

Réunion bilan du projet FREMTEIL – 26-27 septembre 2024 - Viviers

Suite au séisme du Teil (11 novembre 2019, Mw 4,9) de nombreux travaux scientifiques ont été engagés dans le but de préciser les caractéristiques et l'origine de ce séisme emblématique qui s'est produit sur une zone de failles anciennes (le système de failles cévenol CFS) située dans un domaine intraplaque caractérisé par un très faible taux de déformation, ainsi que les implications en termes d'aléa dans une région (la vallée du Rhône) où la vulnérabilité est importante.

Une grande partie de ces travaux a été réalisée dans le cadre du projet FREMTeil (« Failles, Ruptures Et Mouvements forts dans la région du Teil: Quelles conséquences pour l'aléa sismique sur le faisceau nord-est cévenol (CFS) », PI J-F. Ritz) soutenu par l'INSU de 2021 à 2023. Plusieurs laboratoires académiques ont été impliqués (notamment Géosciences Montpellier, ISTERre, Géoazur, CEREGE) ainsi que plusieurs instituts (IRSN, EDF, CEA, CEREMA).

Le projet FREMTEIL avait pour ambition de répondre à plusieurs questions : La faille de la Rouvière, responsable du séisme du Teil, avait-elle déjà rompu dans le passé ? D'autres failles d'une CFS, notamment au niveau de la terminaison NE du faisceau pourraient-elles également produire ce type d'événements ? Le déclenchement du séisme du Teil pourrait-il être lié à l'activité anthropique à proximité de la faille (i.e. l'extraction de roches au niveau de la carrière Lafarge située au toit de la faille) ? Quel est le contrôle de la rupture sismique et des effets de site sur la distribution des dégâts et la variation spatiale du mouvement sismique ?

Une première réunion, avec plus de 35 participants, a été organisée en janvier 2023 (<https://www.epos-france.fr/blog/2023/01/04/reunion-du-projet-fremteil-sur-lalea-sismique-dans-le-nord-est-des-cevennes/>) et la réunion-bilan du projet s'est déroulée les 26 et 27 septembre 2024. Elle a réuni une vingtaine de participants (liste ci-dessus avec affiliation) des différents laboratoires à l'Hostellerie Charles de Foucault à Viviers. La dernière demi-journée était consacrée à des présentations didactiques destinées à présenter les résultats des recherches aux habitants de la région, (notamment aux riverains chez qui les travaux de recherche ont été menés et au « Collectif pour les sinistrés du séisme du 11/11/2019 »), ainsi qu'aux représentants des maires des villages situés dans la zone épiscopale (Le Teil, Saint-Thomé) et à quelques journalistes.

Les recherches se poursuivent et la "communauté" FremTeil a le projet de continuer à collaborer pour répondre aux questions qui restent posées (sismologie, mouvements forts, paléosismologie : toutes les failles du CFS n'ont pas été tranchées). Dans un premier temps l'objectif est avant tout de trouver de nouveaux financements (e.g. un projet ANR dans le cadre du PEPR Irima, ...).



Présentation au grand public des résultats du projet FREMTeil le vendredi 27 septembre :

Liste des participants :

Géosciences Montpellier : J-F Ritz, C. Thomasset, N. Cathelin; Isterre, Grenoble : C. Cornou, M. Causse; Géoazur : J-P. Ampuero, C. Larroque, M. Maxime Godano ; Géoresources Nancy : A. Gébelin ; IRSN :

Résumés des interventions :

Jeudi 26 et vendredi matin 27 septembre :

Les principales actions réalisées ces 2 dernières années ont été présentées (les résultats sont pour la plupart en cours de publication) :

Maxime Godano et Christophe Larroque ont présenté un modèle cinématique de la rupture co-sismique issu de l'inversion conjointe des données sismologiques et InSAR. L'utilisation du template matching a permis de détecter plus d'une centaine de répliques dont une grande partie a été relocalisée précisément par double différence. Les mécanismes au foyer ont pu être déterminé pour une vingtaine de ces répliques. La localisation précise du choc principal et des répliques montre que la stratification rhéologique des couches sédimentaires, alternant calcaires massifs, marno-calcaires et marnes, contrôle en partie la distribution de la sismicité : nucléation du choc principal et quantité de glissement sur le plan de faille ainsi que la nucléation des répliques.

Cécile Cornou a présenté les expériences de sismique passive et active conduites dans la ville du Teil ainsi que les simulations de dommages aux bâtiments qui indiquent une distribution spatiale des dommages observés largement contrôlée par la présence de dépôts alluvionnaires meubles en surface, de 10 à 20 m d'épaisseur, amplifiant le mouvement sismique dans la gamme de fréquences de résonance des bâtiments.

Matthieu Cause a présenté les résultats d'une expérience sur table vibrante réalisée au FCBA à Bordeaux, destinée à observer "en direct" le glissement d'une pierre tombale soumise à l'accélération du sol lors d'un séisme. Ces travaux font suite aux observations de déplacements de pierres tombales après le séisme du Teil. Ces expériences vont permettre de calibrer un modèle de friction et de traduire ce type d'observation en paramètre du mouvement du sol (par exemple le pic de vitesse). L'objectif final est d'établir un protocole pour obtenir rapidement, à la suite d'un séisme majeur, des estimations quantitatives du mouvement fort dans les zones de dégâts".

Sébastien Hok a présenté une modélisation dynamique de la rupture du séisme du Teil. Ce travail permet de discuter certains aspects particuliers du séisme : rupture de surface, propagation de la rupture sur une ou plusieurs failles, champ de contrainte à l'œuvre. Des modèles du séisme ont été élaborés dans le but de comprendre l'interaction entre propagation de la rupture profonde et expression de la rupture de surface, et s'appuient sur une comparaison avec les observations. Les résultats obtenus sont utilisés pour la simulation des mouvements forts en champ proche (présentation de Hongyi Su).

Hongyi Su a réalisé des simulations afin de quantifier la variabilité des mouvements forts en champ proche de la faille de La Rouvière lors du séisme de 2019 par une approche conjointe de modélisation cinématique et dynamique de la rupture. Les paramètres de friction et de contrainte hétérogènes sous une loi de friction linéaire d'affaiblissement du glissement et des critères de rupture de Mohr-Coulomb sont dérivés en appliquant la méthode de Tinti et al. (2005, 2023) avec le code de rupture dynamique 3D open-source SeisSol. La distribution de glissement résultante est compatible avec le modèle cinématique. Les premiers résultats montrent que le mouvement du sol dépend du modèle de source choisi et de la paramétrisation du modèle dynamique

Aurore Laurendeau a analysé les variations régionales observées dans les mesures d'intensité des mouvements du sol (PGA, PGV, durée, spectres de réponse) enregistrées lors du séisme du Teil. En raison de la très faible profondeur du séisme (~1km), des ondes de Rayleigh dominant le signal à des fréquences inférieures à 1 Hz, principalement dans les directions nord-ouest et sud-est, et les modèles de prédiction sous-estiment ces effets. À des fréquences plus élevées, les mouvements du sol sont fortement atténués dans la région sud-est (bien en dessous des prédictions). Ce phénomène peut être attribué à l'atténuation régionale, à la structure géologique et/ou aux conditions géologiques locales (présence d'une couche à moindre vitesse en profondeur) combinées à la profondeur extrêmement faible de l'événement sismique.

Diego Mercerat a présenté les mesures de vibrations ambiantes réalisées dans des bâtiments courants en maçonnerie dans les zones touchées par le séisme de 2019 afin d'estimer la vulnérabilité sismique du bâti. Des vibrations ambiantes ont aussi été enregistrées dans le clocher et à l'intérieur de la nef de l'Eglise de l'Assomption, en centre-ville, entre janvier et mai 2023, quelques mois avant sa démolition définitive. L'analyse modale opérationnelle confirme les résultats obtenus lors des missions de reconnaissance réalisées en 2022. Le suivi temporel de fréquences et des coefficients d'amortissements en relation avec les variations de conditions météorologiques est en cours de réalisation.

Jean-Paul Ampuero a présenté les résultats d'essais de frottement sur des échantillons de roche prélevés à la surface. Ces matériaux sont des marnes et calcaires représentatifs des couches traversées par la faille de La Rouvière aux profondeurs de la rupture du séisme du Teil. Les essais de laboratoire ont été effectués à Géoazur en collaboration avec François Passelègue, et à l'Université de Utrecht (HPT Lab, EPOS-NL, en collaboration avec André Niemeijer). Il a aussi présenté des modèles théoriques et numériques montrant que la portion superficielle d'une faille, même si elle a des propriétés de frottement nominale stable, peut être déclenchée sismiquement par une extraction de roche en surface.

Didier Georges a exposé les objectifs et les défis d'un jumeau numérique en matière de gestion des risques et des risques sur le territoire du Teil élargi aux centres nucléaires de Cruas et du Tricastin. La vocation du jumeau est de prendre en compte l'ensemble des risques affectant ce territoire et notamment des scénarios de crises issues d'événements sismiques comme celui du 11/11/2019.

Stéphane Baize a présenté une étude dont l'objectif est de préciser les régimes tectoniques subis par le système de failles des Cévennes, et en particulier l'âge de son inversion tectonique entre son dernier mouvement normal connu (Oligocène) et le séisme de 2019. Plus de 70 marqueurs cinématiques (i.e. plans striés) associés aux failles ont été échantillonnés et une vingtaine ont pu être datés par la méthode U-Pb. Plusieurs épisodes de déformation, de l'Albien à l'Oligocène, sont caractérisés mais aucun échantillon n'a enregistré la compression alpine du Miocène, ni aucun autre événement local compressif. L'âge de l'inversion tectonique de la faille des Cévennes reste donc énigmatique.

Aude Gébelin a présenté l'analyse des cristallisations syntectoniques réalisée sur les carottes du premier forage traversant la faille de La Rouvière vers 25 m de profondeur. Plusieurs générations de fractures ont été reconnues dans le cœur de faille. L'étude microstructurale couplée à la géochronologie U-Pb par LA-ICP-MS sur des ciments fins de calcite ont permis de mettre en évidence un jeu polyphasé (entre ca. 25 et 90 Ma). Les échantillons étudiés n'ont pas enregistré de mouvement associé à la tectonique Alpine, il semble donc qu'une longue période de quiescence caractérise la faille de La Rouvière depuis 25 Ma.

Nicolas Cathelin a montré les résultats de 4 sites de tranchée sur la faille de Saint Montant bordant le système de failles des Cévennes au SE. Deux indices d'activité Quaternaire suggèrent une cinématique transpressive sénestre. Cependant, dans certains cas il est encore difficile de conclure définitivement entre un mouvement purement tectonique, un mouvement gravitaire, ou un mouvement gravitaire sous sollicitation dynamique. D'autres indices morphologiques à plus grande échelle (cônes colluviaux décalés) semblent être en accord avec une cinématique décrochante de la faille, du moins au Plio-Quaternaire.

Camille Thomasset a mis en évidence une rupture de surface le long de la faille de Marsanne survenue entre 340 et 230 ka. Cette rupture témoigne d'un mécanisme de faille inverse, entraînant un soulèvement d'environ 50 cm du bloc sud-est ce qui correspondrait à un séisme de magnitude minimum Mw 5,9 (d'après les fonctions statistiques qui relient le déplacement de surface et la magnitude). Les caractéristiques de cette rupture sont comparables à celles observées lors du séisme du Teil avec une magnitude plus élevée.

Jean-François Ritz a présenté une synthèse des dernières investigations paléosismologiques le long du segment central de la faille de la Rouvière qui a cassé en 2019. L'âge des déformations (fissures, bande de déformation dans les clastes) mises en évidence dans les géolifractions du Würm supérieur recouvrant l'escarpement de la faille est compris entre 13,3 et 5,3. Par ailleurs, la partie nord du segment central semble avoir été affecté par un séisme beaucoup plus récent, postérieur à 1300 AD. Il pourrait s'agir du séisme historique de 1549 AD (appelé séisme de Montélimar) mais d'autres investigations paléosismologiques sont nécessaires pour confirmer cette observation.

Vendredi 27 septembre après-midi :

C. Larroque, C. Cornou, J.P. Ampuero et J.F. Ritz ont présenté les principaux apports de ces recherches au grand public. Une trentaine de personnes était présente : représentants de la mairie du Teil, de Viviers, du collectif des sinistrés du séisme du Teil, des riverains ayant accueilli les scientifiques sur le terrain (stations sismologiques, tranchées paléosismologiques) et des journalistes (France bleu Drôme-Ardèche, Le Dauphiné Libéré, La Tribune de Montélimar).

Participants

(Géosciences Montpellier)

Jeff Ritz
Camille Thomasset
Nicolas Cathelin

(IRSN – Fontenay-aux-Roses)

Stéphane Baize
Hervé Jomard
Céline Gélis
Sébastien Hok
Aurore Laurendeau
Hongyi Su

(EDF, TEGG, Aix-en-Provence)

Kevin Manchuel
Romain Leroux-Mallouf

(Isterre, Grenoble)

Cécile Cornou
Matthieu Causse

(Géoazur, Nice / Sophia-Antipolis)

Jean-Paul Ampuero
Christophe Larroque
Maxime Godano

(Géoressources Nancy)

Aude Gébelin (Visio)

(CEREMA)

Diego Mercera

(GIPSA-lab, UMR 5216) : / Université Grenoble Alpes)

Didier Georges:
Gildas Besançon

Publications (parues ou sous presse ; NB : plusieurs autres publications sont en cours de rédaction)

Cathelin, N., Ritz, J-F., Baize, S., Blard, P-H., and Malcles, O. Using cosmogenic ^3He and radiocarbon dating for incision and uplift rates estimations at the margin of the Massif Central along the northeast termination of the Cévennes fault system. *Sous Presse à Quaternaire*.

Cathelin N., Analyse paléosismologique des failles de saint Montant et de Bayne-Roche-Renard, et étude géomorphologique de la terminaison Nord-Est du faisceau de faille des Cévennes (Vallée de L'Escoutay). Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier, Soutenance prévue pour le 26 Novembre 2024.

Combey, A., Mercerat, D.E., Gueguen, P., Langlais, M., Audin, L., 2022. Postseismic Survey of a Historic Masonry Tower and Monitoring of Its Dynamic Behavior in the Aftermath of Le Teil Earthquake (Ardèche, France). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 112 (2), 1101–1119, doi: <https://doi.org/10.1785/0120210258>.

Gébelin, A., Matonti, C., Larroque, C., Carr, P., and Ampuero, J.-P. First in situ calcite U-Pb dating revealing the past episodes of the 2019 Le Teil Earthquake (France). Submitted to *Comptes-Rendus Géoscience*.

Godano, M., Larroque, C., Delouis, B., Ampuero, J.P., Courboux, F., Deschamps, A., van den Ende, M., Baize, S., and Ritz, J.F. Back to the source : connecting the seismological observations of Le Teil earthquake (Mw4.9, 2019/11/11, France) to the local geology. Submitted to *Journal of Geophysical Research*.

Laurendeau, A., Causse, M., Cushing, M.E., Gélis, C., Lancieri, M., Rusch, R., Fahed, P., Cornou, C. and Hok, S. The extremely shallow Mw 4.9 2019 Le Teil earthquake, France : main ground motion features and comparison with ground motion models. Submitted to *Seismica*.

Ritz J-F, S. Baize, N. Cathelin, C. Thomasset, M. Riesner, E. Hannouz, M. Ferry, C. Larroque, L. Audin, L. Bollinger, K. Manchuel, C. Sue, C. Vergnault, M. Rizza, H. Jomard, P. Arroucau, R. Le Roux-Mallouf, Paleoseismological investigations of the La Rouvière fault, unexpected source of the 11-11-2019, Mw4.9 Le Teil surface rupturing earthquake (Cévennes fault system, France), *Proceedings of the 11th International INQUA Workshop on Paleoseismology, Active Tectonics and Archaeoseismology ("PATA Days") 25 - 30 September 2022, Aix-En-Provence, France*.

Thomasset, C., Ritz, J.F., Pouliquen, S., Manchuel, K. and Le-Roux-Mallouf, R., 2024. Geometry and tectonic history of the Northeastern Cévennes Fault System (Southeast Basin, France): new insights from deep seismic reflection profiles. *BSGF - Earth Sci. Bull.*, 195, 17, <https://doi.org/10.1051/bsgf/2024016>.

Thomasset C., Cadre structural et cinématique de la terminaison Nord-Est du faisceau de faille des Cévennes (NCFS) et analyse paléosismologique des failles de Marsanne et de Grangette, Thèse de doctorat de l'Université de Montpellier, Soutenance prévue pour le 26 Novembre 2024.