



HAL
open science

Aux origines du séisme du Teil

Christophe Larroque, Jean-Paul Ampuero, Bertrand Delouis, Cécile Cornou

► **To cite this version:**

Christophe Larroque, Jean-Paul Ampuero, Bertrand Delouis, Cécile Cornou. Aux origines du séisme du Teil. *La Recherche*, 2020, 561-562, pp.94-97. hal-02934441

HAL Id: hal-02934441

<https://hal.science/hal-02934441>

Submitted on 12 Nov 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.

Aux origines du séisme du Teil

Christophe Larroque, université de Reims Champagne-Ardenne, **Jean-Paul Ampuero** et **Bertrand Delouis**, université Côte d'Azur, et **Cécile Cornou**, IRD

Fin 2019, un tremblement de terre d'une ampleur exceptionnelle pour la région se déclenche en Ardèche. S'il n'y a pas de victimes, les destructions du village du Teil sont importantes. Les particularités de l'événement et la présence d'une grande carrière de ciment, à l'aplomb de la faille qui a rompu, interrogent les scientifiques. Serait-il d'origine anthropique ?

Le 11 novembre 2019 à 11 h 52, dans la vallée du Rhône, en Ardèche, les habitants du village du Teil et des alentours entendent un bruit assourdissant et sont violemment secoués durant 5 à 6 secondes par le plus fort tremblement de terre enregistré sur le territoire métropolitain depuis celui qui détruisait presque complètement le village d'Arette, dans les Pyrénées, en 1967. « *Soudain, on a cru que la maison était en train de se soulever, on s'est tous retrouvés par terre avec de la vaisselle partout* », déclare le maire du Teil à *Libération* le 11 novembre. Nombre d'habitants pensent que leur maison va s'effondrer, d'autres s'imaginent un attentat ou une explosion due au gaz. Du Teil à Montélimar, une

bonne partie des habitants évacuent leur logement. Les secousses sont ressenties jusqu'à Grenoble et Montpellier, à plus de 100 km du Teil. Vers midi, la préfecture de l'Ardèche confirme qu'il s'agit bien d'un séisme d'une magnitude estimée entre 5,2 et 5,4. On craint des répliques qui pourraient dépasser une magnitude 4 dans les heures qui suivent, avec un risque de destruction des habitations fragilisées par le choc principal. Heureusement, on ne déplore pas de décès et seulement quatre blessés.

Dans la commune du Teil, plus de 30 maisons sont détruites, au moins 200 sont sérieusement fissurées, les plafonds de l'école et de l'église se sont effondrés. Au total, plus de 1 000 personnes sont relogées dans des hôtels, des campings ou dans



GÉOPHYSICIENS

Christophe Larroque (1), Jean-Paul Ampuero (2) et Bertrand Delouis (3) travaillent au laboratoire Géoazur (université et observatoire de la Côte d'Azur, CNRS, IRD). Cécile Cornou (4) est au laboratoire ISTERre de Grenoble (universités Grenoble Alpes, Savoie Mont Blanc et Gustave Eiffel, CNRS, IRD, Ifsttar).

leur famille. Dans les jours suivants, les commissions de sécurité prennent 900 arrêtés de péril sur les bâtiments avec, pour nombre d'entre eux, interdiction d'y entrer. Les dégâts sont d'une telle ampleur que les travaux de reconstruction sont estimés par la municipalité à plus de cinq ans.

Rapidement, des questions surgissent parmi les habitants de cette zone à forte vulnérabilité humaine et industrielle. La région comprend en effet deux centrales nucléaires, avec quatre réacteurs chacune, trois sites classés Seveso (*) et deux barrages proches sur le Rhône. Ces installations dites « à risque spécial » au regard de la législation ont-elles été touchées ? Pour les centrales nucléaires, l'ampleur du mouvement du sol n'a pas dépassé le seuil de sécurité, mais la secousse a déclenché une alarme sur l'un des quatre réacteurs du site de Cruas-Meysse, situé à seulement 15 km du Teil. Bien qu'aucun dommage apparent ne soit constaté et que les installations fonctionnent

Contexte

Le séisme du Teil, en France, amène à reconsidérer l'évaluation du risque, en particulier pour les ouvrages à risque spécial (centrales nucléaires, sites industriels Seveso), mais aussi pour les zones urbanisées à constructions anciennes.

normalement, l'exploitant, Électricité de France, suivant le protocole de sécurité, décide l'arrêt des réacteurs de Cruas pour un audit approfondi. Il faudra attendre le début du mois de décembre 2019 et l'autorisation de l'Autorité de sûreté nucléaire pour les redémarrer. Les autres sites n'ont subi ni dommage ni alerte. Par ailleurs, les habitants, les médias et les scientifiques s'interrogent : dans la zone épiscopale se trouve une carrière dont on a extrait un grand volume de roches. L'exploitation de ce site a-t-elle pu être à l'origine du séisme ?

Ruptures en surface

Immédiatement après l'événement, le travail scientifique commence, avec l'analyse automatique des enregistrements des sismomètres du réseau sismologique et géodésique français. Puis, dans l'après-midi du 11 novembre, des sismologues installent d'autres appareils dans la zone épiscopale, afin d'enregistrer le maximum de répliques [les auteurs de cet article faisaient partie des sismologues envoyés sur place ou bien ont travaillé sur les données, NDLR]. Au total, plus de 45 sismomètres ont ainsi été mis en place dans la semaine qui a suivi le choc principal. Le 12 novembre, une première observation de modification de la topographie produite par le séisme est faite au moyen d'une technique d'interférométrie radar par satellite comparant deux images de la zone épiscopale prises respectivement avant et après le séisme. Le lendemain, une équipe de géologues se rend sur le site pour rechercher les traces du séisme en surface. Enfin, du 18 au 22 novembre, une équipe du Groupe d'intervention macrosismique du Bureau central sismologique français analyse les dégâts subis par les bâtiments, afin d'évaluer les intensités des mouvements du sol.

Les résultats arrivent rapidement et permettent de pointer plusieurs originalités (1). D'abord, le mouvement sur la faille est de type compressif et le foyer du séisme est situé à seulement 1 km sous la surface, alors que la plupart des séismes en France métropolitaine ont un foyer à plus de 5 km de profondeur. Par ailleurs, l'intensité du mouvement du sol dans la zone de l'épicentre est forte : elle atteint le huitième degré sur l'échelle EMS98, qui en compte douze (cette échelle internationale permet de classer les intensités en fonction des dégâts constatés sur la structure des bâtiments). Ensuite, dans les trois mois qui ont suivi le séisme du Teil, le nombre de répliques enregistrées

(*) **Le statut Seveso** s'applique aux installations industrielles utilisant des produits chimiques dangereux et vise à prévenir et à mieux gérer les accidents mettant en cause ces produits.

▼ **À la suite du séisme, 900 arrêtés de péril ont été pris sur les bâtiments de la zone sinistrée.**

par les sismomètres a été faible en comparaison avec d'autres événements de même ampleur, étudiés avec le même niveau de détection et qui se sont produits dans un contexte géologique similaire. On compte ainsi 30 répliques pour le Teil – dont la plus forte a atteint 2,8 de magnitude – contre plus d'une centaine enregistrées après le séisme d'Annecy (le 15 juillet 1996), dont la plus forte a atteint une magnitude de 4,2. Autre spécificité : les images d'interférométrie radar par satellite de la zone épiscopale font apparaître un soulèvement d'un compartiment du sol d'une dizaine de centimètres sur environ 4 km de long, avec une limite nette qui se superpose à ●●●



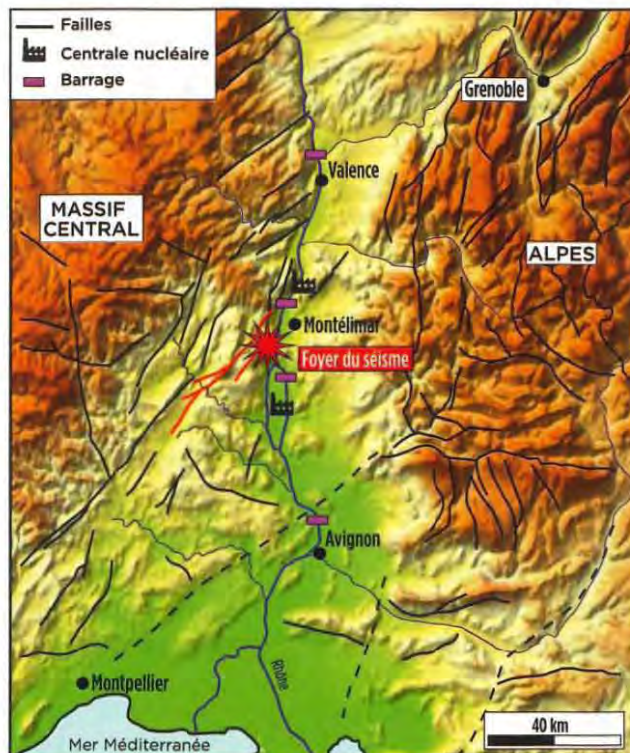
... une faille connue dans la géologie de la région : la faille de La Rouvière. Enfin, le long de cette faille, les géologues mettent en évidence des traces de ruptures en surface. L'analyse montre que ces traces ne résultent pas de processus secondaires liés aux vibrations du sol, mais qu'elles correspondent bien à l'émergence en surface du plan de faille, lors du séisme (2). Si l'observation de ruptures de surface est commune lors des forts tremblements de terre (magnitude supérieure à 6,5), elles sont bien plus rares lors des séismes de magnitude modérée comme celui du Teil. Par ailleurs, l'étendue de la rupture de surface du Teil est une première sur le territoire métropolitain.

Scénario reconstitué

À l'aide de ces premiers résultats et de la connaissance du contexte géologique, nous avons reconstitué le scénario de ce séisme. Son épicerne est localisé sur le grand système de failles des Cévennes, qui s'étend de Montpellier à Valence et sépare les domaines géologiques du Massif central (ici le plateau de l'Ardèche) et du bassin du Sud-Est. Les analyses géologiques montrent que ces failles ont été plusieurs fois activées depuis 100 millions d'années, jusqu'à il y a environ 10 millions d'années. Le séisme du Teil est la conséquence de la réactivation d'une de ces failles : celle de La Rouvière.

La sismicité enregistrée depuis la mise en place du réseau de sismomètres dans les années 1960 est relativement faible dans la zone du Teil. Mais les études historiques révèlent que plusieurs séismes importants se sont produits dans la région du XVI^e au milieu du XX^e siècles, les deux plus forts s'étant produits coup sur coup, le 19 juillet et le 8 août 1873 (3). Les mouvements du sol atteignirent une intensité de niveau VII, presque

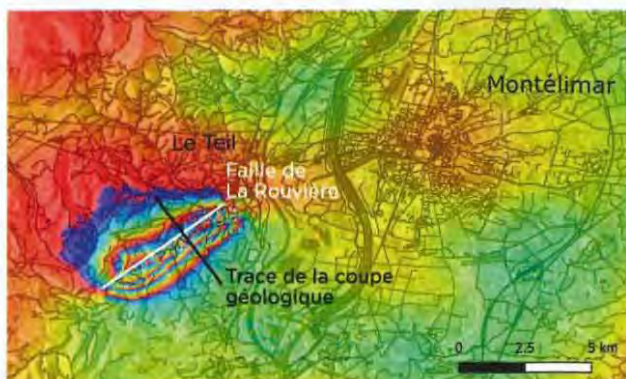
Un environnement à risques



équivalente à celle du séisme du Teil (niveau VIII). De nombreux dégâts furent à déplorer dans plusieurs villages. Selon les témoins de l'événement, la montagne de Navon, située à 10 km au sud de Montélimar, « se serait fendue lors des secousses du 8 août 1873 ». Toute cette région est classée au niveau 3 sur 5 dans le zonage sismique (*) de la France et est donc susceptible d'être affectée par des séismes de magnitude modérée.

Par conséquent, le séisme du Teil n'est pas une surprise. Il résulte de la réactivation d'une faille ancienne et cette situation correspond à la

▼ Cette image d'interférométrie radar par satellite montre des franges d'interférence entourant la faille. Une frange représente 3 cm de déplacement vertical. La partie au sud (4 franges) s'est soulevée de 12 cm et celle au nord s'est affaissée de 6 cm.



plupart des séismes se produisant en France, comme le séisme d'Annecy, dans les Alpes, ou le séisme d'Arette, dans les Pyrénées. D'une façon générale, les séismes résultent des pressions qui s'accumulent dans la croûte terrestre et qui, à un moment, dépassent le seuil de résistance des roches. Dès lors, ces roches se fracturent et glissent le long d'un plan de faille en libérant l'énergie sous la forme d'ondes sismiques. L'accumulation des pressions sur une longue durée (plusieurs centaines d'années à plusieurs centaines de milliers d'années, suivant les contextes géologiques) est appelée « chargement tectonique des failles ».

À cet égard, le séisme du Teil est donc un séisme en apparence « normal ». Toutefois, ses caractéristiques originales pour un séisme de magnitude modérée (très forte secousse du sol, rupture en surface...) en font un séisme singulier. Une singularité qui s'explique en grande partie par la très faible profondeur du foyer. C'est justement l'initiation de la rupture à très faible profondeur (1 km), et à proximité immédiate d'une carrière de calcaire exploitée de taille conséquente, qui a ouvert un débat sur l'origine du séisme. Il a en effet été montré dans plusieurs endroits du monde que les extractions massives de roches dans des carrières situées à proximité de failles pouvaient perturber suffisamment l'état des pressions dans la croûte terrestre pour déclencher des séismes.

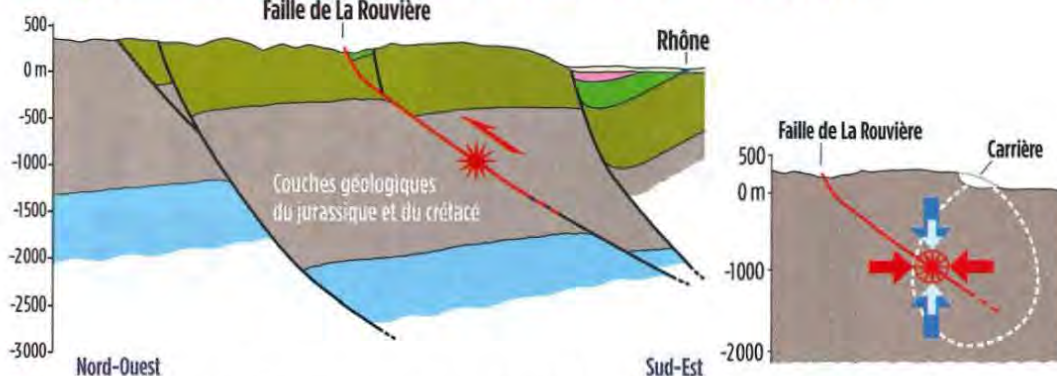
Est-ce le cas de celle du Teil ? Cette question a débouché sur la création par le CNRS d'un groupe de travail, dont plusieurs auteurs de cet article font partie (4). La résolution complète et définitive de cette question demandera encore du temps, mais les données à disposition nous ont déjà permis de réaliser une modélisation de l'influence du volume de matériaux extraits dans la carrière sur le comportement de la faille

Les pressions exercées sur la faille de La Rouvière

de La Rouvière (5). Les pressions qui s'exercent sur la faille sont de deux ordres : des pressions horizontales, correspondant au chargement tectonique de la faille, et des pressions verticales exercées par la colonne de roche située au-dessus de la faille. L'action de ces pressions est antagoniste : les pressions horizontales activent la faille, tandis que les pressions verticales bloquent le mouvement. L'initiation d'une rupture le long de la faille dépend du rapport entre les deux. La rupture devient possible à deux conditions. D'une part, si le chargement tectonique de la faille – qui augmente très lentement dans le temps – atteint le seuil de résistance des roches ; d'autre part, si les pressions verticales, qui bloquent la faille, diminuent suffisamment.

La goutte d'eau...

Dans cette modélisation, nous avons pris en compte la masse de roche excavée depuis 1946, estimée à 71,6 millions de tonnes. Puis, de cette réduction de charge en surface, nous avons déduit le changement de pression verticale exercée sur la faille dans la zone d'initiation de la rupture, située à 1 km de profondeur. Les valeurs obtenues indiquent que la réduction de pression verticale exercée sur la faille serait suffisante pour déclencher la rupture. Cependant, si l'on compare la diminution de la pression verticale due à l'extraction des roches avec la diminution de pression horizontale due au séisme, on constate que cette dernière est beaucoup plus importante. Cela implique que le paramètre prédominant pour expliquer la puissance du séisme est le chargement tectonique de la faille. Autrement dit, l'extraction des roches de la carrière aurait pu être la goutte d'eau qui a fait déborder le vase : elle aurait pu déclencher le séisme alors que la faille était déjà au bord de la rupture. L'ampleur du séisme serait donc liée



▲ À gauche : lors du séisme, le compartiment sud se soulève de 12 cm le long de la faille. À droite : après l'extraction des roches, la pression verticale a suffisamment diminué (flèches bleues) pour que la pression horizontale (flèche rouge) déclenche la rupture le long de la faille.



C'EST LA PROFONDEUR ESTIMÉE du foyer du séisme, alors qu'en France, dans la plupart des cas, elle dépasse 5 km.

(*) **Le zonage sismique** de la France répartit les zones en 5 classes : 1 (risque très faible) ; 2 à 5 (de faible à fort), où les prescriptions parasismiques sont appliquées pour la construction.

au chargement tectonique sur une longue période de plusieurs milliers à centaines de milliers d'années.

Ce séisme soulève plusieurs questions scientifiques majeures, notamment sur l'initiation de la rupture à une si faible profondeur, le peu de répliques qui ont suivi le choc principal, ou encore sur le comportement de la faille active et des couches de roches environnantes. En particulier, les failles voisines de la faille de La Rouvière, certainement soumises aux mêmes conditions géologiques, peuvent-elles déclencher un séisme dans un futur proche ? Et ce séisme éventuel pourrait-il être d'une magnitude plus élevée que celui du 11 novembre 2019 ?

Étant donné que son foyer est situé à faible profondeur, ce séisme offre une chance unique pour apporter des réponses à toutes ces questions. De fait, la possibilité d'observer directement la zone de rupture par forage nous permettra d'étudier précisément la relation entre les propriétés mécaniques du milieu géologique et les conditions d'initiation de la rupture, ce qui serait une première mondiale.

Il s'agit d'un événement emblématique du risque existant en France métropolitaine, où les taux de déformation sont très faibles, mais où la sismicité modérée peut produire des dégâts considérables dans des zones où les vulnérabilités

sont multiples (bâtiments anciens, industries, voies de transport...). La rupture exceptionnelle de la surface du sol et les très fortes vibrations, par exemple, amènent à reconsidérer l'évaluation du risque, en particulier pour les ouvrages industriels à risque spécial (6). Les constructions du Teil et des villages alentours sont représentatives de celles existantes dans de nombreuses régions françaises exposées au même niveau de risque. L'ampleur des destructions produites par le séisme de 2019 doit faire réfléchir à ce qui doit être fait pour le renforcement, en particulier des habitations anciennes, sachant que les normes françaises de construction parasismique ne s'appliquent qu'aux bâtiments neufs. À ce titre, et en plus de l'intérêt scientifique de cet événement, le séisme du Teil est un avertissement à peu de frais. ■

(1) C. Cornou *et al.*, « Rapid response to the M_w 4,9 earthquake of November 11, 2019 in Le Teil, Lower Rhône Valley, France » (en révision aux CRAS).

(2) J.-F. Ritz *et al.*, « The 11 November 2019 M_w 4,9 Le Teil earthquake surface rupture in France: new insight for seismic hazard in stable regions » (en révision à Nat. Commun. Earth Environ.).

(3) <https://sisfrance.irsn.fr>

(4) B. Delouis *et al.*, tinyurl.com/rapport-evaluation-teil, 2019.

(5) J.-P. Ampuero *et al.*, European Geophysical Union, General Assembly, doi:10.5194/egusphere-egu2020-18295, 2020.

(6) www.irsn.fr

COMMENT LES INSTALLATIONS NUCLEAIRES PRENNENT-ELLES EN COMPTE LE RISQUE SISMIQUE ?

Lors du séisme du Teil qui s'est produit en novembre 2019 en Ardèche, des questions ont été posées sur le risque lié à la proximité immédiate de deux centrales nucléaires. Deux spécialistes de l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire décryptent la situation.

Lorsqu'un séisme se produit, ce qu'il est important d'évaluer, c'est avant tout l'accélération subie par les installations, qui est fonction de la magnitude du séisme et de la distance du foyer sismique à la centrale. C'est ce facteur qui permet de s'assurer de l'intégrité de l'installation après le séisme. Dans la réglementation nucléaire, les mouvements sismiques attendus sont pris en compte dès la conception des installations. Ils sont ensuite réévalués pour suivre l'évolution des connaissances. La démarche générale considère les séismes les plus forts qui se sont produits dans le passé d'une même région. On suppose que ces séismes peuvent se produire sous les installations et, par sécurité, on majore forfaitairement de 0,5 leur magnitude pour définir le mouvement sismique possible dont il faut se protéger (SMS). Ainsi, pour les sites nucléaires de Cruas et du Tricastin, le séisme de référence est celui qui est produit à Tricastin en 1873 dont l'intensité épicentrale est de VII (une intensité de VII signifie qu'il occasionne des dégâts sur le bâti ; une intensité de VIII des dégâts importants). En supposant qu'un tel séisme majoré se produise sous les centrales en question, cela conduirait à des accélérations de 0,26 g à Cruas et 0,285 g à Tricastin (g étant l'accélération de la pesanteur, $9,81 \text{ m.s}^{-2}$). Autrement dit, les centrales sont conçues pour résister à ces accélérations. Or lors du séisme du Teil, les accélérations mesurées ont été de 0,045 g à Cruas et de 0,006 g près du Tricastin.

Deux remarques cependant : le séisme du Teil a produit en son épicentre des effets supérieurs (intensité VIII) à ceux du séisme de référence ; les accélérations du sol mesurées ont été enregistrées à 14 et 20 km de l'épicentre, respectivement pour Cruas et Tricastin. Aussi il faudra vérifier si l'accélération du sol à l'épicentre a pu dépasser celui associé au séisme de référence, car rien n'écarte pour l'instant l'hypothèse qu'un séisme comparable puisse se produire sous les sites. Enfin, le séisme du Teil a produit une rupture de surface, un aléa encore mal évalué qui peut menacer l'intégrité des installations : des recherches sur ce phénomène sont en cours, dans lesquelles l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) est actif avec la production de bases de données, d'investigations de terrain, et des développements méthodologiques dans un cadre international. L'IRSN met à disposition de tous une base de connaissances détaillée sur les séismes ainsi que son analyse du séisme du Teil (<https://www.irsn.fr/>).

Stéphane Baize et Christophe Clément, IRSN.

https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/La_surete_Nucleaire/risque_sismique_installations_nucleaires/Pages/sommaire.aspx#.Xo3tRf5OLDd