

I - Argumentaire général pour l'Observatoire de Corinthe

1- Les questions scientifiques de la sismogénèse (développées plus en détail en II pour le cas de Corinthe)

Pour comprendre la mécanique des failles et la dynamique de la sismicité et des couplages sismiques-asismique dans un système de failles, il faut intégrer de manière cohérente une vaste échelle de temps - de la fraction de seconde des microséismes aux 100 kyr des transformations tectoniques majeures- et une vaste échelle d'espace - de métrique pour les plus petites ruptures sismiques à hecto-kilométrique, pour le système de failles majeures - . Il y a donc nécessité de se concentrer sur un même objet - système de failles - et d'y développer une observation rapprochée, continue, long terme, et multidisciplinaire : géodésie, sismologie, géologie, géophysique, géochimie. Plus précisément, il s'agit de cerner le mode de chargement des failles, leur mécanismes d'interaction, la physique des processus transitoires de déformation, incluant glissements lents et essais sismiques, le rôle des fluides, le lien entre petits et grands séismes, et, in fine, pour l'aléa, le rôle de tous ces processus couplés dans la préparation et le déclenchement des grands séismes.

2. Stratégie du choix de la cible d'observation long terme: zone de subduction, ou failles crustales continentale?

2.1 Les zones de subduction

Les études de sismogénèse décrites ci-dessus sont depuis une vingtaine d'années essentiellement développées dans un contexte de subduction (Japon, Cascades, subduction amérindienne), impliquant des dizaines de chercheurs français, avec soit des investissements français importants en terme d'instruments sismologiques et géodésiques installés de manière temporaire, soit des transferts massifs de données via internet, collectées par les réseaux sous responsabilité du pays d'accueil, donc sans forte capacité d'influer sur la géométrie ou la densité des réseaux existants. Mais il est bien reconnu que ces chantiers ont des limites, liées à la grande profondeur des sources sismiques sur l'interplaque, et à l'absence ou l'insuffisance des mesures en mer (positionnement géodésique encore très peu précis et très coûteux, et perte de stabilité spatiale et coût très élevé des réseaux OBS successifs).

2.2 Les failles continentales

Le monitoring de systèmes de failles continentales évite ces écueils, exigeant mais aussi permettant une très forte densité de stations, puisqu'il doit s'adapter à une cible naturelle pour l'essentiel à moins de 15 km de profondeur. De plus, ces études hors zone de subduction sont pertinentes, sinon nécessaires, pour contribuer aux recherches sur ce type d'aléa sismique qui est caractéristique de la France métropolitaine, tant par leurs approches méthodologiques (réseaux denses, processing avancé des données, intégration multiparamètre), que par le caractère générique des processus intraplaques eux-mêmes. En particulier, indépendamment de leur fréquence, les essais sismiques au sein de système de failles continentales partout dans le monde obéissent à des processus mécaniques similaires.

2.3 Une cible en France métropolitaine ?

Bien que les essais sismiques en France soient relativement fréquents sur l'ensemble du territoire (plusieurs par décennie), ils restent rarissimes si on se limite à une zone déterminée de 50km x 50 km requise pour une observation dense, impliquant un système de failles crustales. De plus, la densité de microséismes, même dans les zones les plus actives en France, y est trop faible pour déterminer la structure fine et l'activité des failles d'une telle zone à l'échelle de temps de quelques décennies, et les taux de déformation y sont trop faibles pour espérer contraindre par la géodésie la mécanique de forçage de ces essais sismiques. La France n'est donc pas le lieu adapté pour progresser rapidement sur la compréhension des mécanismes génériques des essais sismiques et des déformations transitoires intersismiques.

Petite incidente à propos du caractère supra-national des objets d'étude scientifiques en Sciences de l'Univers. Les astronomes français ne se posent pas la question du propriétaire de leur objet d'étude, comète, galaxie, trous noir, onde gravitationnelle, ni du caractère français ou non du territoire d'accueil de leurs instruments: ils l'observent à partir de la meilleure position possible. Pour les failles actives, la tectonique nous offre en Europe une opportunité d'observabilité exceptionnelle. C'est en Grèce, dans la partie ouest du rift de Corinthe.

3. Le choix du rift de Corinthe

L'ouest du rift de Corinthe (et le rift de Patras qui en est le prolongement) présente des taux de déformation et de sismicité le plus élevé de toute la zone euro-méditerranéenne, qui permettent de progresser rapidement sur ces sujets: plusieurs séismes par siècle de magnitude entre 6 et 7, sur le site instrumenté de Corinthe (50 x 50 km²), un taux de déformation parmi les plus rapide au monde (10⁻⁶ par an), une activité sismique en essais ayant montré migration de pression de fluide et glissements transitoires, une structuration complexe de failles en interaction, une probabilité de séismes de magnitude dépassant 6 supérieure à 50% dans les trente prochaines années. Les failles crustales observées à Corinthe ont des segmentations de dimensions caractéristiques (5-20 km) similaires à celle du territoire français.

4. Contexte national et international de l'observatoire de Corinthe

Pour la sismologie, le CNRS-INSU finance (via RESIF) un parc de stations mobiles qui partent à l'étranger pour des études essentiellement de structure, pour des durées atteignant 2 à 3 ans, ou en mission postsismique pour des durées de quelques mois. Ces moyens d'observations d'objets hors territoire français ne sont pas adaptés, pour les raisons exposées plus haut, à bien des aspects de la thématique « sismogénèse », bien que ceux-ci intéressent pourtant une partie non négligeable de la communauté. En particulier, de nombreux chercheurs de laboratoire associés au CNRS (IPGP, ENS Paris, GEOAZUR-Nice, EOST, Université de Montpellier, IsTerre, Mines ParisTech, ...), sont impliqués dans ces études à Corinthe, auxquels on peut ajouter l'IRSN pour les intégrations vers l'aléa.

CRL associe depuis 20 ans des chercheurs de nombreux laboratoires étrangers :

- grecs: Université de Patras, Université d'Athènes, NOA, partageant la charge des réseaux de terrain
- et plus marginalement : république Tchèque, Bulgarie, Allemagne (GFZ), Italie (INGV Rome et Milan).

CRL est un « site instrumenté » de l'INSU depuis 2015, et depuis 2017 observatoire de statut international, officiellement reconnu par EPOS comme producteur de données brutes et élaborées, multiparamètres, et ouvertes; c'est de fait le « Near Fault Observatory » (NFO) d'EPOS le plus avancé en Europe.

CRL est reconnu par HELPOS, qui est pour la Grèce l'organisme interface entre le NOA et EPOS. CRL présente un équilibre de stations grecques et françaises, mais il reste pour les grecs – comme pour les français - un réseau de recherche, fondé sur un partenariat international. Le NOA ne le reprendra donc pas en charge dans le réseau national grec de surveillance sismique, lequel présente un maillage bien moins dense (et donc inadapté à ces recherches focalisées).

Pratiquement, la reconnaissance de CRL par EPOS a conduit à la mise à disposition de ses données par RESIF en temps réel, et à la création de bases de données élaborées complémentaires.

5. Contexte budgétaire

- CRL est un chantier européen, impliquant, du point de vue français, un faible coût des missions de maintenance par rapport à des chantiers en Asie ou en Amérique.

- CRL est chantier européen multidisciplinaire, ce qui offre la possibilité de financements EC, pour des projets de recherche et de formation- mais pas pour l'infrastructure de terrain. Cette dernière n'étant pas non plus soutenue par EPOS, elle devrait l'être, au moins pour partie, par les deux instituts nationaux impliqués (CNRS-INSU et NOA). NOA et ses partenaires grecs assurent de leur côté le maintien de leurs stations.

- Le besoin de maintenance (sans jouvence) de l'ensemble des stations sismologiques et géodésiques est estimée en gros à 70 ke par an pour la partie française de CRL, au prorata du nombre d'instruments de CRL (1.5 ke/an/instrument) . Les grecs prennent en charge la maintenance de leur propre équipement. Soutien du CNRS-INSU pour le « site instrumenté » Corinthe : 2015 : 15 ke ; 2016 : 10 ke, 2017 : 0 ke ; 2018 : 8 ke ; 2019 : 5 ke. Jusqu'à présent, la maintenance du côté français (missions, contrôles, réparations, ...) est donc essentiellement financée sur des crédits des équipes (ENS, GEOAZUR, IPGP), souvent sans rapport avec CRL, pour 40 à 50 ke par an. Il n'est pas dans les objectifs de l' ANR de soutenir la maintenance des équipements d'observatoire tels que ceux de CRL.

6. Conclusion

De par sa nature spécifique d'observatoire, CRL a introduit en Europe la première infrastructure de terrain internationale et multidisciplinaire ciblant les processus de sismogénèse. L'observatoire de Corinthe a ainsi produit 23 thèses et 110 articles (sismologie, géodésie, géologie, géochimie, archéologie, histoire, ...) (<https://hal.archives-ouvertes.fr/CRL>) , et celles qui citent la collaboration CRLNET (réseau sismique de CRL) ont produit 23 articles et 6 thèses. Pour les décennies à venir, CRL présente des possibilités d'évolution des réseaux très attractives, offrant un fort terrain de jeu propice aux expérimentations à terre, en forage, et en mer, aux tests de nouvelles méthodologies d'analyse, à la qualification de nouveaux capteurs innovants (fibre optique, ...), et au développement de gros codes de calcul mécaniques 3D intégrant les nombreuses observables à différentes échelles de temps et d'espace. Toutes ces initiatives de recherche à venir devraient pouvoir s'appuyer efficacement sur les réseaux de terrain et les mesures de qualité produits et maintenus par l'observatoire CRL. Clairement, ce dernier offre un très fort potentiel de recherches et de découvertes, même si les grands séismes en préparation peuvent encore se faire attendre quelques décennies.

II - L'Observatoire de Corinthe : découvertes scientifiques, questions et perspectives

Le rift de Corinthe est un site exceptionnel en Europe pour comprendre les interactions entre microsismicité, fluides, et glissements transitoires, et le rôle de ces processus dans la préparation d'un fort séisme, ainsi que les mécanismes d'ouverture d'un rift continental. Ci-dessous, un bref résumé de ce que nous ont montré et appris 20 ans d'observation continue de CRL (2000-2020), renforcées, depuis 1990, par de nombreuses expérimentations temporaires de sismologie, géodésie, et géophysique, et de nombreuses études géologiques. Avec une foison de questions qui en ressortent, génériques, ou spécifiques à Corinthe. Les réseaux d'observation de CRL sont décrits sur le site crlab.eu.

Bilan sur la sismicité : (1), environ 10.000 séismes sont détectés et localisés tous les ans, permettant les études fines de source et de structure listées ci-dessous ; (2), trois séismes de magnitude égale ou supérieur à 5 ont eu lieu au coeur du réseau CRL (2 en 2010 et 1 en 2015) ; (3), trois grands séismes de magnitude > 6 régionaux ont eu lieu à moins de 100 km.

Structuration et mécanismes d'ouverture d'un rift continental

- L'ouverture très rapide du rift occidental, essentiellement asismique et régulière, apparaît sans corrélation temporelle avec les pulsations sismiques des essaims pourtant au coeur de la zone de déformation maximale. Cela reste à expliquer.
- Le détachement de faible pendage nord sur lequel s'enracinent les failles majeures semble connecté – faiblement – à la croûte ductile, mais nous ignorons quel est le mode de déformation principal au centre du rift sous la zone sismogène.
- La sismicité et la géométrie des failles définissent une limite structurale NS découpant tout le rift, qu'il reste à comprendre, peut-être en lien avec le découpage du panneau en subduction à 50 km de profondeur sous le rift.
- Le système de failles du rift occidental s'est accommodé d'une couche géologique fragile, épaisse de 1-2 km, à 6-10 km de profondeur, qu'elle traverse et tronçonne. Nous ignorons sa structure fine, sa rhéologie, et sa dynamique de déformation.
- La micro-sismicité révèle un recoupement entre certaines failles, ce qui devrait aider à comprendre l'historique de leur croissance, de leurs interactions, et, pour certaines, de leur fin d'activité.
- Au nord du rift, des failles aveugles profondes ont été révélées par leurs bouffées microsismiques ou par des séismes modérés ($M=5+$), suggérant des failles relativement immatures et en croissance, et la poursuite de la migration de l'activité long terme du rift vers le nord. Leur potentiel sismogène reste à déterminer.

Sismogénèse et couplage sismiques-asismiques

- La microsismicité en essaims s'active essentiellement dans cette couche, à la racine des failles superficielles, montrant à grande échelle des vitesses de migration plutôt lentes, caractéristiques de diffusion de pression de pore, et à petite échelle des vitesses rapides, caractéristique de glissements transitoires. La plupart des segments de failles surveillés ont été le siège de plusieurs essaims sismiques, de caractéristiques spatio-temporelles variées, ce qui devrait peu à peu nous éclairer sur les mécanismes en jeu et éventuellement leur évolution. CRL est donc un site idéal pour l'analyse de la mécanique générique des essaims.
- La tomographie sismique (avant CRL) montre une zone à faible vitesse, coïncidant avec la source des essaims sismiques, interprétée par une fracturation ou porosité élevée. Le vaste catalogue de sismicité de CRL a permis de lancer récemment de nouvelles tomographies qui devraient largement affiner les modèles. Les éventuelles évolutions temporelles des vitesses sismiques et de la résistivité électrique associés à ces activations restent à être recherchées par des expériences et analyses spécifiques.
- L'analyse fine des familles de multiplets sismiques et des séismes de type « repeaters » montre : (1), une dominance de la persistance des familles sur la partie profonde du détachement, suggérant un chargement continu, et (2) une dominance de familles de courte durée de vie dans les zones d'essaim sismique, suggérant une forte instabilité structurale de la couche géologique impliquée, qu'il reste à quantifier et comprendre.
- La partie superficielles de certaines failles majeures montre du glissement asismique, et un glissement transitoire de 30 minutes (magnitude 5) a été identifié, associé à une crise microsismique associant plusieurs segments de faille. La caractérisation géométrique et mécanique précise de ces surfaces de failles reste à faire, en lien avec la géologie.
- Des failles anciennes, au sud du rift, géologiquement inactives, sont parfois affectées par de fortes crises microsismiques dans leur partie profonde, en lien avec des suppressions de fluide déduites des vitesses de migrations. Leur lien avec les pulsations de pression de pore du rift central reste à évaluer.

Aspérités bloquées et grands séismes

- La structure fine des zones actives révélées progressivement par la sismicité permet de voir apparaître peu à peu des zones silencieuses que nous sommes tentés d'interpréter comme de grosses aspérités bloquées sur certaines segments de failles majeures. La pérennité des observations sismologiques et géodésiques permettra de mieux les cerner, et de détecter d'éventuelles évolutions dans leur activité bordière qui pourraient révéler un début de déstabilisation pouvant conduire à un fort séisme.
- La segmentation des failles favorise des ruptures caractéristiques de séismes de magnitude de l'ordre de 6, mais des calculs numériques et l'analyse de séismes historiques montre un potentiel élevé pour des ruptures impliquant plusieurs segments, conduisant à des magnitudes dépassant largement 6.5.
- Une approche multidisciplinaire de l'aléa, intégrant les informations ci-dessus, a permis d'estimer à 50 % la probabilité d'au moins un séisme de magnitude supérieure à 6 dans les 30 prochaines années dans la zone CRL.