

Défi 4. Forçage et dynamique des événements telluriques extrêmes

Composition du groupe de travail : L. Benedetti, A. Hildenbrand, et R. Cattin

Ce document préliminaire est issu d'un travail de synthèse réalisé par L. Benedetti (CEREGE), A. Hildenbrand (GEOPS), et R. Cattin (GM). La présentation de ce défi a été initialement rédigée par ces trois collègues (voir paragraphe suivant « présentation initiale du défi 4 »), puis distribuée à l'ensemble de la communauté. Une quinzaine de retours ont été reçus. Les chercheur(ses) ayant participé à la consultation pour ce défi proviennent de laboratoires variés à l'échelle nationale : ISTerre, EDYTEM, Geo-OCean, LPG, GM, Géoazur, GEOPS et le LMV. Leurs domaines d'expertise couvrent l'ensemble des champs thématiques du défi 4: aléas sismiques, volcaniques et gravitaires. Il n'est pas rare que ces chercheu(r)ses se positionnent « à cheval » sur plusieurs disciplines et combinent de fait des approches multiples.

Présentation initiale du défi 4

Forçage et Dynamique des Aléas Telluriques - Les sociétés humaines sont menacées par un certain nombre d'aléas telluriques à fort potentiel destructeur : séismes, éruptions volcaniques, glissements gravitaires, tsunamis. Ces processus peuvent être générés ou influencés par des sollicitations internes (déformations tectoniques, mouvements verticaux, circulations de fluides) comme externes (ouragans, crues éclairs), et /ou se produire en cascade (éruptions et séismes, séismes et glissements de terrain, tsunamis induits). Les recherches de la communauté pour mieux caractériser ces aléas doivent à la fois porter sur l'identification de potentiels signaux précurseurs et plus généralement viser à contraindre la contribution des différents facteurs favorisant/déclenchant, afin d'améliorer la prévision et/ou la mitigation de ces phénomènes. Les deux principaux défis concernent (1) l'identification de ces signaux précurseurs potentiellement très faibles et souvent mélangés à des signaux pouvant être associés à des perturbations de surface ou à des forçages externes par la cryosphère ou l'érosion et (2) l'étude des événements « catastrophiques » très brefs qui s'insèrent dans une histoire plus longue (du siècle à plusieurs dizaines de milliers d'années). Le développement de continuum aléas – événements extrêmes – histoire longue est important pour s'affranchir de l'effet « focus » sur un événement donné, et permettra d'identifier l'origine des signaux observés hors des périodes de crise et de mieux comprendre le rôle de ces processus catastrophiques instantanés dans une évolution à plus long-terme. Une approche pourrait consister à étudier des sites instrumentés ou des cas bien documentés sur lesquels l'ensemble de la communauté pourrait se rassembler, en collectant de nouvelles mesures tout en revisitant les observations existantes de tous types, de l'échelle globale jusqu'à celle de l'affleurement.

4.1 Nature du défi

Au cours de la dernière décennie, la thématique axée sur les forçages et la dynamique des événements telluriques extrêmes a fait l'objet de nombreuses études. Les observations de plus en plus diverses et précises, les approches multi-échelles et pluridisciplinaires, ainsi que l'accès à des moyens de calcul conséquents ont permis des avancées scientifiques majeures. Cependant, la compréhension des mécanismes contrôlant l'occurrence de ces événements reste parcellaire. Pour relever ce défi, de nombreux axes de recherche existants doivent être renforcés et des ruptures thématiques doivent être envisagées.

4.1.1. Renforcement des recherches actuelles

Le continuum entre source, propagation, impacts ainsi que l'intégration de la démarche probabiliste sont indispensables afin de prédire ou de gérer/anticiper les aléas telluriques. Pour ce faire, assurer la fiabilité et la distribution des données d'observatoire est essentiel. Au-delà des épisodes de crise, la pérennité des mesures permet en effet de prendre en compte des aléas modérés qui contribuent significativement aux pertes cumulées. Une telle approche permet également d'observer plus fréquemment et ainsi de mieux contraindre les forçages et la dynamique des événements extrêmes.

De façon générale, les études tentant de relier des données tectoniques, sédimentologiques, pétrophysiques, géochimiques et géophysiques doivent être soutenues. Seule une démarche multi-approche permettra de décrypter les mécanismes complexes responsables du déclenchement des événements extrêmes.

4.1.2. Soutien à des thématiques de rupture

En termes d'instrumentation, de nombreuses approches innovantes sont en cours. Elles vont sans doute dans les années à venir modifier fortement nos démarches pour documenter les événements telluriques extrêmes. On peut notamment mentionner:

- La mise en œuvre de multi-capteurs satellitaires, aéroportés, en mer ou au sol.
- L'utilisation de câbles sous-marins équipés de fibres optiques, qui offre une capacité unique pour détecter des signaux spécifiques dans des environnements marins profonds et éloignés, offrant ainsi de nouvelles perspectives pour l'étude et la quantification des catastrophes naturelles sous-marines.
- Le déploiement de nanocapteurs ou de drones autonomes dotés de capteurs à échelle nanométrique pourrait révolutionner la mesure des gaz volcaniques. Ces technologies permettraient une précision accrue, notamment pour détecter des espèces gazeuses en très faibles concentrations, souvent inaccessibles avec les outils actuels.

Task force : Les instruments actuels et futurs doivent pouvoir être mobilisables rapidement : en avance lorsque la crise peut être prévue, durant une crise en cours, ou juste après lorsque ces instruments permettent d'apporter des informations décisives, mais dont les traces sont souvent éphémères. Cette capacité d'intervention rapide collaborative, qui peut être trans-laboratoire et même trans-nationale, impose essentiellement la mise en place d'une Task Force scientifique et technique par domaine, impliquant les capteurs disponibles au moment de la crise et les personnels volontaires. Pour le CNRS et l'ensemble des organismes de recherche, cela nécessite la mise à disposition de crédits dédiés (ou l'assurance par les labos d'être remboursés) et une aide à l'acheminement des matériels et personnels. Outre les retombées scientifiques, de telles interventions contribuent au rayonnement de l'Institut et du pays.

En termes de modélisation numérique, les approches utilisées restent souvent trop simples face à la complexité des processus. Une caractérisation haute-résolution des zones sources (imagerie des failles, des édifices volcaniques, des mouvements gravitaires), une meilleure intégration des cycles de déformations et des états critiques, ainsi qu'une prise en compte de la propagation et de l'étendue des événements extrêmes sont indispensables. La prise en compte de rhéologies plus réalistes apparaît également comme un défi majeur nécessitant de mieux contraindre les paramètres physiques et les taux de déformation. L'ensemble de ces approches gagnerait à intégrer l'utilisation de l'intelligence artificielle, notamment dans la prédiction des événements extrêmes.

Globalement, les thématiques en rupture sont associées à la prise en compte de la dynamique des systèmes complexes. À titre d'exemple, on peut mentionner:

- Les forçages externes - internes et leurs couplages. L'impact des événements climatiques extrêmes sur l'aléa gravitaire ou l'effet des éruptions sur le climat sont aujourd'hui bien documentés et avérés. Cependant, même si plusieurs études ont récemment proposé de potentiels liens entre séismes et climat, ces couplages restent mal compris. Plusieurs pistes pourraient être envisagées, notamment en augmentant significativement la période d'observation. Les approches couplant sismologie et géodésie permettent aujourd'hui d'observer les phénomènes lents et long-terme sur plusieurs décennies. Le recours à la paléosismologie via les archives sédimentaires continentales et marines doit également être renforcé, permettant d'accéder à des observations sur plusieurs millénaires.
- En volcanologie, une nouvelle direction pourrait consister à se concentrer sur les gaz nobles (He, Ne, Ar, Xe) et les isotopes rares pour tracer l'origine des volatiles dans les magmas. Ces recherches offriraient une meilleure compréhension des sources mantelliques profondes et des interactions croûte-magma. En complément, le couplage de plusieurs éléments chimiques (dont Li, Cl, B, F) impliqués dans les cycles géologiques permettrait de reconstituer en temps quasi-réel les dynamiques magmatiques modulo des temps de transferts, notamment les épisodes de recharge magmatique et les interactions au sein des zones de mush, la vitesse d'ascension du magma et les mécanismes de dégazage associés.

4.2 Thématiques scientifiques

Plusieurs thématiques et disciplines sont identifiées pour le défi 4, dont certaines dépassent le cadre de l'INSU - Terre Solide.

4.2.1. Au sein l'INSU - Terre Solide

- Thématiques - liens : Dynamique des systèmes complexes (à toutes échelles d'espace et de temps), mécanismes de la sismicité, enregistrement sédimentaire, séismes/ éruptions/ tsunamis/ glissements sous-marins (avalanches de débris, turbidites..), aléas et risques en milieu anthropisé, interactions et rétroactions entre tectonique-volcanisme-climat, impacts

environnementaux et sur les écosystèmes, reconstruction historique, mesure du temps et récursivité.

- Disciplines : géodynamique, géodésie, géochimie, géochronologie, géophysique, géomorphologie quantitative, géologie structurale/tectonique, (paléo-)sismologie, géomécanique, volcanologie (sl), modélisation (analogique et numérique), pétrologie endogène, sédimentologie, sciences atmosphériques et climatologie, thermodynamique, physique, mathématiques, archéologie et histoire.

4.2.2. Au sein l'INSU, autres domaines concernés

Le défi 4 ne peut pas être exclusivement limité aux contours du domaine Terre Solide. En effet, de nombreux processus impliqués dans la dynamique des événements extrêmes, notamment aux forçages externe - interne au niveau de la surface de la Terre, sont davantage étudiés dans les domaines « Océan-Atmosphère » et « Surface et interfaces continentales ».

4.2.3. Autres instituts du CNRS concernés

Le défi 4 est focalisé sur les processus qui conduisent à l'évaluation de l'aléa. La définition des risques associés implique une prise en compte de la vulnérabilité et des enjeux sociétaux et environnementaux. Les instituts « Écologie et Environnement » et celui des « Sciences Humaines et Sociales » ont donc une part importante à prendre dans ce défi.

4.3 Verrous scientifiques et techniques / adaptation des outils et de l'organisation pour les lever

4.3.1. Verrous techniques

La capacité de l'INSU à mobiliser des moyens observationnels rapidement, juste avant, pendant, ou juste après une crise reste limitée. Pour lever ce verrou, il serait nécessaire de mettre en place l'organisation collective d'une force d'intervention (par domaine thématique par exemple), avec des facilités financières et organisationnelles particulières de la part du CNRS pour les urgences (message d'alerte scientifique, fret matériel, transport des personnels, gestions douanières, accords transporteurs).

Le manque de données géophysiques en milieu marin limite la caractérisation des risques liés aux aléas. Œuvrer pour lever ces verrous avec l'accès à plus de câbles pour l'utilisation des technologies de mesures sur fibre optique permettrait une amélioration des systèmes d'alertes. Un autre point concerne la sensibilité et la dynamique des mesures associées aux instruments DAS qui sont encore trop limitées. Par exemple, dans la cadre de la sismologie, ces aspects inhibent encore l'efficacité des instruments DAS pour une surveillance sismique complète et précise.

Concernant les systèmes magmatiques les verrous concernent les limites analytiques. Les techniques actuelles (par exemple SIMS, LA-ICP-MS) nécessitent des améliorations pour atteindre une résolution isotopique et chimique plus fine, particulièrement pour les éléments légers comme le Li, le B ou le Cl. De plus, le lien entre signaux géophysiques (sismicité, déformation) et les processus chimiques reste difficile à établir en l'absence d'outils intégrés.

4.3.2. Verrous observationnels

Un premier verrou concerne l'accès limité aux processus profonds. Les données directes sont rares, et les reconstructions reposent souvent sur des proxies tectoniques, géochimiques et géophysiques. Ainsi, les échantillons volcaniques et magmatiques disponibles sont souvent fragmentaires et ne reflètent qu'une partie des processus en jeu. De même, les observations géodésiques, sismologiques ou gravimétriques ne permettent d'obtenir qu'une image floue des structures et des déplacements en profondeur.

Comme mentionné dans la section 1.2., un second verrou est lié à la temporalité des phénomènes. Plusieurs pistes peuvent être envisagées pour documenter des échelles de temps allant de quelques minutes à plusieurs milliers d'années. Au-delà des observations actuelles (minutes à quelques décennies), on peut mentionner l'accès à des enregistrements qui permettent de reconstituer la fréquence des événements sur le long terme avec une très bonne contrainte chronologique. Par exemple des carottes sédimentaires longues via le Centre de Carottage Français qui pourrait être renforcé pour obtenir des séquences sédimentaires riches et mutualisables.

4.3.3. Verrous conceptuels

Pour les systèmes magmatiques, les processus (ascension, mélange, dégazage, différenciation), sont interconnectés de manière complexe, rendant leur décomposition et leur modélisation difficile. De même, pour les séismes et les glissements gravitaires, les liens directs entre observations et processus devraient être explorés davantage. Relier les données géochimiques, pétrologiques, géodésiques ou géophysiques pour reconstruire la dynamique des événements extrêmes en temps réel reste un défi majeur.

Plus généralement, les modèles numériques sont encore limités dans leur capacité à reproduire des conditions naturelles complexes. La mise en place de jumeaux numériques est sans doute une piste à explorer, à la fois pour leurs capacités à assimiler des données sur des sites instrumentés et pour leur caractère prédictif (simulation, anticipation) sur des glissements gravitaires, des failles, ou des édifices volcaniques. Ces approches pourraient être développées sur des sites expérimentaux prioritaires pour une large communauté.

4.4 Liens avec les questions environnementales et sociétales

Le défi 4 est étroitement lié à des questions sociétales et environnementales.

4.4.1. Implication sociétale

Mieux anticiper les aléas telluriques, en relevant les défis associés aux signes précurseurs, aux événements extrêmes, mais aussi aux processus déclencheurs ou à la caractérisation/imagerie de leur état critique permettrait de mieux anticiper et réduire les impacts pour la société. De plus, la distinction des aléas et des conséquences associées qui sortent du cycle naturel serait essentielle pour répondre à la recherche de responsabilité lors de pertes ou de gênes.

Ce défi scientifique est avant tout focalisé sur les processus et les aléas. La médiation scientifique et l'amélioration des systèmes d'alerte sont certes importantes. Cependant, pour accroître fortement l'impact sur la société des recherches menées, il faudrait ouvrir les recherches et les questions scientifiques aux autres disciplines du CNRS, incluant les SHS, et les sciences de l'ingénieur et encourager les dispositifs de recherche-action avec les acteurs des territoires, tout en gardant un volet de recherches fondamentales. Des recherches centrées sur des territoires ou chantiers spécifiques, où les scientifiques de disciplines diverses pourraient interagir avec des acteurs locaux pour contribuer à répondre aux besoins du territoire pourraient être une façon d'aborder cette question de la recherche transformante pour la société en lien avec les aléas (e.g. GDR Rift).

4.4.2. Questions et transition environnementales

Les liens du défi 4 avec la société sont principalement liés aux questions environnementales. Ils posent la question de l'impact environnemental des projets de recherche et de la pertinence des thématiques de recherche associées aux questions environnementales.

4.4.2.1. Privilégier une recherche sobre

Il apparaît important de privilégier l'information et la sensibilisation des coûts des projets de recherche. Un bonus qualité pour l'évaluation des projets sobres pourrait être mis en place. Le calcul du bilan carbone semble une étape indispensable dans les laboratoires, permettant d'optimiser les achats, de réfléchir aux missions utiles, et de mutualiser des achats d'instruments ou de serveurs. Parallèlement, les tutelles doivent investir massivement dans la rénovation des bâtiments, notamment en termes d'isolation thermique.

4.4.2.2. Contributions scientifiques

Avant de présenter les liens entre le défi 4 et les questions environnementales, il est important de repreciser la notion d'événements telluriques extrêmes. En effet, le système Terre doit être considéré dans sa globalité. Les événements telluriques doivent donc, non seulement inclure les phénomènes endogènes (séismes, tsunamis, glissements gravitaires et éruptions volcaniques), mais également exogènes (crues, tempêtes, activités anthropiques). Dans ce cadre, les liens sont souvent complexes, multi-échelle temporelle et spatiale et incluant de nombreuses boucles de rétroaction.

L'impact environnemental des événements telluriques extrêmes est déjà bien documenté. On peut citer notamment l'accident de Fukushima, les cyclones tropicaux aux Antilles re-mobilisant, via l'érosion, le Chlordécone stocké dans les sols, ou le couplage entre gaz-volcans avec le système atmosphérique global. L'objectif est ici de proposer quelques pistes où la communauté « Terre solide » peut, en partenariat avec les collègues travaillant sur l'océan, l'atmosphère et les sciences humaines, contribuer à une meilleure compréhension et gestion du système Terre :

- Le lithium, en tant que métal clé pour les batteries rechargeables et la transition énergétique, est d'un intérêt stratégique mondial. Les environnements volcaniques et hydrothermaux

constituent des sources potentielles de lithium, mais leur genèse et leur exploitation durable nécessitent une meilleure compréhension des processus géologiques impliqués. Les études sur le comportement du Li dans les systèmes magmatiques et hydrothermaux contribuent à mieux localiser les gisements exploitables. Elles permettent également de proposer des méthodes d'extraction plus respectueuses de l'environnement, réduisant ainsi l'impact écologique de l'exploitation minière.

- Le continuum aléas – événements extrêmes – histoire longue, souvent utilisé par la communauté « Terre solide » permet d'aborder les événements extrêmes dans un cadre plus large, comme dans le cas des glissements de terrain ou des essaims de séismes superficiels associés à des tempêtes (par exemple crue, glissement de terrain et essaims de séismes déclenchés par la tempête Alex de 2020).
- La détermination du terme source des éruptions volcaniques explosives induit une connaissance affinée des quantités de cendres fines, aérosols, et gaz émis par les volcans. Que les éruptions soient récurrentes et de faible intensité ou rares et catastrophiques, ces produits contaminent les ressources à proximité (sols, agriculture, eau), et surtout contribuent à la pollution atmosphérique locale et régionale et ont des effets sur le climat global. Parallèlement, dans les régions très volcaniques comme l'Indonésie, les produits éruptifs (cendres et dépôts pyroclastiques notamment) contribuent également à fertiliser les sols (permettant jusqu'à 3 récoltes de riz par an). Du coup, les populations sont souvent réticentes à s'éloigner des volcans, malgré les aléas importants. Les enjeux environnementaux sont donc importants. Un des multiples enjeux concerne par exemple une précision accrue de certains paramètres d'entrée des modèles prévisionnistes du climat.
- Prévention des risques telluriques et résilience environnementale. Les éruptions volcaniques, les séismes ou les glissements de terrain présentent des risques directs pour les populations et les écosystèmes environnants. Les avancées (1) dans la compréhension des processus magmatiques grâce aux traceurs géochimiques, (2) dans le suivi des glissements lent et asismique le long des failles et (3) dans la surveillance géochimique/géophysique des glissements de terrain permettent d'améliorer les prévisions en identifiant de potentiel signaux précurseurs ; d'élaborer des stratégies d'alerte et de gestion des risques plus efficaces, minimisant les impacts sur les populations et les écosystèmes vulnérables.

4.5 Contexte programmatique

4.5.1. Bilan du « tout appel d'offre »

La logique d'appel d'offre empêche la réalisation de grandes initiatives. La création de l'ANR a permis le développement de projets spécifiques, préparant cette logique pour les appels d'offres européens. Après plus de 20 ans, le « tout appel d'offre » a bridé en partie le développement ou/et le pilotage de grands programmes qui pourraient être confiés à des instituts (en particulier le CNRS mais pas que). Les exemples des PEPR illustrent ce problème majeur, où les moyens sont confiés à quelques pilotes avec parfois un manque de logique de développement communautaire concerté. Les programmes devraient être pilotés (en particulier) par le CNRS sur des projets communautaires, avec des moyens significatifs. Ainsi, le PEPR IRIMA traitant des questions d'aléa est bien trop restrictif et ne se focalise que sur certains types d'événements dans certaines régions. Par exemple, dans les Antilles françaises, de nombreux aléas sont présents (séismes, tsunamis, cyclones tropicaux, éruptions volcaniques) mais seulement un de ces aléas (sismo-volcanique) est étudié dans le cadre de ce programme. Ce qui est extrêmement regrettable car une approche plus holistique aurait pu être mise en place. Comment par exemple, oublier d'étudier les cyclones tropicaux dans ce secteur, alors que l'on sait que cet aléa augmente avec le changement climatique global ? D'autre part, quels impacts immédiats ou différés ces événements climatiques extrêmes peuvent-ils avoir sur les éruptions-séismes-glissements de terrain ?

4.5.2. Empreinte carbone

De plus, les moyens doivent privilégier la sobriété tout en maintenant une performance scientifique indispensable pour résoudre les défis auxquels la communauté doit faire face. Il apparaît indispensable de maintenir et renforcer les services d'observation (la plus belle mutualisation des efforts et des besoins) et les moyens de stockage des données rattachés aux producteurs de données qui en ont l'expertise. Si le bilan carbone est un indicateur important à intégrer dans les stratégies de recherche, il ne doit cependant pas être vu comme une fin en soi. Toute action de recherche a inévitablement des impacts environnementaux immédiats, mais peut à contrario permettre des économies substantielles de moyens, de ressources et donc d'émission de carbone à moyen et long-terme.

4.5.3. Futur contexte programmatique

Pour une approche plus communautaire, plusieurs programmes et structures devraient être renforcés : les GDR ou les structures fédératives internationales équivalentes, les liens avec la MITI, la mise en place de projets européens type cluster / consortium.

Ce défi devrait également pouvoir s'intégrer dans des programmes européens portés par les IR. Les communautés sont déjà structurées nationalement autour des SNO impliqués, et internationalement autour des services des IR. Pour les mobiliser, il apparaît nécessaire de les soutenir et de leur donner une autonomie programmatique annuelle, suivant une feuille de route scientifique définie et s'appuyant sur les principes d'amélioration continue de la qualité.

Plusieurs actions spécifiques sont également à soutenir. Par exemple, le Groupement Français de Recherche pour la mesure sur fibres Optiques en Géosciences (G-FROG) sous la tutelle d'Epos-France est une initiative qui regroupe la communauté française de chercheurs travaillant avec les mesures sur fibre optique. Les thématiques de ce défi associées à la fibre optique sont donc très pertinentes pour ce groupe. La recherche participative a montré qu'elle permettait des choses impossibles autrement dans certains contextes (comme la surveillance sismique en Haïti par un réseau citoyen, alors que le pays est complètement bloqué). Cette démarche nécessite de renforcer les liens avec les SHS.

Enfin, la communauté souligne l'importance de poursuivre les programmes TelluS qui permettent d'initier des projets et tester leur faisabilité, avant d'envisager de monter des projets d'envergure de type ANR. Les programmes PEPR apparaissent comme fermés pour une large partie de la communauté, et les ERC souvent inaccessibles aux enseignants-chercheurs de par le temps nécessaire. Il apparaît essentiel que le CNRS redevienne un institut qui pilote des orientations et des transformations via des programmes long-termes avec des moyens conséquents.