

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

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

Recommandations

Structuration et coordination nationale : créer/designer un réseau thématique « Géodynamique multi-échelle » pour coordonner observations géologiques et géophysiques, mesures géochimiques,

expérimentations et modélisation, favoriser la mutualisation des infrastructures et des bases de données et définir les priorités d'investissement (par ex. pour la conception et le déploiement de capteurs nouveaux, ou de plateformes analytiques innovantes pour la géochimie de haute résolution).

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

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

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

1.6 Conclusion

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