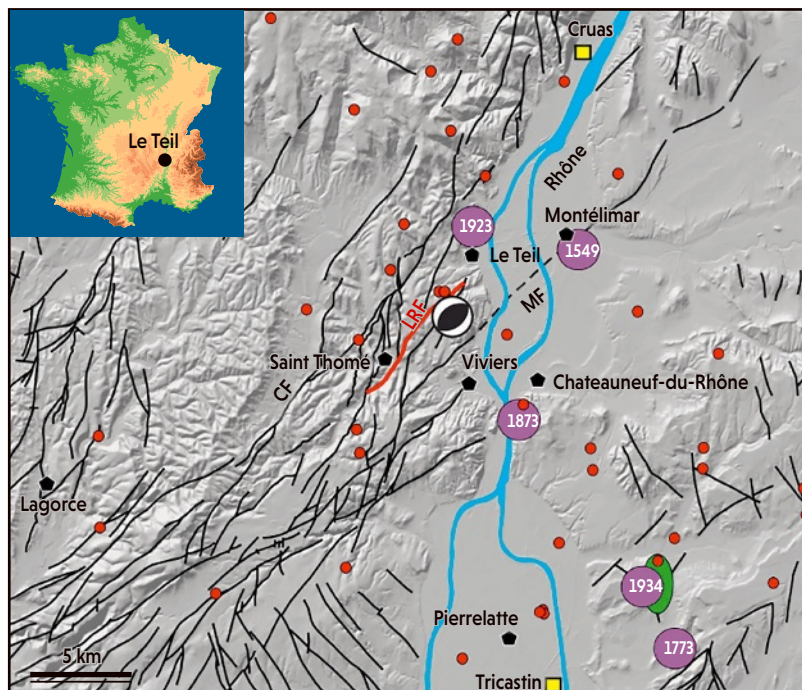


➤ Dans les jours qui ont suivi le tremblement de terre, des calculs plus précis ont montré qu'il était très superficiel avec un foyer (ou hypocentre) situé entre 1 et 3 kilomètres de profondeur. Au regard de sa force, une si faible profondeur suggérait que la rupture sismique s'était probablement propagée 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



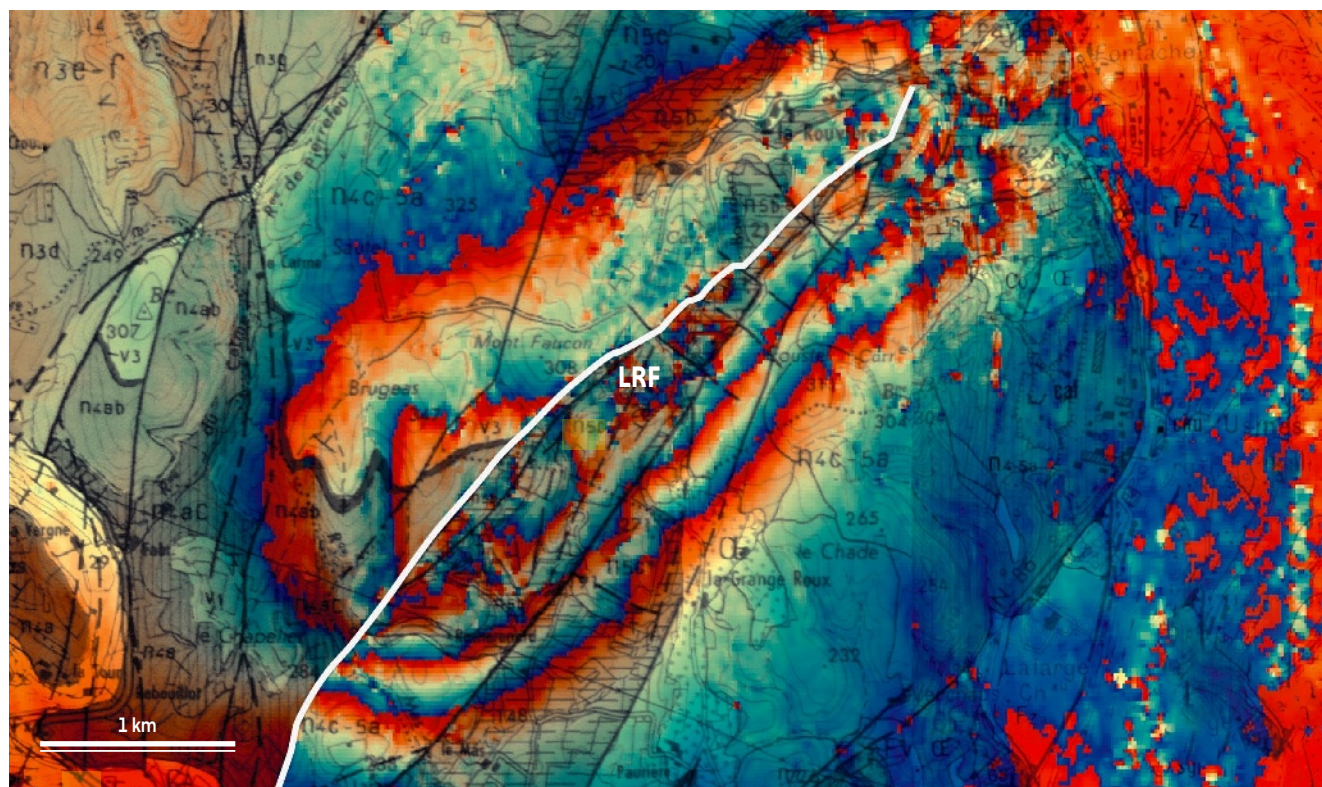
intensité a atteint VII sur l'échelle de Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK), une gradation sur 12 degrés des dégâts causés par un tremblement de terre: le niveau VII correspond à des dommages prononcés, avec de larges lézardes dans les édifices et la chute de cheminées. On a estimé sa magnitude M_w autour 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.

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 (LRF, en rouge), la faille des Cévennes (CF), la faille de Marsanne (MF). On distingue également les centrales nucléaires (carrés jaunes).

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)



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 quiradient 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