HAL
open science

Rapport d'évaluation du groupe de travail (GT) CNRS-INSU sur le séisme du Teil du 11 novembre 2019 et ses causes possibles

Jean Paul Ampuero, Laurence Audin, Pascal Bernard, Florent Brenguier, Bertrand Delouis, Raphael Grandin, Romain Jolivet, Philippe Hervé Leloup, J.F. Ritz, Jerôme Vergne, et al.

To cite this version:

Jean Paul Ampuero, Laurence Audin, Pascal Bernard, Florent Brenguier, Bertrand Delouis, et al.. Rapport d'évaluation du groupe de travail (GT) CNRS-INSU sur le séisme du Teil du 11 novembre 2019 et ses causes possibles. [Rapport de recherche] Institut National des Sciences de l'Univers. 2019. hal-03080941

HAL Id: hal-03080941

https://hal.science/hal-03080941v1

Submitted on 17 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Rapport d'évaluation du groupe de travail (GT) CNRS-INSU sur le séisme du Teil du 11 novembre 2019 et ses causes possibles

11 décembre 2019

Plan du rapport

Préambule

Résumé des principaux résultats du rapport

I. Contexte du séisme : géologie, tectonique, sismicité instrumentale et historique
II. Caractéristiques du séisme du Teil du 11 novembre considérées comme bien établies
III. Caractéristiques du séisme qui doivent encore être précisées ou confirmées
IV. Questionnement autour du lien potentiel entre la carrière du Teil et le déclenchement ou le déroulement du séisme du 11 novembre 2019 en regard des processus naturels
V. Questionnement au sujet de la profondeur très superficielle du séisme
VI. Discussion sur les conséquences du séisme sur l'aléa sismique futur du secteur
VII. Conclusions – Résumé
VIII. Travaux de recherche à poursuivre ou à entreprendre pour aller plus loin

Annexes

Ce document a été rédigé sous la coordination de Bertrand DELOUIS (Géoazur, Sophia-Antipolis), le groupe de travail et les contributeurs étant, par ordre alphabétique :

AMPUERO Jean-Paul (Géoazur, Sophia-Antipolis), AUDIN Laurence (IsTerre, Grenoble), BERNARD Pascal (IPGP, Paris), BRENGUIER Florent (IsTerre, Grenoble), DELOUIS Bertrand (Géoazur, Sophia-Antipolis), GRANDIN Raphaël (IPGP, Paris), JOLIVET Romain (ENS, Paris), LELOUP Philippe Hervé (Laboratoire de géologie de Lyon), RITZ Jeff (Géosciences Montpellier), VERGNE Jérôme (EOST, Strasbourg), VERNANT Philippe (Géosciences Montpellier), VOISIN Christophe (IsTerre, Grenoble)

Préambule

La mise en place du groupe de travail (GT) correspond à une auto saisine du CNRS afin de faire un point sur ce que la recherche fondamentale et ses outils peuvent apporter comme éclairage sur ce séisme et ses causes possibles.

Le GT n'a pas pour mandat de donner un avis sur la reprise d'activité de la carrière du Teil (ou toute autre carrière ou activité industrielle), ni sur ses modalités. Statuer sur les modalités de reprise d'activité de la carrière revient aux services de l'Etat compétents, qui se baseront sur un ensemble d'informations plus vaste dont notre analyse n'est qu'un élément parmi d'autres.

Le GT n'est pas mandaté non plus pour évaluer les conséquences du séisme du 11 novembre 2019 en termes de risque sismique sur les sites des centrales nucléaires, cet aspect étant du ressort de l'IRSN.

Sur demande du GT l'entreprise LafargeHolcim a fourni par l'intermédiaire de la DREAL un certain nombre de documents confidentiels qui apportent certaines précisions sur des points d'analyse du GT.

Lorsque nous faisons référence au « séisme du 11 novembre », ou même simplement au « séisme », sans plus de précision, dans le rapport, il s'agit du séisme principal de magnitude 5 qui s'est produit le 11 novembre 2019 à 11h52 heure française (10h52 en temps universel).

Note : dans ce rapport nous utilisons la notation internationale (anglo-saxonne) pour les abréviations de direction. Par exemple NE-SW pour nord-est – sud-ouest.

Résumé des principaux résultats du rapport

C1. La rupture du séisme du 11 novembre 2019 s'est produite à très faible profondeur, essentiellement à moins de 1000 m, avec un mouvement de type inverse sur un plan de faille orienté NE-SW incliné vers le SE. L'extension latérale de la rupture est d'un peu plus de 4 km, localisée entre Le Teil et Saint-Thomé. L'ampleur du glissement cosismique (mouvement de faille lors du séisme) atteint par endroit 20 à 30 cm d'amplitude.

C2 : Etant données ses caractéristiques, notamment sa magnitude, le séisme du 11 novembre 2019 s'est nécessairement produit sur une faille géologique préexistante, de dimension plurikilométrique.

C3. Le contexte tectonique est favorable pour l'occurrence d'un séisme sur une faille NE-SW avec un jeu inverse, tel que celui qui s'est produit le 11 novembre 2019. Il existe dans le secteur un faisceau de failles d'orientation NE-SW, à pendage vers le SE, dans un régime tectonique actuel caractérisé par une compression horizontale NW-SE compatible avec leur jeu inverse. Parmi les failles connues du secteur, la faille de la Rouvière est celle qui est le plus vraisemblablement responsable du séisme. Elle a la bonne orientation (NE-SW), son pendage est vers le SE, et sa trace cartographiée en surface est très proche, à quelques dizaines de mètres près, des ruptures en surfaces produites par le séisme.

C4. La sismicité instrumentale dans le secteur est faible à modérée, mais pas inexistante. Il n'y a pas de séisme historique qui puisse être associé à la faille responsable du séisme du 11 novembre 2019, mais la période de récurrence de tels événements peut être supérieure à la période historique documentée. Des séismes historiques associés à des destructions sont néanmoins répertoriés à proximité du Tricastin, 20-30 km plus au SE.

C5. Le séisme du 11 novembre 2019, de magnitude 5, est associé à un nombre inhabituellement faible de répliques. Il est possible que la nature particulière des terrains dans les premiers 2000 m de la croûte terrestre puisse expliquer cette anomalie, avec une couche marneuse épaisse permettant une relaxation des contraintes, mais cela reste à étudier.

C6. L'épicentre (position géographique) du séisme n'est à ce stade pas encore déterminé avec une précision suffisante (< 1 km) pour pouvoir en déduire si la rupture a démarré dans sa partie SW, NE, ou centrale. Concernant la directivité de la rupture, c'est-à-dire sa direction de propagation sur la faille, les analyses donnent des résultats encore provisoires et trop divergents pour conclure. Certaines données placent néanmoins l'épicentre très proche, voire à l'intérieur, de la carrière du Teil.

C7. L'effet, sur la faille responsable du séisme du 11 novembre 2019, de l'extraction de roche en surface au niveau de la carrière du Teil au cours des dernières décennies, a été modélisé. L'effet reproduit, correspondant à une perturbation (ou changement) de contrainte (de Coulomb) agissant sur la faille située à peu près 1 km plus bas, est dans le sens de favoriser le mouvement inverse sur la faille, donc dans le sens de son mouvement lors du séisme. L'ampleur de la perturbation de contrainte calculée est supérieure aux valeurs reportées avoir été suffisantes pour déclencher des séismes dans divers contextes. Il est par conséquent plausible que la présence de la carrière ait pu aider au déclenchement du séisme, ou ait facilité le développement d'une partie de la rupture sismique, celle qui est la plus proche de la carrière. Par contre, l'ampleur de la chute de contrainte cisaillante calculée pour le séisme est bien supérieure au changement de contrainte cisaillante induit par la présence de la carrière, ce qui implique que le chargement tectonique de la faille est prédominant et constitue le facteur principal contrôlant le séisme. La zone de glissement cosismique principale sur la faille, située dans la partie SW de la rupture, est assez clairement en dehors de la zone d'influence de la carrière, et son chargement en contrainte devrait pouvoir être expliqué par un chargement d'origine naturelle (notamment tectonique) sans contribution de la carrière.

C8. Même si cela ne peut pas être complètement exclu, il est peu probable que le séisme du 11 novembre 2019 puisse être relié à l'effet d'un tir de carrière en particulier. En revanche, il est envisageable que l'effet des perturbations de contraintes dynamiques (c'est-à-dire liées au passage de ondes sismiques) générées par les tirs de carrière répétés sur des décennies puisse produire un affaiblissement progressif de la faille en profondeur, ce qui, combiné aux contraintes tectoniques, et éventuellement à l'effet de l'extraction de roche mentionnée au point précédent, aurait pu faciliter l'occurrence du séisme. Cet aspect, à la pointe de la recherche, devrait faire l'objet de recherches spécifiques, le groupe de travail ne peut pas à ce stade produire d'évaluation de son impact.

C9. Le séisme présente des caractéristiques qui en font un séisme particulièrement superficiel étant donné sa magnitude assez élevée (M5). Toutefois, à ce stade, ce caractère ne peut pas être clairement considéré comme exceptionnel, au regard d'autres cas de sismicité également très superficielle notamment en France, et à proximité immédiate (essaims sismiques proche du Tricastin).

C10. Nous ne faisons qu'aborder la délicate question de la possibilité du déclenchement d'un séisme de taille similaire, voire plus grande, sur la même faille ou sur les failles voisines. Si l'on excepte les zones de la faille qui ont fortement glissé lors du séisme du 11 novembre 2019, il est envisageable que la redistribution des contraintes après le séisme favorise (avance, anticipe) le déclenchement d'un nouveau séisme sur les segments adjacents de la faille de la Rouvière ou sur les failles voisines, comme cela se produit assez fréquemment à l'échelle mondiale. Toutefois, le nombre très réduit de répliques pourrait signifier que les contraintes redistribuées ont été relâchées par d'autres processus non sismiques. De plus, la méconnaissance de l'état de chargement tectonique des segments de faille voisins ne nous permet pas de conduire à ce stade une évaluation plus quantifiée.

C11. Le rôle des fluides, dans le cas présent de l'eau, sur le déclenchement ou le déroulement du séisme n'a pas pu faire l'objet d'analyses très développées à ce stade. Les données disponibles sont trop parcellaires et le groupe de travail n'a pas pu intégrer de spécialiste du sujet. Des modélisations préliminaires, transmises au groupe par des équipes extérieures, tendent à monter que les infiltrations d'eau liées au fortes précipitations durant les semaines qui ont précédé le séisme n'auraient pas pu influer significativement sur la rupture sismique.

I. Contexte du séisme : géologie, tectonique, sismicité instrumentale et historique

I.1 Contexte géologique et tectonique : un contexte tectonique favorable pour un séisme en faille inverse sur une ancienne faille normale NE-SW à pendage SE

Ce point de contexte résulte de l'analyse de documents déjà publiés (Carte géologique au 1/50 000 [Elmi et al., 1996], littérature scientifique). De nouvelles investigations de terrain seront nécessaires pour préciser le contexte géologique.

Contexte régional

Le secteur où s'est produit le séisme du Teil est situé à la limite du massif central, des Alpes, et de la Provence (**Figure CG1**). Son histoire géologique est marquée par au moins quatre phases de déformations majeures depuis 200 millions d'années (Ma) responsables de la création et réactivation de nombreuses failles, et autres structures de plissement.

L'avant dernière phase de déformation est une extension horizontale qui a créé des failles à jeu normal il y a environ 30 millions d'années (Oligocène). La dernière phase de déformation est, elle, en compression horizontale depuis ~20Ma et réactiverait en jeu inverse (**Figure CS1**) les failles plus anciennes. Peu d'arguments géologiques sont disponibles pour dater précisément le début et la fin éventuelle de cette phase compressive mais il s'agit : a) de la dernière phase tectonique répertoriée dans la zone, b) sa direction de compression NW-SE est compatible avec celle de la compression horizontale maximale actuelle (N140) mesurée à Boussenac, 36 km au nord de La Rouvière (**Figure CG1**) [World Stress data base, 2016 – wsm 00609 site FR14].

Contexte local

Les images satellitaires d'interférométrie RADAR (InSAR) révèlent une zone de rupture le long d'une faille répertoriée sur la carte géologique d'Aubenas comme la faille de la Rouvière (**Figures CG2, CG3, et CG4**) – voir **section I.2**). Cette faille d'orientation NE-SW fait partie du système de failles de St Thomé-La Rouvière situé dans le faisceau de failles des Cévennes qui marque la bordure Sud Est du massif central sur près de 150 km de long (**Figure CG1**).

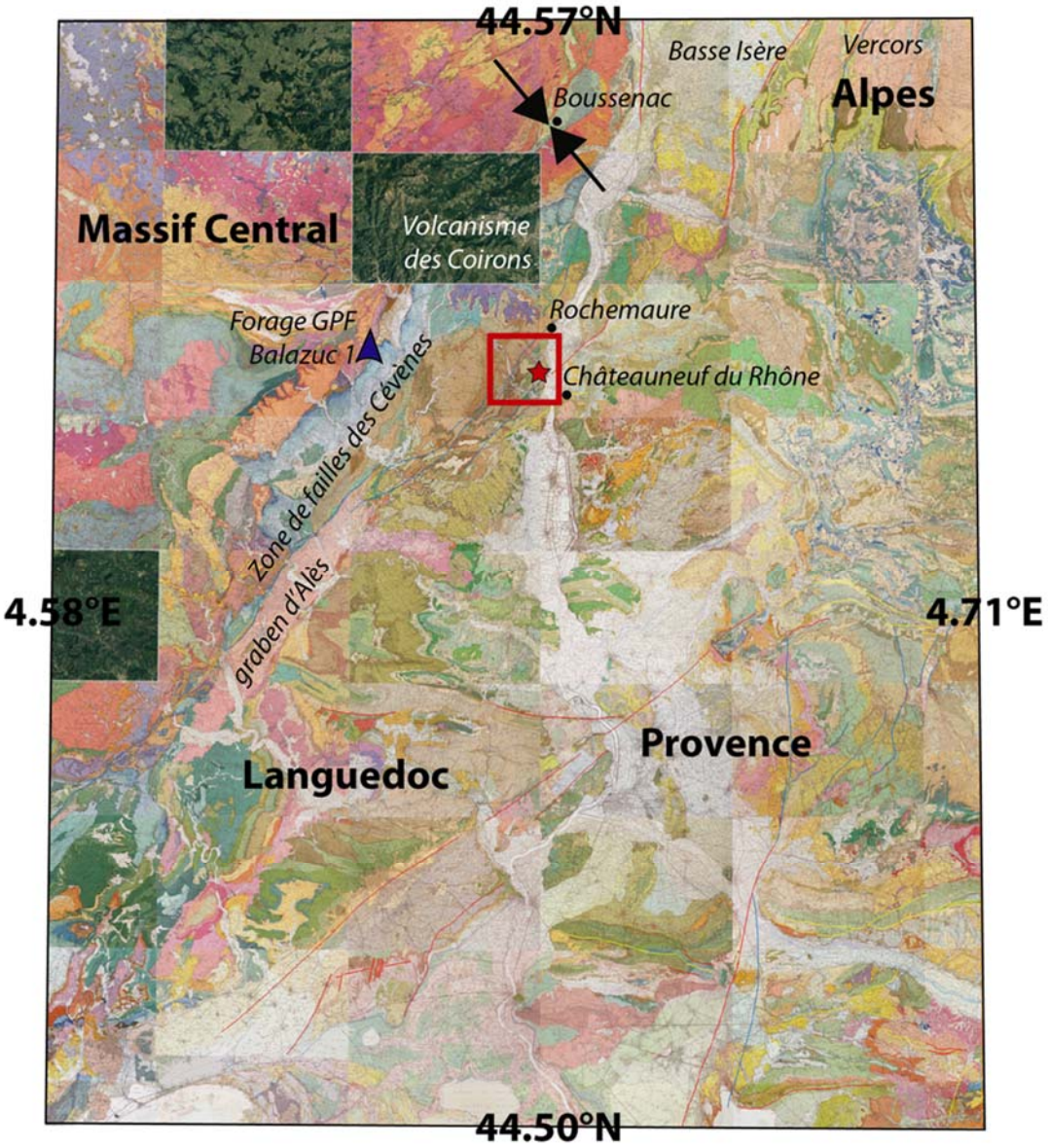


Figure CG1. Contexte géologique Régional. Fond : assemblage des cartes géologiques BRGM de la France au 1/50000. L'étoile rouge représente l'épicentre du tremblement de terre du Teil (11/11/2019). Le cadre rouge correspond à la **Figure CG2**. Sont localisés les éléments discutés dans le texte, notamment la direction de la contrainte horizontale compressive mesurée à Boussenac (flèches noires). Le tracé des failles potentiellement actives [Jomard et al., 2017] est superposé à la carte géologique : rouge – failles quaternaires, orange – failles syn-post Pliocène, jaune failles syn-post Miocène inférieur., bleu – failles d'âge indéterminé.

La faille de la Rouvière a une direction N030 à N050 (**Figure CG2**). Elle est cartographiée comme une faille d'environ 8 km de long à pendage raide vers le SE [Elmi et al., 1996] (**Figure CG3**). Au sud, elle est recoupée par la faille de Valgayette. Sa partie nord est plus complexe : elle est recoupée perpendiculairement par de petites failles NW-SE et converge avec la faille de Bayne-Roche Renard (**Figure CG2**).

La faille de la Rouvière ne figurait pas dans la base de données des failles potentiellement actives en France publiée en 2017 [BDFA, Jomard et al., 2017]. Elle apparait cependant encadrée au NW par la faille de St Rémèze (un des segments de la faille des Cévennes) et au SE par la faille de Marsanne, toutes les deux répertoriées dans cette même base de données [BDFA, Jomard et al., 2017] (**Figure**

CG2). Ces deux failles, parallèles, et de direction NE-SW sont situées à 2.5 km de part et d'autre de la faille de la Rouvière. A noter que le segment central de la faille de Marsanne est indiqué comme étant actif au Quaternaire sur la base d'un alignement géographique de microséismes instrumentaux.

Des structures tectoniques compressives plissées (anticlinal de Serre de Part et synclinal de Couijanet) parallèles à la faille de la Rouvière (direction N45) (**Figures CG2** et **CG3**) confirmeraient un épisode de compression NW-SE perpendiculaire à la faille de la Rouvière (post Oligocène, donc relativement récent).

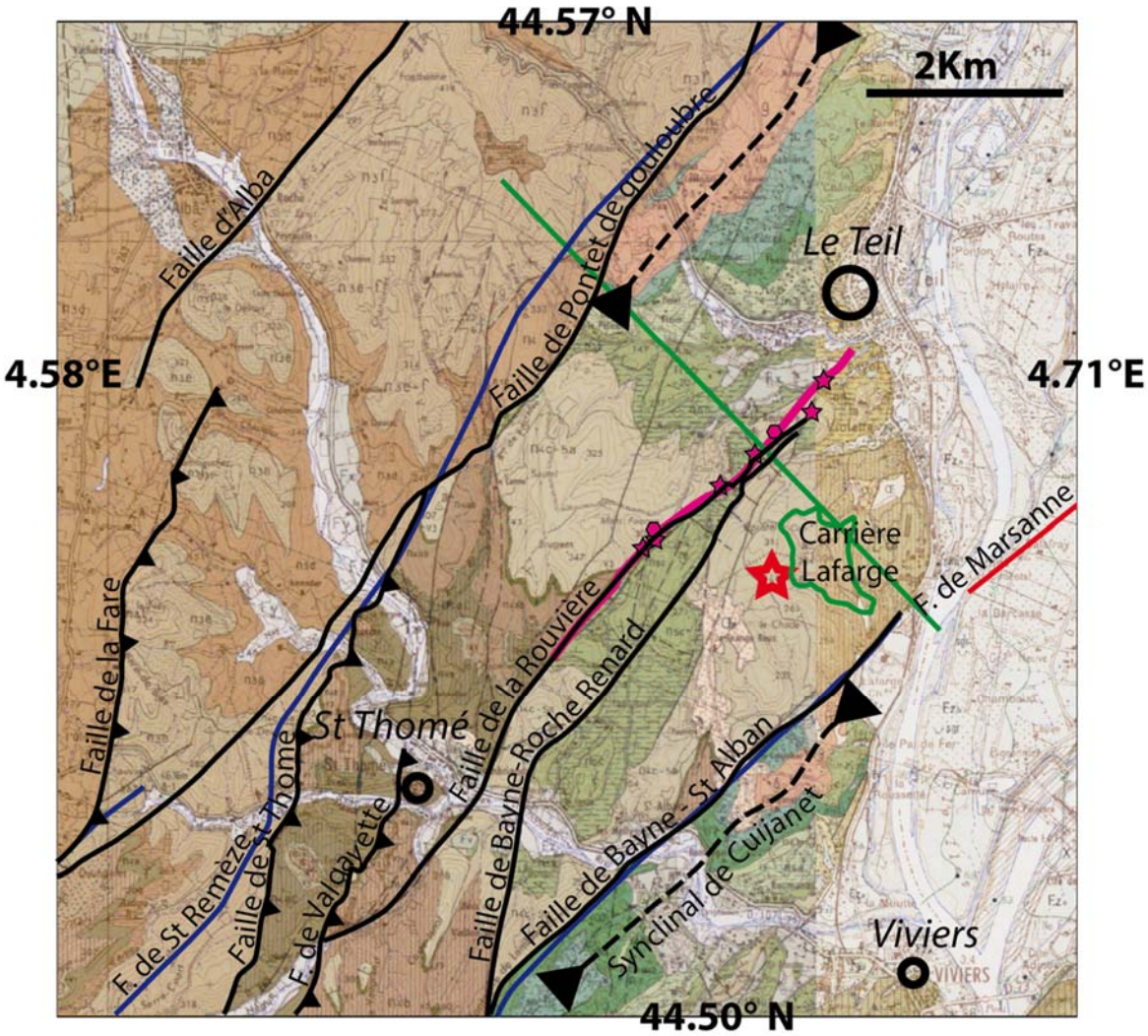


Figure CG2. Contexte géologique Local. Fond : assemblage des cartes géologiques BRGM de Aubenas et Montélimar au 1/50000. Certaines failles géologiques ont été soulignées en noir et leur nom indiqué. Les failles bleues et rouges sont tirées de la base de données de failles potentiellement actives [Jomard, 2017]. L'étoile rouge représente l'épicentre du tremblement de terre du Teil (11/11/2019) tel que défini sur la **Figure CS5** de la **section II** (il reste une incertitude sur sa localisation précise). La zone de rupture détectée par InSAR est la ligne magenta, les évidences de rupture observées sont les étoiles et les plans de failles anciens les polygones. Le trait vert correspond à la coupe géologique de la **Figure CG3**. La partie

active de la carrière Lafarge du Teil est entourée en vert.

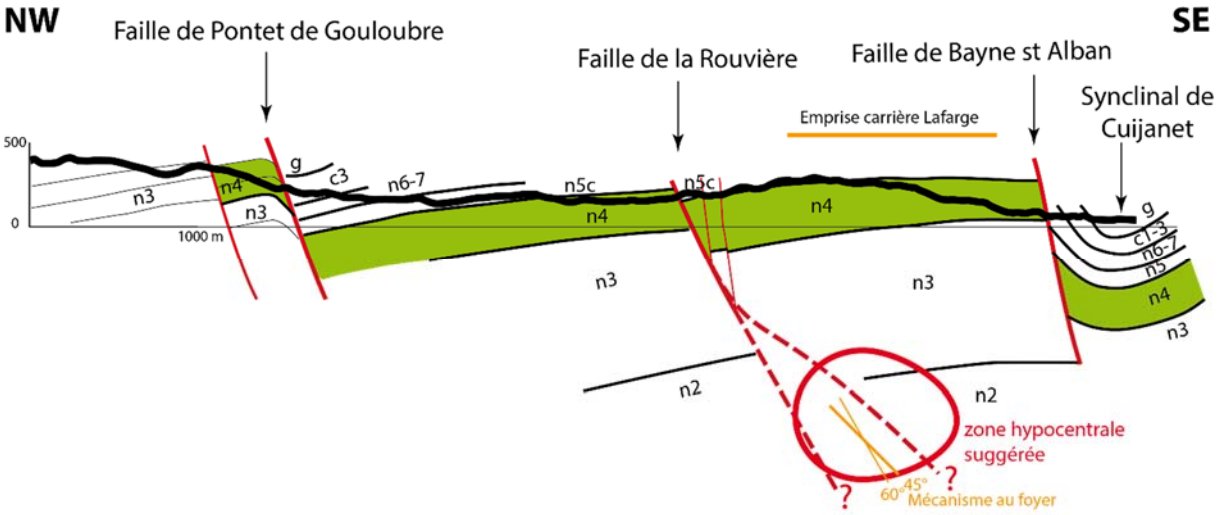


Figure CG3. Coupe géologique schématique perpendiculaire à la faille de la Rouvière. Les informations sont projetées depuis 1 km de part et d'autre du trait de coupe localisé sur la **Figure CG2**. Les incertitudes sont grandes en raison de l'absence de mesures de pendage et de possibles grandes variations d'épaisseur des calcaires Urgoniens (représentés en vert) qui font l'objet de l'exploitation dans la carrière Lafarge. Les niveaux n3 et n2 sont des niveaux épais (près de 2000 m en tout) de marnes. La zone hypocentrale cerclée de rouge est suggérée en compatibilité avec un foyer localisé entre 1 et 1.5 km de profondeur comme discuté en **section II**. Elle se situe à l'intérieur des marnes Hauteriviennes (n3) et Valanginiennes (n2). Les tracés de la faille en profondeur en tirets rouges ont des pendages de 45 et 60° correspondant à l'intervalle de pendage probable de la faille à la source déduit des différentes solutions pour le mécanisme au foyer (Annexe 1). Coupe P.H. Leloup d'après la carte géologique Aubenas (Elmi et al., 1996).

Du point de vue morpho-structural, le système de failles de St Thomé-La Rouvière marque la morphologie sous la forme d'une « fabrique » d'orientation NE-SW imprimée dans le paysage (**Figure CG4**). Celle-ci est liée à l'érosion différentielle des formations géologiques et structures en présence. Cette « fabrique » est largement soulignée également par l'activité anthropique qui souligne l'orientation NW-SE des versants du fait de la présence de nombreuses « restanques » (terrasses anthropiques anciennes ou modernes édifiées pour les cultures).

I.2. Données d'observations post- séisme du Teil :

<u>Cartographie des ruptures de surfaces associées au séisme du Teil (11 Novembre 2019, magnitude 5)</u>

Au total, plus d'une 20aine d'indices de ruptures de surface ont été observés ponctuellement. Ils sont distribués sur une longueur d'environ 4,5 km le long de la discontinuité repérée géographiquement par l'InSAR (**Figure CG4**). Certains de ces indices ont pu être scannés avec un laser pour quantifier avec précision la déformation du sol. Les premières analyses montrent que ces ruptures de surface (petites failles inverses, plis, fissures) sont cohérentes avec le mécanisme en faille inverse à pendage SE déduit des données sismologiques et interférométriques (**Figure CG5**). L'estimation de la composante verticale du déplacement – lorsqu'elle est possible – est comprise entre 5 et 10 cm avec le compartiment SE chevauchant le compartiment NW. Il semble que la déformation soit plus importante au SW qu'au NE.

Figure CG4 *: Tracés sur fond Google Earth de la faille de la Rouvière (en mauve, d'après la carte géologique 1/50000), de la faille de St Remèze (segment de la faille des Cévennes - en bleu), de la faille de Marsanne (en bleu et rouge), et des principaux indices de ruptures de surfaces associés au séisme du Teil du 11-11-2019 (épingles jaunes ; le trait jaune relie les indices entre eux).*

En parallèle de la cartographie de terrain, deux campagnes de survols LiDAR en hélicoptère d'une part, et avec drone d'autre part, ont été réalisées, et sont en cours d'analyse. L'objectif étant d'analyser si la rupture liée au séisme peut être cartographiée sous le couvert végétal, qui masque une grande partie de la zone de rupture d'un point de vue optique simple.

Figure CG5 : Deux exemples d'indices de ruptures de surface associés au seisme du Teil du 11-11-2019 cartographiés par l'équipe tectonique active (J-F Ritz, S. Baize, M. Ferry, C. Larroque et L. Audin): [en haut] plis et fissures en échelons affectant la route (ph. J-F Ritz) ; [en bas à gauche] : détails de l'indice présenté en haut, montrant le plissement de la chaussée et son soulèvement dans la partie SE coté boussole (ph. J-F Ritz) ; [en bas à droite] : chemin de terre recoupé par la rupture avec soulèvement de la partie SE où se trouve la personne (ph. S. Baize).

Analyse des données structurales locales

Des évidences spectaculaires de plans de faille hérités (sites LT05 et LT11) sont alignées le long de la faille de la Rouvière (polygones magenta sur **Figure CG2**). A noter, que ces plans anciens, se trouvent situés entre 30 et 100 m vers le NE, systématiquement plus hauts en altitude par rapport aux ruptures de surface et à la trace InSAR et ne montrent pas de traces de réactivation en surface lors du séisme. Au sites LT05 et LT11, les failles longues de trente à quarante mètres montrent des directions compatibles de N40°E environ (**Figure CG6**), correspondant à la faille normale, et donc en partie décrochante sénestre, Oligocène de la Rouvière. Si cette faille a été réactivée en faille inverse c'est uniquement dans sa partie plus profonde, vraisemblablement à partir de 200 m de profondeur.

Figure CG6 : Evidences de plans de faille anciens. Le plan de gauche montre clairement des stries qui indiquent la direction du mouvement (Oligocène ?). Ph P. H. Leloup.

I.3. Conclusions préliminaires sur le contexte géologique et tectonique

D'après les données géologiques disponibles et les données de ruptures de surfaces observées, le séisme du Teil du 11 Novembre 2019 correspondrait à la réactivation en faille inverse d'une ancienne faille normale–sénestre d'âge Oligocène d'orientation NE-SW. Dans le détail la géométrie précise de la faille qui a été réactivée lors du séisme, ainsi que celles des autres failles alentours restent à préciser, cependant la faille activée semble raide avec un pendage partout supérieur à 45°. L'hypocentre du séisme semble être localisé dans une épaisse formation marneuse située sous les calcaires urgoniens.

I.4. Contexte de déformation dans la région – Apport du GNSS (Global Navigation Satellite System)

Les derniers résultats basés sur le réseau le plus complet de stations GNSS incluant les stations académiques (RENAG), de l'IGN (RGP) et des réseaux privés (Terria, SatInfo, Orphéon) permettent de calculer les directions de déformations principales observées au minimum sur les dix dernières années. Ces résultats publiés récemment (Masson et al., 2019) indiquent dans la région du séisme environ 1 ± 0.4 nanostrain/an en compression avec une direction N110˚ (**Figure CG7**). S'il est impossible de dire sur quelle faille cette déformation se concentre, on peut néanmoins dire que le raccourcissement est

à peu près perpendiculaire au faisceau de failles comprenant celle responsable du séisme, et qu'il est d'environ 0.1 mm/an. Il faudra toutefois affiner cette estimation pour le secteur limité de la faille responsable du séisme de 11 novembre et des failles voisines. Il est impossible d'estimer la part de ce raccourcissement qui est accumulée sous forme de contraintes élastiques pouvant conduire à un séisme, cependant, à ce jour, toutes les failles étudiées dans le monde montrent à minima qu'une petite partie du chargement est accumulée. Par conséquent, les données GNSS suggèrent que des contraintes s'accumulent régulièrement dans la région et qu'il est inévitable qu'elles soient relâchées de temps à autre sous forme de séisme. Ces observations sont cohérentes avec la mesure d'ovalisation de forage à Boussenac citée plus haut qui montre une orientation de raccourcissement horizontal maximal N140˚ (Cox, 1983).

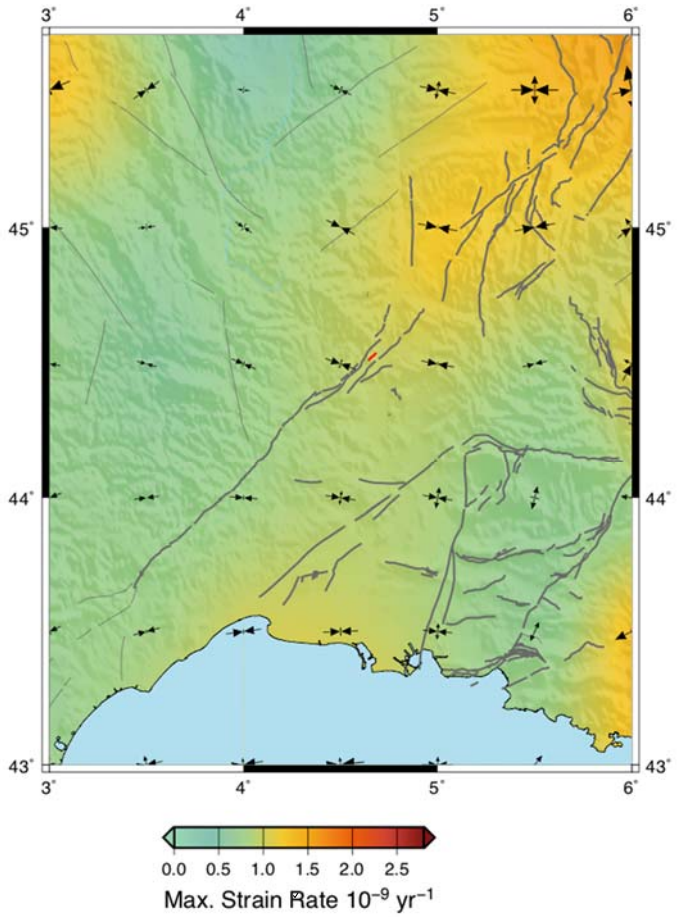


Figure CG7 : Taux de déformation lissés sur une grille de 0.1˚, les tenseurs des taux de déformation sont dessinés tous les 0.5˚. Les incertitudes à 95% de confiance sont de l'ordre de 0.4 nanostrain/an dans la région (Masson et al., 2019). La rupture du séisme du 11 novembre 2019 est indiquée en rouge, les failles potentiellement actives (Jomard, 2017) en gris.

I.5. Sismicité instrumentale et historique

Sismicité instrumentale

Les **Figures CG8** à **CG10** présentent les évènements sismiques localisés dans un rayon de 60km centré sur l'épicentre du séisme du 11/11/2019 et issus du catalogue du BCSF-RéNaSS (renass.unistra.fr). Ce catalogue couvre la période du 03/03/1981 au 10/11/2019 pour les évènements qualifiés de "séismes" ("earthquake") et du 01/10/2013 au 10/11/2019 pour les évènements qualifiés de "tirs de carrière" ("quarry blast").

L'activité sismique dans la région peut être qualifiée de faible à modérée. Durant les ~40 dernières années, un seul séisme de magnitude supérieure à 4 avait été enregistré (Le 03/08/2011 à 3.5km au Nord de Barjac-Gard) et deux séismes de magnitude comprise entre 3 et 4. La magnitude de complétude du catalogue (magnitude à partir de la laquelle le catalogue peut être considéré comme complet) est de Mlv ~2.1 (**Figure CG10**) mais celle-ci a évolué sur la période considéré du fait de l'évolution des réseaux sismologiques. Cette magnitude de complétude est plus basse à partir de 2018 du fait de la densification des réseaux permanents et temporaires (expérience AlpArray) ce qui peut expliquer l'augmentation du nombre de séismes et de tirs de carrière de magnitude inférieure à 2 sur la période 2018-2019 (**Figure CG9**). Les archives de la carrière Lafarge du Teil ne montrent pas une telle augmentation du nombre de tirs.

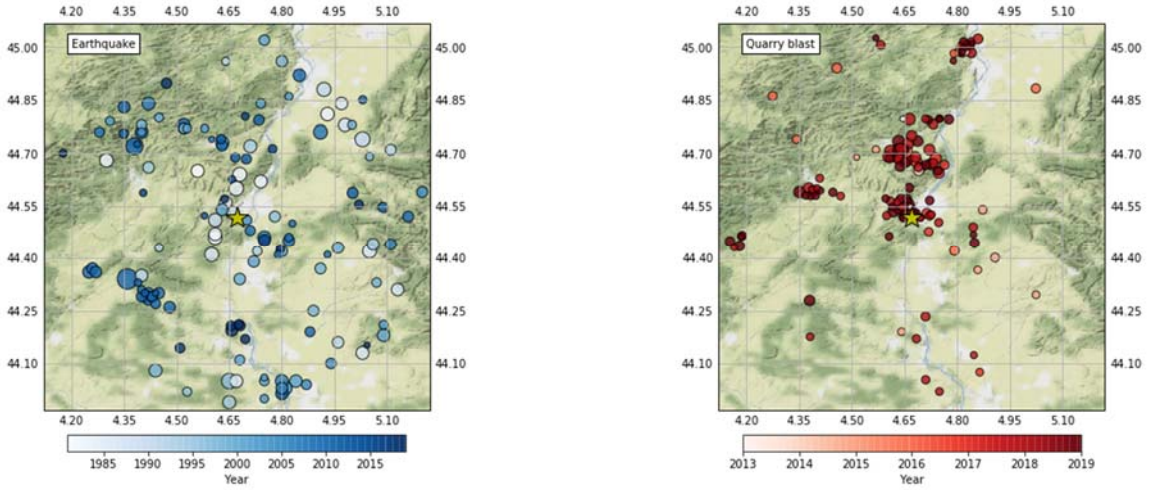


Figure CG8 : Evènements sismiques localisés dans un rayon de 60km de l'épicentre du séisme du 11/11/2019 (étoile jaune) sur la période 03/03/1981 - 10/11/2019 et issus du catalogue du BCSF-RéNaSS (renass.unsitra.fr). A gauche les évènements qualifiés de "séismes" et à droite les évènements qualifiés de "tirs de carrière" depuis 2013 (date du début de la classification dans le catalogue BCSF-RéNaSS). La taille des cercles est proportionnelle à la magnitude et la couleur est fonction de la date d'occurrence

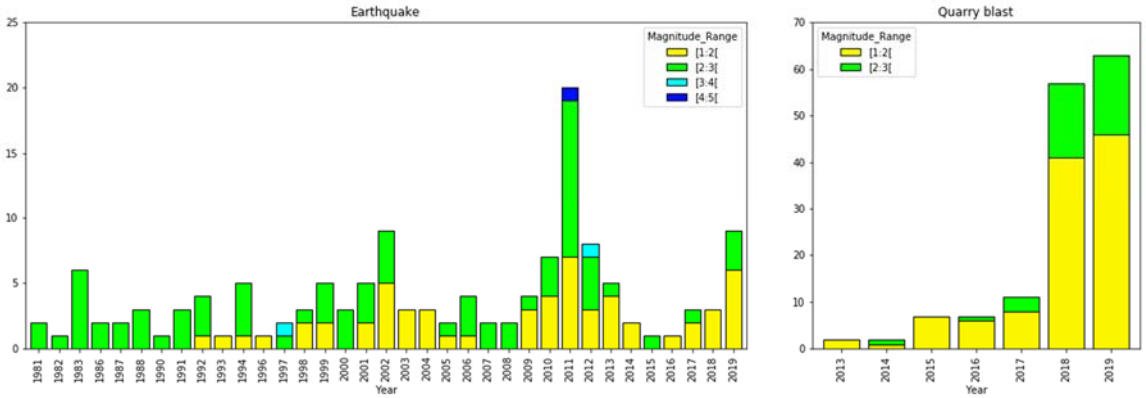


Figure CG9 : Evolution du nombre d'évènements sismiques localisés dans un rayon de 60km de l'épicentre du séisme du 11/11/2019 sur la période 03/03/1981 - 10/11/2019 et issus du catalogue du BCSF-RéNaSS (renass.unsitra.fr). A gauche les évènements qualifiés de "séismes" et à droite les évènements qualifiés de "tirs de carrière" depuis 2013 (date du début de la classification dans le catalogue BCSF-RéNaSS).

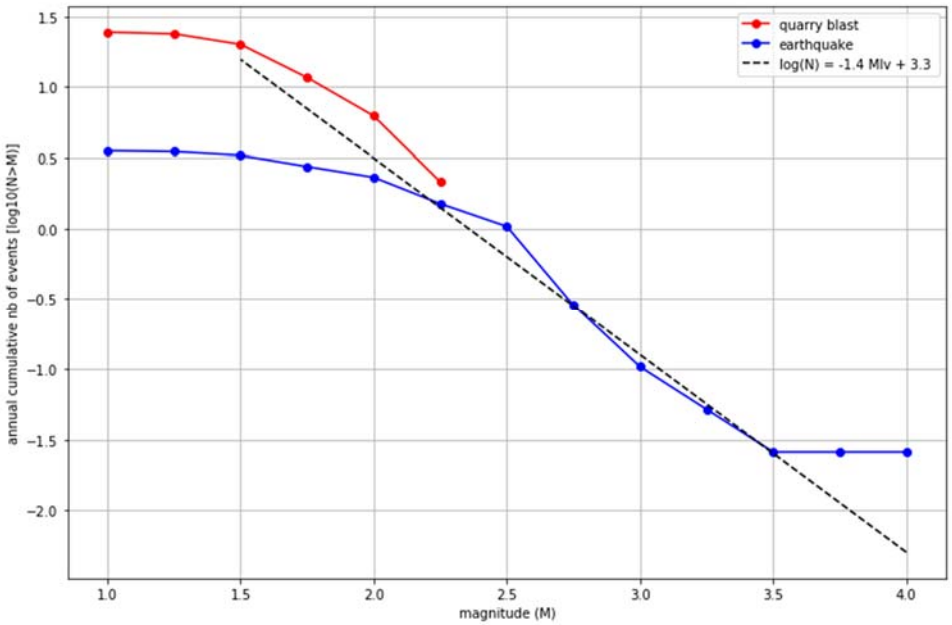


Figure CG10 : Distribution de type Gutenberg-Richter du nombre annuel de séismes (bleu) et de tirs de carrière (rouge) dans un rayon de 60km de l'épicentre du séisme du 11/11/2019 et issus du catalogue du BCSF-RéNaSS (renass.unsitra.fr. Pour les séismes, la période considérée est 03/03/1981 - 10/11/2019 ; pour les tirs de carrières 01/10/2013-10/11/2019. La droite pointillée noire est une régression linéaire pour les séismes uniquement et sur la gamme de magnitude [2, 3.5].

Sismicité historique

D'après la base de données historiques Sisfrance (BRGM, EDF, IRSN), aucun séisme notable n'avait jusqu'à présent été ressenti ou localisé à proximité de ce système de failles. Par contre, une vingtaine de kilomètres plus au sud-est, une zone sismique très localisée est bien individualisée. Il s'agit de la zone du Tricastin, caractérisée par plusieurs secousses d'intensité VII à VIII (séisme du 23/01/1773 et ceux du 19/07 et du 08/08 1873), et plus récemment l'essaim de 1933-1936 culminant avec une intensité VII en 1934 (Thouvenot et al., 2009). L'alignement apparent des épicentres de ces évènements historiques et celui du séisme du Teil (Figure CG11) ne correspond pas à l'orientation des failles connues dans la région, et est à mettre en perspective des incertitudes de localisation des séismes historiques (qui précédent l'existence de données sismologiques instrumentales modernes).

La zone est classée au niveau 3/5 risque « modéré » dans le zonage sismique de la France entré en vigueur le 1er mai 2011.

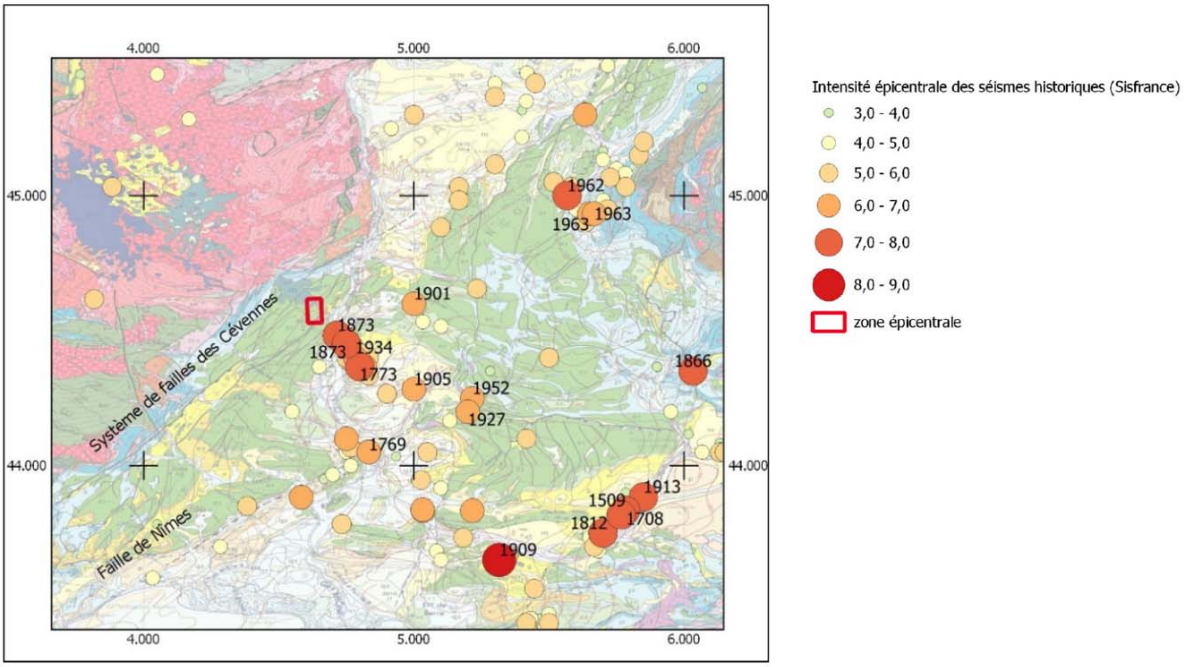


Figure CG11. Carte des épicentres de séismes historiques (extrait de la base Sisfrance) et localisation de la zone épicentrale du séisme du 11/11/2019 sur fond géologique au 1/1 000 000 (Chantraine et al., 2006). D'après communiqué commun du BRGM et CNRS, https://www.brgm.fr/sites/default/files/20191114_note_seisme_ardeche.pdf

II. Caractéristiques du séisme du Teil du 11 novembre considérées comme bien établies

A1. La magnitude.

Les premières estimations de magnitudes proposées pour ce séisme ont fait état d'une valeur de 5.4. Cette valeur a ensuite évolué et s'est stabilisée, suite à nos différentes études, à 5. Il faut noter que différentes magnitudes existent et que différents organismes peuvent proposer des valeurs reposant sur différentes définitions. Au cours de nos travaux, nous utilisons une magnitude dite de moment, correspondant à un modèle physique. Ce modèle considère la taille du plan de rupture, la quantité de glissement et les propriétés mécaniques des roches en mouvement. À la suite de nos analyses, aussi bien sismologiques que géodésiques, il apparait que ce séisme est d'une **magnitude de moment égale à 5.0 ±0.1.** Il est important de noter que cette magnitude est différente de celle de l'échelle de Richter souvent mentionnée qui est basée sur la mesure locale des vibrations du sol uniquement (et non pas sur une analyse physique du phénomène sismique dans son ensemble).

A2. La faille, le type de mouvement, et la rupture en surface. Etant donnée sa magnitude, le séisme ne peut s'être produit que sur une faille géologique préexistante. La faille qui a rompu est de direction NE-SW, et son *pendage* est de l'ordre de 45 à 60° vers le SE (l'analyse des données géodésiques InSAR suggère un pendage de 55°). Le mouvement de faille associé au séisme est de type *inverse* (**Figure CS1**). La rupture est venue rompre la surface. La ligne (ou trace) de rupture en surface s'étend depuis

le Sud de l'agglomération du Teil sur environ 4 km en direction de Saint-Thomé, c'est-à-dire en direction du SW (**Figure CS3, et CG4**). Il est possible que le mouvement essentiellement inverse ait été accompagné d'une petite composante décrochante (horizontale), mais celle-ci n'est n'a pas pu être quantifiée précisément à ce stade (i.e. entre 0 et 5 cm, sans plus de précisions).

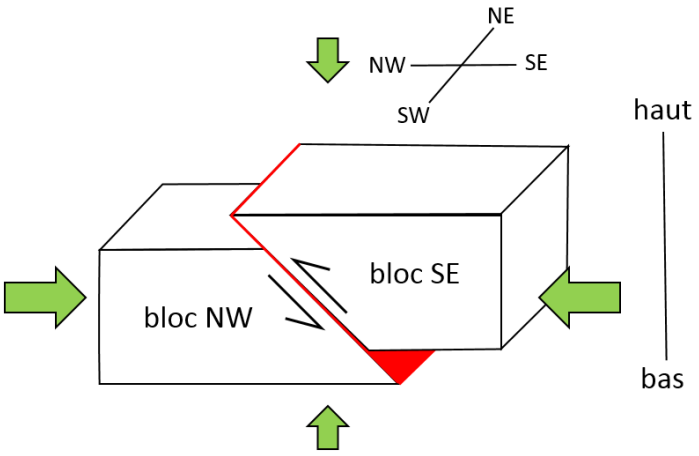


Figure CS1 : schéma représentant le type de mouvement de faille *inverse*, dominant durant le séisme du 11 novembre. La faille est en rouge, d'orientation NE-SW. La double flèche noire indique le sens de mouvement sur la faille. Le bloc SE, situé au-dessus de la faille, est monté par rapport au bloc NW. Les doubles flèches vertes indiquent les contraintes (pressions) qui favorisent le mouvement inverse de la faille et qui s'appliquent en profondeur au niveau du foyer du séisme. Pour qu'un mouvement de type *inverse* puisse avoir lieu il faut que la pression verticale soit plus faible que la pression horizontale. Plus le différentiel entre les contraintes horizontale et verticale est grand, plus aisé devient le mouvement sur la faille.

<u>Justification :</u> la modélisation des ondes émises par le séisme montre que le mouvement à sa source (*mécanisme au foyer, Annexe 1*) correspond à un mouvement de type cisaillant caractéristique des mouvements sur les failles tectoniques, avec un sens de mouvement de type *inverse* (**Figure CS1**). Un séisme « tectonique » d'une telle magnitude correspond à une rupture de plusieurs kilomètres carrés, qui ne peut naitre d'un seul coup. Seule une faille géologique relativement majeure, formée bien avant le séisme, peut produire une rupture de cette dimension. Par ailleurs les images satellitaires d'interférométrie radar (InSAR**, Figure CS2**) et les ruptures observées en surface confirment l'extension plurikilométrique de la rupture. L'orientation de la faille, son pendage, ainsi que sa direction de plongement sont déduites des informations combinées apportées par le mécanisme au foyer, la modélisation des données InSAR, et les ruptures en surface. La localisation des traces de rupture en surface a tout d'abord été suggérée par les images InSAR, qui montrent une discontinuité nette au niveau des franges d'interférométrie qui ne peut être interprétée que par une rupture en surface (ou très proche), puis par les investigations réalisées sur le terrain. Les traces de rupture en surface (**Figure CG5**) confirment le caractère compressif de la déformation et le jeu inverse du séisme.

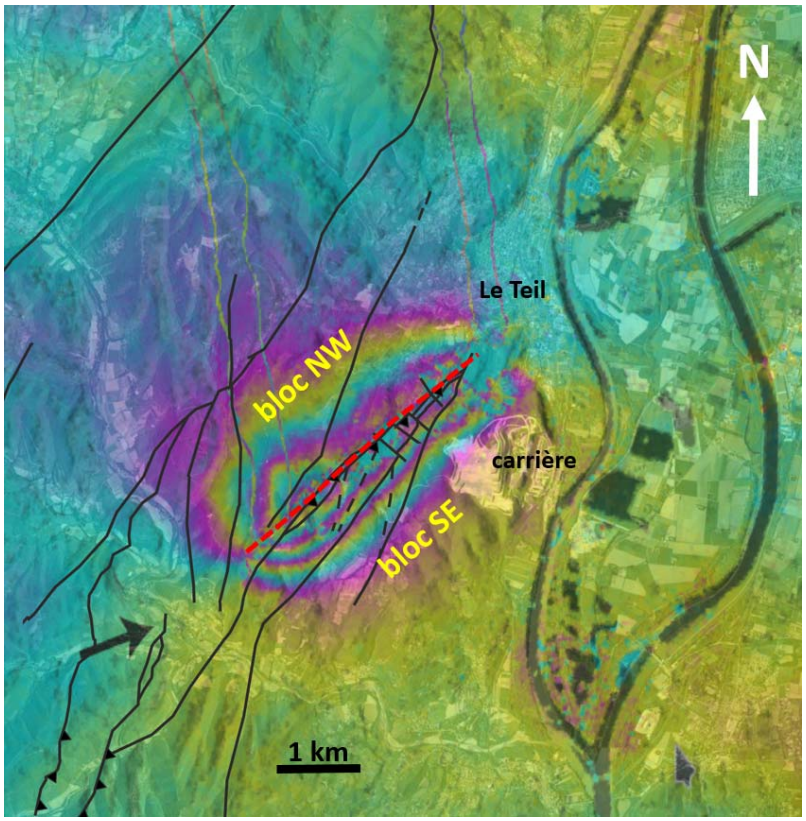


Figure CS2. L'une des images satellitaires d'interférométrie radar (InSAR) disponibles pour le séisme. Chaque frange, représentée par une séquence violet-jaune-bleu, correspond à un déplacement de 2.8 cm du sol dans la direction de visée du satellite. La ligne rouge pointillée marque la discontinuité des franges correspondant aux traces de rupture en surface. Les lignes noires correspondent aux failles de la carte géologique du secteur (BRGM). Celle avec des triangles noirs au centre de la Figure, appelée faille de la Rouvière, coïncide à peu de chose près à la trace de la rupture en surface. Les blocs situés respectivement au NW et au SE de la faille sont indiqués, ils correspondent à ceux de la **Figure CS1**. Il s'agit d'un interférogramme Sentinel-1 (ESA) en orbite ascendante avec image pré-séisme du 6 novembre et post-séisme du 12 novembre. La flèche noire épaisse indiquée la direction de visée du satellite. (Traitement InSAR par O. Cavalié).

A3. La distribution de glissement *cosismique* sur la faille. Le mouvement sur la faille lors du séisme, appelé *cosismique*, montre deux zones de glissement principales, où le glissement atteint 20 à 30 cm d'amplitude. L'une, la plus étendue, est située dans la moitié SW de la rupture, l'autre, de plus faible extension, est située juste au NW de la carrière du Teil (**Figure CS3**). L'essentiel du mouvement de faille lors de la rupture s'est produit entre 0 et 1 km de profondeur.

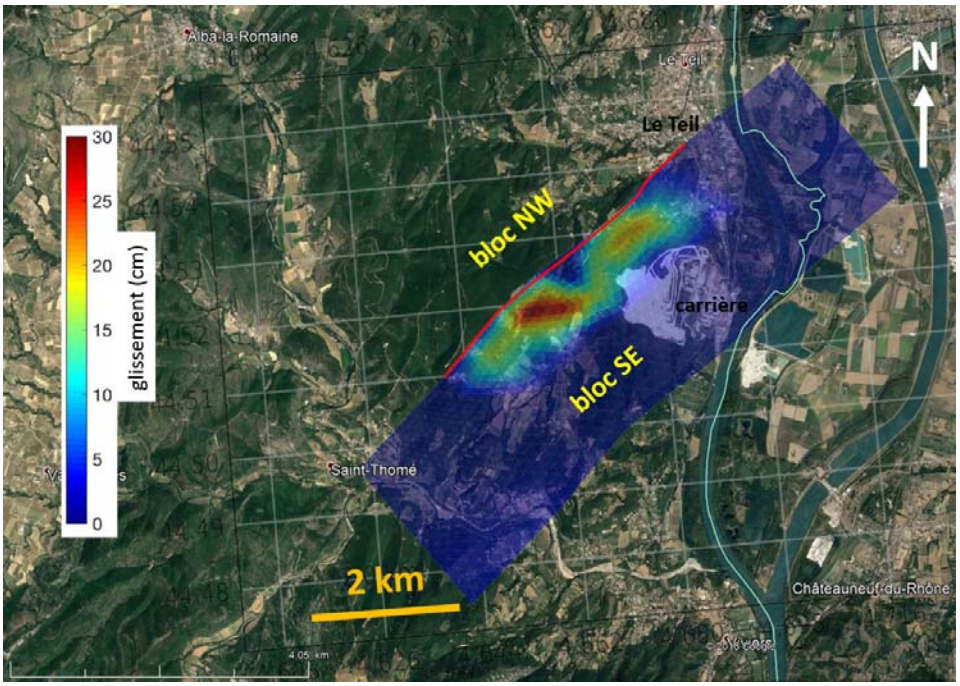


Figure CS3 : Modèle montrant la distribution du glissement associé au séisme du 11 novembre sur la faille. La ligne rouge indique la trace cartographique le long de laquelle des ruptures en surface ont été observées. La zone rectangulaire et de fond bleu représente la surface de rupture du séisme vue du dessus. Il s'agit d'une surface inclinée, qui part de la surface au niveau de la ligne rouge et qui plonge à l'intérieur de la Terre en direction du SE. Au niveau de la bordure NW de la carrière, la surface de rupture est à peu près à 1 km sous la surface. L'échelle de couleur indique l'ampleur du glissement en cm. Ce modèle est obtenu à partir des données satellitaires d'interférométrie Radar (InSAR). Fond de carte : image satellitaire Google Earth. (Analyse R. Jolivet, R. Grandin, O. Cavalié).

Justification : l'ampleur du glissement sur la faille et sa répartition spatiale ont été déterminés par modélisation des données satellitaires d'interférométrie radar (InSAR). Les images InSAR sont de bonne qualité pour ce séisme et couvrent l'ensemble de la zone où le sol a été fortement déplacé par le séisme, autrement dit l'ensemble de la zone de rupture. La relativement faible extension des franges d'interférométrie dans la direction perpendiculaire à la faille **(Figure CS2**) indique que la rupture s'est produite proche de la surface. La modélisation des données InSAR permet de préciser cela, avec une distribution du glissement essentiellement entre 0 et 1 km de profondeur, pour un pendage de la faille entre 50 et 60°. Le pendage optimal pour reproduire au mieux les données est de 55° avec une variation possible de 5°.

A4. La chute de contrainte. La chute de contrainte correspond à la différence de contrainte cisaillante agissant sur le plan de faille avant et après le séisme. Sa valeur moyenne calculée à partir des modèles de glissement disponibles est de l'ordre de 1 MPa (10^6 Pa, soit 10 bars). Localement, elle peut atteindre une valeur maximale de 4 à 5 MPa (40 à 50 bars). Ce sont des valeurs assez standards pour les séismes. La contrainte cisaillante sur les failles étant ce qui les entraine à glisser, notamment lors des séismes.

Justification : le calcul de la chute de contrainte est déduit des modèles de glissement issus de la modélisation des données InSAR. Considérant que les données InSAR couvrent bien la zone de rupture, que la rupture est superficielle ce qui rend le lien entre les déplacements de surface et le glissement sur la faille plus facile à établir, on peut considérer que la distribution de glissement est bien déterminée, et qu'il en va de même pour la chute de contrainte. Différents modèles possibles ont été pris en considération, ainsi que les incertitudes sur certains paramètres clefs, montrant que l'estimation ne varie pas significativement.

A5. Un nombre inhabituellement faible de répliques. A échéance de ce rapport, les données des nombreuses stations sismologiques temporaires qui ont été installées sur le terrain pour améliorer la

détection et la localisation des répliques n'ont été que partiellement récupérée et exploitées. Bien que nous ne disposions pas encore d'analyse suffisamment complète sur le sujet, les stations permanentes dans la région doivent permettre de détecter et localiser la plupart des séismes de magnitude (M) supérieure à 2 dans le secteur. Sur la période des quatre semaines qui ont suivi le séisme du 11 novembre, les sites de Sismalp, sismoazur, et ReNaSS n'ont localisé qu'entre 2 et 5 répliques de M > 1.8. Pour un séisme de magnitude 5, les lois empiriques (Bath, Gutenberg-Richter, Omori) prédisent une réplique de magnitude de 3.8 à 4, une dizaine de magnitude de l'ordre de 3, et une centaine de l'ordre de magnitude 2, le tout avec une décroissance du taux de sismicité avec le temps. On voit que l'on est loin du compte, et la décroissance de l'activité attendue ne devait pas permettre d'atteindre le nombre de répliques empiriquement attendu. Cela n'exclut pas la possibilité du déclenchement d'une nouvelle crise sismique, mais il ne s'agirait alors plus de répliques sensu stricto. Une piste d'explication envisagée à ce stade est liée à la nature des roches dans les premiers 2000 m de la croûte terrestre à cet endroit. Les coupes géologiques et les premières analyses de la structure de vitesse de la croûte du secteur tendent à montrer que dans cette tranche de profondeur on est en présence d'un niveau de calcaire au sommet (relativement rigide) et d'un niveau de marnes (moins rigide et plus ductile) en dessous. Les marnes pourraient avoir aidé à relaxer les contraintes cosismiques de manière asismique, donc sans répliques. Cette hypothèse ne s'appliquerait qu'à la base de la rupture ; d'autres pistes doivent être explorées pour expliquer l'absence de répliques aux extrêmes latéraux de la rupture. Bien qu'inhabituelle, une faible production de répliques n'est pas exceptionnelle à l'échelle globale (par exemple, le séisme de magnitude 7.1 de Puebla, Méxique en 2017 a eu très peu de répliques, toutes de magnitude inférieure à 4).

III. Caractéristiques du séisme qui doivent encore être précisées ou confirmées

B1 : **Localisation de l'*hypocentre* du séisme**. L'hypocentre est le point d'initiation de la rupture sur la faille. L'hypocentre est situé à une certaine profondeur sur la faille et sa projection en surface, c'est à dire sa localisation géographique sur une carte, est l'épicentre (**Figure CS4**). Bien que la localisation du séisme sur la base des temps d'arrivée des ondes sismiques observées au niveau des stations sismologiques soit l'une des premières informations, avec la magnitude, à être diffusée rapidement, elle peut être entachée d'une erreur importante, de l'ordre du kilomètre ou plus. Une telle incertitude est liée à deux facteurs principaux : l'éloignement des stations sismologiques et l'imperfection des modèles de Terre utilisés pour calculer les temps de trajets des ondes sismiques. Pour le séisme du Teil, les trois ou quatre stations les plus proches dont les données étaient disponibles au moment du séisme sont à des distances comprises entre 20 et 50 km, ce qui limite nécessairement la précision de la localisation. Par ailleurs, les localisations en routine diffusées par les différents organismes et sites des observatoires en charge de l'observation sismologique sur le territoire métropolitain (CEA/LDG, RENASS, SISMALP, SISMOZUR) ne sont pas basées sur des modèles de propagation des ondes sismiques très détaillés et spécifiquement adaptés à la région concernée.

Les localisations épicentrales diffuées après révisions dans la journée du 11 novembre par ces différents organises et sites (CEA/LDG, RENASS, SISMALP, SISMOZUR) diffèrent entre elles de plusieurs kilomètres, mais sont toutes localisées dans un même secteur entre le Teil et Alba-la-Romain. L'obtention des images InSAR dès le lendemain du séisme a permis de localiser précisément l'emplacement de la rupture et de montrer que le bloc SE était monté par rapport au bloc NW (voir **Figure CS3** pour la position des deux blocs). Cette information, combinée à celle du mécanisme au foyer indiquant le jeu inverse de la faille, a permis d'en déduire que la faille plonge vers le SE. Par conséquent, les différentes solutions pour l'épicentre du séismes mentionnés ci-dessus, entre le Teil et Alba-la-Romaine, c'est-à-dire au NW de la faille, ne sont pas localisées du bon côté de celle-ci. En

effet, la faille plongeant vers le SE, l'épicentre du séisme doit nécessairement être localisé au SE de celle-ci (**Figure CS4**).

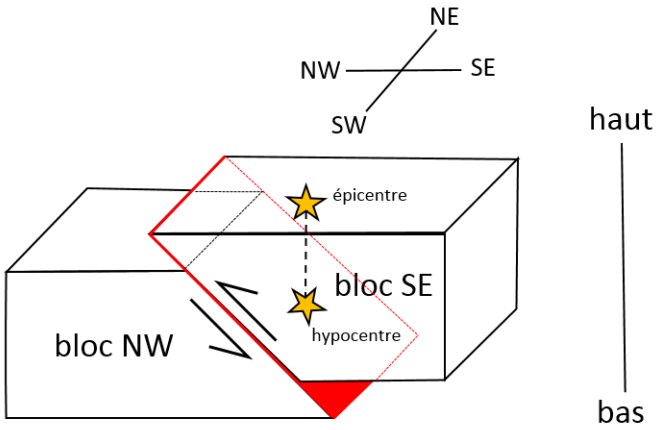


Figure CS4. Schéma similaire à celui de la **Figure CS1**, avec ajout de l'hypocentre et de l'épicentre (échelles non ajustées). Etant donné le pendage de la faille vers le SE, à l'hypocentre en profondeur sur la faille correspond forcément un épicentre en surface positionné dans le bloc SE.

En l'absence de stations sismologiques juste au-dessus du séisme, la profondeur de l'hypocentre n'est pas facile non plus à contraindre à partir des temps d'arrivée des ondes. Toutefois, des approches différentes de modélisation de la forme et de l'amplitude des ondes à basse fréquence employées par différentes équipes françaises pour trouver le mécanisme au foyer du séisme ont montré de manière convergente que la profondeur de l'hypocentre (= foyer) était très superficielle, entre 1 et 3.5 km. Ceci alors que ces approches utilisent des modèles de Terre différents pour la propagation des ondes. Si l'on met en regard ces résultats avec ceux de la modélisation des donnés InSAR (**Figure CS3**), montrant une distribution de glissement sur la faille essentiellement localisée entre 0 et 1 km de profondeur, **une profondeur hypocentrale inférieure à 1.5 km apparait comme la plus probable en compatibilité avec les données sismologiques et InSAR**.

Au cours des semaines qui ont suivies le séisme, les données de stations supplémentaires non télémétrées (c'est-à-dire qui ne transmettent pas leurs données en temps réel mais les enregistrent sur un disque local) ont pu être récupérées. Il s'agit de stations installées dans la région par EDF, l'IRSN, ou de stations temporaires du projet AlpArray. Certaines de ces stations sont plus proches, à des distances comprises entre 8 et 20 km du séisme. Sur la base des temps d'arrivée des ondes P et S des quatre stations les plus proches et à moins 25 km, en prenant en considération à la fois la méconnaissance du milieu de propagation des ondes sismiques et certaines de ses caractéristiques mise en évidence pour le secteur (existence d'une zone de faible vitesse des ondes S dans la croûte terrestre), une zone épicentrale dans le bloc SE, compatible avec la faille, a pu être précisée. Cette zone est située proche de la bordure SW de la carrière du Teil (**Figure CS5**). Elle ne prend en considération que des solutions hypocentrales de profondeurs comprises entre 1 et 1.5 km.

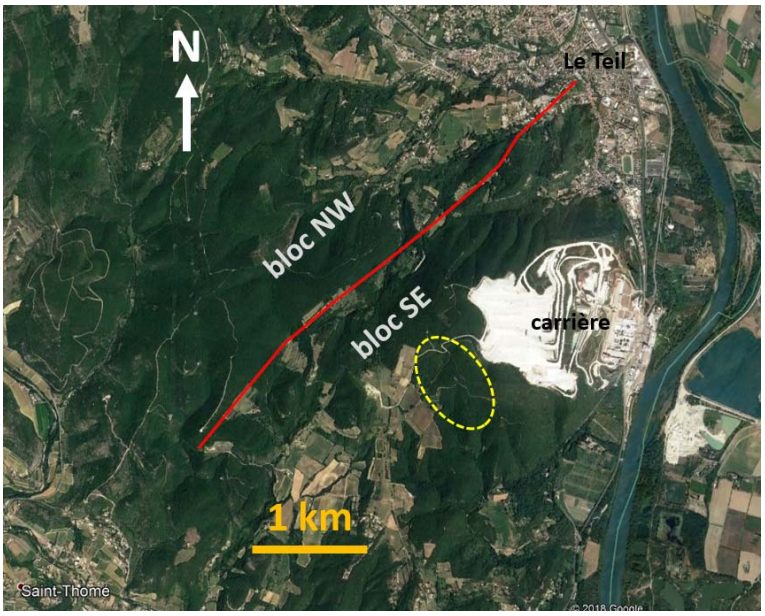


Figure CS5. L'ellipse jaune matérialise la zone épicentrale trouvée à partir des temps d'arrivée des ondes sismiques avec les quatre stations les plus proches, en se limitant aux hypocentres localisés entre 1 et 1.5 km de profondeur. Cette zone épicentrale est reportée sur les **Figures CG2** et **CG3**. La ligne rouge indique la position des ruptures en surface. (Analyse B. Delouis).

Cette zone épicentrale, pour une profondeur de l'hypocentre de 1 à 1.5 km, est compatible avec le pendage de la faille (**Figure CG3**). L'épicentre moyen trouvé pour cette zone est LAT 44.5178° N LONG 4.6709°E.

Un autre type d'analyse des ondes sismiques peut apporter des informations sur la position de l'épicentre. Le calage temporel ainsi que l'amplitude des signaux sismologiques, ou bien la variation azimutale de certaines propriétés du spectre des signaux (fréquence coin), peuvent être modulés par la direction et la vitesse de propagation de la rupture sur la faille. A ce stade, des résultats contradictoires ont été obtenus. L'étude la plus avancée voit dans les signaux une propagation de la rupture essentiellement vers le NE (rupture « unilatérale ») qui imposeraient un épicentre plus au SW (plus proche de Saint Thomé). Mais d'autres analyses en cours ne voient pas d'effet de directivité, suggérant une rupture bilatérale qui se serait propagée dans deux les directions opposées NE et SW depuis une position épicentrale au centre de la rupture, ou trouvent des indices de sens de propagation de la rupture en sens opposé à la première, du NE vers le SW. A ce stade il est donc difficile d'utiliser ces informations pour préciser la position de l'épicentre.

Enfin, les premières analyses d'un enregistrement confidentiel du séisme par un instrument de mesure des vibrations du sol installé par l'entreprise Lafarge chez un particulier, pointent pour un épicentre au niveau de la carrière. Le temps absolu de l'enregistrement n'est pas connu avec une précision suffisante pour que les temps d'arrivées des ondes soient utilisés individuellement. Toutefois une localisation approximative de l'épicentre peut être obtenue sur la base de la direction de polarisation de l'onde P et de la distance épicentrale déduite de la différence des temps d'arrivées des ondes S et P. L'épicentre correspondant est situé dans la partie NW de la carrière, ou juste sur sa bordure NW.

En conclusion sur ce sujet de la localisation hypocentrale, même si une localisation peut être proposée (LAT 44.5178° N LONG 4.6709°E, profondeur entre 1 et 1,5 km)**, l'incertitude est encore de l'ordre du kilomètre ou plus sur l'épicentre, et les différentes analyses n'ont pas encore**

convergées vers une zone compatible avec le degré de précision requis de l'ordre de quelques centaines de mètres.

B2. La direction de propagation de la rupture. Ce point discuté à la fin du point B1 ci-dessus. Les résultats ne sont que préliminaires, et montrent des tendances encore contradictoires.

IV. Questionnement autour du lien potentiel entre la carrière du Teil et le déclenchement ou le déroulement du séisme du 11 novembre 2019 en regard des processus naturels

Préambule

Dans la communauté scientifique, le questionnement sur le lien potentiel entre la carrière et le séisme a été initié par l'observation de son positionnement à proximité immédiate de la rupture cartographiée et modélisée par les données satellitaires d'interférométrie radar (InSAR) (**Figures CS2 et CS3**), ainsi que par le principe, présenté sur la **Figure CS1**, selon lequel une réduction de la charge en surface, et donc de la pression (contrainte) verticale relativement à la pression horizontale peut favoriser le jeu d'une faille inverse. Par la suite, et cela a été plutôt relayé par la presse, le public, puis en retour par les acteurs concernés par l'activité de la carrière, s'est posé la question d'un éventuel lien entre les tirs de carrière et le séisme.

Le présent rapport du groupe de travail (GT) ne constitue qu'une première revue des mécanismes qui pourraient intervenir dans ce lien potentiel. Le GT convient qu'il n'est pas exclu que la proximité entre la carrière et la rupture du séisme soit une coïncidence fortuite sans lien de cause à effet, mais il convient également que des mécanismes invoqués dans d'autres contextes, et reposant sur des études scientifiques validées, pourraient être impliqués dans le cas présent pour expliquer un tel lien.

Le GT regroupe des scientifiques travaillant dans divers domaines des géosciences, mais dans le temps limité qui lui était imparti, n'a pas forcément pu réunir toutes les compétences nécessaires à une première évaluation de tous les mécanismes pouvant entrer en ligne de compte. Le GT s'est efforcé de quantifier les effets liés aux mécanismes pour lesquels ses membres ou des collègues contributeurs externes, maitrisent les outils de modélisation. C'est le cas notamment pour le calcul de l'effet de perturbation de contrainte statique généré par l'extraction de la masse rocheuse de la carrière sur la faille responsable du séisme.

A cette étape, le GT n'est pas en mesure de proposer une évaluation probabiliste chiffrée sur l'existence d'un lien entre la carrière et le séisme, car il n'existe pas à notre connaissance de modèle statistique correspondant à ce contexte très particulier. Pour en construire un, il faudrait réunir et croiser des bases de données à l'échelle mondiale sur les carrières, les séismes, la géologie, les failles,… ce qui demanderait un investissement en temps considérable qui va bien au-delà de la mission actuelle du présent GT. Les séismes de magnitude 5 en France sont trop rares pour limiter une telle analyse statistique au territoire national.

Note sur la terminologie sur les séismes liés à un stimulus autre que le chargement tectonique régional : Un "séisme induit" est un séisme qui ne se serait pas produit en absence du stimulus en question. Un "séisme déclenché" est un séisme qui est initié par le stimulus en question, mais dont l'évolution ultérieure (et donc la magnitude finale) est contrôlée par l'énergie élastique pré-existante naturellement.

La discrimination entre séismes naturels et induits/déclenchés est un exercice souvent difficile. Les critères les plus usuels reposent sur la mise en contexte de l'évènement par rapport à la sismicité naturelle de la région, la distance entre l'hypocentre et la source du stimulus ou la zone stimulée, l'amplitude du stimulus comparée aux stimuli naturels (par exemple les contraintes induites tous les jours par les marées, quelques kPa). La discrimination entre séisme induit et déclenché requiert encore de plus d'information, en particulier une comparaison de l'amplitude du stimulus (contraintes induites) aux contraintes relâchées par le séisme (chute de contrainte).

A l'échelle mondiale, l'ensemble des cas documentés de séismes présumés induits ou déclenchés par des perturbations anthropiques de masse montre, pour les séismes à jeu inverse, des corrélations statistiquement significatives entre la magnitude du séisme, le changement de masse impliqué et la distance à cette perturbation de masse (Klose, 2013, https://link.springer.com/article/10.1007/s10950-012-9321-8). Parmi ces cas, les séismes inverses de magnitude 5 sont associés à des changements de masse d'entre 10 et 100 millions de tonnes, des distances horizontales au stimulus autour de 1 km, et des profondeurs relatives entre 1 et 10 km. Les caractéristiques du cas du Teil ne sont pas incompatibles avec ces cas historiques, compte tenu de leur dispersion. Notons néanmoins que le caractère induit/déclenché dans toute base de données n'est que présumé, et que le GT n'a pas pu évaluer leur qualité en détail, dû au temps limité pour produire ce rapport. Parmi les cas les mieux documentés nous pouvons citer des séismes de magnitude 3.5 et 4.6 à Belchatow, Pologne en 1980 qui ont été associés à l'extraction dans une mine de charbon, et le séisme de magnitude 4.6 à Cacoosing Valley, Reading, Pennsylvania, en 1994 qui a été associé à l'inondation d'une carrière abandonnée.

<u>Evaluation de l'ordre de grandeur de la perturbation de contrainte générée par la masse extraite au niveau de la carrière sur la faille responsable du séisme</u>

Sur la base de différences entre surfaces topographiques issues de modèle numériques de terrain (MNT) à différentes époques, du tonnage annuel d'extraction indiqué dans le rapport de la DREAL de 2018, des informations fournies par l'entreprise LarfageHolcim, la masse rocheuse extraite depuis 1946 est estimée à 71.6 millions de tonnes.

Le principe de la perturbation de contrainte générée par un retrait de masse en surface sur une faille inverse située juste dessous est illustré par la **Figure QC1**, extraite d'un article de Steer et collaborateurs (2014).

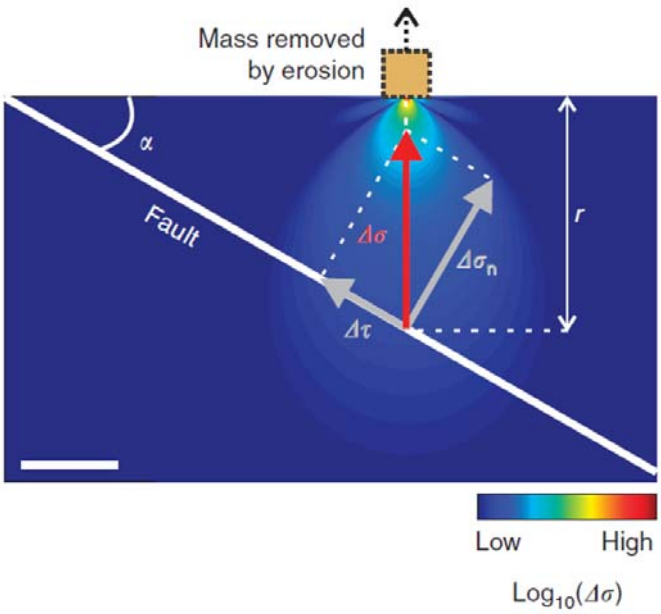


Figure QC1. Distribution de la perturbation de contrainte élastique $\Delta\sigma$ induite par un retrait de masse en surface. L'amplitude indiquée par l'échelle de couleur est purement illustrative (sans unités). Dans le cas illustré, le retrait de masse est produit par l'érosion, mais l'effet est similaire en cas d'extraction de roche au niveau d'une carrière. La flèche (vecteur) rouge est la perturbation de contrainte induite sur la faille, dirigée vers le haut dans le cas d'un retrait de masse en surface. Cette perturbation peut être décomposée en une perturbation cisaillante parallèle à la faille ($\Delta\tau$) qui va favoriser le jeu inverse de la faille, et une composante perpendiculaire (on dit aussi normale) à la faille ($\Delta\sigma_n$) qui va débloquer la faille. D'après Steer et collaborateurs (2014).

La valeur estimée de la masse rocheuse totale extraite est convertie en changement de pression de surface, répartie sur la zone d'extraction principale de la carrière. Au premier ordre la Terre réagit de manière élastique à une telle perturbation, et le lien entre le changement de pression en surface et le changement de contrainte sur la faille peut être calculé grâce à l'approche proposée par Boussinesq. Ce modèle considère un espace élastique semi-infini et une perturbation de contrainte ponctuelle. Bien que très simplifié, ce modèle a été expérimenté avec succès dans de nombreuses études publiée dans la littérature scientifique. La modélisation présentée ici fait intervenir une distribution de sources ponctuelles sur la surface de la carrière. La période considérée, environ 70 ans depuis 1946, est trop courte pour faire intervenir des déformations plastiques, de type fluage, importantes, et l'approche élastique est appropriée pour une première estimation. Des modélisations faisant intervenir une description des comportements mécaniques plus complète pourront être entreprises ultérieurement pour plus de précision. Le plan de faille à l'intérieur de la terre est en fait une surface légèrement ondulée, reprise de la modélisation des donnés InSAR et représenté sur la **Figure CS3**. Le calcul de l'amplitude du changement de contrainte cisaillante ($\Delta\tau$) et normale ($\Delta\sigma_n$), selon le principe illustré sur la **Figure QC1**, est effectué au niveau d'une multitude de petites surfaces localisées sur le plan de faille, ceci afin de cartographier les valeurs du changement de ces contraintes sur la faille (**Figure QC2**). Note sur les unités de contrainte (ou pression) : 10^5 Pa = 1 bar, et 1 bar correspond à la pression atmosphérique.

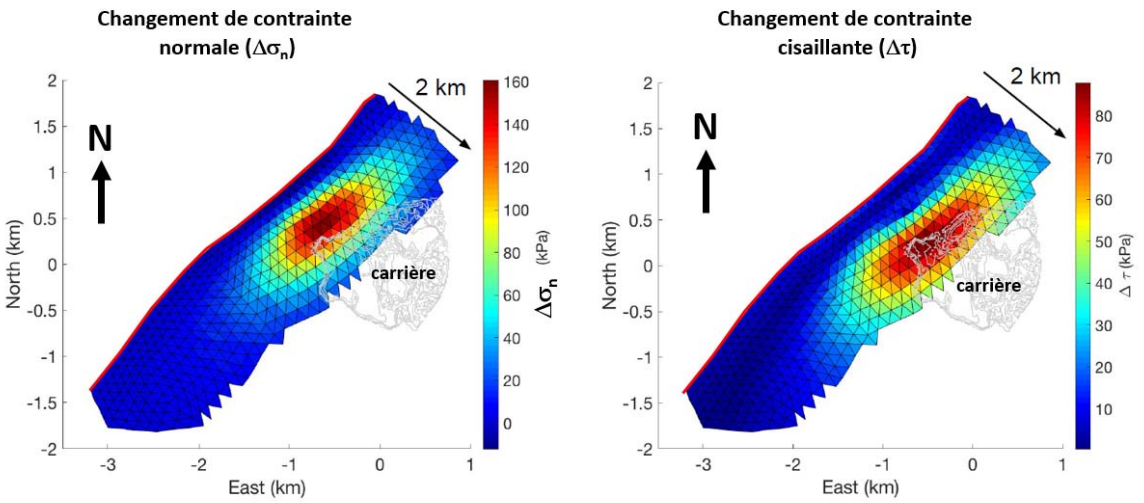


Figure QC2. Cartographie du changement de contrainte normale ($\Delta\sigma_n$) à gauche, et de contrainte cisaillante ($\Delta\tau$) à droite, sur la faille induits par l'extraction de masse rocheuse de la carrière depuis 1946. Les valeurs sont en kPa (x1000 Pa). La contrainte cisaillante ($\Delta\tau$) est positive ici dans le sens de promouvoir un mouvement de type inverse sur la faille, alors que la contrainte normale ($\Delta\sigma_n$) est positive dans le sens où elle débloque la faille. Les deux perturbations vont dans le même sens, celui de promouvoir un mouvement de type inverse de la faille. La ligne rouge souligne l'emplacement des ruptures en surface. Le changement de contrainte cisaillante ($\Delta\tau$) est un peu inférieur à 100 kPa, c'est-à-dire à 1 bar, à environ 1 km de profondeur. (Analyse J-P. Ampuero et collaborateurs).

En fait, le blocage ou déblocage de la faille fait intervenir le produit de la friction sur la faille (μ) par la contrainte normale $\Delta\sigma_n$. Comme la faille peut être amenée à bouger sous l'effet combiné de $\Delta\tau$ et $\mu\Delta\sigma_n$, il est habituel de les combiner en un seul paramètre appelé changement de contrainte de Coulomb (Coulomb stress change, ou Coulomb failure function, notée ΔCFF en anglais), qui dans notre cas est simplement égal à leur somme puisqu'ils jouent dans le même sens, celui de faciliter un mouvement inverse sur la faille ($\Delta CFF = \Delta\tau + \mu\Delta\sigma_n$). Lorsque la contrainte de Coulomb augmente, un matériau est emmené plus proche de la rupture. Il est important de noter que, ne connaissant pas l'état de contraintes absolues dans la croute terrestre (i.e. la contrainte n'est pas une quantité mesurable actuellement), ce critère ne peut que renseigner sur l'évolution relative d'un milieu par rapport à la rupture et ne permet pas de donner une estimation quantitative de la probabilité de rupture. De même, la résistance de la faille (i.e. le seuil au-delà duquel la faille va rompre) ne peut être connue avec précision. Cependant, de très nombreuses études établissent les liens entre des changements de contraintes de Coulomb et des séismes, et cette formulation est applicable à des contextes très différent. La **Figure QC3** montre la cartographie du changement de contrainte de Coulomb sur la faille.

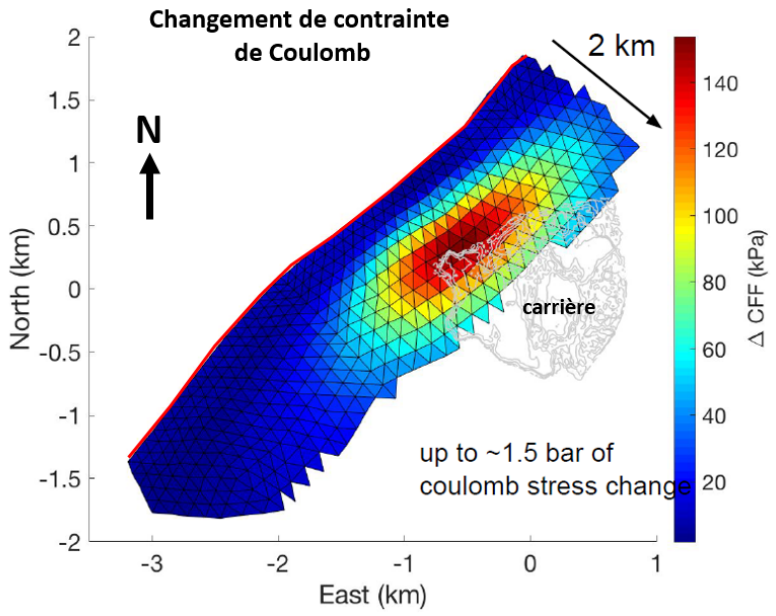


Figure QC3. Cartographie du changement de contrainte de Coulomb sur la faille (ΔCFF) induit par l'extraction de masse rocheuse de la carrière depuis 1946. Les valeurs sont en kPa (x1000 Pa). Les valeurs de ΔCFF sont positives et promeuvent un mouvement de type inverse de la faille. La ligne rouge souligne l'emplacement des ruptures en surface. L'ampleur du changement de contrainte de Coulomb atteint donc environ 1.5 bars à environ 1 km de profondeur. (Analyse J-P. Ampuero et collaborateurs)

Le calcul de la perturbation de contrainte engendrée par l'extraction de roche par la carrière a été effectué par différentes équipes (Geoazur - Jean-Paul Ampuero et collaborateurs, Géosciences Rennes - Philippe Steer), et les résultats en termes de ΔCFF sont convergents, autour de 1.5 à 2 bars.

<u>Implication du changement de contrainte produit par la carrière sur la faille</u>

Rappel : Nous avons établi au point **A2** que la rupture séisme s'est nécessairement produite sur une faille géologique préexistante d'extension plurikilométrique, et dans les éléments de contexte nous avons précisé qu'il s'agit très probablement de la faille de la Rouvière. Nous avons également indiqué que les quelques indices sur l'état de contrainte et de déformation pour la région proche montrent que le secteur est soumis à une compression (raccourcissement) tectonique compatible avec le mouvement de faille observé durant le séisme du 11 novembre.

Premier constat : l'effet de l'extraction du volume rocheux est d'augmenter à la fois la contrainte cisaillante sur la faille, qui tend à faire bouger la faille en jeu inverse, et de réduire la contrainte normale perpendiculaire à la faille, ce qui a tendance à débloquer la faille. Les deux effets se combinent pour faciliter le glissement de la faille avec un jeu inverse de même nature que de celui du séisme du 11 novembre.

Second constat : l'ampleur de la perturbation de contrainte cisaillante ($\Delta\tau$) produite par la carrière, estimée à un peu moins de 1 bar (**Figure QC2**), est relativement faible en comparaison de la contrainte cisaillante relâchée par le séisme (chute de contrainte) qui atteint localement un maximum de 30-40 bars (cf. point **A4**). **Cela implique que le chargement tectonique de la faille est prédominant et constitue le facteur principal contrôlant le séisme.**

Dans ces conditions, quelle peut avoir été l'influence de la modification de l'état de contrainte produit par la carrière sur la rupture du séisme ?

On peut envisager deux types d'influences :

1. La perturbation de contrainte produite par la carrière sur la faille a pu favoriser le déclenchement du séisme. Le changement de contrainte de Coulomb (ΔCFF) produit par le volume cumulé de roche extrait depuis 1946 sur la faille atteint une valeur maximale de l'ordre de 1.5 bars (150 kPa), qui est supérieure aux valeurs de l'ordre de 0.1 bar (10 kPa) reportées avoir été suffisantes pour déclencher des séismes dans divers contextes (Perfettini et al JGR 1999 ; Reasenberg and Simpson, 1992 ; McGarr and Simpson 1998).

   L'hypothèse d'un déclenchement du séisme par la carrière serait d'autant plus plausible que l'hypocentre du séisme, qui est le lieu d'initiation de la rupture, serait proche de la zone de plus fortes valeurs de ΔCFF. La zone de fort ΔCFF est localisée au niveau de la bordure NW de la carrière, mais elle s'étend sur une surface elliptique dont l'extension est de l'ordre de 2km dans la direction NE-SW (**Figure QC3**). A échéance de la rédaction du présent rapport, les différentes méthodes utilisées pour localier l'hypocentre du séisme, notamment sa position géographique (épicentre), donnent des résultats encore trop divergents, donc une précision insuffisante, pour pouvoir conclure au sujet du positionnement relatif de l'hypocentre et de la zone de plus fort ΔCFF.

2. La perturbation de contrainte produite par la carrière sur la faille a pu influencer la distribution du glissement cosismique (associé au séisme) sur la faille. Une comparaison entre la **Figure CS3** et la **Figure QC3** montre qu'il y a un recouvrement partiel entre l'une des zones de fort glissement du séisme (celle située juste au NW de la carrière) et la zone de ΔCFF élevé engendré sur la faille par la carrière. Les valeurs de ΔCFF favorisant ici un mouvement en jeu inverse sur la faille, de même nature que de celui qui s'est produit lors du séisme, cette zone de glissement cosismique aurait pu être en partie favorisée, voire amplifiée, par la carrière.

Les deux types d'influences 1 et 2 décrites ci-dessus ne sont pas exclusives. On peut concevoir que la présence de la carrière ait pu favoriser le déclenchement du séisme, et aidé au développement de la zone de glissement située juste au NW de la carrière. Par contre, la zone de glissement maximal la plus étendue, située plus au SW (**Figure CS3**) est, elle, assez clairement en dehors de la zone d'influence de la carrière, et son chargement en contrainte devrait pouvoir être expliqué par un chargement d'origine naturelle (notamment tectonique) sans contribution de la carrière.

Les hypothèses 1 et 2 présentées ci-dessus sont scientifiquement plausibles, au regard de l'ordre de grandeur de la perturbation des contraintes générée par la carrière sur la faille qui a rompue lors du séisme et de la localisation de cette perturbation par rapport à la distribution du glissement sur la faille lors du séisme. Pour ce type d'interaction se produisant en profondeur à l'intérieur de la Terre, et pour laquelle les processus et mécanismes en jeu sont inaccessibles à une observation directe, il ne sera probablement jamais possible d'établir un lien certain constituant une preuve. Ces hypothèses sont bâties sur un faisceau d'éléments et de modèles validés par la communauté scientifique. Enfin, nous rappelons, que si ces hypothèses sont scientifiquement plausibles, on ne peut pas totalement exclure que les processus invoqués n'aient eu qu'une influence négligeable sur le séisme et que celui-ci se soit produit de toute façon même sans la présence de la carrière sous l'effet des processus purement naturels, notamment tectoniques.

Autres mécanismes possibles au travers desquels la carrière aurait pu influer sur la rupture du séisme

D'autres mécanismes peuvent être invoqués, qui n'ont pu, au mieux, qu'être très partiellement quantifiés à ce stade, et qui devraient faire l'objet d'études plus approfondies.

Rôle de la pression de fluide (eau)

Le déclenchement de la rupture associée à un séisme peut être facilitée par une pression de fluide élevée. Lorsque la pression de fluide augmente dans la roche au niveau de la zone de faille, cela fait chuter sa résistance frictionnelle et aide à son déblocage.

Dans le cas du séisme du Teil, le fluide à prendre en considération ne peut être que l'eau naturelle, puisqu'il n'y a pas de sites d'injection (forages) d'eau, de gaz, ou autre fluide à proximité. La pression de fluide au niveau de la faille peut être modifiée par la venue d'eau d'infiltration, ou par une variation du niveau de la nappe d'eau.

L'infiltration d'eau peut intervenir au niveau de la trace de la faille en surface (**Figure CS3**, ligne rouge), indépendamment de la carrière. Elle peut aussi intervenir au niveau de la carrière, celle-ci correspondant à une zone de mise à nu de la roche et à sa fracturation en surface par les tirs. Toutefois, il ne semble pas y avoir de faille majeure cartographiée traversant le site de la carrière, et il est difficile de savoir à quel point la fracturation naturelle de la roche sous la carrière permettrait à l'eau de pluie s'infiltrant au niveau du sol de la carrière d'atteindre la faille située à peu près un kilomètre plus bas. Cela pourrait faire l'objet d'études spécifiques. Une première analyse rapide des conséquences des fortes précipitations dans le secteur au cours des semaines qui ont précédé le séisme a été transmise au groupe de travail par une équipe de Géosciences Montpellier et Géosciences Rennes (R. Cattin, L. Longuevergne, Ph. Steer). Sur la base du décalage temporel observé entre les précipitations en surface et le niveau piézométrique dans un puis du secteur, une vitesse d'infiltration de l'ordre de 1 à 5 m/jour a été estimée. Cette vitesse d'infiltration implique que l'effet des fortes précipitations de novembre au niveau de la faille devrait se situer à une profondeur comprise entre 30 et 150 m à la date du 11 novembre (date du séisme), ce qui est trop peu profond pour avoir influencé la zone de rupture du séisme. De plus, le changement de contrainte de Coulomb associé (ΔCFF) a été estimé < 0.1 bars, ce qui est faible par rapport à l'effet de la carrière (~1.5 bars).

Un autre facteur potentiellement à l'œuvre, à plus grande distance, est la variation de contraintes par poroélasticité : une augmentation de pression de fluides en un point (en surface ou en profondeur) aura tendance à produire un écoulement vers les zones où la pression est plus faible. Tant que les pressions de fluides ne sont pas équilibrées, les fluides en excès "poussent" la roche environnante, la déforment élastiquement, et modifient les contraintes. Les effets poroélastiques ont été évoqués pour expliquer la sismicité anormale observée à des distances horizontales jusqu'à 40 km en Oklahoma, dans un contexte d'injection d'eaux usées dans des formations poreuses et perméables (Goebel et al., 2017).

A ce stade les informations à ce sujet sont très parcellaires et le groupe n'a pas pu réunir en son sein de spécialistes dans le domaine de l'hydrogéologie pour conduire une évaluation plus aboutie dans cette direction.

Impact des tirs de carrière

Le dernier tir de la carrière du Teil avant le séisme du 11 novembre 2019 date du 8 novembre 2019, 11h05 (heure française). Il a été détecté et localisé par le RENASS, qui lui attribue une magnitude 1.7. D'après les informations dont nous disposons, ce tir n'est pas d'une puissance exceptionnelle, il est dans la norme des tirs effectués dans la carrière au cours des semaines et mois antérieurs. Même si

cela ne peut pas être complètement exclu, il est peu probable que le séisme du 11 novembre 2019 puisse être relié à l'effet d'un tir en particulier. La perturbation de contrainte sur la faille générée par un événement de magnitude < 2 doit être faible (modélisation non encore effectuée, mais envisageable en statique et en dynamique). De plus il faudrait invoquer un mécanisme de retard, afin que la perturbation produise un effet de déclenchement trois jours plus tard (si on considère le tir du 8 novembre 2019). Ce type d'interaction fait l'objet de recherche par certaines équipes, mais il s'agit de travaux à la frontière de la connaissance dont les résultats ne sont pas encore transférables et dont les mécanismes ne sont pas encore bien compris (Brodsky and Elst, 2014 ; Elst and Savage, 2015).

Un autre aspect est à prendre en considération. L'effet des perturbations de contraintes dynamiques (c'est-à-dire liées au passage de ondes sismiques) générées par les tirs de carrière répétés sur des décennies. Il est envisageable que cela puisse produire progressivement un affaiblissement de la faille en profondeur, ce qui, combiné aux contraintes tectoniques, et éventuellement de l'effet de l'extraction de roche discutée plus haut, aurait pu faciliter l'occurrence du séisme. Cet aspect, également à la pointe de la recherche, devrait faire l'objet de recherches spécifiques, le groupe de travail ne peut pas à ce stade produire d'évaluation de son impact.

Références

Goebel, T. H. W., Weingarten, M., Chen, X., Haffener, J., & Brodsky, E. E. (2017). The 2016 Mw5. 1 Fairview, Oklahoma earthquakes: Evidence for long-range poroelastic triggering at> 40 km from fluid disposal wells. *Earth and Planetary Science Letters*, *472*, 50-61.

Brodsky, E. and N. J. van der Elst, The Uses of Dynamic Earthquake Triggering, Annual Review of Earth and Planetary Sciences 2014 42:1, 317-339. https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054648

Steer, P., Simoes, M., Cattin, R. et al. Erosion influences the seismicity of active thrust faults. Nat Commun 5, 5564 (2014) doi:10.1038/ncomms6564

Van der Elst, N. J., and H. M. Savage (2015), Frequency dependence ofdelayed and instantaneous triggeringon laboratory and simulated faultsgoverned by rate-state friction,J. Geophys. Res. Solid Earth, 120, 3406–3429, doi:10.1002/2014JB011611

V. Questionnement au sujet de la profondeur très superficielle du séisme

Comme souligné dans les sections II et III, la rupture du séisme s'est produite à une profondeur très superficielle, entre 0 et 1.5 km. Cela a été mis en évidence principalement par les données satellitaires d'interférométrie radar (InSAR), mais confirmé également par la modélisation des sismogrammes des stations régionales lors de la recherche du mécanisme au foyer (Annexe 1). Les temps d'arrivée des ondes P et S aux stations les plus proches sont compatibles avec cette faible profondeur. Ce caractère très superficiel du séisme est donc considéré comme bien établi, même s'il reste une incertitude sur la position géographique précise de l'épicentre (discussion **point B1, section III**).

Les séismes de magnitude de l'ordre de 5 à des profondeurs inférieures à 2 km en domaine continental sont relativement peu fréquents. Néanmoins, le séisme d'Epargny, proche d'Annecy, en 1996, de magnitude équivalente (Ml 5 .3 pour Epargny et Ml 5.4 pour le séisme du Teil, les deux valeurs correspondant à la magnitude locale du LDG/CEA) a été localisé également à faible profondeur, à moins de 3 km (Thouvenot et al., 1998). Toutefois, le séisme du Teil semble présenter un caractère

particulièrement superficiel, avec des ruptures de surface plus marquées, et un glissement cosismique principal localisé entre 0 et 1 km de profondeur.

Environ 25-30 km au SE du séisme du Teil, à proximité du Tricastin, un essaim de sismicité en 2002-2003 a été localisé à une profondeur de quelques centaines de mètres par Thouvenot et al. (2009). Il comprend 130 événements de magnitude comprise entre -1.7 et 1.7. Ces auteurs rapportent également que des indices de très faible profondeur (manifestations acoustiques) ont été rapportés au sujet des essaims sismiques de 1772–1773 et 1933–1936 dans la même zone, qui ont culminés avec des événements destructeurs d'intensité macrosismique maximale VII à VIII, similaire à celle observée pour le séisme du Teil.

Si bien un séisme de magnitude 5 comme celui du Teil avec une rupture localisée essentiellement à moins de 1 km de profondeur et des traces de ruptures en surface très claires est un cas peu fréquent, il existe donc des cas de séismes présentant des similarités, et dans la région proche (Tricastin) il est suggéré que des séismes de taille similaire très superficiels se soient produits dans le passé (essaims de 1772-1773 et 1933-1936).

Une rupture sismique de magnitude 5 initiée si proche de la surface pose des questions quant aux conditions frictionnelles sur la faille, les circulations de fluides, et autres paramètres mécaniques permettant son occurrence. En effet, il est généralement considéré que le premier km de la croûte terrestre n'est pas favorable pour l'initiation d'une rupture sismique de magnitude supérieure à 3 ou 4. Il s'agit là de pistes de recherche à entreprendre. On pourrait rapprocher le séisme du Teil à un séisme de magnitude locale 5.2 s'étant produit en Californie en 1983 (une réplique du séisme de Coalinga) sur une faille de jeu inverse et pendage 65°, pour lequel une rupture de surface de 3.3 km a été documentée. Sa profondeur hypocentrale a été estimée à 2.4 km.

Comme pour expliquer le faible nombre de répliques, il faudra à ce sujet affiner l'analyse des relations entre la géologie locale et les propriétés mécaniques associées d'une part, et la rupture du séisme d'autre part. Il est possible que le contraste entre des couches plus rigides proches de la surface (premier 1000 m environ) et plus plastiques en dessous, ait conduit à une concentration des contraintes dans les premières et que cela explique la localisation superficielle de la rupture.

VI. Discussion sur les conséquences du séisme sur l'aléa sismique futur du secteur

Il ne s'agit ici que d'une ébauche, car bien que le sujet soit d'une grande importance, cet aspect demandera des travaux et une réflexion plus long terme sur la base d'un groupe élargi. L'évaluation de l'aléa sismique requiert la mise en regard de données de types très divers, et doit essayer de faire un point le plus exhaustif possible sur l'état des connaissances, que nous ne pouvons pas conduire aussi rapidement. Une réflexion nationale sur le sujet de l'aléa sismique en France est entreprise, entre autres, dans le cadre de l'infrastructure de recherche RESIF, et l'IRSN en particulier est fortement impliqué sur le sujet.

Nous posons au moins quelques questions avec des éléments de réponses partiels à approfondir.

<u>La faille qui a produit le séisme (faille de la Rouvière selon ce qui est le plus vraisemblable), peut-elle rompre de nouveau ?</u>

Il est peu probable que les zones de la faille qui ont fortement glissé lors du séisme du 11 novembre rompent de nouveau. On note toutefois une zone de moindre glissement entre les deux zones de glissement principales (**Figure CS3**), sur une longueur d'un kilomètre ou un peu plus, qui pourrait

potentiellement générer un séisme de magnitude 4+. En effet, une zone entre deux zones de fort glissement rapprochées pourrait être une zone où les contraintes ont été reconcentrées.

Se pose ensuite la question de la rupture des segments de la faille de la Rouvière de part et d'autre de la rupture du 11 novembre. On s'attend à une concentration élevée de contraintes au niveau des terminaisons des zones de fort glissement, qui sont par conséquent des endroits propices pour le déclenchement de nouvelles ruptures si les segments de faille adjacents sont déjà fortement chargés par les processus tectoniques. Vers le SW, la faille de la Rouvière est cartographiée au-delà de la rupture du 11 novembre 2019, sur une longueur d'environ 4 km, ce qui peut offrir le potentiel pour un séisme de magnitude de même ordre (M5). Vers le NE, la trace cartographique de la faille se perd et les failles peuvent être masquées par l'urbanisation (Le Teil) et les dépôts alluvionnaires récents du Rhône, donc on ne peut pas dire grand-chose.

Les failles autours peuvent-elle générer également un séisme ?

Des failles voisines, d'orientation et de géométrie similaires, sont présentes à proximité, elles sont de ce point de vue dans une disposition aussi favorable que celle de la Rouvière pour être activées par le régime tectonique actuel. Nous manquons cependant d'éléments de connaissance précis sur ces failles, sur leur géométrie précise et sur leur continuité en profondeur ou sous les sédiments quaternaires. Nous manquons également d'observations sur leur état de chargement tectonique. Cela devrait être clairement un axe de recherche et de déploiement de moyens d'observation à venir pour une potentielle réévaluation du risque sismique.

Un séisme de taille similaire ou plus grand peut-il se produire prochainement dans le secteur ?

C'est à envisager, en raison de l'existence de segments de faille adjacents ou de failles voisines de longueur suffisante pour cela et parce que l'occurrence du séisme du 11 novembre 2019 augmente la probabilité de déclenchement d'un séisme à proximité. Les cas de déclenchement de séismes sur des failles voisines sont courants, avec des délais très variables allant de la minute (cela ne s'est pas produit ici) à des semaines, des mois, voire des années. Néanmoins, le nombre très faible de répliques suggère que ce séisme pourrait être un évènement au potentiel de déclenchement particulièrement bas, comparé à des séquences sismiques usuelles.

VII. Conclusions - Résumé

Nous résumons ici les principaux résultats du rapport, sans nécessairement rappeler les éléments de justification présentés dans les sections précédentes.

C1. La rupture du séisme du 11 novembre 2019 s'est produite à très faible profondeur, essentiellement à moins de 1000 m, avec un mouvement de type inverse sur un plan de faille orienté NE-SW incliné vers le SE. L'extension latérale de la rupture est d'un peu plus de 4 km, localisée entre Le Teil et Saint-Thomé. L'ampleur du glissement cosismique (mouvement de faille lors du séisme) atteint par endroit 20 à 30 cm d'amplitude.

C2 : Etant données ses caractéristiques, notamment sa magnitude, le séisme du 11 novembre 2019 s'est nécessairement produit sur une faille géologique préexistante, de dimension plurikilométrique.

C3. Le contexte tectonique est favorable pour l'occurrence d'un séisme sur une faille NE-SW avec un jeu inverse, tel que celui qui s'est produit le 11 novembre 2019. Il existe dans le secteur un faisceau de

failles d'orientation NE-SW, à pendage vers le SE, dans un régime tectonique actuel caractérisé par une compression horizontale NW-SE compatible avec leur jeu inverse. Parmi les failles connues du secteur, la faille de la Rouvière est celle qui est le plus vraisemblablement responsable du séisme. Elle a la bonne orientation (NE-SW), son pendage est vers le SE, et sa trace cartographiée en surface est très proche, à quelques dizaines de mètres près, des ruptures en surfaces produites par le séisme.

C4. La sismicité instrumentale dans le secteur est faible à modérée, mais pas inexistante. Il n'y a pas de séisme historique qui puisse être associé à la faille responsable du séisme du 11 novembre 2019, mais la période de récurrence de tels événements peut être supérieure à la période historique documentée. Des séismes historiques associés à des destructions sont néanmoins répertoriés à proximité du Tricastin, 20-30 km plus au SE.

C5. Le séisme du 11 novembre 2019, de magnitude 5, est associé à un nombre inhabituellement faible de répliques. Il est possible que la nature particulière des terrains dans les premiers 2000 m de la croûte terrestre puisse expliquer cette anomalie, avec une couche marneuse épaisse permettant une relaxation des contraintes, mais cela reste à étudier.

C6. L'épicentre (position géographique) du séisme n'est à ce stade pas encore déterminé avec une précision suffisante (< 1 km) pour pouvoir en déduire si la rupture a démarré dans sa partie SW, NE, ou centrale. Concernant la directivité de la rupture, c'est-à-dire sa direction de propagation sur la faille, les analyses donnent des résultats encore provisoires et trop divergents pour conclure. Certaines données placent néanmoins l'épicentre très proche, voire à l'intérieur, de la carrière du Teil.

C7. L'effet, sur la faille responsable du séisme du 11 novembre 2019, de l'extraction de roche en surface au niveau de la carrière du Teil au cours des dernières décennies, a été modélisé. L'effet reproduit, correspondant à une perturbation (ou changement) de contrainte (de Coulomb) agissant sur la faille située à peu près 1 km plus bas, est dans le sens de favoriser le mouvement inverse sur la faille, donc dans le sens de son mouvement lors du séisme. L'ampleur de la perturbation de contrainte calculée est supérieure aux valeurs reportées avoir été suffisantes pour déclencher des séismes dans divers contextes. Il est par conséquent plausible que la présence de la carrière ait pu aider au déclenchement du séisme, ou ait facilité le développement d'une partie de la rupture sismique, celle qui est la plus proche de la carrière. Par contre, l'ampleur de la chute de contrainte cisaillante calculée pour le séisme est bien supérieure au changement de contrainte cisaillante induit par la présence de la carrière, ce qui implique que le chargement tectonique de la faille est prédominant et constitue le facteur principal contrôlant le séisme. La zone de glissement cosismique principale sur la faille, située dans la partie SW de la rupture, est assez clairement en dehors de la zone d'influence de la carrière, et son chargement en contrainte devrait pouvoir être expliqué par un chargement d'origine naturelle (notamment tectonique) sans contribution de la carrière.

C8. Même si cela ne peut pas être complètement exclu, il est peu probable que le séisme du 11 novembre 2019 puisse être relié à l'effet d'un tir de carrière en particulier. En revanche, il est envisageable que l'effet des perturbations de contraintes dynamiques (c'est-à-dire liées au passage de ondes sismiques) générées par les tirs de carrière répétés sur des décennies puisse produire un affaiblissement progressif de la faille en profondeur, ce qui, combiné aux contraintes tectoniques, et éventuellement à l'effet de l'extraction de roche mentionnée au point précédent, aurait pu faciliter l'occurrence du séisme. Cet aspect, à la pointe de la recherche, devrait faire l'objet de recherches spécifiques, le groupe de travail ne peut pas à ce stade produire d'évaluation de son impact.

C9. Le séisme présente des caractéristiques qui en font un séisme particulièrement superficiel étant donné sa magnitude assez élevée (M5). Toutefois, à ce stade, ce caractère ne peut pas être clairement

considéré comme exceptionnel, au regard d'autres cas de sismicité également très superficielle notamment en France, et à proximité immédiate (essaims sismiques proche du Tricastin).

C10. Nous ne faisons qu'aborder la délicate question de la possibilité du déclenchement d'un séisme de taille similaire, voire plus grande, sur la même faille ou sur les failles voisines. Si l'on excepte les zones de la faille qui ont fortement glissé lors du séisme du 11 novembre 2019, il est envisageable que la redistribution des contraintes après le séisme favorise (avance, anticipe) le déclenchement d'un nouveau séisme sur les segments adjacents de la faille de la Rouvière ou sur les failles voisines, comme cela se produit assez fréquemment à l'échelle mondiale. Toutefois, le nombre très réduit de répliques pourrait signifier que les contraintes redistribuées ont été relâchées par d'autres processus non sismiques. De plus, la méconnaissance de l'état de chargement tectonique des segments de faille voisins ne nous permet pas de conduire à ce stade une évaluation plus quantifiée.

C11. Le rôle des fluides, dans le cas présent de l'eau, sur le déclenchement ou le déroulement du séisme n'a pas pu faire l'objet d'analyses très développées à ce stade. Les données disponibles sont trop parcellaires et le groupe de travail n'a pas pu intégrer de spécialiste du sujet. Des modélisations préliminaires, transmises au groupe par des équipes extérieures, tendent à monter que les infiltrations d'eau liées au fortes précipitations durant les semaines qui ont précédé le séisme n'auraient pas pu influer significativement sur la rupture sismique.

VIII. Travaux de recherche à poursuivre ou à entreprendre pour aller plus loin

Nous listons ci-dessous, sous une forme brute car rassemblées au moment de la clôture du présent rapport, des pistes de recherche et d'acquisition de données que nous pouvons proposer pour aller plus loin sur la connaissance des caractéristiques de ce séisme et de son contexte, pour mieux évaluer l'aléa sismique régional après le coup de projecteur donné par le séisme, et tirer parti de ce séisme pour progresser dans notre compréhension fondamentale de la rupture sismique. La liste est longue, bien que certainement non exhaustive dans la mesure où des collègues ou équipes de recherche en dehors du présent groupe de travail auront certainement des idées complémentaires.

<u>Sur le séisme, la dynamique de la rupture, les conditions de contraintes, la connaissance de la zone de faille… :</u>

Raffinement des estimations de volume extrait en utilisant l'ensemble des données de l'IGN, puis actualisation des calculs de contraintes induites. (Je ne m'attends pas à des changements significatifs des résultats actuels, mais il faut le faire). Echéance : 1-2 semaines.

Détermination de l'hypocentre en exploitant les tirs de carrière enregistrés par les stations proches, y compris chez les Clauzel et la centrale nucléaire. Echéance : 1 semaine après mise à disposition des données (calibrées, vérifiées). Si les pointés des tirs sont trop incertains, essayer la méthode de cohérence de phase de Hawthorne et Ampuero (2017 http://dx.doi.org/10.1093/gji/ggx012): 1-2 semaines supplémentaires.

Détermination du potentiel de déclenchement dynamique par les tirs de carrière, en utilisant des lois empiriques de type seismicity rate increase vs peak dynamic strain (Brodsky and van der Elst, 2014 https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-earth-060313-054648). Echéance : 1 semaine après mise à disposition des enregistrements locaux de tris de carrière. Si le résultat le justifie, un travail plus fin de modélisation des tirs peut être proposé.

Simulations de rupture dynamique, et contraintes sur les paramètres dynamiques de la faille (énergie de fracturation, pré-contrainte) en exploitant les enregistrements proches, en particulier chez les Clauzel (p.ex. à la Weng & Yang 2018 https://doi.org/10.1029/2017JB015414). Echéance : 1-2 semaines après mise à disposition des données (calibrées, vérifiées) et détermination de l'hypocentre.

Recherche de glissements asismiques dans les 10+ années précédant le séisme, dans les résidus de déformation InSAR après soustraction de l'effet élastique de la carrière. Echéance : en fonction de la disponibilité et du type de données InSAR, probablement quelques mois.

Réaliser des inversions jointes des données InSAR et des données sismologiques proches avec pour objectif de préciser la cinématique de la rupture et apporter des contraintes supplémentaires sur la position de l'initiation de la rupture (hypocentre). Echéance : 1-3 mois.

Détermination des propriétés mécaniques des matériaux de faille, dans les couches principales englobant la rupture + 1 km de profondeur. Synthèse du profil géologique, échantillonner les matériaux pertinents sur le terrain, analyse microstructurale (SEM + XRD), synthèse de résultats existants sur ces matériaux, nouveaux tests en laboratoire de frottement, cohésion, fluage et réponse aux chargements transitoires. Echéance : 8-9 mois.

Simulations de glissement/déformation asismique induit par la carrière. Echéance : 2-4 semaines après définition des propriétés des matériaux, en particulier dans la couche en dessous de la zone de rupture. (En attendant les résultats de laboratoire, ce travail peut commencer en utilisant des propriétés de matériaux trouvées dans la littérature.)

Campagnes sismologiques pour contraindre la géométrie et structure de la faille en profondeur. Pendage ? Variations latérales de géométrie ? Relations entre asperités/barrières de glissement et structure ? Il y a-t-il un décollement à la base de la rupture, dans les couches moins compétentes ?

Forage dans l'hypocentre d'un séisme**.** Ce serait une grande première, et un avancement fondamental pour la physique des tremblements de Terre. Objectif : accès direct aux propriétés mécaniques et structurales in situ. Une opportunité exceptionnelle puisque la faible profondeur hypocentrale permet d'y forer. Egalement intéressant de forer dans les zones de faible glissement et d'arrêt de la rupture. En plus : monitoring fin de la nanosismicité possiblement associée au glissement asismique profond (antenne DAS [fibre optique] en forage). Echéance : X années (dont une grande partie dédiée à trouver les fonds).

<u>Sur l'observation régionale :</u>

Maintenir et renforcer l'instrumentaion (obervation) au voisinage de la rupture du séisme et au niveau des failles environnantes (sismomètres, GNSS, réseaux de fibre optiques,…).

<u>Pour l'analyse de la tectonique active – paléosismologie</u>

1/ Acquisition d'une couverture Lidar avec l'instrument national CNRS-INSU basé à Caen sur toute la zone du faisceau de failles Cévenoles, entre de la faille de Cévennes au NW et la faille de Marsanne au SE, pour à la fois un état « 0 » de le topographie (MNT), et également analyser ce qu'il en est des caractéristiques morphotectoniques notamment dans les terrains les plus récents le long de ce réseau de failles parallèles. Echéance : ?

2/ Géophysique haute résolution dans les terrains quaternaires notamment au niveau du Teil (mais aussi au niveau de la vallée de l'Escoutey au sud de la rupture vers Saint Thomé) pour suivre le tracé

de/des failles géologiques anciennes sous les dépôts quaternaires, et potentiellement analyser si on observe des structures non cartographiées dans ces derniers. Echéance : 6 mois – 1an

3/ Investigations paléosismologiques une fois localisé au mieux le tracé des failles « anciennes » sous les dépôts quaternaires par corrélation des tracés observés en surface et en profondeur (Cf 1) : Ouverture de tranchées et datations des paléo-évènements le cas échéant (mise en œuvre des méthodes et outils de la géochronologie du Quaternaire 14C, OSL, CRN (10Be, 26Al, 3He). Echéance : 1 – 2 ans

4/ Acquisition et corrélations d'images Pléiades pour analyser la déformation cosismique en champ proche (résolution 5cm) le long de la rupture de surface, notamment là où celle-ci traverse les zones non boisées. Echéance : 6 mois

NB1 / En ce qui concerne le point 1 (i.e. projet d'acquisition LiDAR), il est important de souligner ici le besoin d'établir un état initial non seulement au niveau de la région touchée par le séisme du Teil, mais aussi sur tout le territoire national, en vue d'un futur séisme (cf le programme LiDAR B4 sur la faille de San Andreas). L'acquisition de données LiDAR dispersées, réalisées par des groupes différents, pour des disciplines différentes avec des matériels et dans des conditions différentes à l'échelle du territoire français, est un vrai problème. Toutes les disciplines (géographes, urbanistes, historiens, géologues, biologiste, hydrologues...) ont besoin de ces données et surtout besoin d'un état « 0 » à un moment donné pour suivre l'évolution des phénomènes dans le temps. Ceci signifie également, un espace de partage de type NCALM où toutes ces données publiques seront disponibles (ce pourrait être au niveau d'un OSU, celui de Caen ?).

NB2/ Ces différents points ont également été abordés à l'occasion d'un atelier sur la faille de Nîmes et autres failles associées qui s'est tenu la semaine dernière à Montpellier dans le cadre de l'Action RESIF « Failles actives France » (FACT) lancée au plan national en Avril dernier : https://www.resif.fr/spip.php?rubrique53 Stéphane Mazzotti, présent à la réunion et coordinateur, avec Hervé Jormard (IRSN), de l'axe « Aléa » à RESIF a proposé de faire remonter ses points au niveau de l'action « Sismicité » du Consortium (coord. F. Masson) et qu'ils puissent faire l'objet de demandes de financement portées par RESIF.

<u>Pour la connaissance de la structure géologique et ses liens avec le séisme :</u>

1) Réaliser un modèle 3D géologique local pour tester les modèles géophysiques. A partir de la géométrie 3D de la faille de la Rouvière tester si on peut (et surtout comment) recréer le signal INSAR (et inversement le signal INSAR permet-il de contraindre la géométrie). Faire aussi des études microtectoniques.

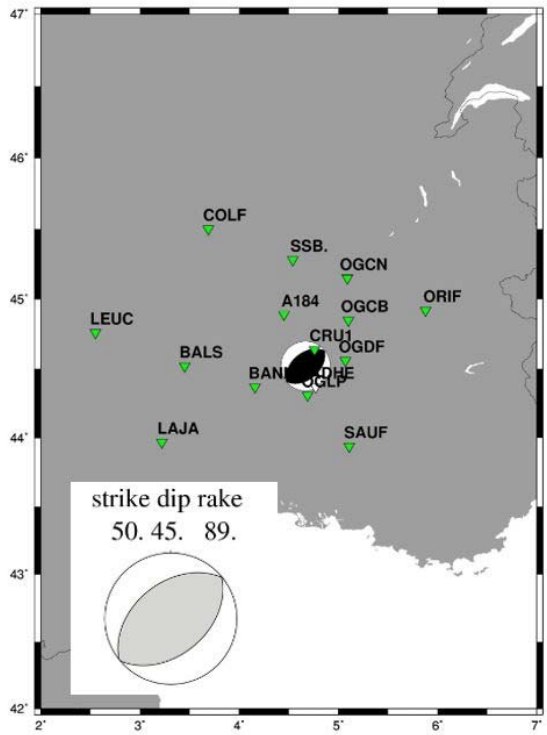
A plus long terme

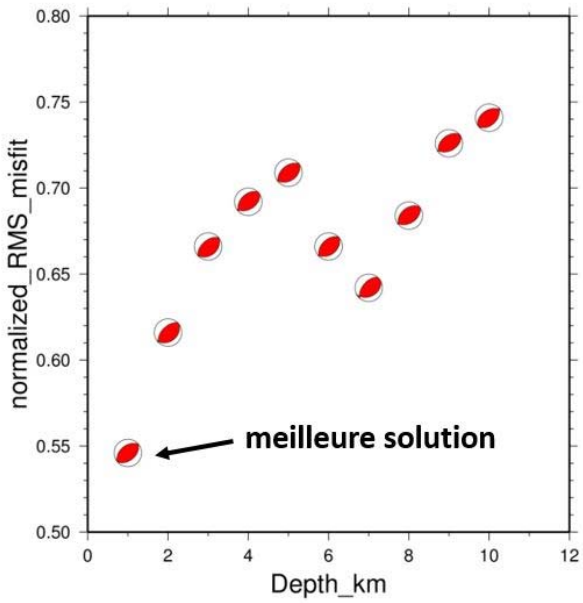
2) Réalisation de profils géophysiques pour imager la zone de faille (englobant la faille qui a rompu et la faille géologique) - 4 profils dont 1 en dehors de la zone qui a rompue pour essayer de comprendre l'arrêt de la rupture.

3) Généraliser le modèle 3D à l'échelle régionale pour discuter des réactivations possibles.

Annexe 1. Mécanismes au foyer obtenus par inversion des formes d'ondes régionales

Le mécanisme au foyer renseigne sur la géométrie possible de la faille et le type de mouvement de faille en profondeur au niveau du foyer (hypocentre) du séisme. Lorsqu'il est déterminé par inversion des formes d'ondes, il permet également de déterminer la magnitude de moment (Mw) et apporte une information sur la profondeur du foyer. Pour le séisme du Teil, au moins trois déterminations ont été effectuées par des équipes françaises. Les solutions sont proches, avec des mécanismes correspondant tous à un jeu de faille inverse dominant, un azimut compris entre N047 et N062 pour le plan plongeant vers le SE avec un angle (pendage) compris entre 45 et 59°. La profondeur optimale du foyer est trouvée entre 1 et 3.3 km. La magnitude de moment Mw est stable à 4.8 – 4.9.





Remarque 1 : il existe quelques variantes du mécanisme pour des valeurs de RMS assez proches de celle de la meilleure solution, pour des azimuts du plan entre 45° et 65°, et des pendages entre 45° et 50°

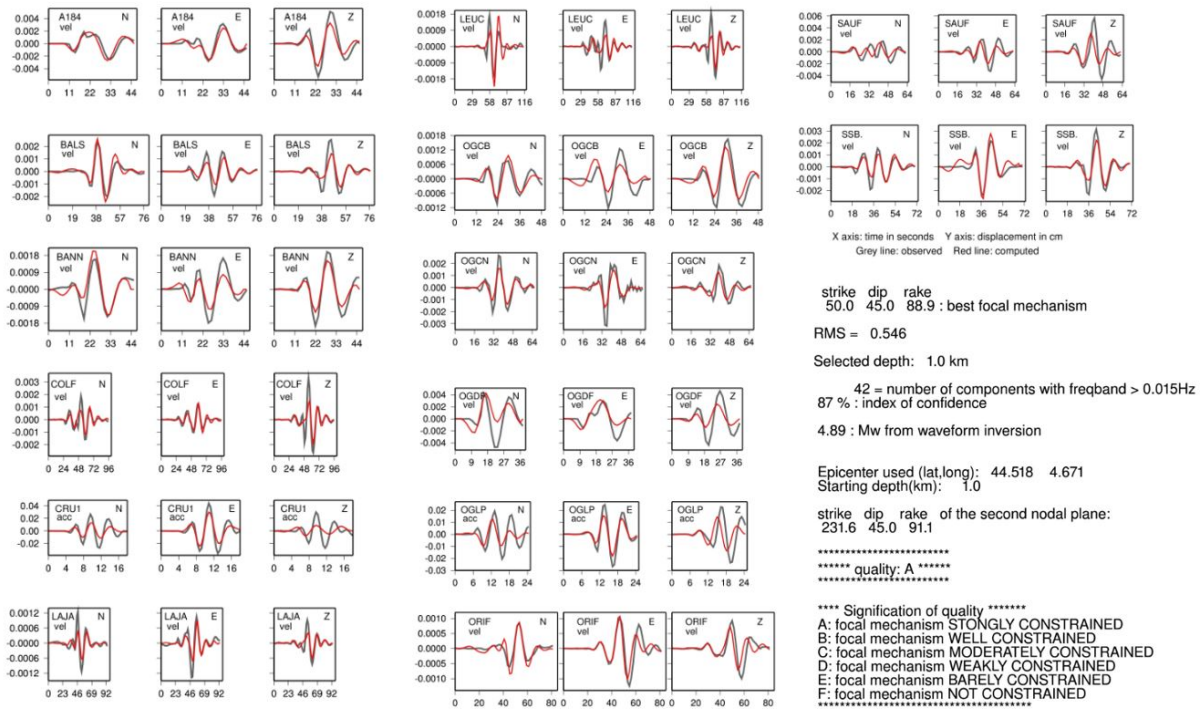


Figure N1. Détermination du mécanisme au foyer par inversion des formes d'ondes, par Géoazur (B. Delouis). La solution incorpore les stations les plus proches disponibles. Pour le plan du mécanisme correspondant à la faille reconnue géologiquement comme étant celle qui a produit le séisme, ce mécanisme donne un azimut N050, un pendage 45°SE, et un mouvement à peu près inverse pur. Le résultat optimal est trouvé pour une profondeur du foyer à 1 km (profondeurs inférieures non testées).

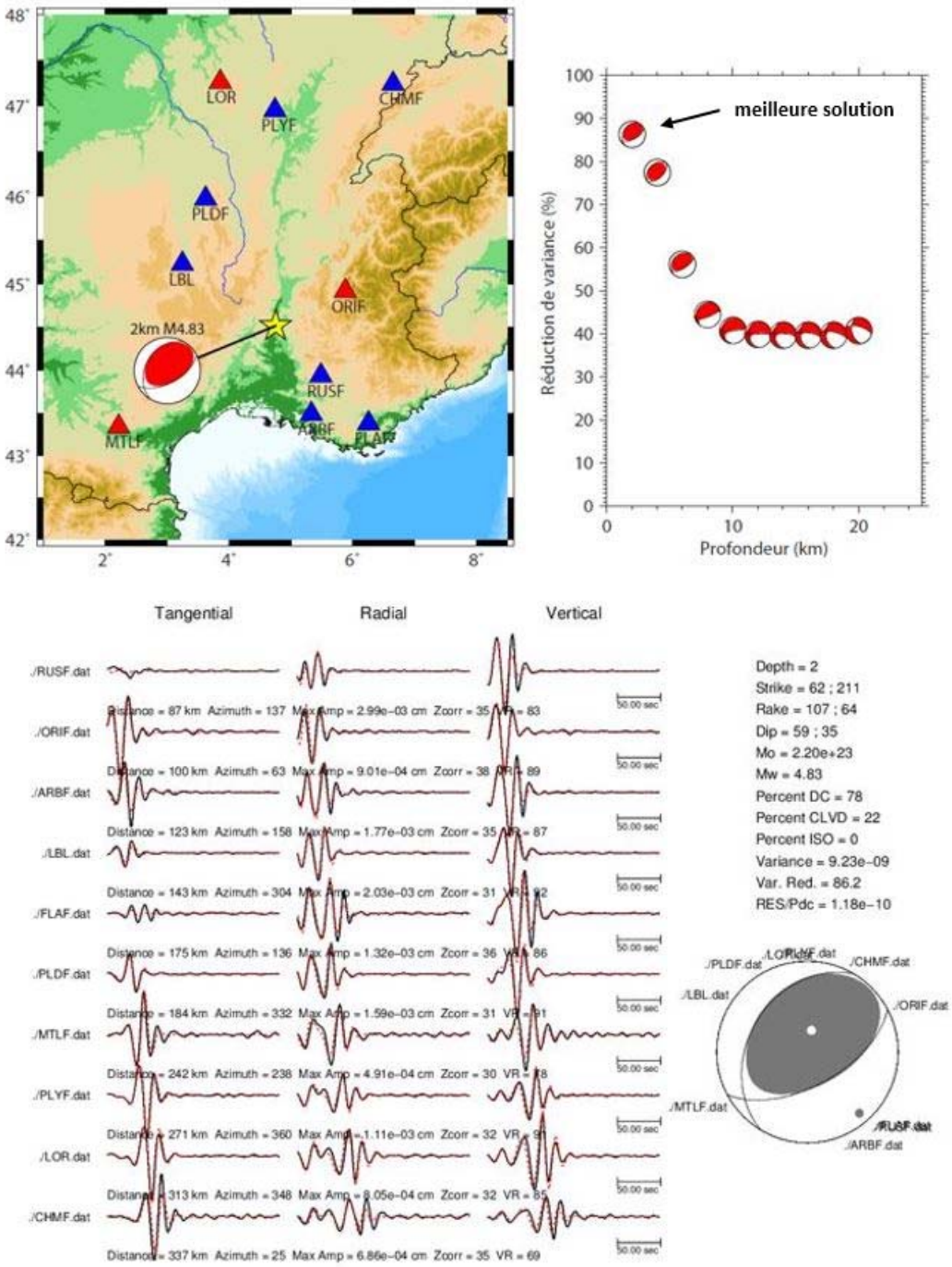


Figure N2. Détermination du mécanisme au foyer par inversion des formes d'ondes, par le IDG/CEA (A. Trilla). Pour le plan du mécanisme correspondant à la faille reconnue géologiquement comme étant celle qui a produit le séisme, ce mécanisme donne un azimut N062, un pendage 59°SE, et un mouvement essentiellement inverse. Le résultat optimal est trouvé pour une profondeur du foyer à 2 km (profondeurs inférieures non testées).

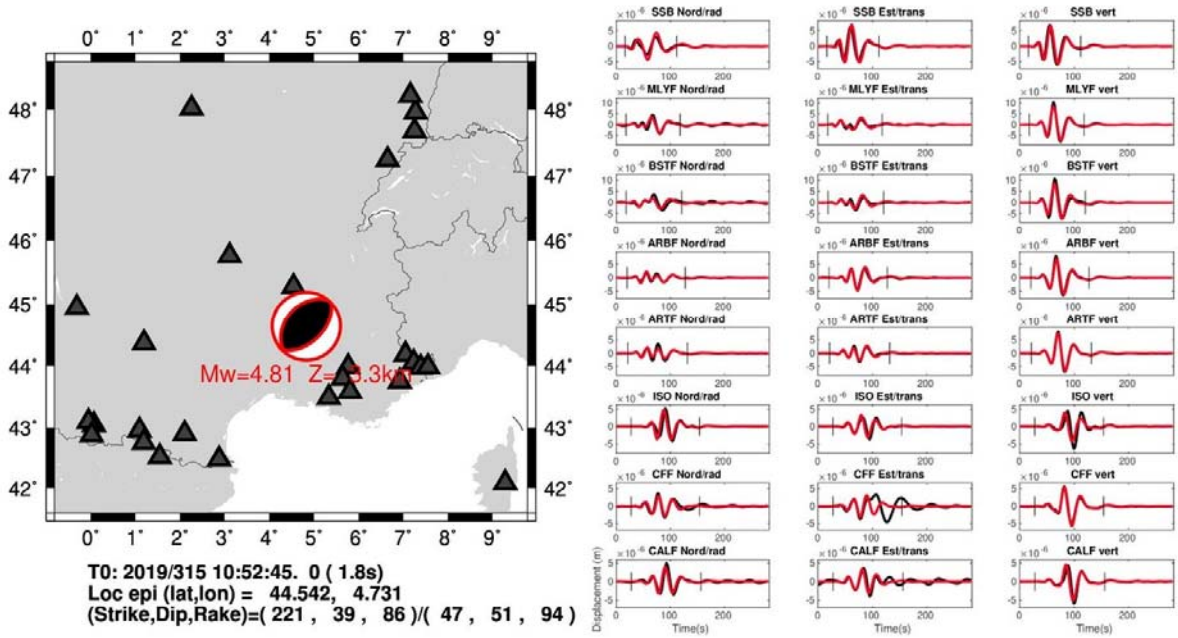
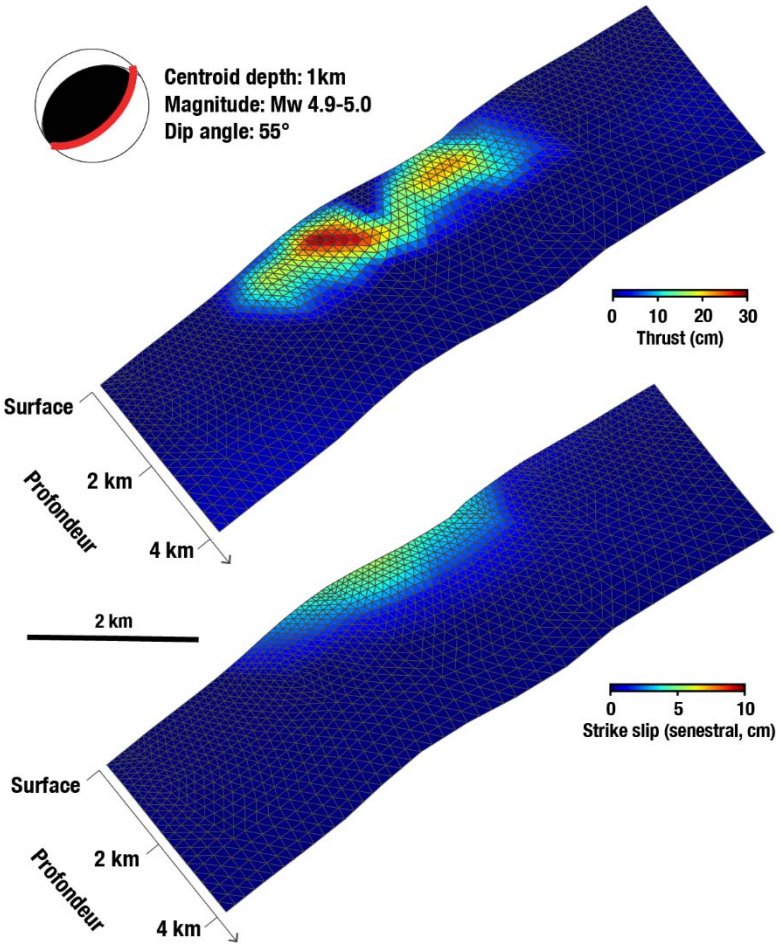


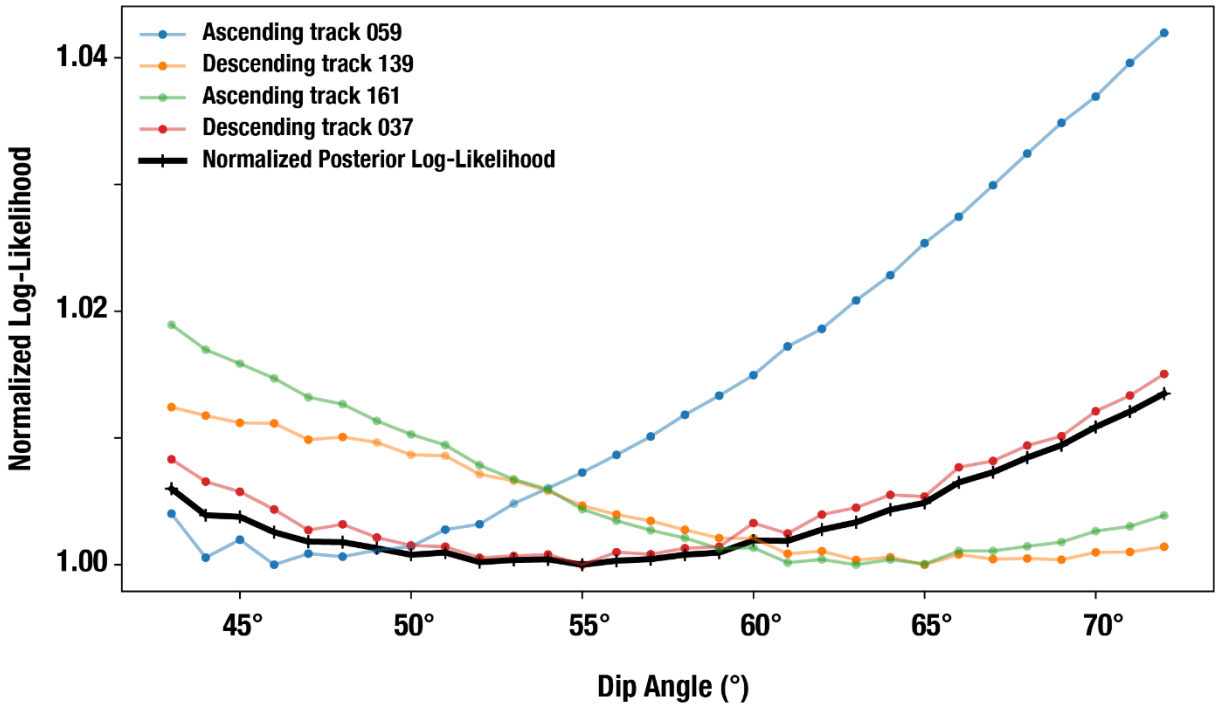
Figure N3. Détermination du mécanisme au foyer par inversion des formes d'ondes, par Géoscope - IPGP (M. Vallée). Pour le plan du mécanisme correspondant à la faille reconnue géologiquement comme étant celle qui a produit le séisme, ce mécanisme donne un azimut N047, un pendage 51°SE, et un mouvement essentiellement inverse. Le résultat optimal est trouvé pour une profondeur du foyer à 3.3 km.

Annexe 2. Informations complémentaires sur le modèle de glissement cosismique obtenu par inversion des données InSAR.



Le modèle de glissement proposé a été déterminé par ajustement aux données d'interférométrie par Radar à Synthèse d'ouverture (InSAR). Les données SAR sont acquises de façon régulière sur cette zone par la constellation Sentinel 1 de l'agence spatiale européenne (ESA). L'interferograme combinant deux acquisitions pré- et post-séisme est une mesure directe du déplacement du sol dans la direction de ligne de visée du satellite. Ici, nous avons utilisé 4 interférogrames indépendants (2 en visée ascendante, 2 en visée descendante), donnant 4 jeux de données indépendants.

A partir de la trace de la rupture en surface, nous avons propagé un plan de faille en profondeur sans variations de pendages. Nous discrétisons ensuite ce plan en triangles et recherchons la meilleure distribution de glissement sur cette faille permettant d'expliquer les données InSAR. Pour ce faire, nous considérons que le milieu est élastique et, au premier ordre, homogène (une amélioration tenant compte des propriétés élastiques variables du milieu est envisagée). Le modèle présenté est celui qui minimise l'écart aux données, ici défini comme la somme des carrés des résidus (i.e. différences entre données et prédictions du modèle) ainsi que de la convolution du glissement avec un noyau basé sur une fonction exponentielle pour rejeter les modèles considérés comme « non-physiques ». Le choix de la longueur d'onde du noyau de lissage est un compromis entre ajustement aux données et rugosité

de la solution. La norme ainsi minimisée correspond à la norme euclidienne dites des moindres carrés généralisée. Cette méthode a été décrite, utilisée et publiée de nombreuses fois pour de nombreux séismes et événements de glissement de par le monde.

Nous avons testé plusieurs angles de pendage différents afin de tester quelles valeurs sont les plus probables. La figure ci-dessous indique la qualité des ajustements aux données (ici représentée de façon normalisée égale à 1 lorsque celle-ci est minimale), considérant les différents interférogrames d'un côté (courbe colorées) et la norme finale minimisée (courbe noire). Le pendage optimal est de 55° mais des valeurs allant de 50° and 60° ne sont pas à exclure.