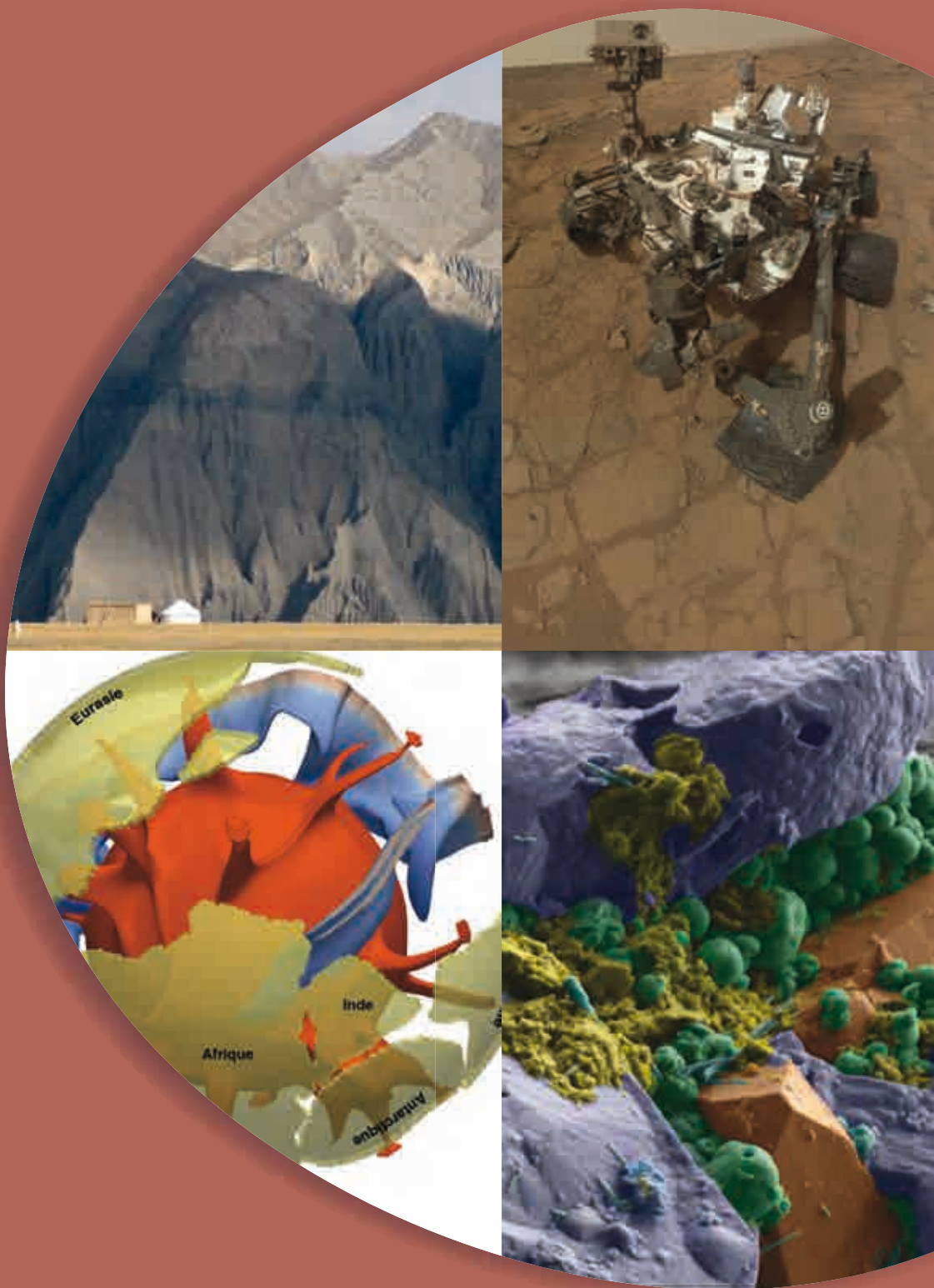


prospective

Institut National des Sciences de l'Univers



**Terre Solide
2016-2020**

*À la mémoire de Jean-François Stéphan
ancien directeur du CNRS-INSU (2010-2013)
et géologue éminent.*

Prospective 2016-2020 de la Commission Spécialisée Terre Solide (CSTS) de l'Institut national des sciences de l'Univers

Synthèse des travaux préparatoires et des conclusions du colloque de Cabourg
25 - 27 novembre 2014

Les travaux des groupes de travail ont été conduits par les membres de la CSTS sous la direction de son président.

Commission Spécialisée Terre Solide

Marc Chaussidon, président

Secrétariat de rédaction

Christiane Grappin

Sommaire

Éditorial	p. 7
Introduction.....	p. 9

Synthèse

Les grands enjeux scientifiques du domaine Terre Solide (TS).....	p. 12
Le contexte de la prospective Terre Solide 2016-2020	p. 14
Les succès de la communauté Terre Solide des 5 dernières années.....	p. 15

Bilan, prospective et recommandations thématiques

Comité Thématique 1 « Origine du système solaire-cosmochimie »	p. 22
Comité Thématique 1 « Formation et fonctionnement des planètes »	p. 28
Comité Thématique 1 « Terre primitive »	p. 35
Comité Thématique 2 « Terre interne et Terre externe, processus et couplages »	p. 39
Comité Thématique 3 « Aléas, risques et catastrophes telluriques »	p. 47
Comité Thématique 4 « Terre Vivante »	p. 58
Comité Thématique 5 « Ressources géologiques et durables »	p. 66
Géosciences Marines	p. 75
Actions Marges, Action coordonnée INSU - Total - Ifremer - BRGM.....	p. 84

Les outils et moyens nationaux

Observation et Terre Solide	p. 92
Instrumentation nationale	p. 97
L'outil spatial pour l'étude de la Terre Solide	p. 102
Le calcul intensif	p. 108

Sciences de la Terre et société

Gestion des risques	p. 116
Les relations industrielles	p. 122
Europe et international	p. 125
Communication Terre Solide	p. 131

Éditorial

L'exercice des prospectives de l'INSU est un mode de fonctionnement unique au sein du CNRS, qui résulte d'une pratique de la recherche qui nous est propre et qui a fait ses preuves depuis plus de trente ans. Cet éditorial est sans doute le lieu pour rappeler l'originalité de la démarche et d'insister sur les vertus d'une co-construction de nos objectifs scientifiques.

La Commission spécialisée Terre-Solide (CSTS) du CNRS-INSU mobilise régulièrement la communauté scientifique pour cet exercice national de prospective (Vulcania 2002, Aussois 2008). Entre l'été et l'hiver 2015, les travaux ont été préparés en amont par des groupes de travail issus de la CSTS, de la section 18 du CNRS et de la communauté en général. Ces groupes ont mobilisé plus d'une centaine de personnes ; ils ont aussi sollicité les directions des laboratoires et des Observatoires des Sciences de l'Univers ainsi que la communauté au sens large.

Le colloque de restitution, qui s'est tenu à Cabourg du 25 au 27 novembre, a réuni près de 150 personnes : CSTS, Section 18, CNAP TI, direction des laboratoires et des OSUs, représentants des comités thématiques et programmes nationaux, responsables des groupes de travail, nos invités du BRGM, CNES, Ifremer, CEA, TOTAL, de l'INSU, de la MI et du MESR, ainsi que des représentants des grandes infrastructures de recherche.

Cette prospective a été orientée autour de plusieurs temps forts : i) une synthèse des enjeux scientifiques du domaine TS, les succès de la communauté sur les cinq dernières années ainsi que les grandes évolutions et les recommandations ; ii) un bilan des prospectives et recommandations dressé par les responsables des cinq comités thématiques ; iii) le fonctionnement des Services Nationaux d'Observations, l'instrumentation, les moyens de calcul et l'outil spatial ; iv) la place des Sciences de la Terre dans notre société ; v) l'Europe et l'international ; vi) la communication. L'ensemble des présentations ainsi que les principales conclusions du colloque ont été mises en ligne sur le site web de l'INSU dès la fin du colloque.

Parmi les éléments du relevé de conclusions du colloque, je citerai Michel Diamant (Directeur adjoint scientifique TS et ancien directeur par intérim de l'INSU) : « Le message essentiel qui en est ressorti est le dynamisme des recherches dans le domaine TS et l'existence d'une structuration et organisation du domaine (en UMRs et OSUs) optimisées. La gestion du domaine TS au cours de ces dernières années a dû faire face à une baisse continue des ressources de l'INSU et notamment la diminution du nombre de postes pérennes d'ITA a atteint un niveau tel que des problèmes graves apparaissent (ou vont apparaître) dans les laboratoires ».

Sans attendre l'édition des prospectives TS, un certain nombre d'initiatives ont été prises répondant ainsi aux recommandations faites ; en particulier en ce qui concerne le fonctionnement de nos Comités Thématiques (renouvellement des membres des comités, création du programme TelluS, mise en ligne des projets retenus et des sommes allouées) et d'une initiative supplémentaire vers l'interdisciplinarité (création d'un appel d'offre avec l'INSMI et la MI et d'un second avec l'IN2P3). D'autres projets sont actuellement en maturation (identification de chantiers thématiques/géographiques TS avec d'autres Instituts du CNRS, mise en place d'un REseau des plateformes analytiques Géochimiques et Expérimentales Françaises (REGEF), restructuration thématique de TERMEX-MISTRALS). Tous ces projets visent à consolider une recherche collective qui a souffert depuis une dizaine d'années.

Sans oublier toutes celles et tous ceux ayant apporté leur contribution aux réflexions, à l'organisation du colloque et à la réalisation de ce document, je tiens à remercier Michel Diamant pour son implication qui a été bien au delà de la communauté TS ces dernières années, la CSTS et tout particulièrement son président, Marc Chaussidon, pour l'organisation de cet exercice de prospective. Ce binôme a permis d'établir la feuille de route de la communauté pour les cinq années à venir, dont j'espère qu'elle sera le point de départ de nouvelles recherches de haut niveau.

Éric Humler

Directeur adjoint scientifique du domaine Terre Solide de l'INSU

Introduction

Ce rapport de prospective est issu des travaux menés par : la *Commission spécialisée Terre Solide* (CSTS) de l'Institut national des sciences de l'Univers du CNRS (CNRS-INSU) ; les cinq *Comités thématiques* (CT1-Formation et fonctionnement des planètes, CT2-Terre interne et Terre externe, processus et couplages ; CT3-Aléas, risques et catastrophes telluriques CT4-Terre vivante, CT5-Ressources géologiques et développement durable ; la *Commission des services nationaux d'observation* ; la *Commission instrumentation* et des groupes de travail mandatés par la CSTS (Géosciences marines, outil spatial, moyens de calcul, risques).

Ces travaux ont été présentés et discutés au colloque de prospective de Cabourg, les 25-27 novembre 2014. Ils sont résumés, ici, à travers des textes faisant ressortir les grands enjeux scientifiques du domaine Terre Solide (TS), les résultats saillants des cinq dernières années, les forces et faiblesses du domaine, des éléments de prospective et de recommandations. Les travaux du groupe de travail sur les risques aboutiront à la rédaction d'un livre blanc.

Depuis le colloque de Cabourg, Michel Diamant, directeur adjoint scientifique du domaine Terre Solide du CNRS-INSU a été remplacé par Eric Humler, et Marc Chaussidon, qui a conduit cette prospective, a été remplacé à la présidence de la CSTS par Yves Gaudemer, puis par Bruno Scaillet. La finalisation de ce rapport est donc le résultat d'un travail d'équipe.

Au cours des cinq dernières années, la communauté Terre Solide a été très active à travers des recherches qui couvrent une large gamme de thématiques, depuis la formation de la Terre et son évolution géologique, jusqu'à son fonctionnement actuel où toutes les interfaces, entre la Terre profonde et les enveloppes de surface, interagissent entre elles. Ces thématiques sont à la fois au cœur de questions fondamentales, comme par exemple l'origine et le développement de la vie, et au cœur de préoccupations sociétales sur les risques naturels ou les ressources minérales et énergétiques du futur. Une part significative des travaux menés dans les laboratoires du domaine Terre Solide du CNRS-INSU est aux interfaces avec les trois autres domaines Astronomie-Astrophysique, Océan-Atmosphère, Surfaces et Interfaces Continentales.

Le dynamisme de la communauté est, aussi, évident si l'on regarde la liste des nombreux financements qui ont été obtenus en dehors des programmes CNRS-INSU, que ce soit à l'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) (projets jeunes chercheurs-jeunes chercheuses, projets collaboratifs dans différents thèmes ou défis), au Programme Investissement d'Avenir (PIA/labex, équipex) ou à l'European Research Council (ERC – « Starting, Consolidator, Advanced Grants »). Le bilan de publication est lui aussi au meilleur niveau comme salué par plusieurs enquêtes internationales.

Tous ces résultats très positifs ne doivent cependant pas cacher le fait que ces travaux ont été menés dans un contexte qui a vu des changements majeurs et sans équivalent dans l'histoire à la fois du mode de financement de la recherche fondamentale (avec une baisse très forte des moyens récurrents et des postes alloués aux laboratoires, et un basculement vers les financements sur projets et l'emploi de contrats à durée déterminée (CDD) de plus en plus nombreux) et du paysage institutionnel des acteurs de la recherche avec les réformes du CNRS et des Universités. Cette évolution semble pour l'instant inéluctable, et si c'est le cas, cela aura des conséquences profondes à moyen et long terme sur le fonctionnement de nos laboratoires.

Marc Chaussidon

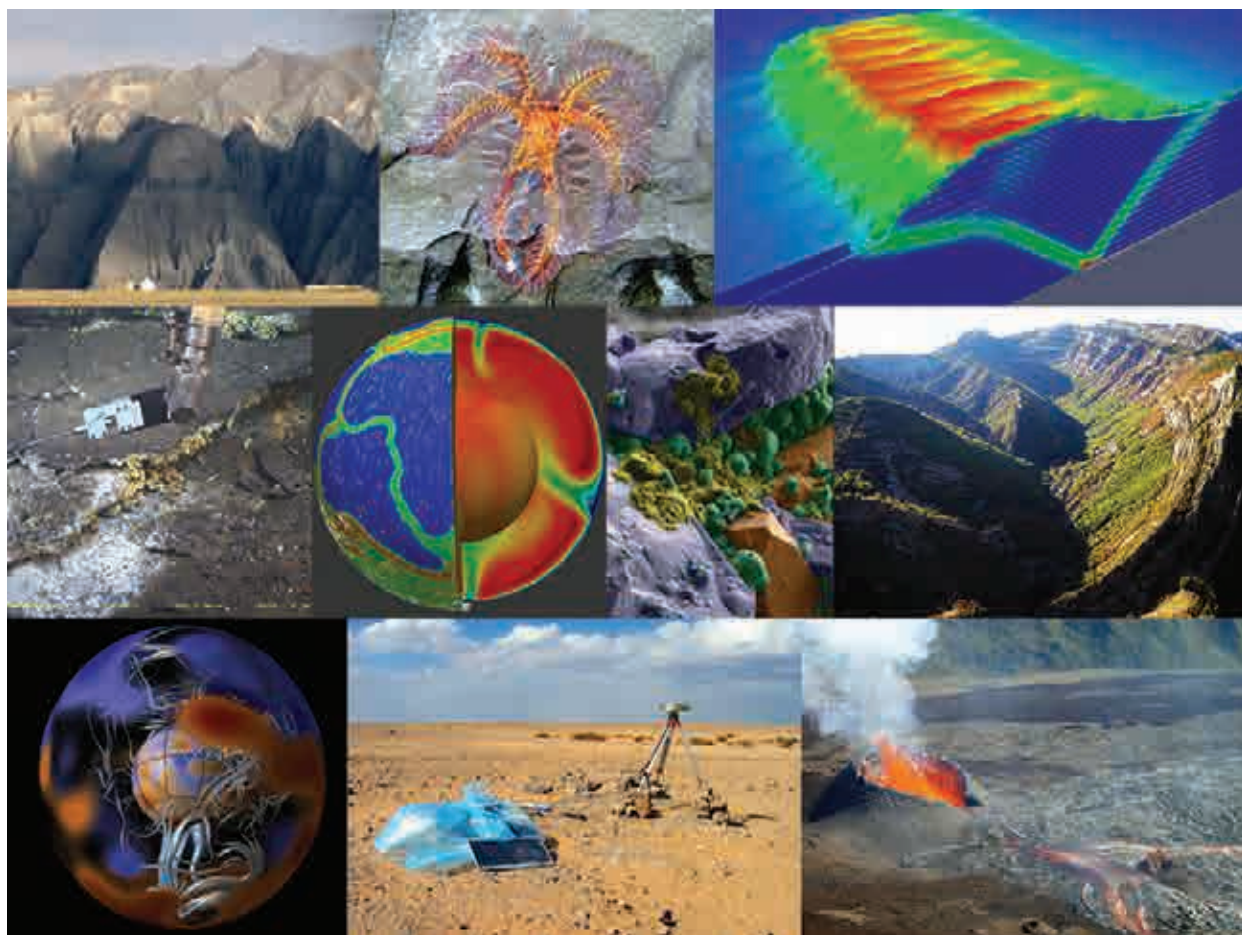
Président de la Commission Spécialisée Terre Solide





Synthèse

Les grands enjeux scientifiques du domaine Terre Solide (TS)



Ces enjeux sont détaillés en détail dans la suite de ce rapport à travers les bilans/prospectives dressés par les cinq comités thématiques. Ils ont un objet commun, la Terre Solide, et partagent une approche commune qui associe observation des objets naturels à toutes les échelles, depuis le global jusqu'à l'échelle atomique, expérimentation et modélisation. Le système Terre est en effet un système complexe, sujet à de nombreux processus géophysiques, géodynamiques et géochimiques, à des échelles spatio-temporelles très variables. Du fait de toutes ces interactions et rétroactions, un processus ou un compartiment du système Terre ne peut pas être étudié de manière isolée (Fig. 1).

Contrairement à certaines idées reçues, les thématiques de la Terre Solide ne sont pas «épuisées» ou moins attractives qu'avant, même si parfois on peut avoir l'impression qu'elles sont un peu

éclipsées dans l'esprit du grand public comme dans les médias par rapport aux problématiques touchant, par exemple, aux questions climatiques ou à la biodiversité. Il serait ainsi totalement erroné de penser que des travaux se rattachant à la tectonique des plaques ne seraient plus d'actualité sous prétexte que cette théorie a maintenant été bien établie au cours des 50 dernières années et est enseignée dès l'école primaire. Nous ne savons toujours pas quand les premiers continents se sont formés, nous ne comprenons pas pourquoi les continents anciens ont pu être préservés en partie, pourquoi et comment des plaques se forment et la tectonique des plaques démarre, pourquoi Mars et la Terre ont eu à cet égard des évolutions très différentes, quels sont les liens entre la présence d'une tectonique des plaques et la composition chimique d'une planète, avec en particulier la présence d'eau. Toutes ces questions sont fondamentales en soi et sont des enjeux de recherche pour des problématiques qui concernent une

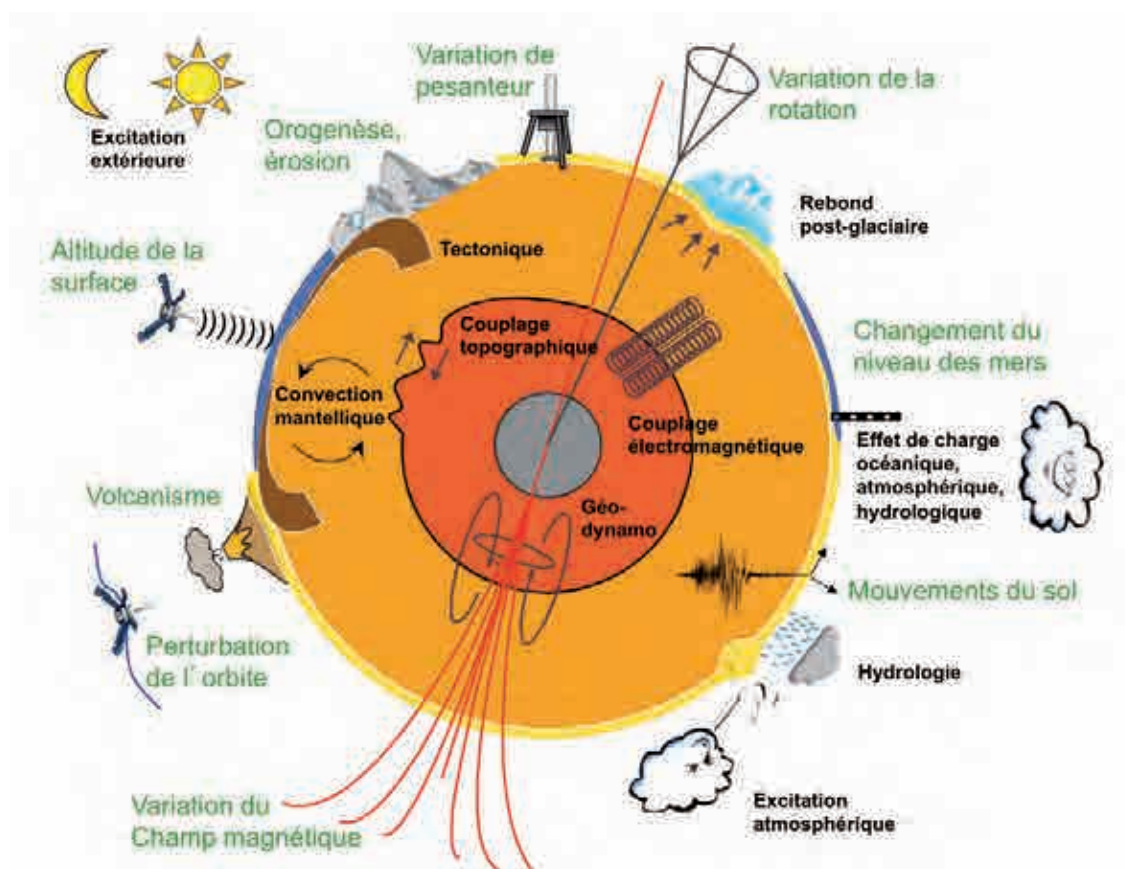


Figure 1. Représentation des interactions multiples du système Terre. © O. de Viron

communauté bien plus large que celle de la Terre Solide. Les liens entre la présence d'une tectonique des plaques, la composition d'une planète, la présence d'eau et de vie sont au cœur de projets d'étude des exoplanètes de type terrestre ou super-terres. De même l'altération des continents, contrôlée en partie par leur dynamique liée à la tectonique des plaques est ce qui contrôle le cycle du CO₂ atmosphérique et l'évolution des conditions de surface de la Terre à l'échelle des temps géologiques.

Les thématiques de la Terre Solide sont aussi au cœur de nombre d'attentes sociétales, que ce soit en ce qui concerne les risques naturels (séismes, tsunamis, volcanisme, glissements de terrain...), les conséquences du changement climatique et les risques environnementaux (la vision intégrée que peut apporter le géologue des processus d'érosion, des flux et des bilans de matière, est indispensable), la recherche des ressources minérales et énergétiques du futur et leur exploitation plus sûre.

Toute la communauté se retrouve derrière un certain nombre de grandes questions très générales qui ne sont toujours pas totalement élucidées.

- Comment la Terre et les planètes se sont-elles formées et quelle a été l'histoire géologique de l'Hadéen, les premiers 500 millions d'années pour lesquels très peu de témoins subsistent ?
- Quelle est la dynamique interne de la Terre et quels sont les liens entre cycles profonds et cycles de surface ?
- Comment les continents évoluent-ils jusqu'à la complexité structurale et chimique actuelle ?
- Quels sont les processus mis en œuvre lors des éruptions volcaniques et des tremblements de Terre ? Peut-on arriver à une prédiction de ces phénomènes ?
- Comment ont évolué les climats à l'échelle géologique ?
- Quand la vie est-elle apparue et comment a-t-elle évolué au cours des temps géologiques ?
- Quelles sont les relations entre le monde minéral et le monde vivant ?

Le contexte de la prospective

Terre Solide 2016-2020

La prospective précédente en sciences de la Terre avait été réalisée suite au colloque de prospective d'Aussois de 2008, mais publiée seulement en 2011 du fait des réformes importantes (création de l'Agence d'Evaluation de la Recherche et de l'Enseignement Supérieur (AERES), mise en place de la loi LRU (loi relative aux libertés et responsabilités des universités), réforme du CNRS, mise en place des Alliances) qui étaient en cours. À la suite des discussions de prospective plusieurs évolutions ont eu lieu pour les sciences de la Terre au CNRS-INSU, avec en particulier une réorganisation partielle des programmes par la création de cinq comités thématiques (CT) chargés de l'évaluation des demandes déposées en réponse aux appels d'offre CNRS-INSU, mais aussi de l'animation scientifique de la communauté et de la prospective. Certaines unités de recherche ont été regroupées, les services d'observations renforcés et avec la nouvelle infrastructure de recherche RESIF (Réseau sismologique et géodésique français) dédiée aux observations en sismologie, géodésie et gravimétrie. L'implication au sein d'infrastructures et de programmes européens, notamment via une politique volontariste de la direction du domaine TS au CNRS-INSU depuis 2008, a été aussi un point très important (ECORD¹, EPOS, ERA-Mines...).

Au cours des cinq dernières années, la structuration et l'organisation du domaine TS en Unités Mixtes de Recherches (UMRs) et au sein d'Observatoires des Sciences de l'Univers

(OSUs) s'est poursuivie et a été optimisée. Les laboratoires du domaine ont dû faire face à une baisse continue des ressources provenant du CNRS-INSU. Les recrutements (et promotions) de chercheurs au CNRS sont malgré tout restés à un niveau significatif, avec une baisse faible (de l'ordre du %) du nombre total de chercheurs en section 18 sur les 10 dernières années. La baisse des postes ITAs (ingénieurs, techniciens, administratifs) s'est par contre accélérée (diminution de 8 à 10% sur 5 ans) et a atteint un niveau tel que des problèmes graves apparaissent, ou vont apparaître, dans les laboratoires avec le non remplacement anticipé pour les années à venir de nombreux départs en retraite. Les soutiens de base et les programmes ont diminué mais ont été maintenus. Le fait que des financements annuels de l'ordre de 10 à 15 k€ sur des petits projets aient pu continuer à exister est plébiscité par la communauté et est ce qui a permis de maintenir une certaine souplesse de fonctionnement.

Cette prospective s'est donc tenue dans un contexte assez tendu : une part essentielle des postes fixes dans les laboratoires provient du CNRS-INSU mais celui-ci n'a plus directement la main sur les financements des grands équipements ou des gros projets de recherche. Comme discuté dans la dernière partie de cette synthèse, un enjeu est donc de redéfinir les rôles que le CNRS-INSU peut avoir au niveau national et européen pour soutenir le développement des recherches en Terre Solide. Son rôle dans le soutien aux moyens d'observation et aux plateformes est essentiel.

Voir les sigles en annexe.

Les succès de la communauté Terre Solide des 5 dernières années

■ Éléments de bibliométrie

Pour évaluer l'impact des travaux de la communauté TS, nous avons suivi la même approche que celle adoptée dans le rapport de prospective précédent. En utilisant la base de données *ISI web of Science*, nous avons sélectionné les 34 revues de notre domaine cumulant le plus de citations et ayant un facteur d'impact élevé et nous avons compté le nombre d'articles publiés ayant un co-auteur français, année par année de 2004 à 2014. Nous avons fait le même recensement pour les 9 autres pays qui sont parmi les 10 premiers au niveau mondial en nombre de publications en Géosciences (ces 10 pays cumulent en moyenne 80% des publications mondiales du domaine).

Ces revues sont, dans l'ordre décroissant de citations totales :

1. *Journal of Geophysical Research*,
2. *Geophysical Research Letters*,
3. *Geochimica and Cosmochimica Acta*,
4. *Earth and Planetary Science Letters*,
5. *Journal of Hydrology*,
6. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,
7. *Chemical Geology*,
8. *Tectonophysics*,
9. *Geophysical Journal International*,
10. *Palaeogeography-Palaeoclimatology-Palaeocology*,
11. *Quaternary Science Reviews*,
12. *American Mineralogist*,
13. *Geological Society of America Bulletin*,
14. *Contributions to Mineralogy and Petrology*,
15. *Bulletin of the Seismological Society of America*,
16. *Geophysics*,
17. *Geomorphology*,
18. *Lithos*,
19. *Precambrian Research*,
20. *Nature Geosciences*,
21. *Journal of Petrology*,
22. *Global Biogeochemical Cycles*,
23. *Marine Geology*,

24. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*,
25. *Geochemistry Geophysics Geosystems*,
26. *Organic Geochemistry*,
27. *Biogeosciences*,
28. *Earth Science Reviews*,
29. *Biogeochemistry*,
30. *Journal of Structural Geology*,
31. *Gondwana Research*,
32. *Reviews of Geophysics*,
33. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*,
34. *Journal of Metamorphic Geology*.

Pour l'année 2014, les publications dans ces 34 revues représentent en nombre, presque exactement 50% de toutes les publications des domaines Geology + Geophysics & Geochemistry + Paleontology + Mineralogy. Elles sont, *a priori*, les 50% les plus importantes car dans les journaux les plus cités et ayant les meilleurs facteurs d'impact. Nous n'avons pas inclus dans cette analyse les articles aux revues Science et Nature car cela compte très peu dans le nombre total d'articles publiés.

Les chiffres d'ISI montrent que la France se situe de manière constante entre le 3^e et 4^e rang mondial du nombre de publications dans ces 34 journaux, derrière les Etats Unis (1^{er}), l'Allemagne (2nd), l'Angleterre (3^e ou 4^e) et depuis 2014 derrière la Chine qui est passée 2nd (Fig. 2). Il est évident que les articles avec un co-auteur français (par exemple 1232 en 2014 sur un total de 20140) n'ont pas tous été financés dans le cadre d'un projet soumis à l'un des cinq CT, mais cela reflète parfaitement le dynamisme des laboratoires et des équipes du domaine TS. Les chiffres montrent que dans le contexte mondial d'une augmentation (ou d'une inflation selon l'analyse que l'on en fait) constante du nombre de publications, la communauté française TS est au meilleur niveau. La qualité et l'originalité des travaux menés et des résultats obtenus, qui ne peuvent pas se « mesurer » simplement par des chiffres, sont bien démontrées dans la suite de ce rapport dans les bilans détaillés des différents CTs.

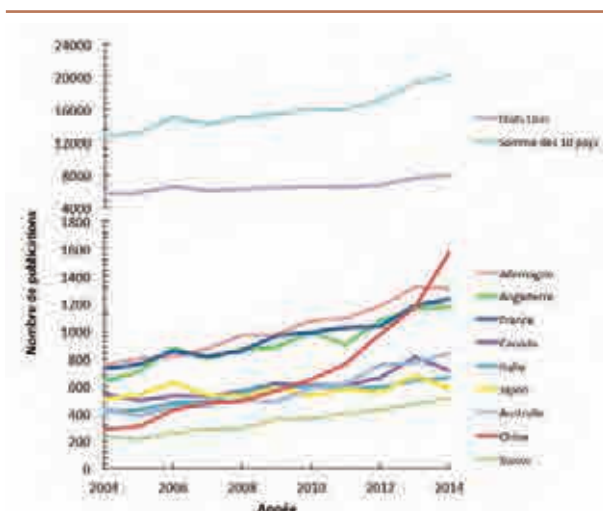


Fig. 2: Nombre de publications dans les principaux journaux internationaux du domaine de la Terre Solide pour les 10 pays les plus actifs. La France se place entre le 2ème et le 4ème rang mondial, la montée en puissance de la Chine étant très claire au cours des cinq dernières années.

■ Projets financés par l'ANR et l'ERC

Une autre manière de se rendre compte de la force de la communauté TS est de regarder ses succès aux grands appels d'offres ANR et ERC. Ce type de financement a profondément modifié le fonctionnement de nos laboratoires, en rendant des projets de grande ampleur possibles (typiquement pour l'ANR un projet jeune chercheur-jeune chercheuse (JCJC) est de l'ordre de 200 k€ pour 4-5 ans, un projet de recherche collaboratif (PRC) de l'ordre de 400 k€ pour 4-5 ans, 1,5 M€ au maximum sur 5 ans une Starting Grant ERC, 2 M€ pour une Consolidator Grant et 2,5 M€ pour une Advanced Grant) mais aussi en fragilisant certaines thématiques qui n'ont pas encore eu de succès à ces appels d'offres et en modifiant certains équilibres dans les laboratoires. Les taux de succès ont été à peu près stables à l'ERC au cours des 5 dernières années et les projets TS sont bien représentés parmi tous les projets CNRS-INSU financés (Fig. 3). Par contre les taux de succès à l'ANR ont fortement baissé au cours des 5 dernières années, si l'on compare les projets financés au thème Blanc jusqu'en 2013 et ceux financés depuis 2013 au Défi 1 (*Gestion sobre des ressources et adaptation au changement climatique*) et au Défi 10 (Défi de tous les savoirs), qui sont les deux portes d'entrée des chercheurs de la communauté TS. Si il y a eu plus de 20 projets TS financés par an avant 2013 (taux de sélection global de 12 à 15%), il n'y en a eu que 12 en 2014 (somme des JCJC et des PRC, avec 7 au Défi 1 et 5 au Défi 10) et 7 en 2015

(aucun JCJC, 2 au Défi 1 et 5 au Défi 10). Cette diminution générale découle directement d'une baisse du budget ANR alloué au thème Blanc, initialement et depuis 2013. Les taux très faibles de succès actuels, de l'ordre en 2015 de 8% du total des projets déposés à l'étape 1 (en moyenne 30% des projets déposés après la pré-sélection à l'étape 2) pour le *Défi de tous les Savoirs* font que l'obtention de ces financements devient anormalement difficile et que beaucoup de projets ne sont pas financés.

Le rôle des programmes CNRS-INSU dans ce contexte est fondamental en permettant de maintenir un soutien annuel plus régulier (taux de succès de l'ordre de 1/3 de la pression financière) à de petits projets qui souvent d'ailleurs, grâce aux idées et aux collaborations qui sont nées, sont la base de projets de plus grande ampleur déposés avec succès à l'ANR ou l'ERC.

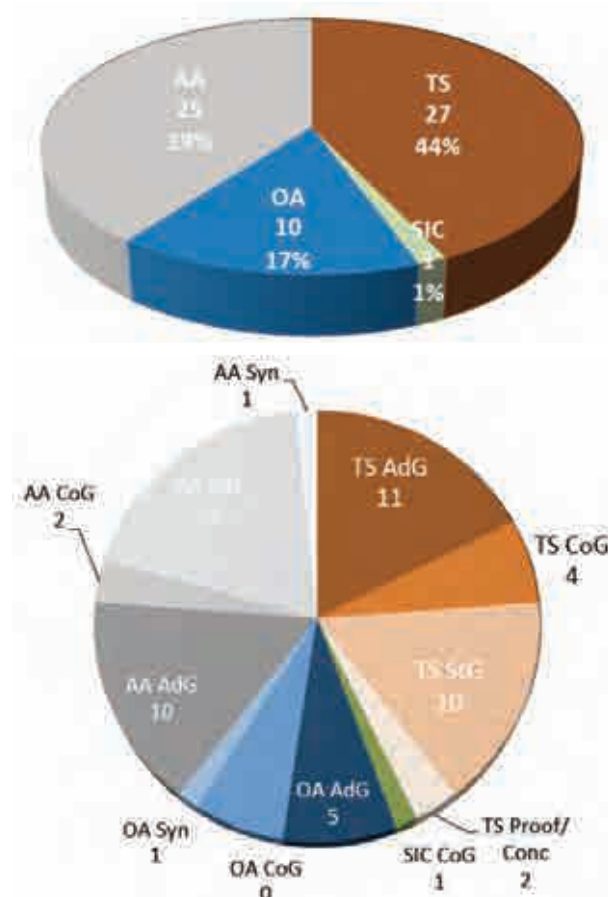


Fig. 3: Le CNRS-INSU a eu, entre 2007 et 2014, 63 lauréats ERC dont 27 en TS avec une répartition équilibrée entre Starting Grant, Consolidator Grant (créé en 2013) et Advanced Grant.

■ Le Domaine Terre Solide de l'INSU en quelques chiffres

Depuis 2015, le nombre d'unités Terre Solide de l'INSU est de 17 UMR et de 6 UMS (sur un total de 62 UMR et 28 UMS) principalement co-partagées avec les domaines SIC et AA. Les laboratoires Terre Solide de l'INSU sont composés au total de 2711 personnels permanents et non permanents (29% de l'INSU), dont 1024 chercheurs et enseignants chercheurs permanents, 706 personnels ITA et BIATOS (21% de l'INSU), 208 post-doctorants et chercheurs non-permanents, 598 doctorants (40% de l'INSU) et 175 personnels temporaires non CNRS.

- En 2016, le budget Fonctionnement, Équipement, Investissement (FEI) du CNRS-INSU aux UMR Terre Solide a été de 1,7 M€ soit une augmentation de 2,3 % par rapport à 2015.
- Le budget dédié aux appels d'offres des cinq comités thématiques, aux colloques, campagnes à la mer et MARGES représente un volet financier moyen de 1,36 M€ en augmentation de 20 % par rapport à 2015 (pour 334 projets déposés et 237 acceptés en 2016).
- La participation aux infrastructures (bâtiments) de l'INSU-TS est de 0,5 M€/an.
- Le budget des Services Nationaux d'Observation et des plateformes Terre Solide de l'INSU est de 1,34 M€/an.
- Les réseaux Terre Solide de l'INSU (ICDP, INTERRIDGE, ILP, etc.) sont financés à hauteur de 0,23 M€/an.
- Le budget total TGIR (IODP-ECORD) et IR (RESIF et EMSO) est de 5,96 M€/an (ECORD 72 %, RESIF 23 % et EMSO 5 %) en augmentation de 8 % par rapport à 2015.

Le budget total (hors salaire) du domaine Terre Solide de l'INSU est d'environ de 11,8 M€/an.

■ Évolutions, contraintes et perspectives

Les dernières prospectives d'Aussois en octobre 2008 ont permis de mettre en place quatre décisions majeures dont l'une posait les bases d'un appel d'offre annuel organisé autour de cinq grands enjeux scientifiques. Cinq comités thématiques ont été créés ayant la charge de la programmation scientifique, de son évaluation et d'une prospective permanente. Le succès de cette structuration est évident tant au niveau de l'organisation thématique du domaine Terre Solide, mais également en terme de production scientifique, d'effet levier sur d'autres appels

d'offres nationaux (ANR) et internationaux (ERC) ainsi que sur l'implication accrue des jeunes chercheurs et enseignants chercheurs de nos laboratoires.

- Parallèlement à la naissance des comités thématiques, nos relations avec nos partenaires industriels et les EPIC se sont considérablement développées. Dans un mode de fonctionnement différent de celui des comités, les projets scientifiques communs impliquent de nombreux chercheurs et enseignants chercheurs de nos UMR sur des sujets ciblés où recherche fondamentale et appliquée s'entrecroisent. Ces projets nécessitent un suivi constant durant la période de montage et impliquent nos services juridiques ainsi que celui d'un délégué aux relations industrielles. Il faut bien réaliser que ces activités sont historiquement portées par le domaine Terre Solide et qu'il s'agit bien d'un atout (un modèle) pour l'INSU.

- L'interdisciplinarité au sein du domaine Terre Solide existe depuis de nombreuses années avant même que le terme ne soit inventé (Morin, 1994). De nombreux chimistes, physiciens, mathématiciens et biologistes ont grandement participé aux avancées majeures en Sciences de la Terre depuis plus de cinquante ans. Le CNRS a encouragé depuis longtemps ces approches grâce aux Programmes Interdisciplinaires de Recherche (PIR) par exemple. La Mission Interdisciplinaire (MI) du CNRS a vu le jour sous une forme rénovée et volontariste depuis environ cinq ans. Nos participations aux différents appels d'offres de la MI couvrent principalement ceux relatifs aux Défis (instrumentation aux limites, InPhyNITI et Littoral) et les PEPS de site.

- L'Agence Nationale pour la Recherche (ANR) est une agence de moyens créée en 2005 qui finance la recherche publique et la recherche partenariale en France. Les chiffres parlent d'eux-mêmes : la dotation de l'ANR était de 710 M€ en 2005, elle est tombée à 535 M€ en 2014. Le nombre de projets soumis était de 5652 en 2005 (1 454 projets financés), il était de 10 532 en 2014 (1071 projets financés). En 2013, le nombre de projets financés dans la catégorie « Défis de tous les savoirs » était de 99 sur 823 déposés soit un taux de succès de 12 %. En ce qui concerne la thématique « Fonctionnement Terre Fluide et Solide » de l'ANR, le taux de succès est passé sous la barre des 5 % en 2015.

- Le Programme Investissements d'Avenir (PIA) a débuté en 2010 et est toujours en cours en 2016 (Equipex/Labex/Idex/IHU/IRT/SATT). Le programme a été décliné en deux phases (le PIA1 de 35 milliards d'euros et le PIA2 de 12 milliards d'euros). Le PIA2 met en place actuellement les I-SITE (Initiatives Science – Innovation – Territoires – Economie) ayant pour vocation d'animer des collaborations fortes avec le monde économique.

- Les ComUE (Communauté d'Universités et Établissements) créées en 2013 permettent de regrouper des établissements d'enseignement supérieur et de recherche et des organismes de recherche. L'objet des ComUE est de coordonner les offres de formation et les stratégies de recherche sur un territoire donné.

- Le lancement officiel du programme européen H2020 a eu lieu en janvier 2014 pour une période de 7 ans. Il finance des projets autour de trois priorités : l'excellence scientifique, la primauté industrielle et les défis sociétaux. Ce sont 79 milliards d'euros (en euros courants, Euratom compris) qui viennent soutenir des travaux scientifiques et des industriels de l'Union Européenne.

- Publication de la Stratégie Nationale de la Recherche (SNR) en mars 2015. La SNR définit les grandes priorités de la recherche française. Inscrite dans la loi, la SNR est élaborée en cohérence avec celle de l'Union Européenne (programme H2020). Dix grands défis ont été définis dont le défi 1 : « Gestion sobre des ressources et adaptation au changement climatique » qui est le seul item en relation partielle avec l'INSU (OA et SIC).

- On assiste à un foisonnement d'initiatives aux niveaux européen et international (EPOS, EMSO, Belmont Forum, Future Earth, ICES, IPBES, ICOS, ENVRI+, Ultimate Earth Project, Earth Cube, Copernicus, GEO, etc.). Les implications de la communauté Terre Solide dans les projets européens sont nombreuses : dans des infrastructures comme EPOS via notamment RESIF, dans EMSO, dans des ERA-Net (Era-Mines...), dans des programmes tel ECORD dont le pilotage et la gestion sont assurés par une unité du domaine et par le CNRS-INSU respectivement, dans les missions spatiales d'observation de la Terre (Earth Explorer de l'ESA, missions Sentinelles de Copernicus...), etc. C'est également vrai au niveau international avec par exemple des programmes de collaborations bi-et multi- latérales, notamment mais pas uniquement dans les unités en co-tutelles avec l'IRD, soutenus par des PICs et LMI's ; par des campagnes de terrain à terre et en mer, etc. ; avec les implications dans les réseaux et bases de données d'observations mondiaux (en sismologie, magnétisme, géodésie, gravimétrie...); dans des programmes spatiaux d'observation de la Terre et d'exploration des planètes au premier rang desquelles Mars (ChemCam, Insight...).

Ces quelques étapes montrent clairement que depuis 2008, le paysage de la Recherche et de l'enseignement supérieur en France et en Europe a profondément changé. Un système de recherche « individuel » a été mis en place au détriment parfois d'une recherche « collective ». Parallèlement, des

méga-structures nationales et internationales se sont mises en place, extrêmement utiles pour notre domaine même si ces méga-structures impliquent souvent des activités chronophages, non directement productrices de connaissances. Dans la période récente, notre rapport à la société a évolué. Même si les recherches en Terre Solide sont naturellement orientées vers la société, nous nous devons de répondre encore plus « aux besoins sociétaux ». Ceux-ci pour notre domaine sont souvent exprimés via un questionnement sur l'environnement présent, sur les ressources, sur les risques telluriques actuels et plus rarement, voire jamais, sur la structure et le fonctionnement de la Terre profonde ou des planètes telluriques, sur l'histoire de notre globe ou sur l'origine et l'évolution de la vie. Enfin, on peut noter que ces dernières années, la recherche participative est mise en avant. Sur ce dernier point, notre communauté a une longue tradition illustrée par exemple par les études macrosismiques.

Malgré cette période caractérisée par une évolution probablement sans précédent du paysage de la recherche, quelques faits majeurs sont à mettre en avant :

- En premier lieu, nos succès à l'ERC est flagrant et il est réalisé sur des projets de recherche fondamentale aussi bien au niveau des projets juniors que seniors (50% des succès à l'ERC de l'INSU viennent de Terre Solide qui ne représentent que 30% des forces de l'institut).
- Des publications Terre Solide, nombreuses dans les meilleures revues scientifiques (Nature, Science, PNAS) abondent régulièrement la communauté internationale.
- Un savoir-faire dans le montage de programmes de recherche avec les industriels.
- Un positionnement stratégique dans les structures et programmes de recherche européenne (EPOS, ECORD, ...).

La diversité de nos approches est une force. Il reste cependant des marges de manœuvres sur lesquelles nous pouvons encore progresser. À titre d'exemple on peut citer :

- L'interdisciplinarité est sans doute une activité que nous pouvons décliner encore plus fortement au sein de nos unités avec nos partenaires historiques (INP, INC) mais également aux interfaces avec la Santé, l'INSHS et l'IN2P3.
- Les chantiers géographiques et/ou thématiques permettent de fédérer les forces Terre Solide mais surtout de relancer une recherche « collective » autour de questions scientifiques majeures.
- La communauté géophysique a su se structurer au niveau national grâce au Réseau Sismologique et géodésique Français (RESIF). La structuration en Réseau de la Géochimie et de l'Expérimentation Française (REGEF) est un projet ambitieux qui permettra une meilleure visibilité de nos plateformes analytiques au niveau national.

■ Le programme TelluS du domaine Terre Solide de l'INSU

Afin de rendre plus visible et homogène les appels d'offres du domaine Terre Solide, le programme TelluS a été créé en 2015. TelluS intègre trois parties : 1) les appels d'offres des cinq comités thématiques, les colloques, les campagnes à la mer et MARGES, 2) les appels d'offres Inter-Instituts du CNRS et 3) les coopérations avec les industriels et les EPIC. L'enveloppe financière globale de TelluS a été de l'ordre de 5,3M€ pour l'année 2016.

1. Les appels d'offres des cinq comités thématiques, les colloques, les campagnes à la mer et MARGES représentent un volet financier moyen de l'ordre de 1,3M€. Le financement INSU est de l'ordre de 80% le reste venant de nos partenaires (TOTAL, CNES, BRGM, SHOM).

2. Les appels d'offres Inter-Instituts CNRS ont été initiés en 2015 et ils visent à encourager des projets entre l'INSU et d'autres Instituts du CNRS pouvant éventuellement être transférés vers la MI sous forme de PEPS ou de Défis. En 2015, 14 projets ont été déposés conjointement avec l'INSM et la MI avec un taux de succès de l'ordre de 80 %. D'autre part, une action entre l'IN2P3 et l'INSU a permis de financer 3 projets portant sur la tomographie muonique. Ce type d'actions incitatives sera poursuivi dans le futur.

3. Les coopérations avec les industriels et les EPIC occupent une place importante dans la palette des outils du domaine Terre Solide. Dans la lignée des coopérations scientifiques antérieures (GOCAD, SEISCOPE 1 et 2., etc.), OROGEN a été lancé en 2016. OROGEN est un projet porté par TOTAL, le BRGM et l'INSU et il concerne l'étude des mécanismes de mise en place et du développement d'une chaîne de collision (les Pyrénées). Le projet est planifié sur une durée de 6 ans (17 thèses, 11 post-doctorats) et implique 9 laboratoires dont la coordination a été confiée à l'INSU.

• Les modes de fonctionnement des autres Domaines de l'INSU en matière de programmes

Le programme LEFE du domaine OA-INSU fonctionne avec un budget annuel provenant à 55% de l'INSU, le reste venant des organismes partenaires (IRD, Météo-France, CNES, IFREMER, CEA, EDF, ADEME, MEEM) ainsi qu'une contribution des autres instituts du CNRS (INP, INC, INSMI). Le PNTS repose sur un fonctionnement partagé entre l'INSU (35%) et des organismes partenaires (CNES, IDR, MF, IGN). Le domaine SIC-INSU organise son programme EC2CO avec un budget annuel (1,45M€) réparti comme suit : 41% INSU, 14% INEE, 7% MI et 38% provenant des autres partenaires hors CNRS. Enfin AA-INSU dispose d'un montant de l'ordre de 1 M€ pour lancer des appels d'offres annuels permettant de financer des projets à hauteur de 5-15 k€. L'enveloppe budgétaire est répartie de la façon suivante : 65% (INSU), 26% (CNES), CEA(2%) et les autres instituts du CNRS pour 7% (INC, INP, IN2P3).

• Les chantiers géographiques et thématiques de l'INSU

Enfin, les chantiers thématiques (ou méga-programmes), historiquement mis en place sous la houlette du domaine Terre Solide (par exemple le chantier Himalaya des années 80), se sont diversifiés vers des thématiques beaucoup plus transverses (MISTRALS, ARCTIQUE). MISTRALS (Mediterranean Integrated Studies at Regional And Local Scales) est composé de 8 programmes thématiques dont l'un (TERMeX) concerne l'identification, l'analyse et la prédiction des risques – séismes, volcanismes, glissements de terrain – et des ressources géophysiques. Après cinq années de fonctionnement, le méga-programme MISTRALS a organisé des perspectives à Marseille du 20 au 22 octobre 2015. Un nouveau projet (TERMeX2) prévu pour prendre la suite de la première phase est actuellement évalué. Cette nouvelle mouture est thématiquement plus resserrée sur 6 axes principaux : tomographie du manteau, imagerie sismique de la croûte, bathymétrie et imagerie structurale fond de mer, topographie dynamique, sismo-tectonique et volcanologie.



Bilan, prospective et recommandations thématiques

Membres de la Commission spécialisée Terre Solide du CNRS-INSU

Membres nommés

CHAUSSIDON Marc	Président CRPG, Nancy
ADER Magali	IPG Paris
BOURQUIN Sylvie	Géosciences, Rennes
BUROV Evgenii †	ISTEP, Paris
CANNAT Mathilde	IPG Paris
CHAUVEL Catherine	IsTerre, Grenoble
DEVERCHERE Jacques	Domaines Océaniques, Brest
DUCHENE Stéphanie	GET, Toulouse
KAMINSKI Edouard	IPG Paris
KLINGER Yann	IPG, Paris P
LALLEMAND Serge	Géosciences Montpellier
MATTIOLI Emanuella	Laboratoire de géologie De Géologie, Lyon
MONTEL Jean-Marc	Géoressources, Nancy
RICARD Yannick	Laboratoire de géologie De Géologie, Lyon
ROCHETTE Pierre	CEREGE, Aix
SCAILLET Bruno	ISTO, Orléans

Représentants institutionnels

TRUFFERT Cathy	BRGM
COUTANT Olivier	IsTerre
MANDEA Mioara	CNES
JAMET Olivier	IGN-Futur responsable du pôle CNES-INSU
BORNETTE Gudrun	INEE
ARFI Robert	IRD
DOUSSIN Jean-François	Président CSOA, LISA

DELAY Fred	Président CSSIC, UNISTRA
FIQUET Guillaume	Président section 18, IMPMC, Paris
GARLAN Thierry	SHOM
COCHONAT Pierre	IFREMER
MARIOTTI André	Conseiller académique pour l'ANDRA
LEBON Patrick	ANDRA

Membres de droit

CAMOIN Gilbert	Chargé de mission, CEREGE, Aix
MAIA Marcia	Chargé de mission, Domaines Océaniques
PERRIN Mireille	Chargé de mission, CEREGE, Aix
ROSE Jérôme	Chargé de mission, CEREGE, Aix
GRAPPIN Christiane	Communication CNRS-INSU-TS
PIK Raphaël	Commission Equipement/Instrumentation CRPG, Nancy
VIRIEUX Jean	CSNO, ISTERRE, Grenoble
HULOT Gauthier	CT1, thème 3 du PNP, IPG Paris
BESSE Jean	CT2, SYSTER, IPG Paris
GODDERIS Yves	CT2, SYSTER, GET, Toulouse
MANIGHETTI Isabelle	CT3, ALEAS, GEOAZUR, Sophia Antipolis
MARTEL Caroline	CT3, ALEAS ISTO, Orléans
ALOISI Vanni	CT4, INTERRVIE, OCEAN, Paris
SERVAIS Thomas	CT4, INTERRVIE, Géosystèmes, Lille
CATHELINÉAU Michel	CT5, CESSUR, Géoressources, Nancy
PEDERSEN Helle	Déléguée Scientifique TS INSU IsTerre, Grenoble

Comité Thématique 1

« Origine du système solaire-cosmochimie »

Appel d'offre : Thème 2 du programme national de planétologie (PNP)

Jean-Alix Barrat (LDO), Marc Chaussidon (IPGP), François Robert (IMPMC), Mathieu Roskosz (UMET)

■ Grands enjeux scientifiques du domaine

Le thème 2a du Programme National de Planétologie (PNP), co-financé par le CNRS-INSU (AA et TS) et le CNES, est rattaché au CT1. Il regroupe les travaux touchant à l'origine du système solaire à travers l'étude de la matière extra-terrestre. L'objectif est de mieux comprendre comment, à partir d'un nuage moléculaire initial, les planétésimaux ont pu se former et évoluer vers des corps planétaires, en aboutissant au système solaire tel que nous connaissons, avec ses planètes et ses populations de petits corps.

Les enjeux scientifiques portent sur : l'évolution chimique de la galaxie ; la formation planétaire au sens large et les exoplanètes ; la différenciation planétaire et l'origine des différentes enveloppes ; l'origine de la matière organique ou les conditions d'habitabilité des planètes. Toutes ces questions concernent aussi bien l'astrophysique que la planétologie, la géologie, la chimie et la biologie.

Grâce au développement de la précision et de la résolution spatiale des techniques d'analyse des propriétés minéralogiques et physiques, ainsi que des compositions chimiques et isotopiques de la matière extra-terrestre, il est possible d'obtenir des informations uniques sur les premiers millions d'années du système solaire, et d'espérer répondre à des questions fondamentales :

- Comment, où, quand et à quelle vitesse les premiers solides et les premières roches se sont-ils formés dans le disque d'accrétion ?
- Quel est le chemin physique et chimique des premiers grains aux premières planètes ?
- Quel est l'héritage dans la composition des planètes terrestres de ces processus qui se sont déroulés dans les premiers millions d'années ?
- Comment évoluent depuis 4,57 milliards d'années les corps du système solaire ?

Tout l'enjeu de ces recherches est d'arriver, un jour, à une compréhension globale qui permettrait de lier tous ces événements, apparemment si différents, à travers un modèle quantitatif faisant appel à des processus physico-chimiques élémentaires. Cet objectif implique de pouvoir croiser au plus prêt les observations faites sur la matière extra-terrestre avec les observations astrophysiques des étoiles jeunes et de leurs disques, et celle des exoplanètes, ainsi qu'avec les simulations de la formation et de l'évolution du disque, en partant du gaz et des poussières, en passant par les planétésimaux et en allant jusqu'aux planètes.

■ Résultats saillants des cinq dernières années

Les travaux soutenus par ce thème du PNP se répartissent en quatre domaines : l'évolution du disque d'accrétion et l'origine des solides dans les zones internes ; l'origine et les transformations des premiers solides dans les zones externes du disque ; la différenciation et l'évolution « géologique » des corps astéroïdaux et la collecte et la classification des météorites.

• Évolution du disque d'accrétion et origine des premiers solides dans les zones internes

Les chondrites, météorites primitives, sont constituées pour l'essentiel de composants ayant été formés et/ou transformés à très haute température (>1200 K) dans le disque d'accrétion, que ce soient les chondres (billes silicatées partiellement fondues et trempées dans le gaz du disque) ou les inclusions réfractaires (CAIs), résultat de l'aggrégation (et/ou de la re-fusion) des premiers solides condensés à haute température à partir du gaz présent dans le disque d'accrétion. Ces échantillons sont les seuls témoins qui permettent d'espérer retracer l'histoire la plus précoce du disque, avant même que les premiers planétésimaux ne soient formés. Cependant leur utilisation se heurte au fait que leur origine reste encore énigmatique, de même que l'origine de leurs « roches mères » que sont les chondrites.

Plusieurs projets soutenus par le PNP ont permis de progresser dans différentes directions : origine des CAIs (Aléon 2016) et des chondres, origine des radioactivités éteintes ^{26}Al et ^{60}Fe (Gounelle et Meynet, 2012), conditions d'irradiation dans la zone interne du disque à partir du ^{10}Be (Gounelle *et al.*, 2013), datation des chondres et de leurs précurseurs par excès radiogéniques de ^{54}Cr (Göpel *et al.* 2015), échanges à haute température entre le gaz nébulaire et les chondres fondus (Marrocchi & Libourel, 2013), recherche des liquides parents des chondres à partir des éléments en trace dans les olivines. Sur le plan expérimental, des travaux (Faure *et al.*, 2012) ont reproduit le piégeage d'inclusions magmatiques de composition très réfractaire dans des olivines riches en Mg, comme observé assez généralement dans les olivines des chondres de type I, montrant ainsi qu'une origine possible pour ces olivines est la cristallisation lente à haute température dans des océans magmatiques de petites planètes. La reconstitution de l'histoire thermique des CAIs (cycles successifs de chauffages et refroidissements) obtenue à partir de l'étude pétrographique et isotopique des CAIs donne accès à la dynamique de ces objets millimétriques à centimétriques dans le disque d'accrétion (Fig. 1, Charnoz *et al.*, 2011 ; thèse d'Esther Taillifet). Enfin, des études, par des techniques originales (laser - icpms) de la complémentarité éventuelle de composition entre chondres et matrice pour un certain nombre d'éléments majeurs et traces ont permis de mieux comprendre l'accrétion des chondrites.

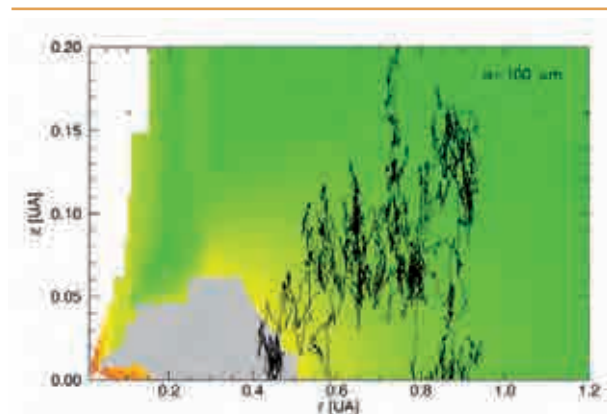


Fig. 1 : Trajectoire d'un grain de 100 μm dans le disque d'accrétion protoplanétaire modélisée à partir d'un code LIDT3D [Charnoz *et al.*, 2011 ; Taillifet *et al.*, 2015].

• Origine et transformations des premiers solides dans les zones externes du disque

Depuis le retour de la mission Stardust (2006) (Fig. 2), notre connaissance de la poussière finement divisée initialement présente dans les zones externes du disque a profondément

évolué. La forte cristallinité des échantillons et le mélange intime de silicates, métaux, sulfures, et de matière organique (à l'échelle nanométrique) ont largement modifié notre description de cette poussière. Mais surtout, à travers ces grains cométaires, ce sont la turbulence du disque et les mélanges à longue distance qui se sont révélés. La communauté soutenue par le PNP a poursuivi ses efforts de caractérisation de ces grains uniques. Passant de l'échelle du grain à l'échelle de l'agrégat, des caractérisations quantitatives des assemblages ont été produites (Leroux *et al.*, 2013 ; Stodolna *et al.*, 2012). La distribution des degrés d'oxydation des constituants des agrégats a été étudiée afin d'évaluer les conditions rédox ayant prévalu dans les environnements cométaires (Stodolna *et al.*, 2013).



Fig. 2 : Mission Stardust : image de l'impact d'une particule ayant pénétré l'aérogel devant servir à rapporter des poussières cométaires. © NASA

Toutefois, les échantillons de Stardust ont été profondément modifiés par la collecte, si bien que d'autres sources d'information se sont révélées irremplaçables, notamment les IDPs et les micrométéorites ultra-carbonées. Leur minéralogie étudiée en détail révèle leur forte cristallinité et leur diversité minéralogique, signature d'une origine essentiellement solaire pour ces grains et non interstellaire comme souvent évoqué (Dobrica *et al.*, 2011 ; 2012). Les signatures spectrales ont démontré une proximité troublante avec les signatures cométaires de Hale-Bopp (Brunetto *et al.*, 2011). Enfin, c'est peut être du côté des signatures chimiques et isotopiques que les résultats les plus frappants ont été obtenus. En effet, des enrichissements phénoménaux ont été mesurés, notamment en deutérium (Duprat *et al.*, 2010, Fig. 3) et en azote (Dartois *et al.*, 2013). Ainsi une matière organique jusqu'ici inconnue s'est probablement formée dans le nuage de Oort.

Ces signatures (minéralogiques, spectrales, chimiques et isotopiques) tout à fait uniques de la matière formée et modifiée dans le disque externe ont également suscité l'intérêt de la communauté des expérimentateurs. Ces objets nous renseignent sur les conditions régnant dans les zones externes du disque. Depuis quelques années, l'intérêt de la communauté PNP s'est focalisé sur les effets de l'irradiation (particules, ions, électrons, photons) sur l'évolution physico-chimique, structurale et isotopique de cette matière. L'effet d'une irradiation électronique sur la structure et la signature D/H d'analogue de l'IOM a été menée (Le Guillou *et al.*, 2013). Djouadi *et al.* (2011) ont aussi montré que l'hydratation des silicates pouvait être facilitée par l'implantation de protons lors de l'irradiation des grains par le vent solaire. Enfin Godard *et al.* (2011) ont quantifié les modifications structurales vues par des analogues de matière organique lors d'irradiation par des rayonnements cosmiques de haute énergie. Ils en déduisent des durées d'exposition ainsi que les environnements propices à ce type d'irradiation.

• Différenciation et évolution «géologique» des astéroïdes

Sont regroupés ici les projets traitant des processus post-accrétion des petits corps telluriques. Par commodité, y sont rattachés les études pétrologiques et géochimiques des achondrites «planétaires», plus précisément les météorites martiennes (comme ALH 84001 ou Tissint, Fig. 4). Les thématiques sont par conséquent très diverses, elles vont du métamorphisme thermique des chondrites (Gattacceca *et al.*, 2014), à la fatigue thermique de la surface des astéroïdes (Delbo *et al.*, 2014), en

passant par les premiers stades de la formation du métal dans des achondrites primitives, la géochronologie et la géochimie d'une classe de météorites de fer (différenciation des fers IVA, Albarède *et al.*, 2013), et à la pétrologie de diverses classes d'achondrites (différenciation des fers IVA, Albarède *et al.*, 2013).

Un évènement marquant de ces dernières années est évidemment l'étude de l'astéroïde-Vesta par la sonde Dawn de la NASA. Des scientifiques français (notamment de l'OMP, Toulouse) ont participé à cette mission et contribué à l'interprétation des données obtenues (financement CNES). Le PNP quant à lui, a financé des travaux de pétrologie des météorites provenant de Vesta (Yamaguchi *et al.*, 2015), apportant une vue complémentaire des données spatiales.

• Classification et collecte de météorites

La recherche et la classification de nouvelles météorites ou micrométéorites sont fondamentales pour la communauté cosmochimique, mais le PNP n'a pas les moyens de soutenir sur le long terme des campagnes systématiques de collecte. Il a par contre veillé à soutenir l'étude de nouvelles classes de micrométéorites d'Antarctique (Suavet *et al.*, 2011 ; Cordier *et al.*, 2012 ; Van Ginneken *et al.*, 2012), les collectes de météorites dans le désert de l'Atacama (Chili) et la détermination du flux d'apport dans cette région (Gattacceca *et al.*, 2011 ; Uehara *et al.*, 2012 ; Munayco *et al.* 2013). L'étude des propriétés magnétiques des météorites en vue de leur classification, en plus de l'utilisation de ces propriétés pour mieux comprendre la structure de leurs corps parents a été développée par le groupe du CEREGE.

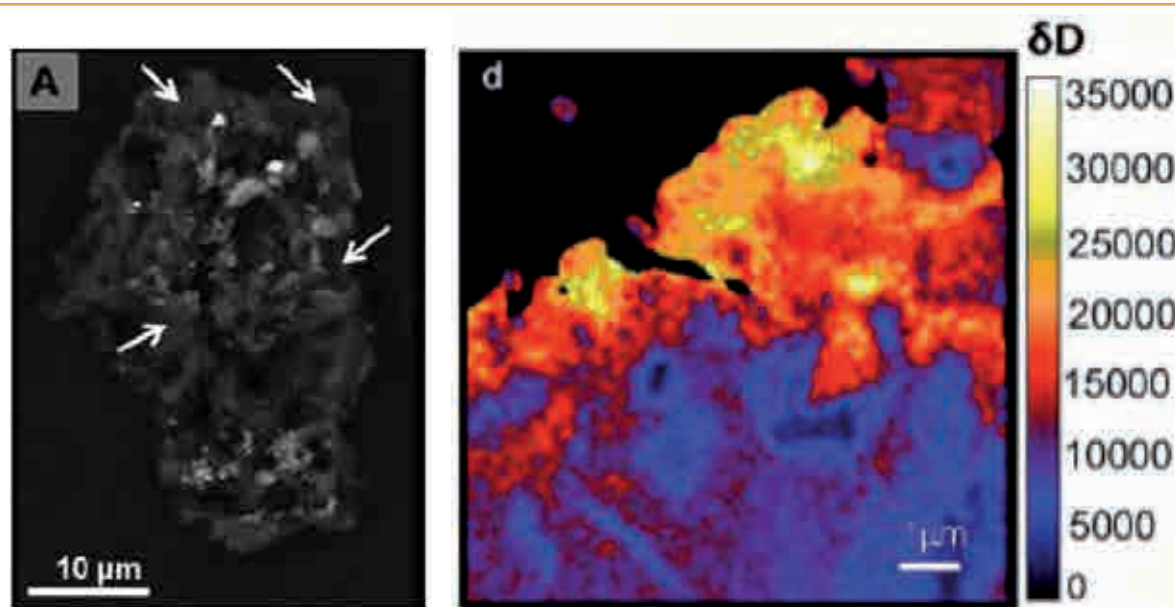


Fig. 3 : Image MEB et cartographie isotopique (D/H) par sonde ionique nanosims d'une micrométéorite ultra-carbonée (UCAMM) découverte dans les glaces antarctiques (Duprat *et al.*, 2010). Ces grains seraient d'origine cométaire.

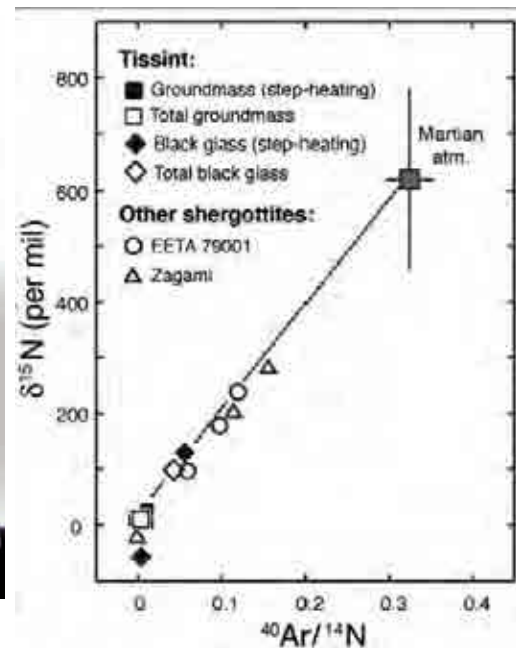


Fig. 4 : Ci-dessus, photo d'un des fragments de la météorite dont la chute a été observée en juin 2011 à Tissint (Maroc). Cette météorite est un fragment de la croûte de Mars comme le montrent les compositions des gaz qu'elle contient (Chennaoui Aoudjehane et al., 2012).
Ci-dessous, une équipe franco-chilienne collecte des météorites dans le désert de l'Atacama © CEREGE



■ Forces et faiblesses

La communauté française de cosmochimie s'est fortement développée au cours des dernières années avec l'affichage de la cosmochimie comme un thème important des laboratoires (Paris, Orsay, Lille, Lyon, Nancy, Grenoble, Aix, Brest, Toulouse pour l'essentiel) et le recrutement de jeunes chargés de recherches et maîtres de conférence. Le bilan des 4 dernières années du PNP ne donne pas une image complète de cette communauté car les porteurs de financements ERC et ANR se sont volontairement exclus de demandes aux PNP, étant donné la baisse continue de la dotation du programme.

La communauté française, renommée au niveau international, s'appuie sur : la collection nationale de météorites du MNHN ; les instruments nationaux d'analyse minéralogique et géochimique (MET à Lille, sonde ionique nanosims au MNHN, sondes ioniques ims1270 et 1280 à Nancy, spectromètres MC-ICPMS à Lyon...) et des instruments dédiés à la cosmochimie dans plusieurs laboratoires (Raman, magnétomètres à Aix...).

Le PNP assure l'animation nationale de la communauté par des réunions traditionnelles (eg «petite LPSC» au MNHN) et des écoles d'hiver jointes astrophysique-cosmochimie (la dernière en date étant la V^e «School on chronology of the formation of the Solar system» aux Houches en février 2013). Des liens traditionnels forts existent avec les communautés voisines en Allemagne et Suisse principalement.

Une faiblesse récurrente de la cosmochimie française est le faible niveau des financements obtenus au PNP (typiquement à l'heure actuelle de l'ordre de 5000 €/an). Les chercheurs français ont contourné ce problème en s'adressant avec succès à l'ERC et l'ANR et programmes d'excellence (Labex, Equipex), mais ces financements sont par essence «exceptionnels». Tous les directeurs de laboratoire et responsables d'instruments sont, ou vont être, confrontés au besoin de financement récurrent des instruments développés au cours

des dernières années, alors qu'il n'existe pas de financement institutionnel à la hauteur pour la cosmochimie.

Une autre grande faiblesse de la communauté de cosmochimie française est l'absence (même si le CNES a réellement soutenu dans le passé la participation de plusieurs laboratoires français à l'étude des échantillons ramenés par des missions NASA comme Stardust ou Genesis) de mission spatiale européenne de retour d'échantillons et des financements qui y sont associés. L'échec de la sélection récente de la mission Marco Polo (retour d'un échantillon d'astéroïde) en est un exemple. A l'inverse la cosmochimie outre Atlantique bénéficie d'un programme NASA (Cosmochemistry program) conçu au moment du retour des échantillons lunaires et dont l'évolution a continué depuis.

■ Éléments de prospective et recommandations

La cosmochimie est à l'interface de nombreuses questions astrophysiques, planétologiques et géologiques, avec la force d'avoir en main des échantillons d'un cas particulier, celui de la formation du système solaire. De grandes avancées ont eu lieu ces dernières années, soient provoqués par la cosmochimie, comme par exemple la mise en évidence d'échelles de temps très courtes de l'ordre du million d'années pour la formation des premières planètes, soit venant de l'astrophysique, comme par exemple la mise en évidence du rôle de la migration des planètes géantes dans la dynamique des petits corps du disque. Dans tous les cas l'évolution des thématiques de cosmochimie est très liée à celles concernant l'astrophysique et la formation planétaire.

Le PNP, de par sa constitution interdisciplinaire est essentiel au développement de la cosmochimie : il faut donc continuer à fonctionner de la sorte en continuant à permettre le développement de 5 à 10 petits projets par an. Ces projets ont au cours de la mandature été des précurseurs du financement de plusieurs gros projets ANR (y compris des projets JC).

Références citées

- **Aleon J.**, (2016) Oxygen isotopes in the early protoplanetary disk inferred from pyroxene in a classical type B CAI. *Earth and planetary science letters* 440, 62-70.
- **Yamaguchi A., Barrat J.-A., Shirai N., Ebihara M.**, (2015) Petrology and geochemistry of Northwest Africa 5480 diogenite and evidence for a basin-forming event on Vesta. *Meteor. Planet. Sci.* 50, 1260-1270.
- **Albarède F., Bouchet R.-A., Blichert-Toft J.**, (2013) Siderophile elements in IVA irons and the compaction of their parent asteroidal core. *Earth Planet. Sci. Lett.* 362, 122-129.
- **Brunetto R., Borg J., Dartois E., et al.** (2011) Mid-IR, Far-IR, Raman micro-spectroscopy, and FESEM-EDX study of IDP L2021C5: Clues to its origin. *Icarus* 212, 896-910.
- **Charnoz S., Fouchet L., Aleon J., et al.** (2011) Three-dimensional lagrangian turbulent diffusion of dust grains in a protoplanetary disk: method and first applications. *Astrophys. J.* 737, # 33.
- **Cordier C., Suavet C., Folco L., et al.** (2012) HED-like cosmic spherules from the Transantarctic Mountains, Antarctica: Major and trace element abundances and oxygen isotopic compositions. *Geochim. Cosmochim. Acta* 77, 515-529.
- **Dartois E., Engrand C., Brunetto R., et al.** (2013) UltraCarbonaceous Antarctic micrometeorites, probing the Solar System beyond the nitrogen snow-line. *Icarus* 224, 243-252.
- **Delbo M., Libourel G., Wilkerson J., et al.** (2014) Thermal fatigue as the origin of regolith on small asteroids. *Nature* 508, 233-235.
- **Djouadi Z., Robert F., d'Hendecourt L., Le Sergeant, et al.** (2011) Hydroxyl radical production and storage in analogues of amorphous interstellar silicates: a possible «wet» accretion phase for inner telluric planets. *Astron. Astrophys.* 531, #A96.
- **Dobrica E., Engrand C., Leroux H., et al.** (2012) Transmission Electron Microscopy of CONCORDIA UltraCarbonaceous Antarctic MicroMeteorites (UCAMMs): Mineralogical properties. *Geochim. Cosmochim. Acta* 76, 68-82.
- **Dobrica E., Engrand C., Quirico E., et al.** (2011) Raman characterization of carbonaceous matter in CONCORDIA Antarctic micrometeorites. *Meteoritics & Planetary Sciences* 46, 1363-1375. Duprat et al., 2010
- **Faure F., Tissandier L., Libourel G., et al.** (2012) Origin of glass inclusions hosted in magnesian porphyritic olivines chondrules: Deciphering planetesimal compositions. *Earth Planet. Sci. Lett.* 319, 1-8.
- **Gattacceca J., Valenzuela M., Uehara M., et al.** (2011) The densest meteorite collection area in hot deserts: The San Juan meteorite field (Atacama Desert, Chile). *Meteoritics & Planetary Sciences* 46, 1276-1287.
- **Gattacceca J., Suavet C., Rochette P., et al.** (2014) Metal phases in ordinary chondrites: Magnetic hysteresis properties and implications for thermal history. *Meteor. Planet. Sci.* 49, 652-676.
- **Godard M., Feraud G., Chabot M., et al.** (2011) Ion irradiation of carbonaceous interstellar analogues Effects of cosmic rays on the 3.4 μm interstellar absorption band. *Astron. Astrophys.* 529, #A146.
- **Gopel C., Birck J.-L., Galy A.**, (2015) Mn-Cr systematics in primitive meteorites: Insights from mineral separation and partial dissolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 156, 1-24.
- **Gounelle M., Meynet G.**, (2012) Solar system genealogy revealed by extinct short-lived radionuclides in meteorites. *Astron. Astrophys.* 545, #A4.
- **Gounelle M., Chaussidon M., Rollion-Bard C.**, (2013) Variable and extreme irradiation conditions in the early Solar System inferred from the initial abundance of Be-10 in Isheyevo CAIs. *Astrophys. J.* 763, #L33.
- **Le Guillou C., Remusat L., Bernard S., et al.** (2013) Amorphization and D/H fractionation of kerogens during experimental electron irradiation: Comparison with chondritic organic matter *Icarus* 226, 101-110.
- **Leroux H., Jacob D.**, (2013) Fine-grained material encased in microtracks of Stardust samples. *Meteor. Planet. Sci.*, 48, 1607-1617.
- **Marrocchi Y., Libourel G.**, (2013) Sulfur and sulfides in chondrules. *Geochim. Cosmochim. Acta* 119, 117-136.
- **Munayco P., Munayco J., de Avillez R.-R., et al.** (2013) Weathering of ordinary chondrites from the Atacama Desert, Chile, by Mossbauer spectroscopy and synchrotron radiation X-ray diffraction. *Meteor. Planet. Sci.* 48, 457-473.
- **Stodolna J., Gainsforth Z., Leroux H., et al.** (2013) Iron valence state of fine-grained material from the Jupiter family comet 81P/Wild 2-A coordinated TEM/STEM EDS/STXM study *Geochim. Cosmochim. Acta* 122, 1-16.
- **Stodolna J., Gainsforth Z., Leroux H., et al.** (2013) Iron valence state of fine-grained material from the Jupiter family comet 81P/Wild 2-A coordinated TEM/STEM EDS/STXM study *Geochim. Cosmochim. Acta* 122, 1-16.
- **Stodolna J., Jacob D., Leroux H.**, (2012) Mineralogy and petrology of Stardust particles encased in the bulb of track 80: TEM investigation of the Wild 2 fine-grained material. *Geochim. Cosmochim. Acta* 87, 35-50.
- **Suavet C., Cordier C., Rochette P., et al.** (2011) Ordinary chondrite-related giant (> 800 μm) cosmic spherules from the Transantarctic Mountains, Antarctica. *Geochim. Cosmochim. Acta* 75, 6200-6210.
- **Uehara M., Gattacceca J., Leroux H., et al.** (2011) Magnetic microstructures of metal grains in equilibrated ordinary chondrites and implications for paleomagnetism of meteorites. *Earth Planet. Sci. Lett.* 306, 241-252.
- **Van Ginneken M., Folco L., Cordier C., et al.** (2012) Chondritic micrometeorites from the Transantarctic Mountains. *Meteor. Planet. Sci.* 47, 228-247.

Comité Thématique 1

« Formation et fonctionnement des planètes »

Appel d'offre : Thème 3 du Programme national de planétologie (PNP)

Gauthier Hulot, Michael Le Bars

Comité thématique : Gauthier Hulot (IPGP), Michael Le Bars (IRPHE)

Nick Arndt (IsTerre), James Badro (IPGP), Sébastien Chevrot (GET), Bernard Marty (CRPG), Yannick Ricard (Laboratoire de Géologie de Lyon), François Robert (LMCM)

■ Grands enjeux scientifiques du domaine

Le comité thématique *Formation et fonctionnement des planètes* concerne tous les travaux sur la structure et la dynamique interne de la Terre et des planètes telluriques, de leur formation jusqu'à nos jours. Les enjeux sont multiples. Les temps primitifs de la Terre et des planètes telluriques restent toujours mal connus alors que c'est à ces époques qu'ont été établies les « conditions initiales » de chacune de ces planètes. La connaissance que l'on peut acquérir de ces temps est donc cruciale pour interpréter convenablement les nombreuses particularités actuelles de la Terre et des planètes. Un autre enjeu concerne la caractérisation des propriétés minéralogiques, pétrologiques, physiques et rhéologiques des matériaux constituant la Terre et les planètes telluriques, à très hautes pression et température. Les difficultés portent à la fois sur la façon d'atteindre les conditions souhaitées et sur la façon d'effectuer les mesures et les calculs. Des progrès importants ont été réalisés ces dernières années, notamment en ce qui concerne la Terre profonde. Cependant la base du manteau et le cœur du noyau, la graine, au sein desquels la sismologie détecte de mieux en mieux de nombreuses structures sont toujours des régions pour lesquelles il reste difficile d'avoir des informations sûres. Un autre enjeu majeur concerne la modélisation de la dynamique interne de la Terre et des planètes telluriques. Cette modélisation se doit de prendre en compte un nombre de plus en plus grand de phénomènes (transition de phases, fusion partielle, rhéologie variable...) sans pour autant perdre de vue la nécessité de bien identifier la cause dominante de ce que l'on veut expliquer, par exemple l'existence d'une tectonique des plaques sur Terre, ou les particularités révélées par des mesures isotopiques témoignant de « réservoirs » différents. Coupler la modélisation numérique avec des observables, via l'assimilation de données, est aussi une voie nouvelle activement explorée et développée, notamment dans le contexte de l'interprétation des données magnétiques terrestres, de plus en plus nombreuses et précises, mais désormais aussi dans le contexte de la reconstruction de la dynamique passée du manteau terrestre, combinant les observations sismologiques, gravimétriques et géodésiques. Il s'agit alors d'aller au-delà de

la seule reconstruction de la tectonique de surface. Comprendre la dynamique planétaire, et particulièrement celle des noyaux planétaires, passe également par le développement d'expériences de mécanique des fluides de plus en plus raffinées. Mais c'est certainement la nécessité d'avoir une vision de plus en plus intégrée et « couplée » de la dynamique interne de la Terre, et des planètes, qui constitue le plus grand des enjeux. Il y a fort à parier que cette approche, qui a déjà permis de comprendre que la graine était sans doute un objet dynamique, sera la clé de nombreux autres progrès dans notre compréhension de la Terre profonde et de ce qui distingue les planètes les unes des autres. Les grands enjeux qui se dégagent sont donc les suivants :

- Préciser la structure et la composition 3D de l'intérieur de la Terre et des planètes telluriques ;
- Préciser les propriétés physiques et de transport (rhéologie, élasticité, conductivité thermique et électrique...) ;
- Etudier la différenciation et la convection primitive, le déclenchement et le fonctionnement de la tectonique des plaques sur Terre, et déterminer la nature de la convection dans les autres planètes telluriques ;
- Mieux comprendre l'histoire thermique de la Terre et des planètes telluriques ;
- Préciser la structure, l'histoire, et la dynamique de la graine terrestre ;
- Progresser sur l'étude des dynamos pour comprendre l'origine, la nature et l'évolution des champs magnétiques planétaires ;
- Mieux comprendre la nature et le rôle des phénomènes dynamiques rapides affectant les noyaux planétaires liquides ;
- Mieux comprendre le rôle des interactions entre les différentes enveloppes des planètes.

■ Résultats saillants des cinq dernières années

La communauté financée par le CT1 au cours des cinq dernières années a été très active et il est toujours délicat, et forcément arbitraire, de ne faire ressortir qu'un petit nombre de résultats saillants. Les résultats sélectionnés l'ont donc été non seulement dans le but de donner un échantillon des progrès réalisés ces dernières années, mais aussi pour illustrer les problématiques abordées et les méthodes employées.

• La différenciation précoce de la Terre

Une thématique qui a été très porteuse, et qui a bénéficié d'un soutien efficace du *Programme National de Planétologie*, est celle de l'étude des réactions chimiques pertinentes pour comprendre la différenciation précoce de la Terre. À titre d'exemple, le partage du Vanadium et du Chrome suggère que l'accrétion terrestre et la formation du noyau se seraient faites dans des conditions plus oxydées que ce que l'on imaginait jusqu'alors (Siebert *et al.* Science, 2013). La Terre aurait ainsi pu se former à partir de matériau oxydé, comme les chondrites ordinaires ou carbonées (Fig. 1).

Par ailleurs, Kaminski et Javoy (EPSL, 2013), en évoquant un scénario en deux temps tenant compte de l'impact géant ayant donné naissance à la Lune, ont proposé la même année que la Terre aurait au contraire pu avoir une composition initiale

analogue à celle des chondrites à enstatite. Ceci illustre de manière typique les difficultés sur lesquelles buttent encore la communauté pour véritablement comprendre la différenciation précoce de la Terre et réconcilier les observations de plus en plus nombreuses. La difficulté n'est d'ailleurs pas moindre pour ce qui est de comprendre les tout premiers temps de la différenciation des planétésimaux et des embryons planétaires dans le système solaire, tant la coexistence de plusieurs phases (solide et liquide) rend la modélisation de l'évolution de tous ces objets délicate, comme l'illustrent, par exemple, les travaux de Sramek *et al.* (Icarus, 2012).

• Les diagrammes de phase de la Terre profonde

Des études sur les diagrammes de phases pertinents pour la Terre contemporaine ont également été menées. Parmi les résultats les plus significatifs figurent ceux de Andrault *et al.* (Science, 2014) qui ont montré que la lithosphère océanique avait toutes les chances de subir une fusion partielle en atteignant la frontière noyau-manteau (Fig. 2). On savait déjà que cette frontière était complexe, grâce, notamment, aux observations sismologiques. Ces travaux apportent un éclairage nouveau sur ce qui pourrait provoquer cette complexité. La frontière noyau-manteau jouant un rôle essentiel pour bien comprendre la dynamique actuelle et passée du manteau et de la Terre, disposer de bonnes contraintes sur la nature et l'état des matériaux qui s'y trouvent est particulièrement important.

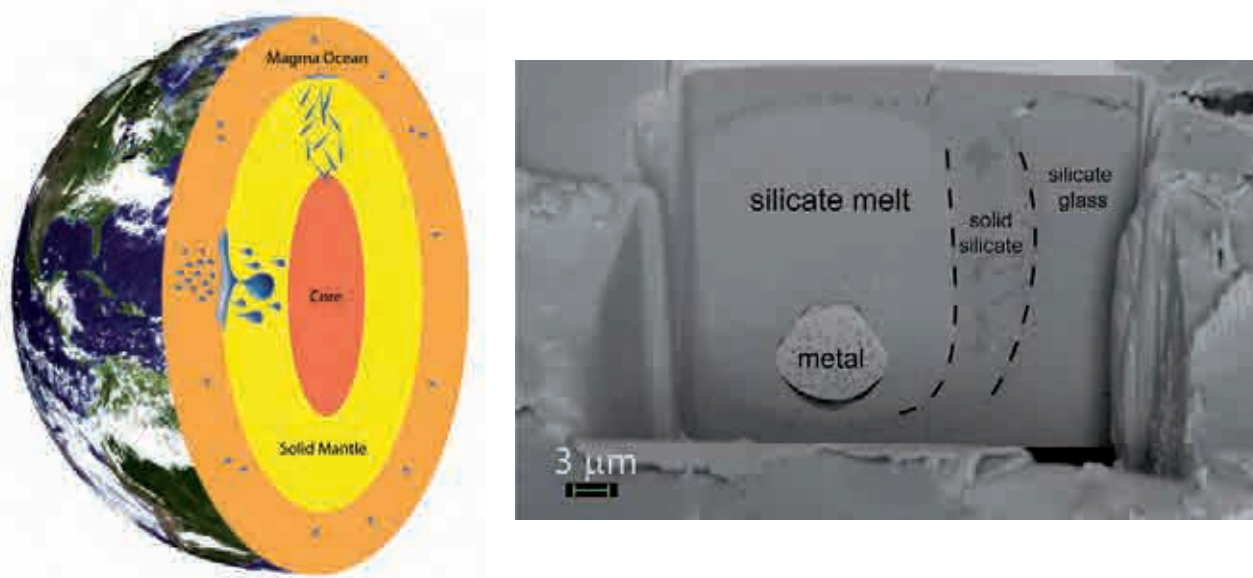


Fig. 1: Image en microscopie électronique d'un échantillon produit à haute pression (50 GPa) et haute température (3500 °C). Son analyse chimique permet de mieux connaître la répartition du chrome et du vanadium entre les liquides métalliques silicatés et au cours de la formation du noyau. La présence d'oxygène en quantité dans le métal permet d'expliquer les abondances de ces éléments dans le manteau terrestre et montre qu'on peut former un noyau riche en oxygène. (Siebert *et al.*, Science, 2013).

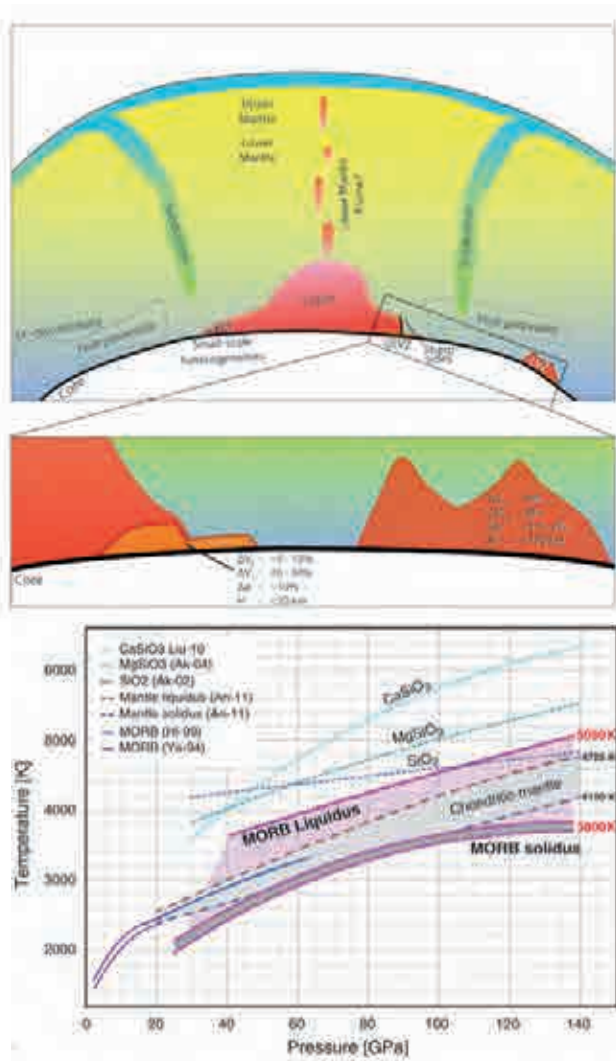


Fig. 2 : Le manteau est un objet dynamique complexe avec une frontière noyau-manteau hétérogène (figure du haut). Après que Fiquet et al. (Science, 2010) aient montré que le matériau principal du manteau pouvait être partiellement fondu, les solidus et liquidus de silicates et de basalte de subduction déterminés par Andraut et al. (Science, 2014, figure du bas) indiquent que le basalte de la lithosphère océanique peut fondre bien plus facilement que les péridotites en atteignant la frontière noyau-manteau.

• La rhéologie du manteau

De nombreuses études ont également porté sur la rhéologie du manteau. Ainsi, les calculs *ab initio* de Cordier et al. (Nature, 2012; Fig. 3) sur la dynamique microscopique et mésoscopique des réseaux cristallographiques ont permis de montrer que la rhéologie de MgO variait entre deux régimes très différents (thermiquement activé ou athermique) et que la transition se produisait dans les conditions du manteau inférieur. Ces calculs suggèrent que de fortes hétérogénéités radiales et latérales de rhéologie pourraient exister dans le manteau inférieur, sans que soient nécessairement présentes des hétérogénéités chimiques.

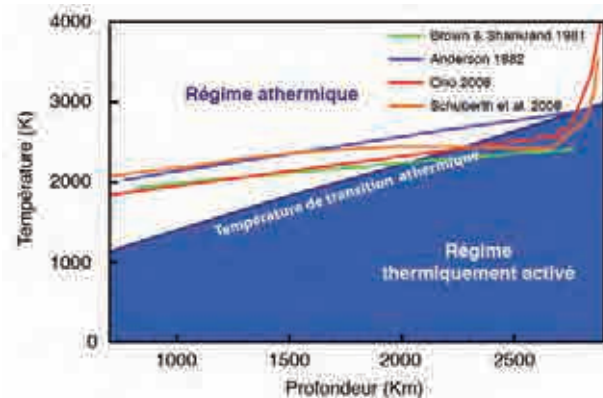


Fig. 3 : Evolution des paramètres rhéologiques de MgO en fonction de la température et des contraintes dans les conditions du manteau. (Cordier et al., Nature, 2012).

D'autres études ont porté sur la dynamique du manteau. Parmi elles, il est intéressant de mentionner celle de Asaadi et al. (Nature, 2011, voir Fig. 4) qui illustre de nouveau la nécessité de bien comprendre les propriétés rhéologiques du manteau, cette fois-ci pour ce qui concerne le manteau supérieur. Cette étude montre comment la forme du bombement topographique sous Hawaii peut être exploitée de manière originale pour préciser cette rhéologie.

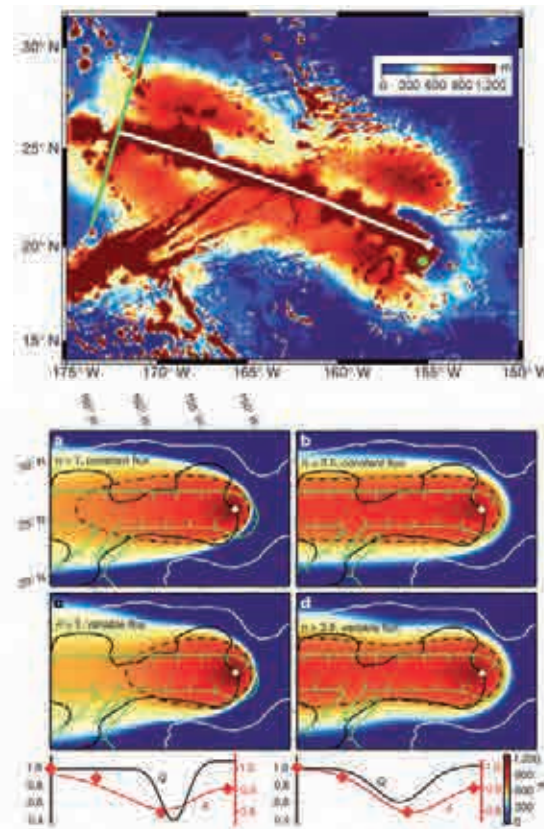
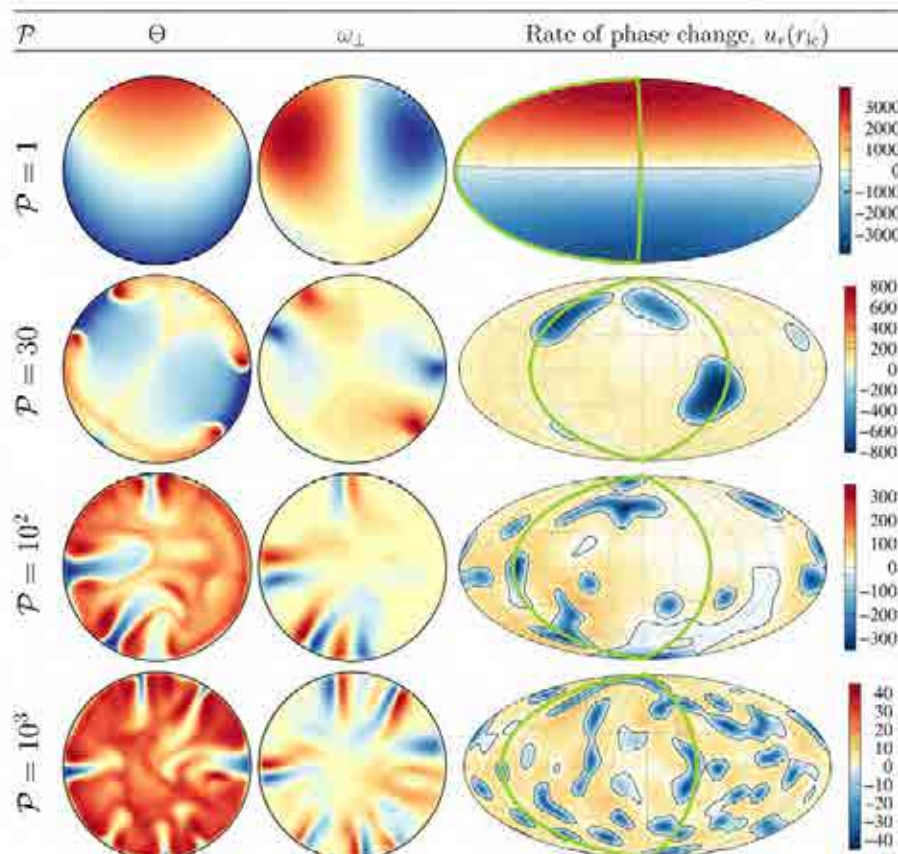
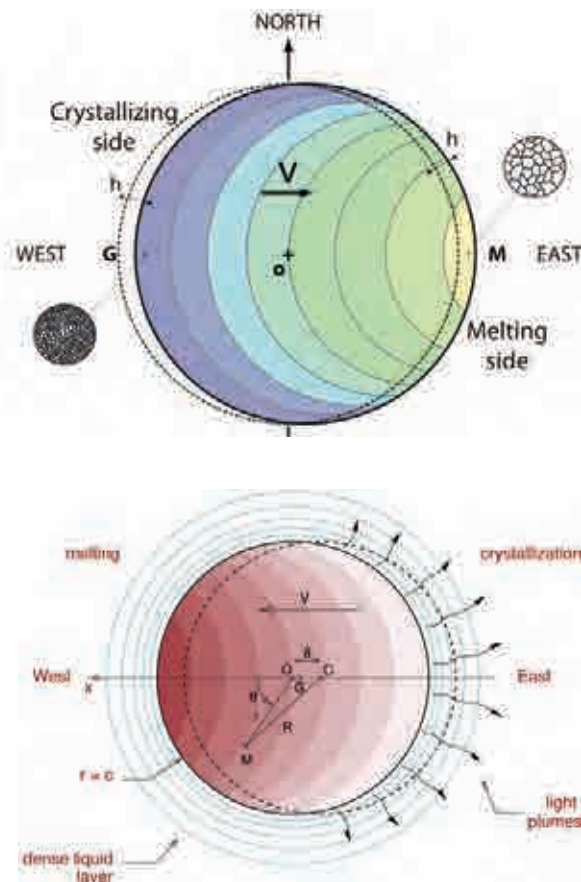


Fig. 4 : En haut, topographie résiduelle du bombement hawaïen; en bas, comparaison avec les résultats de différents modèles obtenus en changeant les caractéristiques non-linéaires de la rhéologie du manteau (Asaadi et al., Nature, 2011).

• La dynamique du noyau et de la graine

C'est peut-être dans le domaine de l'étude du noyau liquide et de la graine terrestre que les évolutions conceptuelles ont été les plus importantes ces dernières années. Le noyau, dont on ne connaissait jusqu'alors pratiquement que la dynamique de surface (à la frontière noyau-manteau, grâce aux observations magnétiques), et la graine, dont on commençait tout juste à mettre en évidence la structure anisotrope il y a une dizaine d'années grâce à la sismologie, sont désormais vus comme des objets dynamiques tridimensionnels en interaction. La figure 5 illustre cette évolution spectaculaire pour ce qui concerne la graine, autrefois considérée comme un objet cristallisant de manière passive du fait du refroidissement séculaire de la Terre, et désormais considéré comme un objet dynamique ouvert sur le noyau liquide.

Fig. 5 : Il est désormais admis que la graine de la Terre est en convection, échangeant de la matière avec le noyau liquide. C'est vraisemblablement dans ce phénomène que se trouve l'explication de la structure interne complexe de la graine, détectée par la sismologie. Si les premières études ont suggéré une convection de type translation (à droite en haut, Monnereau et al., Science 2010, à droite en bas, Alboussière et al., Nature 2010), il apparaît maintenant que cette convection pourrait avoir été plus ou moins complexe selon la valeur des paramètres qui la gouvernent (ci-dessous, Deguen et al., GJI, 2013).



La prise en compte des interactions noyau-graine est désormais aussi centrale dans l'étude de la dynamique du noyau liquide de la Terre (Aubert *et al.*, *Nature*, 2013). Cette dynamique est étudiée de manière de plus en plus fine grâce, notamment, à l'introduction des méthodes d'assimilation de données (Fournier *et al.*, *Space Science Reviews*, 2010), à l'exploitation des données satellitaires appelées à fournir des contraintes de plus en plus précises (Hulot *et al.*, *GRL*, 2015) et aux progrès importants en matière de simulation numérique. Ceci a permis de commencer l'étude de la dynamique 3D du noyau, comme l'ont initié Gillet *et al.* (*Nature*, 2010) et comme l'illustre la figure 6.

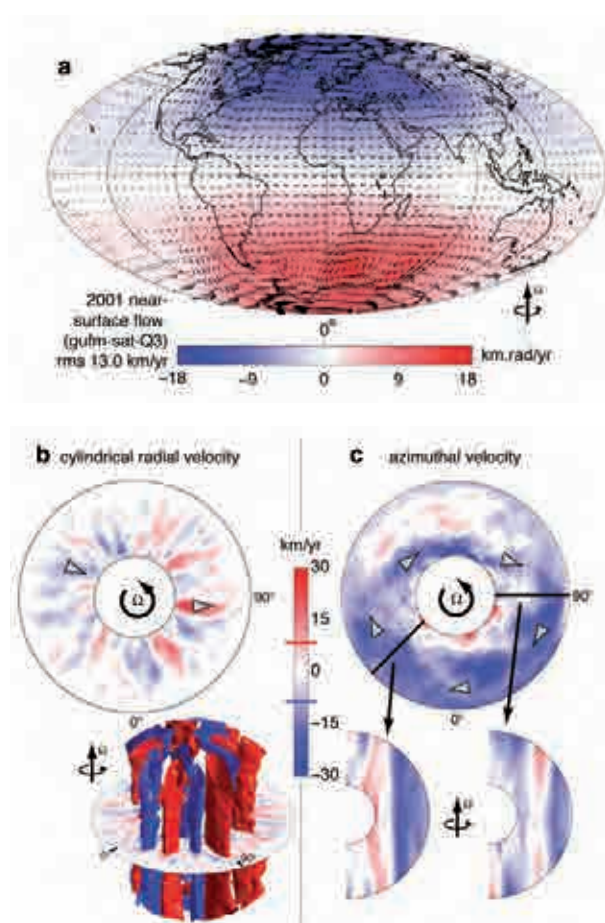


Fig. 6 : Un état possible de la dynamo terrestre pour l'époque 2001, rendant compte des observations magnétiques contemporaines (Aubert, G.Jl, 2013).

L'étude plus générale de la dynamique des fluides en rotation rapide fournit d'excellents exemples de travaux ayant permis des avancées non seulement dans l'étude de la dynamique du noyau de la Terre, mais aussi dans celle de la dynamique des noyaux planétaires. Grâce à des travaux couplant expériences de laboratoire et simulations numériques sur les écoulements induits par la libration (lente oscillation) dans les noyaux planétaires, Le Bars *et al.* (*Nature*, 2011) ont par exemple montré que la dynamo éphémère de la Lune aurait pu être déclenchée par des impacts.

Ces impacts auraient modifié la rotation de la Lune, amplifié la libration et induit des mouvements suffisamment énergétiques au sein du noyau pour alimenter temporairement cette dynamo, responsable de l'aimantation d'une partie de la croûte lunaire. C'est, enfin, aussi en employant les mêmes types de codes numériques que ceux employés pour comprendre l'évolution à très long terme de la dynamo terrestre, que l'on peut tenter de comprendre l'évolution de la dynamo martienne (voir, par exemple, Monteux *et al.*, 2015).

Il importe pour finir de rappeler le rôle fondamental joué par l'acquisition des données dans les observatoires ou lors de campagnes et missions de terrain pour l'étude de la Terre Profonde. S'il est difficile d'associer un résultat plus marquant qu'un autre dans ce domaine, ce travail de fond, que le CT1 a su soutenir, a également permis des avancées notables dans l'enrichissement des bases de données sur lesquelles la plupart des travaux cités ci-dessus se sont appuyés.

■ Forces et faiblesses

La principale force de la communauté scientifique française dans les domaines couverts par le CT1 est d'être présente sur l'ensemble des sujets couverts par ce thème, du moins pour ce qui concerne la Terre profonde. Les scientifiques français ont été présents sur ces thèmes depuis fort longtemps et ont même fait partie des fondateurs de cette thématique transdisciplinaire au niveau international, lors de la fondation de la commission SEDI (Study of the Earth's Deep Interior) de l'IUGG en 1987. Saluons à ce propos les rôles de premier plan joués à l'époque par Jean-Louis Le Mouél et Jean-Paul Poirier. Le SEDI a même été présidé à deux reprises par la France (Jean-Louis Le Mouél de 1993 à 1995, Gauthier Hulot, de 2007 à 2011). La France a également organisé l'un de ses workshops les plus salués en 1998. Enfin, la France ne compte pas moins de huit lauréats (sur un total de 31) du prix Doornbos depuis sa fondation en 1994, dont deux encore dernièrement (M. Le Bars, 2010 et R. Deguen, 2012). Le rôle et l'activisme de la communauté française ne se dément d'ailleurs pas, comme en témoigne le fait que le prochain workshop du SEDI (en 2016) sera de nouveau organisé en France (à Nantes). Cette présence française doit beaucoup au soutien sans faille du CNRS-INSU tout au long de ces années, via ses différents programmes, dont le thème 3 du PNP (auquel est rattaché le CT1) se trouve donc être l'héritier. Ce soutien à la communauté, complément indispensable aux financements de plus grande envergure que sont les ANR et les financements européens, est sans nul doute l'une des clés de la force de cette communauté, car c'est par le biais des financements modestes de ce programme (entre 5 et 15 k€ par projet) que peuvent être initiés la plupart des projets à caractère hautement transdisciplinaire qui ont permis à la France de rester à la pointe de l'initiative scientifique dans les domaines

de la Terre profonde. C'est aussi grâce à ces financements que désormais, la communauté a élargi ses intérêts à l'étude de l'intérieur profond des autres planètes telluriques, avec déjà quelques succès, comme soulignés plus haut.

C'est probablement dans l'élargissement du CT1 aux thématiques planétaires que l'on pourra peut-être trouver quelques faiblesses dans la communauté. Après 4 ans de programme intégré au sein du PNP, la communauté n'a encore que peu sollicité le thème 3 du PNP pour des projets planétaires. Cela tient probablement au découpage des thématiques au sein du PNP, qui parfois se recouvrent, les sujets les plus planétaires étant souvent tirés vers ces autres thématiques, comme cela était le cas lorsque le programme SEDIT (Structure, Evolution et Dynamique de l'Intérieur de la Terre) était un programme purement INSU-ST. Cela n'est pas une faiblesse fondamentale, dans la mesure où, semble-t-il, chaque projet a pu raisonnablement bien trouver le thème qui lui convenait le mieux au sein du PNP. Cela témoigne cependant sans contester le fait que la communauté qui se reconnaît dans le thème 3 du PNP est avant tout celle qui travaille sur la Terre Profonde. Il est donc impératif que le CNRS-INSU et le PNP reconnaissent les besoins spécifiques de cette communauté dont le travail est internationalement reconnu.

■ Éléments de prospective et recommandations

Le soutien du CNRS-INSU aux scientifiques travaillant sur la Terre profonde et les planètes telluriques a toujours été d'une très grande efficacité et a permis à cette communauté de s'établir comme l'une des plus reconnues au monde. On ne peut donc que recommander de poursuivre ce soutien et d'encourager cette excellence, notamment par un abondement au moins constant aux programmes nationaux relevant de cette thématique, qui souvent apportent la première pierre à des recherches innovantes et de grande envergure. Cet effort doit se poursuivre dans le cadre d'un équilibre indispensable entre le soutien aux besoins expérimentaux, aux moyens de calcul, à l'acquisition et l'assimilation de données, tous ces aspects étant indispensables à une recherche de qualité.

La seule critique majeure que l'on peut formuler aujourd'hui réside dans la persistance d'une relative séparation relative entre les chercheurs travaillant sur la Terre profonde et les chercheurs travaillant sur les autres planètes telluriques, voire sur les Super-Terres. Ainsi, l'élargissement de la problématique SEDI aux autres planètes telluriques dans le cadre du PNP, avec le soutien de l'INSU-AA (Astronomie, Astrophysique), n'a pour l'instant abouti au dépôt, et donc au financement, que de peu de projets, même si ceux-ci ont donné d'excellents résultats. L'encouragement de projets transdisciplinaires, au sein mais aussi hors du CNRS-INSU, pourrait constituer un objectif à court terme dans le cadre d'un appel d'offre élargi, mais en aucun cas au détriment de la Terre profonde dont le champ d'étude est lui-même de plus en plus vaste.

Références citées

- **Alboussière T., et al.**, Melting-induced stratification above the Earth's inner core due to convective translation, *Nature*, 466, 744-747, doi:10.1038/nature09257, 2010.
- **Andraut D., et al.**, Melting of subducted basalt at the core-mantle boundary, *Science*, 344, 892, doi: 10.1126/science.1250466, 2014.
- **Asaadi N., et al.**, Inferring nonlinear mantle rheology from the shape of the Hawaiian swell, *Nature*, 473, 501-504, doi:10.1038/nature09993, 2011.
- **Aubert J.**, Flow throughout the Earth's core inverted from geomagnetic observations and numerical dynamo models, *Geophys. J. Int.*, 192, 537-556, doi: 10.1093/gji/ggs051, 2013.
- **Aubert J., et al.**, Bottom-up control of geomagnetic secular variation by the Earth's inner core, *Nature*, 502, 219-223, doi:10.1038/nature12574, 2013.
- **Cordier P., et al.**, Modelling the rheology of MgO under Earth's mantle pressure, temperature and strain rates, *Nature*, 481, 177-180, doi:10.1038/nature10687, 2012.
- **Deguen R., et al.**, Thermal convection in Earth's inner core with phase change at its boundary, *Geophys. J. Int.*, 194, 1310-1334, doi: 10.1093/gji/ggt202, 2013.
- **Fiquet G., et al.** Melting of Peridotite to 140 Gigapascals, *Science*, 329, 1516, doi:
- **Fournier A., et al.**, An introduction to data assimilation and predictability in geomagnetism, *Space Sci. Rev.*, 155, 247-291, doi:10.1007/s11214-010-9669-4, 2010.
- **Gillet N., et al.**, Fast torsional waves and strong magnetic field within the Earth's core, *Nature*, 465, 74-77, doi:10.1038/nature09010, 2010.
- **Hulot G., et al.**, Swarm's absolute magnetometer experimental vector mode, an innovative capability for space magnetometry, *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi: 10.1002/2014GL062700, 2015.
- **Kaminski E., Javoy M.**, A two-stage scenario for the formation of the Earth's mantle and core, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 365, 97-107, doi: 10.1016/j.epsl.2013.01.025, 2013.
- **Le Bars M., et al.**, An impact-driven dynamo for the early Moon, *Nature*, 479, 215-218, doi:10.1038/nature10565, 2011.
- **Monnereau M., et al.**, Lopsided Growth of Earth's Inner Core, *Science*, 328, 1014, doi:10.1126/science.1186212, 2010.
- **Monteux J., et al.**, Giant impacts, heterogeneous mantle heating and a past hemispheric dynamo on Mars, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 240, 114-124, doi: 10.1016/j.pepi.2014.12.005, 2015.
- **Siebert J., et al.**, Terrestrial Accretion Under Oxidizing Conditions, *Science*, 339, 1194, doi: 10.1126/science.1227923, 2013.
- **Sramek O., et al.**, Thermal evolution and differentiation of planetesimals and planetary embryos, *Icarus*, 217, 339-354, doi:10.1016/j.icarus.2011.11.021, 2012.

Comité Thématique 1

« Terre primitive »

Appel d'offre : Thème 5 du Programme National de Planétologie

Janne Blichert-Toft (LGL-TPE)

■ Grands enjeux scientifiques du domaine

Le thème 5 (comme le thème 2a) du Programme National de Planétologie (PNP) est rattaché au CT1. Il concerne tous les travaux touchant à la Terre et la vie primitives. Tous les travaux concernant la Terre primitive impliquent aussi bien des planétologues et des dynamiciens (e.g. étude comparée des planètes telluriques et de leurs évolutions, apports à la proto-Terre des éléments volatils ayant formé l'atmosphère et les océans), des géophysiciens (style de convection et initiation de la tectonique des plaques, tectonique Archéenne, évolution thermique de la Terre interne), que des géochimistes (composition et température de l'eau de mer, oxygénation de l'atmosphère, origine de la vie et les premières traces de vie). Ces travaux sont très souvent à la limite entre géochimie et cosmochimie (e.g. composition initiale de l'atmosphère terrestre).

- Comment s'est déroulée l'accrétion de la Terre (chronologie, processus, nature des matériaux constitutifs) ?
- Comment s'est formé le noyau de la Terre ?
- Y a-t-il eu un océan magmatique sur Terre et quelles en sont les traces éventuelles aujourd'hui ?
- Quand et comment l'oxygénation du manteau s'est-elle produite ?
- Comment et quand sont arrivés les éléments volatils sur Terre ?
- Comment et quand s'est constituée l'atmosphère de la Terre et comment sa composition a-t-elle évolué au cours du temps ?
- Comment et quand a eu lieu l'oxygénation de l'atmosphère et des océans terrestres ?
- Quelle est la nature et le mode de formation de la première croûte continentale, quand la tectonique des plaques a-t-elle commencé ?
- Comment et quand la vie s'est-elle développée ? Comment a-t-elle influencé la formation de grandes concentrations de certaines ressources minérales

■ Résultats saillants des cinq dernières années

Nous présentons ci-dessous quelques exemples de résultats originaux obtenus durant le dernier quadriennal par des chercheurs/thésards français appartenant au thème 5.

L'étude du processus de serpentinisation de la croûte océanique, réaction produisant à la fois des nutriments pour la vie et des minéraux catalyseurs de la formation abiotique d'acides aminés et de bases azotées, molécules du vivant, est essentielle pour mieux comprendre l'émergence de la vie primitive. L'affleurement d'Isua comporte une unité ophiolitique présentant les serpentinites les plus anciennes (3,81-3,70 Ga) : leur analyse permet d'appréhender la réaction de serpentinisation à l'Archéen. Les résultats obtenus pour la composition isotopique du zinc dans ces roches et dans des serpentinites modernes ont permis d'établir une correspondance entre le processus de serpentinisation à Isua et la mise en place de volcans de boues de serpentinites à l'aplomb de la fosse des Mariannes. Il a ainsi été possible d'identifier Isua comme une zone d'arrière-arc de subduction océanique, lieu d'une serpentinisation produisant des fluides de température variable (100-300°C) et de pH alcalin (9-12). Il a ainsi été montré que cette configuration atypique réunissant serpentinisation, fluides alcalins et édifices volcaniques constituait un environnement favorable à l'émergence du vivant (Pons *et al.*, 2011).

Par ailleurs, l'analyse d'un large panel d'échantillons de formations de fer rubané (BIFs), d'âges archéens à protérozoïques, a permis de mettre en relation l'évolution de la composition isotopique du zinc de ces échantillons au cours du temps avec le caractère immergé/émergé des continents et leur colonisation par des films bactériens. Ces résultats sont en faveur d'une émergence débutant il y a 2,9 Ga, suivie d'un développement des communautés microbiennes continentales entraînant la pédogenèse de sols archéens comportant un horizon organique autour de 2,6 Ga (Pons *et al.*, 2013).

L'analyse isotopique Lu-Hf par MC-ICP-MS combinée de zircons ignés et de roches totales d'une importante collection de granitoïdes

archéens appartenant à la suite des Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite (TTG) a été conduite pour apporter des informations originales sur l'origine de la croûte archéenne. La comparaison de ces résultats à une base de données de zircons détritiques (principalement), montre que le rapport Lu/Hf intégré dans le temps de la source mantellique des TTG, et des continents en général, est très proche du réservoir chondritique (CHUR) et n'a pas significativement changé au cours des quatre derniers milliards d'années. Par conséquent, ces données suggèrent que les continents se soient formés en deux temps à partir d'un matériel primitif non fractionné, d'abord extrait du manteau profond par l'intermédiaire de panaches qui après fusion partielle, pour générer des plateaux océaniques, auraient laissé un résidu appauvri dans le manteau supérieur. Par la suite, ces plateaux océaniques auraient été recyclés dans des environnements semblables aux zones de subduction actuelles pour former les continents (Guitreau *et al.*, 2012).

La composition de l'atmosphère archéenne a été approchée grâce à l'analyse de fluides piégés dans des inclusions de quartz bien étudiées et datées. Pujol *et al.* (2011) ont mis en évidence que le xénon atmosphérique de cette époque avait une composition isotopique intermédiaire entre celle des chondrites et celle de l'atmosphère actuelle, permettant de résoudre l'ancien problème du paradoxe du xénon. En effet, le X_e atmosphérique moderne est fractionné isotopiquement de 3‰ par rapport à tous les antécédents primitifs possibles (chondritique ou solaire), et appauvri d'un facteur 20 par rapport aux autres gaz rares. La découverte d'un xénon isotopiquement intermédiaire entre chondritique et atmosphérique moderne dans l'atmosphère archéenne montre que ce paradoxe résulte d'un fractionnement isotopique et d'une perte préférentielle de X_e de l'atmosphère au cours du temps. Ce fractionnement du X_e atmosphérique peut être attribué à l'interaction de ce gaz rare avec le rayonnement UV du Soleil jeune, comme modélisé par Hébrard et Marty (2013).

D'autres résultats importants sur l'atmosphère archéenne sont ceux de Pujol *et al.* (2013) qui ont déterminé la composition isotopique de l'argon ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$, où ^{40}Ar est produit par la décroissance de ^{40}K dans la croûte continentale et dans le manteau) de l'atmosphère archéenne, ce qui a permis de démontrer que la croissance de la croûte continentale a surtout eu lieu entre 3,5 Ga et 2,5 Ga, période pendant laquelle 50-85 % de cette dernière a été formée. Marty *et al.* (2013) ont eux montré que la pression partielle de l'azote dans l'atmosphère et sa composition isotopique avaient peu varié depuis 3,5 Ga, ce qui implique l'établissement d'un champ magnétique significatif dès cette époque protégeant le haut de l'atmosphère d'interactions avec le vent solaire. Ces résultats ont des implications pour le paradoxe du Soleil jeune. Ils vont à l'encontre de modèles paléo-climatiques proposant une P_{N_2} plus élevée à l'Archéen, et permettent de fixer une P_{CO_2} maximum à 0.7 bar il y a 3,5 Ga.

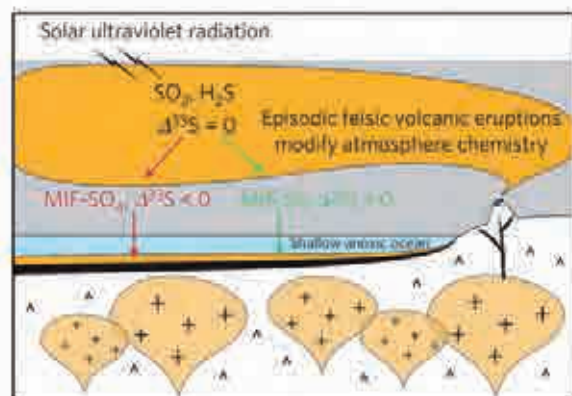
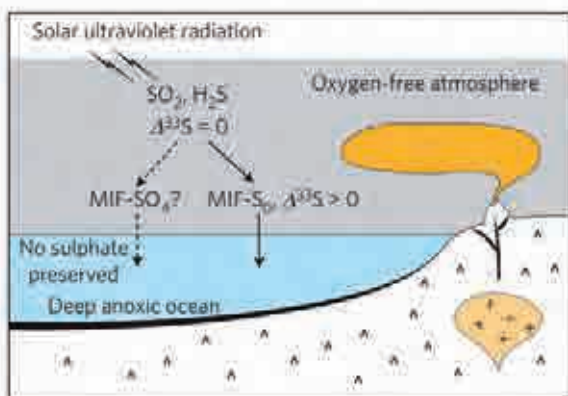
Philippot *et al.* (2012) (Fig. 1) ont montré que les sulfures associés à des dépôts de sulfates et de cendres volcaniques d'Afrique du Sud, d'Australie et d'Inde datés entre 3,5 et 3,2 Ga montraient des anomalies isotopiques du soufre différentes des anomalies observées dans les autres sédiments marins archéens. Cette nouvelle tendance isotopique a été interprétée comme le reflet de la photodissociation UV de SO_2 volcanique présent dans de gigantesques panaches volcaniques formés lors d'épisodes d'activité volcanique subaérienne de courte durée, mais très intenses. Cette activité volcanique entre 3,2 et 3,5 Ga corrèle dans le temps avec la première phase importante de croissance crustale connue sur Terre.

Une méthode d'imagerie hyperspectrale par spectrométrie Raman capable d'identifier les différents types de matière organique piégés dans un échantillon de roche ayant subi une histoire géologique complexe a été mise au point par Sforza *et al.* (2014). Appliquée aux échantillons de la Formation de l'Apex qui a fait l'objet d'une controverse majeure quant à l'origine biologique/abiologique de la matière organique dans des roches plus vieilles que 3,4 Ga (Schopf *et al.*, 2002; Brasier *et al.*, 2002), cette approche a permis de distinguer trois types de matière organique présentant des degrés de rééquilibration différents. En particulier, il a pu être montré que la matière organique présente dans le niveau de référence qui a fait l'objet de la controverse a été largement remaniée par des processus hydrothermaux et météoriques secondaires, et que seuls quelques niveaux sédimentaires relativement éloignés du site de référence contiennent une matière organique bien préservée, possiblement d'origine biologique.

Enfin il faut noter que le projet de forage soutenu par la International Continental Drilling Program (ICDP) dans la ceinture de roches vertes archéennes de Barberton en Afrique du Sud a pris fin en Août 2011. Les carottes ont été transférées à l'Université du Witwatersrand à Johannesburg, où elles ont été étudiées en détail et échantillonnées. Quinze groupes de 11 pays étudient actuellement les carottes en utilisant une diversité de méthodes pétrographiques et géochimiques. Les objectifs de ce projet sont de comprendre les conditions du manteau archéen, la circulation de fluides hydrothermaux à travers la croûte océanique, l'origine des roches sédimentaires archéennes et les caractéristiques physiques et la composition chimique de l'eau de mer de cette époque. Une étude de komatiites par Robin-Popieul *et al.* (2011) a déjà conduit à un nouveau modèle de fusion profonde dans le manteau archéen. L'analyse des isotopes de Nd et de l'Hf sur les mêmes roches par Blichert-Toft *et al.* (2014) renseigne sur la composition et l'évolution à long terme de leur source mantellique. L'étude des sédiments chimiques a précisé l'origine des silices et des études multi-isotopiques ont défini les conditions sur le plancher océanique. L'identification de nouveaux biomarqueurs fournit des informations sur les premières traces de vie.



Fig. 1: (Photos) Vue générale du terrain et site où ont été réalisés les forages BBDP (Afrique du Sud). (Schémas) Cycle du soufre à l'Archéen. À gauche, période de 4.1 à 2.45 Ga excluant la fenêtre 3.5/3.2 Ga ago: la photolyse du SO_2 produit les aérosols MIF- SO_2 , l'absence de MIF sulphate dans les sédiments indique leur complète réduction dans l'océan profond anoxique. À droite, l'abondance des éruptions volcaniques sub-aériennes modifie la composition de l'atmosphère entre 3.5, 3.4 et 3.2 Ga. (Philippot et al. Nature Géoscience 2012).



■ Forces et faiblesses

La communauté Terre primitive est très diversifiée et dispose d'un parc analytique excellent (MC-ICP-MS, ICP-MS, TIMS, sonde ionique etc.) qui a permis de grandes avancées récentes. Un nombre significatif de ces grandes avancées des dix dernières années est lié à des études effectuées sur des carottes de forages. La communauté française a été pionnière en la matière car sur les dix campagnes de forages réalisées pour l'essentiel en Afrique du Sud et Australie, quatre l'ont été par des équipes françaises.

Tous ces travaux font que la visibilité internationale de la communauté scientifique dans le domaine de la Terre et de la vie primitive est très forte. Le pendant à ces atouts est que la communauté étant relativement petite, les travaux reposent sur peu de chercheurs et sont donc nécessairement un peu dispersés pour pouvoir couvrir tous les domaines décrits. Cela comporte le risque d'un affaiblissement à l'international.

■ Éléments de prospective et recommandations

Les sujets abordés dans la thématique Terre primitive nécessitent de conforter les liens avec les autres disciplines que sont la dynamique du disque planétaire, la planétologie comparée, la modélisation pétrologique, géochimique et numérique de la Terre interne et la microbiologie.

Un autre aspect important pour la communauté du thème 5 est le maintien du soutien financier pour des analyses géochimiques et isotopiques qui sont coûteuses à cause des frais associés à la maintenance et au fonctionnement des instruments des parcs analytiques.

Références citées

- Guitreau, M., Blichert-Toft, J., Martin, H., Mojzsis, S.J., and Albarède, F., 2012. Hafnium isotope evidence from Archean granitic rocks for deep-mantle origin of continental crust. *Earth Planet. Sci. Lett.* 337-338, 211-223.
- Hébrard, E., B. Marty (2013) Coupled noble gas-hydrocarbon evolution of the early Earth atmosphere upon solar UV irradiation. *Earth Planet. Sci. Lett.* 385, 40-48
- Marty, B., L. Zimmermann, M. Pujol, R. Burgess, P. Philippot (2013) Nitrogen isotopic composition and density of the Archean atmosphere. *Science* 342, 101-104.
- Philippot, P., Van Zuilen, M. & Rollion-bard, C. Variations in atmospheric sulphur chemistry on early Earth linked to volcanic activity. *Nature Geoscience* 5, 668-674 (2012).
- Pons, M.-L., Quitté, G., Fujii, T., Rosing, M.T., Reynard, B., Moynier, F., Douchet, C., and Albarède, F. (2011) Early Archean serpentine mud volcanoes at Isua, Greenland, as a niche for early life. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 108, 17639-17643
- Pons, M.-L., Fujii, T., Rosing, M., Quitté, G., Télouk, P., and Albarède, F. (2013) A Zn isotope perspective on the rise of continents. *Geobiology* 11, 201-214.
- Pujol, M., B. Marty, and R. Burgess (2011). Chondritic-like xenon trapped in Archean rocks: A possible signature of the ancient atmosphere. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 308, 298-306.
- Pujol, M, Marty B., Burgess R., Grenville Turner G. & Philippot P. (2013) Argon isotopic composition of Archean atmosphere probes early Earth geodynamics. *Nature* 498, 87-90.
- Robin-Popieul, C., Arndt, N.T., Chauvel, C., Byerly, G., Sobolev, A.V. and Wilson, A. (2012) A new model for Barberton komatiites: deep critical melting with high melt retention. *J Petrol.* 53: 2191-2229.
- Sforza, M.C., van Zuilen, M.A. & Philippot, P. Structural characterization by Raman hyperpectral mapping of organic carbon in the 3.46 billion-year-old Apex chert, Western Australia. *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 124, 18-33 (2014).

Comité Thématique 2

« Terre interne et Terre externe, processus et couplages »

Appel d'offres SYSTER : Système TERre, processus et couplage

Jean Besse (IPGP), Catherine Chauvel (ISTERRE), Yannick Donnadiou (IPSL), Stéphanie Duchene (GET), Yves Godderis (GET), Laurent Jolivet (ISTO)

Comité scientifique : Jean Besse (IPGP), Yves Godderis (GET), Laurent Jolivet (ISTO), Olivier Vidal (ISTERRE)

Guilhem Barruol (Géosciences Montpellier), Laurent Bopp (CEA), Anne-Marie Boullier (ISTERRE), Jean Braun (Géosciences Rennes), Jacques Déverchère (Domaines Océaniques), Stéphanie Duchène (GET), Rémi Eschard (IFP), Frédéric Fluteau (IPGP), Christian France-Lanord (CRPG), Thierry Garlan (SHOM), Didier Laporte (LMV), Hervé Leloup, (laboratoire de Géologie Lyon), Bertrand Meyer (ISTEP), Pierre Pellenard (Biogéosciences Dijon), Emmanuelle Pucéat (Biogéosciences Dijon), Cécile Robin (Géosciences Rennes), Martine Simeos (IPGP), Ivan Vlastelic (LMV)

■ Grands enjeux scientifiques du domaine

Un accent fort a été mis ces dernières années sur les couplages existant entre tectonique, érosion, volcanisme, climat et biosphère, recherches fédérées en particulier au sein des actions sur projet SYSTER et INTERRVIE. Cette approche respecte la vision globale d'un Système Terre intégrant un maximum de composantes vivantes et minérales au sein des modèles numériques, mais également des modèles qualitatifs, afin d'approcher toute la complexité de la planète.

Au cours des temps géologiques, la vie s'est développée continuellement en réponse à l'évolution des paléo-environnements terrestres. Ces paléo-environnements sont tributaires des processus internes qui façonnent le visage de la Terre, mais également des rétroactions des enveloppes externes, en particulier, l'océan, l'atmosphère et la biosphère. Les chaînes de montagnes créent des barrières topographiques et climatiques qui modifient profondément les écosystèmes régionaux, induisant des phénomènes d'endémisme, de création d'espèces et une déstabilisation des biomes affectant l'écologie des espèces. Les reliefs jouent également un rôle majeur sur le cycle organique et inorganique du carbone externe. Lors de la fragmentation de continents, les épisodes de rifting conduisent à la formation de marges divergentes entretenant des reliefs et des interfaces très réactives entre lithosphère et enveloppes externes à même de jouer un rôle comparable à celui des orogénèses. Le volcanisme associé à la formation des grandes provinces basaltiques semble avoir joué un rôle majeur dans le processus d'extinctions en masse qui ponctuent le Phanérozoïque, même si les mécanismes mis en jeu restent à comprendre. Enfin la dérive des continents impose le tempo basse fréquence en favorisant ou non les entrées en glaciation, en isolant ou connectant des bassins

océaniques, en créant d'immenses surfaces désertiques...

Les avancées en termes de modélisation, associées à la mise à disposition d'un nombre croissant de données géologiques, géochimiques et géophysiques, permettent désormais d'envisager une modélisation globale prenant en compte non seulement les couplages à l'interface croûte/enveloppes fluides, mais aussi les couplages avec la dynamique interne conduisant à la tectonique des plaques. C'est tout l'enjeu de ce domaine que d'arriver à une telle compréhension globale de ces couplages.

■ Résultats saillants des cinq dernières années

• Mieux mesurer le temps pour mieux définir les couplages entre processus externes et dynamique interne du globe

Étudier les couplages entre les processus internes et externes du globe dans le passé impose de pouvoir, d'une part, vérifier la concomitance entre les événements passés (variations climatiques, événements volcaniques, tectonique, évolution de la chimie des océans ou de l'atmosphère...) afin d'évaluer des liens de causalité, et d'autre part, estimer des flux de matière afin de modéliser la dynamique des couplages. Dans les deux cas, des contraintes géochronologiques sont requises. Les enjeux des développements en géochronologie sont à la fois la mise en application de méthodes existantes à des matériaux et processus nouveaux et une meilleure compréhension des processus physico-chimiques qui contrôlent l'enregistrement chronométrique.

Dans le domaine des processus géologiques profonds, le développement des analyses LA-ICPMS a conduit à une meilleure accessibilité des analyses *in situ* pour le système K/Ar (appliqué pour l'essentiel aux micas, mais aussi aux feldspaths et aux amphiboles) et pour le système U-Th/Pb sur les minéraux uranifères (zircon, mais aussi monazite ou encore allanite). Ces développements techniques ont amené des données plus nombreuses, plus précises dans l'espace et dans le temps, mais surtout des données qu'il est maintenant possible d'interpréter avec finesse. La caractérisation des textures et de la chimie des minéraux à valeur chronométrique, mais aussi des phases associées à leur croissance (Didier *et al.*, 2014) Fig. 1, bénéficie d'avancées notables dans l'obtention de cartographies chimiques (microsonde électronique, MEB, nanoSIMS). Cela permet de caler les âges des minéraux par rapport à l'histoire de la déformation, des mouvements verticaux, des transferts de chaleur et des circulations de fluides avec une précision jusqu'ici inégalée.

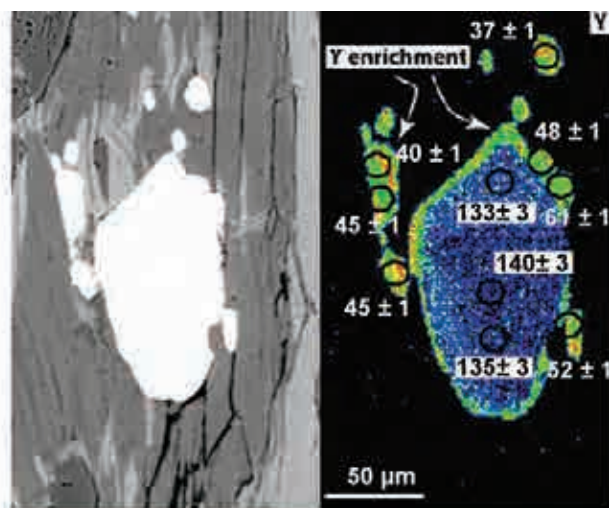


Fig. 1 : Textures, zonations en Y et âge U-Pb dans les monazites (Didier *et al.*, 2014).

L'essor des études sur la dynamique superficielle (géomorphologie, exhumation, érosion, dynamique sédimentaire) s'est accompagné du développement de méthodes de datation afférentes, qui combinent méthodes stratigraphiques (biostratigraphie, magnétostratigraphie, chimiostratigraphie) et méthodes de datation absolue. La datation des surfaces bénéficie du développement de la datation par les isotopes cosmogéniques (^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{14}C), et ce grâce à la mise en place d'équipements dédiés (SMA, ASTER) ayant permis aux équipes françaises de jouer un rôle de leader dans le développement des concepts théoriques et le développement méthodologique. L'amélioration continue des connaissances des paramètres physiques qui contrôlent la production des nucléides cosmogéniques a conduit à une quantification plus précise des processus (Ménabréaz *et al.*, 2014). La datation par isotopes cosmogéniques est maintenant associée à d'autres méthodes (U-Th/He ou traces de fission) ainsi qu'à une modélisation physique des processus qui contrôlent la rétention du signal isotopique (thermicité de la croûte superficielle, rétention des radionucléides dans le cristal) pour arriver à quantifier les processus de dénudation par érosion ou par tectonique superficielle et à évaluer les transferts des produits d'érosion vers les bassins sédimentaires.

• La dynamique des processus érosifs

Des avancées majeures dans notre exploration des liens existants entre l'érosion physique des surfaces continentales et le climat sont venues de l'utilisation de plus en plus efficace et ciblée des isotopes cosmogéniques. De nombreux projets SYSTER ont été financés sur ces questions. Un résultat marquant parmi d'autres est la mise en évidence d'une augmentation de l'érosion physique lors de la transition entre le monde plus chaud du Cénozoïque et la période des glaciations du Quaternaire vers 2 Ma. Cette augmentation, observée en Himalaya à partir de la mesure d'isotopes cosmogéniques sur

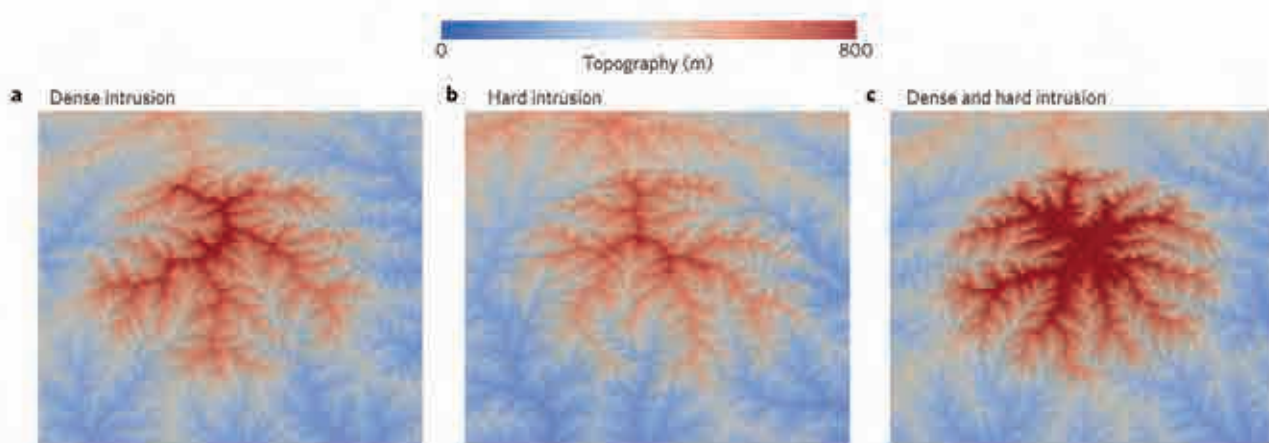


Fig. 2 : Modélisation des processus de surface montrant le rôle de la densité et de la résistance à l'érosion dans l'exhumation d'une intrusion magmatique (Braun *et al.* 2014).

des séries sédimentaires continentales du Tien Shan, illustre bien que ce qui importe pour l'érosion, ce sont les ruptures climatiques (Charreau *et al.*, 2013).

La topographie des continents joue un rôle clé dans l'évolution du système Terre superficiel. Elle est le résultat de l'interaction de deux processus majeurs : l'érosion et la variation de l'épaisseur de la croûte. Le premier facteur, qui dépend entre autres de la dureté des roches, est souvent invoqué pour expliquer la présence de corps granitiques à haute altitude. Cependant, une étude soutenue par SYSTER a montré l'importance du rebond isostatique qui accompagne l'érosion, comme ascenseur pour des corps denses. L'étude montre que l'injection d'un corps moins érodable dans la croûte ne permet pas de créer des anomalies topographiques dans le paysage, au contraire d'un corps dense (Braun *et al.*, 2014), Fig. 2.

La question cruciale des liens existants entre l'érosion physique et l'altération chimique, et leurs conséquences sur les grands cycles biogéochimiques n'est pas élucidée. Dans le cadre d'un projet SYSTER, une méthode novatrice basée sur l'isotopie du lithium a éclairé cette problématique sous un angle nouveau. Il a été possible de distinguer dans une dizaine de grands fleuves la part de sédiments transportés originaires d'un cycle d'altération précédent (recyclage de sédiments) de celle issue de l'altération de matériau frais. La proportion de sédiments recyclés peut atteindre 80% pour certains fleuves. Cette estimation est importante car seuls les sédiments issus de matériaux frais (roche mère) sont à prendre en compte dans l'estimation de la consommation de CO₂ par altération chimique (Dellinger *et al.*, 2014).

• Les paléo-environnements

De nombreux résultats ont été acquis dans le cadre de SYSTER. Ceux-ci vont de la reconstruction des teneurs en CO₂ atmosphérique dans les environnements post-glaciaire du Néoprotérozoïque (Sansjofre *et al.*, 2011) à la modélisation de l'impact environnemental des pulses volcaniques associés à la mise en place des trapps du Deccan. Plus « philosophiquement », les projets financés par SYSTER ont participé à une révolution majeure en termes de reconstruction des paléoenvironnements pré-quaternaires et des processus à l'œuvre au sein de ceux-ci : la prise en compte de plus en plus exhaustive de la variabilité spatiale pour une époque donnée. Jusqu'au début des années 2000, la communauté cherchait surtout à compiler le maximum de données paléoenvironnementales pour en faire des courbes globales de variations paléoclimatiques en fonction du temps. Deux exemples célèbres sont la courbe des modes climatiques phanérozoïques de Larry Frakes, et les compilations de données isotopiques de l'oxygène

sur le Phanérozoïque. Dans le cadre de SYSTER, plusieurs projets sont parvenus à briser cet aspect global en explorant la variabilité spatiale de la productivité primaire dans les océans paléozoïques. La circulation des océans du Crétacé a également été explorée à l'aide des isotopes du néodyme (Moiroud *et al.*, 2013). Ces développements à l'échelle spatiale vont de pair avec l'amélioration de la mesure du temps. Une équipe a exploré la réponse des plateformes carbonatées lors des épisodes anoxiques du Mésozoïque, mettant en évidence une évolution temporelle et spatiale complexe face à l'anoxie qui envahit les bassins océaniques profonds (Lebedel *et al.*, 2013).

En modélisation numérique des environnements anciens, SYSTER a également participé à la révolution de la spatialisation. Si la distribution des continents et de leur relief a été prise en compte dans les simulations exclusivement climatiques depuis les années 80, les modèles couplés climat-carbone sont restés exclusivement adimensionnels jusqu'au début des années 2000. SYSTER a participé à la mise au point de modèles couplés climat-carbone (tel GEOCLIM) qui ont démontré le rôle primordial de la paléogéographie sur l'évolution du CO₂ atmosphérique (Goddéris *et al.*, 2014), rôle négligé dans l'approche adimensionnelle. En outre, on voit l'approche spatialisée de la modélisation converger vers l'approche spatialisée de l'acquisition de données. En émergent de nouveaux moyens d'ancrer les résultats des modèles dans la réalité.

Le message clé de ces années SYSTER est la mise en évidence d'une dynamique très forte des climats pré-quaternaire. Nous nous éloignons sans cesse de l'image d'Épinal des grands, stables et longs modes climatiques des années 80-90. La dynamique du système climatique et géochimique pré-quaternaire est de plus en plus similaire à celle des climats quaternaires, mais avec des amplitudes et un exotisme bien plus marqués.

• Les couplages géochimiques avec la Terre interne

Les matériaux présents à la surface de la Terre sont renvoyés dans le manteau au niveau des zones de subduction et modifient ainsi la composition du manteau. À l'inverse, le volcanisme amène à la surface des liquides et des gaz qui influent fortement sur la composition chimique de la croûte terrestre et de l'atmosphère. Ces deux grands modes d'échange entre enveloppes profondes de la planète et enveloppes superficielles ont fait l'objet de nombreuses études de tout premier plan ces dernières années. Nous prendrons pour exemple les avancées

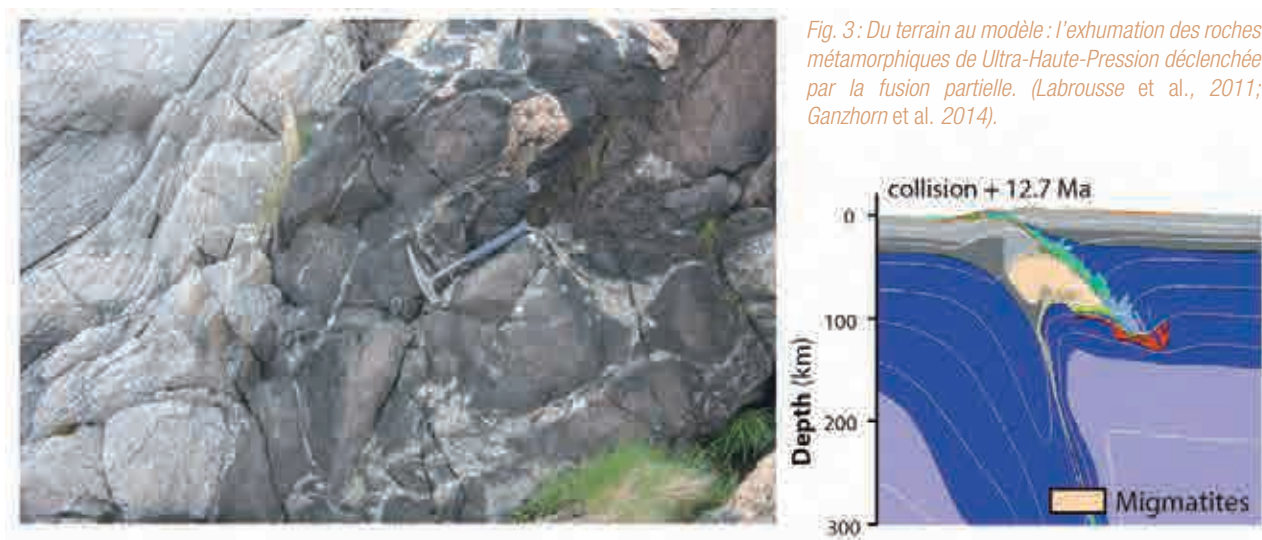


Fig. 3 : Du terrain au modèle : l'exhumation des roches métamorphiques de Ultra-Haute-Pression déclenchée par la fusion partielle. (Labrousse *et al.*, 2011; Ganzhorn *et al.* 2014).

majeures sur notre compréhension du cycle du carbone grâce à la mise en évidence du recyclage du carbone inorganique dans les zones de subduction (Galvez *et al.*, 2013) ainsi que sur la quantification globale des transferts géochimiques (Ryan et Chauvel, 2014).

De même, les études portant sur les conditions de formation des magmas dans le manteau ont permis de démontrer l'impact des conditions d'hydratation sur la nature des magmas formés et sur leur extraction du manteau (Condamines et Médard, 2014). Pour finir, l'étude du cycle du soufre vit une grande révolution depuis la mise en évidence de l'existence de fractionnements indépendants de la masse dans les conditions de surface durant la première moitié de l'histoire de la Terre. Dans ce contexte, les travaux remarquables des équipes françaises (Labidi *et al.*, 2013) ont démontré l'origine superficielle du soufre présent dans de nombreux basaltes de rides océaniques alors que de façon complètement indépendante, des conclusions de même nature ont été suggérées pour l'origine du Pb extrêmement peu radiogénique observé dans des basaltes de la ride indienne (Mougel *et al.*, 2014). De nombreuses pistes restent donc encore à explorer pour mieux cerner les interactions entre enveloppes terrestres et pour quantifier les flux et leur variabilité au cours des temps géologiques.

• La machine tectonique

L'étude de la machine tectonique qu'est la Terre Solide bénéficie des interactions fructueuses entre les équipes qui, travaillant de concert, mesurent sa géométrie, caractérisent ses matériaux, identifient l'histoire de sa déformation et la modélisent. La caractérisation structurale et thermique de la croûte actuelle et passée s'appuie sur une imagerie géophysique de résolution croissante mais aussi sur les progrès notables

et la diversification des méthodes de reconstructions des conditions pression-température passées via la caractérisation pétrologique et la modélisation thermodynamique des roches métamorphiques. Ainsi, la caractérisation des grands domaines orogéniques (Alpes, Himalaya-Tibet, Andes) s'est poursuivie dans un contexte où, parmi les grandes questions abordées, la prospective précédente avait explicitement souligné l'intérêt de faire le lien entre l'histoire tectonique, l'évolution des reliefs et le cycle externe. Cette question a été abordée non seulement dans le cadre évident des orogènes mais aussi, de manière plus inattendue dans celui des marges aujourd'hui à l'affleurement dans les chaînes de montagnes (Boutoux *et al.*, 2014). Au-delà de la question des couplages entre cycle interne et cycle externe, la communauté des tectonicien(ne)s a continué à progresser dans la compréhension des mécanismes de contrôle de la déformation de la lithosphère. On peut citer les améliorations dans la connaissance, du lien entre fusion partielle, rhéologie des matériaux crustaux et déformation de la croûte dans les orogènes, avec le cas particulier de la mise en évidence de la fusion partielle de la croûte dans la subduction continentale, que les études expérimentales suggéraient depuis une dizaine d'années (Labrousse *et al.*, 2013).

À une autre échelle, la modélisation géophysique permet d'explorer le lien entre la déformation à l'échelle du manteau et l'évolution des plaques lithosphériques. Par exemple, la modélisation des grandes dérives du pôle géographique et de la paléoposition du Super-Continent Rodinia (Greff et Besse, 2015), montrent que la position du pôle géographique, la distribution latitudinale des plaques ainsi que leurs rotations dépendent de la localisation des subductions en surface et en profondeur, et que les dômes (upwelling) dans le manteau jouent un rôle stabilisateur.

■ Éléments de prospective et recommandations

Le champ disciplinaire du CT2 étant très large, et les perspectives ne devant pas être trop restrictives pour ne pas brider les initiatives, les perspectives sont bâties autour de quatre axes généraux, laissés largement ouverts et transversaux.

• Couplages

Rôle de la paléogéographie et de la tectonique sur l'évolution du climat et de la vie.

Du début du Néoprotérozoïque jusqu'à la fin du Silurien, la position des continents varie fortement passant d'une paléogéographie dominée par une position des continents autour de la ceinture tropicale à une paléogéographie où la majeure partie des continents se retrouve dans l'hémisphère Sud laissant un hémisphère Nord fortement océanisé. Quelles sont les conséquences de ces mouvements sur la dynamique du climat et sur l'évolution de la biodiversité? L'étude des processus de spéciation liés à l'isolement des continents, des migrations fauniques associées à des changements de circulation océaniques et de la transformation des écosystèmes (dues à des modifications des aires d'habitation ou des

apports continentaux en nutriments) doit être abordée avec un nouveau regard; le développement des modèles de niche écologique présente un fort potentiel d'innovation pour ces nouvelles directions de recherche. De l'extinction de la limite Permien-Trias à l'extinction Crétacé-Tertiaire se met en place la géographie que nous connaissons aujourd'hui. L'Antarctique prend sa position polaire tandis que l'océan Atlantique s'ouvre. Les espèces marines colonisent les domaines océaniques profonds et modifient le cycle du carbone externe par la mise en place de la composante pélagique. Comment la conquête des océans par les espèces calcifiantes a-t-elle modifié la chimie des océans? Y a-t-il eu des conséquences sur les enregistrements sédimentaires? Les grands événements anoxiques du Crétacé ponctuent l'ouverture de l'Atlantique et la mise en place de la circulation océanique moderne. Y a-t-il un lien entre l'ouverture de l'océan Atlantique Nord et l'arrêt des grands événements océaniques anoxiques du Crétacé? Au cours du Jurassique, plusieurs passages océaniques s'ouvrent, l'un connecte le Pacifique Est à la Téthys, l'autre l'océan Arctique à la Téthys. Ces événements océanographiques ont-ils eu des conséquences sur la zonation des ammonites? La compréhension des liens existant entre système climatique, cycles biogéochimiques, et processus géodynamiques passe nécessairement par une amélioration de la couverture spatiale et temporelle des données paléo-environnementales existantes, encore peu nombreuses pour certaines époques et latitudes, dans les environnements terrestres comme marins.

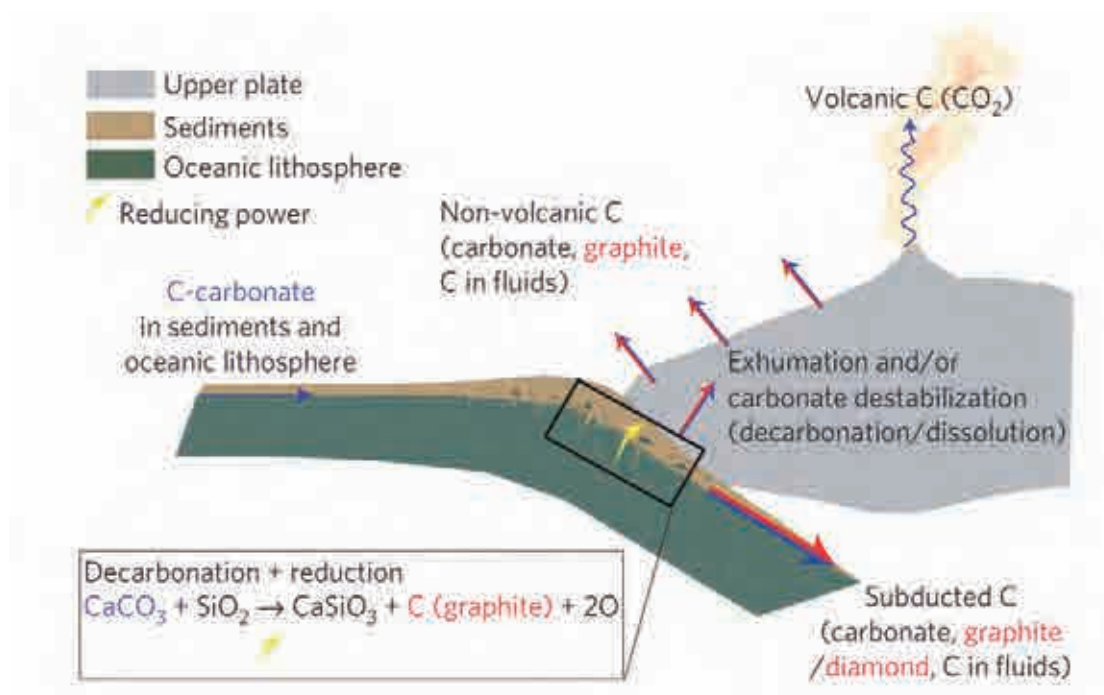


Fig. 4 – Devenir du carbone contenu dans les sédiments dans les zones de subduction. Environ 10% de la matière carbonatée des unités sédimentaires pourrait-être réduite en graphite et stockée pour être transportée en profondeur dans les zones de subduction (Galvez et al., 2013)

Dynamique du rifting, formation, et inversion des marges passives.

Les concepts évoluent vite dans ce domaine et les interactions entre croûte et manteau, entre surface et profondeur sont des questions de premier ordre. De nombreux paramètres ont été suggérés pour expliquer la genèse des différents types de marges (volcaniques ou non-volcaniques, manteau exhumé ou non, croûte inférieure exhumée ou non, symétrie ou asymétrie des marges, amincissement extrême) mais nos connaissances actuelles ne permettent pas d'identifier les processus de premier ordre à l'œuvre dans ces différents types de marge. Leur meilleure appréhension est pourtant fondamentale pour prédire le régime thermique des marges pendant le rifting et après. Le territoire national possède, dans les Alpes et les Pyrénées, des cibles de choix pour aller dans cette direction. L'étude des paléomarges mises à l'affleurement dans les chaînes de montagnes est une façon d'aborder ces questions dans une démarche historique et d'accéder ainsi à leur évolution.

Vers un modèle global des couplages Terre interne – Terre externe ?

Plusieurs propositions récentes suggèrent qu'on ne peut pas négliger les forces de couplage à la base de la lithosphère si l'on veut comprendre la tectonique globale, la déformation des plaques et l'évolution chimique des réservoirs. Les codes de convection permettant d'étudier la dynamique du manteau dans son ensemble doivent être couplés aux codes de déformation lithosphérique, et les évolutions des réservoirs lithosphériques et mantelliques profonds doivent être pensées ensemble afin de répondre aux questions qui se posent encore. Peut-on proposer des modèles d'évolution de la Terre dans son ensemble, reliant convection mantellique et tectonique des plaques, sur le court terme et le long terme ? Quels sont les effets de la convection profonde sur le déplacement et la déformation des plaques, que ce soit dans les zones de subduction, aux dorsales, dans les zones de collision, mais aussi, et ceci mérite toute notre attention, dans les domaines intraplaques ? Peut-on tracer l'histoire de la convection mantellique au cours du temps en la couplant à l'histoire géologique long-terme à grande échelle (changements de régime des domaines convergents, déchirures continentales, formation des Large Igneous Provinces, variations des taux de production de nouvelle lithosphère, cycles de Wilson, topographie dynamique long-terme) ? Quelles sont les interactions (les couplages) entre déformation de la croûte et flux asthénosphériques sous-jacents en général, et en particulier aux limites de plaques ? Qu'elles sont les conséquences de ces couplages sur les flux de matière et les flux de chaleur entre le manteau et la croûte terrestre ?

• Continuum long terme / court terme

Etudier un phénomène sur le temps court permet de le décrire très précisément à un moment donné. Cependant, l'étudier sur le temps long permet d'appréhender les changements à long terme qui peuvent affecter un de ses paramètres, et d'analyser ses conséquences. Les deux approches sont alors complémentaires pour analyser le rôle des paramètres en jeu. Une meilleure coopération entre sismologues, géologues et modélisateurs doit donc permettre de mieux appréhender ce continuum du temps court au temps long. Déjà, les géologues s'intéressent aux paléo-séismes enregistrés dans les roches sous forme des pseudotachylites dans différents types de conditions P-T, ou aux interactions fluides roches lors de déformation à différentes échelles de temps. De même les nombreux travaux actuels quantifiant les vitesses de formation des reliefs et d'exhumation récente, grâce à la thermochronologie de basse température, suscitent des questions intéressantes. Ces travaux doivent être poursuivis et augmentés pour décrire plus complètement les différents comportements rhéologiques en fonction des taux de déformation et de l'échelle spatiale. Plus le passé est lointain et plus les processus sont longs, plus la quantification est difficile, mais s'y intéresser doit permettre de comprendre les mécanismes de localisation de la déformation dans la lithosphère, tant dans le domaine océanique que continental. Quels en sont les paramètres principaux selon l'échelle considérée ? Les facteurs classiques tels que changements de la taille du grain, interactions fluide-roche ou changements de phase liés au métamorphisme, sont sûrement importants dans le manteau ou dans la croûte, mais l'hétérogénéité lithologique de la croûte continentale est également un facteur de premier ordre à explorer.

• Flux et bilans

Même si la tectonique et le magmatisme fonctionnent *a priori* avec des constantes de temps différentes, c'est pourtant la tectonique qui, en grande partie, crée les conduits nécessaires à la montée des magmas, engendre les déséquilibres thermiques et amène les fluides pouvant conduire à la fusion de la croûte ou du manteau. Inversement, les magmas modifient la rhéologie crustale de manière sans doute significative, et sont un vecteur majeur de transferts de matière et de concentration d'éléments, du manteau vers la croûte et les enveloppes externes. Des études conjointes des processus tectoniques et magmatiques à des échelles spatiales et temporelles variées, dans des contextes géodynamique différents et avec l'aide de données géophysiques, devraient permettre de mieux comprendre, voire de quantifier ces interactions, et de préciser leurs relations avec les échelles considérées. De même, des études conjointes

tectonique-magma-métallogénie-modélisation devraient permettre de mieux comprendre les processus de migration et concentration d'éléments à différentes échelles et de fournir de nouveaux guides de prospection. En combinant approche expérimentale, modélisation, et observations d'exemples naturels, on pourra mettre l'accent sur l'évolution physico-chimique des magmas en présence de volatils, sur l'évolution des états d'oxydation des systèmes, et sur l'exploration des mécanismes fondamentaux, de l'échelle du minéral à l'échelle atomique (coefficients de partage, fractionnement isotopique, diffusion, spéciation des éléments).

• Développer et adapter techniques et modélisations à de nouveaux objets

Mesurer et modéliser les conséquences de la croissance et la relaxation des reliefs continentaux

L'objectif est notamment d'implémenter des méthodes de datation des topographies à divers stades de leur développement et de calibrer leurs paléoaltitudes. Dans cette optique, un des enjeux en domaine orogénique est d'améliorer la calibration du $\delta^{18}\text{O}$ des eaux de pluie en fonction de l'altitude, ce qui exclut pour l'instant toute interprétation fiable des données paléoaltimétriques estimées par la géochimie des minéralisations précipitées à partir d'eaux météoriques. Pour valider les hypothèses actuelles, des approches intégrant le maximum de proxies (i.e. isotopes stables et cosmogéniques, thermochronologie et sédimentologie) sont nécessaires pour implémenter les modèles et caractériser finement l'exhumation et l'évolution des reliefs. À terme, l'enjeu serait de calibrer différentes méthodes d'investigations afin d'envisager une application à des chaînes passées pour lesquelles les données paléoaltimétriques et paléogéographiques précises sont partielles, voire inexistantes. D'autre part, l'accent devra être mis sur l'évaluation des forçages du relief : érosion, accretion de matériel crustal, déformation crustale et lithosphérique,

mais aussi dynamique mantellique. Nous proposons donc de fédérer modélisateurs et géologues sur les thèmes suivants :

- Mouvements verticaux, forçages et flux sédimentaires de continents entourés de marges passives (Afrique, Australie) ;
- Quantification des flux d'érosion, altérations et évolution topographique des grands orogènes actuelles (Andes, Himalaya, Alpes) mais également des orogènes passées (Varisque par ex.).

Les zones tropicales sont très dynamiques et les zones cratoniques de type Afrique connaissent des phases de dénudation physique, quasi sans altération chimique, alternant avec des phases d'altération chimique intense identifiées grâce à l'étude des profils d'altération. La modélisation de ces phénomènes constitue un véritable challenge. Elle nécessite d'imbriquer plusieurs modèles numériques afin de reproduire :

- Le climat à l'échelle régionale (plusieurs centaines de km) et la variabilité de ce dernier associée au tempo orbital ;
- L'évolution des reliefs ;
- L'évolution des profils d'altération des sols.

De plus, la cartographie globale des régolithes latéritiques et l'estimation des flux liés à leur dynamique constituent des champs d'investigation pertinents pour l'évaluation de la réactivité des surfaces continentales, notamment au cours du Méso-Cénozoïque. L'intégration de cette cartographie à des modèles de processus de surface et/ou climatiques permettra de tester les rétroactions entre le type de d'altération et le cycle du carbone.

• Développer techniques et codes

La réponse aux enjeux exposés ci-dessus nécessite de lever des verrous méthodologiques en termes :

- D'acquisition et d'analyse de données et d'intégration de ces données dans des modèles ;
- De géophysique, en particulier en développement de l'imagerie sismique de la lithosphère, et son intégration aux études géologiques ;

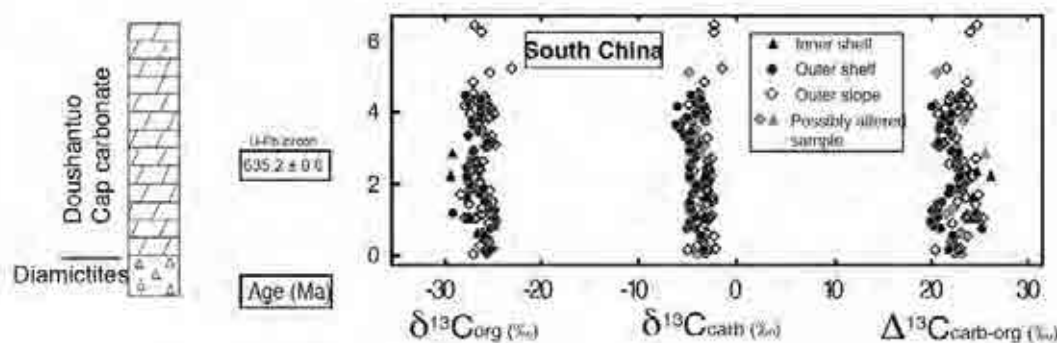


Fig 5 : Valeurs des isotopes de l'oxygène mesurées sur la composante organique et inorganique en Chine du Sud sur des carbonates représentant la période de sortie de la glaciation dite globale autour de 640 Ma. Vers une remise en cause de la théorie de la Snowball Earth (Sans-Jofre et al., 2011).

Comité Thématique 2 « Terre interne et Terre externe, processus et couplages »

- D'expérimentation, en particulier en pétrologie ;
- De géochronologie (dont la datation des déformations) ;
- De mesure des paléoreliefs, avec le développement de la paléoaltimétrie ;
- D'optimisation des codes numériques afin de bénéficier au mieux des développements des architectures informatiques des super calculateurs nationaux. Ces points nécessitent une réflexion quant aux (trop) faibles liens entre numériciens, informaticiens et modélisateur des sciences de la Terre ;

- De développement de modèles numériques de nouvelle génération permettant d'agréger des composantes lentes et rapides (cycle du carbone, érosion, tectonique, manteau par exemple).

Dans cette optique, il est fondamental que des projets à visée méthodologique, qui nécessitent souvent une prise de risque importante, soient soutenus.

Références citées

- **Braun J., Simon-Labric T., Murray, K.-E., Reinert P.**, (2014) Topographic relief driven by variations in surface rock density. *Nature Geoscience*, 7, 534-540
- **Boutoux A., Verlaquet A., Bellhasen N., Lacombe O., Villemant B., Caron B., Martin E., Assayag N., Cartigny P.**, (2014) Fluid systems above basement shear zones during inversion of pre-orogenic sedimentary basins (External Crystalline Massifs, Western Alps). *Lithos*, 206, 435-453
- **Didier A., Bosse V., Cherneva Z., Gautier P., Georgieva M., Paquette J.-L., Gerdjikov I.**, (2014) Syn-deformation fluid-assisted growth of monazite during renewed high-grade metamorphism in metapelites of the Central Rhodope (Bulgaria, Greece). *Chemical Geology*, 381, 206-222
- **Dellinger M., Gaillardet J., Bouchez J., Calmels D., Galy V., Hiltong R.-G., Louvat P., France-Lanord C.**, (2014) Lithium isotopes in large rivers reveal the cannibalistic nature of modern continental weathering and erosion. *Earth and Planetary Science Letters*, 401, 359-372
- **Charreau J.-L., Blard P.-H., Puchol N., Avouac J.-P., Lallier-Vergès E., Bourlès D., Braucher R., Gallaud A., Finkel R., Jolivet M., Chen Y., Roy P.**, (2011) Paleo-erosion rates in Central Asia since 9 Ma: A transient increase at the onset of Quaternary glaciations? *Earth and Planetary Science Letters*, 304, 85-92
- **Condamine P., Médard P.**, (2014) Experimental melting of phlogopite-bearing mantle at 1GPa: Implications for potassic magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 397, 80-92
- **Galvez M., Beyssac O., Martinez I., Benzerara K., Chaduteau C., Malvoisin B., Malavieille J.** (2013) Graphite formation by carbonate reduction during subduction. *Nature Geoscience* 6, 473-477
- **Goddéris Y., Donnadieu Y., Le Hir G., Lefebvre V., Nardin E.** (2014) The role of palaeogeography in the Phanerozoic history of atmospheric CO₂ and climate. *Earth-Science Reviews*, 128, 122-138.
- **Greff-Lefftz M., Besse, J.** (2014), Sensitivity experiments on True Polar Wander, *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 15, 4599-4616
- **Labidi, J., Cartigny, P., Moreira, M.** (2013) Non-chondritic sulphur isotope composition of the terrestrial mantle. *Nature*, 501 (7466), 208-211
- **Labrousse L., Prouteau G., Ganzhorn A.-C.** (2011) Continental exhumation triggered by partial melting at ultrahigh pressure. *Geology*, 39, 1171-1174
- **Lebedel V., Lézin C., Andreu B., Wallez M.-J., Ettachfini E., Riquier L.** (2013) Geochemical and palaeoecological record of the Cenomanian-Turonian Anoxic Event in the carbonate platform of the Preafrican Trough, Morocco. *Paleogeography Paleoclimatology Paleocology* 369, 79-98
- **Ménabréaz L., Thouveny N., Bourlès D., Vidal L.** (2014) The geomagnetic dipole moment variation between 250 and 800 kaB Preconstructed from the authigenic 10Be/9Be signature in West Equatorial Pacific sediments. *Earth and Planetary Science Letters*, 385, 190-205
- **Moiroud M., Pucéat E., Donnadieu Y., Bayon G., Moriya K., Deconinck J.-F., Boyet M.** (2013) Evolution of the neodymium isotopic signature of neritic seawater on a northwestern Pacific margin: new constraints on possible end-members for the composition of deep-water masses in the Late Cretaceous ocean. *Chemical Geology* 356, 160-170
- **Mougel, B., Agranier, A., Hemond, C., Gente, P.** (2014). A highly unradiogenic lead isotopic signature revealed by volcanic rocks from the East Pacific Rise. *Nature Communication*, 5, 4474
- **Ryan, J.G., Chauvel, C.**, (2014) The Subduction-Zone Filter and the Impact of Recycled Materials on the Evolution of the Mantle. In: Holland, H.D., Turekian, K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry* (Second Edition). Elsevier, Oxford, pp. 479-508.
- **Sansjofre P., Ader M., Trindade R.I.F., Elie M., Lyons J., Cartigny P., Nogueira A.C.R.**, (2011) A carbon isotope challenge to the snowball Earth. *Nature* 476, 93-97

Comité Thématique 3

« Aléas, risques et catastrophes telluriques »

Appel d'offre : Aléas

Caroline Martel (ISTO)

Comité scientifique : Isabelle Manighetti (GéoAzur), Caroline Martel (ISTO)

Hideo Aochi (BRGM), Olivier Bellier (CEREGE), Fabian Bonilla (IRSN), Jean Chéry (Géosciences Montpellier), Françoise Courboux (GéoAzur), Cécile Doubre (EOST), Tim Druitt (LMV), Edouard Kaminski (IPGP), Anne Mangeney (IPGP), Thierry Menand (LMV), Chloé Michaut (IPGP), Mathieu Nocquet (GéoAzur), VIRIEUX Jean, IsTerre

■ Grands enjeux scientifiques du domaine

Face aux catastrophes naturelles de type séisme, éruption volcanique, glissement de terrain, ou tsunami, l'enjeu scientifique principal est la construction de modèles capables de préciser à la fois les échelles de temps et d'espace sur lesquelles ces événements peuvent avoir lieu, ainsi que les amplitudes des dommages qu'ils sont susceptibles d'engendrer, pour *in fine*, intégrer ces modèles dans la gestion du risque associé, de façon à pouvoir préserver au mieux les populations menacées et leur environnement. Pour cela, il faut déterminer l'aléa, c'est-à-dire estimer le type, l'intensité et la fréquence de la manifestation naturelle pressentie. Définir l'aléa requiert une connaissance approfondie des processus physico-chimiques mis en jeu, des mécanismes de déclenchement des phénomènes catastrophiques et de leur récurrence temporelle, faisant appel à de nombreuses spécialités des sciences de la Terre (tectonique, sismologie, géodésie, physique des roches, pétrologie, géochimie, géochronologie, hydrogéologie, mécanique du solide et des fluides, etc.) et différentes approches et instrumentations complémentaires (terrain, imagerie satellitaire, analyses géophysiques et géochimiques, modélisation expérimentale et numérique).

L'aléa naturel est décliné ici en : aléa sismique et tectonique active ; aléa volcanique et conditions de stockage et d'éruption des magmas et aléa gravitaire et instabilités à terre et en mer. L'aléa tsunami s'associe à ces trois aléas.

■ Aléa sismique et fonctionnement des failles actives

• Enjeu scientifique et résultats saillants

Dans ce domaine, les enjeux scientifiques principaux sont de comprendre et de modéliser le fonctionnement des failles au cours des différentes phases de leur cycle sismique et d'anticiper les mouvements du sol en surface qui vont causer des dommages à nos sociétés.

En phase co-sismique, un effort considérable a été réalisé dans l'acquisition de nombreuses données par :

- L'installation de réseaux d'instruments géophysiques (accéléromètres, vélocimètres, GPS, tiltmètres) dans des zones à risque ;
- Les méthodes de télédétection (InSAR et corrélation d'images qui permettent d'obtenir le champ de déformation pour tous les séismes, y compris dans des zones non-instrumentées) ;
- L'acquisition d'images optiques multispectrales haute résolution pour la cartographie de la rupture de surface et des dommages.

Les travaux récents de caractérisation de la phase sismique W (signal de longue période 100-1000 s) particulièrement adaptée à la caractérisation des séismes de très forte magnitude (Duputel *et al.*, 2012, Fig. 1) ou ceux de mesures de vitesses de rupture « supershear » (Vallée et Dunham, 2012) ont amorcé des avancées de toute première importance sur la compréhension du fonctionnement physique des séismes. En phase *post-sismique*, les travaux récents font état de modèles complexes tenant compte de la variabilité de la rhéologie depuis la croûte jusqu'à la lithosphère profonde. En phase de *chargement inter-sismique*, les travaux récents ont amorcé l'évaluation du potentiel sismogène par la caractérisation de la

zone bloquée de la faille et de sa vitesse de chargement. Ainsi, nous pouvons maintenant mieux comprendre la physique des mécanismes de préparation des grandes ruptures et du partitionnement entre les glissements sismique et asismique. Notre compréhension du fonctionnement des failles actives est en progression permanente, grâce à la cartographie des failles actives et aux traitements massifs du bruit de fond sismique permettant d'imager les structures (Brenguier *et al.*, 2008). Ce dernier point donne de l'espoir pour des détections temporelles potentiellement avant la rupture même si la localisation reste difficile. Des progrès considérables dans ces domaines ont été possibles grâce au développement d'outils d'acquisition d'images de très haute résolution (images SPOT et Pléiades, SAR) ainsi que de données topographiques (LiDAR) qui permettent la visualisation tridimensionnelle des objets morphologiques. Par une approche d'expérimentation en laboratoire, des études prometteuses ont également été initiées sur le mode de déclenchement d'un séisme par un autre, la dynamique de la rupture (Passelègue *et al.*, 2013 ; Schubnel *et al.*, 2013, Fig. 2) ou le rôle de la circulation de fluides profonds. Quant à la détection des *signes précurseurs* des séismes, l'observation des interactions sismiques (Bouchon *et al.*, 2013), la caractérisation et le rôle des séismes lents (Vigny *et al.*, 2011 ; Vallée *et al.*, 2013) ou le rôle de l'érosion/sédimentation (Steer *et al.*, 2014) sur le déclenchement des séismes, constituent autant d'avancées prometteuses.

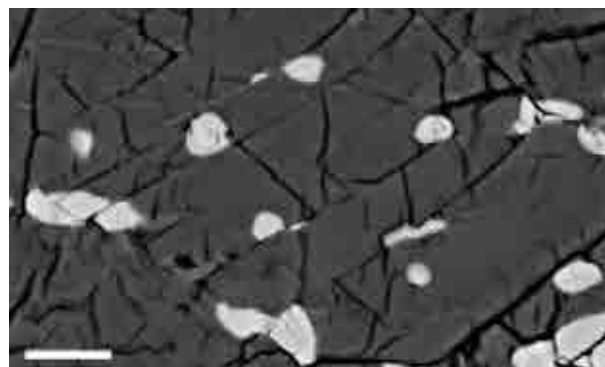


Fig. 2 : Expériences en laboratoire sur la rupture dynamique des roches et implications pour les processus précurseurs des tremblements de Terre (Schubnel *et al.*, 2013).

Complémentant les études de cartographie des failles actives, l'analyse des forts séismes passés (i.e. paléosismologie) est une approche indispensable pour caractériser l'aléa sismique. Cette analyse requiert de pouvoir identifier les ruptures dans la morphologie et la stratigraphie des dépôts récents et de pouvoir dater ces marqueurs. L'effort mené pour coupler les méthodes (tectonique, sismologie, géodésie, magnétotellurie, et imagerie haute résolution) a conduit au cours des dernières années à des résultats prometteurs en termes d'inversion multi-données des propriétés de la source des grands séismes passés (e.g. Delouis *et al.*, 2010) et au développement des études paléosismologiques (e.g. Pouderoux *et al.* 2014 ; Berthet *et al.*, 2014 ; Manighetti *et al.*, 2015).

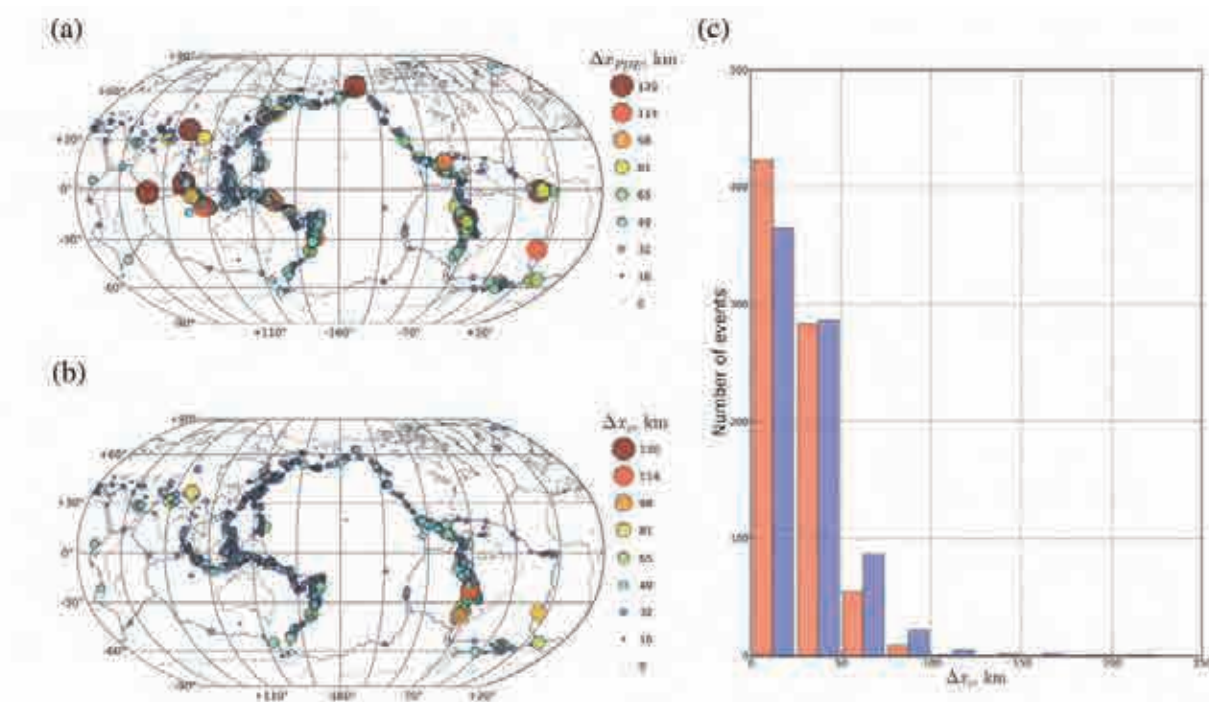


Fig. 1 : Caractérisation de la phase W des séismes de grande magnitude (Duputel *et al.*, 2012).

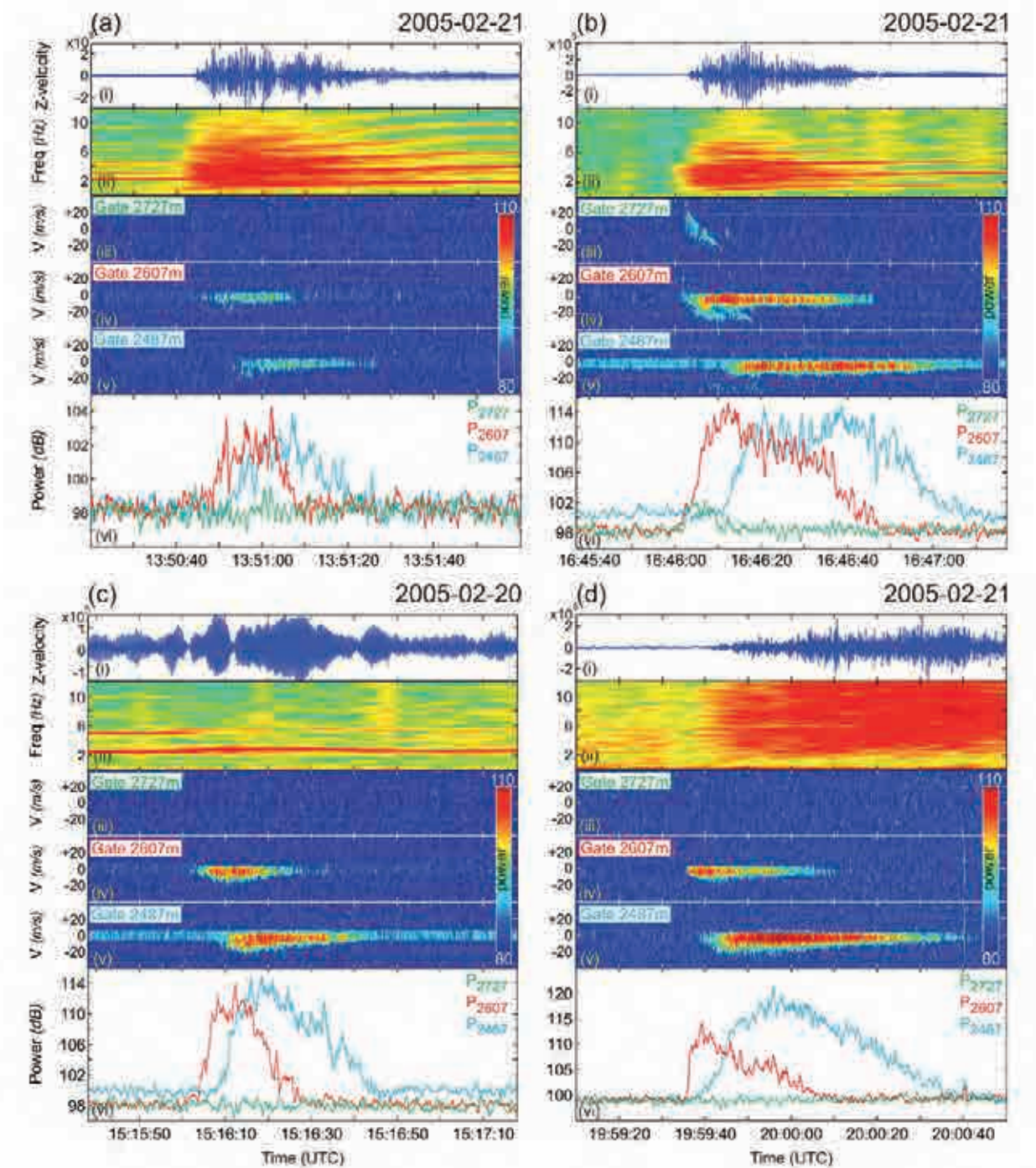


Fig. 3: Apports de l'analyse du bruit sismique à la prévision des éruptions volcaniques. Quatre événements sismiques représentatifs associés à un signal radar : a et b) explosion et séisme associé, c) trémor et d) émission sans signal sismique. (Valade et al., 2012).

Les questions de microsismicité induite prennent une importance croissante, tant pour des raisons de contrôle/optimisation de la production que de sécurité (fuites, sismicité déclenchée), motivant à l'échelle internationale un gros effort de la part des industriels pour surveiller leurs activités souterraines de pompage et de stockage (gaz, pétrole, géothermie), mais aussi le secteur minier (e.g. Kinscher et al., 2015; Aochi et al. 2014).

Concernant les études du mouvement du sol en surface, des avancées récentes ont permis de quantifier sur des exemples précis le rôle de la directivité de la rupture et des effets de site (topographiques et lithologiques) sur les accélérations du sol (Courboulex et al., 2013). Des modélisations numériques pures ou hybrides nécessitant des moyens de calculs importants permettent à présent de pouvoir simuler des signaux synthétiques de séismes forts incluant les hautes fréquences

du signal (Viens *et al.*, 2014) et des effets non linéaires (Gélis & Bonilla, 2014). Enfin, les interactions sol-structure ont pu être étudiées notamment grâce aux stations permanentes installées dans quelques bâtiments (réseau RAP-RESIF). Ces actions de recherche permettent de créer des liens avec la communauté des ingénieurs (notamment à travers des groupes de travail du RAP, réseau accélérométrique permanent ou de l'AFPS).

• Forces et faiblesses de la communauté sismologique/ tectonique

Les forces de la communauté sismologique géodésique et tectonique française résident avant tout dans une forte structuration nationale, qui permet d'obtenir le leadership de nombreux projets scientifiques nationaux et internationaux et d'assurer des responsabilités dans les instances internationales. Le résultat de cet effort est une excellente renommée internationale dans le domaine de la sismologie et de la tectonique active. Cette qualité scientifique est avant tout le résultat de Services Nationaux d'Observations (SNO) efficaces et performants (SNO, RESIF, RENASS et pour les datations des dépôts quaternaires : Artemis, LN2C-ASTER, SARM), de programmes d'instrumentation sur cible à l'étranger (LIA, LMI, chantiers instrumentés INSU) et de programme de structuration européen EPOS.

Cependant, et contrairement à des pays comme l'Italie, le Japon ou les Etats-Unis, le continuum est faible entre la recherche sur les processus et celle sur les effets (e.g. GIS RAP), freinant l'évolution vers la prise en compte et la gestion du risque sismique. Ceci est en partie dû au fait que ces thématiques sont développées par une multitude d'institutions (e.g. CEA, BRGM, IFSTTAR, IRSN, Universités...) qui manquent à l'heure actuelle de coordination pour concentrer leurs efforts vers un objectif commun d'estimation intégrée de l'aléa et du risque sismiques.

• Éléments de prospective et recommandations pour l'aléa sismique

La prospective scientifique doit être ciblée sur trois enjeux principaux : les aspects observationnels, le traitement des données, et les aspects modélisation et prédiction.

Pour les *enjeux d'observation*, il est crucial de maintenir l'effort sur le déploiement des réseaux d'observation à long-terme, court-terme et urgent, et sur l'accès aux données, menés au travers des différents programmes d'instrumentation et de

structuration. En complément, des actions soutenues par l'INSU pourraient être menées pour certains des sites instrumentés avec la création d'observatoires européens ou internationaux plus pérennes, cela en particulier pour garantir la qualité et la pertinence de l'infrastructure EPOS. Le renforcement de programmes français et européens soutenant des initiatives d'observation des zones de subduction des sites pilotes par le développement d'une instrumentation fond de mer spécifique, tant pour la partie sismologique que géodésique, est très souhaitable pour permettre de contraindre les processus de déformation intersismique. Par ailleurs, il existe une lacune d'observation importante à l'échelle intermédiaire (mètre à décamètre) et en champ proche dans les failles, qui pourrait être comblée par le développement de nouvelles expériences *in-situ* dans le but d'étudier les fondements physiques du comportement des failles sismogènes et du partitionnement entre les glissements sismique et asismique. En paléosismologie, il est nécessaire de promouvoir l'acquisition de données géologiques sur des séries temporelles longues pour établir une modélisation réaliste du phénomène séisme, et de dater précisément les marqueurs morphotectoniques et stratigraphiques notamment par OSL-IRSL (manquant actuellement à la communauté des Géosciences en France).

En ce qui concerne le *traitement des données*, l'enjeu à venir est de réussir l'assimilation et la gestion du flux de données croissant, notamment en terme spatial et de calcul numérique (cf. réflexions menées au sein des groupes de travail «Outil spatial» et «Moyens de calculs»).

Pour l'*aspect modélisation et prédiction*, il faut noter la faible organisation autour d'outils performants de modélisation de la rupture sismique sur des surfaces complexes dans des milieux hétérogènes (prenant compte, par exemple, de l'effet des processus dissipatifs, de la réponse non linéaire du milieu ou des effets de sites locaux), alors que les ressources informatiques existent maintenant pour de telles modélisations. Les nouveaux développements de l'analyse et des modélisations de la microsismicité induite que permettent les réseaux d'observations de recherche académique devraient contribuer à cet effort de recherche appliquée.

Pour progresser dans l'estimation de l'aléa local (i.e. effets de site liés à la lithologie et à la topographie qui augmentent l'accélération du sol au moment de la propagation des ondes sismiques, ainsi que la durée de propagation), des approches probabilistes sont de plus en plus envisagées, en complément des approches déterministes (si la structure du milieu est connue). Ces conditions de site s'avèrent souvent très pénalisantes en termes de risque sismique en domaine à sismicité modérée, comme ce fut le cas lors du séisme de

Lambesc en Provence en 1909, et plus récemment le séisme de l'Aquila en Italie. Par ailleurs, la capacité à réaliser une alerte précoce suite au séisme et avant l'impact dans la zone d'intérêt a été promue par différents acteurs internationaux et pourrait être intéressante dans le cadre de certains territoires français.

Les recommandations comprennent également un effort pour renforcer les liens entre la recherche sur les processus et celle sur les effets, qui pourraient être resserrés par des études spécifiques (effets de site et des ondes sur les bâtiments, caractérisation des incertitudes ou l'aléa probabiliste) et par la mise en place d'exercices de simulation de crise sismique. Les Antilles, par exemple, représentent un chantier ouvert qui montre la méconnaissance, face à son ampleur, de l'aléa sismique associé à celui de tsunami et à celle du risque associé à une échelle locale et régionale (y compris une méconnaissance des instances locales telles la Région, l'Etat-major de zone, la DREAL, etc.). Dans ce sens, l'aspect multi-risques (e.g. séismes et tsunami/inondation, séisme et éboulements consécutifs, séismes et éruptions volcaniques) est encore très peu abordé alors qu'il affecte directement les populations et serait donc à renforcer.

■ Aléa volcanique

• Enjeu scientifique et résultats saillants

L'enjeu scientifique principal est de comprendre les causes menant aux différents dynamismes éruptifs que l'on observe sur les volcans actifs, et en particulier sur les volcans de type explosif. Comprendre le fonctionnement des volcans permet une meilleure estimation de l'aléa nécessaire à la prise en compte et à la gestion du risque associé.

Les travaux récents ont révélé les progrès réalisés dans le développement des techniques permettant de quantifier les paramètres chimiques et physiques contrôlant une éruption. Par exemple, la mise au point de nouvelles générations d'appareils de mesures des gaz (e.g. OP-FTIR, DOAS, MultiGAS) ont permis de déterminer les spéciations et les flux de gaz émis dans les panaches éruptifs (e.g. Allard *et al.* 2014 ; Bouche *et al.*, 2010 ; Vlastelic *et al.*, 2013). Par couplage à des mesures des concentrations de ces gaz dans le magma en profondeur obtenues grâce à des méthodes analytiques de précision (e.g. SIMS) sur les inclusions vitreuses piégées dans les cristaux (e.g. Moune *et al.*, 2012) ou de l'expérimentation à haute pression et température (e.g. Morizet *et al.*, 2013), des bilans du dégazage magmatique ont pu être établis afin de mieux comprendre le contrôle du dégazage sur le dynamisme éruptif.

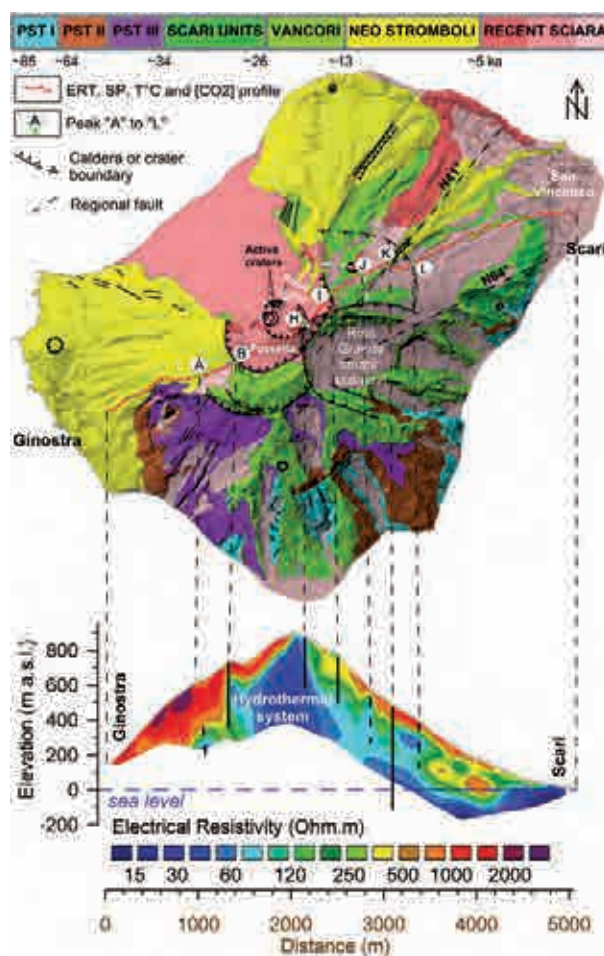


Fig. 4: La tomographie de résistivité électrique informe sur les contrastes de perméabilité les plus marquants de la structure des édifices volcaniques, ici le Stromboli. Ce sont ces limites de perméabilité qui peuvent jouer lors d'événements catastrophiques (glissement gravitaire latéral d'édifice volcanique, éruptions excentrées, etc.). La connaissance et la localisation de ces zones de faiblesse à l'intérieur d'un édifice volcanique est la première étape pour installer une surveillance ciblée de ces zones de plus grand risque. (Revil *et al.*, 2011)

De même, des améliorations techniques de l'instrumentation géophysique ont permis d'analyser le bruit sismique pour progresser dans la prévision des éruptions (Brenguier *et al.*, 2008 ; Valade *et al.*, 2014), de mesurer les vitesses d'éjection des particules volcaniques (par radar doppler ; Donnadieu *et al.*, 2011), ou encore de suivre en temps réel l'activité volcanique par télédétection satellitaire. Le développement de la tomographie sismique, électrique, muons cosmiques et de l'imagerie satellitaire multi-échelles a mené à une amélioration significative dans le domaine de l'imagerie géophysique du système volcanique (magmatique et surtout hydrothermal ; e.g. Revil *et al.*, 2011, Fig. 4 ; Brothelande *et al.*, 2014 ; Lesparre *et al.*, 2012). Le couplage des différentes méthodes géophysiques (GPS, sismométrie, gravimétrie, magnétisme, OBS, InSAR) a permis de mieux contraindre les déformations des édifices

volcaniques et d'y associer des mouvements de magma ou fluides (e.g. Lénat *et al.*, 2012), ainsi que la reconnaissance et la quantification des déstabilisations de flancs (Clarke *et al.* 2013).

Ces dernières années, des découvertes et progrès remarquables ont été réalisés grâce à l'approche expérimentale (analogique ou en température et pression). En parallèle, des expériences destinées à contraindre les conditions de pression, température, oxydoréduction et teneurs en volatils pour le stockage des magmas en profondeur (e.g. Andujar & Scaillet, 2012), des études in-situ, dynamiques et cinétiques se sont développées pour appréhender les conditions d'éruption, de dégazage (e.g. Martel & Iacono-Marziano, 2015), de cisaillement, de mélange des magmas, ou de dépôts des produits émis (Girolami *et al.*, 2015). Ces expériences *in situ* et dynamiques permettent en particulier d'étudier l'évolution avec le temps d'un certain nombre de paramètres clés à la compréhension du fonctionnement du système volcanique.

Ces nouvelles techniques de quantification des paramètres physiques, chimiques et temporels, ont permis une progression remarquable dans la modélisation des processus magmatiques mis en jeu lors des éruptions volcaniques (e.g. détermination des conditions pré- et synéruptives, causes de la transition effusive-explosive, dynamique des jets explosifs, rôle du système hydrothermal, ou écoulements pyroclastiques ; Kelfoun, 2011).

• Forces et faiblesses de la communauté volcanologique

Les équipes françaises montrent un très bon leadership de projets scientifiques nationaux et internationaux, notamment en ce qui concerne la géochimie des fluides, la pétrologie expérimentale ou la modélisation numérique et analogique. Ces efforts de leadership et de coopération se traduisent par une excellente renommée internationale dans certains domaines de la volcanologie. La participation des scientifiques français dans les instances internationales est également très active.

Cependant, et malgré des interactions accrues entre les principaux instituts de recherche dans le domaine, il n'y a pas suffisamment de structuration de la communauté volcanologique française, notamment entre les programmes de recherche et les tâches d'observation. Ce manque de coordination et de mise à disposition de l'ensemble des compétences et forces en présence françaises constituent d'une part un frein à la pleine reconnaissance de la volcanologie française dans son ensemble (représentée par toutes ses disciplines) et d'autre part, une faiblesse évidente face à la

gestion d'une crise éruptive dans le cas fort probable à court terme de la réactivation d'un volcan français.

• Éléments de prospective et recommandations pour l'aléa volcanique

La progression dans la compréhension des processus magmatiques a été remarquable ces dernières années, notamment grâce aux progrès techniques de quantification des paramètres physicochimiques contrôlant les éruptions volcaniques. Qu'il s'agisse de mesures directes (gaz, vitesse d'éjecta, géophysiques, imagerie satellitaire) ou d'expérimentation en température-pression ou analogique, l'importance des découvertes réalisées justifie pleinement de maintenir l'effort sur ces développements techniques. La validité des modélisations des dynamismes éruptifs en dépend. Par ailleurs, pour que l'interprétation de ces résultats en termes de dynamisme éruptif soit pertinente, n'oublions pas la nécessité absolue d'études de terrain de qualité (stratigraphie, caractérisation, et étude structurale des dépôts ; e.g. Famin & Michon, 2011 ; Komorowski *et al.*, 2013). A l'heure actuelle, cette discipline est largement sous-valorisée et le risque dans les années à venir est de manquer de cette expertise précieuse que des observations satellitaires ne pourront pas remplacer. En parallèle des études sur les éruptions magmatiques, un point qui commence à révéler toute son importance dans l'estimation de l'aléa est l'étude du système hydrothermal et des éruptions phréatiques. En effet, les éruptions phréatiques montrent souvent peu ou pas de signes précurseurs (contrairement aux éruptions magmatiques), mais sont souvent elles-mêmes le signe précurseur d'une éruption magmatique. Aux Antilles et sur les volcans explosifs en général, l'éruption phréatique représente un des aléas les plus préoccupants, qu'une meilleure compréhension des systèmes hydrothermaux devrait permettre de mieux contraindre.

Un certain nombre de grandes questions, bien qu'abordées récemment, restent encore à élucider. On peut citer par exemple l'identification des précurseurs des éruptions, l'influence des phénomènes volcaniques sur le climat, la dispersion des panaches volcaniques dans l'atmosphère, les liens entre l'activité tectonique, sismique et volcanique, le lien avec les ressources minérales et la géothermie, le rôle des volcans sur les autres planètes, etc. Répondre à ces questions nécessite de s'intéresser à d'autres domaines tels que la sismologie, la géodynamique, la métallogénie, la climatologie, ou la planétologie. Cette interdisciplinarité est par conséquent à encourager vivement dans les années à venir.

Pour être plus réaliste, l'analyse de l'aléa volcanique doit maintenant intégrer les risques associés tels que les destabilisations de flanc et les tsunamis, ce qui requiert non seulement une surveillance optimisée des volcans actifs (cf. le service national d'observation en volcanologie ; SNOV), mais également une évolution vers une stratégie multidisciplinaire (i.e. une imagerie fonctionnelle associant géophysique et géochimie des magmas, fluides et gaz) qui met à contribution les autres services nationaux d'observation (géodésie-gravimétrie, sismologie, magnétisme, et instabilité de versants).

Pour que la volcanologie française gagne en efficacité et reconnaissance au niveau international et qu'elle soit capable de gérer une crise volcanique sur le territoire, il devient nécessaire et urgent de la structurer davantage, notamment en resserrant les liens entre les programmes de recherche et les tâches d'observation (opérées par les deux OSU de l'IPGP et de l'OPGC). Cette structuration passe entre autres par le montage de projets de recherche (type ANR ou européens) qui intègrent les grandes questions de recherche fondamentale avec celles concernant l'aléa et le risque sur un chantier commun (e.g. aux Antilles ou tout autre volcan actif). Une autre façon d'amorcer la structuration de la communauté serait d'organiser des exercices de simulation de crise éruptive sur un volcan cible, en y faisant participer les protagonistes (nationaux, mais aussi internationaux) de la recherche fondamentale, de la surveillance volcanologique, de la protection civile et des autorités locales. De fait, il est indispensable qu'une réflexion de fond soit engagée par les tutelles ministérielles concernées sur la définition des responsabilités et rôles des différents acteurs en cas de crise majeure (de façon à clarifier au mieux la chaîne du risque sur toute sa longueur, en intégrant la recherche en amont, en passant par l'observation/surveillance, pour aboutir à celui de l'interaction avec les pouvoirs publics et les média régionaux/nationaux).

■ Aléa gravitaire

• Enjeu scientifique et résultats saillants

L'aléa gravitaire n'était pas mentionné parmi les enjeux principaux de la prospective INSU précédente, mais il est reconnu aujourd'hui comme un enjeu de première importance. Les mouvements de terrain constituent en effet des phénomènes ubiquistes, qui se produisent dans tous types de contextes géodynamiques, géologiques et climatiques. Ils présentent des ampleurs très variables (volumes individuels de quelques milliers de m³ à plusieurs centaines de km³), et des mécanismes contrastés depuis les glissements

lents progressifs jusqu'aux épisodes de destabilisations catastrophiques, qui génèrent le plus souvent des débris particulièrement destructeurs. Les phénomènes gravitaires constituent donc une menace importante pour les populations locales, mais également à une échelle régionale, voire globale (exemple des méga-tsunamis générés par les effondrements géants en domaine marin). L'enjeu principal du domaine est la prise en compte de la diversité et de la complexité naturelle du système instable. La caractérisation des instabilités et des différents types et mécanismes de destabilisation par l'étude de cas concrets sur le terrain est une étape importante pour comprendre et discriminer les facteurs favorisant/contrôlant leur déclenchement, et élaborer des modèles prédictifs réalistes pour une meilleure définition de l'aléa. Ces systèmes localisés spatialement se trouvent à l'interface entre le milieu solide et le milieu aérien ou entre le milieu solide et le milieu marin induisant des conditions très différentes à terre et en mer. Sur le territoire français, l'établissement d'un service national d'observation (OMIV) avec quatre sites aériens en complément des projets de recherche spécifique sur certaines cibles alimente cette communauté scientifique.

Les travaux des équipes françaises au cours de ces dernières années ont permis de mettre en évidence et de documenter de nombreux épisodes de destabilisation (dont certains actifs), tant en domaine aérien que marin. Ces travaux portent à la fois sur les zones sources (architecture et dynamique des glissements), sur les produits générés (avalanches et coulées de débris, écoulements denses...), et dans de rares cas sur l'aléa tsunami (e.g. Schneider *et al.*, 2014). Récemment, des mesures de la dynamique des instabilités (variation rapide des vitesses, pression de fluides...) ont été réalisées, notamment via des données hydrogéologiques et sismique, i.e. le signal sismique émis par les glissements de terrain (e.g. Moretti *et al.*, 2014), la sismicité des versants rocheux instables (e.g. Helmstetter & Garambois, 2010) ou la chute de la vitesse des ondes de cisaillement. La caractérisation 3D haute résolution tant au niveau aérien (SAR, LIDAR) que marin (sondeur multi-faisceau) peut identifier les zones potentielles d'instabilité mais aussi assurer un suivi dans le temps pour des évolutions lentes. Ces cartographies sont à mettre en lien avec celles réalisées sur l'ensemble du globe et sur d'autres planètes. Par ailleurs, un suivi temporel local d'observations multi-paramétriques illustrent la variabilité de comportement des systèmes gravitaires et permet d'identifier les observables pertinents de l'évolution du système. La quantification du volume mobilisé et de son étendue spatiale finale pour des glissements passés et futurs doivent être extraites. La modélisation de ces écoulements, en intégrant de plus en plus les aspects tridimensionnels et le type de contact avec la partie immobile, émerge tant dans une approche déterministe que stochastique (Taboada & Estrada,

Comité Thématique 3 «Aléas, risques et catastrophes telluriques»

2009). Un second enjeu est d'établir des lois rhéologiques pour les phases d'endommagement, de rupture, de mobilisation et de propagation des produits, à l'image des travaux récents révélant l'affaiblissement frictionnel dans les glissements sur Terre et sur les autres planètes (Lucas *et al.*, 2014).

Un autre point crucial dans l'estimation de l'aléa gravitaire lié aux grands glissements de terrain est le facteur temps. En effet, les régions montagneuses sont des zones particulièrement actives en termes de glissements de terrain, mais leur évolution intervient sur de longues périodes de temps (> 100 ans), leur occurrence apparaissant ainsi hautement stochastique sur un temps « humain ». En particulier, ces phénomènes gravitaires de grande ampleur sont caractérisés par une cinétique de rupture évolutive, du glissement lent au collapse rocheux soudain. Un enjeu important est donc de parvenir à reconstruire l'évolution des structures gravitaires au cours du temps, et/ou de dater les événements catastrophiques survenus dans le passé. Cette approche est importante non seulement pour déterminer la récurrence des phénomènes, mais également pour établir leurs éventuelles corrélations avec les différentes sollicitations régionales ou globales (volcanisme, tectonique, climat). Ces questions scientifiques constituent notamment un enjeu primaire pour la gestion des territoires et des risques alors engendrés.

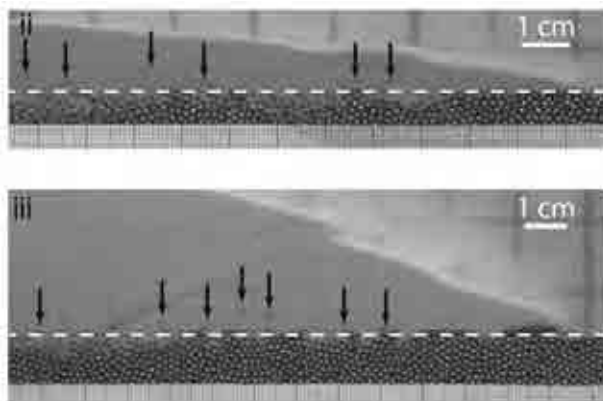


Figure 5 : Expérimentation analogique de caractérisation des conditions d'écoulements gravitaires (Roche *et al.*, 2013).

De manière générale, ces recherches ont montré la nécessité de prendre en compte de nombreux paramètres tels que les effets des sollicitations sismiques, volcaniques et climatiques, la fragmentation du milieu, les effets thermiques, ou le rôle des fluides dans la rupture, l'écoulement, l'érosion/déposition, et l'hétérogénéité des matériaux (e.g. Boudon *et al.*, 2013; Meunier *et al.*, 2013; Roche *et al.*, 2013; Cappa *et al.*, 2014). L'étude des processus gravitaires nécessite donc des collaborations étroites entre les scientifiques de ces principaux domaines. Dans ce contexte, les résultats saillants de la communauté française concernent :

- L'identification de différentes signatures sismiques dans les processus d'instabilité et d'écoulements gravitaires ;
- L'établissement de lois d'affaiblissement mécanique, en particulier la friction ;
- La compréhension du rôle des fluides dans la rupture des versants rocheux.

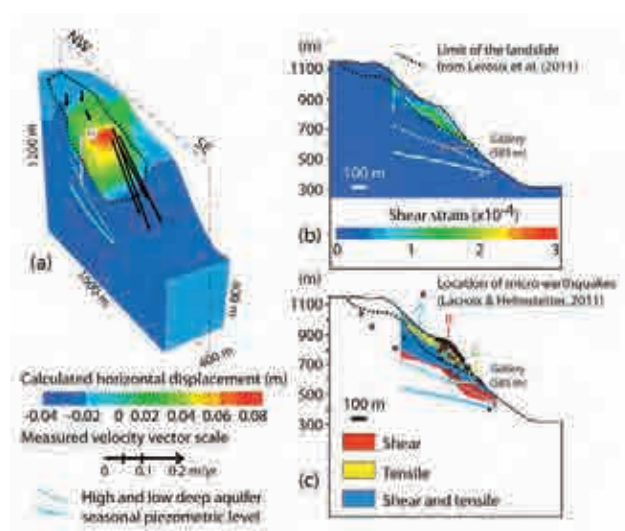


Figure 6 : Rôle des fluides dans la genèse d'un glissement de terrain (Cappa *et al.*, 2014).

• Forces et faiblesses de la communauté

La force de la communauté française réside à la fois dans l'étude sur le terrain des déstabilisations passées et actuelles et la modélisation numérique des processus d'instabilités et d'écoulement gravitaires, avec une reconnaissance internationale de premier plan dans ces domaines. Toutefois, si nous avons progressé sur la modélisation, il nous reste des efforts à faire pour développer des réseaux denses de mesures sismologiques, géodésiques et hydrogéologiques sur les glissements de terrain.

La principale faiblesse de la communauté provient du très faible nombre de scientifiques qu'elle compte, résultant parfois en un sentiment d'isolement scientifique face à la mobilisation des communautés sismologiques et volcanologiques.

• Éléments de prospective et recommandations pour l'aléa gravitaire

Les perspectives en termes d'aléas gravitaire sont de plusieurs ordres :

- Promouvoir la rencontre entre chercheurs français et étrangers travaillant sur l'aléa gravitaire, afin de stimuler les

échanges scientifiques et permettre éventuellement la définition de chantiers d'études et d'actions communes pour les années à venir ;

- Intégrer les résultats scientifiques dans les systèmes d'alertes.

Ces deux objectifs passent par le développement de réseaux d'observations denses sur quelques cibles bien identifiées pour améliorer les modèles décrivant à la fois les déformations lentes (ans) et rapides (secondes à minutes) sur plusieurs cycles de rupture. Le suivi long-terme multi-paramètres pour essayer d'identifier des signaux précurseurs, des valeurs seuils au niveau des facteurs de déclenchement et des temps (de délais) entre l'évènement déclencheur et le glissement est particulièrement crucial pour la compréhension, l'estimation de l'aléa, et la gestion du risque. Le déploiement

de ces instrumentations sur plusieurs sites français à terre, en particulier dans le cadre de l'OMIV, doit être étendu, avec l'objectif notamment de diversifier les observations réalisées. L'acquisition des données nécessaires à la compréhension et à la modélisation des effondrements gravitaires bénéficierait d'un accès facilité au parc instrumental national pour les mesures Lidar et entre les instrumentations 'Terre' et 'Mer'.

Les effondrements gravitaires résultant de causes diverses, les projets multi-disciplinaires sont de fait vivement encouragés. De même, l'aléa tsunami doit être naturellement intégré à un projet d'étude des grands glissements de terrain. Il devient indispensable pour des projets sismologiques, tectoniques, volcaniques d'inclure les processus gravitaires pour une estimation intégrée de l'aléa. En domaine océanique, la combinaison des approches Terre-Mer devrait être encouragée.

Références citées

- Allard P., Aiuppa A., Beauducel F., Gaudin D., Di Napoli R., Calabrese S., Parelo F., Crispi O., Hammouya G., Tamburello G., (2014) Steam and gas emission rate from La Soufrière volcano, Guadeloupe (Lesser Antilles): Implications for the magmatic supply during degassing unrest. *Chemical Geology* 384, 76-93.
- Andújar J., Scaillet B., (2012) Experimental Constraints on Parameters Controlling the Difference in the Eruptive Dynamics of Phonolitic Magmas: the Case of Tenerife (Canary Islands). *Journal of Petrology* 53, 1777-1806.
- Aochi H., Poisson B., Toussaint R., Rachez X., Schmittbuhl J., (2014) Self-induced seismicity due to fluid circulation along faults. *Geophysical Journal International* 196 (3), 1544-1563.
- Berthet T., Ritz J.-F., Ferry M., Pelgay P., Cattin R., Drukpa D., Braucher R., Hetenyi G., (2014) Active tectonics in eastern Himalaya: new insights from a first morphotectonic study in central Bhutan. *Geology*, 42, 427-430.
- Bouche, E., Vergnolle S., Staudacher T., Nercessian A., Delmont J.-C., Frogneux M., Cartault F., Le Pichon A., (2012) The role of large bubbles detected from acoustic measurements on the dynamics of Erta 'Ale lava lake (Ethiopia). *Earth and Planetary Science Letters* 295, 37-48.
- Bouchon M., Durand V., Marsan D., Karabulut H., Schmittbuhl J., (2013) The long precursory phase of most large interplate earthquakes. *Nature Geoscience* 6, 299-302.
- Boudon G., Villemant B., Le Friant A., Paterne M., Cortijo E., (2013) Role of large flank-collapse events on magma evolution of volcanoes. Insights from the Lesser Antilles Arc. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 263, 224-237.
- Brenguier, F., Shapiro N.-M., Campillo M., Ferrazzini V., Duputel Z., Coutant O., Nercessian A., (2008) Towards Forecasting Volcanic Eruptions using Seismic Noise. *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo104.
- Brothelande E., Finizola A., Peltier A., Delcher E., Komorowski J.-C., Di Gangi F., Borgogno G., Passarella M., Trovato C., Legendre Y., (2014) Fluid circulation pattern inside La Soufrière volcano (Guadeloupe) inferred from combined electrical resistivity tomography, self-potential, soil temperature and diffuse degassing measurements. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 288, 105-122.
- Cappa F., Guglielmi Y., Viseur S., Garambois S., (2014) Deep fluids can facilitate rupture of slow-moving giant landslides as a result of stress transfer and frictional weakening. *Geophysical Research Letters* 41, 1-6.
- Clarke D., Brenguier F., Froger J.-L., Shapiro N.-M., Peltier A., Staudacher T., (2013) Timing of a large volcanic flank movement at Piton de la Fournaise Volcano using noise-based seismic monitoring and ground deformation measurements. *Geophysical Journal International* 195, 1132-1140.
- Courboux F., Dujardin A., Vallée M., Delouis B., Sira C., Deschamps A., Honoré L., Thouvenot F., (2013) High frequency directivity effect for an Mw 4.1 earthquake, widely felt by the population in southeastern France. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 103, 3347-3353, 2013.
- Delouis B., Nocquet J.-M., Vallée M., (2010) Slip distribution of the February 27, 2010 Mw = 8.8 Maule Earthquake, central Chile, from static and high-rate GPS, InSAR, and broadband teleseismic data. *Geophysical Research Letter*, DOI: 10.1029/2010GL043899
- Donnadieu F., Valade S., Moune S., (2011) Three dimensional transport speed of wind-drifted ash plumes using ground-based radar. *Geophys. Res. Lett.* 38, L18310, doi:10.1029/2011GL049001
- Duputel Z., Rivera L., Kanamori H., Hayes G. (2012) W-phase fast source inversion for moderate to large earthquakes (1990 - 2010). *Geophysical Journal International* 189, 2, 1125-1147.
- Famin V., Michon L., (2010) Volcano destabilization by magma injections in a detachment, *Geology* 38, 219-222.
- Gélis C., Bonilla L.-F., (2014) Influence of a sedimentary basin infilling description on the 2-D P-SV wave propagation using linear and non-linear constitutive models. *Geophysical Journal International* 198, 1684-1700.
- Girolami L., Druitt T., Roche O., (2015) Towards a quantitative understanding of pyroclastic flows: Effects of expansion on the dynamics of laboratory fluidized granular flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 296, 31-39.
- Helmstetter A., Garambois S., (2010) Seismic monitoring of Séchillienne Rockslide (French Alps): analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls. *Journal of Geophysical Research* 115, DOI: 10.1029/2009JF001532
- Kelfoun K., (2011) Suitability of simple rheological laws for the numerical simulation of dense pyroclastic flows and long-runout volcanic avalanches, *J. Geophys. Res., Solid Earth*, doi:10.1029/2010JB007622.
- Kinscher J., Bernard P., Contrucci I., Mangeney A., Pigué J.-P., Bigarre P., (2015) Location of microseismic swarms induced by salt solution mining. *Geophys. J. Int.* 200, 337-362.
- Komorowski, J.-C., Jenkins S., Baxter P. J., Picquout A., Lavigne F., Charbonnier S., Gertisser R., Preece K., Cholik N., Budi-Santoso A., et al. (2013) Paroxysmal dome explosion during the Merapi 2010 eruption: Processes and facies relationships of associated high-energy pyroclastic density currents. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 261, 260-294.
- Lenat, J.-F., Bachelery P., Peltier A., (2012) The interplay between collapse structures, hydrothermal systems, and magma intrusions: the case of the central area of Piton de la Fournaise volcano. *Bulletin of Volcanology* 74, 407-421.

- **Lesparre, N., Gibert D., Marteau J., Komorowski J.-C., Nicollin F., Coutant O.,** (2012) Density muon radiography of La Soufriere of Guadeloupe volcano: comparison with geological, electrical resistivity and gravity data. *Geophysical Journal International* 190.
- **Lucas A., Mangeney A., Ampuero J.-P.,** (2014) Frictional velocity-weakening in landslides on Earth and on other planetary bodies. *Nature Communications* 5, doi:10.1038/ncomms4417.
- **Manighetti I., Perrin C., Dominguez S., Garambois S., Gaudemer Y., Malavieille J., Matteo L., Delor E., Vitard C., Beaupêtre S.,** (2015) Recovering paleoearthquake slip record in a highly dynamic alluvial and tectonic region (Hope Fault, New Zealand) from airborne lidar. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, DOI: 10.1002/2014JB011787, sous presse.
- **Martel C., Iacono-Marziano G.** (2015) Bubble coalescence, outgassing, and foam collapsing in decompressed rhyolitic melts. *Earth and Planetary Science Letters* 412, 173-185.
- **Meunier, P., Ushida T., Hovius N.** (2013) Landslide patterns reveal the source of large earthquakes. *Earth Planet. Sci. Lett.* 363, 27-33.
- **Moretti L., Allstadt K., Mangeney A., Capdeville Y., Stutzmann E., Bouchut F.,** (2015) Numerical modeling of the Mount Meager landslide constrained by its force history derived from seismic data. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, doi:10.1002/2014JB011426.
- **Morizet Y., Brooker R.-A., Iacono-Marziano G., Kjarsgaard B.-A.,** (2013) Quantification of dissolved CO₂ in silicate glasses using micro-Raman spectroscopy. *American Mineralogist* 98, 1788-1802.
- **Moune S., Sigmarsson, O., Thordarson T., Schiano P., Keiding J.,** (2012) Melt inclusion constraints on the magma source of Eyjafjallajökull 2010 flank eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 117, doi:10.1029/2011JB008718.
- **Passelègue F.-X., Schubnel A., Nielsen S., Bhat H.-S., Madariaga R.,** (2013) From Sub-Rayleigh to Supershear Ruptures During Stick-Slip Experiments on Crustal Rocks. *Science* 340, 1208-1211.
- **Pouderoux H., Proust J.-N., Lamarche G.,** (2014) Submarine paleoseismology of the northern Hikurangi subduction margin of New Zealand as deduced from turbidite record since 16 ka. *Quaternary Sciences Reviews* 84, 116-13.
- **Revil A., Finizola A., Ricci T., Delcher E., Peltier A., et al.** (2011) Hydrogeology of Stromboli volcano, Aeolian Islands (Italy) from the interpretation of resistivity tomograms, self-potential, soil temperature and soil CO₂ concentration measurements. *Geophysical Journal International* 186 (3), 1078-1094.
- **Roche O., Niño Y., Mangeney A., Brand B., Pollock N., Valentine G.,** (2013) Dynamic pore pressure variations induce substrate erosion by pyroclastic flows. *Geology* 41, 1107-1110.
- **Schneider J.-L., Chague-Goff C., Bouchez J.-L., Goff J., Sugawara D., Goto K., Jaffe B., Richmond B.,** (2014) Using magnetic fabric to reconstruct the dynamics of tsunami deposition on the Sendai Plain, Japan - The 2011 Tohoku-oki tsunami. *Marine Geology* 358, 89-109.
- **Schubnel A., Brunet F., Hilairet N., Gasc J., Wang Y., Green H.-W.,** (2013) Deep-Focus Earthquake Analogs Recorded at High Pressure and Temperature in the Laboratory. *Science* 341, 1377-1380
- **Steer P., Simoes M., Cattin R., Shyu B.-H.,** (2014) Erosion influences the seismicity of active thrust faults. *Nature Communication* 5, doi:10.1038/ncomms6564.
- **Taboada A., Estrada N.,** (2009) Rock-and-soil avalanches: theory and simulation. *Journal of Geophysical Research* 114, 10.1029/2008JF001072.
- **Valade S., Donnadieu F., Lesage P., Mora M., Harris A., Alvarado G.E.,** (2012) Explosion mechanisms at Arenal volcano, Costa Rica: an interpretation from integration of seismic and Doppler radar data. *J. Geophys. Res.* 117, B01309, doi:10.1029/2011JB008623.
- **Vallée M., Dunham E.-M.,** (2012) Observation of far-field Mach waves generated by the 2001 Kokoxili supershear earthquake. *Geophys. Res. Lett.* 39, L05311.
- **Vallée M., Nocquet J.-M., Battaglia J., Font Y., Segovia M., Régnier M., Mothes P., Jarrin P., Cisneros D., Vaca S., Yepes H., Martin X., Béthoux N., Chlieh M.,** (2013) Intense interface seismicity triggered by a shallow slow-slip event in the Central-Ecuador subduction zone. *J. Geophys. Res.* 118, 2965-2981.
- **Viens L., Laurendeau A., Bonilla L.-F., Shapiro N.-M.,** (2014) Broad-band acceleration time histories synthesis by coupling low-frequency ambient seismic field and high-frequency stochastic modelling. *Geophysical Journal International* 199(3), 1784-1797.
- **Vigny C., et al.** (2011) The 2010 Mw 8.8 Maule Megathrust Earthquake of Central Chile, Monitored by GPS. *Science* 332, 1417-1421.
- **Vlastelic I., Staudacher T., Deniel C., Devidal J.-L., Devouard B., Finizola A., Telouk P.,** (2013) Lead isotopes behavior in the fumarolic environment of the Piton de la Fournaise volcano (Reunion Island). *Geochimica and Cosmochimica Acta* 100, 297-314.

Comité Thématique 4

« Terre Vivante »

Appel d'offre : INTERRVIE (Interactions Terre/Vie)

Giovanni Aloisi (LOCEAN), Gilles Escarguel (LEHNA), Frédéric Marin (Biogéosciences), Thomas Servais (Evo-Eco-Paleo)

Comité scientifique : Karim Benzerara (IMPMC), Thomas Servais (Géosystèmes Lille), Giovanni Aloisi (LOCEAN)

Olivier Beyssac (IMPMC), Sylvie Crasquin (CR2P), Gilles Escarguel (LEHNA), Frédéric Marin (Biogéosciences Dijon), Brigitte Meyer-Berthaud (CIRAD), David Moreira (ESE Orsay), Pascal Neige (Biogéosciences Dijon), Didier Nereaudau (Géosciences Rennes), Stéphane Peigne (CR2P).

■ Grands enjeux scientifiques du domaine

Le domaine Terre vivante concerne cinq grands axes thématiques, les (R)évolutions du vivant et l'histoire de la vie, la biosphère microbienne profonde et les interactions vivants-minéral, l'impact du vivant sur les cycles biogéochimiques et la taphonomie et préservation.

L'enjeu pour les géobiologistes est de reconstituer le déroulement et les mécanismes de l'histoire complexe et chaotique de l'évolution du vivant au cours des 3,5 derniers milliards d'années. L'étude des grandes transitions qui jalonnent cette histoire s'impose comme un axe majeur structurant la communauté autour de trois thématiques complémentaires :

- **La question des origines** (de la vie, des eucaryotes, des métazoaires, de la biominéralisation, de l'os, des écosystèmes marins modernes, des écosystèmes terrestres, des amniotes),
- **Les grandes radiations phylogénétiques** (édiacarienne, cambro-ordovicienne, des amniotes, des angiospermes, des mammifères placentaires),
- **Les crises biotiques** et leur corollaire, **les phases de reconquêtes** (crises Ordovicien/Silurien, fini-Dévonien, Permien-Trias et Crétacé/Paléogène, événements anoxiques mésozoïques).

Ces thématiques façonnent une véritable discipline d'interface, aux frontières de la paléontologie, de la sédimentologie, de la biogéochimie et de la géomicrobiologie. Elle vise à évaluer l'impact des événements géologiques sur la biosphère, évaluer l'impact de la biosphère sur la surface de la Terre, et à identifier les modalités d'enregistrement et de préservation des traces de vie.

L'existence d'une *biosphère microbienne dans l'environnement intra-terrestre profond* est l'une des découvertes majeures de ces quinze dernières années. Les forages océaniques

ont montré que les microorganismes sont présents et métaboliquement actifs à une profondeur de 1600 m sous le fond marin. L'étude de la biosphère microbienne profonde est l'un des trois enjeux majeurs dans la prospective 2013-2023 du programme IODP. Les défis majeurs sont de comprendre les sources d'énergie métabolique, la diversité biologique, et les processus d'interaction avec les minéraux.

Les enjeux de l'étude des interactions vivants-minéral sont de comprendre les processus de *biominéralisation* et de *bioaltération*. La biominéralisation est un processus bio-sédimentaire réalisé en équilibre ou non avec le milieu qui est une révolution majeure de l'histoire de la vie : stromatolithes archéens, métazoaires à la transition Précambrien/Cambrien, ou encore diatomées & coccolithophores au Méso-Cénozoïque. Elle permet un archivage unique des conditions environnementales actuelles et passées, et participe à l'homéostasie du système Terre (grands cycles biogéochimiques). Les biominéraux formés constituent des sources d'informations paléoenvironnementales qu'il faut décrypter en déconvoluant les signaux produits par les effets vitaux. La bioaltération, corollaire de la biominéralisation, est le processus par lequel le vivant dissout ou altère des minéraux. Ce processus se déroule dans de nombreux environnements en surface, sub-surface et en profondeur (fonds océaniques, (paléo)-sols). Dans le registre fossile, la bioaltération témoigne de l'activité passée du vivant. Actuelle, elle impacte les cycles biogéochimiques globaux : des travaux récents mettant en lien la bioaltération de silicate et le piégeage de CO₂ (par des bactéries) sous forme de carbonate, ont une réelle portée environnementale.

Les processus métaboliques fondamentaux qui fournissent l'énergie pour les activités vitales des organismes (photosynthèse, respiration aérobie, sulfato-réduction) et qui sont impliqués dans la biominéralisation ou la bioaltération jouent un rôle fondamental dans les cycles biogéochimiques globaux. Un des enjeux principaux de la géobiologie est de quantifier *le rôle de la biosphère dans ces cycles*, et *in fine* dans

le climat et son évolution. Ainsi, par exemple, la colonisation progressive du domaine continental par les plantes durant le Paléozoïque aurait modifié de façon irréversible les conditions environnementales sur Terre. Par son impact sur l'érosion chimique et le transport des sédiments, la terrestrialisation a joué un rôle majeur dans la diminution de la concentration de CO₂. Par la suite, l'apparition des plantes à fleurs et leur colonisation des écosystèmes terrestres au Crétacé a probablement induit des rétroactions importantes sur l'atmosphère. En domaine océanique, le développement, au Trias supérieur, de la calcification par les coccolithophoridés puis, au Jurassique moyen, par les foraminifères planctoniques a favorisé :

- Le transfert du dépôt des carbonates des plates-formes néritiques épicontinentales vers l'océan profond ;
- L'apparition d'un gradient vertical d'alcalinité ;
- La mise en place de la CCD, qui joue un rôle majeur dans les cycles biogéochimiques globaux.

Au *passage vivant-fossile*, des phénomènes physico-chimiques complexes altèrent les signaux biologiques. Dès lors, il est indispensable d'appréhender ces perturbations taphonomiques afin d'en évaluer l'impact sur les reconstructions paléoenvironnementales, mais aussi la signification des éléments anatomiques et des caractéristiques biochimiques associés à ces fossiles. A l'exception de la communauté proche de l'archéo-

logie, la paléontologie en France accuse un retard par rapport aux nations majeures de la discipline (GB, USA, Allemagne). Plusieurs approches complémentaires sont envisageables pour replacer la recherche en taphonomie à un niveau d'excellence internationale.

■ Résultats saillants des cinq dernières années

Parmi les résultats originaux concernant l'évolution de la vie, il faut citer ce qui concerne les récupérations post-crise avec la mise en évidence par Brayard et al. 2011, Fig. 1 et 2, de la réapparition rapide, au Trias inférieur, de récifs à micro-organismes et éponges, ainsi que de nombreux métazoaires associés à la suite de l'extinction de masse fin-permienne. De leur côté Morard et al. 2013 ont montré comment la prise en compte de la diversité cryptique chez quatre morpho-espèces actuelles de foraminifères planctoniques améliore la précision des fonctions de transfert (prédiction de la température de surface de la mer (SST)) basées sur ces organismes.

Le résultat le plus emblématique concernant la biosphère profonde a été la preuve directe de l'existence d'écosystèmes profonds nourris par les volatiles dérivant de l'hydratation du manteau océanique (Ménez, B., *et al.*, 2012, Fig 3). Cette



Fig1 : Développement rapide (< 2M.a. après la crise Permien-Trias) de récifs à microbes et éponges riches en métazoaires. Brayard et al. (2011) – Nature Geoscience 4, 693-697.

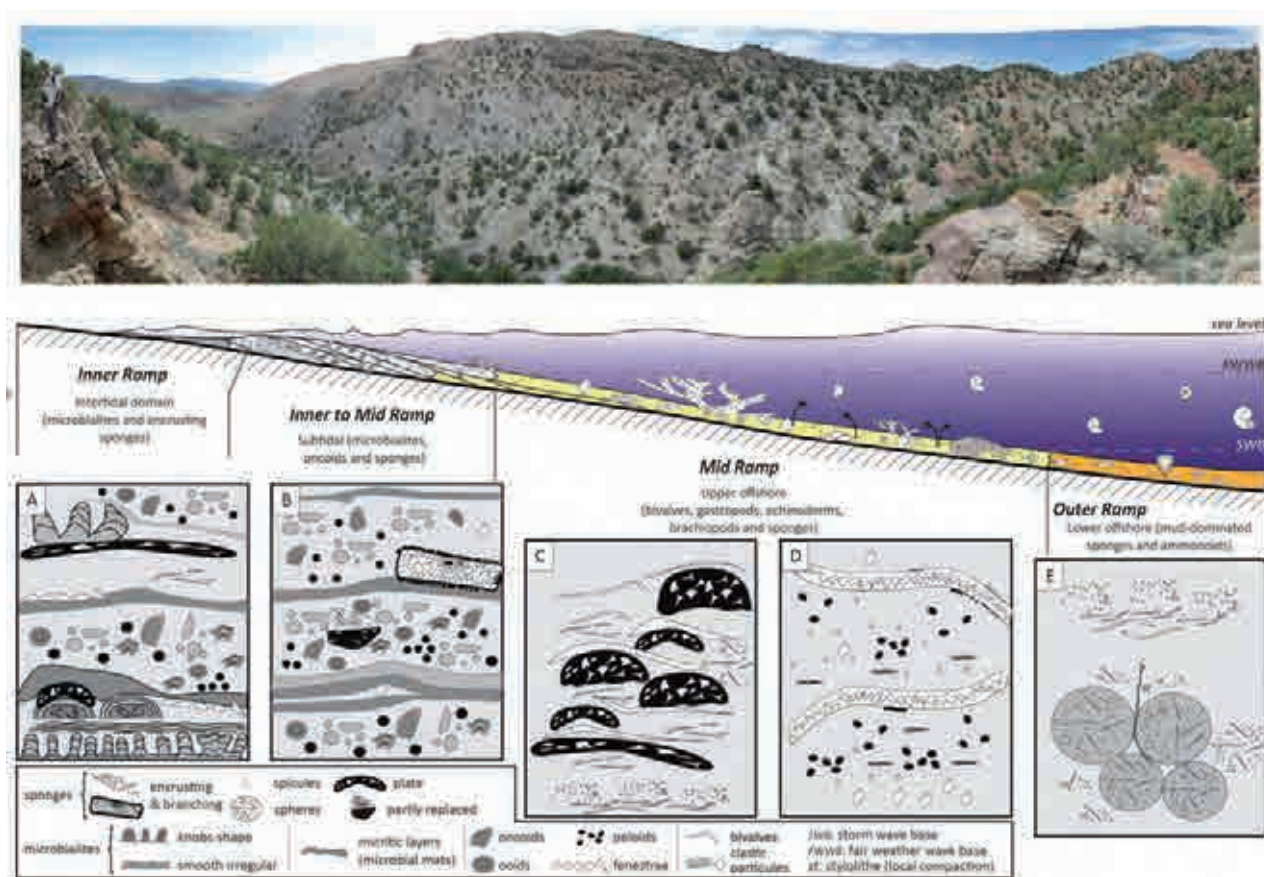


Fig. 2: Reconstitution des récifs à microbe et éponges riches en métazoaires Bayard et al. (2011) – Nature Geoscience 4, 693-697.

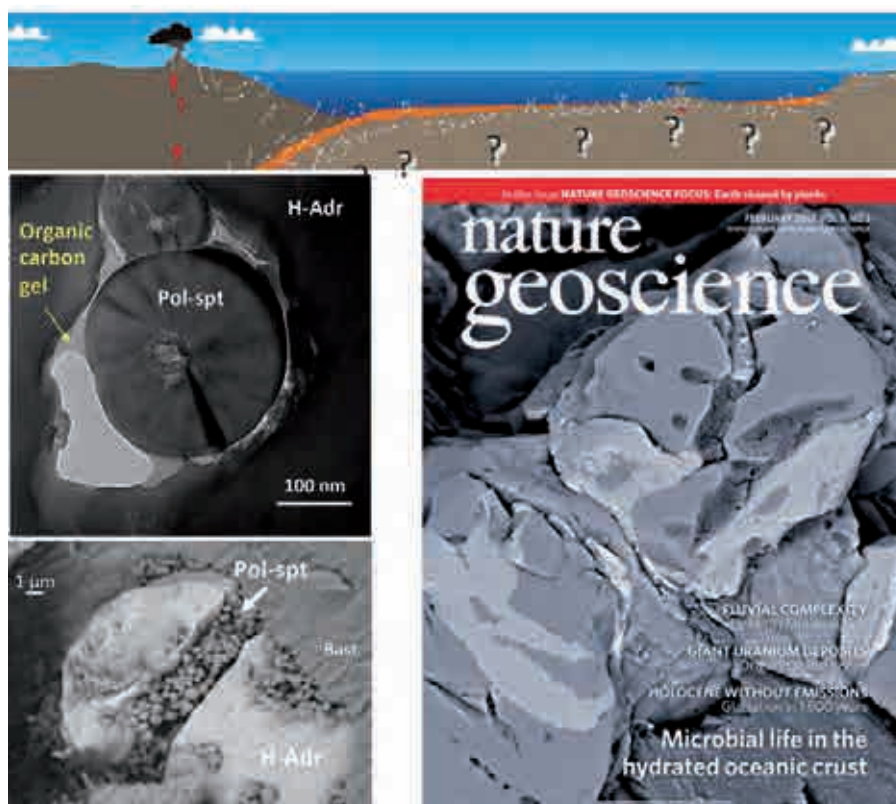


Fig. 3: Étude menée sur des échantillons de péridotites hydratées (ou « serpentinisées ») provenant du massif Atlantis près de la ride médio-atlantique. Des investigations en microscopie électronique et spectroscopie Raman ont permis d'y détecter des accumulations de carbone endogène d'origine biologique. Ménez, B., et al., 2012

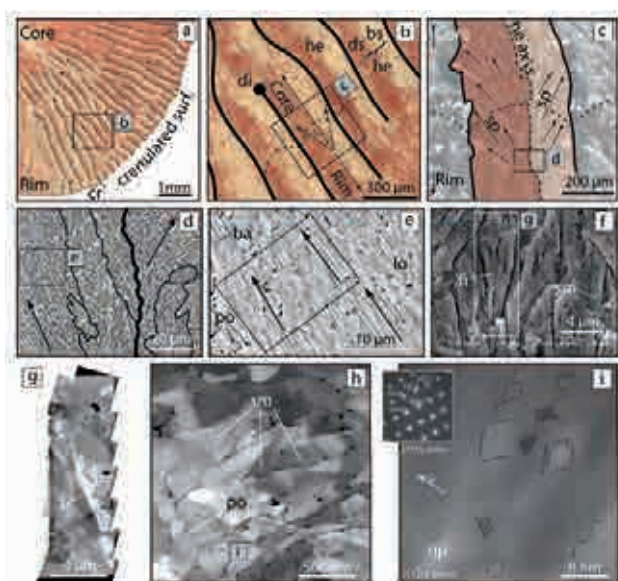


Fig. 4: Cristallographie du Corail rouge. Cette étude montre que c'est l'association d'un ordre cristallographique et d'interfaces de faible désorientation à tous les niveaux qui permet une liberté de formes observée chez le Corail rouge. Vielzeuf et al., 2010.

découverte repousse les limites de la colonisation microbienne bien au-delà des systèmes hydrothermaux des fonds océaniques.

Plusieurs avancées ont été faites sur les biominéraux. Tout d'abord, leur structure a été explorée. Les biominéraux présentent une hiérarchie microstructurale multi-échelle (ex.



Fig. 5: Image de *Candidatus Gloeomargarita lithophora*. On distingue à l'intérieur de la cyanobactérie les inclusions de carbonates de calcium, magnésium, strontium et baryum. Couradeau et al. (2012), *Science* 336, 6080 (459-462).

du corail rouge Vielzeuf *et al.*, 2010, Fig. 4) jamais observée sur des minéraux précipités chimiquement. Des calculs *ab initio* permettent de mieux comprendre la structure atomique de biominéraux récents ou fossiles et ainsi de mieux diagnostiquer s'ils portent une information originelle ou bien transformée par la diagénèse (Yi H., *et al.* 2014). La formation des biominéraux est un processus dynamique de cristallisation 'non conventionnelle'. La découverte de cyanobactéries formant des carbonates intracellulaires amorphes remet en question la vision classique d'un processus de calcification purement extracellulaire (Couradeau E., *et al.*, 2012, Fig. 5). Les acteurs macromoléculaires (protéines, polysaccharides) de

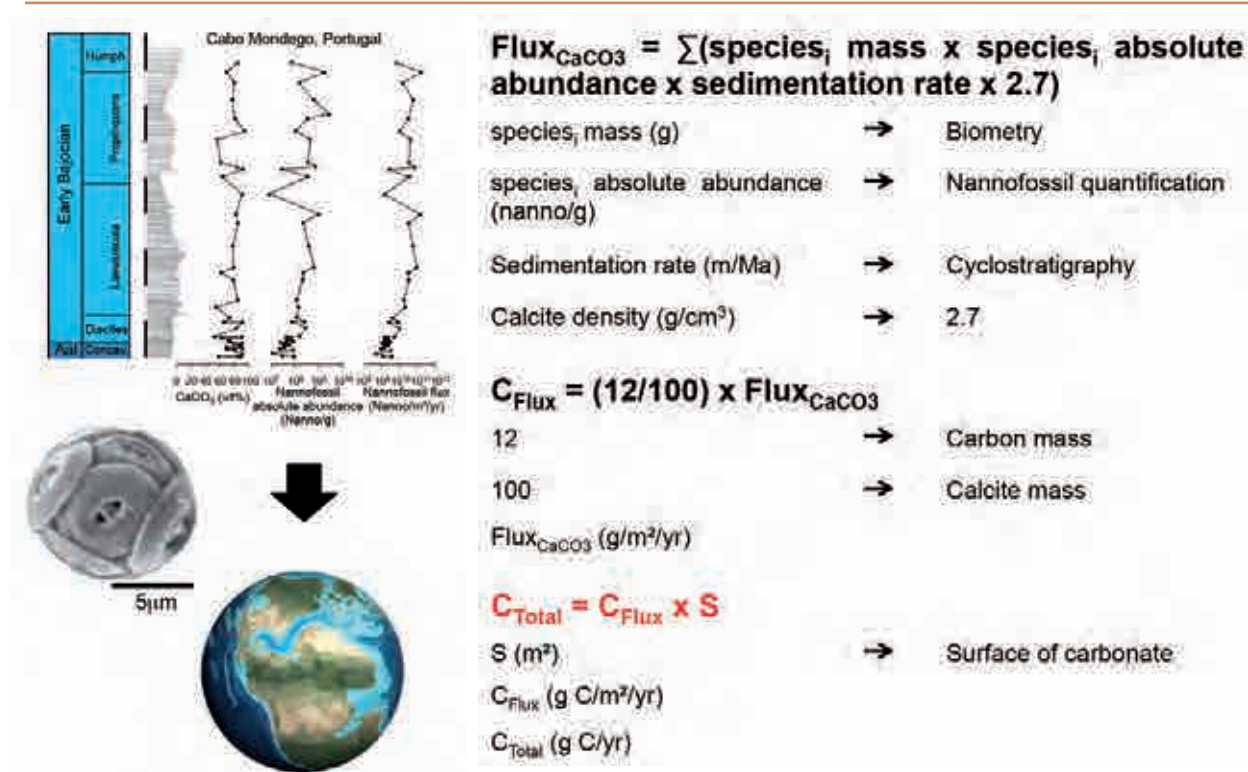


Fig. 6: Impact du vivant sur les cycles biochimiques, Suchéras-Marx, B., et al. 2012.

la matrice minéralisante sont identifiés chez les métazoaires, ce qui conduit à mettre en évidence une grande diversité des fonctions moléculaires mises en jeu (Marin, F., *et al.*, 2012).

Enfin, des analyses protéomiques montrent que la calcification a pu être inventée de nombreuses fois chez les métazoaires, et que certaines macromolécules, initialement dédiées à d'autres fonctions, ont été cooptées pour la minéralisation (Marie, B., *et al.*, 2013).

Une partie des travaux concernant le rôle de la biosphère dans les cycles biogéochimiques et l'évolution du climat a été intégrée dans l'action SYSTER (CT2) plutôt que dans INTERRVIE (CT4). Deux résultats très importants sont cependant imputables à un financement du CT4 : le premier concerne l'impact de la diversification d'un coccolithophore sur le cycle du carbone (Suchéras-Marx, B., *et al.* 2012, FIG. 6) et le second décrit quantitativement comment les évolutions climatiques et eustatiques ont contrôlé la paléobiogéographie des ammonites au moment de la crise Pliensbachien-Toarcien (Dera G., *et al.*, 2011).

■ Forces et faiblesses de la communauté nationale

La première des forces de la communauté française est l'émergence d'interdisciplinarités avec notamment une communauté de minéralogistes/géochimistes experts de techniques spectroscopiques et microscopiques qui s'intéressent au vivant. La caractérisation à micro- et nano-échelle des objets d'intérêt géobiologique est en pointe au niveau de la communauté française. Les outils utilisés sont : microscopes Raman (Lyon, IMPMC, IPGP), microscopies électroniques (MEB, MET et FIB) à Lille, Paris (IMPMC et depuis peu IPGP) et Lyon ; NanoSIMS/ToF-SIMS (IMPMC ; Lille) ; microsonde ionique (CRPG) ; CT-scan (CR2P-MNHN ; Lille) ; lignes synchrotrons Grenoble (notamment microscopie X ; tomographie X), SOLEIL (ligne PUMA dédiée au « paléo », STXM à venir, Nanoscopium à venir, Infrarouge). Grâce à INTERRVIE, des rapprochements ont été faits entre des géochimistes/minéralogistes et des sédimentologues et/ou paléontologues. De même, un développement de l'interface avec la biologie moléculaire et la microbiologie est en cours même si nos forces restent limitées en comparaison de ce qui se fait, par exemple, aux USA. En bioinformatique, on note les développements à l'interface avec les sciences de la Terre, notamment à l'IMPMC pour l'utilisation des données métagénomiques.

La communauté peut aussi s'appuyer sur des *gisements fossillifères remarquables* Lagerstätten du Carbonifère (ex : Monceau), du Jurassique (ex : La Voulte), du Crétacé (ex :

Archingeay), du Tertiaire (ex : phosphorites du Quercy) permettant des approches pluridisciplinaires sur des (assemblages de) fossiles à préservation exceptionnelle, ainsi que sur des *collections paléontologiques de référence mondiale* (Muséum National d'Histoire Naturelle (collections patrimoniales nationales), Université Pierre & Marie Curie, Universités de Lyon, de Lille...). Ces collections sont traitées par le CNRS-INSU et par les universités comme des plates-formes de recherche. Leur labellisation «Grand Instrument National», déjà discutée à plusieurs reprises, devrait aboutir. Enfin, *l'approche expérimentale est en forte voie de développement*, ce qui permet de coupler physico-chimie/géochimie isotopique, thermodynamique et biologie (p. ex., GET, IMPMC, CRPG, IPGP), en particulier en ce qui concerne l'impact des microorganismes sur l'altération et sur la formation des carbonates et des carbonates magnésiens.

Parmi les faiblesses on peut identifier l'existence de *peu d'interaction avec des chimistes des eaux*. Il manque une véritable expertise en chimie aquatique. Une grande partie des processus à l'interface entre biosphère et géosphère a lieu sous forme de réactions chimiques en solution aqueuse (précipitation de minéraux biologiques, fractionnement cinétique de l'oxygène). Des liens doivent être établis entre géobiologistes et chimistes océanographes, par exemple, et un transfert de connaissances doit avoir lieu. D'autre part nous connaissons une *perte d'expertises fondamentales en paléontologie/géologie*. Ceci concerne à la fois l'approche naturaliste (dérive vers une approche globale et l'hyper-spécialisation) et des spécialités telles que la biostratigraphie, la paléobotanique, la palynologie et la micropaléontologie. Enfin, il y a pour l'instant encore *peu d'analyse d'échantillons en conditions natives grâce aux techniques cryogéniques* (congélation des échantillons dans leur solution en glace amorphe alors que ces développements ont déjà bien commencé en Suisse, en Allemagne et aux USA).

■ Éléments de prospective et Recommandations

• Évolutions thématiques

L'analyse de l'évolution de la biodiversité va prendre de plus en plus en compte à la fois la dimension géographique des variations de biodiversité à l'échelle des temps géologiques, encore trop rarement évaluée, et l'intégration des dimensions taxinomiques, morphologiques (disparité), phylogénétiques et fonctionnelles. Ainsi, la caractérisation d'une biodiversité jusqu'alors non-identifiée (cryptique) au sein de certains groupes systématiques actuels offre d'intéressantes perspectives, en termes de reconstruction paléo-

océanographique/paléo-climatique. De plus, l'intégration des variabilités spatio-temporelles de différentes dimensions de la biodiversité affectera les réflexions sur l'érosion actuelle de biodiversité et sur les stratégies de prévention et de remédiation à mettre en œuvre. En dépit de développements méthodologiques récents, les analyses comparatives phylogénétiques restent encore très peu utilisées par nos communautés, alors même que ces approches répondent efficacement à de nombreuses problématiques (par exemple, prédiction de traits morphologiques /écologique aux nœuds d'une phylogénie; mise en évidence de correspondances entre phases de diversification phylogénétique et événements globaux).

Une autre évolution est en train de se produire dans l'étude de la vie profonde. Deux chantiers sont actuellement développés par la communauté française et ont de forts liens avec le programme IODP : *la vie dans la lithosphère océanique* et *la vie dans les géants salifères*. Les péridotites, portées à l'affleurement au fond des océans ou dans les massifs d'ophiolites par le jeu de la tectonique, pourraient constituer le plus grand habitat microbien sur Terre, sachant que les 2/3 de la lithosphère créée le long des 60 000 km de rides océaniques sont surtout constitués de péridotites serpentinisées sur plusieurs kms d'épaisseur. Se pose la question du rôle de ces écosystèmes profonds dans la fixation du carbone, du taux de productivité primaire associé, et des facteurs physico-chimiques qui limitent cette production. Négligée dans les modèles biogéochimiques

actuels, cette vie intra-terrestre semble toutefois jouer un rôle clé (médiateur des flux élémentaires entre lithosphère, océans et atmosphère). D'autre part, depuis le Néoprotérozoïque, les dépôts salifères géants, susceptibles d'abriter une biosphère microbienne profonde diversifiée et active, demeurent encore inexplorés. Le dépôt salifère géant de Méditerranée, d'âge Messinien (6 Ma), est le plus récent connu ; il contient environ 1 million de km³ de roches évaporitiques (gypse, anhydrite), énorme source de sulfate pour les microorganismes sulfato-réducteurs intraterrestres (Aloisi, G., *et al.* 2013, Fig. 7). Cas particulier : les inclusions fluides dans la halite et le gypse, qui constituent un micro-habitat dans lequel les microorganismes peuvent survivre pendant des dizaines de milliers, et peut-être des millions d'années, posant des questions fondamentales quant aux stratégies métaboliques d'adaptation à ces conditions extrêmes.

De *nouveaux proxies géochimiques* vont être développés pour utiliser les biominéraux afin de décrypter l'histoire géochimique de la Terre. Ces développements sont rendus complexes par l'existence des effets vitaux. La compréhension du fonctionnement des effets vitaux hors-équilibre est un enjeu majeur. Les approches 'multi-isotopes' (par exemple, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{11}\text{B}$ (marqueur du pH), $\delta^7\text{Li}$ (possible marqueur du DIC) et D_{47} (traceur indépendant de T, $\delta^{18}\text{O}_{\text{eau}}$)) couplées à une modélisation géochimique des organismes minéralisants offrent d'intéressantes perspectives. La recherche de marqueurs résistants au processus de fossilisation est une

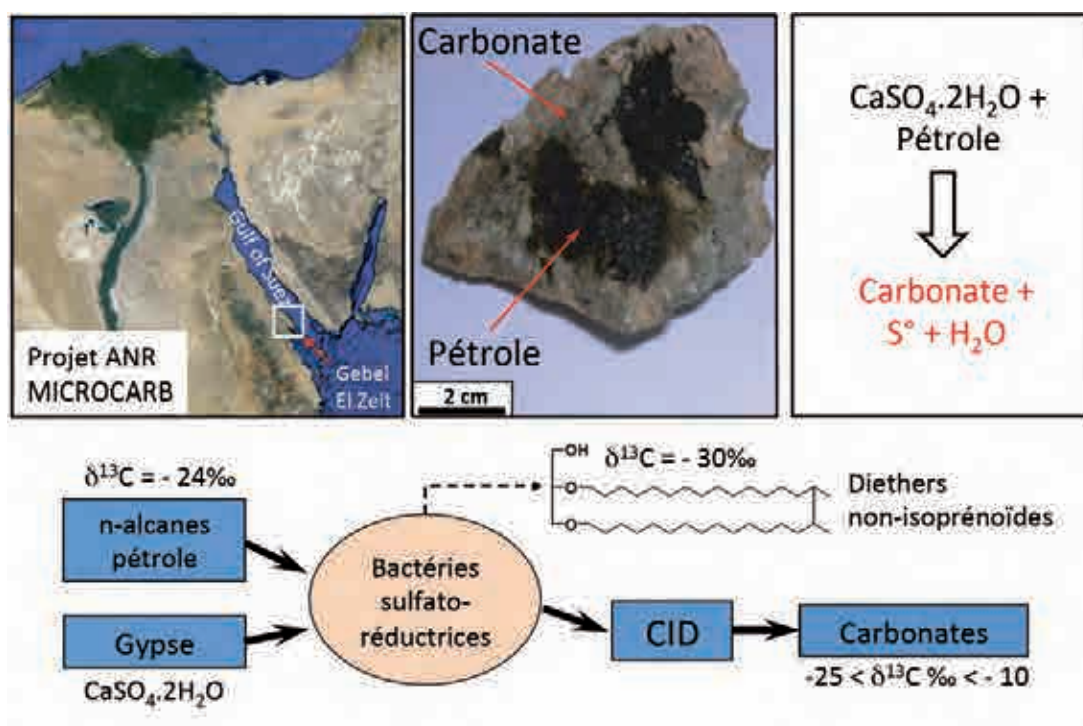


Fig. 7 : Projet ANR MICROCARB, étude de la biosphère microbienne profonde dans les grandes formations salifères. Aloisi, G., *et al.* 2013.

voie d'avenir, *via* le couplage de la géochimie isotopique et des éléments-traces avec l'analyse spectroscopiques et la modélisation moléculaire *ab initio*. Des équipes françaises (IPGP) développent un protocole analytique couplant microfluorescence X par rayonnement synchrotron (SR- μ XRF), absorption X par rayonnement synchrotron (SR- μ XANES) et spectroscopie Raman. Cette approche permet de comprendre l'origine et la remobilisation des métaux dans les stromatolithes modernes et anciens.

L'utilisation des *gisements à conservation exceptionnelle* (Konservat-Lagerstätten et Konzentrat-Lagerstätten) va se développer car ces gisements sont nombreux sur le territoire national et ils offrent de nombreuses perspectives grâce aux techniques modernes (synchrotron, CT-Scan, spectrométrie X, FT-IR, UV, sonde ionique). Le soutien à quelques chantiers phares a déjà démontré son impact scientifique et médiatique. Les travaux de *taphonomie expérimentale* vont se multiplier. La plupart des processus taphonomiques et de diagenèse précoce interviennent à des échelles de temps suffisamment courtes pour être expérimentables. La *taphonomie expérimentale* a déjà montré son intérêt sur la préservation des objets biologiques ou manufacturés, en archéologie. Les protocoles expérimentaux en environnements marins restent à développer : ils permettraient notamment d'explorer les modalités de minéralisation des tissus, en fonction du chimisme des eaux et de la composition des communautés bactériennes. L'*actuo-taphonomie* correspond à l'étude des conséquences des processus taphonomiques en jeu dans la formation des assemblages de restes biologiques accumulés dans les sédiments. Les phénomènes de condensation du temps ou de mélange d'éléments issus de milieux distincts, affectant la structure de la biodiversité dans les assemblages fossiles, sont ainsi quantifiables. Les applications sur la mesure d'autres proxys, notamment géochimiques, utilisés en routine dans la reconstitution des paléo-environnements, restent à explorer. Enfin, les biominéralisations doivent aussi être appréhendées dans leur évolution diagénétique, une problématique bien cernée du point de vue 'minéralogique', mais mal comprise du point de vue 'matrice organique'. Des expériences de diagénèse expérimentale couplées à des analyses protéomiques devraient permettre d'identifier les processus moléculaires de transformation diagénétique, et de lever certains biais d'enregistrement des signaux géochimiques. L'étude de fossiles par microscopie électronique et spectroscopie à l'échelle nanométrique a permis de retracer le processus de fossilisation des composants organiques du point de vue géochimique (Galvez Matthieu E., *et al.*, 2012). Ce type d'étude permet aussi d'appréhender le rôle de la matière organique dans la fossilisation.

■ Recommandations

La première des recommandations qui doit être faite concerne *les collections*, leur exploitation, l'acquisition de données et *les banques de données afférentes*. La notion de collection a été récemment étendue à celle de patrimoine paléontologique et géologique, qui fait désormais l'objet de programmes d'inventaire, de conservation, de gestion et de valorisation à l'échelle nationale, européenne et mondiale (Géoparc). Il faut veiller au *maintien et à la bonne gestion des collections patrimoniales*. Il y a nécessité de développer la notion de patrimoine paléontologique national : sites de référence, sites-écoles et grands chantiers nationaux. Nous devons développer des banques de données qui permettent un stockage et une analyse dans un environnement harmonisé. Quelles que soient les méthodes employées, l'analyse morpho-anatomique des restes fossiles et leur classification restent indispensables. Les informations attachées (localisation, images numériques...) à un objet fossile doivent être accessibles et vérifiables. Elles suffisent souvent à la vérification des identifications. Il faut privilégier le choix d'un modèle commun de description et de stockage des informations paléontologiques qui offre la possibilité de partager les données utilisées pour un travail de recherche et qui permette aussi la comparaison, l'analyse et le traitement des données en masse. Cette approche a déjà montré son intérêt pour résoudre des questions générales sur de grandes échelles de temps et d'espaces. Les données paléontologiques sont nécessaires à la calibration des modèles prédictifs : elles portent des informations majeures sur la relation « climat - changement environnemental – biodiversité ». L'automatisation et l'informatisation de clés de description et de détermination de certains groupes taxonomiques sont en plein essor. Il faut enfin viser à établir des référentiels dynamiques en biochronostratigraphie qui permettrait de mieux valoriser les données anciennes en actualisant automatiquement les âges. Les intérêts sont multiples et touchent aussi bien la recherche académique qu'industrielle. Ces préoccupations sont au cœur de divers projets nationaux et internationaux le plus souvent transdisciplinaires qui associent Sciences de la Terre, Sciences du Vivant, et (Bio)-Informatique.

Des outils spécifiques doivent être développés. Il faut aller vers une *automatisation de l'acquisition de données*, notamment morphométriques et taxinomiques (identification). L'intégration spatio-temporelle de données paléontologiques requiert de grandes quantités d'informations coûteuses en expertise (identification) et en temps (comptages). Des procédures et techniques d'acquisition (semi)-automatiques existent déjà ; d'autres restent à développer afin d'optimiser cette phase cruciale d'acquisition de données. À l'heure de l'essor du « Big

Data», de tels outils d'acquisition haut-débits ouvriront aux paléontologues les portes de la phéno-mique, science intégrative de la forme, s'attachant à l'analyse structurale (morphométrie), fonctionnelle (bio-mécanique) et développementale (Evo-Dévo) de la morphologie des organismes. De même *de nouveaux outils de la biologie moléculaire* doivent être utilisés. Les méthodes de criblage haut-débit (génomique, transcriptome, protéome) se développent en biominéralisation, quel que soit le modèle : communautés bactériennes, métazoaires... Pour les premières, l'analyse métagénomique est une approche de plus en plus abordable grâce aux techniques NGS de séquençage massif. En parallèle, sur tous les modèles biologiques un couplage transcriptomique/protéomique permet d'identifier les protéines impliquées dans la biominéralisation et autorise des comparaisons inter-taxon. Retracer la macro-évolution de certaines fonctions moléculaires liées à la biominéralisation devient possible. Pour autant, la compréhension des mécanismes mis en jeu implique un «saut conceptuel» alliant chimie supramoléculaire, auto-assemblage et concepts d'émergence. Enfin il faut développer des cryo-méthodes qui permettent d'analyser des échantillons assemblant vivant et minéral en limitant un grand nombre d'artefacts induits par la préparation d'échantillons. Les échantillons cryo-congelés (sans traitement préalable) sont coupés par cryo-ultramicrotomie puis observés sur tous types de microscopes : MEB, MET, microscopes à faisceau d'ions focalisés (FIB) et sondes ioniques (notamment NanoSIMS).

La *modélisation* reste un enjeu capital et doit être développée significativement, que ce soit à l'échelle de l'organisme (processus

de biominéralisation, origine des effets vitaux), ou à des échelle plus grandes où la biologie doit être couplée à des paramètres environnementaux, non seulement pour expliquer les petits systèmes expérimentaux mis en place au sein des laboratoires mais également à plus grande échelle, du sol au bassin versant ou au système côtier. D'autre part il faut amplifier le *rapprochement entre paléontologues et minéralogistes, géochimistes, biochimistes et biologistes moléculaires*. Il sera vraiment fécond au vu des complémentarités analytiques, de la connaissance des objets et des terrains, et de la diversité du vivant.

Il faut enfin veiller à *maintenir les expertises indispensables*. Abordé à différentes échelles d'intégration biologique (de l'organisme à l'écosystème), spatiale (du local au global) et temporelle, le traitement de ces grands thèmes requiert le maintien et/ou le développement d'expertises fondamentales et complémentaires : systématique, biostratigraphique, de terrain. Il exige également le développement de bases de données aux normes et procédures standardisées, fonctionnelles et évolutives.

En ce qui concerne l'aspect programmatique, l'intérêt pour la *reconduction du programme INTERRVIE (CT4)* est très vif au sein de la communauté scientifique CNRS-INSU. Il faut étudier la possibilité d'un programme commun CNRS-INSU-INEE. Le CNRS-INSU doit continuer de *financer des projets où les missions et l'acquisition de données de terrain ont une part extrêmement importante* en coût humain ou financier. Ils constitueront le socle de nouvelles connaissances qui nous semblent encore souvent manquer dans de nombreux projets beaucoup plus gros.

Références citées

- Aloisi G., et al. 2013. Biomarker and isotope evidence for microbially-mediated carbonate formation from gypsum and petroleum hydrocarbons, *Chem. Geol.*, 347, 199-207 ;
- Brayard A., et al., 2011: Transient metazoan reefs in the aftermath of the end-Permian mass extinction. *Nature Geosci.*, 4 (10): 693-697 ;
- Couradeau E., et al., 2012. An early-branching microbialite cyanobacterium forms intracellular carbonates. *Science*, 336, 459-462 ;
- Dera G., et al., 2011. Paleobiogeography of ammonites during the Pliensbachian-Toarcian crisis (Early Jurassic): a link to paleoclimate, eustasy, and extinctions. *Global Planet. Change*, 78 (3-4): 92-105 ;
- Galvez Matthieu E., et al., 2012. Morphological preservation of carbonaceous plant fossils in blueschist metamorphic rocks from New Zealand. *Geobiology*, 10, 118-129.
- Marie B., et al., 2013. The shell-forming proteome of *Lottia gigantea* reveals both deep conservations and lineage specific novelties. *FEBS J.*, 280 (1): 214-232 ;
- Marin F., et al., 2012. The formation and mineralization of mollusk shell. *Front. Biosci.* (Schol. Ed.), 4: 1099-1125 ;
- Ménez B., et al., 2012. Life in the hydrated suboceanic mantle, *Nature Geosci.*, 5 (2), 133-137 ;
- Morard R., et al., 2013. Ecological modeling of the temperature dependence of cryptic species of planktonic foraminifera in the Southern Hemisphere. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 391, 13-33 ;
- Suchéras-Marx B., et al., 2012. Impact of the Middle Jurassic diversification of *Watznaueria* (coccolith-bearing algae) on the carbon cycle and $\delta^{13}\text{C}$ of bulk marine carbonates. *Global Planet. Change* 86-87, 92-100 ;
- Vielzeuf, et al., 2010, Multilevel modular mesocrystalline organization in red coral, *Am. Mineral.*, 95, 242-248 ;
- Yi H., et al., 2014. Probing atomic scale transformation of fossil enamel using FTIR and NMR spectroscopy: A case study from the Tugen Hills (Rift Gregory, Kenya) *Acta Biomater.*, 10, 3952-3958 ;

Comité Thématique 5

« Ressources géologiques et durables »

Appel d'offre : CESSUR « Connaissance et tEchnologie du Sous-Sol pour son exploitation et Usage duRable »

Michel Cathelineau (GéoRessources), Philippe Boulvais (Géosciences Rennes), et le Comité CESSUR

Comité scientifique (au 1/1/ 2016) : Michel Cathelineau (GeoRessources)

Pascale Benezeth (GET), Didier Beziat (GET), Philippe Boulvais (Géosciences Rennes), Benjamin Brigaud (Geosciences ORSAY), Jean-Raynald de Dreuzy (Géosciences Rennes), Michel Dietrich (ISTerre), Michel Pichavant (ISTO), Marina Rabineau (TTM)

■ Grands enjeux scientifiques du domaine

Les gisements métalliques ou de substances énergétiques sont des manifestations exacerbées de transferts de matière se produisant à l'échelle crustale. Ces transferts s'effectuent souvent par l'intermédiaire de phases fluides ou de magmas. Ils sont liés à la déformation et aux gradients thermiques ou de pression. Les gisements métalliques ou de substances énergétiques sont des marqueurs uniques de la dynamique et de l'évolution de la lithosphère ; ils constituent des enjeux majeurs quant à l'approvisionnement en ressources.

■ Résultats saillants des cinq dernières années

Les appels d'offres du CT5 (CESSUR), régulièrement ouverts entre 2009 et 2014, visaient à l'émergence, la consolidation, la mise en place d'actions structurantes aux frontières des mondes académiques. Une priorité a été portée sur les thèmes suivants :

- Énergies non carbonées (géothermie, H₂ naturel et méthane) ;
- Action bassins sédimentaires (évolution thermo-mécanique de la lithosphère, fracturation, circulations des fluides et interactions fluides/roches, diagénèse) ;
- Ressources minérales : cycle des métaux depuis la source jusqu'au dépôt ; approches analytiques et expérimentales ; datation de la mise en place des minéralisations métaux « critiques » ;
- Enjeux environnementaux, en particulier dans le cadre de la mise en place initiale de l'Observatoire de la mine en milieu fragile arctique et sub-arctique.

Le bilan montre que la communauté la plus réactive est celle des *ressources minérales*. Un certain nombre de projets ont concerné les ressources en eau, les énergies non carbonées (H₂), et des processus crustaux impliquant des phases fluides.

La communauté *Bassin* n'a pratiquement pas répondu aux AO, mis à part quelques actions liées à la diagénèse et aux transferts de matière liés à des concentrations minérales (fluorine). Cependant, elle s'est rassemblée à l'occasion de projets fédérateurs comme l'ANR Pyrénées.

Un effort tout particulier a été fait vers l'animation scientifique avec la mise en place entre autres d'écoles thématiques. Cela s'est traduit par :

- Deux ateliers nationaux « *Bassins sédimentaires* » qui ont débouché notamment sur l'ANR « Pyrénées » et « Hydrogéologie » ;
- Trois colloques internationaux (France-Québec) qui ont été organisés autour de la notion d'Observatoire. Les discussions, contacts, démarrages de projets et de thèses ont accompagné ces échanges prospectifs et d'animation scientifique sans compter l'élaboration avec les autres domaines de l'INSU du laboratoire dédié à l'Université Laval ; Les *colloques De Launay* qui sont organisés systématiquement à l'occasion des Réunions annuelles des sciences de la Terre (RST). Le dernier à Pau a rassemblé une cinquantaine de communications ;
- Cinq École thématiques « *Ressources* » annuelles organisées par le CT5 depuis 2010 (Nancy, Orléans, Paris, Genève, Rennes) qui ont permis la constitution d'un véritable réseau de laboratoires travaillant sur ce thème à l'échelle nationale. La première école « Ressources Minérales » a été créée à Nancy en 2010 et a fait suite aux besoins identifiés à la prospective du CNRS-INSU d'Aussois en 2008. La participation aux Écoles Thématiques a été d'environ une centaine de chercheurs à chaque édition. La prochaine École aura lieu à Toulouse en 2016, car 2015 a été l'occasion de nombreux échanges à Nancy lors du congrès international SGA programmé fin août. Ces écoles thématiques réunissent tant des chercheurs que des industriels et EPIC. Elles comprennent des présentations des travaux en cours, notamment des étudiants, avec de plus, des bilans synthétiques de la part de personnalités scientifiques. Ces écoles répondent donc complètement, du point de vue du Comité CESSUR, à l'animation demandée par le CSST INSU.

Une communauté d'environ 120 chercheurs a été touchée par les appels d'offres ou les Écoles thématiques, relativement bien répartie en France, avec des participations fortes de Orléans, Nancy, Toulouse, Besançon et Rennes. Nous donnons ici quelques exemples d'études soutenues par CESSUR.

Des études interdisciplinaires (géochimistes, géologues/géophysiciens, minéralogistes, biologistes spécialistes des environnements extrêmes) et le monitoring *in situ* ont été réalisés sur des *systèmes actifs impliquant la formation d'Hydrogène naturel*. L'étude de ces objets géologiques particuliers a des implications directes pour diverses questions scientifiques de premier plan (carbonatation des péridotites, émergence de la vie sur Terre dans un environnement hypercalcin, origine biotique ou abiotique du méthane sur Mars...). La serpentinisation des péridotites est un processus complexe mettant en jeu simultanément des réactions de dissolution des minéraux primaires (olivines, pyroxènes), de formation de minéraux secondaires (serpentes, brucite, magnétite) et des réactions d'oxydo-réduction (oxydation du fer et réduction de l'eau) qui dépendent de la température. La serpentinisation est responsable de la production des eaux les plus basiques de la Terre (pH jusqu'à 12,5 dans l'avant-arc des Mariannes) avec un enrichissement en hydrogène et en méthane (Fig. 1). Les travaux menés en Oman, en Ligurie (Italie du Nord) et dans la Baie de Prony (Nouvelle Calédonie) ont montré que les sources chaudes (40°C) présentent des pH jusqu'à 12,2. La morphologie et la typologie des carbonates de Ca varient selon les conditions environnementales (composition chimique inorganique des sources, gaz émis...) mais aussi selon la présence de composés organiques (substances exopolymériques produites par les microorganismes alcalophiles)

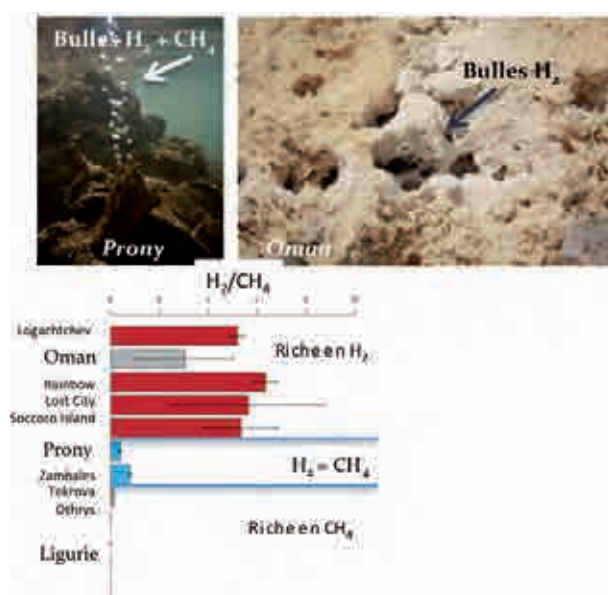


Fig. 1: Production naturelle d' H_2 et CH_4 dans les processus de serpentinisation. Monnin et al., 2014

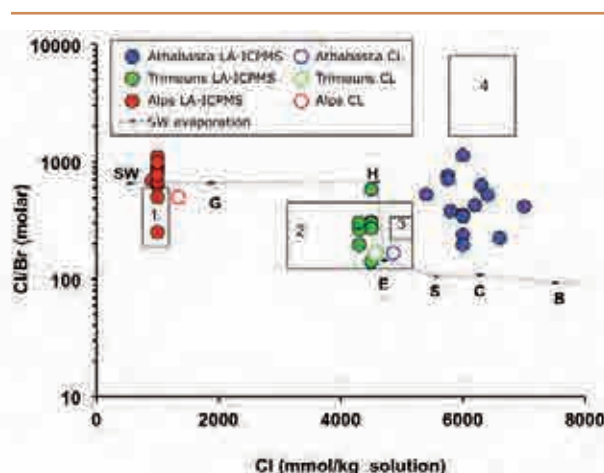


Fig. 2: Rapport Cl/Br vs Cl mesurés *in situ* dans des inclusions individuelles de paléofluides d'âge paléo-protérozoïque, pyrénéen ou alpin, montrant l'implication de saumures évaporitiques dans des altérations majeures (métasomatisme magnésien (talc de Trimouns, et altérations diagénétiques) et dans la formation des cavités alpines. Les chiffres correspondent à des fluides de référence: 1: fluides du métamorphisme varisque, 2: saumures du Trias, 3: saumures liées aux gisements d'Ag; 4: saumures des émeraudes de Colombie). Leisen, et al., 2012a,b

(Monnin et al., 2014). Les gaz émis dans ces sources sont dominés par l'azote, dont l'origine reste à déterminer, et sont enrichis en hydrogène et méthane jusqu'à des teneurs d'environ 40%, en proportions variables selon le contexte géologique. Le développement d'un capteur *in situ* d'hydrogène a permis de valider le concept du capteur dans le milieu gazeux avant de passer à une conception pour le milieu aqueux qui est exigeant en terme de cahier des charges (Dong et al., 2010). Un premier set de capteur en nanotechnologie, a été testé et validé en milieu gazeux. Il s'agit là d'un dispositif de laboratoire qui ne dépasse pas le niveau 3 sur l'échelle « Technology Readiness Level ».

La compréhension des mécanismes de *circulations fluides et des transferts de masse* associés dans la lithosphère est un thème de recherche de première importance si on s'intéresse aux processus de concentration en métaux. Faire des progrès dans ce domaine implique notamment d'effectuer un traçage géochimique des sources des fluides et d'étudier le comportement des métaux en présence de solvants. Un exemple de résultat notable est l'étude à l'échelle de l'inclusion fluide individuelle des rapports Cl/Br de saumures contemporaines de la formation des gisements d'uranium du bassin de l'Athabasca, Canada, ou du gisement de talc de Trimouns dans les Pyrénées (Leisen, et al., 2012a,b). L'évolution des rapports entre halogènes, éléments considérés généralement comme conservatifs avec notamment le rapport Cl/Br et la composition isotopique en chlore ($\delta^{37}Cl$) sont des indicateurs de l'origine de l'eau et de sels dissous dans les fluides responsables des transferts de matière dans la croûte

(eau de mer, eau météorique, fluides diagénétique, fluides métamorphiques, fluides magmatiques). Jusqu'alors la mesure du contenu en Br dans les fluides était effectuée sur populations globales d'inclusions fluides après écrasement et lixiviation du minéral hôte (quartz, carbonate, fluorine, barytine...), cette technique engendrant souvent des mélanges des populations d'inclusions fluides de différentes générations. L'analyse par ablation laser couplée à la spectrométrie de masse (LA-ICP-MS) permet d'éviter de tels biais par l'analyse d'inclusions fluides individuelles. La méthodologie développée a permis de mettre en évidence une source d'eau de mer évaporée pour ces deux types de gisement (Fig. 2).

Le *germanium* (Ge) est un métal rare, très utilisé dans l'industrie (catalyseurs, optique infra-rouge, fibres optiques, électronique et semi-conducteurs). La demande actuelle est en hausse, due au besoin croissant de technologies vertes pour la réduction des gaz à effet de serre, d'où le développement de nouvelles techniques d'exploration. Des travaux (Belissant *et al.*, 2014) ont été menés pour déterminer si les isotopes du germanium pouvaient être des traceurs des conditions de minéralisations, en prenant comme cas d'étude les sphalérites riches en Ge du gisement de Noailhac – Saint-Salvy (France). Ces sphalérites montrent des zonations optiques complexes et des hétérogénéités chimiques extrêmes pour leurs concentrations en éléments en traces (Ge, Ga, Ag, Sb et As). Les compositions isotopiques du Ge sont très variables et sont corrélées aux concentrations en Ge d'une manière qui traduit des mélanges de fluides de températures différentes. Cela souligne donc l'importance des isotopes du Ge pour tracer les processus superficiels basse température liés à la circulation de fluides.

La quantification du rôle du CO_2 dans le transfert des métaux d'intérêt économique par les fluides géologiques nécessite de connaître les solubilités et spéciations des métaux en phase fluide/vapeur ($\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-Cl-S}$) pour pouvoir développer des modèles physico-chimiques. Des travaux expérimentaux menés au GET à Toulouse ont permis de déterminer les solubilités du Fe, du Cu et de l'Au en fonction de la PCO_2 dans les fluides de différents gisements de type porphyres Cu-Au-Mo ou orogénique à Au (Fig. 3). La présence du CO_2 entraîne un fractionnement fort Cu/Fe et explique l'abondance de ces métaux dans les gisements d'or orogénique. Ces travaux se poursuivent par l'analyse du rôle des polysulfures dans le piégeage de l'or par la pyrite lors de la formation des gisements hydrothermaux aurifères, grâce à la synthèse des pyrites aurifères en présence de S^{3-} en conditions contrôlées typiques de leur formation dans la nature. Les premiers résultats indiquent que l'ion S^{3-} contrôlerait la mobilité de l'or dans les fluides et son incorporation dans la pyrite.

La durée, la vitesse et l'amplitude des réactions entre minéraux sulfurés et fluides/liquides silicatés sont parmi les paramètres clés qui contrôlent la formation des dépôts métallifères hydrothermaux-magmatiques. Afin de quantifier le mécanisme et la vitesse de dissolution des sulfures dans les fluides aqueux et les liquides silicatés hydratés, des expériences ont été menées en conditions contrôlées (réacteurs chimiques, cellules enclume-diamant) et analysées en couplant différentes méthodes de microanalyse *in situ* et de modélisation des cinétiques de réactions. Ces résultats ont été confrontés aux observations zonations minérales, zones réactionnelles) faites sur des échantillons naturels issus des zones de subduction

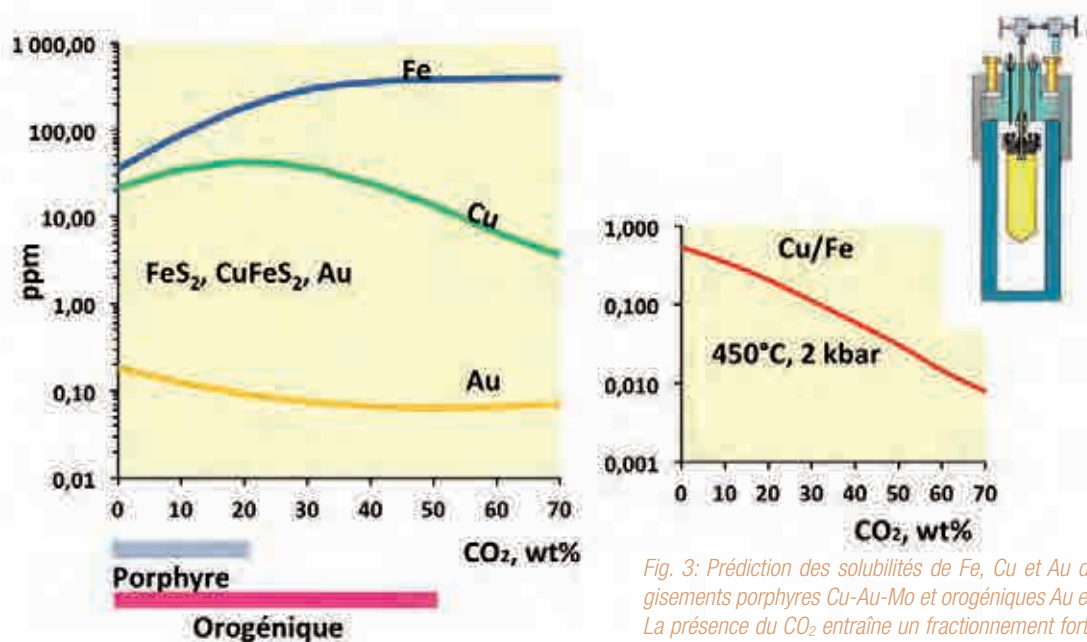


Fig. 3: Prédiction des solubilités de Fe, Cu et Au dans les fluides de gisements porphyres Cu-Au-Mo et orogéniques Au en fonction du CO_2 : La présence du CO_2 entraîne un fractionnement fort Cu/Fe et explique les rapports d'abondance de ces métaux dans les gisements d'or orogénique. Borisova *et al.*, 2014

actuelles (volcan Merapi, Indonésie) et des zones cratoniques anciennes (massif Bushveld, Afrique du Sud). Les résultats obtenus (Borisova *et al.*, 2014), combinés avec des données géochronologiques, géodynamiques et géophysiques, permettent de préciser la durée des phénomènes responsables de la concentration des ressources minérales (Au, Cu, PGE) dans ces différents contextes ainsi que de reconstituer les processus à l'origine des fluides magmatiques minéralisateurs et de leur évolution depuis le manteau supérieur.

■ Éléments de prospective et recommandations

Les questions fondamentales au coeur de la recherche sur les ressources.

• Formation et Fonctionnement des sources

Quelles sont les contributions relatives des processus géologiques, impliqués dans la formation et la remobilisation de la croûte (magmatisme, fusion partielle, érosion et démantèlement, formation des bassins) et le recyclage des métaux à l'échelle des provinces métallogéniques ?

La détermination des minéraux porteurs des métaux dans les roches sources est souvent hypothétique compte tenu de leurs très faibles teneurs ainsi que la difficulté à reconnaître la zone source dans la lithosphère. Il reste à explorer le fonctionnement des sources pour la plupart des métaux, y compris les plus communs. Les méthodes analytiques *in situ* comme la microsonde ionique, l'ablation laser-ICP-MS sont souveraines pour identifier les porteurs et leur comportement, qui pourrait être prédit par l'expérimentation.

• Déformation et circulation des fluides

Quels sont les processus contrôlant la formation des provinces métallifères à l'échelle crustale ?

Dans le régime « moderne » de tectonique globale (depuis ~ 0.7 Ga), l'étude des systèmes métallogéniques a révélé qu'ils pouvaient être d'excellents marqueurs géodynamiques. De même, l'étude du fonctionnement des systèmes métallogéniques anciens peut renseigner sur l'évolution du régime géodynamique de notre planète depuis l'accrétion primitive. Les mécanismes de concentration des éléments métalliques sont intimement associés à une succession de processus géologiques au cours de l'histoire de la Terre, depuis l'accrétion primitive, incluant les transferts de matière entre le manteau et la lithosphère et la croûte, en relation

avec la tectonique des plaques et les cycles orogéniques. La modélisation des processus de transfert doit prendre en compte le fait que les processus tectoniques ont évolué depuis les périodes anciennes (Archéen, lithosphères chaudes) jusqu'à l'actuel (lithosphères froides). Les modalités des interactions entre tectonique et transferts de fluides sont au premier ordre dépendantes des modes de déformation à l'échelle crustale et lithosphérique. Le couplage des processus de surface (e.g. création de reliefs) et de profondeur (e.g. localisation des zones de déformation) permet de comprendre les transferts dans un « paysage métallogénique ».

• Transport des métaux par les phases fluides Mode de transferts de métaux

Quels sont les processus contrôlant l'extraction et le transport des métaux par les phases fluides ?

De nombreuses données géochimiques et thermodynamiques nécessaires à la compréhension du rôle des fluides dans les systèmes métallogéniques restent à acquérir. Dans les domaines magmatiques, il est nécessaire de mieux comprendre les processus d'enrichissement en métaux rares, les phénomènes de compétition et/ou affinités entre éléments et les phénomènes de couche-limite versus immiscibilité de magmas. La spéciation chimique et la stabilité des formes dissoutes des métaux et volatils à haute T-P dans les systèmes minéraux-fluides-liquide silicaté reste toujours d'actualité. Les efforts doivent continuer à porter sur les trois ligands majeurs que sont le soufre, les chlorures et les espèces du carbone. La grande variété des états redox du soufre donne lieu à l'existence de nombreux types de ligands potentiels mal connus dont l'inventaire et la caractérisation, sont nécessaires. Caractériser la vitesse et les mécanismes de dissolution des minéraux sulfurés et oxydés des liquides silicatés (hydratés) ou fluides aqueux à haute T-P en est un complément important. Les chlorures, souvent issus d'évaporites, jouent un rôle de premier plan dans le transport des métaux. La nature des complexes chlorurés et leur rôle sur le transport de certains métaux restent cependant encore mal connus. Le rôle des espèces du carbone, en particulier des fluides carbonatés dans la gamme de 200-400°C doit être mieux compris. Créer une base de données thermodynamiques et de spéciation dans le système « métaux-S-C-H₂O-sel » dans une large gamme de T et P (jusqu'à 1000°C et 30 kbar), serait une grande avancée. Enfin, la production naturelle de gaz et leur rôle dans les interactions fluides minéraux reste un sujet important : les productions d'hydrogène, de méthane et de composés organiques (acétate, formate, alcanes légers formés par des

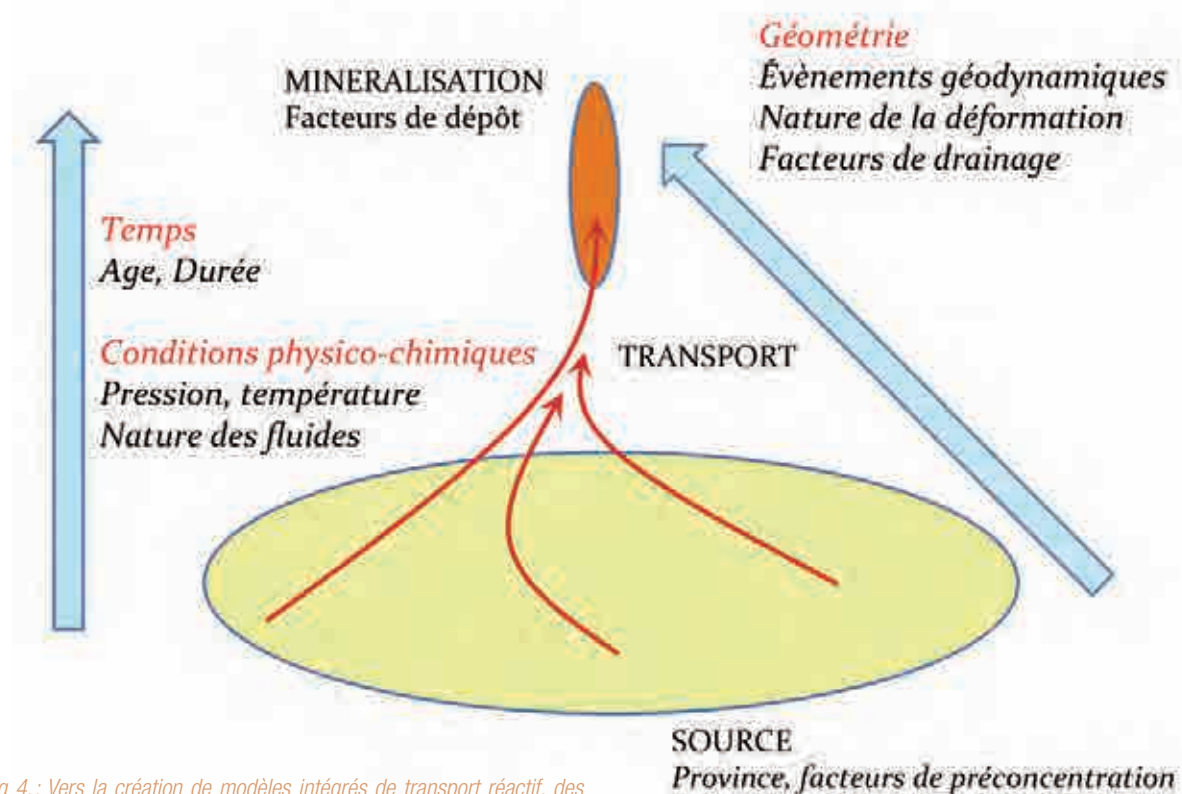


Fig 4. : Vers la création de modèles intégrés de transport réactif, des chemins des fluides métallifères et de distribution en 3D des minerais.

mécanismes dits de Fisher-Tropsch) restent insuffisamment connus à l'échelle lithosphérique.

• La dynamique des fluides

Quels sont les gradients P-T-X à l'origine des paléo-circulations fluides ? Peut-on estimer les paléo-perméabilités et l'hydrodynamique des systèmes métallogéniques ?

Il faut combiner les modèles chimiques des interactions fluides-roches et de spéciation des métaux avec les modèles d'hydrologie physique de circulation de fluides basés sur la perméabilité de roches et le flux de chaleur. Cette combinaison permettra la création de modèles intégrés de transport réactif, des chemins des fluides métallifères et de distribution en 3D des minerais Fig 4.

• Processus de dépôt : comment et quand

Quels sont les causes et les mécanismes de dépôt ?

Répondre à cette question nécessite de coupler expérimentation et modélisation numérique en utilisant dans la définition des paramètres d'entrée les données issues de l'analyse des paléo-systèmes minéralisés.

Quel est le cycle des éléments habituellement en traces qui sont considérés comme des métaux stratégiques ?

De nombreux métaux stratégiques ne possèdent pas de phase propre mais sont à l'état de traces dans les minéraux majeurs (par exemple le Ge dans la sphalérite). Leurs mécanismes d'incorporation ainsi que leur répartition à l'échelle des gisements ou de la province métallogénique sont très mal connus. Il faut donc étudier leur distribution à des échelles de plus en plus petites (micro ou nano) dans des échantillons naturels (minéraux et inclusions) qui sont généralement hétérogènes (zonations multiples, présence de micro et nano-phases). Cela ne peut se faire qu'en améliorant les limites de détection pour les éléments traces en poursuivant le développement des méthodes micro-analytiques (SEM, EMPA, LA-ICP-MS, LA-MC-ICP-MS, SIMS, micro-Raman, micro-XANES) et expérimentales (solubilité, spectroscopie) in situ.

Quels sont l'âge et la durée des circulations de fluides ?

Dater les minéralisations reste un enjeu. Ceci nécessite une très bonne connaissance à toutes échelles des minéraux datables (imagerie, analyses micro et nano, analyse texturale et micro-structurale) et une analyse géochimico-géochronologique « in situ » et « en contexte ». Les causes de perturbation des géochronomètres (interaction fluides-

géochronomètres) peuvent être mieux comprises par ces mêmes outils. On peut étendre cette thématique à l'enjeu global de datation des fluides qui circulent dans les failles ou zones de cisaillement au moment où elles jouent, et donc avoir accès à l'âge de la déformation, contrainte importante dans la reconstitution d'une histoire métallogénique. Un objectif est donc de révolutionner les approches géochronologiques qui reposent sur le paradigme selon lequel la plupart des minéraux magmatiques ou hydrothermaux sont des systèmes fermés et figés qui gardent leur signature chimique et isotopique depuis leur origine.

- **Modéliser les systèmes minéralisateurs.**
Notion de paysage métallogénique

L'intégration des données est essentielle, car beaucoup trop d'études sont mono-approches. Des datations précises permettent par exemple de mieux caler les événements par rapport à l'histoire géodynamique. De nouveaux modèles numériques intégrant l'hydrodynamique des systèmes, les fonctionnements discontinus ou par pulses périodiques (comme les valves sismiques) sont à mettre au point et à appliquer à des problématiques de dépôt comme celui de l'or par exemple. La France et l'Europe en général sont très en retard sur le développement des modélisations 3D des transferts de masse et de chaleur, et de leur application aux ressources.

- **Tenir compte du cycle des métaux jusqu'à la dissémination dans les systèmes superficiels**

Quels sont les processus de dispersion ou re-concentration en sub-surface qui contrôlent les géo-disponibilités et les bio-disponibilités qui déterminent en partie l'éco-toxicité ?

Les relations bactéries-minéraux-matières organiques restent également un sujet d'actualité. Une question est celle de l'énergétique des interactions eaux-roches et des réactions biogéochimiques :

La sursaturation du fluide vis-à-vis d'espèces minérales, et l'énergie disponible associée est-elle utilisée par les bactéries et archées chimiolithotrophes ? Quelle est la diversité et l'activité des communautés microbiennes chimio-litho-autotrophes dont la source d'énergie est indépendante de la photosynthèse et ne dépend donc que de molécules produites abiotiquement, H₂ et CO₂ principalement ?

- **Le contexte européen des programmes de recherche sur les ressources**

Les études prospectives de l'Union Européenne ont montré des perspectives de pénurie ou de très grande dépendance de l'Europe vis-à-vis des ressources. Une recherche renouvelée tant dans ses concepts que dans le type de processus ou d'objets étudiés (gisement de métaux stratégiques dont le cycle géochimique est encore fort mal connu) est nécessaire. Cela a conduit les acteurs nationaux (SNRI 2009 – Rapport du groupe de travail « ressources naturelles ») et internationaux (Initiative européenne « Raw Materials » en 2008, Déclaration de Luleå 2009, Rapport CE 2010 « Critical raw materials for the EU ») à suggérer une politique active de soutien à l'exploration et à la production, au recyclage et la gestion environnementale des ressources minérales primaires et secondaires. Cependant, les programmes de recherche dédiés à cette thématique (AO H2020 dans le domaine des Raw materials) sont plutôt d'ordre technologique ou de transfert (KIC Raw Materials). L'activité du réseau Eranet ERAMIN, dont le CNRS est leader (O. Vidal, responsable), a eu un seul AO supporté par la France dans le domaine des Ressources en 2014, malheureusement non renouvelé en 2015. Dans ce panorama partiel, seules les activités comme celle d'ERAMIN sont centrées sur la recherche fondamentale. Les compléments ciblés et plus modestes dans le cadre du CT5, seul appel d'offres au niveau national, permettent de répondre à l'attente des laboratoires.

Les ressources énergétiques et minérales et les débats sociétaux : doit-on poursuivre la prospection des ressources, quelle implication des chercheurs dans les débats sur le futur des ressources ?

La question de l'ouverture des mines, ou de la recherche de ressources non conventionnelles (ex : gaz de schiste) est une question majeure pour les années à venir. La recherche académique doit s'emparer d'un certain nombre de problématiques inhérentes à l'exploitation de ces ressources. Aujourd'hui le débat porte sur la fracturation hydraulique, demain il portera sur d'autres méthodes d'exploitation. Il est aujourd'hui nécessaire que des groupes de chercheurs académiques s'intéressent et se spécialisent dans ces problèmes afin d'apporter des réponses objectives aux attentes des citoyens. Les réponses ne doivent pas être guidées uniquement par des convictions personnelles sur le sujet mais par une science objective et indépendante. C'est une question de société, au même titre que la question des OGM souvent débattue. L'absence de la communauté scientifique est flagrante. Dans le rapport d'information présenté à l'assemblée nationale en Juin 2011 sur les gaz de schistes, seuls 2

chercheurs issus du monde universitaire ont été consultés contre 36 représentants de compagnies pétrolières. Il est important que notre communauté participe aux recherches sur l'évaluation des ressources et les techniques d'exploitation pour ne pas être distancée par la recherche menée dans le secteur privé et pour ainsi pouvoir participer aux débats.

Il semble nécessaire de constituer un réseau de chercheurs capables de s'intéresser aux différents problèmes soulevés par l'exploitation de ces ressources non conventionnelles (géologues, mécaniciens de la fracturation, hydrogéologues, géochimistes de l'environnement...) avec un lien évident avec les SHS et la biologie.

Quelle structuration (réseau de laboratoires), quel type d'actions collectives seraient utiles à la mise en œuvre de programmes ?

En premier lieu, la poursuite du financement de petits projets est une demande unanime de la communauté. Vu le nombre restreint de laboratoires travaillant en France sur les ressources minérales, il paraît adéquat de former un réseau de laboratoires travaillant sur ces thématiques avec la poursuite de rencontres scientifiques, comme les écoles thématiques qui existent depuis 2010 et sont très appréciées. Une réflexion stratégique sur la recherche autour des ressources minérales, avec au moins une réunion par an, serait utile afin de compléter ce dispositif. Cela pourrait se faire éventuellement en même temps que l'école thématique du CNRS et devrait idéalement être un programme multi-organismes. De plus, la formation d'un réseau national de manière à organiser la recherche française dans le domaine pourrait la rendre plus compétitive dans un contexte européen très concurrentiel.

Références dans la thématique CESSUR proches des actions financées ou cofinancées par CESSUR

- Belissont R., Boiron M.-C., Luais B., Cathelineau M., (2014) LA-ICP-MS analyses of minor and trace elements and bulk Ge isotopes in zoned Ge-rich sphalerites from the Noailhac – Saint-Salvy deposit (France): Insights on incorporation mechanisms and ore deposition processes, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 126, 518-540 DOI: 10.1016/j.gca.2013.10.052 Belissont2014.pdf
- Ben Aissa F., Postec A., Erauso G., Payri C., Pelletier B., Hamdi M., Ollivier B., Fardeau M.-L., 2014. Characterization of *Vallitalea pronyensis* sp. nov., a novel marine bacterium, isolated from an alkaline hydrothermal chimney in Prony Bay, New Caledonia. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology in press*.
- Borisova A.-Y., Gouy S., A new method for quantifying elemental concentrations in natural and synthetic fluid inclusions and gas bubbles by LA-ICP-MS (submitted to *Geostandards and Geoanalytical Research*)
- Borisova A.-Y., Gurenko A.-A., Martel C., Bindeman I.-N., Kouzmanov K., Troll V., Extreme oxygen isotope heterogeneity of magma recorded in the 2010 Merapi plagioclase phenocrysts. (to be submitted to *Chemical Geology*).
- Borisova A.-Y., Toutain J.-P., Dubessy J., Pallister J., Zwick A., Salvi S., (2014). H₂O–CO₂–S fluid triggering the 1991 Mount Pinatubo climactic eruption (Philippines). *Bulletin of Volcanology* 76:800, DOI 10.1007/s00445-014-0800-3.
- Borisova A.-Y., Troll V., Bindeman I.-N., Deegan F., Toutain J.-P. How carbonated crust is digested by the Merapi magma? (to be submitted to *Chemical Geology*).
- Boulart C., Chavagnac V., Monnin C., Delacour A., Ceuleneer G., Hoareau G., 2013. Differences in gas venting from ultramafic-hosted warm springs: the example of Oman and Ligurian Ophiolites. *Ophiolite* 38, 142-156.
- Chavagnac V., Ceuleneer G., Monnin C., Lansac B., Hoareau G., Boulart C., 2013a. Mineralogical assemblages forming at hyperalkaline warm springs hosted on ultramafic rocks: a case study of Oman and Ligurian ophiolites. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 14, 2474–2495.
- Chavagnac V., Monnin C., Ceuleneer G., Boulart C., Hoareau G., 2013b. Characterization of hyperalkaline fluids produced by low temperature serpentinization of mantle peridotites in the Oman and Ligurian ophiolites. *Geochemistry Geophysics Geosystems* 14, 2496–2522.
- Dong L., de Groot C.-H., Usgaocar A., Chavagnac V., 2012. Electro-deposited PdNi-Si Schottky barrier hydrogen sensors with improved time response. *Procedia Engineering*, 47 : 37-40.
- Escoubé R., Rouxel O.-J., Luais B., Ponzevera E., Donard O.-F.-X., (2012) Intercomparison study of Germanium Isotope composition of Geological and Reference Materials. *Geostandards and Geoanalytical Research* 36, 149-159. doi: 10.1111/j.1751-908X.2011.00135.x
- Essarraj S., Cathelineau M., Boiron M.-C., Banks D.-A., 2010, Circulation de saumures de bassins en évaporation à grande échelle et minéralisations argentifères associées: Le gisement d'Imiter (Ag-Hg), un cas similaire à ceux de Zgounder (Ag-Hg) et Bou Azzer (Co-Ni-Ag), (Anti-Atlas, Maroc). *Colloque De Launay, Marrakech*.
- Estrade G., Salvi S., Béziat D., Rakotovo S., Rakotondrazafy R., (2014) HFSE mineralization in peralkaline granites of the Ambohimirahavy alkaline complex, Ampasindava peninsula, Madagascar. *Journal of African Earth Sciences*. DOI 10.1016/j.jafrearsci.2013.06.008

- Feneyrol J., Giuliani G., Ohnenstetter D., Saul M., Saul E., Saul J.-M., (2010) Le district minier à 'tsavorite' de Lemshuku, Tanzanie. *Revue de l'Association Française de Gemmologie*, 172: 11-22.
- Feneyrol J., Giuliani G., Ohnenstetter D., Fallick A.-E., Martelat J.-M., Monié P., Dubessy C., Rollion-Bard C.-I., Le Goff E., Malisa E., Rakotondrazafy A.-F.-M., Pardieu V., Kahn T., Ichang'i D., Venance E., Voarintsoa N.-R., Ranatsenho M., Simonet C., Omoto E., Nyamai C., Saul M., (2013) Worldwide tsavorite deposits: new aspects and perspectives. *Ore Geology Reviews*, 53, 1-25.
- Feneyrol J., Ohnenstetter D., Giuliani G., Fallick A.-E., Rollion-Bard C.-I., Robert J.-L., Malisa E., (2012) Evidence of evaporites in the genesis of the vanadian grossular 'tsavorite' deposit in Namalulu, Tanzania. *Canadian Mineralogist*, 50, 745-769.
- Feneyrol J., Giuliani G., Ohnenstetter D., Rondeau B., Fritsch E., Fallick A.-E., Ichang'i D., Omoto E., Rakotondrazafy A.-F.-M., Ranatsenho M., Lallier F., (2014) New tipology and origin of tsavorite based on trace-element chemistry. *Eur. J. Mineral.* 26, 293-308.
- Feneyrol J., Giuliani G., Ohnenstetter D., Le Goff E., Malisa P. et J., Saul M., *et al.* (2010). Lithostratigraphic and structural controls of 'tsavorite' deposits at Lemshuku, Merelani area, Tanzania. Contrôles lithostratigraphique et structural des gisements de «tsavorite» de Lemshuku, région de Merelani, Tanzanie. *Comptes Rendus Geosciences*, 342(10), 778-785.
- Galois L., Feneyrol J., Giuliani G., Calas G., (2010) The origin of coloration in garnets: an optical spectroscopic study. *Geochimica Cosmochimica Acta* 74, A314-A314.
- Gasc J., Brunet F., Bagdassarov N., Morales-Flórez V., (2011) Electrical conductivity of polycrystalline $Mg(OH)_2$ at 2 GPa: effect of grain boundary hydration-dehydration, *Phys. Chem. Mineral.*, 38, 543-556.
- Gasc J., Brunet F., Brantut N., Corvisier J., Findling N., Verlaquet A., Lathe C., Effect of water activity on reaction kinetics and intergranular transport at high-pressure: Insight from the $Ca(OH)_2 + MgCO_3 + CaCO_3 + Mg(OH)_2$ reaction (Submitted to *Contrib Mineral Petrol*)
- Giuliani G., Fallick A.-E., Feneyrol J., Ohnenstetter D., Pardieu V., (2011) 180/160 and V/Cr ratios in gem tsavorites from the Neoproterozoic Mozambique Metamorphic Belt: a clue for their origins? *Mineralium Deposita*, 46: 671-676
- Giuliani G., Feneyrol J., Ohnenstetter D., Marshall D., Walton L., Martelat J.-E., Fallick A.-E., (2014) Tsavorite and tanzanite deposits. In: Raeside ER (ed) *Geology of gem deposits*, Mineralogical Association of Canada, *Short Course Series* 44, Tucson, USA, pp 217-246.
- Giuliani G., Groat L., Ohnenstetter D., Fallick A.-E., Feneyrol J., (2014) The geology of gems and their geographic origin. In: Raeside ER (ed) *Geology of gem deposits*, Mineralogical Association of Canada, *Short Course Series* 44, Tucson, USA, pp 113-134.
- Giuliani G., Ohnenstetter D., Fallick A.-E., Feneyrol J., (2011) State of the art in the formation of high-value colored gemstones. *Gems & Gemology*, 47: 108-110.
- Giuliani G., Ohnenstetter D., Fallick A.-E., Feneyrol J., (2012) Les isotopes de l'oxygène, un traceur des origines géologique et/ou géographique des gemmes. *Revue de l'Association Française de Gemmologie A.F.G.*, 179: 11-16.
- Giuliani G., Ohnenstetter D., Fallick A.-E., Groat L., Feneyrol J., (2012) Geographic origin of gems linked to their geographical history. *InColor*, 19, 16-27.
- Janots J., Bernier F., Brunet F., Munoz M., Trcera N., Lanson M., Berger A., X-Ray-absorption near edge structure spectroscopy at the LIII edge of Ce in lateritic mineral and rocks (Madagascar): Insights on Ce oxidation state and redox evolution during tropical weathering. soumis à *Geochimica et Cosmochimica Acta*.
- Leisen M., 2011, Analyse chimique des inclusions fluides par ablation laser couplée à l'ICP-MS et applications géochimiques. *Thèse Univ de Lorraine*, Soutenue le 16 novembre 2011,
- Leisen M., Boiron M.-C., Essarraj S., Dubessy J., 2013, Origin of brines associated with the Bou Azzer silver deposit, Anti-Atlas, Morocco: A LA-ICPMS study of individual fluid inclusions. *Goldschmidt Conference*, Florence, Aout 2013, p. 582.
- Leisen M., Boiron M.-C., Richard A., Dubessy J., 2012, Determination of Cl and Br concentrations in individual fluid inclusions by combining microthermometry and LA-ICPMS analysis: Implications for the origin of salinity in crustal fluids. *Chemical Geology*, 330-331, 197-206.
- Leisen M., Dubessy J., Boiron M.-C., Lach P., 2012. Improvement of the determination of element concentrations in quartz-hosted fluid inclusions by LA-ICP-MS and Pitzer thermodynamic modeling of ice melting temperature. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 90, 110-125.
- Luais B., (2012) Germanium chemistry and isotopic measurements of Fe-Ni, Zn alloys and silicate matrices using MC-ICPMS: insights into deep Earth processes. *Chemical Geology* 334, 295-311. doi: 10.1016/j.chemgeo.2012.10.017 Luais2012.pdf
- Malvoisin B., Brunet F., (2014) Water diffusion-transport in a synthetic dunite: Consequences for oceanic peridotite serpentinization, *Earth and Planetary Science Letters*, 403, 263-272.
- Monnin C., Chavagnac, V., Boulart C., Ménez B., Gérard M., Gérard E., Quéméneur M., Erauso G., Postec A., Dombrowski L., Payri C., Pelletier B., 2014. The low temperature hyperalkaline hydrothermal system of the Prony bay (New Caledonia). *Biogeosciences Discussion* 11, 6221-6267.
- Postec A., Quéméneur M., Bes M., Meil N., Benaïssa F., Payri C., Pelletier B., Monnin C., Dombrowsky L., Ollivier B., Gérard E., Pisapia C., Gérard M., Ménez B., Erauso G., submitted. Microbial Communities in a Serpentinite-Hosted Ecosystem: the Prony Hydrothermal Field, New Caledonia. *PLOS ONE*.

Comité Thématique 5 « Ressources géologiques et durables »

- **Quéméneur M., Bes M., Postec A., Meil N., Hamelin J., Monnin C., Chavagnac V., Payri C., Pelletier B., Donbrowski L., Gérard M., Pisapia C., Gérard E., Ménez B., Ollivier B., Erauso G.**, 2014,. Spatial distribution of microbial communities in the shallow submarine alkaline hydrothermal field of the Prony Bay, New Caledonia. *Environmental Microbiology*, in press.
- **Rossi M., Tarrieu L., Cheilletz A., Gasquet D., Deloule E., Paquette J.-L., Bounajma H., Mantoy T., Ouazzani L., Ouchtouban L.**, The polymetallic (W-Au/Pb-Zn-Ag) Tighza district (central Morocco): age of the magmatic and hydrothermal events. Soumis *Livre métallogénie de l'Afrique du Nord* (sous la direction de M. Bouabdellah). SGA éditeurs.
- **Scheffer C., Vanderhaeghe O., Tarantola A., Ponthus L., France L., Photiades A., Lanari P.**, (à soumettre à *Tectonophysics*). Tectonic evolution of the western boundary of the Attico-Cycladic complex (Lavrio, Greece).
- **Scheffer C., Tarantola A., Vanderhaeghe O., Photiades A.**, (à soumettre à *Journal of Metamorphic Petrology*). Genesis of aqueous-carbonic fluids by decarbonation during the brittle-ductile transition in the post orogenic extension of the Hellenic belt (Lavrio, Greece).
- **Usgaocar A.-R., de Groot C.-H., Boulart C., Castillo A., Chavagnac V.**, 2012. Low power hydrogen sensors using electrodeposited PdNi Schottky diodes. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 170 : 176-181.
- **Usgaocar A.-R., de Groot C.-H., Boulart C., Castillo A., Chavagnac V.**, 2010. Low power hydrogen sensors using electrodeposited PdNi Schottky diodes. *Procedia Engineering*, 5: 143-146.

Géosciences Marines

Mathide Cannat (IPGP), Jacques Déverchère (LDO), Serge Lallemand (Géosciences Montpellier), Marcia Maia (LDO)

■ Pourquoi une prospective spécifique en Géosciences Marines ?

Les géosciences marines (GM) relèvent moins d'une thématique que d'une approche spécifique mettant en œuvre des moyens lourds au premier rang desquels l'utilisation de navires ou d'instruments embarqués. La mise en œuvre de ces moyens nécessite, plus encore que pour des projets « terrestres », le montage de projets collaboratifs au niveau national et/ou international et une coordination complexe notamment dans le phasage de la programmation. Elle mobilise par ailleurs des compétences particulières (navigation, logistique, développement et déploiement d'instruments spécifiques...) chez les chercheurs et les ingénieurs de la discipline. A l'étranger, les scientifiques appartenant à la communauté GM exercent la plupart du temps dans des instituts propres. C'est aussi le cas en France au sein d'IFREMER, mais la plupart des chercheurs et des ingénieurs concernés sont intégrés dans des UMRs dont la dominante n'est pas nécessairement marine. Il est ainsi apparu important, dans cette nouvelle prospective, de détailler les forces et les faiblesses de cette communauté et de délivrer ainsi des recommandations appropriées.

La réflexion qui suit s'appuie sur un questionnaire envoyé aux laboratoires impliqués dans la thématique, permettant de recenser le nombre de personnes, les sujets de recherche, les chantiers, les projets de campagne récents et futurs, la participation à des programmes nationaux et internationaux, les outils et équipements mis en œuvre, la place de la thématique GM dans la formation ainsi que les enjeux et les problèmes rencontrés. Nous avons également utilisé des documents, et des avis fournis par la TGIR Flotte Océanographique Française (FOF).

% "GM"	labo	ville
- 90%	EPOC	Bordeaux
- 90%	LDO	Brest
- 60%	CEFREM	Perpignan
- 50%	"Géosystèmes"	Lille
- 40%	LPG	Nantes
- 35%	CEREGE	Aix-Marseille
- 30%	GEOAZUR	Nice
- 25%	LSCE	Gif/Yvette
- 25%	ISTEP	Paris
- 20%	ENS	Paris
- 20%	GEOPS (ex-IDES)	Orsay
- 15%	IPGP	Paris
- 10%	GM	Montpellier
- 10%	LIENS	La Rochelle
- 10%	Magma et volcans	Clermont-Ferrand + St Etienne
< 10%	IPGS	Strasbourg
<< 10%	Dépt Géosciences	Pau
<< 10%	Géoressources	Nancy

■ Bilan

• Les forces en 2014

Sur l'ensemble des laboratoires universitaires consultés, quatre affichent une dominance marine dans leurs thématiques de recherche, et pour huit autres, les GM contribuent de manière significative. Enfin, six autres laboratoires reconnaissent des thématiques marines, même si elles ne sont pas au cœur de leurs axes de recherche. La communauté est constituée d'environ 330 chercheurs et enseignants chercheurs et 60 ingénieurs et techniciens impliqués à des niveaux variés. Ces forces sont significatives, irriguant le territoire national, mais la dispersion géographique peut aussi entraîner des difficultés de coordination et de concertation.

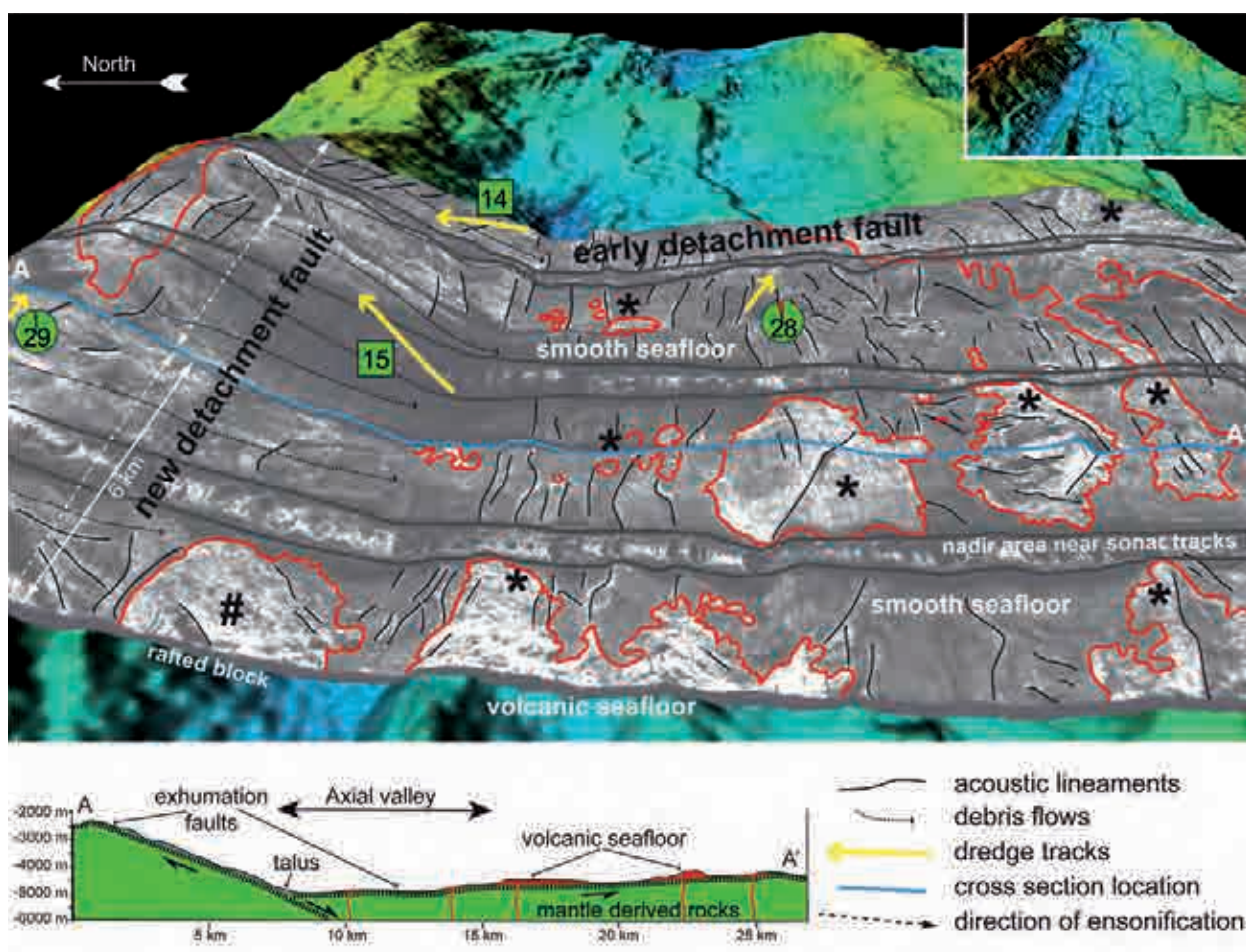


Fig. 1. La campagne océanographique SMOOTHSEAFLOOR (Marion Dufresne, dorsale sud-ouest indienne) a permis de mettre en évidence un nouveau mode de fonctionnement des dorsales océaniques, avec la mise à l'affleurement de roches du manteau sur des grandes surfaces et sur des longues périodes de temps. Ce processus d'exhumation du manteau, continu depuis au moins dix millions d'années, correspond donc à une accretion amagmatique, avec très peu de fusion et de production de basaltes. Sauter et al., *Nature Geosciences*, 2013.

De nombreux partenariats, nationaux et internationaux, contribuent à augmenter ce potentiel de recherche, notamment avec l'IFREMER, l'IRD et le CEA, mais également le BRGM et, parmi les acteurs industriels, TOTAL et PETROBRAS. La communauté participe activement aux programmes internationaux InterRidge, IODP-ECORD ainsi qu'à des consortiums et programmes européens dont EMSO, MARSITES, EUROFLEETS et FIX03.

La TGIR Flotte Océanographique Française (FOF), structurée depuis 2011 autour d'une UMS regroupant les quatre opérateurs de navires scientifiques CNRS-INSU, IFREMER, IPEV et IRD est un atout majeur pour la communauté GM nationale. Cette flotte, composée de navires hauturiers, côtiers et dits « de station », mais également de véhicules submersibles (Nautilie, ROV Victor, AUVs) et d'équipements (sismiques HR et multitrace, carottiers), auxquels s'ajoutent les OBS du parc national du CNRS-INSU, permet l'accès à la mer en différentes parties du globe et l'étude d'un vaste éventail de problèmes scientifiques, tant en domaine hauturier que côtier et littoral. Elle n'est pas à l'usage seule de la communauté GM, qui par-

tage ces moyens à la mer avec les communautés Océan-Atmosphère et Biologie-Ecologie-Environnement pour des projets de campagnes à la mer de plus en plus multidisciplinaires. Les demandes de campagne soumises sont évaluées par deux commissions mises en place par la FOF : la CNFH pour les projets concernant des navires hauturiers, et la CNFC pour les navires côtiers.

La jouvence des matériels, AUVs et navires est indispensable au maintien de la qualité des recherches en GM. La période écoulée a permis la programmation de la jouvence du Marion Dufresne, en cours actuellement, ainsi que celle de la sismique (flûte et sources).

• Les thématiques et quelques résultats récents

La communauté GM est active sur des thématiques et des chantiers très divers, allant de l'évolution du trait de côte à

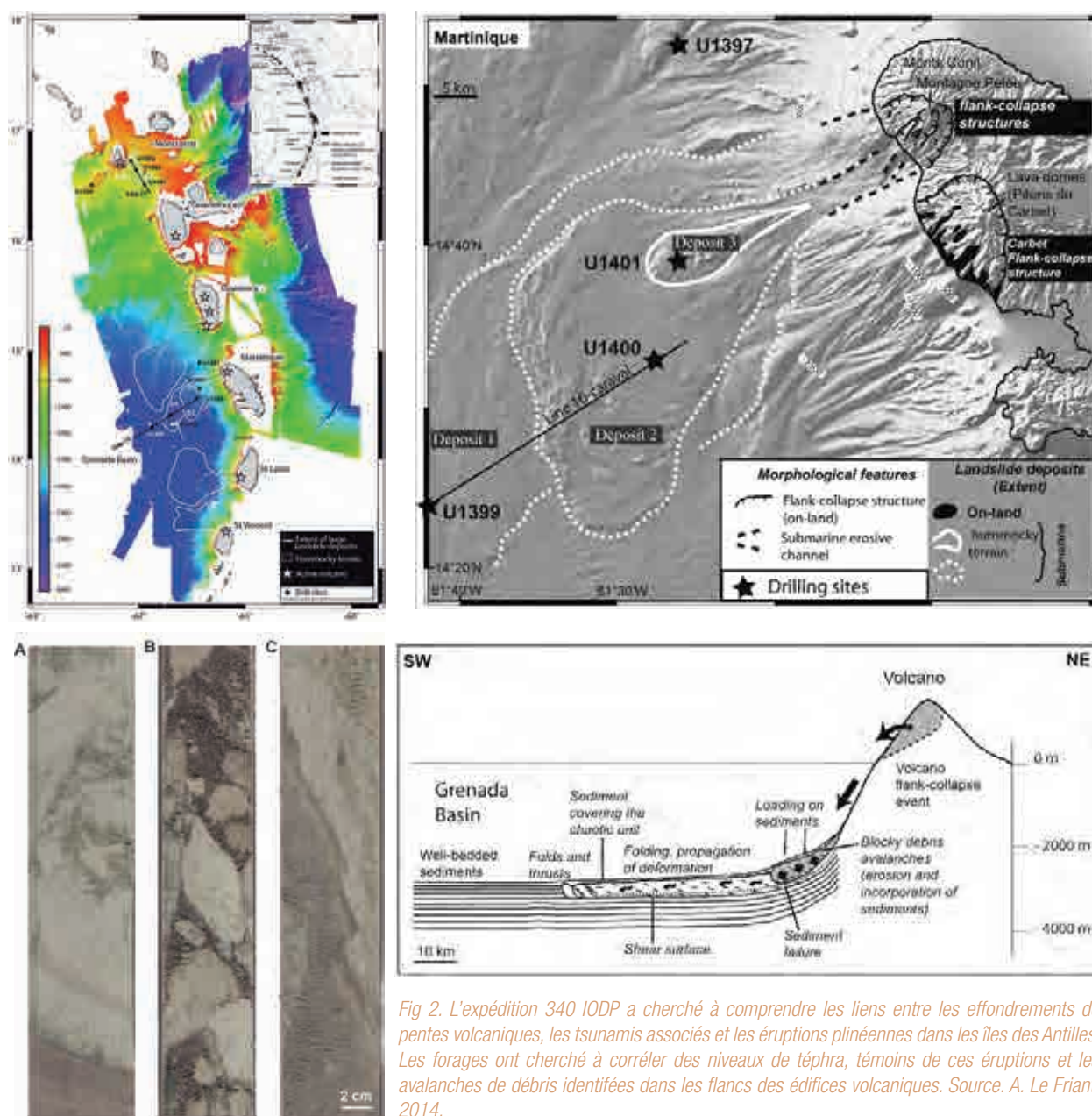


Fig 2. L'expédition 340 IODP a cherché à comprendre les liens entre les effondrements de pentes volcaniques, les tsunamis associés et les éruptions plinéennes dans les îles des Antilles. Les forages ont cherché à corrélés des niveaux de téphra, témoins de ces éruptions et les avalanches de débris identifiées dans les flancs des édifices volcaniques. Source. A. Le Friant, 2014.

la dynamique des dorsales océaniques ou des subductions. Les préoccupations de la société pour l'océan et les littoraux se sont amplifiées, renouvelant le questionnement scientifique autant qu'économique : risques événementiels de type tsunamis/séismes, risques côtiers liés au changement climatique, ressources minérales marines, énergies marines renouvelables, ressources minérales marines, redéfinition des ZEE... Beaucoup de laboratoires en France se sont ré-orientés vers ces questions.

Parmi les résultats marquants de ces dernières années, nous pouvons citer :

- La mise en évidence d'un mode localement amagmatique de divergence des plaques à l'axe de certaines dorsales lentes, avec mise à l'affleurement tectonique du manteau

lithosphérique sur plusieurs dizaines de km (Fig 1).

- La redéfinition des processus de la rupture continentale, avec la mise en évidence d'une géométrie 3D et d'une rupture polyphasée.
- Les liens maintenant démontrés entre les éruptions volcaniques et les effondrements de pentes volcaniques et tsunamis dans les Antilles françaises (suite à une campagne de forage du programme IODP, proposée initialement par des chercheurs français) (Fig. 2).

Il faut aussi rappeler que les équipes françaises sont historiquement très impliquées sur plusieurs marges actives (Andes du Nord, Japon, Méditerranée, SO Pacifique, Océan Indien). Soulignons particulièrement la séquence de forages océaniques IODP dans le cadre du programme NantroSeiZe

sur la marge de Nankai ou JFAST sur la marge du Japon peu après le méga-séisme de 2011, (Fig. 3). La comparaison de ces deux marges, l'une en période intersismique et l'autre juste après une méga-rupture a apporté des éléments déterminants permettant de préciser l'état de contraintes et les paramètres lithologiques et thermiques lors des phases pré- co- et post-sismiques. La communauté académique a également innové dans deux domaines en plein essor :

- La réduction des risques et l'adaptation au changement climatique dans les zones littorales, en contribuant à évaluer de manière quantifiée les facteurs d'érosion et de submersion marine modifiant le trait de côte (voir aussi le document de prospective «Surfaces et interfaces continentales 2013-2017» du CNRS-INSU).
- L'instrumentation pour les grandes profondeurs, notamment en géophysique, avec le développement de capteurs et de dispositifs nouveaux pour l'électromagnétisme (ACEM), la gravimétrie (GRAVIMOB), la géodésie et l'observation sismique.

• Les observatoires fond de mer et sites instrumentés

Les observatoires sous-marins sous la responsabilité de la France sont maintenant intégrés au projet européen EMSO de mise en réseau de 11 sites observatoires marins multidisciplinaires (géosciences, biologie, océanographie), (fig. 4). EMSO-France est devenu une Infrastructure de Recherche (IR) portée par le CNRS et l'Ifremer avec 3 sites cibles : Açores (MOMAR), façade Ligure et Marmara. Ces trois sites concernent environ 120 utilisateurs repartis sur 15

3 – source : Document de programmation budgétaire EMSO-France, janvier 2014

labos, dont près des 2/3 relèvent des GM. Le fonctionnement de l'IR mobilise environ 11 équivalents temps plein et son budget consolidé hors campagnes en mer³ est de 1.15 M€ (Ifremer) + 904 k€ (CNRS). La gouvernance de l'IR est assurée par un comité de pilotage appuyé par un comité scientifique et technique. L'implication de la communauté en GM sur ces sites observatoires concerne principalement la dynamique des circulations hydrothermales, la stabilité des pentes, la géodésie fond de mer et l'observation sismique.

Les observatoires fond de mer, mais également les sites instrumentés labellisés par l'INSU, tel que le réseau hydro-acoustique de l'océan Indien, nécessitent des tâches de service annuelles et donc l'octroi de jours de mer sur des navires adaptés. La reconnaissance de ce besoin par les instances d'évaluation et d'attribution de jours de mer sur les navires de la flotte française a été une avancée significative de la période.

• Les campagnes à la mer dans la période

Les projets de campagne soumis en GM sont nombreux pour les navires hauturiers et un peu moins sur la flotte côtière, qui est plus utilisée par les autres disciplines. Cette flotte côtière est toutefois importante pour la communauté car les thématiques littorales GM montent en puissance. Elle permet également des stages embarqués pour les formations en Géosciences ayant des cursus « marins ».

Le nombre total de campagnes et de jours de mer toutes disciplines confondues a légèrement baissé entre 2007 et 2014, surtout pour les navires hauturiers (Fig. 5). La

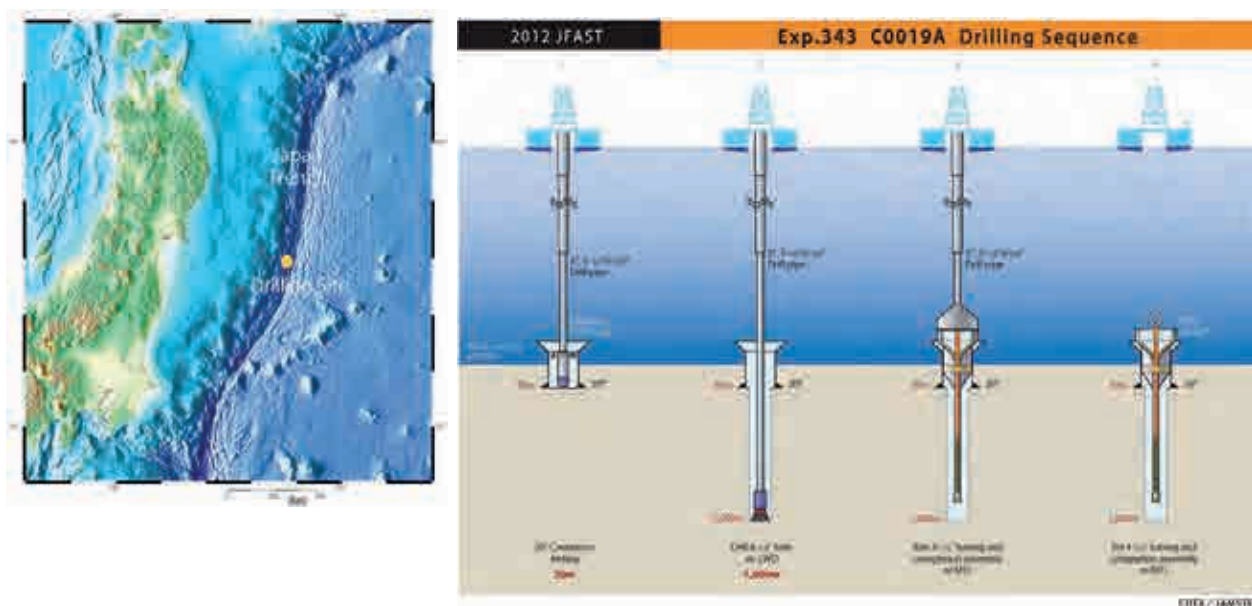


Fig. 3 : La campagne IODP JFAST sur la marge du Japon peu après le méga-séisme de 2011. IODP



Fig. 4 : Site des Açores (MOMAR) où est implanté un observatoire marin multidisciplinaire (géosciences, biologie, océanographie) intégré à EMSO-France. © Ifremer-Momar

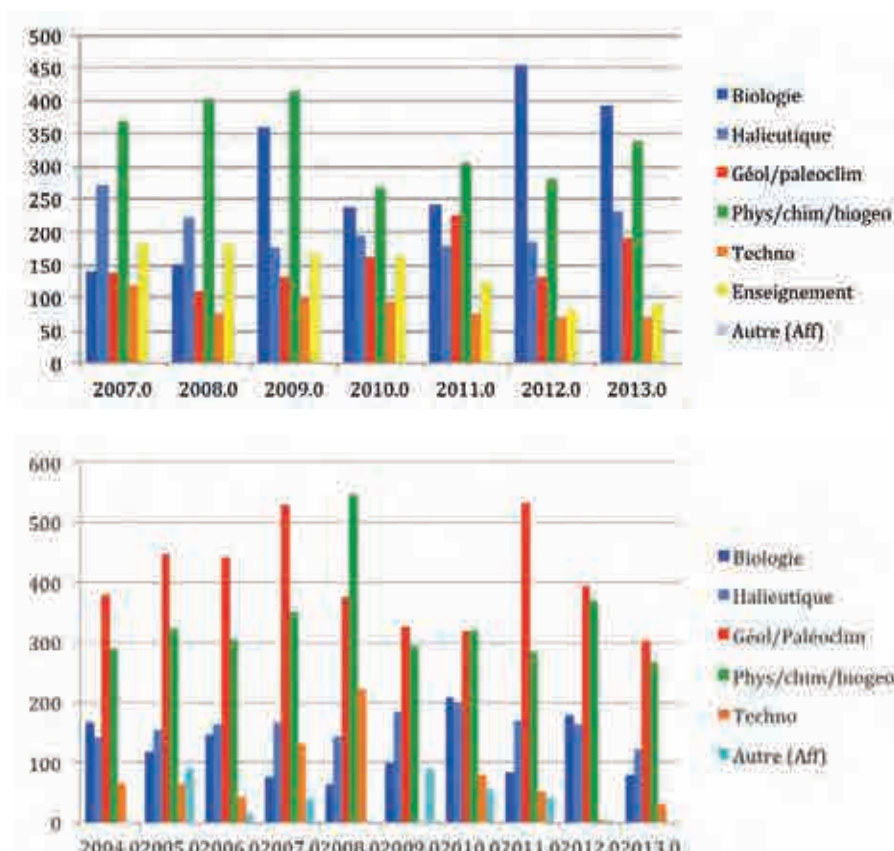


Fig. 5 : Nombre de jours de mer par discipline entre 2007 et 2013 pour les navires de la flotte côtière (en haut) et entre 2004 et 2013 pour ceux de la flotte hauturière (en bas). Source. CNFC et CNFH.

tendance générale de ces dernières années va vers des campagnes hauturières plus longues et plus lourdes, souvent pluridisciplinaires, et pour lesquelles des bateaux tels que le

« Pourquoi Pas ? » et le « Marion Dufresne », sont bien adaptés. Le monde académique est porteur d'une majorité des projets de campagnes à la mer GM, tant en côtier qu'en hauturier. Son

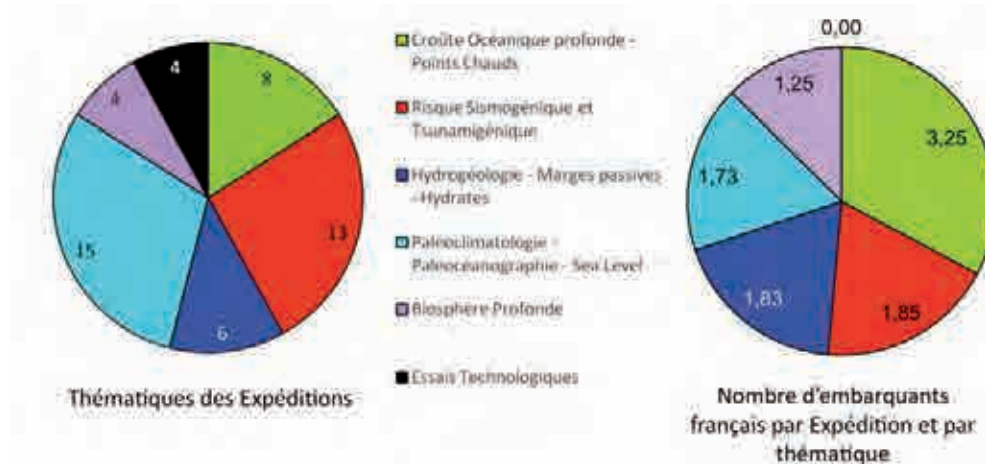


Fig. 6. Nombre de campagnes IODP classées par thématique (à gauche) et nombre de participants français par thématique aux campagnes (à droite) pour la décennie 2003-2013.

dynamisme est attesté par de nombreuses réponses à l'AO 2014 « Lettres d'intention » lancé par la FOF.

La CNFH s'inquiète cependant d'une baisse récente du nombre de demandes de campagnes effectivement soumises par la communauté GM. Elle attribue cette baisse aux difficultés rencontrées par les équipes pour faire financer leurs projets en dehors des jours de mer : achat de matériel avant la campagne, puis traitement des données récoltées après la campagne.

• IODP

La participation au programme IODP est l'autre composante de l'implication marine de la communauté académique en géosciences. Les projets sont portés par des groupes internationaux et la participation française est assurée dans le cadre d'un consortium de pays européens, via la TGIR IODP-ECORD. La fig. 6 montre le nombre d'embarquants français sur des expéditions IODP, et les thématiques abordées. La longévité de ce programme est fondée sur ses succès : succès scientifiques, mais aussi remarquable esprit de coopération internationale, programmation bottom up (il est à noter que les projets ne sont pas sollicités) et évaluation par les pairs, mise en œuvre opérationnelle efficace et adaptée aux besoins (avec en particulier ces dernières années l'usage de plateformes de forage diversifiées), et gestion exemplaire de l'archivage (carothèques et bases de données ouvertes).

• Synthèse pour la période : points forts et faibles

Parmi les points forts, on peut d'abord citer le fort impact de la communauté française en GM dans l'Europe et dans le monde, avec environ 400 articles publiés par an. Plusieurs thèmes de recherche de cette communauté figurent parmi les thèmes

phares de différents programmes internationaux ce qui la rend également très visible.

L'insertion dans les réseaux européens est bonne, mais pourrait être renforcée. La participation aux réseaux d'observation, notamment, s'est structurée ces dernières années, même s'il reste beaucoup à faire, principalement en ce qui concerne l'archivage et la mise à disposition des données. Il y a également un fort dynamisme dans la formation de jeunes chercheurs avec des cursus et des stages en milieu marin et environ 60 thèses soutenues par an.

La flotte et les moyens à la mer sont des atouts majeurs de la recherche marine française et la période écoulée a vu des évolutions positives (jouvenances, nouveaux équipements). L'accès à ces moyens, via les commissions d'évaluation nationales de l'UMS FOF, est également devenu plus lisible. Sur ce dernier point, on constate que le dynamisme de la communauté est cependant un peu en recul en terme de propositions de campagnes à la mer, notamment pour la flotte hauturière. Ceci nous paraît lié aux délais importants de réalisation de certains projets de campagne classés comme prioritaires, mais dans des zones peu fréquentées par nos navires, mais surtout aux problèmes de financement des projets, notamment après l'acquisition des données en mer.

L'un des principaux problèmes actuels de la communauté, relevé avec insistance par différents chercheurs et laboratoires, est en effet la difficulté rencontrée pour financer le travail scientifique, notamment la phase post-campagne à la mer. Le nombre de guichets s'est multiplié, les calendriers des appels d'offres des instances de financement ne sont pas en phase avec ceux de la flotte et ne prennent pas en compte certaines spécificités de la discipline, notamment le calendrier de la programmation des campagnes, qui ne dépend pas de

la volonté du chercheur. Le soutien post-campagnes attribué par le CNRS-INSU ne permet qu'un traitement à minima des résultats. Des difficultés croissantes existent également pour financer la préparation des campagnes et notamment des opérations lourdes telles que le déploiement d'instruments, pour lesquels des coûts opérationnels sont souvent élevés (et dépassent les capacités du système de soutien pré-campagne de l'INSU). Un autre constat des équipes GM consultées est le manque de personnel IT (ingénieurs et techniciens) dans les laboratoires pour le développement, la maintenance, la mise en œuvre des équipements embarqués et de l'instrumentation marine. Ceci compromet le développement de thèmes novateurs. Plusieurs laboratoires considèrent aussi que le manque de personnel IT compromet leur activité à court terme.

En résumé, la communauté française dispose de moyens performants et d'équipements de haute technologie, financés par la TGIR FOF, mais il lui manque le complément financier, souvent faible comparé au coût des jours de mer, pour pouvoir assurer des recherches de haut niveau dans des délais compétitifs.

■ Les enjeux et les priorités pour les années à venir

• Les thématiques de recherche

Parmi les défis scientifiques à relever dans les prochaines années, les thèmes suivants ont été mis en avant par les différents laboratoires du domaine :

- Favoriser les études littorales et couplées terre-mer, notamment en matière d'aléas tsunami/sismique/gravitaire et d'échanges souterrains continent/océan ;
- Étudier les processus non-linéaires dans les systèmes couplés océan-atmosphère-biosphère-Terre interne ;
- Développer l'instrumentation de fond de mer pour obtenir des séries longues de données à haute résolution et aborder la dynamique des processus à l'échelle locale ;
- Décrypter de manière plus poussée les archives marines pour mieux contraindre les changements climatiques et les impacts anthropiques ;
- En ce qui concerne les travaux liés aux ressources minérales profondes, obtenir une meilleure compréhension des processus hydrothermaux et géo-microbiologiques, du bilan des éléments, ainsi que du rôle relatif du magmatisme et de la tectonique dans leur évolution.

Les autres grands thèmes abordés en GM restent d'actualité, comme la chimie et la dynamique du manteau, la structure de la lithosphère océanique, et son évolution depuis sa formation aux marges continentales divergentes jusqu'à la subduction.

• Les besoins en termes d'évolution de la flotte et des moyens à la mer

La période écoulée a vu la jouvence du Marion Dufresne et l'achat d'un nouveau système de sismique mis en œuvre par l'Ifremer. On note également l'organisation, par le Département Infrastructures Marines & Numériques de l'Ifremer dans le cadre de l'UMS FOF, d'un colloque qui s'est tenu au CNRS au printemps 2014 sur les besoins de la communauté en matière d'instrumentation marine. Ce type de réunion a vocation à se reproduire chaque 2 à 4 ans. Parmi les besoins exprimés par la communauté, le développement d'un AUV profond (6000m) apparaît comme l'un des plus importants, mais également l'amélioration de la performance de différents capteurs et le développement d'une sismique numérique.

• Le financement : jours de mer, préparation des campagnes et recherches post-campagne

Le constat général est qu'il est actuellement trop difficile d'obtenir tous les financements nécessaires à la réalisation d'une campagne en mer et principalement à son exploitation dans de bonnes conditions. L'accès au temps navire est obtenu par le biais des projets soumis aux Commissions Nationales de la Flotte (CNFs). Mais les financements nécessaires à la bonne réalisation des projets sont actuellement mal assurés et aléatoires. Le CNRS-INSU, via ses appels d'offre pré- et post-campagnes, permet dans la plupart des cas d'éviter l'annulation du projet, mais ne distribue pas des moyens suffisants et le traitement des résultats en pâtit. Les formats des appels d'offre ANR ou européens ne sont pas adaptés en raison du non-phasing avec le calendrier d'évaluation et de programmation des campagnes à la mer. Par ailleurs il n'y a pas de financements intermédiaires entre les projets ANR et les projets CNRS-INSU, et surtout la chronologie est quasi impossible à bâtir entre les CNFs et ces autres sources de financement éventuel. Il n'y a donc pas de cohérence entre le choix de programmer la campagne et la mise à disposition des moyens pour l'exploiter et la valoriser.

Pour répondre à ce problème, la communauté consultée souhaite unanimement qu'une meilleure synergie s'établisse entre les CNFs et l'ANR, ou, mieux encore, que le budget lié aux campagnes soit individualisé au sein de l'UMS FOF. L'idéal, qui reproduirait le fonctionnement de nos principaux partenaires internationaux (ex.: US, UK, Allemagne), serait un guichet unique comprenant une ou des commissions habilitées à évaluer les projets dans leur intégralité et ce pour toutes les disciplines utilisatrices de la flotte. L'UMS FOF pourrait

être mandatée et mettre en place de telles commissions, pour l'évaluation complète des projets (avis favorable → programmation → financement pré-campagne → financement post-campagne si les résultats sont atteints). Cela pourrait nécessiter de modifier la composition des comités existants et leurs modalités d'expertise afin de respecter les exigences des financeurs du complément de financement (CNRS-INSU, ANR...). Le CNRS-INSU pourrait jouer un rôle moteur en incitant à une reprise des négociations, au niveau ministériel ou au niveau de l'Alliance AllEnvi, entre l'UMS FOF (dont le CNRS-INSU, l'IFREMER, l'IPEV et l'IRD sont partenaires) et l'ANR. En pratique, nous proposons donc la création d'un comité restreint pluri-organismes chargé de conduire une négociation en ce sens avec le Ministère, l'AllEnvi et l'ANR à propos du financement des campagnes en mer (chargés de mission CNRS GM-OA-BEE, CEA, IRD, IFREMER...).

Le financement de certaines campagnes en mer GM soulève également le problème de l'articulation fonds publics-fonds privés. On note en effet l'émergence de projets financés par des fonds privés, tels que Pamela-Total et ceux liés à l'exploration des ressources minérales des grands fonds (pilotage interministériel et fonds privés). Ceci amène la communauté à s'interroger sur les articulations possibles avec ces partenaires et sur le positionnement des tutelles, CNRS et Universités. Il est nécessaire de clarifier quelques procédures pour que ces tutelles interviennent et apportent le cas échéant soutien et accompagnement aux chercheurs impliqués dans ce type de montage financier.

Enfin, la CNFC soulève les problèmes fréquents rencontrés par les porteurs de projets côtiers programmés pour financer le ticket modérateur requis pour l'accès aux navires du CNRS-INSU. Ceci a des conséquences négatives sur certains projets et décourage les demandes. Ce ticket modérateur a récemment été diminué pour les stages d'enseignement en mer. Cette diminution est encourageante mais l'effet ne sera ressenti que lors des prochaines maquettes. La commission remarque également que le ticket modérateur pour les missions relevant des observatoires est identique à celui des missions de recherche alors que l'observation est une tâche fondamentale du CNRS-INSU. Ceci paraît incohérent et une baisse de la valeur du ticket modérateur, aligné sur celui de l'enseignement, est souhaitable pour ces campagnes.

• Les besoins en personnel ingénieurs et techniciens (IT) dédié

Nous sommes conscients que le manque de personnel IT est criant dans la plupart des disciplines. Dans le contexte actuel de pénurie, il nous semble qu'il faut s'organiser de la façon la

plus pragmatique possible. En particulier, nous pensons qu'une meilleure articulation entre les laboratoires GM et la DT CNRS-INSU est souhaitable, autour de projets d'instrumentations, et de certaines campagnes très techniques, par exemple les campagnes de maintenance d'observatoires.

Les objectifs d'archivage/stockage/mise à disposition de données nécessitent également un personnel dédié qui n'existe pas actuellement dans les laboratoires GM, sauf de façon très marginale.

Enfin, le montage de projets multi-partenaires à la mer comporte beaucoup d'aspects techniques, logistiques et juridiques (autorisations de travailler dans les eaux étrangères mais aussi françaises, négociations avec agents maritimes pour le transport de matériel, établissement de contrats multi-partenaires fixant les droits et les devoirs de chacun...). Le durcissement des règles environnementales liées à la préservation des milieux marins et l'augmentation du nombre des zones marines protégées qui en résulte entraînent des changements importants dans les procédures de demandes d'autorisations de travaux, non seulement dans les eaux étrangères mais également dans les eaux françaises. Ouvrir au personnel académique une aide mutualisée sur ces aspects au sein de l'UMS FOF est essentiel (à l'image de ce qui se fait à l'Ifremer). Des cellules d'accompagnement qui seraient mises en place au sein de l'UMS FOF permettraient d'accompagner les porteurs de projet dans le montage et le suivi de tels dossiers. Faute de cela, de nombreuses régions pourraient devenir inaccessibles pour les équipes françaises.

• L'archivage et la mise à disposition des données

La communauté fait ressortir également l'importance du développement d'une politique nationale d'archivage et de mise à disposition des données acquises en mer. L'existence de banques de données et de collections nationales d'échantillons marins est nécessaire pour promouvoir des études globales, notamment celles menées par des scientifiques n'ayant jamais mis les pieds sur un navire. Ce problème ne concerne donc pas seulement la communauté GM mais toute la communauté TS.

La situation est particulièrement mauvaise pour les échantillons de roche. Depuis 2000 (fin d'activité de la lithothèque LINEM à Brest, dont les collections restent cependant accessibles sur demande auprès de l'Ifremer), les échantillons marins des campagnes CNRS-INSU sont dispersés dans les laboratoires et aucune base de données n'a été alimentée. De nombreuses données sismiques sont aussi archivées en local sans

systématique ni visibilité nationale. On note enfin l'absence de gestion à l'échelle nationale pour les carottages.

Deux groupes de travail (« Echantillons marins » et « Sismique marine ») ont été créés par le CNRS-INSU en 2014 pour faire l'état des lieux des échantillons et données acquises lors des campagnes océanographiques pilotées par les chercheurs CNRS-INSU ou sur les navires CNRS-INSU. Ces groupes ont fait des propositions pour l'archivage et la pérennisation de ces données/échantillons et pour leur mise à disposition de la communauté scientifique. Une réflexion est également en cours au sujet de l'archivage et de la mise à disposition des carottes sédimentaires. La solution optimale serait une lithothèque, une carothèque et un espace national de stockage des données sismiques dotés d'un portail unique avec du personnel dédié – établissement de règles simples et claires d'accès aux données, moratoires (en coordination avec le SISMER).

Compte tenu des problèmes à prévoir pour identifier et financer un lieu de stockage unique pour les roches, le groupe de travail propose de travailler sur le portail unique en laissant les échantillons là où ils sont stockés actuellement si ce stockage est satisfaisant, et en ne proposant de nouveaux stockages qu'en fonction des besoins, s'appuyant sur des lithothèques déjà existantes dans certains OSUs. Ceci suppose tout d'abord un état des lieux exhaustif et ensuite l'élaboration d'une base de données et d'un portail d'accès aux informations pour lequel on devrait dégager au minimum un CDD (IE sur 2 ans) qui pourrait être basé à l'UMS FOF.

En ce qui concerne la sismique, le CNRS-INSU a participé au projet européen E-BISS afin, de manière coordonnée avec le SISMER et les différents laboratoires CNRS-INSU, d'améliorer l'archivage des données et leur visibilité. Le projet n'a pas été retenu, mais le souhait du GT est de redéposer E-BISS en 2015. Une participation du CNRS-INSU est souhaitée en amont sous forme d'un IE (CDD 2 ans) pour accompagner les laboratoires dans les travaux préalables d'inventaire, de recollement et de reformatage des données. Ce CDD pourrait partager son temps entre les deux bases de données, échantillons et sismique.

• L'intégration des observatoires fond de mer aux réseaux d'observation nationaux et internationaux

L'observation fond de mer (et dans la colonne d'eau pour les OA (océan-atmosphère) et les sciences de la vie) est l'un des grands enjeux des années à venir. A ce titre, il est souhaitable que les observatoires fond de mer et les sites instrumentés marins puissent être reconnus comme des services d'observation à part entière par le CSNO et à ce titre, être intégrés dans les réseaux d'observation nationaux. L'Europe représente également un enjeu significatif. Les observatoires fond de mer MOMAR et de mer Ligure, ainsi que les projets en cours en mer de Marmara, sont déjà très bien insérés dans une stratégie européenne par le biais du projet EMSO.

Actions Marges

Action coordonnée INSU - Total - Ifremer - BRGM

Sylvie Leroy (ISTEP), Cécile Robin (Géosciences Rennes) et Gianreto Manatschal (IPGS)

Comité scientifique : Sylvie Leroy (ISTEP), Cécile Robin (Géosciences Rennes et Gianreto Manatschal (IPGS) (bureau)

Olivier Dauteuil (Géosciences Rennes), Elia d'Acremont (ISTEP), Christophe Basile (ISTERRE), Virginie Gaullier LOG), Aurélien Gay (Géosciences Montpellier), Laurent Geoffroy (LDO), Nicolas Loget (ISTEP), Lies Loncke (CEFREM), Sébastien Migeon (GEOAZUR), Thierry Mulder EPOC, Raphael Pik (CRPG), M. Marina Rabineau (LDO) (responsables de thèmes et de chantiers)

Ces dernières années, la compréhension des rifts et des marges passives a largement été revue, grâce notamment à de nouvelles technologies d'imagerie sismique, de modélisation numérique de la dynamique lithosphérique et par de nouvelles contraintes issues de données onshore ou offshore, incluant les marqueurs sédimentaires mettant en exergue le lien intime entre processus profond et processus de surface.

Depuis plus de 10 ans, la communauté scientifique française travaillant sur les marges s'est structurée dans un partenariat avec des partenaires institutionnels ou privés, en particulier Total, au travers de projets pluridisciplinaires avec ateliers de restitution réguliers. Les champs thématiques impliqués couvrent les processus géologiques caractéristiques des marges à différentes échelles, depuis la lithosphère (comportement thermique et mécanique) et son couplage avec le manteau jusqu'au système sédimentaire en érosion-sédimentation en passant par la circulation des fluides dans les milieux poreux sédimentaires.

De cette communauté ont émergé des concepts nouveaux assurant une reconnaissance et une expertise internationale unanimement reconnue.

1. Cinématique des plaques
2. Extension des marges – concept d'hyperextension
3. Marges volcaniques
4. Marges jeunes – étude intégrée
5. Marges évoluées – étude intégrée- lien profond-surface
5. Mouvements verticaux post-rift des marges
6. Fonctionnement des systèmes sédimentaires ultimes (turbidités)
7. Démarche « source to sink » sur les marges
8. Expulsion primaire des fluides
9. Marges transformantes

Un des succès est la création de deux chantiers géographiques pluridisciplinaires pour lesquels leur compréhension a fortement progressé : le Golfe d'Aden sur le thème « marge

jeune » et la Méditerranée Occidentale sur les thèmes « marges évoluées », « source to sink » et « mouvements verticaux des marges ». La communauté Actions Marges a ainsi identifié ces deux chantiers comme parmi les meilleurs laboratoires naturels pour y étudier les processus de genèse de rifts et de marges passives, en lien avec les processus climatiques, lithosphériques, de transferts de masse jusqu'à l'inversion des marges et les processus orogéniques (Alpes, Pyrénées).

Plusieurs questions scientifiques émergent :

■ Marges obliques – transformantes

Les avancées de ce chantier dans le cadre du programme d'Actions Marges ont permis de mettre en évidence un certain nombre de processus spécifiques aux marges transformantes : mécanismes tectoniques, déformation associée aux décrochements, processus d'amincissement crustaux (pull-apart, transtension) et mouvements verticaux syn- et post-déformation. Le rôle de la flexuration lithosphérique reste à étudier, comme la structure thermique et son évolution au cours de l'histoire de la marge. Les processus sédimentaires sont également apparus spécifiques, avec une prédominance des processus gravitaires (arrachements, glissements en masse et dépôts associés) et des phénomènes de transports latéraux (contourites) dans des marges dont la morphologie exerce un contrôle de premier ordre sur la circulation océanique profonde.

Un grand nombre de questions restent à aborder dans le futur, comme la symétrie ou l'asymétrie des marges, ou le rôle du manteau dans leur formation. La structure profonde des plateaux marginaux (un tiers des marges transformantes) reste quasi-inconnue de même que les facteurs contrôlant leur formation, principalement en raison de l'absence d'acquisition de nouvelles données. Enfin, les facteurs contrôlant la diversité des marges transformantes restent inconnus par manque d'études comparatives. La compréhension de cette diversité

et des modèles sédimentaires associés constitue un très vaste champ d'exploration.

■ Marges volcaniques

Grâce notamment à Actions Marges, la France est en pointe sur ce thème grâce à une comparaison directe entre données de terrain et données géophysiques qui ont permis assez tôt de dégager des concepts de rupture lithosphérique très différents de ceux proposés pour les marges non magmatiques (ou le magmatisme, naturellement, intervient en fin du processus d'amincissement lithosphérique). Il reste cependant un point majeur à résoudre pour contraindre notamment l'interprétation des profils sismiques profonds de ces marges et pour pouvoir modéliser notamment leur évolution isostatique : c'est celui de la composition et des propriétés physiques de la croûte inférieure de ces marges. Il faut donc chercher des croûtes profondes de marges volcaniques. Ceci suppose une action de terrain dans des contextes orogéniques, incluant possiblement la réinterprétation de certaines ophiolites.

■ Extension des marges – concept d'hyper-extension

D'autres questions restent en suspens, pour partie communes d'ailleurs aux marges obliques et/ou volcaniques :

- Quels sont les processus thermo-mécaniques et magmatiques contemporains de l'extension extrême d'une lithosphère continentale et d'une rupture (breakup) lithosphérique ?
- Comment ces processus contrôlent-ils l'espace d'accommodation / la subsidence et le régime thermique d'une marge passive ?
- Quels processus président à la formation des limites de plaques (incluant systèmes transformants, systèmes magmatiques et nouvelle croûte océanique ; collaborations à développer avec la communauté « Ridge »)
- Qu'elle est l'importance de l'héritage du rift sur les systèmes convergents puis orogéniques, comme par exemple sur l'initiation de la subduction ? (interactions à développer avec la communauté des sismologues pour mieux imager les structures crustales et lithosphériques)
- Qu'elle est l'importance de la topographie dynamique sur les régimes de rift et sur l'évolution des marges passives ?

■ Intégration amont – aval des systèmes sédimentaires

La modélisation numérique des systèmes sédimentaires (Sedsim, Dionisos...) a montré la faiblesse des lois de transport utilisés (processus physiques limités à des échelles de temps

de quelques centaines de milliers d'années ou loi de diffusion à coefficients *ad hoc*). Le défi est d'aller plus loin que les règles globales de bilan de masse entre le domaine continental et le domaine marin défini par la stratigraphie séquentielle dans les années quatre-vingt-dix. L'objectif futur est d'étudier des systèmes terre-mer bénéficiant de bases de données remarquables (sismique, puits datés) du continent à la plaine abyssale pour définir de nouvelles lois de transport intégrant les longues échelles de temps et la variabilité des paramètres topographie, déformation, niveau de la mer, flux sédimentaire. Ces bases de données ne peuvent être qu'industrielles sur des régions « matures » (Golfe de Guinée, Australie...) où le travail de quantification des flux reste cependant encore à réaliser.

■ Mouvements verticaux des marges

Les marges passives sont classiquement vues comme un élément géodynamique simple subissant une subsidence provoquée par un rééquilibrage consécutif à la rupture continentale. Or, les processus à l'origine de déplacements verticaux sont plus nombreux depuis des processus externes (érosion/altération, climat) modifiant la charge locale jusqu'à des processus profonds (dynamique mantellique). Chacun présente des caractéristiques temporelles et spatiales qui lui sont propres. Ainsi, ils peuvent durer quelques secondes (séismes) à plusieurs dizaines de Ma (rééquilibrage thermique), affecter une zone de quelques dizaines de mètres (séismes) à plusieurs milliers de kilomètres (dynamique mantellique) pour une amplitude du centimètre (marées) au kilomètre (inversion de marges). Il est donc fondamental de déconvoluer le signal de déformation afin de quantifier la part relative des différents processus impliqués : ceux présents sur toutes les marges qui correspondent à l'évolution implicite d'une marge (réajustement thermique, subsidence induite par la charge sédimentaire, uplift lié à l'érosion de la partie amont, topographie dynamique), de ceux plus régionaux (tectonique locale, magmatisme, point chaud, rebond glaciaire...). Compte-tenu des déformations attendues, il est impératif de trouver des marqueurs et des proxys de cette déformation aussi bien à terre, qu'en mer et de les dater précisément. Il y a un véritable défi méthodologique notamment pour établir un modèle évolutif depuis la partie amont du système en érosion à la partie aval en dépôt. La modélisation numérique s'appuyant sur des données de terrain devient un outil incontournable pour fixer la gamme des possibles des processus et proposer des corrélations entre les différents domaines du système.

Les implications de cet axe dépassent largement le cadre tectonique et géodynamique : en effet ces mouvements contrôlent largement : les transferts de matières en influant

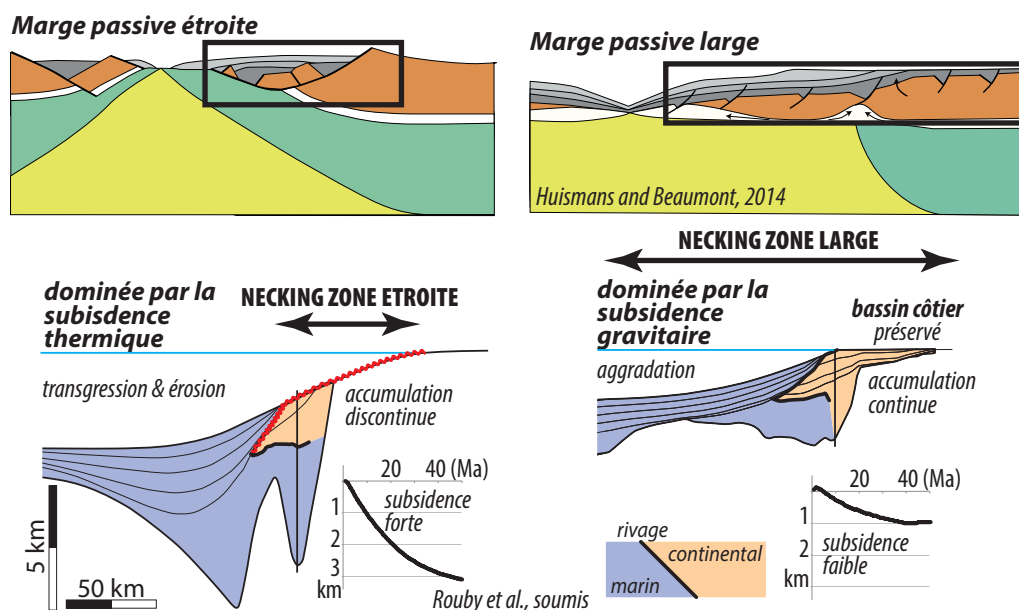


Fig. 1 : Contrôle de l'architecture stratigraphique des mouvements verticaux des marges par approche numérique (Rouby et al., 2014).

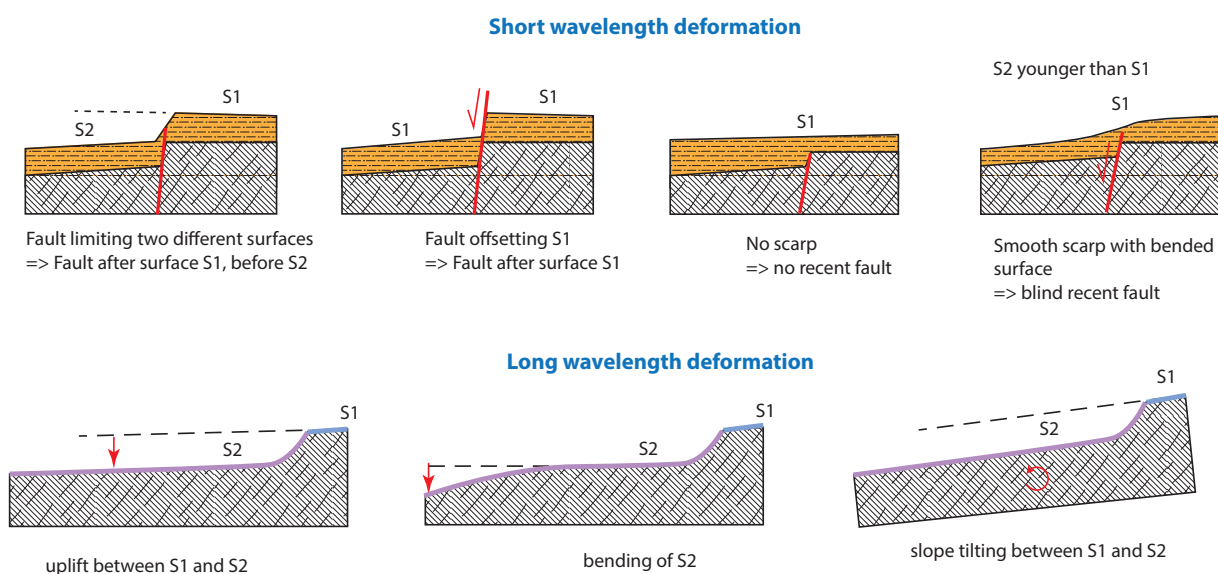


Fig. 2 : Enregistrement des déformations courte-longueur d'onde (en haut) et grande longueur d'onde (en bas) par les surfaces d'aplanissement (Picart, 2015)

à la fois sur l'érosion des domaines émergés, le stockage et les transits vers l'océan; l'évolution thermique du système (accélération ou ralentissement de l'enfouissement, maturation de la MO...).

■ Fluides-Matière organique – Matières minérales

Action Marges a permis de fédérer et d'organiser la petite communauté scientifique travaillant sur ces thématiques et l'a ainsi aidée à produire des résultats innovants basés sur des

approches pluri-disciplinaires et multi-chantiers (Méditerranée orientale, Golfe de Guinée, bassin du sud-est, Nouvelle Zélande, Pyrénées). Ce thème a pour but de mieux contraindre la chaîne continue de transformations entre le dépôt de la matière organique, la production de fluides, et leur migration et leur impact sur la colonne sédimentaire.

Les évolutions complexes Matière Organique-Matières Minérales et la production de fluides dans les premières centaines de mètres de la colonne sédimentaire sont abordées en appréhendant le rôle des sources (marine/terrestre) et la nature et le rôle des argiles dans la préservation des MO, le rôle

de l'environnement de dépôt (oxique/anoxique), les conditions de la dégradation bactérienne de la MO et les modalités de la production/libération des fluides. Les relations entre sources de fluide/conduits/marqueurs d'expulsion sont analysées par les circulations grande échelle et leurs géométries, les marqueurs de l'expulsion (comparaison sismique/terrain), et la dynamique des expulsions et leur timing au cours de l'histoire d'un bassin. Enfin, les implications des expulsions de fluides sur l'encaissant sédimentaire ont été analysées pour contraindre : le rôle des fluides dans les modifications des propriétés rhéologiques et la dégradation rapide des matériaux ; le rôle de l'état des fluides sur le type de glissement en masse déclenché ; la caractérisation des surpressions nécessaires au déclenchement d'une rupture dans la colonne sédimentaire ; le lien temporel entre la libération/circulation des fluides et la rupture d'une faille.

Ces résultats ont été obtenus grâce à l'accès à de larges sets de données multi-échelles (bathymétrie, sismique HR/THR/3D, carottes), la mise en commun de moyens analytiques (comme les analyses minéralogiques, cristalochimiques, isotopiques et Rock-Eval), le développement de modélisations hydro-mécaniques et analogiques.

■ Chantier pluridisciplinaire – MEDOCC

Les marges de la Méditerranée Occidentale, constituent un objet géodynamique cohérent et unique, résumant différents stades de la genèse des marges divergentes et de leur devenir. Les marges du Golfe du Lion, de la Sardaigne, et de la Ligure, située dans un contexte d'arrière-arc, ont des géométries crustales comparables en tout point à celles des marges type de l'Atlantique : la marge du Golfe du Lion est semblable à la marge du Gabon ; la marge de Ligure, plus abrupte, à celle de certaines marges équatoriales ; la marge Est-Sardaigne syn-messinien est réactivée ; le bassin de Valence représente un stade avorté ; la marge algérienne, un stade en inversion. D'autre part, toutes ces marges passives sont jeunes et fortement subsidentes et donnant lieu à un enregistrement exceptionnel des processus sédimentaires qui permet une approche détaillée des effets des variations climatiques et tectoniques au cours des 30 derniers millions d'années sur les flux sédimentaires de la ligne de rivage, au plateau continental, sur la pente, dans les canyons et jusqu'aux bassins profonds. Enfin, l'événement messinien représente un marqueur

FMOMM: les verrous scientifiques du T-PEG-ME

Horizon 2020

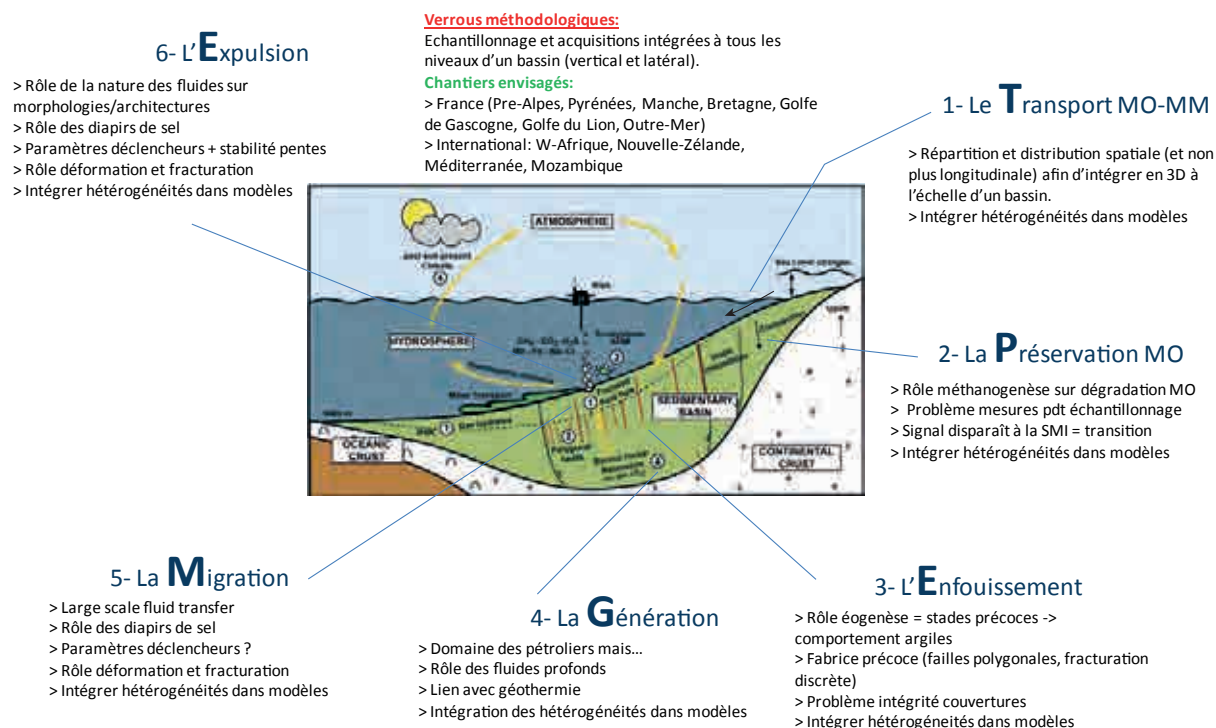


Fig 3.: Schéma de synthèse des actions envisagées au sein du thème FMOMM (Fluides-Matière Organique et Matières Minérales) dans le cas d'un appel à projet Action Marges à l'horizon 2017-2020 (modifié après Anka, Berndt and Gay, 2012)

RESULTATS

- Chronologie du rifting / drifting / réactivation
- Structures des marges et bassins
- Cartographie de l'épisode messinien à l'échelle du bassin
- Accommodation de la reprise en compression : style de déformation / localisation/ impact sur les systèmes sédimentaires et la tectonique salifère
- Rôle de l'héritage sur la structuration des marges (segmentation / asymétrie)
- Relation processus profonds et superficiels
- Lien Terre-Mer analyses structurales et sédimentaires

QUESTIONS EN SUSPENS:

- Géométrie 3D du slab: évolution spatio-temporelle ?
- Dynamique mantellique, comportement thermo-mécanique ?
- Structure crustale ?
- Nature et structure de la TOC ?
- Relation tectonique/climat/eustatisme sur le flux sédimentaire ?

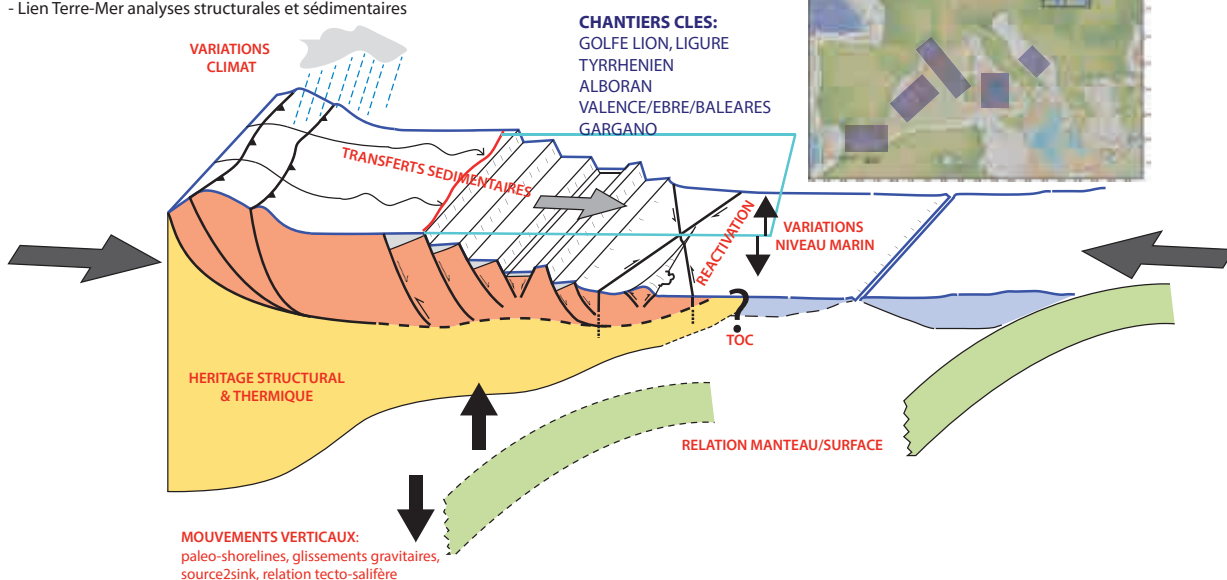


Fig 4.: Bloc tridimensionnel schématisant les principaux résultats scientifiques, les chantiers-clés ainsi que les questions en suspens du chantier pluridisciplinaire MEDOCC, © V. Gaullier

unique pour l'étude des transferts sédimentaires et leurs conséquences sur les mouvements verticaux des marges.

- Quel est le rôle respectif de la tectonique et du climat sur ces flux sédimentaire ? Cette question reste largement ouverte et donne lieu à une controverse intense actuellement. Dans les zones carbonatées Méditerranéennes, il convient de développer des méthodes de quantification des processus de karstification, afin d'intégrer la dissolution des carbonates dans les bilans.

- Quels sont les liens entre processus superficiels et profonds ? Afin d'y répondre, un effort tout particulier doit être porté sur la quantification des mouvements verticaux via l'utilisation de marqueurs stratigraphiques cartographiés en 3D (messinien, paléo-rivages, karsts) et la paléo-topographie, ainsi que sur la discrimination des effets relatifs de la tectonique salifère, de l'argilocinèse par rapport à la tectonique crustale et sur les modélisations (stratigraphiques, lithosphériques...).

- Quelle est la rhéologie de la lithosphère (nature de la croûte, TOC, manteau, ...) ? Quel est son comportement lors de la genèse de la marge, lors de sa réactivation et lors des transferts de masse dus à l'événement Messinien ?

- Comment se réalise la réactivation des marges passives en contexte de domaine arrière-arc ?

■ Chantier pluridisciplinaire : Golfe d'Aden - Afar - Sud Mer Rouge

Cette province est remarquable car il s'agit du plus jeune point triple du globe où trois rifts, dont deux déjà océanisés, fragmentent un continent sous l'influence de l'activité d'un panache mantellique. Tous les stades d'extension, du pré-rift au centre d'accrétion océanique actif y sont représentés, le long d'une variété de segments de marges continentales étirées, volcaniques ou non, quand on s'éloigne de l'influence du point chaud le long du Golfe d'Aden ou de la Mer Rouge. À l'opposé, le cœur de la province volcanique représente le stade ultime de la fragmentation continentale, objet unique à l'échelle du globe, pour lequel l'activité, la morphologie et la segmentation des rifts axiaux sont comparables à celles des segments océaniques, mais accessibles à pieds secs ! Ce chantier permet d'étudier de façon intégrée l'évolution d'un système de marges jeunes où sont exprimées encore nettement les relations syn-rift/post-rift et Terre/Mer autour de la transition continent/océan lors de l'amincissement lithosphérique extrême et de mettre en évidence une variabilité importante des structures d'Ouest en Est, en s'éloignant du point chaud Afar. L'ensemble du questionnement scientifique intrinsèque des Marges y est abordé et peut y être « adressé ».

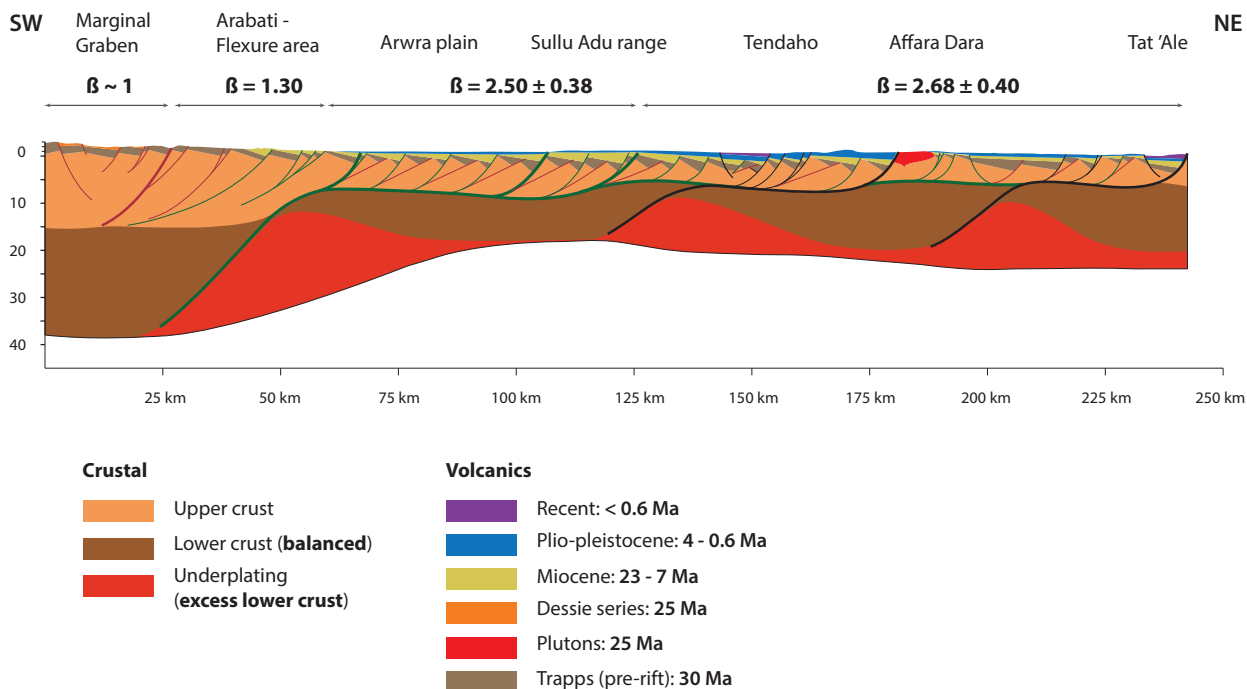


Fig 5.: Cette coupe représente une nouvelle vision de la structure de la marge W-Afar, unique analogue sur Terre de marge volcanique au stade d'extension proche du break-up. Elle a été réalisée par le groupe de chercheurs pluridisciplinaire du chantier Afar-Aden du programme Actions Marges (Stab et al. 2016), et montre l'importance des volumes de magmas ajoutés à la croûte, processus très spécifique qui au cours de l'extension compense l'amincissement à l'aplomb des marges volcaniques.

Du fait de sa participation à l'Action Marges, cette communauté structurée émerge peu aux autres CT INSU et peut donc sembler peu visible vu de l'INSU. Elle réussit sur une des missions du CNRS : transférer une recherche fondamentale de haut niveau au monde industriel. Cette communauté doit également être soutenue par le monde académique et par des recrutements de jeunes chercheurs/enseignants-chercheurs dans les années à venir.

Du fait de la distribution des âges de cette communauté « marges », certaines spécialités sont menacées. La première touchée est celle qui concerne la thermicité de la lithosphère et son expression dans les bassins. Cette expertise peut disparaître d'ici 3 ans. Un recrutement CNRS sur poste fléché est absolument requis.

■ Flotte

De nombreuses campagnes ont été et sont encore proposées et soutenues financièrement (via le ticket modérateur INSU) dans le cadre d'Actions Marges et autres projets intimement liés. Les marges continentales étant pour la plupart immergées, l'acquisition de nouvelles données marines constitue une part importante dans la progression de notre compréhension du système dans son ensemble, depuis la mer jusqu'à la terre.

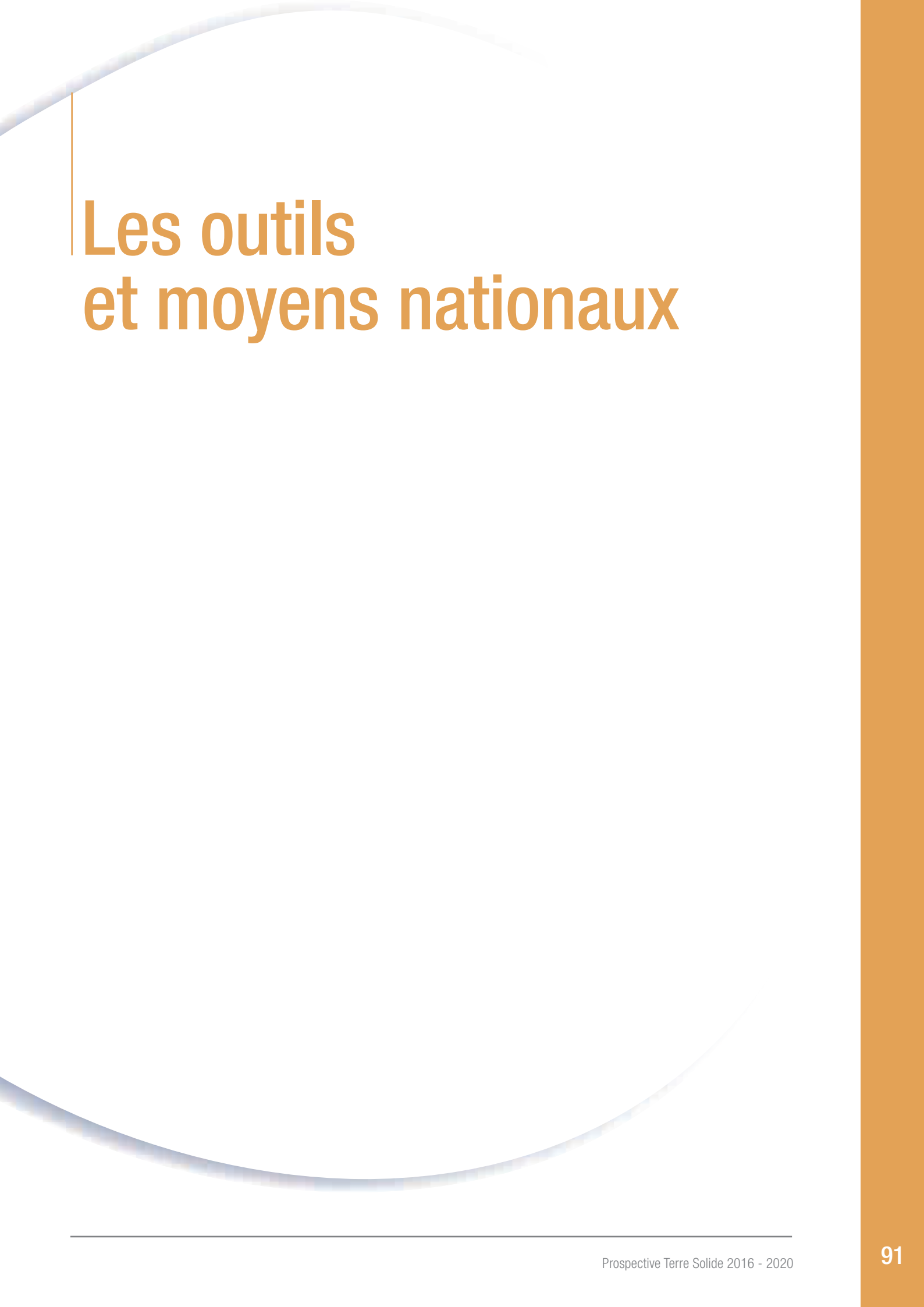
■ Actions Marges en quelques chiffres

Il est important pour les recherches futures de développer des collaborations avec l'industrie car seules ces dernières peuvent fournir les données nécessaires à l'élaboration de nouvelles théories. Le programme Actions Marges est une pépinière de projets qui ont donné et peuvent donner naissance à des projets plus larges (ANR – projets ECORD – projets IODP Gold, ITN, ERC etc.).

Il est également important que cette communauté continue à développer son expertise dans le domaine des rifts et des marges continentales passives car les implications sociétales sont d'importance et, entre autres, ce domaine est à fort potentiel d'embauche pour nos étudiants.

- Budget de 250 à 350 Keuros par an (INSU-TOTAL- IFREMER-BRGM) / 55 projets financés / budget moyen 6 keuros.
- 25 laboratoires français et autant de collaborations internationales
- 120 chercheurs français (CNRS-INSU- Universités, IFREMER, BRGM)
- 30 chercheurs étrangers





Les outils et moyens nationaux

Observation et Terre Solide

Michel Diamant (IPGP), Dominique Gibert (Géosciences Rennes), Philippe Charvis (GéoAzur)

L'observation pérenne est un des trois piliers, au côté de l'expérimentation et de la modélisation, des activités de recherche à l'INSU et en particulier dans le domaine Terre Solide. Héritiers d'une longue tradition remontant en France par exemple au XVI^e siècle pour les premières observations du champ magnétique terrestre, les observations dans le domaine Terre Solide au XXI^e siècle se font au sol dans des stations et observatoires pérennes regroupés en réseaux internationaux mais aussi depuis l'espace avec des missions satellitaires dédiées ou non et enfin avec des dispositifs de mesures dans le domaine océanique installés en fond de mer ou dans la colonne d'eau. Les mesures sont soit continues, soit répétées avec des fréquences temporelles variables.

Ce dispositif cohérent et pérenne d'acquisition d'observations de paramètres physiques et chimiques permet la caractérisation d'événements rares ou brefs (séismes, éruptions volcaniques, effondrements gravitaires, etc.) et d'événements éventuellement associés (tsunamis, lahars, etc.), le suivi de processus plus lents (mouvements de la surface dans les zones actives, liés au rebond post-glaciaire, grands glissements de terrain, variation de la composition chimique des émissions volcaniques, etc.), l'évolution séculaire de certaines variables (champ magnétique, champ de pesanteur, etc.). C'est un support indispensable aux recherches modernes dans le domaine : c'est par exemple la combinaison d'observations géodésiques et sismologiques continues qui a permis la découverte récente des séismes lents.

Un grand nombre de processus agissant dans le système Terre impliquent des couplages et rétroactions entre les différents compartiments physiques (Terre Solide, surfaces et interfaces continentaux, océan et atmosphère) comme avec le milieu vivant au premier rang duquel la composante anthropique. Cela signifie que des observations relevant a priori uniquement du domaine Terre Solide sont indispensables à d'autres, c'est par exemple le cas des observations magnétiques pour la météorologie de l'espace, de la quantification des transports de masse pour l'océanographie ou l'étude de la cryosphère, des observations des panaches volcaniques pour les interactions aérosols-atmosphère, etc. Les observations en géodésie permettant les réalisations du système de référence terrestre sont partagées entre les domaines Astronomie-Astrophysique et Terre Solide, celles sur l'érosion et les mouvements de

versants le sont avec le domaine SIC, et le niveau des mers relève à la fois de l'Océanographie et du domaine Terre Solide. Les observations en Terre Solide relèvent donc à la fois de notre domaine sensu-stricto, de l'observation du système Terre global avec tous ses compartiments et des interfaces entre Terre Solide et les autres secteurs de l'INSU, SIC, Océan-Atmosphère et Astronomie-Astrophysique¹.

Compte tenu de ce contexte ; les missions générales des services nationaux d'observation en terre interne sont de différents types :

- Mesure, archivage et étude de paramètres physiques et chimiques de la Terre Solide ;
- Étude des aléas naturels en Terre Solide ;
- Mission d'expertise auprès des autorités pour les aléas telluriques ;
- Aide à la gestion des ressources et des déchets.

Les observatoires, portés par l'INSU et ses partenaires académiques, ont une vocation de recherche amont et n'ont pas a priori les capacités pour accomplir des missions de surveillance, ni la légitimité pour assurer les missions d'alerte. Bien évidemment les données et l'expertise acquises grâce aux observatoires de recherche peuvent et doivent contribuer à la surveillance, mais celle-ci demande des moyens supplémentaires qui ne peuvent pas être financés par le MENSUR et l'alerte doit être assurée par des organismes mandatés pour cela avec les moyens afférents. La structuration actuelle fait que ce n'est pas toujours le cas, et jamais le cas pour les risques volcanologiques sur le territoire national où les observatoires volcanologiques de la Réunion et des Antilles assurent de fait la surveillance et fixent un niveau d'alerte auprès des autorités sans moyens dédiés. Une des tâches prioritaires des années à venir sera de clarifier les rôles et contributions respectives des différents acteurs impliqués dans l'identification et la gestion des risques volcanologiques sur le territoire national.

■ Services nationaux d'observation et sites instrumentés

Dans ces dernières années, sous l'impulsion de la Commission Spécialisée du domaine, les services d'observation ont

1 - Outre la géodésie, la planétologie est l'autre grand domaine à l'interface entre AA et TS. Actuellement, les actions en planétologie Terre Solide ne relèvent pas des missions ou tâches de service

été regroupés en un nombre limité de Services Nationaux d'Observation, pilotés chacun par un responsable s'appuyant sur un conseil scientifique et soutenu par des OSU dans le cadre d'un engagement quadriennal. Ce schéma a été ensuite étendu à l'ensemble des domaines de l'INSU. Par ailleurs un label « site instrumenté » a été mis en place. Une commission dépendante de la CSTS, la Commission des Services Nationaux d'Observation (CSNO) assure le suivi des SNO et des sites labellisés.

La CSNO a un rôle d'évaluation et de conseil. Ses avis sont transmis à la CSTS et à la direction de l'INSU. Les missions de la CSNO sont les suivantes :

- Proposer un budget pour chaque SNO à la direction de l'INSU sur la base des demandes et rapports annuels des responsables de SNO. Proposer des priorités de recrutement des physiciens et physiciens-adjoints du CNAP et des ingénieurs.
- Évaluer les services nationaux d'observation à partir de l'examen des :
 - Moyens mis en œuvre ;
 - Observations conduites ;
 - Politique de distribution des données.
- Analyser les demandes de nouvelles labellisations de SNO ou de sites instrumentés.
- Assurer une prospective à plus long terme.

Les SNO, au nombre de cinq, peuvent regrouper plusieurs services. Ce sont :

- ST-SO1, Service national d'observation Volcanologique (IPGP, OPGC, OSUG, OSUR) ;
- ST-SO2, Service national d'observation en Sismologie (EOST, IPGP, OCA, OMP, OPGC, OREME, OSUG, OSUNA) regroupe le RéNaSS, le BCSF, le RAP, GEOSCOPE et le RLBP ;

- ST-SO3, Service national d'observation en Géodésie et en Gravimétrie (EOST, IPGP, OCA, OMP, OPGC, OREME, OSUG) regroupe actuellement le RéNaG et le SO Gravimétrie ;
- ST-SO4, Service national d'observation en Magnétisme (IPGP, EOST) regroupe les services BCMT et ISGI ;
- ST-SO5 : OMIV Service national d'observation des instabilités de versants (EOST, OSUG, OCA, THETA).

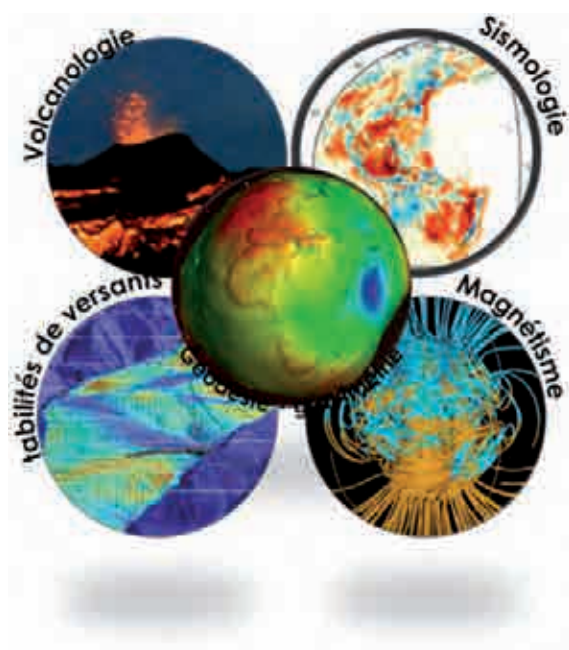
En complément des SNO l'étude de certains processus géodynamiques fondamentaux (comme le rifting ou la subduction) ou certains outils ou sites exceptionnels (OHASIS-BIO, etc.) nécessitent une durée d'observation de quelques années, en continu ou de façon répétée, ou avec une densité spatiale supérieure (par exemple en cas de forçage de certains phénomènes, pour des observations pluridisciplinaires de durée limitée, ou dans des sites situés à l'étranger...).

C'est pour cela que le label « sites instrumentés » a été créé et a été attribué après examen par la CSNO à sept entités :

- Le laboratoire souterrain à bas bruit de Rustrel (LSBB) ;
- Le site instrumenté de Corinthe : Corinth Rift Laboratory (CRL) ;
- Les sites instrumentés en fond de mer en mer Ligure, aux Açores et en mer de Marmara, de l'infrastructure de recherche EMSO (European multidisciplinary seafloor observatory) ;
- L'observatoire hydroacoustique de la sismicité et de la biodiversité (OHASIS-BIO) ;
- Les volcans explosifs - laboratoires indonésiens (VELI) ;
- Les sites pour l'étude des processus sismogéniques et de l'aléa sismique des zones de subduction (Chili, Mexique) ;
- L'observatoire géodésique de Tahiti (OGT).

Il est sans doute nécessaire de faire évoluer cette liste (EMSO-FR est maintenant une IR...) mais cette labellisation site instrumenté, même si elle n'implique pas automatiquement de soutien spécifique de l'INSU, est importante car elle permet une certaine souplesse, la reconnaissance de sites hors du territoire national avec des co-labellisations d'autres organismes (IRD...) et peut anticiper une évolution des SNO dans le temps. La mise en œuvre et le fonctionnement des services nationaux et sites labellisés est assurée par des personnels CNAP de la section Terre Interne mais aussi par des personnels enseignants-chercheurs, chercheurs, ingénieurs et techniciens relevant des universités, d'OSU à statuts spécifiques (IPGP, OCA) et de plusieurs EPST (CNRS, IFSTTAR, IRD).

Le budget hors salaires attribué annuellement à l'ensemble du dispositif sur les dernières années est de l'ordre de 950-970 k€.



■ Quelques avancées obtenues grâce aux SNO en Terre Solide

De nombreux résultats scientifiques ont été obtenus récemment grâce aux données acquises dans les services nationaux d'observation en Terre Solide. On peut aussi citer quelques avancées en se focalisant sur celles ayant un impact sociétal fort en ce qui concerne les risques, les ressources et sur la compréhension de processus liés au changement global :

SNO Volcanologie : l'information systématique auprès des autorités des éruptions au Piton de la fournaise.

SNO Sismologie : l'évolution du réseau accélérométrique permanent vers la « sismologie urbaine » en liaison avec le génie civil pour la quantification du risque sismique. Les travaux sur la sismicité induite par les activités anthropiques. L'ouverture de l'utilisation des données sismologiques vers d'autres communautés par exemple : Océan-Atmosphère pour le suivi de l'état de l'océan et de la banquise, Surfaces et Interfaces Continentales pour la dynamique des flux hydriques érosifs.

SNO Géodésie-Gravimétrie : la quantification de déplacements dans les Alpes de mouvement verticaux sans mouvement horizontaux significatifs. Les cartographies globales des anomalies gravimétriques.

SNO Magnétisme : Les développements de nouveaux indices utiles à la météorologie de l'espace.

SNO OMIV : La mise en évidence d'une relation volume des glissements de terrain et magnitude sismique.

■ Les liens avec les infrastructures de recherche nationales et européennes et l'international

Au niveau national, les observations en Terre Solide s'appuient et bénéficient d'infrastructures de recherche existantes ou inscrites sur la feuille de route nationale du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche.

• Le réseau sismologique et géodésique Français (RESIF)

RESIF est un consortium de 18 organismes de recherche (EPST, EPIC,...) et d'établissements académiques français coordonnés par le CNRS-INSU. RESIF est une infrastructure de recherche

et à ce titre bénéficie d'un financement annuel pour son fonctionnement. L'équipement quant à lui est financé grâce au succès obtenu à l'appel d'offres EQUIPEX de la seconde vague (RESIF-CORE). RESIF vise d'abord à mettre en place un équipement national d'excellence pour l'observation et la compréhension de la Terre interne. Cet instrument ambitieux va permettre d'acquérir de nouvelles données de qualité dans les domaines de la sismologie, la géodésie et de la gravimétrie. Réparti sur l'ensemble du territoire métropolitain terrestre, il permet de mesurer l'activité du sol sur des échelles de temps allant de la fraction de seconde à la décennie. Les données sismologiques acquises par l'instrumentation RESIF sont archivées et distribuées via un centre de données.

L'instrumentation consiste en des réseaux permanents des services d'observation des SNO Sismologie et Géodésie-Gravimétrie ainsi que des parcs instrumentaux mobiles, pour la plupart gérés par la Division technique de l'INSU.

L'instrumentation de RESIF s'intègre naturellement et est interopérable avec les dispositifs européens et mondiaux d'instruments.

RESIF est aussi labellisé en tant que « Système d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement » (SOERE) par l'alliance ALLENI.

• European Multidisciplinary Seafloor and water column Observatory (EMSO)

EMSO-FR est l'infrastructure de recherche française, composant de l'infrastructure européenne EMSO, qui met en œuvre des observatoires de fond de mer et de la colonne d'eau. La France a la responsabilité de trois sites : aux Açores, en mer Ligure et dans la mer de Marmara. Les observatoires d'EMSO acquièrent des séries de données temporelles en milieu marin profond. Les objectifs principaux pour notre domaine concernent l'étude de processus sismologiques, volcaniques, hydrothermaux, gravitaires et tectoniques. Ces observatoires devraient aussi à terme pouvoir compléter des réseaux globaux.

• ForM@Ter

ForM@ter est un pôle de données et de service en cours de mise en place. Il est issu des conclusions du rapport d'un groupe de réflexion mis en place par l'INSU et le CNES sur les pôles thématiques qui a recommandé la création de quatre pôles de données et de service, un par grand compartiment du système Terre. Le but est de donner accès aux données

spatiales et « *in situ* » ainsi qu'aux produits dérivés, d'abord pour les communautés scientifiques. Le pôle Terre Solide, intitulé ForM@Ter, a été initié en 2012. ForM@Ter s'inscrit dans le contexte « big data » global et répond au souhait exprimé par les tutelles d'éviter la multiplication des centres de données particulièrement énergivores.

Pour la partie atmosphère, un pôle, désormais intitulé AERIS, regroupe notamment les anciens pôles Ether et Icare. Pour la surface continentale, le pôle Théia existe depuis plusieurs années, et s'appuie sur un Equipex (Geosud). Pour l'Océan, le pôle ODATIS est également en construction.

En parallèle, le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche dans le cadre de la remise à plat de la feuille de route sur les infrastructures de recherches a incité à la mise en place d'un projet d'une IR « pôle de données Système Terre » fédérant les quatre pôles. Ce projet a été retenu et est sur la feuille de route des IR. Il reste à la construire pour 2018.

Dans ce cadre, le pôle Terre Solide, est appelé à jouer un rôle de portail des données spatiales, *in situ* et d'expérimentations du domaine. Il doit apporter de la plus-value, notamment pour les données et services dans les champs dans lesquels des centres de données n'existent pas ou demandent à être développés. Il doit, en synergie avec les autres structures du domaine et au sein de cette nouvelle infrastructure de recherche inter-domaines, renforcer la communauté Terre Solide en lui donnant accès aux données et aux produits dont elle a besoin pour ses recherches.

Pour cela, ForM@Ter, représentant la communauté Terre Solide au sein de la future infrastructure de recherche, va assurer un rôle fédérateur des différents centres de données déjà présents au sein de structures de notre domaine et va développer des services répondant aux besoins exprimés par la communauté.

• L'European Plate Observing System (EPOS)

Epos est une infrastructure de recherche européenne du domaine Terre Solide, en phase de mise en œuvre après avoir été sélectionnée par la Commission Européenne dans le cadre d'ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures). Aujourd'hui 23 pays sont partenaires (18) ou associés (5) à EPOS. EPOS est une des infrastructures européennes, créées ces dernières années, dédiées à l'observation et l'étude du système Terre et de ses différents compartiments : géosphère, hydrosphère, atmosphère et biosphère. EPOS y représente le domaine Terre Solide et concerne une grande partie des observations géophysiques et géologiques, même si EPOS

ne couvre pas à elle seule la totalité du vaste spectre des disciplines des Sciences de la Terre. D'autres complètent le panorama, c'est le cas par exemple d'EMSO, citée plus haut.

En réunissant des infrastructures existantes, en facilitant l'interopérabilité des données, en fournissant de nouveaux produits, EPOS a l'ambition de créer une plate-forme de recherche pluridisciplinaire en Europe rendant accessibles et interopérables des données et produits d'observatoires, réseaux, instruments dans des disciplines des sciences de la Terre telles que la sismologie, la géodésie, la volcanologie, la tectonique, la géologie, le géomagnétisme, le paléomagnétisme.

Les équipes françaises ont largement participé à la construction et au portage des services d'EPOS sous la coordination du CNRS-INSU. Un point fort de la participation française au départ était RESIF, à laquelle s'ajoutent d'autres services portés par des Services Nationaux d'Observation (volcanologie, magnétisme...), ForM@Ter, les services portés par le BRGM etc.

• L'implication internationale.

Au-delà de leurs implications et intégrations dans des structures européennes décrites ci-dessus, les services d'observation du domaine sont aussi naturellement largement impliqués dans des structures internationales. La France a la responsabilité de services mondiaux (Bureau Gravimétrique international par exemple) ou contribue activement à d'autre (Intermagnet).

■ La feuille de route des années à venir

• Poursuivre la structuration des services

Poursuivre la structuration des SNO en Terre-Solide :

- Un responsable par SNO est missionné par le CNRS-INSU, gère les moyens et les financements, définit les priorités de recrutement.
- Un conseil scientifique représentatif.
- Veiller à la leur mission propre : acquérir et diffuser des données destinées d'abord à la communauté scientifique dans le respect des normes internationales.
- Dynamiser l'interaction recherche-observation.

Évaluer régulièrement (par exemple tous les 5 ans) les SNO

- La pertinence du SNO par rapport à une problématique scientifique actuelle, son évolution et les potentialités futures non encore identifiées.

- L'organisation et le fonctionnement du SNO.
- La valorisation des données, des modèles et des outils : mise à disposition, partage, valorisation scientifique.

- **Développer les interactions et synergies entre les SNO**

Développer des interactions et synergies d'une part entre les SNO du domaine TS (par exemple impliquer OMIV, Gravimétrie et géodésie, Sismologie dans les observatoires volcanologiques),

mais aussi, d'autre part, avec les SNO portés par les autres domaines de l'INSU (par exemple pour les observations sous-marines pluridisciplinaires, en géodésie, etc.).

Cœuvrer pour une synergie harmonieuse entre SNO et infrastructures de recherche.

Mieux se coordonner avec les autres établissements de recherche.

Jouer un rôle moteur au niveau européen.

Instrumentation nationale

Raphaël Pik (CRPG)

Commission des instruments nationaux

Pierre Deschamps (CEREGE), Isabelle Daniel (LGP-TPE), Pierre Beck (IsTerre), Paul Rateron (UMET), Chrystelle Sanloup (ISTEP), Anne-Magali Seydoux-Guillaume (LMV)

■ L'Instrumentation nationale de 2009 à 2014

L'instrumentation nationale concerne la géochimie, la pétrologie et la géochronologie. Son parc comprend actuellement de 11 instruments nationaux (cf. liste en encart) et couvre un vaste champ scientifique qui vient en appui principalement des domaines TS et SIC et dans une moindre mesure OA. Suite aux recommandations de la dernière prospective, cette période a vu la mise en place d'une commission dédiée à la politique d'instrumentation nationale (PIN) pour renforcer et organiser le concept d'«instrument national». Il s'agissait d'élargir les missions de l'ancien «groupe ad hoc Mi-lourds» pour que la labellisation, le suivi et l'évaluation des instruments nationaux soient assurés par la même commission, tout en étant couplés et associés à une connaissance approfondie du parc analytique des laboratoires de façon à éclairer les arbitrages du CNRS-INSU.

Cette nouvelle structure est intervenue dans un contexte de restriction budgétaire au niveau du CNRS (abandon des financements de type mi-lourds) et d'une profonde refonte du mode de soutien financier aux équipements, notamment via la mise en place des projets d'investissements d'avenir EQUIPEX, ou même les dotations très élevées des projets ERC. Aidé aussi par un soutien local en augmentation (financement Région, FEDER...), ce paysage remodelé a vu le nombre d'équipements «mi-lourds» des laboratoires (Spectromètre de masse, tomographes...) s'accroître ces dernières années, et ceci de façon déconnectée de toute politique nationale d'équipement. L'enquête menée dans le cadre de la prospective montre que le corollaire de cette nouvelle situation est un besoin criant, au niveau des laboratoires, de fonds pour assurer le fonctionnement de ces machines (consommables, contrats de maintenance...), ainsi que de personnels et d'ingénieurs pour les mettre en œuvre. Nous sommes donc actuellement dans une situation orthogonale aux recommandations et alertes de la précédente prospective, qu'il sera important de prendre en compte pour la future politique d'instrumentation nationale du CNRS-INSU.

Durant cette période, le parc d'instruments nationaux a peu évolué, avec une seule nouvelle labellisation pour la plateforme de microsondes électroniques CAMPARIS, qui vient compléter le spectre. L'effort et les réflexions de la nouvelle commission au début de son mandat ont porté sur la structuration des moyens en plateformes nationales de taille significativement plus importante, organisées sous forme de réseaux. Le projet de plateforme qui a été monté par la commission pour la géochronologie (CHRONOS) est resté embryonnaire et n'a pas eu de suite, à la différence par exemple de l'action montée avec succès pour le parc instrumental national de géophysique (RESIF). Son positionnement thématique trop spécifique, ainsi que la mise en réseau potentielle de trop nombreux sites, et de trop nombreux équipements, ont montré les limites de la viabilité de ce projet. Le travail de la commission sur la mise à jour et la redéfinition des termes d'une nouvelle «charte des instruments nationaux» se heurte actuellement pour sa mise en application à l'essoufflement du modèle actuel de gestion structurelle et économique de ce parc d'instruments nationaux.

Dans ce contexte, il est certainement nécessaire de (re)définir le périmètre et la rationalité des «Instruments nationaux», ainsi que le modèle de fonctionnement et de soutien en moyens financiers et humains par les différentes tutelles. La pérennisation des moyens et leur augmentation substantielle nécessaire passe probablement par la mise en place d'une structure plus visible de type Infrastructure de Recherche. La commission, ou toute autre structure nationale qui en aura la gestion, devrait avoir une mission claire, délivrée par le CNRS-INSU avec un périmètre d'action bien défini, ainsi que la charge des programmations et demandes de moyens. Le découplage actuel entre les missions de réflexion/évaluation et les missions de programmation/gestion a montré ses limites.

INSTRUMENTS NATIONAUX

- ASTER (CEREGE)
- SARM (CRPG)
- RAMAN (LGL)
- SIMS (CRPG)
- CAMPARIS Sonde Electronique (Paris)
- MEHR (Lille-Marseille-Montpellier)
- Nano-SIMS (MNH)
- FAME (ESRF-Grenoble)
- Presse Multi-Enclumes (LMV Clermont)
- MC-ICPMS-HR (LGL)
- LMC14

■ Les différents types d'instruments nationaux et les enjeux futurs

Le travail de la commission de suivi a montré que le parc d'instruments nationaux fonctionne bien et répond de façon satisfaisante à ses missions auprès de la communauté scientifique du CNRS-INSU. L'accueil des projets sur chaque instrument est en bon accord avec la contractualisation initiale et la valorisation *a posteriori* en termes de publications est bonne. A court terme, et quel que soit le mode de gestion future, la présentation de l'offre des services nationaux et leur tarification sont des points qui mériteront d'être harmonisés et centralisés pour tout le parc. Comme il est construit actuellement, le parc d'instruments a un périmètre très pluriel et fournit des services très différents qui ont tous été plébiscités par les utilisateurs de la communauté au cours de cette année de prospective.

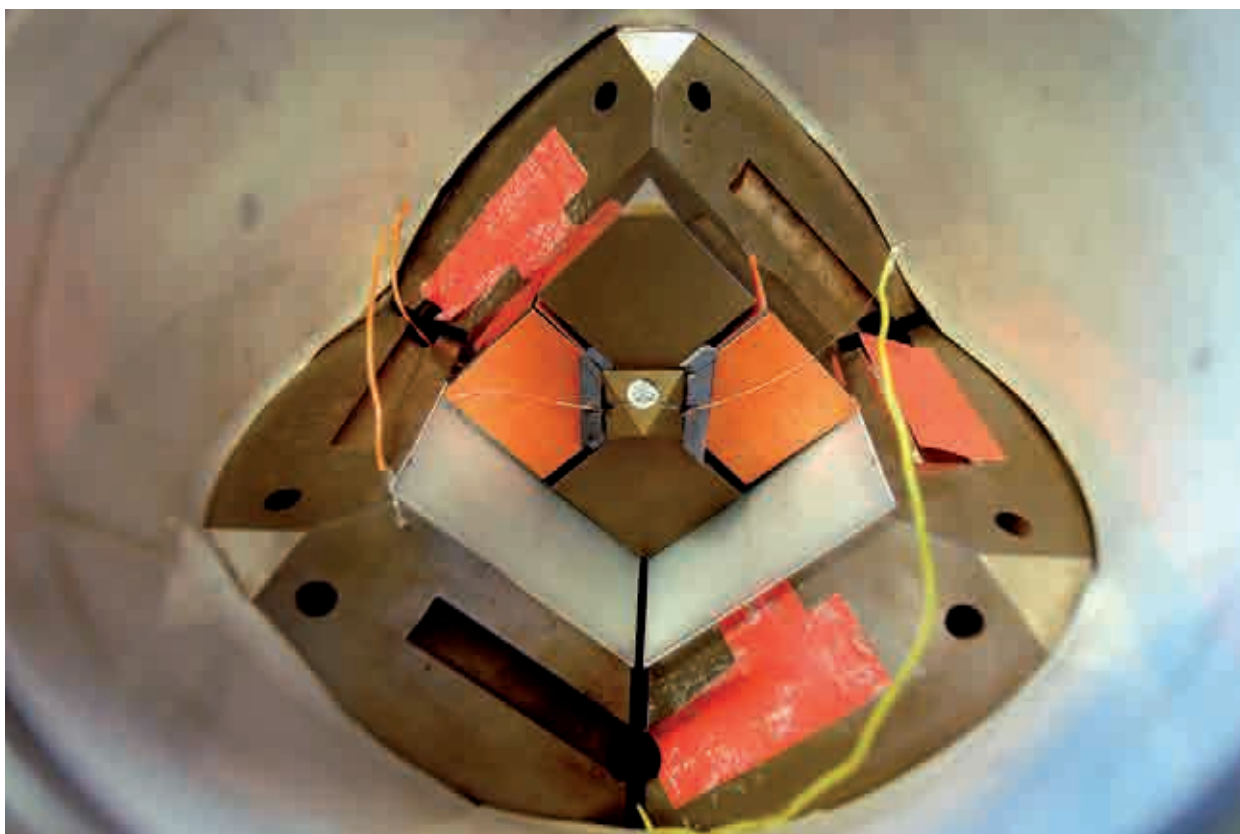


Fig 1. : Cœur de la presse multi enclumes permettant de soumettre un échantillon millimétrique de roche volcanique à de très hautes pressions et températures. © Hubert RAGUET/CNRS Photothèque.

• Les grands instruments

Il est clair que les grands instruments très onéreux comme les sondes ioniques, l'accélérateur Aster, le MC-ICPMS-HR ou encore la ligne de lumière FAME, pour lesquels le CNRS et l'INSU ont permis le financement en s'associant à d'autres



Fig 2.: Avec la sonde ionique NanoSims, il est possible d'établir une cartographie chimique et isotopique de ces compositions des premières couches atomiques à la surface d'un échantillon, avec une résolution spatiale de 0,05 micromètres. © Hubert RAGUET/MNHN/INSU/CNRS Photothèque.

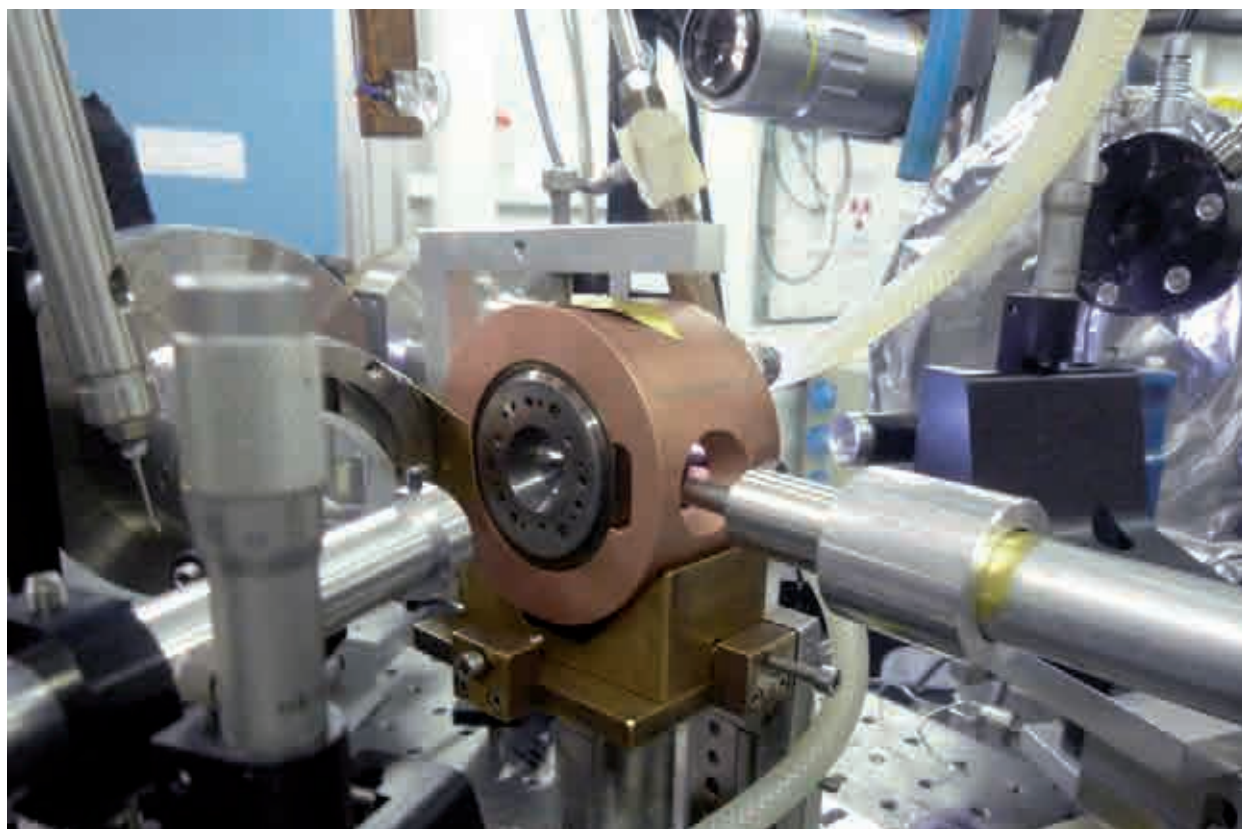


Fig 3.: Dispositif expérimental utilisé sur la ligne de lumière ID27 de l'ESRF (European synchrotron radiation facility). La cellule à enclumes de diamant est placée à l'intérieur du cylindre de cuivre au centre du dispositif. Elle permet de soumettre un échantillon à des températures et à des pressions extrêmes, typiques du manteau terrestre. © Denis ANDRAULT/Youcef MEZOUAR/CNRS Photothèque.

tutelles, sont des instruments nationaux primordiaux. Ils permettent un accès à des mesures pointues et rares, avec les technologies les plus récentes, qui représentent pour la communauté une haute valeur ajoutée. Les équipes françaises de géochimistes et de pétrologues utilisent bien le potentiel de ces instruments et ont très clairement fait remonter leur volonté de pouvoir continuer à accéder à ce type de services nationaux. Le positionnement crescendo des géosciences modernes vers les approches interdisciplinaires va continuer de nécessiter ce type d'investigations multi-documentées et non-destructives sur du matériel toujours plus petit ou sur des zones de plus en plus focalisées à l'intérieur des objets. Une telle politique d'investissements récurrents dans les grands instruments à la pointe des capacités technologiques devra donc impérativement être maintenue dans l'avenir pour assurer le rayonnement de la communauté.

• Les instruments de taille intermédiaire

Le parc actuel est aussi composé d'instruments plus communs (Sondes électroniques, Spectroscopie Raman, microscopes électroniques...) qui permettent pour des chercheurs qui ne sont pas équipés dans leur laboratoire, d'avoir un accès simplifié à ces mesures. Dans ce cas, l'offre d'accès à l'instrument national est plus particulièrement associée à une expertise de l'équipe de recherche locale pour le traitement et l'interprétation des données. Ce type de service fonctionne extrêmement bien et est très plébiscité par les utilisateurs. En effet, une partie importante de la recherche effectuée par notre communauté est aussi basée sur l'utilisation d'analyses ou de caractérisations de routine qui permettent néanmoins d'approcher des questions scientifiques de premier ordre.

• Le Service d'Analyse des Roches et des Minéraux (SARM)

Dans la catégorisation des instruments nationaux, le SARM se situe à l'un des extrêmes. Le SARM fonctionne entièrement en service à la communauté pour la mesure d'éléments majeurs et traces dans les roches. La possibilité d'avoir accès à un très grand nombre de mesures de routine est certainement un des enjeux de l'approche scientifique actuelle qui revisite de plus en plus souvent les processus géologiques à l'aide d'une approche quantitative statistique. Ce constat et ce besoin sont remontés de notre communauté, tout comme récemment dans des livres blancs de la NSF. En ce sens, le SARM a été pionnier en faisant franchir le pas vers l'offre de mesures de routine en service avec un succès et une optimisation remarquables. Il est clair, là aussi, que plusieurs autres champs de mesures isotopiques ou de datations de routine pourraient être

concernés par un tel type de service national en appui d'un réel besoin d'une partie de la communauté.

• Les écoles thématiques

En parallèle du fonctionnement des instruments nationaux, la communauté a eu l'occasion de rappeler lors de cette prospective son attachement et l'importance qu'elle porte aux écoles thématiques et aux formations spécifiques (FAME+, ISOTRACES, Raman Sciences de la Terre, ...) qui répondent de façon très précise et efficace aux besoins de formation des utilisateurs, jeunes chercheurs et des personnels en charge du fonctionnement des instruments.

■ Quel modèle de fonctionnement et quelle structure pour les Instruments nationaux à l'avenir ?

Le nombre d'instruments à «coût moyen» a fortement augmenté dans nos laboratoires ces deux dernières décennies. Au delà du coût de l'équipement, le coût de fonctionnement des instruments, qu'ils soient nationaux ou pas, représente un vrai enjeu à traiter pour l'avenir dans la communauté des géochimistes et des pétrologues du CNRS-INSU. Les modes de financement de la recherche ont été profondément modifiés depuis une quinzaine d'années et ne permettent plus à présent de mettre en place et d'entretenir les équipements dans les laboratoires à partir d'une politique d'instrumentation nationale. Se pose donc dans ce contexte la question de comment organiser et optimiser le fonctionnement de tout ce parc analytique en terme de coût financier direct et peut être plus encore en terme de moyen humains spécifiques.

En ce qui concerne les instruments nationaux proprement dits, il est clair que la communauté ne pourra se passer d'un parc d'instruments nationaux soutenu par le CNRS-INSU. Il faudra régulièrement réévaluer le périmètre et le spectre du parc, ainsi que les offres d'accès et de services associés. La périodicité des prospectives des domaines du CNRS-INSU est probablement la bonne récurrence. Comme évoqué dans la section précédente, la communauté des géosciences a des attentes et des besoins pluriels en termes d'instrumentation nationale qui doivent servir de base à la définition du spectre et du type d'instruments qui composent le parc national. Les modalités d'un tel soutien doivent se traduire en priorité au niveau des moyens humains affectés aux instruments et de la participation à l'achat des grands équipements à fort rayonnement. Le concept de participation récurrente de l'INSU au coût de fonctionnement doit aussi perdurer, mais devra sans

aucun doute être complété à l'avenir par une tarification de l'accès aux instruments nationaux. Ce type de fonctionnement devrait mieux s'accorder avec la réalité des modalités du financement actuel de la recherche. La pérennité du parc d'instruments nationaux est un autre enjeu pour l'avenir, avec un paysage et des structures de financement qui s'organisent de plus en plus à l'échelle Européenne, et pour lesquels les relais nationaux restent à développer sur ce sujet des infrastructures instrumentales. La mise en place d'une super-structure transversale aux différents domaines de l'institut, plus visible et organisée sous forme d'une Infrastructure de Recherche est sûrement l'option à suivre pour ceci. Une large concertation sur les différents points évoqués devra être engagée avec les autres tutelles et/ou partenaires des instruments nationaux qui sont copilotés.

Pour les autres instruments des laboratoires, le paysage, et donc les réponses pertinentes, sont plus complexes. Augmenter

le parc d'instruments nationaux pour y loger le maximum d'instruments ne serait qu'une réponse partielle, et ne serait de toute façon pas viable. Par contre, il est certainement possible d'optimiser le fonctionnement et de rationaliser les demandes de moyens venants des instruments des laboratoires, via la mise en place de réseaux nationaux spécifiques à chaque type d'instrument ou à chaque type d'approche. Ces réseaux pourraient avoir une animation indépendante et leur gestion être assurée par la même super-structure que celle dédiée au parc d'instruments nationaux. Cette super-structure type Infrastructure de Recherche gèrerait ainsi deux niveaux de granularité : le parc d'instruments nationaux et les réseaux d'instruments spécifiques. Elle aurait l'avantage de pouvoir rétablir, comme souhaité par les prospectives successives, une politique d'instrumentation nationale basée sur une connaissance précise et en prise directe avec les moyens analytiques des laboratoires.

L'outil spatial pour l'étude de la Terre Solide

Yann Klinger (IPGP) avec la contribution de Jean-Mathieu Nocquet (GEOAZUR) (et de Marie-Pierre Doin (ISTERRE), Pascal Allemand (LGL-TPE), Giovanni Occhipinti (IPGP), de Jean-Paul Boy (IPGS), ainsi que des discussions nombreuses avec beaucoup d'autres collègues

Le développement d'outils spatiaux dédiés, ou l'utilisation opportuniste d'instruments déjà existants, pour l'étude de la Terre Solide n'est pas nouveau. De façon générale, l'étude des thématiques concernant plutôt la Terre profonde (essentiellement gravimétrie et magnétisme) a conduit au cours de la dernière décennie au développement et à l'exploitation de capteurs dédiés comme Grace, Goce où plus récemment la constellation des satellites Swarm (Fig1). Au contraire, les communautés qui étudient les phénomènes plus superficiels comme le volcanisme, les déformations d'origine tellurique de la croûte, ou les mouvements gravitaires ont plutôt tiré parti d'outils (GPS (Fig 2), satellites radar, optiques...) qui n'étaient pas

initialement pensés pour cet objectif, en ne s'intéressant qu'assez marginalement aux développements instrumentaux proprement dits. Dans ces communautés, l'effort s'est plutôt porté sur les développements méthodologiques permettant une exploitation intelligente de ces différents capteurs.

À partir de cette constatation, et afin de ne pas proposer un texte qui ne serait qu'un inventaire à la Prévert de méthodes n'ayant finalement que très peu de points communs, le parti pris suivant a été suivi : le domaine Terre Solide du CNRS-INSU est finalement peu impliqué directement dans le développement des plateformes spatiales dédiées qui relèvent plus directement du domaine Terre Solide du CNES. Le lecteur est donc renvoyé

Fig. 1 : La constellation SWARM © ESA

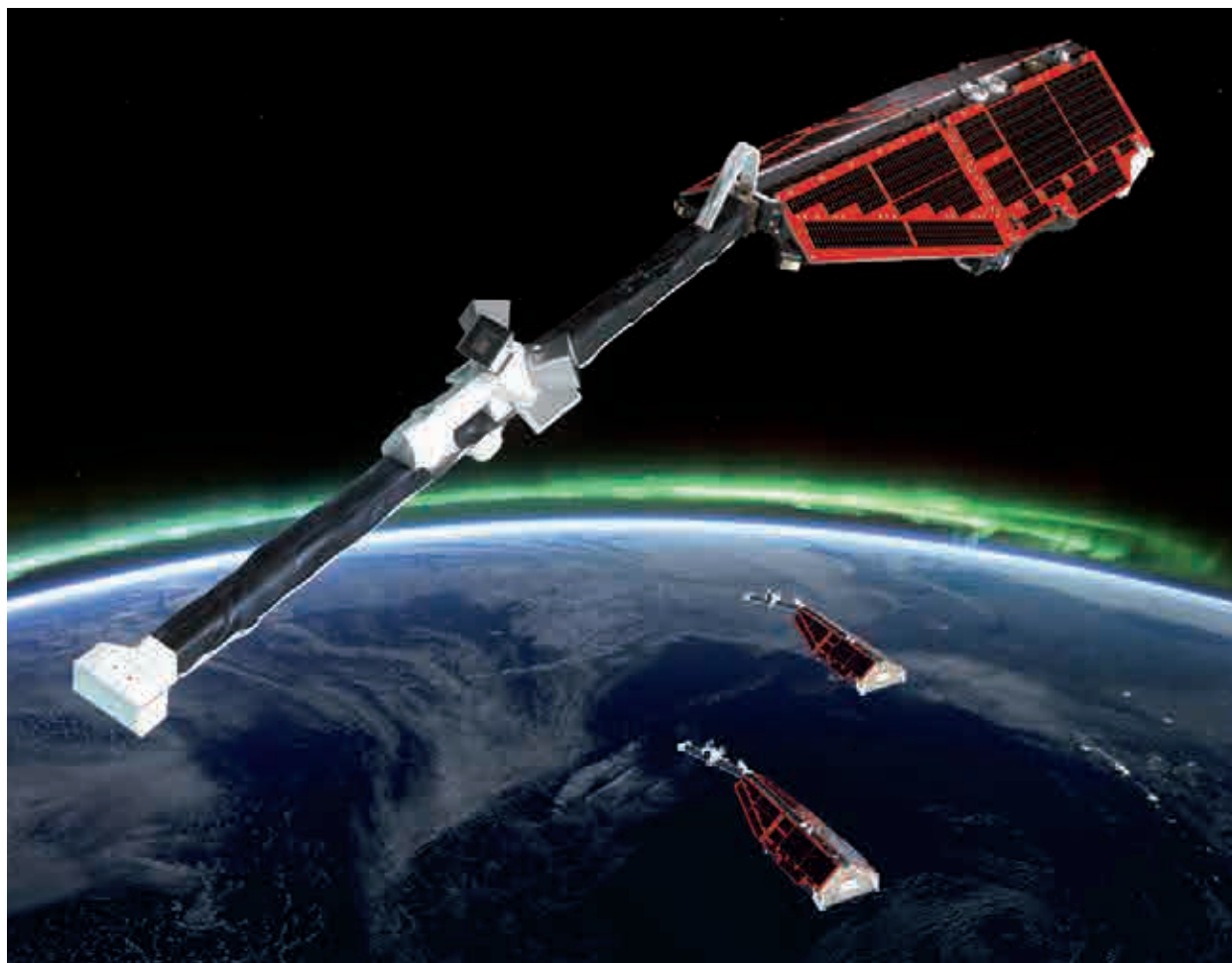




Fig. 2 : Station GPS © JM Nocquet

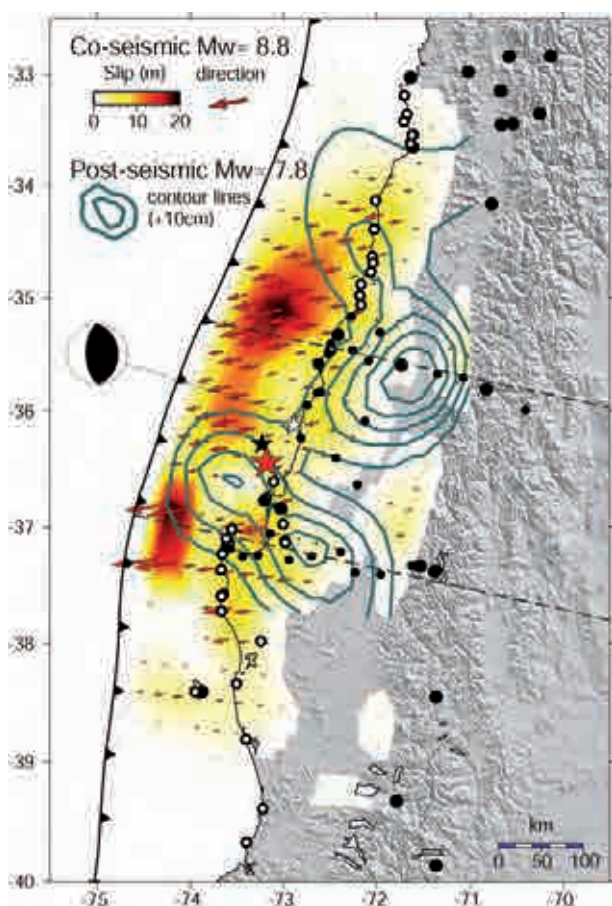


Fig. 3 : Les zones colorées montrent la zone de glissement co-sismique avec le maximum de déplacement dans les zones rouges. Les flèches rouges indiquent l'intensité et la direction du déplacement sur le plan de faille. Les contours bleus délimitent le déplacement post-sismique (durant 12 jours après le séisme). Les points indiquent l'emplacement des mesures GPS. Vigny *et al.* *Scienceexpress*, 2010

vers la prospective du CNES pour ce qui concerne directement ces aspects. Ceci étant dit, tout ce qui touche directement à l'analyse des données issues de ces plateformes pour les mesures magnétiques et gravimétriques est évidemment au cœur de TS et trouve naturellement sa place dans les sections

de ce volume concernant plus spécifiquement la Terre profonde (voir particulièrement les sections concernant les CT1 et CT2, et de façon plus marginale le CT3). A l'inverse, la communauté Terre Solide française est très active dans le développement de méthodes pour la mesure des déformations de la croûte (volcan, séismes, gravitaire) à partir de données qui n'ont pas forcément été initialement pensées pour cela. La suite de ce texte se concentre donc sur ces aspects où le soutien du CNRS-INSU est essentiel pour permettre aux équipes françaises de rester à la pointe des avancées. Les sections qui suivent abordent donc spécifiquement les mesures GNSS (Global Navigation Satellite System), l'interférométrie radar et les capteurs optiques spatiaux.

■ Le système GNSS

La dernière décennie a vu la multiplication des réseaux de GPS permanents avec des fréquences d'échantillonnage élevées, en complément des mesures de campagne qui restent essentielles. Ces réseaux ouvrent de nouvelles perspectives car ils offrent, par exemple, la possibilité de capturer des phénomènes de très courtes durées de temps, comme les transitoires sismiques, ou même plus directement la propagation des ondes sismiques. Il est cependant critique de pouvoir maintenir ces réseaux opérationnels longtemps pour pouvoir en tirer pleinement parti, notamment pour ce qui concerne l'extraction de signaux avec un faible rapport signal/bruit.

Par ailleurs, la précision du calcul en «point isolé» (Precise Point Positioning PPP) s'est fortement améliorée (Blewitt, 2008, Bertiger, 2010) et devrait permettre une généralisation rapide de la méthode pour l'analyse de grandes quantités de données, pour les analyses cinématiques du GPS haute-fréquence, ainsi que pour les applications temps réel. Enfin, le calcul de solutions cinématiques lors de grands séismes de subduction (e.g. Vigny *et al.*, 2011) a permis une mesure du déplacement dynamique depuis quelques dizaines de Hz, jusqu'au déplacement statique, et ce sans problème de saturation du signal, fournissant ainsi une contrainte essentielle pour la modélisation cinématique de la rupture (Fig 3).

• Résultats marquants

Parmi les résultats les plus intéressants, on peut noter en géodynamique les premières études faisant le lien entre les mouvements de surface et les processus profonds (e.g. Pérouse *et al.*, 2009). En France, les données du réseau RENAG ont permis de mettre en évidence la surrection des Alpes au niveau de deux millimètres par an dans un contexte de mouvements horizontaux faibles ou nuls (e.g. Vernant *et al.*, 2013) (Fig. 4).

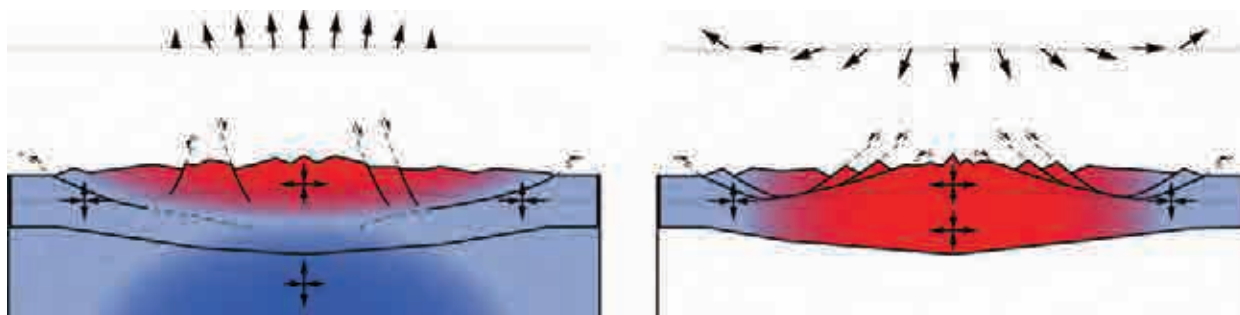


Fig. 4 : Extension induite par érosion des reliefs (à gauche), par effondrement gravitaire (à droite). La différence principale repose sur le champ de vitesse (composante horizontale plus rapide et subsidence au centre de la chaîne pour l'effondrement gravitaire). Il est à noter que dans le cas de l'extension induite par érosion, la croûte inférieure est en compression. Vernant *et al.*, 2013

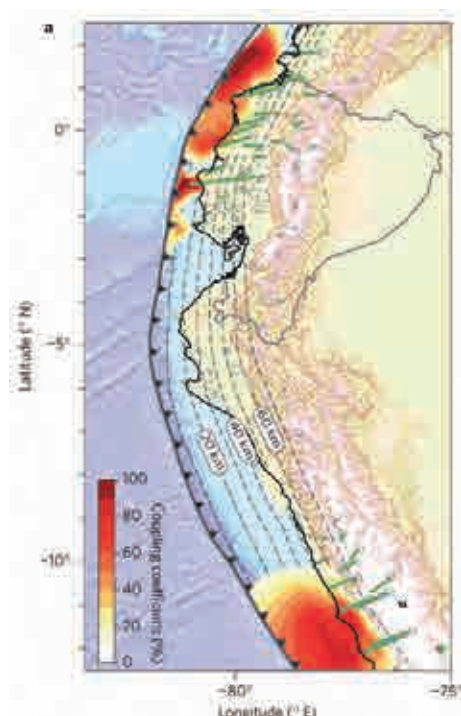


Fig. 5 : Modèle du couplage mécanique le long de l'interface de subduction, montrant le glissement asismique entre les zones de Lima et du Sud-Equateur ; vitesses GPS par rapport à l'Amérique du Sud © Géoazur. Nocquet *et al.*, 2014.

Des résultats significatifs ont été obtenus dans les études du cycle sismique, pour lequel le GPS reste un outil privilégié, très complémentaire de la mesure InSAR, d'observation des processus d'accumulation et de relaxation des contraintes à proximité des grandes failles. Sur les zones de subduction, les mesures GPS ont montré une grande hétérogénéité du degré de couplage intersismique et de sa distribution spatiale à différentes échelles (10-10⁴km, e.g. Metois *et al.*, 2013; Nocquet *et al.*, 2014), Fig. 5. Le développement des réseaux permanents dans les grands systèmes actifs a fourni trois avancées majeures :

- Cela a rendu la mesure du déplacement dynamique engendré

par les grands séismes, la quantification des processus post-sismiques et la caractérisation des séismes lents en période intersismique.

- L'étude des processus post-sismiques a mis en évidence à la fois des variations spatiales des propriétés frictionnelles des failles (e.g. Perfettini *et al.*, 2010) et de la réponse visco-élastique complexe du milieu environnant.
- Enfin, après une décennie d'observation, il apparaît que les séismes lents sont relativement fréquents et d'une grande variété (e.g. Walpersdorf *et al.*, 2011).

• Perspectives

La mise en service progressive de nouveaux systèmes GNSS, en particulier Galileo, devrait améliorer la résolution temporelle, les corrections atmosphériques, et permettre une meilleure compréhension de l'origine du bruit des séries temporelles GPS. D'une manière générale, la quantification des signaux non-tectoniques reste un objectif pour extraire des faibles signaux, comme la déformation intraplaque ou la détection de petits événements transitoires.

Par ailleurs, les analyses multi-capteurs, combinant du GPS et de l'InSAR pour les grands séismes (e.g. Béjar-Pizarro *et al.*, 2013), ou pour l'étude des signaux transitoires (analyse combinée GPS/sismologie, inclinométrie, extensomètre, e.g. Vallée *et al.*, 2013), se multiplient, pointant le fort potentiel d'une intégration plus systématique des différents types de mesures. Ces mesures de déformation (inclinométrie et extensométrie), sont d'autant plus intéressantes que la source du signal est proche de la surface, augmentant ainsi le rapport déformation sur déplacement, ce qui explique leur utilisation dans le domaine de la volcanologie. Toutefois pour être mis en œuvre conjointement aux réseaux GPS, un travail d'instrumentation à une échelle industrielle reste à effectuer.

Enfin, les grands séismes de subduction récents ont montré la nécessité de quantifier l'accumulation de déformation à

proximité de la fosse. Le développement des méthodes de géodésie fond de mer apparaît comme un axe de développement majeur à mettre en œuvre ces prochaines années.

■ L'imagerie satellitaire

Le vocable d'imagerie satellitaire recouvre en fait au moins deux technologies très différentes que sont les capteurs actifs dans le domaine radar et les capteurs passifs de type optique. Si ces deux technologies existent et sont utilisées en sciences de la Terre depuis au moins 20 ans, dans les deux cas les nouveaux capteurs disponibles depuis quelques années à quelques mois sont en train de révolutionner le domaine.

• L'imagerie radar

Le premier interferogramme pour imager un séisme fut produit lors du séisme de Landers, de magnitude M7.3, en 1992, avec les données de la mission européenne ERS1. Depuis, la mesure de la déformation par interférométrie radar, si elle ne s'est pas complètement standardisée, est effectuée en routine par de nombreux groupes. Au cours des dix dernières années des progrès significatifs ont été réalisés non plus

dans le calcul des interférogrammes mais dans toutes les étapes du post-traitement, telle que le déroulement des franges interférométriques, y compris dans des contextes de topographie complexe, ou les corrections à apporter à la mesure pour minimiser les effets liés au bruit atmosphérique. Cette amélioration importante du rapport signal/bruit a ouvert la porte à une exploitation plus systématique de l'ensemble des archives ERS puis Envisat, y compris pour des zones se déformant lentement ou pour des périodes post-sismiques et intersismiques, notamment en traitant les données en séries temporelles grâce à la chaîne de traitement NSBAS (Doin *et al.*, 2012) mise au point par les équipes françaises. Cela a conduit à quelques résultats notables tels que la mesure de la déformation intersismique en travers de l'Himalaya (Grandin *et al.*, 2012) ou la mise en évidence de fluage sur de grands décrochements continentaux (Cavalié *et al.*, 2014).

Aujourd'hui la communauté Insar se trouve face à un changement de paradigme avec le démarrage de plusieurs nouvelles plateformes radar (Terrasar-X, CosmoSkymed, Alos2), et plus particulièrement la mise en orbite par l'ESA de la constellation des deux satellites radar Sentinel. Grâce à ces deux nouveaux satellites, le temps de revisite pour un site donné va être de 6 jours contre ~1 mois précédemment.

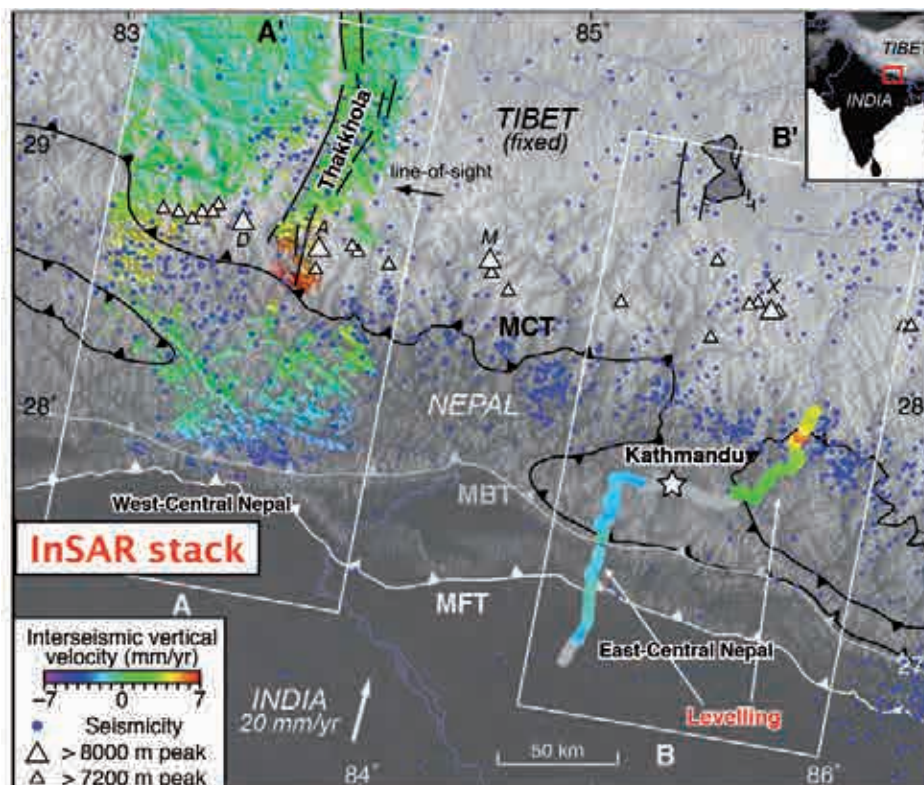


Fig. 6 : Déformation du sol au Népal Central mesurée par interférométrie radar, à l'aide du satellite ENVISAT (ESA). La déformation se manifeste par le soulèvement (zone en rouge) d'une bande de terre s'étendant tout le long de la chaîne de montagnes (les triangles signalent les sommets de plus de 7 000 mètres), à une vitesse d'environ 6 mm/an. Ce soulèvement résulte du chargement intersismique du grand chevauchement himalayen, responsable également de la micro-sismicité indiquée par les cercles blancs. Le séisme de Gorkha, le 25 avril 2015 (magnitude 7.9), s'est produit dans la zone située au centre de la figure. Il a permis de relâcher une partie – mais pas la totalité – de ce chargement (Grandin *et al.*, 2015).

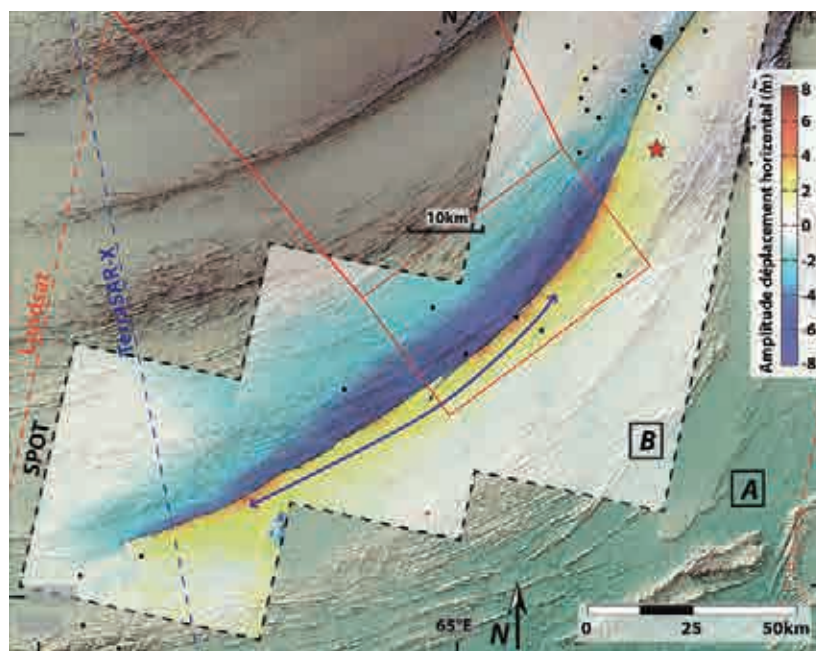


Fig. 7 : Illustration de l'amplitude du champ de déplacements induit par le séisme du Pakistan, superposée à la topographie (A) faisant apparaître les différentes chaînes de montagnes composant le Makran. En B les déplacements horizontaux, en C les déplacements verticaux. Vallage et al. 2015

Par ailleurs, le nouveau mode d'acquisition en « wide swath » de 250 km avec des pixels de 20 m augmente de façon considérable la quantité de données par image. Du coup, le volume de données disponibles va être multiplié dans des proportions rendant l'archivage de l'ensemble des données impossible pour un laboratoire particulier. Une réorganisation de la communauté autour d'infrastructures communes va donc s'imposer, ainsi que le développement de nouveaux outils permettant le traitement des données à distance et un calcul des interférogrammes en routine, pour éviter des transferts de données qui engorgeraient très vite les réseaux. Ce nouveau mode d'acquisition des données va permettre un traitement en séries temporelles beaucoup plus fin qui doit permettre d'imager dans le détail toute une nouvelle gamme de déformations avec des constantes de temps plus courtes telles que des mouvements transitoires aismiques, la dynamique des glissements gravitaires ou le gonflement/dégonflement des édifices volcaniques.

• Images optiques

L'imagerie optique satellitaire a été à l'aube des années 80 l'un des outils majeurs dans la découverte des grandes failles actives et dans la compréhension des systèmes tectoniques continentaux. Dans les années 90, les satellites de la famille Spot 1-4, avec une résolution de 10 m en mode panchromatique ont permis d'identifier les objets morphologiques individuellement et de déterminer avec précision les taux de déformation au cours de l'Holocène. Les 10 dernières années ont vu l'arrivée en nombre de capteurs satellitaires optiques avec des

résolutions métriques ou même maintenant submétriques (le nouveau satellite Pléiades du CNES fournit en routine des images à 50 cm de résolution au nadir). Cette explosion de la résolution, avec des temps de revisite courts et la possibilité de combiner les images de différents capteurs (contrairement au radar) ouvre un ensemble de nouvelles opportunités : ces nouvelles images ont permis par exemple de cartographier avec un détail inégalé les ruptures de surfaces associées à de grands séismes, données originales qui peuvent servir pour une meilleure compréhension mécanique des phénomènes de rupture (Klinger *et al.*, 2011).

En parallèle du développement de ces nouvelles plateformes, ces dernières années ont vu le développement de méthodes, notamment du fait de groupes français (e.g. Rosu *et al.*, 2015), permettant de corréler plusieurs images optiques. La corrélation des images permet d'une part de calculer la topographie si les images sont acquises avec des angles d'incidences différents. Au contraire, si les angles sont les mêmes ou si l'on peut corriger finement les effets stéréoscopiques, il devient alors possible de mesurer les déplacements horizontaux dans la scène entre les différentes acquisitions, et ce avec une résolution nominale identique à celle de l'image de base (e.g. Vallage *et al.*, 2015). Ces dernières années ont vu plusieurs études significatives mettant en œuvre ce type de techniques, éventuellement combinées avec des données radars (Grandin *et al.*, 2009).

La multiplication des données, associée à ces nouvelles techniques de corrélation, encore en plein développement, va

permettre un nouveau regard sur les processus dynamiques qui affectent la surface. Cependant, un effort encore important en terme de développement méthodologique doit être mené pour permettre une exploitation plus systématique de la manne de données image disponibles, mais rarement acquises dans des géométries optimales, ainsi que l'exploitation de l'archive de données aériennes et satellitaires anciennes qui doivent pouvoir être corrélées avec des acquisitions récentes, pour la mesure de déformations lentes. Ces développements nécessitent des compétences (optique, physique de l'image, traitement du signal) qui ne se trouvent pas forcément dans la communauté Terre Solide et qu'il faudra aller chercher dans d'autres communautés, tant sur le plan de la recherche que du développement technique.

Il devrait rapidement devenir possible de faire de la topographie différentielle à très haute résolution (potentiellement

équivalente à ce qui est faisable avec du Lidar aéroporté, mais sans les multiples problèmes logistiques qu'implique cette méthode) et mesurer des déformations horizontales inférieures au mètre. Le couplage avec le radar devrait pouvoir donner accès à un champ de déformation 3D de résolution métrique. Cela nécessite évidemment qu'une archive la plus systématique possible soit acquise à l'échelle de la planète et que l'accès aux images, au moins celles acquises par des satellites français et européens, reste facile pour le milieu académique, ce qui ne semble pas une évidence aujourd'hui.

En terme plus prospectif, il est évident que les aspects dynamiques des processus affectant la surface de la Terre vont pouvoir être explorés de façon plus systématique et que l'outil idéal serait un satellite optique géostationnaire haute résolution acquérant des données à haute fréquence (Michel *et al.*, 2013).

Références citées

- **Béjar-Pizarro, M.** *et al.*, (2013). Andean structural control on interseismic coupling in the North Chile subduction zone. *Nature Geoscience*.
- **Bertiger, W.**, *et al.*, (2010). Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data. *Journal of Geodesy*, 84(5), 327-337.
- **Blewitt, G.** (2008). Fixed point theorems of GPS carrier phase ambiguity resolution and their application to massive network processing: Ambizap. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, 113(B12).
- **Cavalié, O., & Jónsson, S.** (2014). Blocklike plate movements in eastern Anatolia observed by InSAR. *Geophysical Research Letters*, 41(1), 26-31.
- **Doin, M. P.**, *et al.*, (2011, September). Presentation of the small baseline NSBAS processing chain on a case example: The Etna deformation monitoring from 2003 to 2010 using Envisat data. In *Proceedings of the European Space Agency Symposium "Fringe"*. Frascati, Italy.
- **Grandin, R.**, *et al.*, (2012). Long-term growth of the Himalaya inferred from interseismic InSAR measurement. *Geology*, 40(12), 1059-1062.
- **Grandin, R.**, *et al.*, (2009). September 2005 Manda Hararo Dabbahu rifting event, Afar (Ethiopia): constraints provided by geodetic data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012)*, 114(B8).
- **Klinger, Y.**, *et al.*, (2011). Characteristic slip for five great earthquakes along the Fuyun fault in China. *Nature Geoscience*, 4(6), 389-392.
- **Métrois M.** *et al.*. (2013). Revisiting the North Chile seismic gap segmentation using GPS-derived interseismic coupling. *Geophysical Journal International*, 194(3), 1283-1294.
- **Michel R.**, *et al.*, (2013). A geostationary optical seismometer, proof of concept. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 51(1), 695-703.
- **Nocquet J.-M.**, *et al.*, (2014). Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes. *Nature Geoscience*, 7(4), 287-291.
- **Perfettini H.**, *et al.*, (2010). Seismic and aseismic slip on the central Peru megathrust. *Nature*, 465(7294), 78-81.
- **Rosu A.-M.**, *et al.*, (2015). Measurement of ground displacement from optical satellite image correlation using the free open-source software MicMac. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 100, 48-59.
- **Vallage et al.**, (in review, 2015). Fault segmentation and inelastic surface deformation during the Mw7.7, 2013, Balochistan earthquake.
- **Vallée M.**, *et al.*, (2013). Intense interface seismicity triggered by a shallow slow slip event in the Central Ecuador subduction zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(6), 2965-2981.
- **Vernant P.**, *et al.*, (2013). Erosion-induced isostatic rebound triggers extension in low convergent mountain ranges. *Geology*, 41(4), 467-470.
- **Vigny C.**, *et al.*, (2011). The 2010 Mw 8.8 Maule megathrust earthquake of Central Chile, monitored by GPS. *Science*, 332(6036), 1417-1421.
- **Walpersdorf A.**, *et al.*, (2011). Two successive slow slip events evidenced in 2009–2010 by a dense GPS network in Guerrero, Mexico. *Geophysical Research Letters*, 38(15).

Le calcul intensif

Nous dédions cette réflexion prospective sur le calcul intensif en Terre Solide à notre collègue et ami Evgenii Burov, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie et chercheur l'IsTeP, disparu prématurément en 2015. On lui doit notamment d'avoir fait franchir à la modélisation numérique des processus de déformation de la lithosphère un pas décisif.

Evgenii Burov (IsTeP)

Comité scientifique : Evgenii Burov (IsTeP)

Jean-Pierre Vilotte (IPGP), Alexandre Fournier (IPGP), Camille Risi (UPMC), Jean Braun (IsTerre), Jean Virieux (IsTerre), Etienne Balan (UPMC), Nicolad Coltice (U. Lyon), Riad Hassani (GéoAzur), Stéphane Operto (GéoAzur), Guust Nolet (GéoAzur), Laura Grigori (Inria), Laetitia Le Pourhiet (UPMC), Sébastien Wolf (UPMC)

Le calcul intensif et les infrastructures associées, comme l'indique le Président du CNRS A. Fuchs dans sa lettre du 21/09/2012, sont au cœur de la plupart des avancées de la recherche dans l'ensemble de la communauté scientifique. En Sciences de la Terre Solide, les enjeux sont vastes et ne se limitent pas à la recherche, mais aussi aux problèmes sociétaux, économiques, financiers et écologiques. Les recherches basées sur le calcul intensif portent sur plusieurs axes, qu'on peut diviser, toutefois, en deux grands sous-domaines :

- **Traitement, inversion et assimilation de grands volumes de données**, en général géophysiques et géodésiques, dont la quantité ne cesse de croître suite à l'amélioration permanente de la résolution spatiale et temporelle des méthodes d'acquisition.

- **Modélisation physique** i.e., interprétation, intégration et validation de données et vérification de concepts. La modélisation porte généralement sur les processus physiques et chimiques à la base des processus géologiques et géodynamiques au sens large, de l'échelle atomique à l'échelle du Globe.

La liste non-exhaustive d'études sollicitant de grands moyens de calcul inclut l'imagerie 3D (e.g. la tomographie sismique)

de la structure de la Terre ; la détection, la caractérisation et l'imagerie des sources sismiques ; la modélisation physique de la dynamique et de l'évolution du système Terre à différentes échelles (les fluides géophysiques ; les processus géodynamiques, géologiques et tectoniques, la simulation du champ magnétique et de la dynamo terrestre et des planètes) ; l'étude des environnements de surface actuels et anciens et des couplages, paléoclimats ; la minéralogie et les propriétés physiques haute pression – haute température des matériaux terrestres ; l'évaluation et les méthodes de surveillance de l'aléa et des risques sismiques et volcaniques ; l'exploration et la gestion des ressources minérales et énergétiques ; le stockage des déchets et du dioxyde de carbone.

■ Enjeux et défis méthodologiques du calcul

Les enjeux méthodologiques et algorithmiques traversent l'ensemble des disciplines des Sciences de la Terre et de l'Univers et stimulent des interfaces de collaboration interdisciplinaire matérialisées et soutenues par de nombreux GDR, programmes ANR et projets Européens.

• Inversion et assimilation de données

Les sciences de l'Univers sont par nature observationnelles autour d'un cycle acquisition-traitement-inversion par méthodes d'optimisation globale. Ces méthodes permettent d'explorer l'espace des paramètres, via des algorithmes de type *recuit simulé*, *génétique* ou de *Monte-Carlo* et de caractériser de

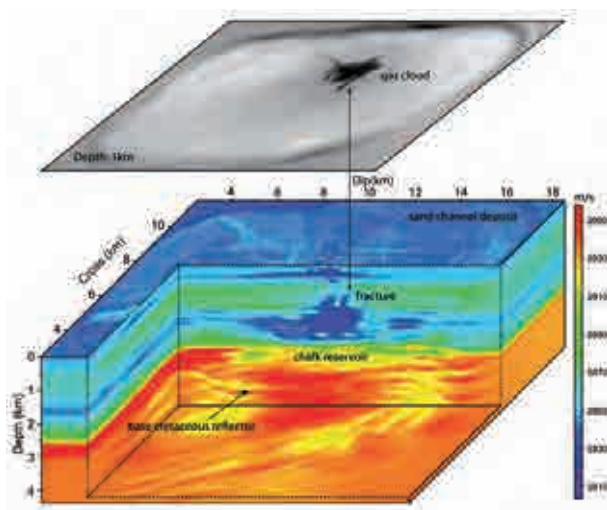


Fig. 1. L'inversion/tomographie multiparamétrique de grands volumes de données sismiques est une de tâches de l'imagerie sismique de haute résolution de l'échelle locale ou globale. Ici, interprétation des structures géologiques sous marines imagées : réservoir crayeux, fractures (injectées de gaz interdit par BP), nuage de gaz, dépôts sableux glaciaires, (poches et cheminée de gaz interdit par BP), scarifications laissées par des icebergs sur le paléofond (non illustré). Un réflecteur à faible vitesse à 500m de profondeur correspondant probablement à une zone d'accumulation de gaz. (Metivier et al., 2013)

manière probabiliste les incertitudes inverses. Le développement de nouvelles stratégies parallèles pour l'exploration d'espaces de paramètres de grande dimension (Fig. 1), ainsi que l'optimisation du grand nombre de simulations directes impliquées, constituent le défi des prochaines années dont les attendues sont la caractérisation probabiliste de l'espace des modèles.

Un autre défi concerne aujourd'hui les solveurs parallèles pour les grands systèmes linéaires et non linéaires qui limitent aujourd'hui ces méthodes dans le cas de formulations implicites ou en fréquence :

- **Inversion par méthodes d'optimisation locale.** Le développement de nouvelles stratégies pour l'optimisation locale de la résolution parallèle du grand nombre de simulations est un enjeu important en raison des volumes de données associées.

- **Assimilation de données.** Les nouvelles approches (e.g., géomagnétisme) des méthodes d'ensemble du filtre de Kalman (ENKF), reposant sur une approximation des distributions de probabilités des états assimilés impliquent un grand nombre de degrés de liberté et des besoins importants en termes de calcul et de stockage.

- **Analyse et traitement de très grandes masses de données.** Un des grands défis est la fouille et l'analyse statistique des grandes masses de données issues des systèmes d'observation et des simulations numériques.

- **Traitement d'images spatiales et télédétection.** L'analyse des données d'imagerie spatiale, dont la résolution et la fréquence d'acquisition ne cessent d'augmenter, requiert aujourd'hui le développement de chaînes de traitement complexes permettant de manipuler un nombre croissant d'images et des méthodes de filtrage et de corrélation multidimensionnelle complexes.

- **Traitement, visualisation et l'analyse de données synthétiques.** S'il est aujourd'hui possible de simuler les systèmes des sciences de la Terre à des résolutions spatiales et temporelles croissantes, il est difficile de stocker et d'analyser les données ainsi engendrées. Il est devenu crucial de développer des méthodes de visualisation et d'analyse statistique de très gros volumes de données.

• Modélisation numérique des processus physiques

- **Ultra-haute résolution en temps et en trois dimensions spatiales (4D).** La particularité des modèles actuels porte sur l'émergence des approches à ultra-haute résolution spatiale (5003 - 10003 éléments) et temporelle, ce qui permet l'implémentation de couplages, par exemple, entre les processus tectoniques, de surface et la convection mantellique. Ceci nécessite la résolution de très grands systèmes d'équations, généralement non-linéaires, et, par conséquent, le développement de puissantes méthodes d'inversion parallèle de grandes matrices généralement creuses

(solveurs parallèles non-linéaires). Ces algorithmes doivent tirer partie des caractéristiques des architectures sur lesquels ils sont déployés (CPU/GPU, architecture distribuée / mémoire partagée).

- **Couplages multi-physiques.** Il est fondamental (Fig. 2,3) de pouvoir étudier l'évolution de ces systèmes en tenant compte des interactions entre processus physiques différents. Cela requiert de nouvelles méthodes de couplage adaptées exploitant les nouvelles architectures massivement multi-cœurs.

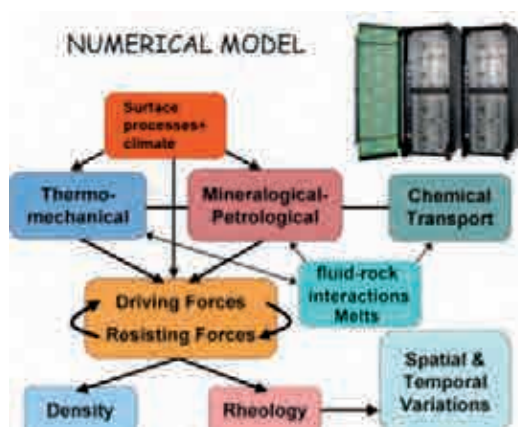


Fig. 2. La modélisation numérique est un outil universel pour étudier les processus géologiques multi-physiques de court-terme et long-terme, pour valider les concepts géologiques et géodynamiques, pour apporter des contraintes plus importantes et guider les observations (Burov et al., 2014)

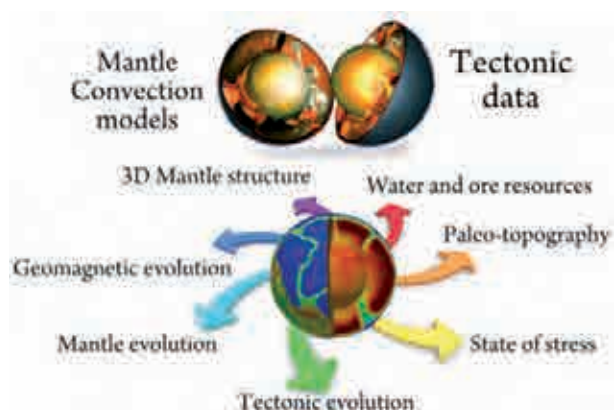


Fig. 3. L'approche multiphysique de modélisation permet de confronter plusieurs types de données et d'établir des liens entre divers phénomènes et processus. Source : Projet ERC Consolidator Augury N. Coltis. Rey et al., Nature, 2014)

- **Modélisation multi-échelles.** Les systèmes en sciences de l'Univers impliquent la résolution d'échelles en temps et en espace qui diffèrent de plusieurs ordres de magnitude (Fig. 2,4). Cela requiert de nouvelles approches, exploitant les nouvelles architectures multi-cœurs et basées sur des stratégies de maillage adaptatif, de décomposition de domaines, de couplage

de modèles multi-niveaux (upscaling/downscaling), de méthodes cohérentes d'homogénéisation déterministe ou stochastique en temps et en espace, ainsi que de nouvelles méthodes d'intégration en temps. Par exemple, dans *modélisation de Geodynamo*, l'effort de modélisation est appelé à se poursuivre selon deux axes : l'axe des temps courts (échelles de temps annuelles à pluriannuelles) et l'axe des temps longs (géologiques). Ces deux axes nécessiteront de savoir mobiliser plusieurs milliers (voire dizaines de milliers) de cœurs, pour un calcul donné, selon une approche traditionnelle de calcul intensif.

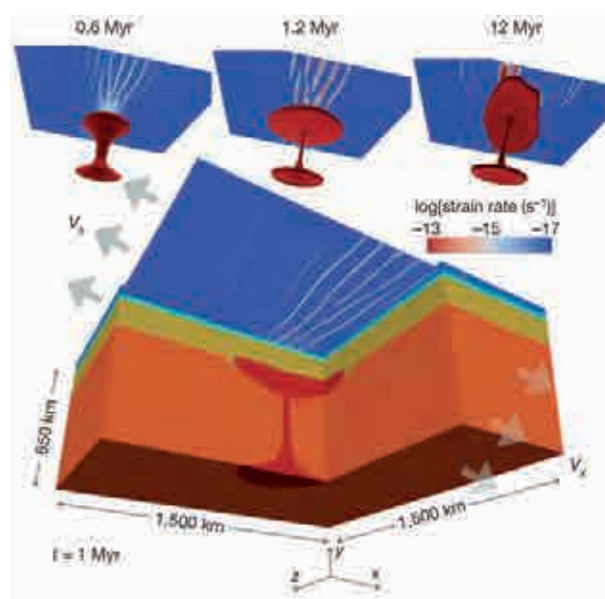


Fig. 4. Un modèle 3D d'interactions panache-lithosphère à ultra haute résolution (500^3 éléments, thermo-mécaniquement et thermodynamiquement couplé, efforts de calcul parallèle $\sim 100-200$ ans en équivalent single CPU, Burov et Gerya, *Nature*, 2014 ; Projet ERC Advanced Rheolith).

• **Modélisation à l'échelle atomique et moléculaire, propriétés physico-chimiques et physico-mécaniques des matériaux.** La simulation d'ensemble des propriétés structurales, spectroscopiques et dynamiques à l'échelle atomistique (Fig. 5) fait appel aux méthodes de calcul quantique de la physique moléculaire. Les objectifs sont de simuler les propriétés de systèmes physico-chimiques pertinents à partir de leurs constituants atomiques dans des conditions difficiles à atteindre et/ou à étudier expérimentalement (haute pression-haute température, impuretés et défauts en très faibles concentrations, interfaces solide-solution, effets d'irradiation, équilibres thermodynamiques dans les systèmes de basse température).

• **Quantification des incertitudes directes.** Ces incertitudes sont associées aux limites intrinsèques de l'observation de la modélisation physique. Caractériser comment ces incertitudes

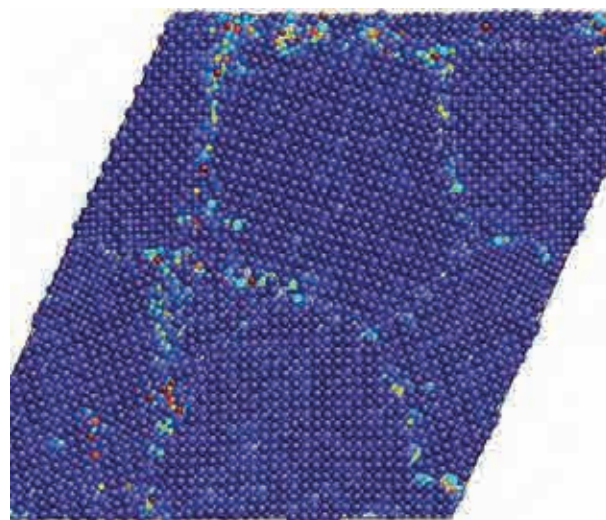


Fig. 5. La simulation atomistique par la méthode ab-initio permet de modéliser la rhéologie et la structure minéralogique de la Terre profonde, autrement inaccessible, ou les propriétés des matériaux complexes dans des conditions extrêmes. (ici déformation à l'échelle atomique d'un polycristal de perovskite MgSiO_3 dans les conditions du manteau inférieur ; projet ERC Advanced RheoMan P. Cordier)

se propagent au travers des différentes échelles et affectent l'évolution et la prédiction de ces modèles, requiert de nouvelles approches stochastiques multi-échelles et des réalisations d'ensemble, impliquant un grand nombre de simulations parallèles et la génération de très gros volumes de données à analyser a posteriori de manière probabiliste.

■ Enjeux algorithmiques

L'exploitation des nouvelles technologies de calcul intensif et de traitement de données, basées sur des architectures massivement *multi-cœurs*, à *mémoire partagée et hybrides* (AP, GPU), des systèmes de *fichiers parallèles* et des grandes *bases de données scientifiques parallèles*, implique un effort important des communautés pour l'adaptation et l'optimisation des applications. Les nouvelles architectures défient aujourd'hui les modèles classiques de programmation parallèle et requièrent de nouveaux modèles permettant d'exploiter l'hétérogénéité des « processing éléments » et la hiérarchie de mémoire et de stockage.

• Verrous numériques et méthodologiques à lever

Amélioration des performances.

Il devient stratégique de développer de nouvelles approches numériques permettant d'accélérer les calculs de façon significative *via* :

- **La parallélisation optimisée des codes de modélisation physique.** Une grande partie des codes « classiques » sont mal optimisés, ce qui engendre un temps de calcul trop élevé. Ce problème est en grande partie lié à l'absence de solveurs parallèles non-linéaires, suffisamment efficaces, car la plupart des problèmes de modélisation portent sur la résolution de grands systèmes d'équations non-linéaires. L'élaboration et l'optimisation de solveurs sont donc des enjeux très importants pour l'ensemble des méthodes numériques utilisées en Sciences de la Terre.

- **L'optimisation d'accès aux données** par : l'exploitation d'un haut niveau de concomitance de tâches (communications asynchrones, recouvrement des phases de calcul et de communication); l'exploitation de nouveaux modèles de programmation hybride pour l'exploitation des architectures de type GPUs; l'exploitation explicite de modèles de localité (horizontal et vertical) au travers de la hiérarchie mémoire-cache-disques (SSD/HDD); l'exploitation des méthodes d'équilibrage dynamique de charge; l'exploitation de mécanismes de coordination et de synchronisation extensibles; de nouvelles stratégies permettant d'équilibrer les flux de données et les flux de calcul pour les méthodes de fouille et d'analyse de données exploitant les technologies d'E/S parallèles, de grandes bases de données scientifiques parallèles et optimisant la bande passante des E/S séquentielles.

Nouveaux schémas numériques.

- **Résolution spatiale.** Les modèles physiques actuels ont rarement une discrétisation spatiale supérieure à 10^8 éléments tandis que le niveau de détail nécessaire serait de l'ordre 10^{11} voire 10^{14} . Cette résolution est à la fois nécessaire en termes de niveau de détail souhaitable pour comparaisons avec des observations, mais également afin d'assurer la convergence algorithmique. La résolution spatiale est limitée par le temps de calcul, par la taille de la mémoire des calculateurs et par les capacités algorithmiques des solveurs.

- **L'enrichissement de la physique pour une meilleure description des processus et phénomènes** sont les enjeux de premier plan : processus multi-physiques; amélioration de la précision des descriptions associée au traitement de systèmes de plus grande taille dans la dynamique moléculaire; transferts d'échelle (*homogénéisation, upscaling et downscaling*). Le dernier problème s'inscrit dans le cadre de la théorie mathématique de l'homogénéisation qui consiste à décrire mathématiquement les propriétés des matériaux hétérogènes. Le challenge dans ce contexte est de décrire les propriétés moyennes des matériaux au niveau macroscopique en tenant compte de leur arrangement microscopique. Le support apporté à ces approches par collaborations avec des spécialistes en mathématiques appliquées et par les centres nationaux de calcul, l'IDRIS en particulier, est à souligner.

- **Méthodologie de couplage d'algorithmes «black-box».** La nouvelle tâche d'implémentation des couplages multiprocesseurs nécessite de « faire communiquer » plusieurs algorithmes de nature et d'origine différentes, dont les codes « source » ne sont pas toujours disponibles (e.g. codes commerciaux). Plusieurs outils parallèles doivent pouvoir échanger des informations au travers d'une interface commune dans le cadre d'interactions dynamiques, de manière optimale (en limitant les temps de latence).

■ Enjeux en termes d'infrastructures et de politique pour le calcul intensif

• Perspectives et Recommandations.

- Les défis logiciel et algorithmique, auxquels toutes les disciplines des sciences de la Terre sont confrontées, ne peuvent être relevés sans une étroite interaction avec d'autres disciplines comme les mathématiques, l'informatique, la physique, la chimie en particulier. L'émergence de la Maison de la simulation (CNRS, CEA, Inria, Université Paris-Sud, USQV), et de la Mission pour l'interdisciplinarité du CNRS constituent autant de nouvelles opportunités.

- Il est indispensable de faire émerger et de valoriser, en termes de reconnaissance scientifique et de carrière, une nouvelle génération de chercheurs et d'ingénieurs de recherche à l'interface avec ces nouvelles technologies de calcul et de données.

- Il est nécessaire de créer une structure, ou service, spécialisée, consacrée au développement et maintenance d'outils de calcul « lourds » mutualisés pour l'usage communautaire.

- Il est nécessaire aujourd'hui de rapprocher le calcul des données, et de développer des réseaux de transfert de données parallèles, puisque la bande passante des E/S séquentielles et des réseaux de communication ne permettent plus de suivre la vitesse d'évolution des volumes des données, ce qui implique une nouvelle architecture et une urbanisation des infrastructures de données, en synergie avec les centres de données et les *Observatoires des Sciences de l'Univers*.

- Les demandes en moyens de calcul croissantes et les restrictions budgétaires nous amènent à recourir de plus en plus aux grands moyens de calcul nationaux et européens (Tiers-1, Tiers-0). Ce déploiement sera conditionné par l'amélioration des méthodes numériques et « le blindage » de nos outils de simulation et par notre capacité à gérer efficacement les grands volumes de données. À ce niveau, la contribution du

Le calcul intensif

CNRS-INSU est essentielle afin de mieux prendre en compte les besoins des équipes de différents Instituts. Il est tout aussi important de renforcer les liens avec l'IDRIS, au-delà de son rôle d'opérateur de ressources, en tant que pôle d'expertise et de soutien aux communautés scientifiques, en synergie avec la Maison de la Simulation.

- Au niveau Tiers-2 (équipements locales), il est indispensable de maintenir un équilibre de ressources. Cela ne pourra se faire sans synergie avec les grands pôles universitaires émergents et, pour ce qui concerne l'INSU, en synergie avec

les *Observatoires des Sciences de l'Univers*.

- Une nouvelle politique, et stratégie, au niveau du CNRS-INSU doit s'appuyer sur l'ensemble des expertises et des acquis du CNRS-INSU et du CNRS dans les domaines du calcul intensif et du traitement des données, au travers des différents Instituts. Elle doit faire émerger une urbanisation des infrastructures de calcul et de données, intégrant HPC, grilles, cloud et grands centres de données des Instituts. Elle pourra s'appuyer sur les acquis de l'IDRIS, de l'IdGC de la Maison de la Simulation et du CC-IN2P3 et des Observatoires des Sciences de l'Univers.

Principaux laboratoires impliqués dans le calcul intensif

- Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP, UMR7154, Université Paris Diderot – Paris 7)
- Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP, UMR7193 UPMC-CNRS, Université Pierre et Marie Curie – Paris 6)
- Institut de Minéralogie et de Physique des Milieux Condensés (IMPMC, UMR7590, Université Pierre et Marie Curie – Paris 6)
- Planétologie et Géodynamique (UMR6112, Université de Nantes)
- Institut de Physique Théorique (IPhT, URA2306, CEA – Saclay)
- Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels (EGI, UMR5519, INPG, Université Joseph Fourier, Grenoble)
- Institut des Sciences de la Terre (ISTerre, UMR5275, Université Joseph Fourier, Grenoble)
- Institut de Physique du Globe de Strasbourg (EOST, UMR7516, Université de Strasbourg)
- Géosciences Montpellier (UMR5243, Université Montpellier 2)
- Sismologie, Structures Profondes, Déformations Continentales (UMR5562, Université Paul Sabatier, Observatoire Midi Pyrénées)
- Laboratoire Géosciences Azur (Géoazur, UMR6526, Université de Nice Sophia-Antipolis)
- Laboratoire de Modélisation et Imagerie en Géosciences (UMR5212, Université de Pau et des Pays de l'Adour)
- Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE, UMR5564, Université Joseph Fourier, Grenoble)
- Laboratoire Climat et Occupation du Sol par Télédétection (COS-TEL-LETG, UMR6554, Université Rennes 2)
- Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE, UMR1572, CEA-DSM)
- Laboratoire Interuniversitaire des Systèmes Atmosphériques (LISA, UMR7583), Université Paris Est Créteil Paris XIII)
- Laboratoire de Météorologie Physique (LaMP, UMR6016, Université Blaise Pascal Clermont II)
- Institut Pierre Simon Laplace (IPSL, FR636, Fédération de Recherche UVSQ, UPMC, CEA-DSM, ENS, École Polytechnique)
- INRIA Paris - Rocquencourt Alpines group
- Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE, UMR5183, Université Joseph Fourier, Grenoble)
- Laboratoire Détection et de Géophysique (UMR8538, CEA, DAM Arpajon)
- Sciences de L'Univers au CERFACS (URA1875, CERFACS/CNRS, Toulouse)
- Laboratoire de Sondages Électromagnétiques de l'Environnement Terrestre (LSEET, UMR6017, Université du Sud Toulon)
- Laboratoire des Sciences de l'Environnement Marin (LEMAR, UMR6539, Institut Universitaire Européen de la mer, Université de Bretagne Occidentale)
- Laboratoire de Mécanique des Fluides (UMR 6598, École Centrale de Nantes)

Références citées

- Livre Blanc de Calcul Intensif CNRS, <http://www.cnrs.fr/ins2i/spip.php?article379>
- **Burov E., Francois T., Yamato P., Wolf S.**, Advances and challenges in geotectonic modeling, *Soc. Geol. Fr.* Invited paper, v. 185, p.147-168, doi:10.2113/gssgfbull.185.3.147, 2014
- **Burov E., Gerya T.**, Asymmetric three-dimensional topography over mantle plumes, *Nature*, 513, 85-89, DOI: 10.1038/nature13703, 2014
- **Cordier P., Amodeo J., Carrez P.**, Modelling the rheology of MgO under Earth's mantle pressure, temperature and strain rates, *Nature* 481 pp. 177-180 (2012) [doi: 10.1038/nature10687]
- **Métivier L., Brossier R., Virieux J., Operto S.**, Full waveform inversion and the truncated Newton method. *SIAM J. Sci. Comput.*, 35(2), B401–B437, 2013
- **Rey P.-F., Coltice N., Flament N.**, *Nature* 513 (7518), 405-408





Sciences de la Terre et société

Gestion des risques

Patrick Bachèlery (OPGC)

La gestion des risques telluriques en France demeure une question trop peu souvent évoquée, si ce n'est pour souligner le manque de préparation, d'organisation de notre communauté, ou encore l'absence de liaison clairement établie avec les Ministères et autorités en charge de la protection civile et environnementale. Dans une période où la parole des scientifiques est de plus en plus questionnée par le public, et où le rôle d'expert apparaît de plus en plus difficile à tenir, la question de la responsabilité des scientifiques en période de crise doit être débattue.

En matière de risques telluriques, les progrès accomplis dans l'observation et la représentation des processus durant ces dernières années sont considérables. Les moyens d'observation sismologique et géodésique connaissent une amélioration sans précédent avec le déploiement du Réseau Sismologique Français (RESIF). Les observatoires volcanologiques comptent parmi les mieux équipés au monde. L'implication de la communauté nationale est croissante dans le cadre du Service National d'Observation en Volcanologie (SNOV). L'observation progresse sur les mouvements de terrain dans le cadre de l'Observatoire des Mouvements et Instabilités des Versants (OMIV).

Si nos capacités d'observation et de modélisation sont en progression, il n'en reste pas moins que des questions essentielles en matière de gestion des risques demeurent non résolues. La question de la communication des scientifiques et experts mandatés par les pouvoirs publics à propos de phénomènes mettant en jeu des interactions complexes, non-linéaires, dont la physique n'est pas encore bien comprise, et mettant en jeu des échelles de temps et d'espace diverses, est extrêmement délicate. Notre approche souvent probabiliste de ces phénomènes s'accorde mal avec l'attente plus binaire des autorités en charge de la sécurité civile, des media ou du grand public. Le scientifique, amené à sortir de son mode habituel de communication, est souvent mal préparé pour aborder ce nouveau domaine, en particulier lorsque des incertitudes ou des controverses pèsent sur le débat, ce qui est le plus souvent le cas en matière de risques telluriques.

Le jugement rendu en première instance envers nos collègues italiens à la suite du séisme de l'Aquila en avril 2009, a clairement posé la question de la responsabilité des scientifiques et experts, de leur protection juridique, de

la conduite à tenir, ou encore de l'organisation même de la communication en période de crise.

En France, le rôle des établissements publics de l'enseignement supérieur et de la recherche en matière de suivi et de gestion des crises telluriques est loin d'être clair. Quelle est notre responsabilité dans la surveillance opérationnelle de ces phénomènes? Jusqu'où doit aller notre implication? Quel moyens humains et financiers avons nous pour maintenir un dispositif d'alerte opérationnel 24 h sur 24? Comment communiquer sur des phénomènes complexes et incertains?

Ces questions ont été débattues à la suite de la crise sismique de l'Aquila en Italie et des décisions juridiques qui ont suivi au sein du Comité d'éthique du CNRS (COMETS) et du groupe de réflexion « Gestion de crise et expertise » mis en place par le CNRS-NSU; puis lors de la table ronde organisée dans le cadre de la prospective CNRS-INSU-TS en novembre 2014 à Cabourg.

■ Comité d'éthique scientifique (COMETS)

• Extraits des principales conclusions de l'auto-saisine

(www.cnrs.fr/comets/spip/.php?article_85)

Le COMETS souligne les difficultés que sont la nécessité de prise de décision très rapide de la part du commanditaire et l'absence de réponse simple à donner à la question posée. Il faut par ailleurs tenir compte de la méconnaissance par une large part de la population et par les décideurs des représentations probabilistes des connaissances scientifiques (difficulté de la communication), et des possibles divergences au sein de la communauté scientifique du fait de l'existence de débats contradictoires (recherche des méthodes et les interprétations qui font l'objet d'un consensus suffisant). Le scientifique, qui doit apprendre à apprivoiser l'espace public (l'expert peut être déconcerté par une exposition médiatique où l'autorité d'un savoir construit cède devant la force d'une intime conviction), agissant en qualité d'experts, a pour rôle de transmettre des informations scientifiquement pertinentes, accessibles et complètes. Les scientifiques ont à faire face à deux demandes distinctes, celle du public, et celle des décideurs, auxquelles

les réponses doivent être identiques dans le contenu mais dont les formulations auront à être adaptées.

CONCLUSIONS DU COMETS

- La recherche fondamentale peut contribuer efficacement à la réduction sur le long terme des risques encourus par la population.
- Le CNRS doit veiller à clarifier son champ d'action en particulier en séparant expertise et tâches opérationnelles.
- En s'appuyant sur les chartes existantes, et pour chaque type de risques, des procédures d'engagement dans l'expertise doivent être préparées en avance des situations de crise. La communication est particulièrement difficile sur des phénomènes complexes dont l'évolution requiert des approches probabilistes. Des porte-parole doivent être désignés, préparés et formés pour cette tâche, car l'espace public démocratique requiert d'autres règles et un autre registre que la discussion scientifique.
- L'exploitation des conclusions de l'expertise n'appartient pas à l'expert scientifique, mais au décideur politique. Les scientifiques n'ont pas à être solidaires des décisions prises à partir d'un ensemble d'informations dont leur expertise n'est qu'un élément.
- L'expert conserve un pouvoir de contrôle sur le contenu de son expertise, qui ne doit pas être dénaturé dans sa présentation au public.
- Le contenu scientifique de l'expertise inclut un exposé des informations techniques et de l'état de la connaissance. Ce contenu doit être rendu public rapidement. Dans les problèmes d'aléas naturels, les conclusions scientifiques sont souvent entachées de fortes incertitudes liées à la dynamique du système considéré. La communication doit tenter de rendre cet état de fait compréhensible par tous.

■ Groupe de réflexion « Gestion de crise et expertise »

Le rôle du groupe de réflexion était de donner des lignes directrices à l'INSU dans le domaine des risques telluriques et sismiques et de réfléchir à la mise en place d'une charte adaptée à la question de l'expertise en période de crise et aux liens avec la société civile

Les discussions ont porté sur :

- Les mots « alerte » et « surveillance » avec la « crainte d'afficher des missions que nous ne pourrions pas honorer », et

le problème des moyens et financements associés.

- La mission d'observation qui fait partie de nos métiers (SNO), et le fait que la situation se complique lorsque le préfet demande un avis ou une réaction ;
- L'expertise et l'alerte qui sont deux choses différentes. En situation d'expertise, on doit pouvoir fournir les éléments utiles à diffuser au public ;
- Qui parle ? Au nom de qui on parle ? Au nom du CNRS-INSU, du laboratoire, etc. Dans la charte du CNRS, il y a un chapitre qui insiste sur le fait que l'expert n'est pas obligé de donner son avis s'il ne le veut pas ;
- Comment diffuser l'information (quel est le rôle du CNRS ?) ;
- L'analyse de la crise de 1976 à la Soufrière de Guadeloupe ;
- L'analyse des textes actuels (Charte de l'expertise, décrets/conventions INSU-CNAP-IPGP, conventions liant les observatoires volcanologiques aux collectivités locales).

RECOMMANDATIONS

Les recommandations du groupe de réflexion « Gestion des risques et expertise » sont :

- Mettre en place, sous le label CNRS-INSU, une structure opérationnelle à caractère national (avec une reconnaissance par les Ministères concernés), dédiée à l'expertise et à la communication en cas de crise tellurique majeure ;
- Prévoir son adossement aux SNO, en lien avec les OSU ;
- Mettre en place les moyens d'une communication scientifique claire, intégrant les divergences et reflétant un état des connaissances ;
- Faire un travail préparatoire intégrant la notion d'incertitude et de prise de décision ;
- Réaffirmer les recommandations de la charte de l'expertise et, si besoin, les adapter, en rappelant notamment que l'expert doit avoir l'accord de son organisme, qui, dès lors, s'engage à le protéger juridiquement. Cette charte doit concerner tous les personnels des OSU impliqués ;
- Anticiper le fait qu'en volcanologie, les crises peuvent être de très longue durée (plusieurs mois/années) ;
- Former les interlocuteurs (autorités, responsables, population ?) ;
- Avoir des personnels dédiés à assurer le lien entre scientifiques et non-scientifiques.

■ Table ronde « Gestion des risques », colloque de prospective (novembre 2014, Cabourg)

La table ronde a débuté par un rappel des enjeux et des principales conclusions issues des débats sur le même thème dans le groupe de réflexion « Gestion de crise et expertise » mis en place par le CNRS-NSU, et au sein du Comité d'éthique du CNRS (COMETS), à la suite de la crise sismique de l'Aquila en Italie et des décisions juridiques qui ont suivi. Un état des lieux concernant les systèmes d'alerte en sismologie, volcanologie et pour les mouvements de terrain a été dressé.

• Discussions relatives à l'information et la communication en période de crise

Diffusion de l'information, lien avec les médias

Comme on l'a vu précédemment, une des difficultés majeures dans le domaine des risques telluriques vient du fait que l'évaluation scientifique concerne l'occurrence de phénomènes exceptionnels, dont l'évolution est toujours donnée en termes de probabilités. Toute évaluation comporte une part d'incertitude qui est difficile à retranscrire et à faire admettre aux autorités, aux médias, au public.

L'information doit être délivrée par le ou les organismes en charge de la crise. Si non, le risque est que les médias cherchent l'information par leurs propres moyens et ne trouvent pas forcément des sources fiables. En cas de non-préparation, n'importe qui peut communiquer.

En cas de crise volcanique, les observatoires volcanologiques sont rapidement sollicités par les médias. Se pose alors la question de la compétence des personnels des observatoires en matière de communication. Des formations au « media-training » qui ont montré leur efficacité par ailleurs, pourraient leur être proposées.

Enfin, lorsque les scientifiques, personnels du CNRS ou des Universités, sont amenés à prendre position en situation de crise, la question de leur protection juridique se pose.

Problèmes de temporalité liés aux crises

La réponse à donner en situation de crise doit être rapide. Elle se satisfait mal de longues chaînes de décision devant transiter par les directions des organismes. La crise doit de ce point de vue là, comme pour bien d'autres, être anticipée, avec des procédures rapides déjà validées.

L'une des principales difficultés est la prise de décision quant à la déclaration de la situation de crise. A quel moment décide-t-on qu'une situation nécessite des mesures exceptionnelles ? Qui prend la responsabilité de déclarer qu'il y a crise ?

L'éruption récente du Mont Ontake au Japon (septembre 2014) montre que, en matière de volcanologie, la situation d'un volcan peut changer très rapidement. Ceci nécessite une évaluation et une décision rapide.

État des lieux de la gestion des crises telluriques en France, délimitation des responsabilités

En matière de sismologie, l'organisme en charge de l'alerte est le CEA. Il y a une personne d'astreinte spécialement dédiée au suivi de l'activité sismique, et une cellule d'astreinte post-sismique peut être mise en place si nécessaire. Cela couvre aussi bien la sismicité de routine que celle associée à un événement majeur. Ce dispositif d'alerte ne comprend pas, en revanche, de dispositif de communication.

Pour le volcanisme, il n'existe pas d'organisme officiellement en charge de la gestion des crises volcaniques en France. Le Comité Supérieur d'Évaluation du Risque Volcanique (CSERV) n'existe plus. Son efficacité fut jugée très faible. Il ne répondait pas aux exigences de la situation de crise.

De fait, les observatoires volcanologiques, et donc l'Institut de Physique du Globe de Paris, établissement tutelle des observatoires volcanologiques, héritent de cette responsabilité puisqu'ils sont directement sollicités par les autorités (préfecture), si ce n'est réquisitionnés. Aucun des textes actuellement en vigueur ne délivre formellement une quelconque responsabilité à l'IPGP dans la déclaration de situation de crise.

Des situations semblables existent pour d'autre type d'aléas. Exemple a été donné des mouvements de terrain et effondrements de falaise pour lesquels les scientifiques locaux sont questionnés par les autorités qui leur demande une décision sur les mesures à prendre.

La séparation des rôles entre les scientifiques et les autorités doit être claire et réaffirmée.

Questions liées à la formation des autorités et personnes en charge des décisions

Le problème de la rotation fréquente des préfets, et donc des difficultés qu'il y a à travailler sur le long terme avec eux, a été évoqué à plusieurs reprises. Les fonctionnaires de l'État affectés dans les départements d'outre-mer où le risque volcanique, voire sismique, est présent, ont généralement une méconnaissance des situations liées aux crises telluriques. Des formations pourraient facilement leur être proposées.

Le projet européen VUELCO a été évoqué. Ce projet met en place sur divers volcans de par le monde des exercices de simulation de crise. Dans ces simulations, les observatoires volcanologiques sont au centre du dispositif ; ils constituent le centre de décision et de diffusion de l'information. La nécessité d'avoir une bonne connaissance du système volcanique est essentielle. Un test au niveau national devrait être effectué sur l'un des volcans antillais.

Pour les crises sismiques, de tels exercices ont eu lieu (exercices RICHTER). Ils visent à accroître la sensibilisation des acteurs, collectivités locales en particulier, et sont utilisés pour actualiser les plans «ORSEC séisme». L'information recueillie doit être centralisée par le BRGM. Qu'en est-il ?

Questions liées à l'effort de financement propre à la gestion de crise.

Les structures de recherche du CNRS-INSU sont en première ligne sur ces questions. Tout l'effort de financement revient donc au seul Ministère de la Recherche, alors que des aspects propres à la surveillance et aux risques naturels existent. Il paraît anormal que seul le Ministère de la Recherche finance, alors des missions sont confiées par les services de l'État chargés de la protection des personnes et des biens, aux Services Nationaux d'Observation et, en particulier aux observatoires volcanologiques.

Quelle organisation possible ?

Aux Etats-Unis, l'USGS est un service de l'État dont les personnels sont requis par l'administration en cas de situation de crise. S'ils donnent leur avis sur le phénomène en cours, c'est uniquement vers l'administration et dans le giron scientifique. Ils ne sont pas autorisés à communiquer avec les médias ; un porte-parole est mandaté pour cela. Voir à ce propos l'article de Sparks sur la gestion de la crise volcanique à Montserrat. Il fournit un très bon exemple de gestion de crise.

IDÉES FORTES ET CONCLUSIONS

- La formation est indispensable. Elle concerne tout autant les scientifiques (pour les aspects communication), les autorités (à la compréhension des phénomènes naturels), les médias et le public.
- Absolue nécessité de préparer en amont des procédures de gestion des crises (en complément des plans ORSEC), d'organisation de la prise de décision comme de la communication.
- Toute situation de crise doit conduire à la mise en place d'une cellule, sous l'autorité du CNRS-INSU, qui elle seule communique. Cela implique une procédure de prise de parole organisée et approuvée par le CNRS, les universités partenaires par le biais des OSU, et les laboratoires. Doit-on créer, sous le label CNRS-INSU, une structure opérationnelle à caractère national ? Laquelle ?
- Hors crise, une procédure propre à la communication en situation de crise ou d'événement tellurique exceptionnel doit être établie au niveau national, mais également à l'échelon régional, diffusée par le CNRS, validée par les Universités et portée à la connaissance des médias.
- Nécessité de mettre en place des moyens humains et financiers appropriés à la surveillance et à l'alerte.
- Pour la volcanologie, réaffirmer le rôle central des observatoires volcanologiques.

La responsabilité des scientifiques en matière de communication

Elle porte sur :

- Une formulation compréhensible et partagée, capable de faire passer la notion d'incertitude dans les avis rendus.
- La nécessité de rendre publique rapidement le contenu de l'expertise.
- L'explication des divergences éventuelles en cas de débat scientifique. Il faut tendre vers un consensus, sans taire les divergences, et, si besoin, dire les limites de notre capacité d'expertise.

Enfin, le droit de réponse des scientifiques doit être respecté, surtout si la communication est encadrée par des non-scientifiques.

• Enjeux scientifiques

Forces et faiblesses de la communauté nationale

Le tissu de la recherche française en Terre Solide constitue une force réelle par sa qualité et son organisation coordonnée dans le cadre du CNRS-INSU. Le CNRS-INSU, à travers ses missions nationales reconnues par les textes législatifs, coordonne les Services Nationaux d'Observation, et fédère, grâce aux Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU), la quasi-totalité des UMR en Sciences de la Terre. Cette situation permet d'établir une stratégie nationale, voire internationale, et de faciliter le dialogue avec, et entre, les scientifiques qui se reconnaissent largement à travers une « communauté INSU ».

Les Services Nationaux d'Observation (SNO) en Terre Solide permettent de suivre dans la durée les phénomènes telluriques, et par là d'en comprendre et d'en modéliser le fonctionnement et l'évolution. Pour la volcanologie, le SNOV contribue aux besoins de surveillance des volcans dans le cadre de missions confiées par les services de l'État en charge de la sécurité des personnes et des biens.

Services Nationaux d'Observation et Observatoires des Sciences de l'Univers portent donc des systèmes d'observation qui s'inscrivent dans une durée nécessaire à l'appréciation de la variabilité des systèmes et processus géologiques. Ils ont vocation à permettre un large partage des données et métadonnées, ouvrant ainsi la possibilité d'impliquer une large communauté de chercheurs. Ce dispositif est reconnu comme un soutien indispensable aux activités de recherche en Terre Solide. Il est, bien entendu, à la base de l'évaluation des aléas telluriques, et donc un maillon incontournable de la gestion des crises.

Les faiblesses se situent, d'une part dans les moyens pouvant être consacrés aux missions d'alerte et de communication de l'alerte, d'autre part dans l'absence d'organisation du système de communication en période de crise.

Si, comme mentionné précédemment nos capacités d'observation et de suivi des phénomènes telluriques sont bonnes, la nécessité de disposer de moyens appropriés permettant d'organiser une communication d'alerte opérationnelle a été souvent soulignée au cours des débats. C'est particulièrement les cas pour la volcanologie et les mouvements de terrain, mais également en partie pour la sismologie.

L'impréparation des scientifiques à la communication (vers les autorités, les média, le public) en période de crise est également identifiée comme une faiblesse. Ceci est clairement renforcé par l'absence d'une stratégie prédéfinie de communication aux

niveaux des institutions, CNRS et donc CNRS-INSU en premier lieu, mais au delà, les universités d'accueil des UMR CNRS-INSU et les laboratoires eux-mêmes.

• Prospective scientifique et recommandations

Une réflexion nationale

Il est nécessaire d'avoir une réflexion nationale sur :

- Les questions associées spécifiquement aux situations d'urgence, en impliquant les ministères concernés (Intérieur, Environnement), au delà du seul Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche ;
- Le lien Recherche / Sécurité civile ;
- Le positionnement du scientifique dans le dispositif institutionnel et dans le débat public qui accompagnent les situations d'urgence.

CONCERNANT LES ENJEUX SCIENTIFIQUES

Il s'agit d'assurer le maintien de l'expertise scientifique française dans le domaine du suivi des phénomènes telluriques et des risques associés, et de renforcer les capacités des organismes en terme de dispositif d'alerte (vers la mise en place un système d'alerte et de communication 24h sur 24).

Les travaux sur les risques telluriques et la gestion de crise sont à renforcer par l'établissement de liens forts entre sciences fondamentales, sciences environnementales et sciences humaines et sociales ; sont également à renforcer nos connaissances sur la perception du risque ; il faudrait envisager d'avoir des personnels dédiés à assurer le lien entre scientifiques et non-scientifiques.

Plus spécifiquement pour le volcanisme, il convient d'évaluer notre réel degré d'expertise instrumentale dans le cas d'une catastrophe sur les volcans aujourd'hui ; d'anticiper ce que sera l'organisation au sein de notre communauté en cas de crise majeure aux Antilles ; de définir quelles doit être l'interaction entre SNOV et Observatoires (IPGP) en cas de crise.

L'ÉDITION D'UN LIVRE BLANC

Le constat général issu des discussions est qu'il est indispensable de rendre public les limites du système actuel. Un manque de structuration et un défaut d'implication des autorités sont clairement ressentis par

la communauté scientifique. Soit les pouvoirs publics ne se sentent pas concernés, soit ils pensent que tout va bien, soit ils ne souhaitent pas être concernés, ne voulant pas en assurer les conséquences financières.

La rédaction d'un « livre blanc » précisant ces points a été proposée et doit être conduite sous la houlette du CNRS-INSU, avec un rappel fort de l'absolue nécessité à maintenir une expertise scientifique en matière de risques naturels. Le système de gestions des risques naturels doit être renforcé, voire repensé, avec un investissement concret des ministères concernés (Intérieur, Environnement). Le lien entre la sécurité civile et les scientifiques doit être clairement défini.

Le livre blanc doit permettre de poser la question « avez-vous réfléchi à ce qui se passe si une crise majeure survient ? ». Il doit servir à souligner les faiblesses de la chaîne d'alerte.

Des moyens spécifiques à la surveillance et à la gestion de crise sont nécessaires, et ceci ne peut pas reposer uniquement sur des moyens et dispositifs mis en place pour des problématiques de recherche.

Un groupe de travail pour la rédaction d'un livre blanc « Aléas et risques naturels d'origine tellurique sur le territoire français : observation, surveillance, alerte » a été mis en place par le CNRS-INSU et travaille à la rédaction de l'ouvrage.

Les relations industrielles

Gabriel Marquette (INSU)

La Délégation aux Relations Industrielles du CNRS-INSU (DRI) a été créée en Janvier 2012. La Délégation recouvre 2 missions conjointes : l'une stratégique et l'autre opérationnelle.

■ La stratégie

La mission stratégique a pour objectif de mettre en place sur le long terme des plateformes de recherche entre le monde économique et celui de la recherche autour des domaines de recherche centraux du CNRS-INSU. Ces plateformes serviront de pont entre l'industrie et le CNRS-INSU afin de :

- Développer de la science commune sur des thématiques à impact économique et sociétal (énergie, environnement, risques...);
- Mettre en place des passerelles d'échange de chercheurs entre le monde académique et le monde industriel;
- Mieux positionner l'INSU et donc le CNRS face à une concurrence en matière de recherche qui est mondiale.

■ L'opérationnelle

L'opérationnelle consiste en :

- L'utilisation extensive des résultats de la cartographie des laboratoires à fort potentiel d'innovation et de transfert technologique;
- L'analyse des bases de données en matière d'inventions et de partenariats;
- Le développement d'un réseau interne pour identifier les projets collaboratifs en mûrissement et exploiter les programmes en cours.

Rattachée à la direction de l'institut, elle est totalement complémentaire des actions de terrain menées par les RSPV et s'appuie sur leur travail réalisé en région et avec les laboratoires. En relation étroite avec la DIRE, elle utilise de façon ad hoc FIST et les SATT pour répondre à des demandes ponctuelles des laboratoires et/ou pour établir des relations avec les industriels concernés. Enfin elle s'appuie fortement sur les services de la DAJ pour tous les termes juridiques dans les contrats/accords en négociation (les actions-phare GEODENERGIES et PAMELA¹ en sont 2 illustrations parfaites) et ceux de la DERIC pour tout ce qui concerne ses relations à l'international (mission au Canada, MOU avec le Brésil, relations avec le bureau de Bruxelles et le CLORA à titre d'exemple).

1 - Voir paragraphe suivant; 2 - Disponible sur demande

■ Les actions phares et les plateformes stratégiques

Sans refaire le bilan² exhaustif des 3 premières années, 2 actions phares relevant de Terre Solide sont présentées à titre d'illustration de ce que l'INSU compte généraliser comme paradigme dans le relationnel avec les entreprises – programmes pluriannuels, multipartenaires avec thésards, postdocs, équipes intégrées, échanges de chercheurs, laboratoires communs... - pour le développement de relations long terme portant des vraies questions scientifiques.

• L'Institut pour la Transition Energétique (ITE) GEODENERGIES :

À ce titre l'exemple de l'ITE est emblématique car il s'inscrit parfaitement dans la démarche que le CNRS-INSU met en œuvre avec ses partenaires industriels, porteurs de vision stratégique et partageant les mêmes champs de travail scientifiques. D'où le rôle moteur pris par l'INSU dans GEODENERGIES (Géotechnologies pour décarboner les énergies).

GEODENERGIES porté par le Bureau de recherches géologiques et minières, est l'Institut d'excellence pour des énergies décarbonées (IEED, devenu depuis ITE) dans lequel le CNRS est le plus impliqué. Ce partenariat public-privé stratégique conduira au développement de trois filières industrielles à vocation mondiale dans l'utilisation rationnelle du sous-sol pour décarboner le secteur de l'énergie : géothermie, stockage géologique du CO₂ et stockage de l'énergie/chaleur.

Avec 7 laboratoires impliqués dans GEODENERGIES, le CNRS joue un rôle prépondérant dans ce partenariat public-privé rassemblant 7 établissements publics, 14 industriels ainsi que 2 pôles de compétitivité.

La croissance de la demande énergétique mondiale, la quantité de CO₂ d'origine anthropogénique produite, l'intermittence de la production des énergies renouvelables et l'incapacité des réseaux à gérer intelligemment la ressource électrique par défaut de capacité de stockage sont autant de défis économiques et sociétaux.

GEODENERGIES ambitionne d'apporter une partie de la solution technologique manquante pour favoriser l'émergence de trois filières industrielles consacrées à l'exploitation et la

gestion des ressources du sous-sol au service des énergies décarbonées :

- stockage de CO₂ (temporaire et séquestration),
- stockage d'énergie (chaleur, électricité sous forme d'air comprimé, de H₂),
- géothermie (très basse, basse et haute énergie).

Ces trois filières émergentes, qui sont à différents stades de maturité, s'avèrent potentiellement capables de contribuer de façon conséquente à l'atténuation du changement climatique et la gestion responsable et respectueuse de l'environnement du sous-sol.

GEODENERGIES, labélisé IEED en avril 2012, sera cofinancé dans le cadre des Investissements d'Avenir, est maintenant dans sa phase finale de montage, avec en perspective la création d'un GIS d'ici Septembre 2015, préfigurateur d'une SAS à venir dans les 3 années. Le CNRS-INSU en est le coordinateur depuis son montage fin 2011.

• Participation au programme-cadre Total-Ifremer sur l'exploration des marges passives (PAMELA)

Ce programme de recherche ambitieux de 6-8 ans, incluant la mise à disposition d'équipements importants représente un montant d'environ 5 M€ de contrats d'études et 15 thèses pour les laboratoires CNRS-INSU impliqués.

Vu l'ampleur du programme, son intérêt scientifique, et l'implication de nombreuses équipes des UMR, il a été décidé de faire rentrer l'ensemble de ces actions (études et thèses) dans un contrat partenarial entre ce programme-cadre et les tutelles des laboratoires concernés.

Le CNRS-INSU, mandataire unique pour le CNRS et les universités, a assuré la négociation de ce contrat partenarial avec l'industriel et l'EPIC concernés. Le bénéfice de l'interlocuteur unique a permis que le CNRS, au nom des partenaires, se retrouve en position d'égalité, de supprimer la fragmentation qui est source de faiblesse, et de présenter un front unique, ce qui est un facilitateur pour le demandeur industriel car le travail de construction de la solution scientifique qu'il recherche est réalisé.

La négociation a permis :

- Un accord sur les grands principes qui régissent les contrats en collaboration ;
- L'intégration des contrats de thèses ;
- La définition d'une clé de répartition de la propriété intellectuelle ;
- La modification des règles de gouvernance : CNRS et Univ.

membres du COPIL ;

- Le principe de la comptabilité analytique adopté par tous les partenaires ;
- La définition d'un modus operandi conduisant à un délai maximum de 60 jours pour l'approbation ou non des publications/communications ;
- L'approbation des règles de confidentialité ;
- L'application des règles de santé/sécurité/environnement dans les campagnes terrain comme dans les laboratoires ;
- La prise en compte des apports matériels des partenaires.

Toute avancée dans ces domaines permet de construire un nouveau relationnel avec le monde industriel, et participe de l'effort d'adaptation de nos laboratoires pour être au plus près des contraintes industrielles qui leur seront appliquées en tout état de cause.

Cet exemple de négociation se veut précurseur, dans la démarche, pour l'établissement de relations équilibrées entre les différents acteurs, de la recherche à l'économie avec un retour sur investissement mesurable (scientifique et économique) dès le lancement des programmes, pour chacun des partenaires.

■ Perspectives pour 2015-2018

En 3 ans le contexte national et international a beaucoup évolué : l'exercice de la SNR est achevé, le rôle des Alliances est en pleine révision, H2020 est lancé, des partenariats scientifiques se montent entre acteurs mondiaux de la recherche et le CNRS veut occuper la place qui lui revient comme acteur incontournable dans le monde économique et acteur citoyen pour apporter des réponses à la demande sociétale :

- Son autorité scientifique, conférée de par l'excellence de ses chercheurs et la qualité de la science qu'ils produisent, lui impose un devoir de communication, d'explication et d'éducation citoyenne comme expert indépendant et neutre.
- Dans un monde de la recherche de plus en plus globalisé, la concurrence internationale, à laquelle l'organisme est habitué en matière d'excellence scientifique, implique également la visibilité et l'appropriation sociétale des actions scientifiques.

Si on ajoute la raréfaction des ressources financières et l'obligation de travailler au contact avec les acteurs économiques non pas pour compenser cet appauvrissement, il est impératif pour atteindre cet objectif de :

- Faire rentrer la science dans la chaîne de valeur économique ;
- Faire reconnaître et apprécier à sa juste valeur la contribution de la science à la réponse aux défis sociétaux.

Pour ce qui concerne le CNRS-INSU, 4 objectifs ont été fixés :

• Objectif 1 : Mise en place de Plateformes stratégiques

Capitaliser sur les acquis de GEODENERGIES et des grands programmes partenariaux type PAMELA. Définition de grands programmes scientifiques ambitieux, pluriannuels, multipartenaires avec des grands groupes comme TOTAL, THALES, CGG, AREVA, SAINT-GOBAIN ou AIR LIQUIDE.

• Objectif 2 : Service aux Unités/OSU

Mise en place de nouveaux outils de suivi de la valorisation économique (start-ups, labcoms, plateformes stratégiques). Définition de KPI à intégrer à l'ensemble de ceux développés au sein du CNRS. Service d'appui aux unités pour la gestion d'actions en recherche collaborative ou PPP, et soutien pendant la réalisation des projets avec les SPV des DR.

• Objectif 3 : Stratégie nationale

Alliances : Positionnement fort et contribution active dans les groupes de travail des Alliances (ALLENVI : CVT, GT Prospective,

aide au Secrétariat Général ; mais aussi ANCRE où le CNRS-INSU-TS peut contribuer davantage) et aux événements portés par celles-ci (COP21 pour 2015).

TGIR : Utilisation et valorisation des TGIR pour leur promotion et le développement de leurs capacités, en cohérence avec les exigences scientifiques des instruments dans une relation équilibrée et claire avec le monde économique.

Actions d'envergure nationale et internationale à l'initiative des ministères : MESR-DGRI, MRP-DGE, MEDDE-DGEC-ADEME

ANR, PIA, FUI, FEDER : Coordination des actions menées pour donner une cohérence et montrer la stratégie qui guide ces actions perçues comme parcellaires et individuelles.

• Objectif 4 : Rayonnement à l'Europe et à l'international

Structuration/coordination des actions menées à l'Europe et l'International : ECORD/IODP, Chantier Arctique, UMI, RESIF, ECCSEL, KIC Raw MatTERS, etc.

Europe et international

Elisabeth Kholer (INSU)

La dimension européenne et internationale est centrale pour les projets en TS. L'accès à des terrains d'observation partout dans le monde, en dépit des vicissitudes géopolitiques, reste essentiel pour la communauté TS. En même temps, les missions sur le terrain ne suffisent pas. Dans un contexte de compétition mondiale au niveau de l'excellence scientifique et des enjeux stratégiques autour du big data, la communauté TS doit aussi valoriser l'acquisition de données et des résultats scientifiques dans un contexte européen et international. Afin d'accroître la visibilité et la structuration de la communauté TS, il convient ainsi d'utiliser au mieux différents appels d'offres et programmes européens et internationaux, tels ceux relatifs aux infrastructures, l'ERC, les outils de coopération internationale ou encore EUREKA.

■ Les infrastructures européennes et internationales

• European Plate Observing System (EPOS)

EPOS est une des infrastructures européennes créées ces dernières années, dédiée à l'observation et l'étude du système Terre et à ses différents aspects : géosphère, hydrosphère, atmosphère et biosphère. Elle est en phase d'implémentation après avoir été sélectionnée par la Commission Européenne dans le cadre de ESFRI (European Strategy Forum on Research Infrastructures). EPOS a l'ambition de créer une plateforme européenne de recherche efficace, largement pluridisciplinaire, rendant accessibles et interopérables des données et produits d'observatoires, des réseaux et instruments des disciplines des sciences de la Terre telles que la sismologie, la géodésie, la volcanologie, la tectonique, le géo/paléo-magnétisme, la géologie.

Dans la mesure du possible, EPOS coordonnera ses activités en partenariat avec d'autres initiatives, comme par exemple ORFEUS et CSEM pour la sismologie, EUREF pour le GNSS, EuroGeoSurveys pour les données géologiques, etc. EPOS facilitera ainsi la requête de données mono ou pluridisciplinaires, avec l'objectif d'augmenter si nécessaire tant la quantité que la qualité des données disponibles.

L'architecture de EPOS est structurée en trois niveaux :

- Le premier niveau est formé par les infrastructures de

recherche et centres de données nationaux (pour la France, RESIF et ses diverses contributions).

- Le deuxième niveau est représenté par les TCS (Thematic Core Services) qui ont pour objectifs de mettre à disposition, par thématique, les données et produits issus des infrastructures nationales (sismologie, magnétisme, volcanologie...). Ils doivent aussi développer des produits et services pour les utilisateurs. Les équipes françaises sont présentes dans tous les TCS à l'exception du TCS « Geo-energy test beds for low carbon energy services ».

- Enfin, le dernier niveau regroupera les ICS (Integrated Core Services) qui permettront d'intégrer toutes ces données multidisciplinaires et fourniront l'accès à des outils communs de visualisation et de modélisation.

Les équipes françaises sont fortement mobilisées pour construire et porter des services de EPOS. Le point historique fort de la participation française à EPOS est RESIF, auquel s'ajoutent des services portés par les Services Nationaux d'Observation (SNO), Form@Ter, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), etc. La France est bien représentée du point de vue scientifique dans le projet EPOS-IP par ses nombreux participants dans la préparation des services, ainsi que dans la construction de la gouvernance et de la politique de données d'EPOS, pilotée par l'INSU.

Bien que les contours disciplinaires de EPOS soient beaucoup plus larges que ceux de RESIF, les partenaires institutionnels français sont presque les mêmes. Sous l'impulsion du MENESR, la participation française à EPOS devrait donc être naturellement coordonnée par le Comité Directeur de RESIF, sous une forme qui reste encore à préciser.

EPOS rentrera en phase opérationnelle en 2020. La coordination nationale et européenne des activités dans les contours disciplinaires d'EPOS aura un très fort impact sur les outils pour la recherche en sciences de la Terre Solide, et sera un outil indispensable des chercheurs des générations futures.

• Participation aux programmes de forages internationaux : IODP-ICDP

Le forage scientifique permet d'accéder directement aux archives où sont enregistrés les événements climatiques, sédimentaires et tectoniques ayant affecté la planète au cours de son histoire. L'instrumentation des puits de forage

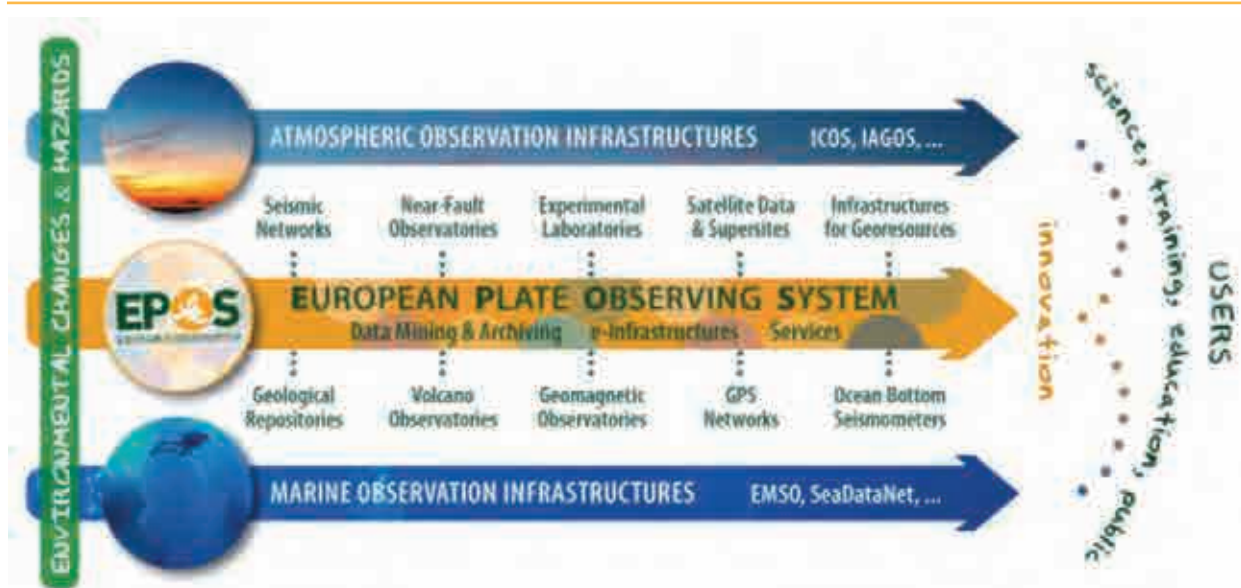


Fig. 1 : Contours disciplinaires de EPOS et lien avec d'autres Infrastructures de Recherche européennes.

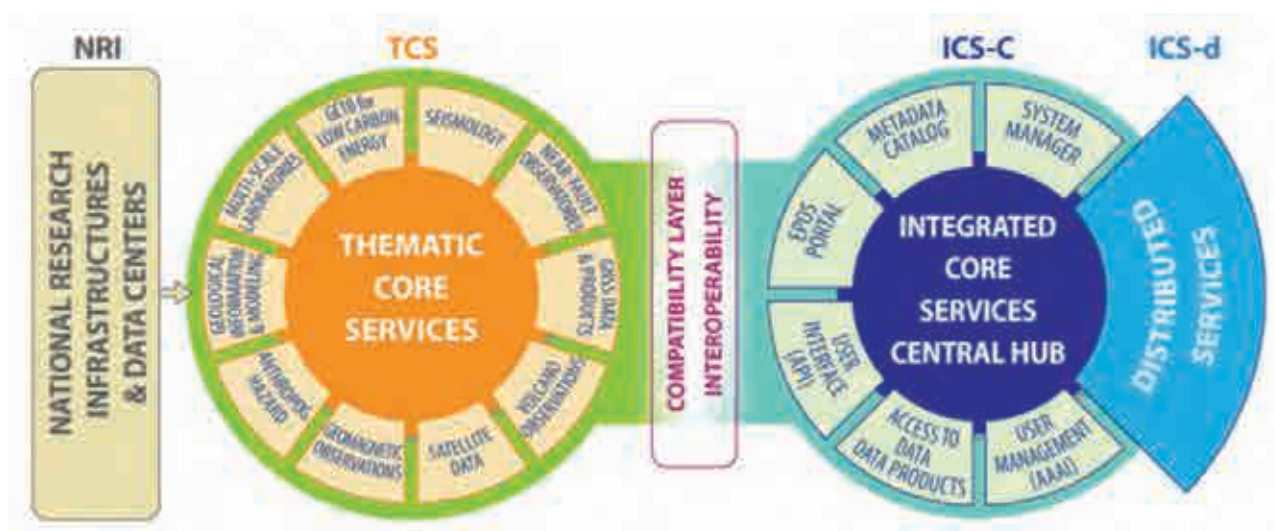


Fig.2: L'architecture d'EPOS

permet un suivi à long terme des processus actifs, dans le cadre d'observatoires. Le forage scientifique et les techniques associées sont donc des outils essentiels et indispensables pour comprendre et prédire le fonctionnement du système Terre.

La France a été impliquée depuis plusieurs décennies dans les programmes internationaux de forages océaniques DSDP, ODP, IODP-1 et IODP-2 (depuis 2013) et, plus récemment (2014), dans le programme international de forages continentaux ICDP.

IODP, programme international majeur en Sciences de la Terre, et ICDP donnent accès à des infrastructures absolument uniques et jouent ainsi un rôle majeur dans l'exploration des archives géologiques, océaniques et continentales, à différentes échelles de temps. Les thèmes mis en avant par les deux programmes incluent les changements climatiques,

la biodiversité, la géophysique et la géodynamique du globe au travers de thématiques aussi variées que les risques sismiques, les changements climatiques, la biosphère profonde, les biotechnologies, l'acidification des océans, le stockage du CO₂, les ressources naturelles, les échanges chimiques entre la croûte océanique et l'Océan, les processus biogéochimiques et physiques liés aux circulations de fluides sous le plancher océanique etc. Une diversification des moyens à la mer s'est avérée indispensable pour aborder les nouveaux objectifs scientifiques de la communauté internationale et mettre en œuvre leurs nouvelles techniques d'étude.

La France participe au Programme IODP à travers le consortium européen ECORD, piloté par l'INSU et qui regroupe 18 états-membres. La plupart des laboratoires français sont impliqués à des titres divers (embarquants, représentants dans les

structures d'évaluation et de décision, utilisateurs de données, étudiants et jeunes scientifiques dans les activités éducatives). L'ouverture à de nouvelles thématiques scientifiques (ex. risques sismiques et volcaniques, biodiversité, biosphère profonde, acidification des océans, stockage de CO₂) et à de nouveaux moyens d'investigation du plancher océanique (ex. foreuses téléguidées, carottiers à sédiments etc.) dans le cadre de l'International Ocean Discovery Program donne l'opportunité à d'autres scientifiques, laboratoires et établissements français de s'impliquer dans IODP.

Le programme IODP met en œuvre une politique de conservation et mise à disposition des données absolument remarquable. Toutes les données et les carottes récoltées au cours des campagnes sont stockées dans trois carothèques et sont en accès ouvert à la communauté scientifique après une période moratoire d'un an.

Outre les aides apportées aux scientifiques au travers de l'organisation de workshops destinés à développer des propositions de forage, ECORD finance une large palette d'activités éducatives ouvertes aux étudiants et post-docs et des actions pédagogiques pour des Professeurs de l'Enseignement Secondaire et pour des élèves et étudiants de tous les niveaux scolaires et universitaires.

• EMSO

EMSO est un réseau européen d'observatoires sous-marins pour l'environnement. EMSO est inscrit dans la liste ESFRI et a terminé sa Phase Préparatoire, qui faisait suite au travail du Network of Excellence ESONET (European Seafloor Observatory Network). La constitution d'un ERIC (European Research Infrastructure Consortium) est actuellement en cours pour gérer cette infrastructure, sous présidence de l'Italie (INGV). L'engagement français dans cet ERIC a été confirmé par lettre du Ministère datée du 27 novembre 2015. La participation française à EMSO est opérée par l'IR EMSO-France (www.emso-fr.org), dont la gouvernance est définie par un accord entre l'Ifremer et le CNRS.

EMSO est un réseau européen d'observatoires sous-marins pour l'environnement. Le réseau comprend 11 sites observatoires distincts sur le pourtour européen, à des stades divers d'installation. Ces sites seront à échéance de 2017-2018, équipé grâce en partie au projet européen EMSO-DEV, de capteurs physiques, chimiques, et biologiques et d'infrastructures permettant la transmission en temps réel ou légèrement différé des données acquises, soit par câble, soit par des systèmes mixtes acoustiques/hertziens portés par des bouées. EMSO vise à acquérir des séries temporelles longues (> 10 ans) dans les mers du pourtour européen avec pour

objectifs principaux :

- L'étude de l'impact du réchauffement climatique sur les océans entourant l'Europe.
- L'étude des écosystèmes marins profonds dans une optique de recherche fondamentale mais aussi de gestion durable, en s'intéressant particulièrement aux facteurs anthropogéniques et climatiques.
- L'étude des processus tectoniques, volcaniques, hydrothermaux et gravitaires et la surveillance des aléas associés (séismes, tsunamis, instabilité des pentes) pour les zones côtières à forte densité de population. Dans ces domaines côtiers, EMSO participe au développement d'une approche terre-mer pour le monitoring des processus actifs, en lien avec des programmes comme EPOS et IODP-ICDP.

EMSO prend en compte le besoin de données océaniques en temps réel exprimé par des agences internationales telles que GMES (Global Monitoring for Environment and Security), ou par des agences nationales ou régionales de suivi des ressources halieutique ou de prévention des risques. EMSO est ainsi identifié comme fournisseur de GMES pour les données eulériennes concernant les changements climatiques (température, salinité, acidité, poids et hauteur de la colonne d'eau, extension de la glace au site EMSO-Arctique), la productivité océanique et le potentiel halieutique, la stabilité des pentes et la sismicité des régions côtières de l'Europe. Au niveau régional, EMSO-Marmara devra par exemple jouer un rôle crucial pour l'évaluation du risque sismique dans la région d'Istanbul, et EMSO-Ligure apportera des données précieuses pour évaluer les risques de glissement de terrain dans le secteur de Nice.

Au niveau international, EMSO collabore principalement avec les initiatives d'observation fond de mer multidisciplinaires du Canada, des USA et du Japon : travail sur des standards communs, et échange de capteurs et de personnel. EMSO est l'un des membres du réseau informel ION (International Ocean Network) qui lors de réunions régulières permet l'échange d'informations et de bonnes pratiques. Le Japon possède un réseau très dense d'observatoires sismologiques et géodésiques câblés, dont une bonne part sont coordonnés par le réseau DONET (Dense Oceanfloor Network System for Earthquakes and Tsunamis). Pour les observatoires multidisciplinaires comparables à EMSO, l'initiative la plus avancée est Neptune-Canada. Un câble de 800 km de long transmet depuis décembre 2009 les données de capteurs installés sur 5 sous-stations au large de Vancouver (www.neptunecanada.ca). Aux USA, le projet Ocean Observatory Initiative (OOI, une subdivision de la NSF) concerne un réseau ambitieux de stations câblées et non câblées sur le pourtour du continent américain pour une durée d'observation de 25 ans.

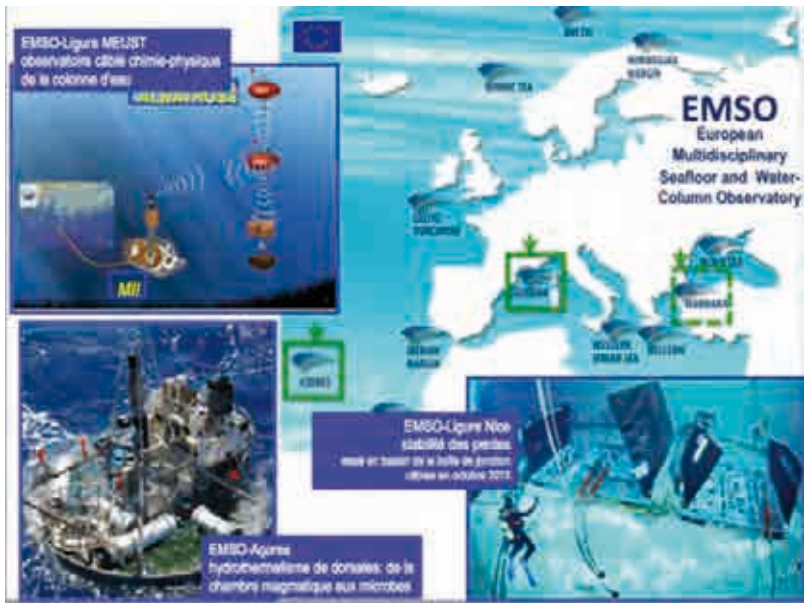


Fig. 3: Les 11 sites du système d'observation marine distribué EMSO. En encart des exemples d'infrastructures opérées dans ce réseau par l'IR EMSO-France.

■ European Research Council (ERC)

Financés par la Commission européenne sous le FP7, puis H2020 les appels ERC font l’objet d’une forte compétition fondée sur des critères d’excellence scientifique. Compte tenu de la forte pression et des financements élevés pour les lauréats, les bourses ERC sont un facteur à la fois de visibilité et de compétition, tant entre pays au niveau européen, entre

organismes au niveau national, voire entre laboratoires. Sur le plan européen, la France se situe en troisième position, derrière le Royaume-Uni et l’Allemagne, tandis que le CNRS reste le premier organisme au niveau européen. Au niveau du CNRS, l’INSU est derrière l’INSB et l’INP mais fait jeu égal avec l’INC et l’INSIS. Au sein de l’INSU, la communauté TS est, avec AA, le plus gros contributeur.

En 2015, la communauté TS affiche ainsi 32 lauréats ERC (tous organismes d’accueil confondus), réparti comme suit :

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	TOTAL
Starting Grant	3			2	2	2		1		10
Consolidator Grant*							2	2	3	7
Advanced Grant		3		2	3		2	1	2	13
Proof of Concept**					1			1		2
TOTAL	3	3	0	4	6	2	4	5	5	32

*premier appel en 2013; **premier appel en 2011

Ces enjeux politiques liés « au label ERC » incitent à la fois à renforcer les dispositifs d’incitation et d’accompagnement des candidats potentiels, mais ne doivent pas non plus conduire à négliger d’autres types d’initiatives.

■ Les outils de coopération internationale

Outre certains appels d'offre de coopération du MAEDI et de l'ANR, le CNRS dispose d'outils qui viennent renforcer les collaborations initiées au niveau des laboratoires. Alors que les PICS (durée 3 ans, non renouvelable) sont destinés en priorité aux jeunes chercheurs pour renforcer des coopérations émergentes, les LIA et GDRI (durée 4 ans, renouvelable une fois), et les PRC dans une moindre mesure (appels ciblés sur quelques pays, tels la Chine, le Japon et la Russie) ont un effet plus structurants dans la mesure où, contrairement aux PICS, elles n'engagent pas le CNRS de façon unilatérale,

mais également le pays partenaire. Au-delà de leur qualité scientifique, ces projets s'inscrivent dans la stratégie internationale de l'INSU. Malgré des sommes relativement modestes, ces projets peuvent servir, notamment dans le domaine TS, à faciliter les missions sur le terrain et à établir des coopérations scientifiques durables dans des pays plus difficiles d'accès.

En 2016, la répartition des PICS (Projets internationaux de coopération scientifique), PRC (Projets de recherche conjoints), LIA (Laboratoires internationaux associés) et GDRI (Groupements de recherche internationaux) s'établit de la façon suivante :

	PICS	PRC	LIA	GDRI	Total	Budget
<i>Allemagne</i>	1				1	5 000
<i>Argentine</i>	1				1	6 000
<i>Arménie, Azerbaïdjan, Géorgie, Ukraine</i>				1	1	15 000
<i>Brésil</i>		1			1	5 000
<i>Canada</i>	1		1		2	13 500
<i>Chili</i>			1		1	15 000
<i>Chine</i>	2	1	1		4	29 000
<i>Espagne</i>	1				1	4 000
<i>Etats-Unis</i>	3				3	18 000
<i>Indonésie</i>	1				1	6 000
<i>Iran</i>				1	1	15 000
<i>Pérou</i>	1				1	6 000
<i>Rép. Tchèque</i>	1				1	5 000
<i>Russie</i>		1			1	6 000
<i>Taiwan</i>			1		1	15 000
TOTAL	12	3	4	2	21	163 500

■ EUREKA

EUREKA un instrument au service des laboratoires pour collaborer avec l'industrie

EUROGIA2020, cluster EUREKA pour le développement des technologies de l'énergie bas carbone : son bras armé pour le développement des technologies du sous-sol.

En 5 ans le contexte national et international a beaucoup évolué : l'exercice de la SNR est achevé, le rôle des Alliances est en pleine révision, H2020 est lancé, et des partenariats scientifiques se montent entre acteurs mondiaux de la recherche.

Dans ce monde de la recherche de plus en plus globalisé, la concurrence est internationale, et l'implication des équipes françaises dans la recherche finalisée va s'amplifiant quotidiennement. EUREKA, l'initiative intergouvernementale lancée en 1985 pour compléter le dispositif des instruments de recherche collaborative à l'échelle européenne, est un outil de financement décentralisé (qui s'appuie sur les financements nationaux) pour soutenir des actions de recherche et développement finalisées dans le but de renforcer la compétitivité des entreprises. EUREKA suit une logique totalement « bottom-up », et les projets sont drivés par l'industrie et orientés marché.

EUREKA représente annuellement un budget total opéré de

l'ordre de 1 à 2 Md €, ce qui le place directement derrière H2020 comme source de financement des projets de R&D en Europe. Les projets transnationaux sont tous à forte participation industrielle et coordonnés par un grand groupe ou une PME.

La place de la recherche est néanmoins essentielle et les laboratoires du CNRS y participent de façon active.

Le modèle EUREKA s'exporte bien à l'échelle planétaire puisqu'aujourd'hui 44 pays soutiennent cette initiative (les 28 pays de l'Union Européenne et tous les autres pays de l'Europe géographique y inclus la Turquie et Israël), et le statut de pays associés a déjà permis de faire rentrer dans la famille EUREKA la Corée du Sud, le Canada et l'Afrique du Sud, et prochainement le Chili.

EUREKA se décline en projets individuels (Network Projects), en initiative pour les PME (EUROSTARS) et en Clusters,

lorsqu'un secteur industriel s'est structuré pour animer son propre programme et réaliser une feuille de route promue par l'industrie pour l'industrie et approuvée par EUREKA.

EUROGIA2020 est le Cluster pour l'ensemble du mix énergétique, des ressources primaires aux énergies renouvelables. En 5 ans, le CNRS a été impliqué dans 15 propositions EUROGIA (sur 95 soumises) dont 7 ont été approuvées (sur 35). Ces 7 projets représentent un budget total de près de 40 M€ dont 2,8 M€ pour les 7 labos CNRS concernés.

Terre-Solide est directement intéressé par cet outil de développement des relations avec des partenaires industriels et académiques, en France, en Europe et au-delà, et à ce titre les grands chantiers comme l'Arctique ou ECORD, tout comme les grands thèmes tels que le stockage géologique du CO₂, la production de l'hydrogène, le stockage de l'énergie, la géothermie, etc. sont autant de possibilité de projets de recherche collaborative pour la communauté TS.

Communication Terre Solide

Christiane Grappin (INSU)

■ Les missions

Pour mémoire, la cellule de communication du CNRS-INSU a pour missions de valoriser les résultats de la recherche, l'activité des laboratoires et la politique de l'institut ; d'informer et de renseigner à la demande les services de la direction de la communication du CNRS (DirCom), et de participer aux actions communes de la DirCom. Les cibles (media, public intéressé par les sciences de l'Univers, enseignants du secondaire, « grand public »...), comme les moyens d'action (web, réseaux sociaux, expositions, éditions, manifestations ...), sont multiples. La priorité est donnée à la valorisation des résultats de publications scientifiques et à l'information de la presse et du public intéressé par les sciences de l'Univers par le biais de communiqués de presse (traités par le Bureau de presse du CNRS), de nouvelles traitées par la communication TS, mises en ligne sur le site web du CNRS-INSU (<http://www.insu.cnrs.fr/>) et diffusées par la lettre électronique bimensuelle associée « Les dernières nouvelles de l'INSU ».

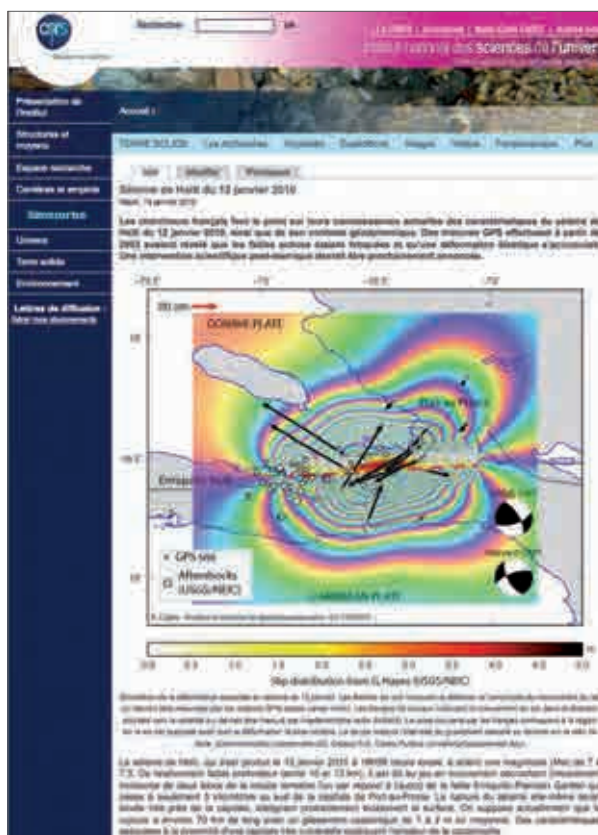
■ Un travail en réseau

La cellule de communication de l'INSU travaille en relation directe avec la direction du CNRS-INSU (DI, DAS, Chargés de mission), les laboratoires, l'ensemble des services de la DirCom (Bureau de presse, CNRS Le Journal, CNRS Images, Pôle événement et actions jeunes), les services de communication des autres Instituts, des délégations régionales, des chargés de communication des laboratoires et des OSU constitués en réseau).

■ Les actualités et communiqué de presse

Entre 2009 et 2014, environ 300 publications ont été traitées par « Les dernières nouvelles de l'INSU » en Terre Solide. En 2014 l'ensemble des actualités Terre Solides représentaient environ 79 000 consultations, l'article « Le séisme au Népal le 25 avril 2015 » a été consulté 9792 fois et on constate que certains articles sont consultés plusieurs années de suite et font référence comme l'article de 2010 sur le séisme de Haïti, cité par Wikipédia en référence. Chaque article est classé et archivé dans une sous thématique du site CNRS-INSU/domaine Terre Solide depuis 2003 <http://www.insu.cnrs.fr/terre-solide>. Les actualités font systématiquement l'objet d'alerte via Twitter,

et certaines sont rediffusées spécifiquement aux journalistes par la lettre du bureau de presse « En direct des labos ». Enfin « Les dernières nouvelles de l'INSU » sont reprises sur plusieurs sites, et systématiquement par le site de Planet-Terre de l'ENS Lyon ; on constate un suivi de la communauté des professeurs de Sciences de la Terre et de la Vie. Le site semble remplir sa mission d'information des enseignants.



■ Communication sur les séismes majeurs

En ce qui concerne l'information spécifique sur les séismes majeurs, une collaboration s'est établie entre la Cellule post-sismique et la communication Terre Solide de l'INSU. La cellule post-sismique informe le CNRS-INSU (DAS et communication) dès qu'un séisme justifiant l'ouverture d'une page sur son site se produit. La décision de donner des informations par le site de l'INSU est pris en commun dans les plus brefs délais. Ces informations sont mises en ligne dès que les spécialistes concernés les ont transmises et sont actualisées dès que nécessaire. Si l'importance de l'événement sismique le justifie, le CNRS-Dircom relaye l'information directement

aux journalistes, au public via CNRS Le Journal en ligne et les réseaux sociaux. Ont ainsi été traités en 2010 les séismes de Haïti, du Chili, de Sumatra Pagai, en 2011 le séisme de Tohoku, en 2012 les séismes de Van, d'Oaxacan, en 2013 les séismes d'Iran et du Sichuan, en 2014 les séismes du Chili et du Népal. (cf. l'entrée Terre Solide/Actualités/séismes sur le site de l'INSU http://www.insu.cnrs.fr/panel_ept_actualite/273).

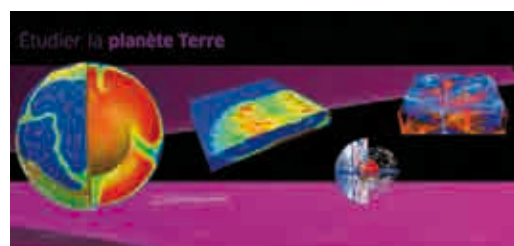
Le domaine Terre Solide du site du CNRS-INSU comporte d'autres rubriques que les «Actualités»: campagnes (principalement l'annonce des campagnes à la mer); livres, images, vidéos, fondamentaux. En 2012 une interview de François Robert a fait l'objet d'une série de 12 petites vidéos sur les météorites, en 2013 une interview de Gauthier Hulot a été réalisée au moment du lancement de la constellation de satellites SWARM. Les plus belles images de sciences sont sélectionnées pour la rubrique «Images». Les connaissances de bases sur la structure de la Terre, la tectonique des plaques, les dorsales océaniques, les zones de subductions, soit «Les fondamentaux», ont été traitées avec la collaboration de spécialistes de chaque domaine. La diminution des postes ne permettra certainement de continuer cette série. (<http://www.insu.cnrs.fr/node/5215>).

■ Actions avec la Direction de la communication et les autres instituts du CNRS

La communication du CNRS-INSU participe à toutes les actions de communication de la direction de la communication du CNRS avec comme partenaire les autres instituts du CNRS. Cela concerne les expositions comme notamment les grandes fresques réalisées pour le couloir de la station de métro Montparnasse dans le cadre d'une collaboration avec la RATP. Terre Solide a ainsi participé à ces actions transversales avec la direction de la communication du CNRS et les autres instituts en 2011, 2012, 2013, 2014, 2015.

En 2014 Terre Solide a également participé à l'année internationale de la cristallographie (AICR), coordonnée par le CNRS-INP, <http://www.cnrs.fr/cristallo/>.

Ces manifestations permettent une rencontre avec un large public, mais ne permettent toute fois pas de faire découvrir l'étendue des avancées en Terre Solide. Pour aller plus loin et compléter l'offre, la communication TS a édité 8 diaporamas/articles de vulgarisation pour l'AICR, (<http://www.cnrs.fr/cristallo/spip.php?article127>) et 3 pour la fresque RATP 2015.



Toujours dans le domaine des expositions, en 2012-2013, la communication TS avait préparé un projet d'exposition «Terre sous écoute», devant montrer les connaissances acquises lors des dernières décennies grâce à l'essor de l'ensemble des systèmes d'observation. Jean Virieux et Michel Diamant en étaient les responsables scientifiques. Le projet avait été



accepté par le Musée des Arts et Métiers qui finalement a fait défection. Le sujet reste néanmoins d'actualité, le scénario pertinent, et le projet peut être repris, notamment dans un schéma moins ambitieux, mais sûrement plus facile à réaliser. La difficulté est l'absence de lieu CNRS pour réaliser de tels projets, d'où l'obligation de rechercher des partenariats avec les musées, qui de fait, privilégient leurs propres projets.

La communication TS collabore à Cnrs Le Journal, au Forum annuel du CNRS « Que reste-t-il à découvrir », aux conférences des Arts et métiers, aux « Petits déjeuners » de l'association



des journalistes scientifiques, aux Journées nationales de l'Association des professeurs de biologie et géologie, en proposant des sujets d'articles ou de conférences (et conférenciers/ières) correspondant aux axes forts de Terre Solide.

■ Formation des chercheurs à la communication

Une formation intitulée « Communiquer vers le grand public et les media en science de l'Univers » a été organisée en 2013, 2014 et 2015 par la Communication de l'INSU, dans le cadre de la formation permanente. Cette formation de 4 jours a bénéficié à une vingtaine de personnes dont 5 provenant de Terre Solide. Ce type de formation, qui implique des travaux dirigés ne peut s'adresser qu'à un petit nombre de personnes lors de chaque séance. Bien qu'elle ait été jugée très utile et efficace par les participants, cette formation a suscité peu d'inscriptions chaque année, notamment en Terre Solide.

Enfin, l'édition, et notamment l'édition des prospectives TS, fait également partie des activités de la communication.

Sigles et acronymes

• AA	Astronomie-astrophysique	• CNFC	Commission Nationale de la Flotte Côtière
• AERES	Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur	• CNFG	Comité national français de géographie
• AFES	Association française pour l'étude des sols	• CNFH	Commission Nationale de la Flotte Hauturière
• AFPS	Association française du génie Parasismique	• CNFs	Commissions Nationales de la Flotte
• ANR	Agence nationale pour la recherche	• CNRS	Centre national de la recherche scientifique
• AO	Appel d'offre	• COMETS	Comité d'éthique scientifique
• APBG	Association des professeurs de biologie et géologie	• COPIL	Comité de pilotage
• AUV	Autonomous Underwater Vehicle	• CPU	Conférence de présidents d'universités
• AVR	Automatique, vision et robotique	• CPU/GPU	Processeurs génériques et coprocesseurs généralisés
• BCSF	Bureau central sismologique français	• CR2P	Centre de recherche sur la paléobiodiversité et les paléoenvironnements
• BDI	Bourse de docteur ingénieur	• CRPG	Centre de recherches pétrographiques et géochimiques
• BGI	Bureau gravimétrique international	• CS	Conseil ou comité scientifique
• BGS	Biogéosciences	• CSNO	Commission des services nationaux d'observation
• BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières	• CSTS	Commission spécialisée Terre Solide
• CC-IN2P3	Centre de calcul de l'Institut de physique nucléaire et de physique des particules	• CVT	Consortium de Valorisation Thématique des Alliances
• CDD	Contrat à durée déterminée	• DAJ	Direction des affaires juridiques
• CE	Commission européenne	• DAS	Directeur adjoint scientifique
• CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives	• DERCI	Direction Europe de la recherche et coopération internationale
• CEREGE	Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement	• DI	Directeur d'institut
• CESSUR	Connaissance et technologie du Sous Sol pour son exploitation et usage durable	• DOM-ROM	Département d'outre-mer , Région d'outre-mer
• CGG	Compagnie générale de géophysique	• DR	Délégué régional
• CLORA	Club des Organismes de Recherche Associés http://www.clora.eu/	• DT	Division technique de l'INSU
• CMT	Core Molding Technologies	• E-BISS	European Business Intelligence Summer School
• CNAP	Comité national des astronomes et physiciens	• ECCSEL	European Carbon Dioxide Capture and Storage Laboratory Infrastructure
• CNES	Centre national d'études spatiales	• ECORD	European Consortium for Ocean Research Drilling
		• EMSO	European Multidisciplinary Seafloor Observatories

• EMPA	Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche	• FEDER	Fonds européen de développement économique régional
• ENKF	Ensemble Kalman filter	• FIB	Focus Ion Beam
• ENS	École normale supérieure	• FIST	France Innovation Scientifique et Transfert
• ENSTA	École nationale supérieure de technique avancée	• FIX03	Fixed-Point Open-Ocean-Observatories
• EOST	École et observatoire des sciences de la Terre	• FOF	Flotte océanographique française
• EPIC	Établissement public à caractère industriel et commercial	• FUI	Fonds unique interministériel
• EPOS	European Plate Observing System	• GDR	Groupement de recherche
• EPOS-RESIF	Réseau sismologique et géodésique français	• GDRI	Groupement de recherche international
• EPST	Établissement public à caractère scientifique et technologique	• GET	Géosciences Environnement Toulouse
• ERANET	Réseau de financeurs publics européens	• GJI	Geophysical Journal International
• ERC	European Research Council	• GM	Géosciences marines
• ERS	European Remote Sensing	• GNSS	Global Navigation Satellite System
• ESA	European Spatial Agency	• GPS	Global positioning system
• ESF	European Science Foundation	• GRAVIMOB	Gravimetry and gradiometry mobile system
• ESFRI	European Strategy Forum on Research Infrastructures	• GRL	Geophysical Research Letters
• ESONET	European Seafloor Observatory Network	• GT	Groupe de travail
• ETH	Eidgenössische Technische Hochschule	• HPC	High Performance Computer
• EUREF	Reference Frame Subcommittee for Europe	• IEED	Institut d'Excellence pour l'Energie Décarbonée, devenu ITE : Institut pour la Transition Energetique
• EUROCORES	European Collaborative Research	• IdGC	Institut des Grilles et du Cloud
• EUROFLEETS	Research Infrastructures project under the 7 th Framework Programme of the European Commission.	• IDPs	Intrusion Detection and Prevention Systems
• EUROGIA	Eureka cluster for low carbon energy technologies	• IDRIS	Institut du développement et des ressources en informatique scientifique
• EUROMARGIN	Programme sur les marges continentales passives	• IFP	Institut français du pétrole
• EUROMINSCI	European Mineral Sciences Initiative	• IFREMER	Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
• EUROSFAIRE	Service français d'accès à l'information sur la recherche en Europe	• IGN	Institut géographique national
• FAME	The French Absorption spectroscopy beamline in Material and Environmental sciences	• IMPMC	Institut de minéralogie et de physique des milieux condensés
		• INEE	Institut écologie et environnement
		• InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar

• INST2I	Institut des sciences et technologies de l'information et de l'ingénierie	• MET	Microscope électronique en transmission
• INSU	Institut national des sciences de l'Univers	• MNHN	Muséum national d'histoire naturelle
• Intermagnet	International Real-time Magnetic Observatory Network	• MOMAR	Monitoring the Mid Atlantic Ridge
• IODP	Integrated Ocean Drilling Program	• MOU	Memorandum of understanding
• IPEV	Institut Paul-Emile Victor	• NASA	National Aeronautics and Space Administration
• IPGP	Institut de physique du globe de paris	• NSBAS	New Small temporal and spatial BASelines
• IR	Ingénieur de recherche	• NSF	National Science Fondation
• IRD	Institut de recherche pour le développement	• OCA	Observatoire de la côte d'azur
• IRIS	Incorporated Research Institutions for Seismology	• OGM	Organismes génétiquement modifiés
• IRSN	Institut de recherche et de sûreté nucléaire	• OMIV	Observatoire multidisciplinaire des instabilités de versants
• ISOTRACE	Analyse des éléments en TRACE et des ISOtopes RAdiogéniques en Sciences de la TERRE	• OMP	Observatoire Midi-Pyrénées
• ISTeP	Institut des Sciences de la Terre de Paris	• OMS	Organisation mondiale de la santé
• IsTerre	Institut des Sciences de la Terre de Grenoble	• OPGC	Observatoire de physique du globe de Clermont Ferrand
• ITA	Ingénieurs, techniciens, administratifs	• ORSEC	Organisation de réponse de Sécurité civile
• ITE	Institut pour la Transition Energétique	• OSU	Observatoire des sciences de l'Univers
• ITN	Innovative Training Networks	• OSUG	Observatoire des sciences de l'Univers de Grenoble
• JCJC	Jeunes Chercheuses et Jeunes Chercheurs	• OVSG	Observatoire volcanologique et sismologique de la Guadeloupe
• KIC	Knowledge and Innovation Communities	• PAMELA	Passive Margin Exploration Laboratories
• KPI	Key Performance Indicator	• PCN	Points de contacts nationaux
• LEFE	Les enveloppes fluide et l'environnement	• PCRD	Programme cadre de recherche et développement
• LPSC	Laboratoire de physique subsonique et cosmologie	• PDA	Personal Digital Assistant
• LRU	Loi relative aux libertés et responsabilités des universités	• PI	Principal Investigator
• MAE	Ministère des affaires étrangères	• PIA	Programme d'Investissements d'Avenir
• MARSITES	Earth Observation in the Marmara Supersite	• PICS	Projet international de coopération scientifique
• MC-ICP-MS	Multi Collector-Inductively Coupled plasma Mass Spectrometry	• PNP	Programme national de planétologie
• MC-ICPMS-HR	Multi Collector-Inductively Coupled plasma Mass Spectrometry – High Resolution	• PPP	Partenariat Public-Privé
• MEDOCC	Méditerranée Occidentale	• PRC	Pôle Régional de Compétences
		• RAP	Réseau accélérométrique permanent

• RENAG	Réseau national GPS permanent	• SNR	Stratégie nationale de recherche
• RENASS	Réseau national de surveillance sismique	• SNRI	Stratégie nationale de recherche et d'innovation
• RESIF	Réseau sismologique et géodésique français	• SO	Service d'observation
• ROV	Remotely Operated Vehicle	• SPV	Service Partenariat Valorisation des Délégations Régionales
• RST	Réunion des sciences de la Terre	• SWARM	Stabilised Weapon And Reconnaissance Mount
• SAR	Synthetic Aperture Radar	• SYSTER	Système Terre
• SARM	Service d'analyse des roches et des minéraux	• TGIR	Très grandes infrastructures de recherche
• SAS	Société par actions simplifiée	• TIMS	Team Information Management System
• SATT	Sociétés d'Accélération du Transfert de Technologies	• TOC	Transition Ocean-Continental
• SEDI	Study of the Earth's Deep Interior,	• TOPO-EUROPE	Topography Evolution in Europe
• SEDIT	Structure, évolution et dynamique de l'intérieur de la Terre	• TS	Terre Solide
• SEM	Standard Error of the Mean	• UMI	Unité mixte internationale
• SHS	Sciences humaines et sociales	• UMR	Unité mixte de recherche
• SIC	Surfaces et interfaces continentales	• UPMC	Université Pierre et Maris Curie
• SIMS	Spectrométrie de masse à ionisation secondaire	• USGS	United State Geological Survey
• SISMER	Système d'Informations Scientifiques pour la Mer	• USR	User (utilisateur)
• SNO	Service nationaux s'observation	• UVSQ	Université Versailles Saint Quentin
• SNOV	Service nationaux s'observation volcanologique	• VUELCO	Volcanic Unrest in Europe and Latin America
		• ZEE	Zones économiques exclusives

Coordination éditoriale

Christiane Grappin

Impression

Imprimé par TPI sur du papier issu de forêts gérées durablement.

Conception

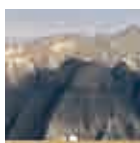
Trait de caractère(s)

Maquette

Page B

Juillet 2016

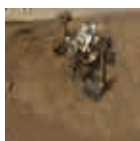
■ Légendes de la mosaïque de couverture



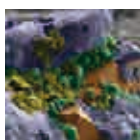
Piémont nord du Thianshan 2012 © S. Dominguez, Géosciences Montpellier.



Structures convectives dans le manteau de la Terre calculées à la période de la Pangée (il y a 200 millions d'années). © N. Coltice, LGL-TPE.



Autoportrait du rover Mars Curiosity de la NASA © NASA/JPL-Caltech/MSSS.



Première détection de traces de vie dans les profondeurs du manteau océanique hydraté © B. Ménéz - IPGP, Univ. Paris Diderot/D. Brunelli - Univ Modena e Reggio Emilia.

prospective

Institut National des Sciences de l'Univers



INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES DE L'UNIVERS
Centre National de la Recherche Scientifique
3, rue Michel-Ange
75794 Paris Cedex 16

<http://www.insu.cnrs.fr>