

Quelle place pour l'imagerie sismique dans la caractérisation des failles en domaine intraplaque ?

How to use seismic imagery for fault characterization in intraplate domain ?

Kevin MANCHUEL¹, Sylvain Pouliquen¹, Christophe Vergnault¹, Pierre Arroucau¹, Romain Le Roux Mallouf¹, Jean-François Ritz²

¹EDF-DIPNN-DI-TEGG, 905 av. Du Camp de Menthe, 13097 Aix en Provence, Cedex 02

²Geosciences Montpellier, Univ. Montpellier, CNRS, Univ. Antilles, Place E. Bataillon, 34095 Montpellier, Cedex 05

Résumé: Localisés à distance des grandes limites de plaques lithosphériques, les domaines intraplaques présentent de faibles vitesses de déformation géologique, se traduisant par des niveaux de sismicité faibles à modérés, avec des temps de retour longs entre deux séismes significatifs. Dans ces régions, les processus de surface sont plus rapides que les processus tectoniques et tendent à effacer les éventuelles traces de rupture laissées en surface par des séismes majeurs du passé. L'estimation de l'activité des failles dans de tels contextes nécessite la mise en œuvre d'une approche pluridisciplinaire combinant géophysique, géologie et paléosismologie. Nous présentons ici l'approche développée par EDF, dans le cadre de ses études d'aléa sismique, pour améliorer la connaissance des failles en France métropolitaine, en se focalisant sur l'utilisation de la sismique réflexion (imagerie) à différentes échelles. Les lignes sismiques de Haute Résolution (HR ; i.e. sismique profonde de type pétrolière) permettent d'estimer la localisation et la géométrie des failles en profondeur, ainsi que leur histoire cinématique. La sismique ultra haute résolution en ondes S (UHRS) donne quant à elle une information sur la localisation des failles en très proche surface et permet de localiser d'éventuelles tranchées paléosismologiques visant à analyser l'activité des failles.

Abstract. Intraplate domains, located far away from lithospheric plate boundaries, exhibit low deformation and geological deformation velocities and are characterized by low to moderate seismicity with long return period between two significant earthquakes. In these regions, surface processes act faster than tectonics and tend to erase the geomorphological surface evidences produced by large past earthquakes. Faults activity assessment in such contexts requires the implementation of a multi-disciplinary approach that combines geophysics, geology and paleoseismology. We present here the approach developed by EDF to improve fault knowledge in metropolitan France for seismic hazard assessment purpose, with a focus on the use of seismic reflection imagery at different scales. High Resolution (HR) seismic lines allow characterizing faults location geometry at depth, together with their kinematic history. Ultra high resolution seismic (UHRS) in S waves, gives information on fault location in subsurface and allows defining paleoseismological trench location to study fault quaternary activity.

1 Introduction

La majeure partie de la France métropolitaine présente des vitesses de déformation géologiques horizontales très faibles, et se comporte comme un bloc rigide avec une déformation interne ne dépassant pas 0.5 mm/an [1], [2] et [3]. Les vitesses de déformation horizontales les plus importantes sont observées dans les Alpes, et sont néanmoins inférieures au mm/an [4]. Ceci se traduit, dans ce type de régions dites intraplaques, par une sismicité faible à modérée, avec par moment l'occurrence de séismes significatifs, comme ce fut par exemple le cas pour la France avec les séismes de Bâle (1356) et de Lambesc (1909), de magnitude respective $M_w= 6.5$ et $M_w= 5.7$. Le temps de retour de ces séismes majeurs est long (quelques centaines à plusieurs milliers d'années) et nécessite d'observer l'activité sismique sur des temps longs pour rendre compte du comportement sismogénique des structures tectoniques.

La Figure 1 présente les différentes échelles de temps auxquelles la sismicité est analysée en France métropolitaine :

- la sismicité instrumentale, qui correspond aux 60 dernières années au cours desquelles l'activité sismique a pu être enregistrée par les réseaux d'observation sismologique ;
- la sismicité historique, qui correspond à la connaissance des séismes du passé (~1000 ans) obtenue au travers de l'analyse des témoignages laissés dans les archives historiques (registres paroissiaux, notariaux, livres de raison,...). Les données relatives aux séismes historiques pour la France métropolitaine sont stockées dans la base de données SISFRANCE (EDF, BRGM, IRSN) [5];
- la paléosismologie, qui vise à observer in situ et analyser les déformations laissées par des séismes anciens dans les couches géologiques. La période visée par ces investigations se limite en général au Quaternaire, qui est la période généralement retenue pour considérer qu'une faille est active (i.e. en capacité de générer encore aujourd'hui des séismes significatifs).

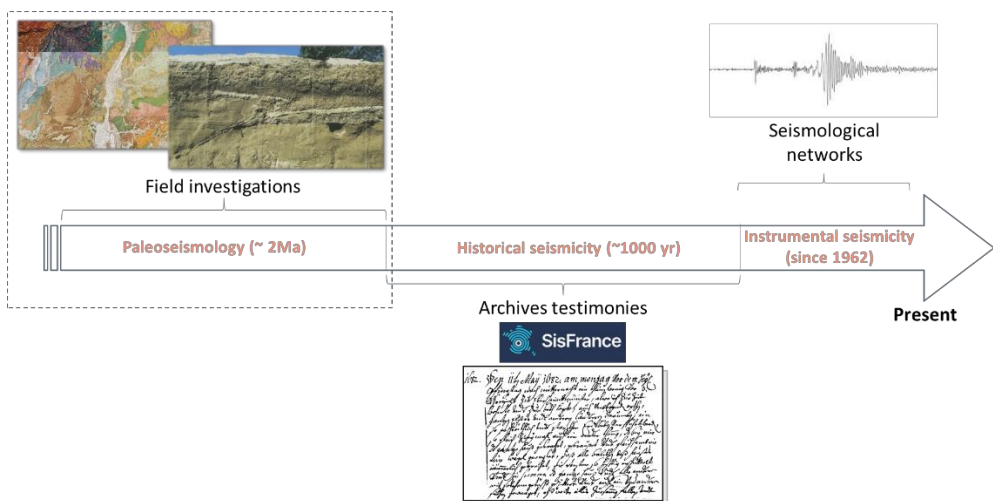


Fig.1 : Echelles d'observation de l'activité sismique en France métropolitaine. Le rectangle en traitillé indique la période d'observation dont il est question ci-après. Carte géologique au 1/50000 (feuille de Valréas) et photo de l'indice néotectonique de Courthézon.

La caractérisation des failles actives dans ces régions est un véritable challenge, dans la mesure où les processus de surface sont plus rapides que les processus tectoniques et contribuent à effacer les traces laissées par les séismes du passé dans le paysage. Des efforts de compilation des données relatives aux indices néotectoniques et aux failles en France métropolitaine ont été réalisés ces dernières années :

- le comité NEOPAL (https://data.oreme.org/fact/fact_map/neopal) et [6] ont en effet recensé et analysé les indices de déformation quaternaire publiés dans la littérature. Au final seulement quelques indices seulement ont été confirmés, de nombreux ont été rejetés après analyse (notamment par manque de contrainte sur l'âge des déformations observées), et certains sont considérés comme des indices « possibles » ;
- Jomard et al. (2017) [7] ont publié une base de données des failles potentiellement actives (BDFa), qui regroupe les informations disponibles pour les failles localisées dans un rayon de 50 km autour des installations nucléaires. Pour chaque faille, l'âge du dernier mouvement est indiqué s'il est connu. Une analyse statistique des paramètres des failles renseignées dans cette base de données souligne une connaissance parcellaire de nombre de ces paramètres, voire le caractère lacunaire de certains paramètres clés tel que les vitesses de glissement le long des failles (Figure 2).

Le niveau de connaissance trop souvent limité des indices de déformation quaternaire et des paramètres géologiques, tectoniques et sismologiques des failles, conduit à des incertitudes parfois importantes associées aux études d'aléa sismique, qu'elles soient déterministes ou probabilistes. Les informations contenues dans ces compilations sont des données d'entrée de premier ordre lorsque l'on réalise des études d'aléa sismique, que ce soit dans un cadre déterministe ou probabiliste. Malheureusement, le degré de connaissance associé à ces indices de déformation et/ou ces failles est souvent parcellaire et conduit à de grandes incertitudes dans les calculs d'aléa sismique.

Dans le but d'améliorer la connaissance des failles, et par conséquent de réduire les incertitudes des études d'aléa sismique impliquant des failles, EDF a développé et mis en œuvre, avec ses collaborateurs, une approche graduelle d'observation et de caractérisation des failles, combinant géophysique, géologie, tectonique et paléosismologie. Cette approche est présentée ci-après et illustrée au travers de l'exemple de la caractérisation en cours de la terminaison Nord-Est du faisceau cévenol.

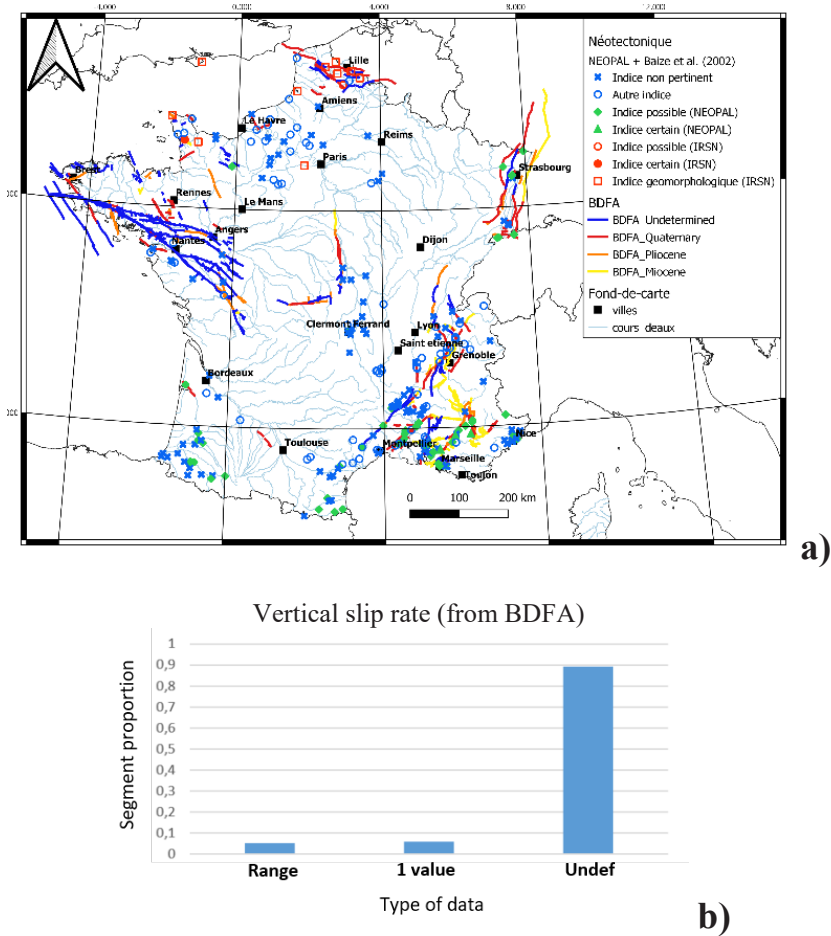


Fig. 2 : a) Indices néotectoniques issus de la base de données NEOPAL et de Baize et al. (2002), ainsi que les failles de la BDFA (Jomard et al. (2017)). b) Proportion des segments de failles de la BDFA pour lesquels le taux de déplacement vertical est connu.

2 Méthodologie de caractérisation des failles

La méthodologie mise en place, présentée sur la Figure 3, consiste en une approche graduée, basée sur un zoom progressif sur les structures tectoniques. L'objectif est de pouvoir, au fur et à mesure des investigations, accroître le degré de finesse des observations afin de caractériser les failles en terme de géométrie, de cinématique, l'âge du ou des derniers mouvements et si possible de vitesses de déformation. Dans cette approche progressive, la mise en œuvre de la méthode suivante n'est réalisée que si la méthode précédente ne permet pas de conclure quant à l'activité de la faille (i.e. dernière déformation observée > 2Ma).

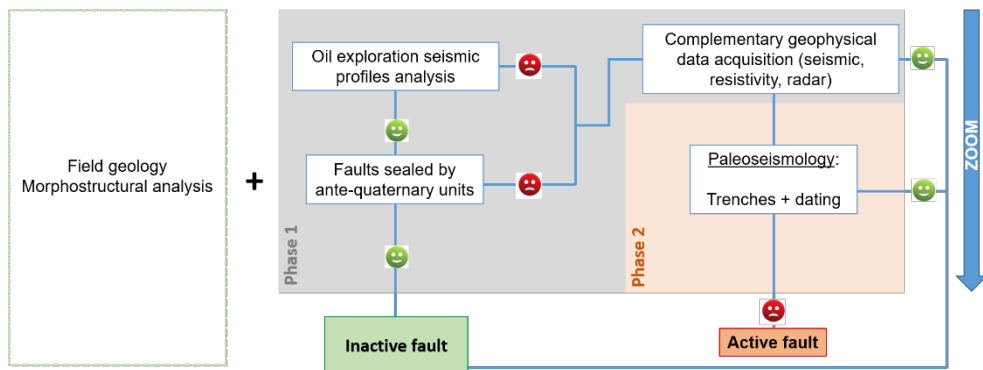


Fig. 3 : Approche mise en œuvre par EDF pour la caractérisation des failles en domaine intraplaque.

On distingue dans le logigramme présenté dans la Figure 3, des reconnaissances de surface (levés géologiques de terrain et analyse morphostructurale lorsque cela est possible/pertinent) et des investigations du sous-sol. Les deux sont complémentaires et sont confrontées et analysées conjointement pour aboutir à la construction du modèle de faille final. Les reconnaissances de surface peuvent être menées tout au long de l'étude, alors que les investigations du sous-sol suivent un ordre précis visant à zoomer progressivement sur les failles jusqu'à aller les observer *in situ* dans les tranchées paléosismologiques.

Afin d'optimiser les coûts et de valoriser les données existantes, les profils sismiques pétroliers de Haute Résolution (HR) recoupant perpendiculairement les failles d'intérêt sont récupérés et retraités. L'objectif, avec ces données profondes, est de déterminer i) la localisation des failles dans les premiers kilomètres sous la surface, ii) leur histoire cinématique et si possible iii) l'âge de leur dernier mouvement. Lorsque cette donnée d'imagerie profonde n'existe pas, une campagne d'acquisition peut alors être réalisée (cf§ 3).

Dans la mesure où les données de sismique HR ne permettent généralement pas d'imager les premières centaines de mètres sous la surface, la géométrie en proche surface et l'âge du dernier mouvement des failles non scellées par des terrains profonds et anciens (>2 Ma) ne sont pas contraints par ces données. Des acquisitions complémentaires sont alors mises en place, avec dans un premier temps des profils sismiques de Très Haute Résolution (THR) afin de préciser la localisation des failles dans les premières centaines de mètres sous la surface. Si l'analyse des images ne permet pas de conclure à une activité anté-quaternaire des failles, alors une acquisition sismique d'Ultra Haute Résolution (UHRS), en ondes P et/ou en ondes S, est mise œuvre afin d'imager la très proche surface et de déterminer l'implantation des tranchées paléosismologiques.

Cette approche est actuellement en cours de déploiement sur la terminaison Nord-Est du faisceau cévenol, suite au séisme du Teil (11/11/2019) qui s'est produit sur la faille de la Rouvière dont la rupture a atteint la surface [8]. Ces travaux se font en collaboration avec les laboratoires universitaires de Géosciences Montpellier, ISTERre, CEREGE, Géoazur, ainsi qu'avec l'IRSN et le CEA, dans le cadre de l'action FACT (Failles ACTives France) de l'action transverse Sismicité du consortium RESIF (<https://www.resif.fr/actions/action-transverse-sismicite/>). Cette dernière a pour objectif de réévaluer les bases de données existantes (NEOPAL et BDFA) et de les compléter pour une mise à jour des connaissances sur les failles.

3 L'exemple de la terminaison Nord-Est du faisceau cévenol

La terminaison Nord-Est du faisceau de failles cévenoles est une structure majeure du Sud-Est de la France, qui marque la bordure Est du Massif Central. Il s'agit d'un accident hérité de la tectonique paléozoïque, et qui a connu depuis une histoire tectonique polyphasée, marquée notamment à l'Oligocène par une phase d'extension [8] [9]. Le séisme du Teil, en faille inverse, suggère que le système soit à l'heure actuelle en compression. La mise en place du logigramme (Figure 3) a pour objectif d'affiner la connaissance des failles du faisceau Nord-Est cévenol, dans le but d'affiner les études d'aléa sismique dans la région.

Dans la mesure où aucune ligne sismique pétrolière n'est disponible au travers de la zone d'intérêt, de nouvelles acquisitions sismiques ont été réalisées. La Figure 4a présente la localisation de ces acquisitions sismiques HR qui se sont déroulées en juin 2020 et septembre 2021. Les résultats de la première campagne d'acquisition (lignes traitillées noires sur la Figure 4a) ont mis en avant des difficultés d'acquisition, liés d'une part à la présence de terrains urgoniens karstifiés et hors nappe agissant comme un masque à l'émission et à la réception des ondes, et d'autre part à la présence de terrains pliocènes qui piègent et atténuent fortement une partie du signal empêchant d'imager de façon satisfaisante les unités géologiques localisées en dessous. Afin de pallier ces difficultés et tenter d'obtenir une image exploitable du sous-sol dans les 5-6 premiers kilomètres, une seconde campagne d'acquisition a été dimensionnée et réalisée en septembre 2021 (traits noirs pleins sur la Figure 4a), en évitant au maximum les terrains urgoniens dénoyés et en utilisant des sources sismiques plus puissantes (3 camions M26 60.000Lbs – Figure 4b – par point vibré en 2021 vs 1 camion Hemi 48.000Lbs par point vibré en 2020). Les paramètres d'acquisition des lignes acquises en 2021 sont présentés dans le tableau 1.

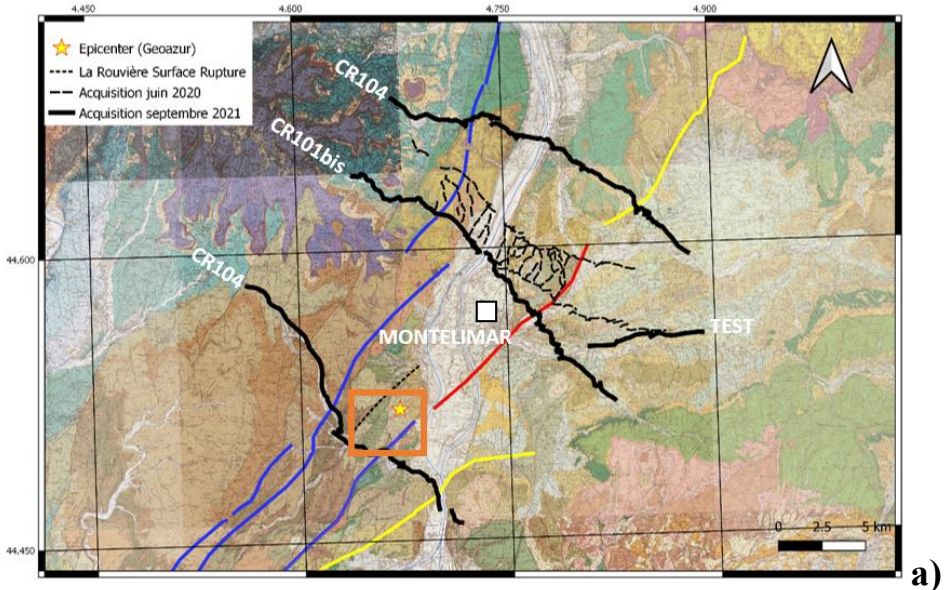




Fig. 4 : a) localisation des failles et des lignes sismiques acquises HR acquises pour caractériser les failles en profondeur. La ligne « TEST » représente le tronçon sur lequel ont été réalisés les test de calibration de la campagne. Le rectangle orange délimite l’emprise de la carte de la Figure 5. b) sources sismiques de la campagne d’acquisition sismique HR de septembre 2021 (camions M26 60.000Lbs).

Tableau 1. Paramètres d’acquisition sismique HR septembre 2021

Sweep			
6 – 65 Hz			
Inter-tirs			
7.5 m			
Inter-traces			
5 m			
Géométrie des lignes (cf Figure 4a pour leur localisation)			
	Longueur	Positions RP	Position VP
Ligne Tests	7	1309	872
Ligne CR103	20	3932	2621
Ligne CR101bis	25	3988	2659
Ligne CR104	20	3323	2215

Le traitement des données a été réalisé au cours du dernier trimestre 2021 et les lignes sismiques sont à l’heure actuelle en cours de calage et d’interprétation. La qualité des données permet d’obtenir des images exploitables jusqu’à 7-8 km sous la surface. Les structures tectoniques de la zone ressortent particulièrement bien, et les horizons clés ont pu être identifiés grâce à l’utilisation des données de puits dans la région. On retrouve principalement l’histoire tectonique extensive oligocène, avec des failles listriques à pendage Sud-Est qui décalent les séries mésozoïques et s’enracinent toutes sur un niveau de décollement triasique bien marqué. La phase de compression pyrénéenne est également visible. La résolution en proche surface est relative pauvre et ne permet pas d’imager correctement le prolongement des failles dans les premières centaines de mètres. Une fois les failles bien localisées en profondeur et le schéma structural élaboré, une acquisition de lignes sismique plus de haute résolution (THR dans un premier temps) pourra être réalisée pour la poursuite du logigramme (Figure 3), dans le but de définir l’activité des failles.

En parallèle de ces reconnaissances en profondeur, des acquisitions de sismique UHRS ont été réalisées en juin 2020 au travers de la faille de Marsanne dont un segment est indiqué comme actif au Quaternaire dans la BDFA [7] (segment rouge sur la Figure 4a). Ce test de la méthode UHRS dans la zone d’étude à des fins d’observation de failles a pu être réalisé en

amont des investigations profondes, à la faveur d'une cartographique géologique relativement précise de la faille et de la présence d'une terrasse plio-quaternaire drapant le tracé de la faille. La localisation de la ligne sismique UHRS et le résultat d'imagerie obtenu sont présentés sur la Figure 5. On distingue clairement un changement de géométrie des horizons imagés à très faible profondeur (i.e. dans les 10 premiers mètres sous la surface) à mesure que l'on va vers le Sud, au niveau du CDP 400. Ce changement de géométrie pourrait traduire la présence d'une faille individualisant un compartiment affaissé au Sud de la faille, avec la mise en place d'une sédimentation en éventail. La qualité de l'image et l'interprétation réalisée permettent de proposer deux sites pour l'implantation de tranchées paléosismologiques (Figure 5).

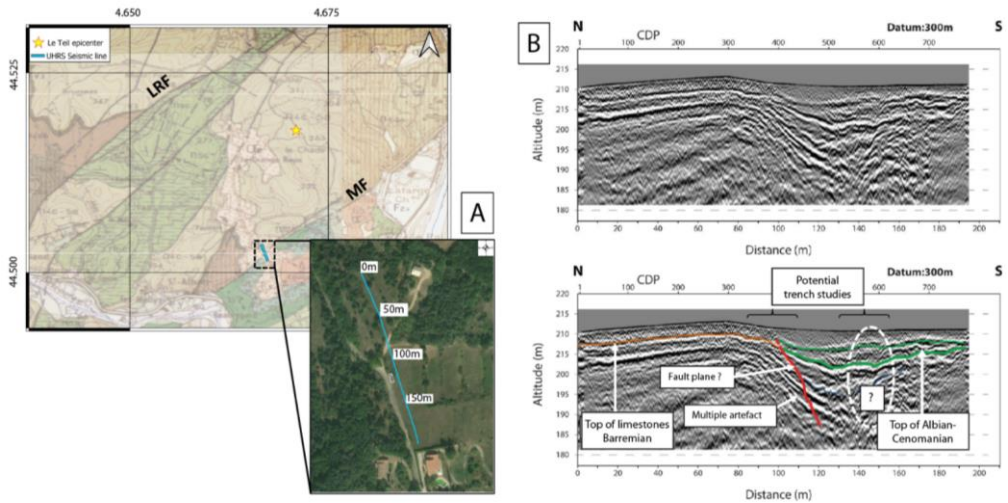


Fig. 5 (d'après [10]) : A) Localisation du profil sismique UHRS au travers de la faille de Marsanne (MF). LRF : La Rouvière Fault. B) Image sismique obtenue après traitement (haut) et image sismique interprétée (bas).

Les tranchées paléosismologiques (dernière étape du logigramme, Figure 3) sur la faille de Marsanne n'ont pour l'heure pas été réalisées. En revanche, 16 tranchées ont été ouvertes au niveau de la faille de la Rouvière génératrice du séisme du Teil. Leur localisation a pu être déterminée sans avoir recours à l'imagerie sismique, dans la mesure où lors du séisme du Teil la rupture a atteint la surface, s'exprimant par des déformations centimétriques à pluri-centimétriques observables sur le sol [8]. La trace de la portion de la faille de la Rouvière ayant rompu étant connu, les tranchées ont été implantées sur la base de ces observations. Les observations effectuées dans ces tranchées sur la faille de la Rouvière sont présentées dans [9] et [11].

4 Conclusion

La connaissance des failles actives en domaine de déformation intraplaque est un véritable challenge du fait du temps de retour long entre les séismes significatifs et des processus de surface qui effacent rapidement les traces laissées par les épisodes tectoniques. En France métropolitaine, la connaissance des failles est parcellaire, avec notamment de nombreux paramètres peu contraints alors qu'ils sont d'intérêt pour les études d'aléa sismique. Afin de palier à ce manque de connaissance sur les failles, EDF a développé et mis en œuvre, avec ses partenaires, une approche graduelle basée sur un zoom progressif sur les structures

tectoniques, combinant géologie, morphotectonique, tectonique, géophysique et paléosismologie. L'objectif est de définir la localisation, la géométrie, l'histoire cinématique et l'âge de dernier mouvement des failles.

Concernant la géophysique, la sismique réflexion à différentes échelles permet localiser les failles en profondeur et de caractériser leur géométrie et leur histoire cinématique (sismique HR), d'imager le prolongement de ces failles en sub-surface (sismique THR) et d'analyser les structures qui se propagent jusqu'en surface ou très proche surface (sismique UHRS). Chaque méthode peut permettre de conclure sur l'âge de dernier mouvement d'une faille. Si celui-ci est plus ancien que le Quaternaire, les méthodes suivantes ne sont pas mises en œuvre car la faille est considérée inactive.

Suivant cette approche, des investigations sont en cours au niveau de la terminaison Nord-Est du faisceau cévenol, suite au séisme du Teil. Environ 70 km de profils sismiques HR ont été acquis, qui permettent d'imager les failles jusqu'à 7-8 km de profondeur. Les premières analyses, à confirmer, semblent montrer que les failles de couverture présentent une géométrie listrique, à pendage Sud-Est, venant s'enraciner sur un niveau de décollement triasique. Des investigations géophysiques complémentaires seront mise en place à la suite de l'interprétation finale de ces lignes, afin de poursuivre la caractérisation de ces failles vers la surface et de pouvoir *in fine*, s'il s'agit de failles présentant des déformations quaternaires, réaliser des tranchées paléosismologiques.

5 Références

- [1] Nocquet, J. -M., Calais, E. (2004) Geodetic Measurements of Crustal Deformation in the Western Mediterranean and Europe. *Pure Appl Geophys* 161:661–681
- [2] Walpersdorf, A., Baize, S., Calais, E., et al (2006) Deformation in the Jura Mountains (France): First results from semi-permanent GPS measurements. *Earth Planet Sci Lett* 245:365–372
- [3] Masson, C., Mazzotti, S., Vernant, P., and Doerflinger, E. (2019). Extracting small deformation beyond individual station precision from dense Global Navigation Satellite System (GNSS) networks in France and Western Europe. *Solid Earth*, 10: 1905–1920
- [4] Nocquet J-M (2012) Present-day kinematics of the Mediterranean: A comprehensive overview of GPS results. *Tectonophysics* 579:220 – 242. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.03.037>
- [5] Jomard, H., Scotti, O., Auclair, S., Dominique, P., Manchuel, K., Sicilia, D., (in press). The SISFRANCE database of historical seismicity. State of the art and perspectives. *Comptes Rendus Geosciences*
- [6] Baize, S. (2002) Inventaire des indices de rupture affectant le quaternaire, en relation avec les grandes structures connues, en France métropolitaine et dans les régions limitrophes. Société géologique de France, Paris
- [7] Jomard, H., Cushing, E. M., Palumbo, L., et al (2017) Transposing an active fault database into a seismic hazard fault model for nuclear facilities - Part 1: Building a database of

potentially active faults (BDFA) for metropolitan France. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 17:1573–1584. doi: <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1573-2017>

[8] Ritz, J. F., Baize, S., Ferry, M., et al (2020) Surface rupture and shallow fault reactivation during the 2019 Mw 4.9 Le Teil earthquake, France. *Commun Earth Environ*, 1:10. <https://doi.org/10.1038/S43247-020-0012-Z>

[9] Ritz, J. F., Baize, S., Cathelin, N., et al (2022) The 2019 Le Teil unexpected surface-rupturing earthquake along the La Rouvière Fault within the Cévennes fault system (France): What does paleoseismology reveal? *Soumis à Journées scientifiques AGAP Qualité 2022*

[10] Ritz, J. F., Baize, S., Audin, L., et al (In press) Perspectives in studying active faults in metropolitan France. *Comptes Rendus Gesciences*

[11] Ritz, J. F., Baize, S., Ferry, M., et al (2021) Analyzing the paleoseismic history of the La Rouvière fault, unexpected source of the 11-11-2019, Mw4.9 Le Teil surface rupturing earthquake (Cévennes fault system, France). *Vienne (Austria)*