



**HAL**  
open science

## Un risque sismique sous-estimé ?

Jean-François Ritz, Matthieu Ferry, Christophe Larroque, Stephane Baize,  
Laurence Audin

► **To cite this version:**

Jean-François Ritz, Matthieu Ferry, Christophe Larroque, Stephane Baize, Laurence Audin. Un risque sismique sous-estimé?. Pour la Science. Dossier, 2021, Hors-série (110), pp.14-19. hal-04717029

**HAL Id: hal-04717029**

**<https://hal.science/hal-04717029v1>**

Submitted on 14 Oct 2024

**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.

Copyright

LES AUTEURS



**JEAN-FRANÇOIS RITZ** est directeur de recherche au CNRS et membre du laboratoire Géosciences Montpellier, à l'université de Montpellier.



**MATTHIEU FERRY** est maître de conférences et membre du laboratoire Géosciences Montpellier.



**CHRISTOPHE LARROQUE** est maître de conférences à l'université de Reims et membre du laboratoire Géoazur, à l'université de la côte d'Azur.



**STÉPHANE BAIZE** est chercheur-géologue à l'institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN), à Fontenay-aux-Roses.



**LAURENCE AUDIN** est directrice de recherches à l'IRD et membre de l'Institut des sciences de Terre (ISTerre), à l'université de Grenoble-Alpes.

# Un risque sismique sous-estimé ?

La sismicité de la région du Teil, dans la vallée du Rhône, était supposée modérée. Pourtant le séisme de 2019 a causé de gros dégâts et une rupture en surface inédite. L'élucidation des mécanismes à l'œuvre oblige à réévaluer le risque sismique en France métropolitaine même dans les zones réputées stables.

## L'ESSENTIEL

- La terre a tremblé au Teil, en Ardèche, en novembre 2019 alors que la région était classée dans une zone à sismicité modérée.
- Le mouvement des blocs de croûte terrestre en cause est inversé par rapport à ceux qui ont eu lieu par le passé.
- Les experts dépêchés sur place ont analysé les effets de ce séisme inédit par ses caractéristiques.
- Des travaux sont en cours pour mieux caractériser les risques de rupture sismique dans des zones que l'on imaginait épargnées.



# L

e 11 novembre 2019, un violent séisme de magnitude 5,4 sur l'échelle de Richter a secoué le sud de la France, fait trembler l'Ardèche et frémir Marseille comme Montpellier, faisant quatre blessés. L'épicentre, situé près de la ville du Teil, dans la vallée du Rhône, correspond à une zone densément peuplée avec de nombreuses installations industrielles dont deux centrales nucléaires situées à moins de 25 kilomètres. Le tremblement de terre a causé des dégâts importants dans les villages du Teil,

de Saint-Thomé et de Viviers, fissurant des murs épais et provoquant la chute de tuiles, de cheminées et de cadres de fenêtres et provoquant l'effondrement partiel de nombreuses maisons. Au total, dans le seul village du Teil, plus de 700 bâtiments ont été endommagés ou éventrés: des sinistres chiffrés à plusieurs dizaines de millions d'euros. Le séisme «du Teil» est le plus destructeur et le plus fort ressenti en France depuis celui d'Arette, dans les Pyrénées, en 1967. Et il a eu lieu là où on n'imaginait pas qu'il puisse se produire!

## ANATOMIE D'UN SÉISME

Avant cet événement, dans la vallée du Rhône, le niveau de sismicité détectée par des instruments, sans même qu'elle soit ressentie par les populations, était faible à modérée, et peu de fortes secousses telluriques avaient été documentées ces derniers siècles. Que s'est-il passé? Doit-on s'inquiéter de nouveaux séismes à venir? Sous-estime-t-on le risque de tremblements de terre en France métropolitaine? Pour répondre, plongeons dans les profondeurs du sous-sol. >

© SHUTTERSTOCK.COM / VIBRANT100



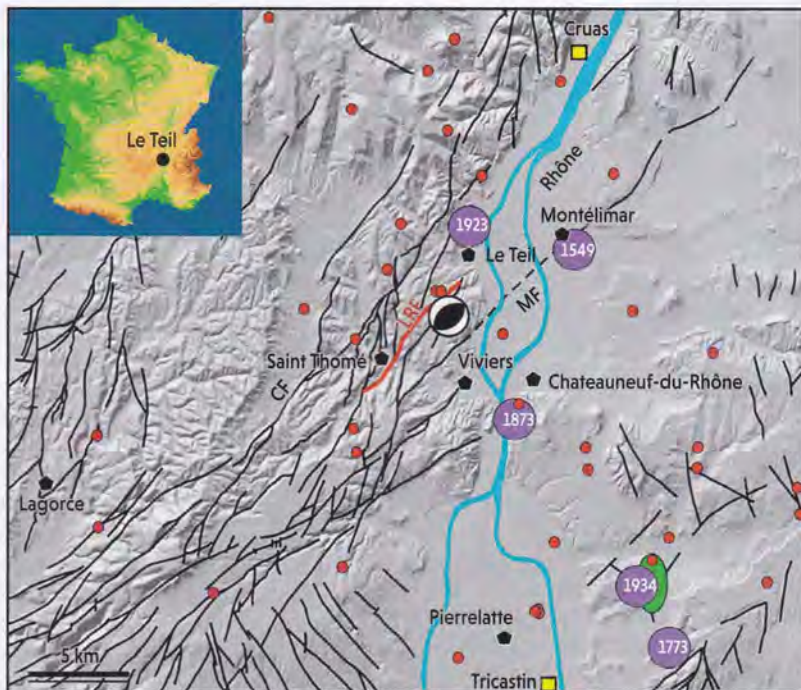


➤ Dans les jours qui ont suivi le tremblement de terre, des calculs plus précis ont montré qu'il était très superficiel avec un foyer (ou hypocentre) situé entre 1 et 3 kilomètres de profondeur. Au regard de sa force, une si faible profondeur suggérait que la rupture sismique s'était probablement propagée jusqu'à la surface. Ces caractéristiques et la présence d'une importante carrière de calcaire à ciel ouvert située près de l'épicentre (le point en surface à l'aplomb du foyer) ont immédiatement questionné sur l'origine du séisme du Teil: pouvait-il avoir, au moins en partie, une origine anthropique? L'Institut des sciences de l'Univers (Insu) du CNRS a mandaté un groupe d'experts pour étudier la question. Leur rapport publié en ligne quarante jours après l'événement, a conclu que le déficit de masse dû à l'extraction de matériaux de la carrière a pu contribuer au déclenchement du séisme. Cependant, les experts soulignèrent également que l'origine et la taille de la secousse sismique étaient essentiellement dues à l'accumulation de forces tectoniques au fil du temps.

L'épicentre du séisme est situé au nord-est du système de failles des Cévennes, à proximité immédiate de l'une d'elles, la faille de La Rouvière. Celle-ci court sur environ 10 kilomètres entre les villages de Saint-Thomé, au sud-ouest, et du Teil, au nord-est (voir la figure ci-contre). Le système de failles des Cévennes correspond à une limite structurale majeure entre le socle cristallin du Massif central et le bassin sédimentaire du sud-est de la France, qui borde la chaîne des Alpes. La structure actuelle de cette région résulte d'une évolution en plusieurs étapes ayant abouti à un canevas structural composé de failles orientées nord-est sud-ouest sur plus de 100 kilomètres de longueur et plongeant vers l'est.

À quel point le séisme du Teil est-il inhabituel? Du point de vue de la sismicité dite « instrumentale », le Réseau national de surveillance sismique (RéNaSS) et le Laboratoire de détection et de géophysique (LDG) du Commissariat à l'énergie atomique (CEA) ont enregistré 39 secousses entre 1962 et 2018 dans un rayon de 20 kilomètres autour du village du Teil, tous de « magnitude du moment »  $M_w$  (voir l'encadré page ci-contre) inférieure à 2,9 et donc le plus souvent non ressentis. Cette magnitude du moment, privilégiée par les sismologues, rend compte de l'énergie émise par le tremblement de terre alors que celle de Richter, fondée sur des mesures locales de sismomètres, est moins précise. Les profondeurs de ces événements sont estimées entre 5 et 24 kilomètres. La distribution des épicentres ne montre aucun schéma particulier qui trahirait l'activité d'une faille donnée.

Historiquement, quelques crises sismiques plus violentes ont été répertoriées au sud du Teil en 1773, en 1873 et en 1934. Le principal événement historique régional s'est produit le 19 juillet 1873, près de Châteauneuf-du-Rhône. Son



intensité a atteint VII sur l'échelle de Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK), une gradation sur 12 degrés des dégâts causés par un tremblement de terre: le niveau VII correspond à des dommages prononcés, avec de larges lézardes dans les édifices et la chute de cheminées. On a estimé sa magnitude  $M_w$  autour de 4 et la profondeur de son foyer à environ 3 kilomètres. À noter qu'un séisme a été localisé au Teil, le 26 novembre 1923, avec une intensité MSK de IV (on ressent des vibrations comparables à celles provoquées par le passage d'un gros camion), pour une magnitude  $M_w$  estimée à 3.

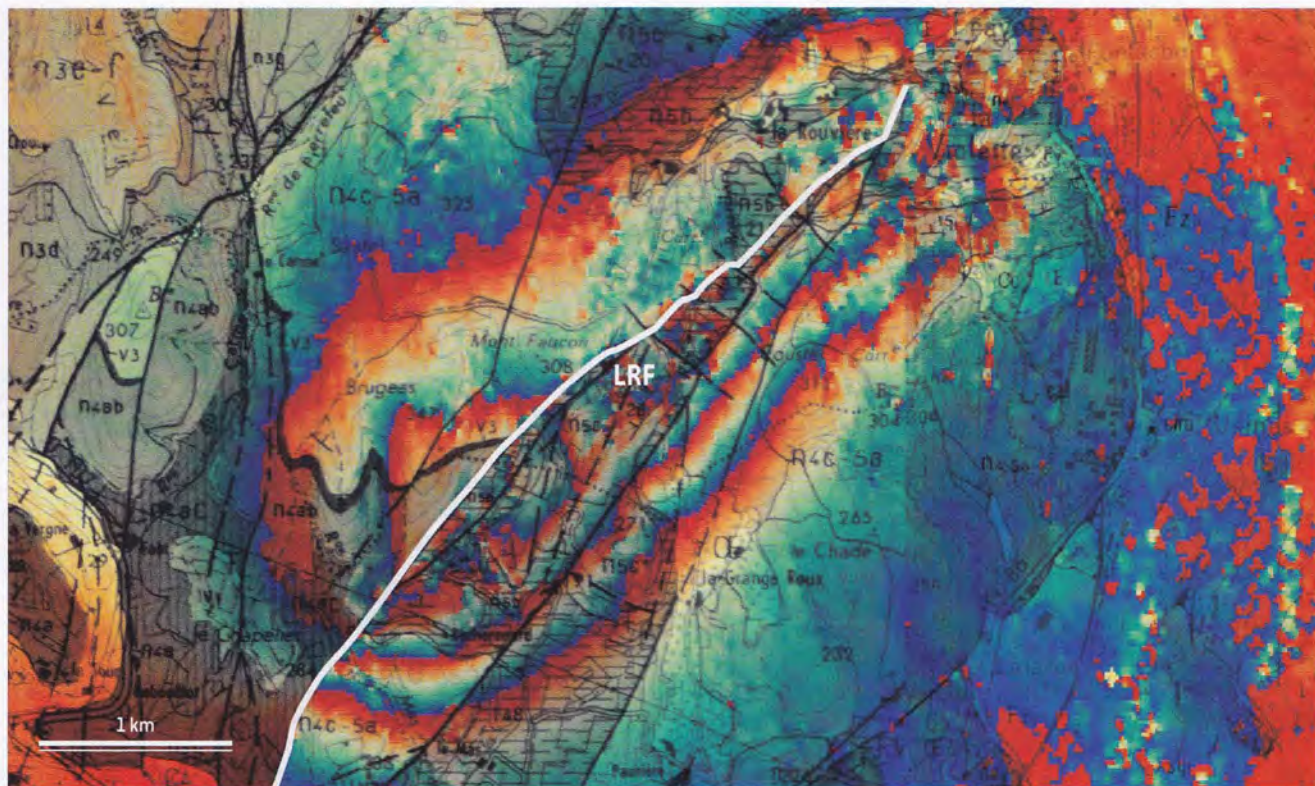
### ET LA TERRE S'EST SOULEVÉE

À partir de l'analyse des ondes sismiques détectées par quatre stations les plus proches, le séisme du Teil a pu être localisé à 500 mètres près. Ces ondes sont celles de compression (notées P, elles correspondent à des déplacements du sol parallèles à la direction de propagation de l'onde) et celles de cisaillement (notées S, cette fois, les mouvements du sol sont perpendiculaires au sens de propagation de l'onde). Le foyer du tremblement de terre a été estimé à un kilomètre de profondeur, et son mécanisme - la géométrie précise de la rupture ainsi que son sens de mouvement - montre qu'il s'agit d'un plan de faille avec un glissement purement inverse, c'est-à-dire que le bloc du dessus glisse vers le haut par rapport au bloc du dessous qu'il chevauche.

La déformation de surface associée au séisme du Teil a été mesurée grâce aux données du satellite *Sentinel-1* fournies par le programme *Copernicus* de la Commission européenne. La comparaison (on parle d'interférogramme)

La carte sismotectonique de la vallée du Rhône, entre Massif Central et Alpes, où s'est produit le séisme du 11 novembre 2019 (le rond noir et blanc). Les points rouges indiquent des séismes mineurs (de magnitude inférieure à 2,9) non ressentis, mais détectés par des instruments. Les points violets correspondent aux séismes historiques. Les lignes noires indiquent les failles géologiques cartographiées avec notamment la faille de la Rouvière (LF, en rouge), la faille des Cévennes (CF), la faille de Marsanne (MF). On distingue également les centrales nucléaires (carrés jaunes).





## UNE AFFAIRE DE MAGNITUDE

La magnitude quantifie l'énergie libérée lors d'un séisme, c'est-à-dire lors d'un glissement soudain le long d'un plan de faille, sous forme d'ondes sismiques qui radient au-delà de la zone de glissement. Facile à définir, le paramètre est néanmoins difficile à déterminer, car il est inaccessible à une mesure directe. On le calcule à partir des signaux enregistrés par les stations sismologiques.

La magnitude dite « de Richter » ou magnitude locale  $M_L$  est calculée en fonction de l'amplitude maximale d'une partie des ondes mesurées sur un sismomètre et de la distance de ce sismomètre à l'épicentre. Toutefois, les valeurs de  $M_L$  annoncées diffèrent parfois selon les instituts de géophysique, car ils n'utilisent pas toujours les mêmes réseaux de stations sismologiques ni les mêmes instruments. D'autres problèmes, comme la saturation du signal lors de forts séismes, compliquent également le calcul de la magnitude locale. Pour toutes ces

raisons, les sismologues préfèrent la magnitude de moment  $M_w$ . Elle est obtenue par une analyse plus complète du signal sismique, qui reflète plus fidèlement l'énergie de la rupture libérée pendant le séisme. Cette méthode s'affranchit des difficultés rencontrées avec la magnitude locale et livre des valeurs plus homogènes.

Autre intérêt, la magnitude de moment aide à estimer les paramètres physiques de la rupture sismique comme la surface de la rupture (en kilomètres carrés) et l'amplitude du déplacement au niveau de celle-ci (en mètres). En conséquence, les experts sont en mesure de faire le lien entre la magnitude de moment et des relevés effectués en surface sur le terrain par les géologues. Par exemple, à partir de la longueur de la rupture, juste après un séisme ou très longtemps après, dans le cas d'études paléosismologiques, on obtient une estimation de la magnitude du tremblement de terre.

L'interférogramme obtenu à l'aide des données du satellite Sentinel-1 compare une image pré-séisme à une autre post-séisme. Les lignes noires correspondent à des failles, et la ligne blanche définit la section nord de la faille de La Rouvière (LRF). Les franges d'interférence apparaissent là où un mouvement vertical a été détecté par le satellite à raison d'une frange (du bleu au rouge) par déplacement de trois centimètres. Ainsi, le bloc sud-est s'est soulevé d'environ 12 centimètres (4 franges) et le bloc nord-ouest s'est affaissé de 6 centimètres (2 franges dans l'autre sens).

entre une image présismique datant du 31 octobre et une autre postsismique datant du 12 novembre (voir la figure ci-dessus) a confirmé l'existence d'une rupture sismique très proche de la surface sur une longueur d'environ 5 kilomètres, orientée nord-est sud-ouest, correspondant à la moitié nord de la faille de La Rouvière. Cet interférogramme a également révélé que le bloc situé au sud-est s'était soulevé par rapport au bloc situé au nord-ouest, avec un décalage vertical compris entre 10 et 15 centimètres.

En utilisant des images satellites prises à 6 jours d'intervalle, plutôt que 12, les sismologues ont calculé un interférogramme plus précis, à partir duquel la composante verticale du déplacement a été déterminée plus précisément. De la sorte, ils ont repéré les gradients de déplacement les plus forts, interprétés comme étant associés à une rupture du sol. Le plus fort gradient de déplacement vertical est bien localisé le long de la faille de La Rouvière. Ils ont alors construit un



➤ profil de distribution du déplacement vertical le long de la faille à partir de quatorze coupes perpendiculaires. La déformation est plus importante et plus localisée dans la partie sud de la faille, avec un déplacement vertical maximum de 23 centimètres. Dans la partie nord, la déformation de surface est répartie sur une zone plus large, de 100 à 600 mètres, avec un déplacement vertical maximum de 13 centimètres. Comment ces déformations se sont-elles traduites en surface?

### À LA RECHERCHE D'INDICES

Grâce à des analyses radar (InSAR), les premières traces en surface du séisme ont pu être découvertes 48 heures après le tremblement de terre (voir la figure ci-contre). Compte tenu de la densité de végétation qui couvre une grande partie de la région autour de l'épicentre, ces recherches se sont concentrées sur les routes et les chemins traversant la faille de La Rouvière, sur laquelle se calquait la ligne de discontinuité observée dans les données InSAR. Pour évaluer la continuité de la rupture sous le couvert forestier, un levé topographique par lidar (une sorte de radar utilisant de la lumière plutôt que des ondes radio) aéroporté a complété les investigations sur le terrain. Les traces repérées correspondent principalement à des fissures ouvertes ayant une orientation nord-est sud-ouest. Au total, une vingtaine d'indices ponctuels ont été observés sur une longueur de 4,5 kilomètres, le long de l'escarpement qui marque la faille de La Rouvière dans le paysage. Ils confirmaient que la rupture sismique associée au séisme du Teil s'est bien produite le long de cette faille ancienne.

Les indices les plus clairs ont été mesurés avec un scanner laser terrestre, révélant un soulèvement du sol compris entre 2,5 et 13 centimètres. C'est un peu moins de la moitié du déplacement estimé à partir de l'analyse InSAR, ce qui suggère que plus de 50% de la déformation s'est répartie à côté de la faille dans une zone de 100 à 600 mètres de largeur. Précisons que, compte tenu de l'inclinaison de la faille, les 2,5 à 13 centimètres précédents correspondent en fait à un déplacement total en surface le long de la faille compris entre 5 et 25 centimètres.

Une coupe géologique éclaire la relation entre l'ancienne faille normale (c'est-à-dire un plan incliné séparant deux compartiments rocheux) datant de l'Oligocène (il y a 20 à 30 millions

d'années), et la rupture sismique associée au séisme du Teil qui fait rejouer cette faille dans un mouvement inverse (voir la figure page ci-contre). Cette coupe géologique montre que les différentes failles composant la terminaison nord-est du système des Cévennes correspondent à d'anciennes failles normales. L'examen des principales unités sédimentaires montre que le processus d'inversion est très jeune et très lent.

### EFFACÉ DU PAYSAGE ?

Toutes ces observations montrent que le séisme du Teil est associé à la réactivation de la faille de La Rouvière dans sa partie superficielle. Une des particularités de l'événement est sa remarquable rupture de surface. À l'échelle mondiale, un événement de si faible magnitude a une très faible probabilité (inférieure à 10%) de rompre la surface, mais la superficialité du foyer

explique ce phénomène rare. La faille de La Rouvière n'a pas été précédemment identifiée comme active, car elle ne présentait aucune sismicité notable détectable par des instruments. De même, aucune expression géomorphologique, c'est-à-dire aucun élément du paysage, ne trahissait une activité tectonique postérieure à l'Oligocène.

L'absence de preuves géomorphologiques avant le séisme du Teil suggère que la faille n'avait pas rompu la surface depuis longtemps, c'est-à-dire plusieurs centaines voire milliers d'années. Peut-être est-ce dû à de très longs intervalles de temps entre les séismes du fait du très faible taux de déformation qui caractérise la France métropolitaine. Ainsi, dans la partie sud-est du Massif central, ce taux de déformation annuel correspond à un raccourcissement de 0,1 milli-

mètre sur 10 kilomètres de distance (200 fois moins vite que dans l'Himalaya) : imaginez-vous dans un étai de 10 kilomètres de large dont les deux mâchoires se rapprochent de 0,01 millimètre chaque année! C'est très lent.

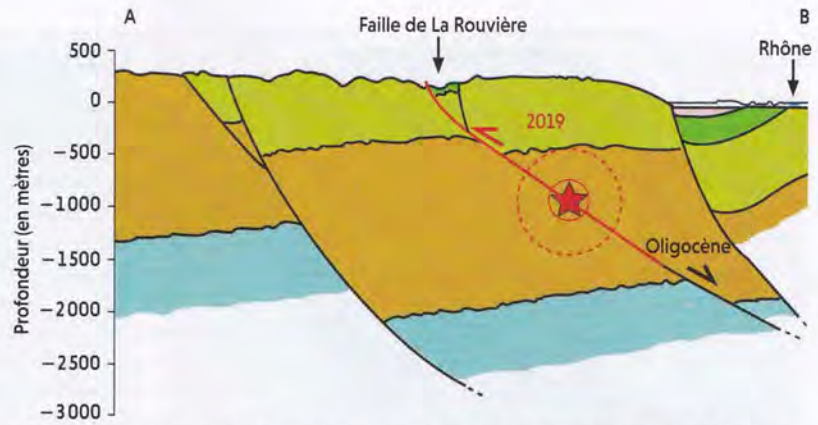
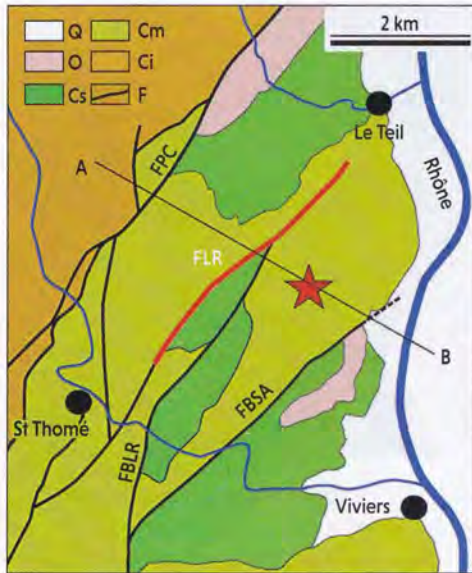
Il est donc possible que des ruptures ayant atteint la surface par le passé aient été effacées du paysage par l'érosion. De plus, si l'on suppose que la déformation est répartie sur différentes failles du système cévenol, et donc diluée en quelque sorte, la préservation de marqueurs géomorphologiques tels que des escarpements de failles est encore plus improbable.

L'ensemble de ces éléments soulève plusieurs questions importantes quant à l'estimation de l'aléa sismique dans les régions comme



Le séisme du Teil s'est manifesté par diverses modifications géomorphologiques comme ce petit escarpement de faille recoupant une piste forestière. La petite tranchée creusée perpendiculairement à l'escarpement montre le plan de rupture plongeant vers la gauche.





La carte géologique simplifiée de la région (à gauche) autour de l'épicentre du séisme du Teil (étoile rouge) montre les différentes failles du Nord-Est du faisceau des Cévennes, compris entre les terrains du Quaternaire (Q) et ceux du Crétacé inférieur (Ci). Ces failles recourent les terrains de l'Oligocène (O) et des Crétacés supérieur (Cs) et moyen (Cm). Il s'agit des failles de Pontet-de-Couloubre (FPC), de Bayne-Roche-Renard (FBRR) et de Bayne-Saint-Alban (FBSA). Au niveau de la faille de La Rouvière (FLR), le trait rouge montre la section qui a cassé jusqu'en surface lors du séisme du Teil. Sur la coupe géologique (à droite) sont représentés le mouvement ancien (O) de la faille de La Rouvière durant l'Oligocène, et la réactivation en sens inverse (2019) lors du séisme du Teil du 11 novembre 2019.

la France métropolitaine et plus généralement l'Europe de l'Ouest. La première est de se demander si les failles ou segments de failles composant le système nord-est cévenol, incluant la faille de La Rouvière, avaient déjà rompu ces derniers millions d'années, et, le cas échéant, avec quelle magnitude. Pour répondre, plusieurs études sont nécessaires. D'abord, une imagerie géophysique profonde aidera à localiser ces structures en profondeur, à définir leurs géométries, leurs dimensions et leur capacité à produire des tremblements de terre de magnitude supérieure à 6. En parallèle, des études paléosismologiques renseigneront sur l'âge des séismes anciens dont on déduira un intervalle de récurrence moyen, c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre deux séismes ayant provoqué des ruptures de surface. L'objectif de ces travaux est d'améliorer le modèle de failles utilisé dans les analyses de risque sismique.

### UN RISQUE À RÉÉVALUER

De plus en plus, le risque de rupture en surface est considéré comme une menace importante pour les infrastructures et les installations sensibles dont la tolérance aux instabilités du sol est très faible. En France et dans les zones intra-plaques avoisinantes, ce risque est rarement pris en compte. Pourtant, il existe bien, comme le montre le cas du séisme du Teil. Aujourd'hui, cet aléa est essentiellement analysé à partir d'approches empiriques pour anticiper la localisation et l'amplitude du glissement localisé le long d'une faille active en surface. Un couloir sécurisé où toute infrastructure sensible serait proscrite, ou au moins adaptée, peut être défini autour de la faille sismique ainsi répertoriée. Mais toutes ces approches empiriques souffrent de la rareté des données, notamment dans la plage des magnitudes faibles à modérées.

Enfin, le rôle même des processus tectoniques à long terme, s'étalant sur plusieurs centaines de millions d'années, liés aux mouvements des plaques lithosphériques lointaines, est remis en question. En effet, la France métropolitaine ainsi que ses pays voisins de l'Europe de l'Ouest correspondent à des régions continentales stables, où nous l'avons vu, les taux de déformations sont très faibles. Et il n'est pas impossible que la sismicité de ces régions soit davantage liée à d'autres types de mécanismes «tectoniques» qui s'expriment à plus court terme que la tectonique des plaques. Des études récentes suggèrent par exemple que le champ de contraintes régnant actuellement dans la région où a eu lieu le séisme du Teil serait lié au soulèvement du Massif central et des Alpes induit par des processus d'érosion ou consécutif à la fonte des glaces lors de la dernière déglaciation il y a entre 15000 et 18000 ans (on parle de rebond postglaciaire). Résoudre ces problèmes géodynamiques requiert l'acquisition de données géologiques et géophysiques supplémentaires ainsi que la mise en œuvre de nouveaux modèles. En d'autres termes, plus les experts acquerront des connaissances, plus ils seront en mesure d'être précis dans la détermination de l'aléa sismique.

Alors seulement, on pourra vraiment savoir si à l'instar de la faille de La Rouvière, il existe en France, par exemple dans le Massif armoricain, les Alpes, les Pyrénées, les Vosges... d'autres failles anciennes, capables de produire des séismes avec ruptures de surface. Rappelons que la métropole compte une dizaine de grandes zones de failles. Plusieurs projets en cours visent à réévaluer la sismicité dans les zones intracontinentales stables pour, à terme, redessiner la carte des failles actives en France. ■

### BIBLIOGRAPHIE

J.-F. RITZ ET AL., Surface rupture and shallow fault reactivation during the 2019 Mw 4.9 Le Teil earthquake, France, *Commun. Earth & Environ.*, pp. 10, 2020.

K. MANCHUEL ET AL., The French seismic CATalogue (FCAT-17), *Bull. Earthquake Eng.*, vol. 16, pp. 2227-2251, 2018.