



NOTE D'INFORMATION

Identification des failles actives et rupture de surface : Enseignements du séisme du Teil pour l'évaluation de l'aléa sismique.

Date : 11/11/2020

Le 11 novembre 2019, un séisme s'est produit dans la région de Montélimar et a causé des dommages importants dans la commune ardéchoise du Teil et ses voisines. Dans les jours qui ont suivis, les experts de l'IRSN se sont mobilisés aux côtés de chercheurs du CNRS, de l'IRD, et d'équipes universitaires pour recueillir l'ensemble des données nécessaires à l'analyse de ce séisme. Pour la première fois en France, ces données recouvraient des observations sismologiques (issues des enregistrements obtenus par différents réseaux d'instruments), des observations géologiques de terrain et des données satellitaires (interférométrie radar).

L'analyse croisée de ces données (voir la note IRSN du 14 novembre 2019 pour plus de détails¹) a permis de déterminer les principales caractéristiques de ce séisme. Celui-ci s'est produit sur la faille de la Rouvière qui appartient au faisceau de failles des Cévennes (Figure 1) dont plusieurs segments sont reconnus comme potentiellement actifs², ce qui n'était pas le cas de la faille de la Rouvière. La magnitude de moment du séisme a été évaluée à 4,9 et l'analyse des données sismologiques a permis de montrer que la rupture s'est initiée à une profondeur d'environ 1 km. Cette faible profondeur de foyer est rarement observée pour un séisme de cette magnitude, la rupture s'initiant généralement au-delà de 5 km. Il faut souligner que cette région a connu historiquement des séismes de magnitude moindre mais très superficiels (essaim de Tricastin, voir figure 1). Enfin, la rupture, qui s'est produite sur une longueur de 5 km, est arrivée jusqu'à la surface et a conduit à un décalage du sol de l'ordre de 10 cm entre les deux compartiments de la faille. Il est là-aussi très rare d'observer une rupture de surface pour un séisme de cette gamme de magnitude, les ruptures de surface apparaissant en général pour des magnitudes dépassant 6. Ces caractéristiques peu communes ont fait l'objet de plusieurs études. Celle à laquelle l'IRSN a contribué³ illustre, comme l'Institut en avait déjà fait l'observation⁴ il y a quelques

¹ https://www.irsnn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Pages/20191114-Fiche-Seisme-Le-Teil-Ardeche-11112019.aspx#.X1XUcRTgqCo

² Une faille est potentiellement active lorsqu'elle présente une activité géologique récente (moins de 5 Ma). On estime alors qu'elle peut générer des séismes significatifs dans un avenir proche.

³ Ritz et al., 2020. Surface rupture and shallow fault reactivation during the 2019 Mw 4.9 Le Teil earthquake, France. Nature, Communications Earth&Environment, <https://doi.org/10.1038/s43247-020-0012-z>;

⁴ En 2014, l'IRSN, dans un avis rendu dans le cadre de la troisième visite décennale des réacteurs de 1300 MWe, indiquait, dans le cadre d'observations, que l'exploitant devrait « étudier les failles potentiellement actives dans un rayon d'au moins 25 km autour des sites, afin de déterminer leur potentiel sismogénique et leur capacité à rompre la surface ».

années, la nécessité d'élargir le champ des investigations nécessaires à l'évaluation de l'aléa sismique dans un pays à sismicité modérée comme la France métropolitaine.

L'objet de cette note est de présenter, sur la base des principaux enseignements de cette étude, les actions que mène l'IRSN pour améliorer la prise en compte de l'aléa sismique pour les installations nucléaires.

1) Au-delà des études de sismicité historique⁵, l'évaluation de l'aléa sismique nécessite d'identifier et d'étudier, avec des méthodes appropriées, les failles potentiellement actives et donc susceptibles de générer des séismes caractérisés par de très longues périodes de retour.

Comme indiqué en introduction, le séisme du 11 novembre 2019 s'est produit sur la faille de la Rouvière, segment de la faille des Cévennes. Cette dernière est une structure géologique majeure du sud-est de la France formée il y a plusieurs centaines de millions d'années. Elle est constituée d'une multitude de segments dont plusieurs ont été identifiés et cartographiés comme potentiellement actifs (voir figure 1), ce qui n'était cependant pas le cas de la faille de la Rouvière.

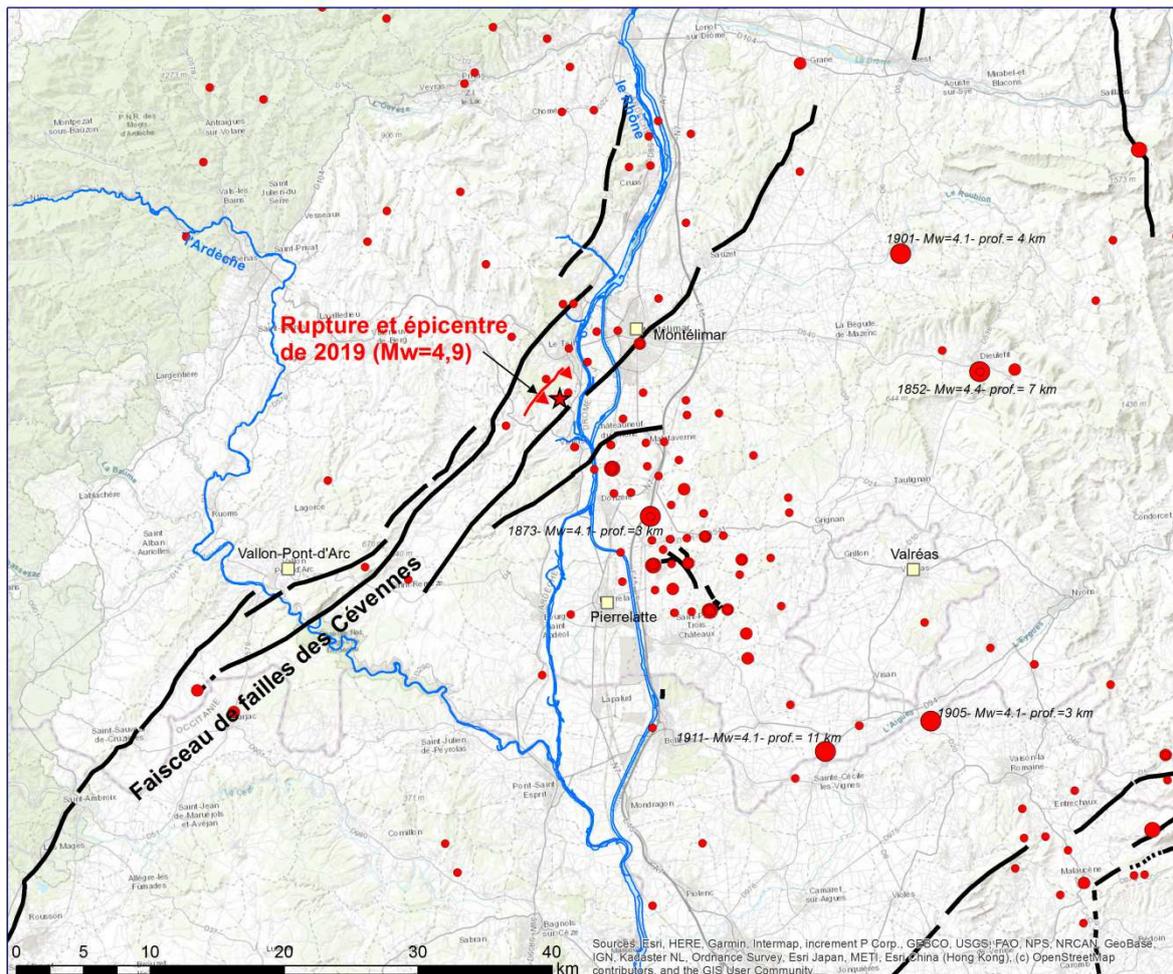


Figure 1 : Carte montrant la localisation de la rupture apparue en surface lors du séisme de 2019 (trait rouge, triangles côté : compartiment soulevé) entre deux segments connus du système de failles des Cévennes. Les points rouges sont les épicentres des séismes historiques (catalogue Manchuel et al., 2017).

⁵ En France métropolitaine, la sismicité historique est principalement connue à partir des archives. La base de données SISFRANCE (BRGM-EDF-IRSN) assemble les événements identifiés, dont les plus anciens remontent à environ 1000 ans.

Leur magnitude estimée s'étale entre 3 et 4,5 dans cette zone (la taille des points est proportionnelle à la magnitude estimée). Le nuage d'épicentres entre Pierrelatte et Montélimar est connu sous le nom « d'essaim de Tricastin ».

La dernière période d'activité connue de cette dernière remonte à environ 20 millions d'années. Si la faille de la Rouvière n'a pas été reconnue comme potentiellement active jusqu'à la survenue du séisme du Teil, cela est dû au fait que la région se déforme très lentement, comme cela a été démontré par des analyses de données GPS⁶. Cette déformation très lente se traduit par une occurrence très rare des séismes (probablement avec des périodes de retour de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'années), notamment pour ceux qui laissent des traces de rupture en surface, comme celui du Teil. Ces traces de surface, qui sont soumises aux phénomènes d'érosion et de modification du paysage par l'activité anthropique ou plus rarement enfouies sous des sédiments, peuvent être effacées ou masquées. Elles peuvent donc échapper aux travaux de cartographie des failles potentiellement actives par les géologues, qui basent une partie de leurs analyses sur leur identification. Dans le cas du séisme du Teil, l'analyse *a posteriori* de l'expression topographique de la faille de la Rouvière ne montre pas de trace distinguable de séismes dans un passé géologique plus récent que 20 millions d'années. Pour résoudre cette difficulté d'identification des failles potentiellement actives, il est nécessaire d'utiliser des techniques permettant de visualiser le sous-sol (techniques géophysiques, creusement de tranchées, forages...) ce qui permet d'étudier le décalage des terrains dont la datation permettra de déterminer la période de retour des événements sismiques (figure 2). Un tel travail auquel collaborent plusieurs équipes dont l'IRSN est en cours sur la faille de la Rouvière.

Conscient, depuis une vingtaine d'années, de cette nécessité d'améliorer la connaissance sur les événements rares qui viennent compléter l'analyse des données de sismicité historique, l'IRSN, en collaboration avec des équipes académiques, effectue des recherches dans le domaine de la cartographie et de l'étude des failles potentiellement actives. Ces travaux se sont traduits, pour ce qui concerne la France métropolitaine :

- a) Par plusieurs études sur des failles en France qui ont permis, par l'utilisation combinée de diverses techniques géophysiques et géologiques ainsi que par le creusement de tranchées, de mettre en évidence leur activité dans un temps géologique récent (plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'années). Ces études dites de « paléosismologie⁷ » ont permis de mettre en évidence des traces caractéristiques de séismes à très longue période de retour sur des failles en Savoie et Haute-Savoie, dans le fossé Rhénan, dans la vallée de de la Moyenne Durance ou encore dans l'Artois ;
- b) Par la constitution et la publication récente d'une base de données sur les failles potentiellement actives en France⁸. Cette base de données ne mentionnait pas la faille de la Rouvière comme active du fait de l'absence de traces visibles de déformation en surface. L'occurrence du séisme du Teil rappelle l'importance de maintenir et renforcer l'effort de mise à jour de cette base en utilisant les techniques appropriées pour identifier et caractériser les failles actives sur le territoire et notamment à proximité des installations nucléaires.

Le séisme du Teil, par ses caractéristiques peu communes, appelle à renforcer le travail de cartographie des failles actives en cours depuis une vingtaine d'années. Les études à mener doivent aller au-delà de l'analyse des anomalies topographiques et de recherche de traces de déformations en surface, signatures de l'occurrence de séismes datant de l'époque historique ou très récente. Il est indispensable de procéder à des recherches mettant en œuvre des techniques complémentaires permettant de visualiser le sous-sol (géophysiques, tranchées, forages, écoute sismologique) et permettant ainsi de retrouver les traces de séismes

⁶ Ces données sont mises à disposition par le consortium Résif (réseau sismologique et géodésique français) : <https://www.resif.fr/>

⁷ La paléosismologie regroupe l'ensemble des techniques qui permettent de caractériser l'activité des failles antérieure à ce qui peut être déduit des archives historiques ou des enregistrements par des instruments.

⁸ <https://bdfa.irs.fr/index.html>.

anciens. Ces études sont indispensables pour avoir accès aux évènements rares (c'est-à-dire de période de retour de plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'années) non accessibles par l'étude et l'analyse de la sismicité historique.

2) La possibilité de rupture de surface doit être intégrée dans l'évaluation de l'aléa sismique

Le séisme du Teil s'est traduit par l'apparition d'une rupture de surface attestée par un décalage vertical moyen des terrains de l'ordre de 10 cm, avec un maximum de 20 cm, le compartiment sud-est s'étant soulevé par rapport au compartiment situé au nord-ouest.

Cette rupture est une observation rare en France. En effet, depuis que les observations sismologiques modernes existent (environ 60 ans), cela n'avait été observé qu'une seule fois auparavant lors du séisme d'Epagny en 1996 (magnitude de moment d'environ 5) qui avait vu l'apparition en surface d'un décalage centimétrique. En revanche les études de paléosismologie évoquées précédemment ont montré que ce phénomène s'est produit sur plusieurs failles du territoire national dans l'histoire ou dans un passé géologique récent. Ce phénomène, courant et pris en compte dans les zones à forte sismicité (Californie, Japon...), présente une menace pour les réseaux (transports, gaz, eau, énergie), infrastructures (barrages, digues), et installations à risque. En France, comme dans d'autres régions éloignées des grandes limites de plaques tectoniques, cet aléa commence à être reconnu. Sa prise en compte dans l'évaluation scientifique du risque sismique doit être développée notamment à l'échelle des failles géologiques étendues.

Les travaux de recherche à mener, au-delà de la caractérisation des failles proches des sites suivant les méthodes de paléosismologie décrites ci-dessus, concernent les approches statistiques qui permettent d'estimer les déplacements permanents probables (amplitude) et leur variabilité, en une période de temps donné. Ces approches, dites probabilistes, sont basées sur des catalogues de cas connus à partir desquels des « lois empiriques » sont dérivées pour la prédiction. Celles-ci sont aujourd'hui peu robustes par manque de cas répertoriés. A ce titre, l'IRSN mène des recherches méthodologiques avec des équipes internationales qui a permis la constitution d'une base de données mondiale de ruptures de surface qui permettra de consolider l'approche statistique évoquée plus haut. Enfin, l'IRSN contribue, depuis plusieurs années et sous l'égide de l'AIEA, à la mise à jour d'une approche internationale permettant la prise en compte des ruptures de surface dans l'évaluation de l'aléa sismique pour les installations nucléaires.

En conclusion, le séisme du Teil et ses caractéristiques peu communes rappellent la difficulté de l'évaluation de l'aléa sismique dans des régions à sismicité modérée et à faible taux de déformation comme la France. L'identification des failles potentiellement actives est un enjeu majeur pour identifier et caractériser les séismes à très longues périodes de retour (plusieurs milliers à plusieurs dizaines de milliers d'années). Ces données permettent de compléter les connaissances issues de l'analyse de la sismicité historique qui ne couvre qu'environ 1000 ans. Le travail d'identification des failles actives doit aller au-delà de l'analyse des anomalies topographiques et des déformations de surface et nécessite l'utilisation de moyens importants pour retrouver les traces des séismes dans le sous-sol. Ce travail est indispensable pour avoir accès aux évènements rares, et notamment ceux ayant produit des ruptures de surface, qui sont déterminants pour une meilleure appréciation de l'aléa sismique.

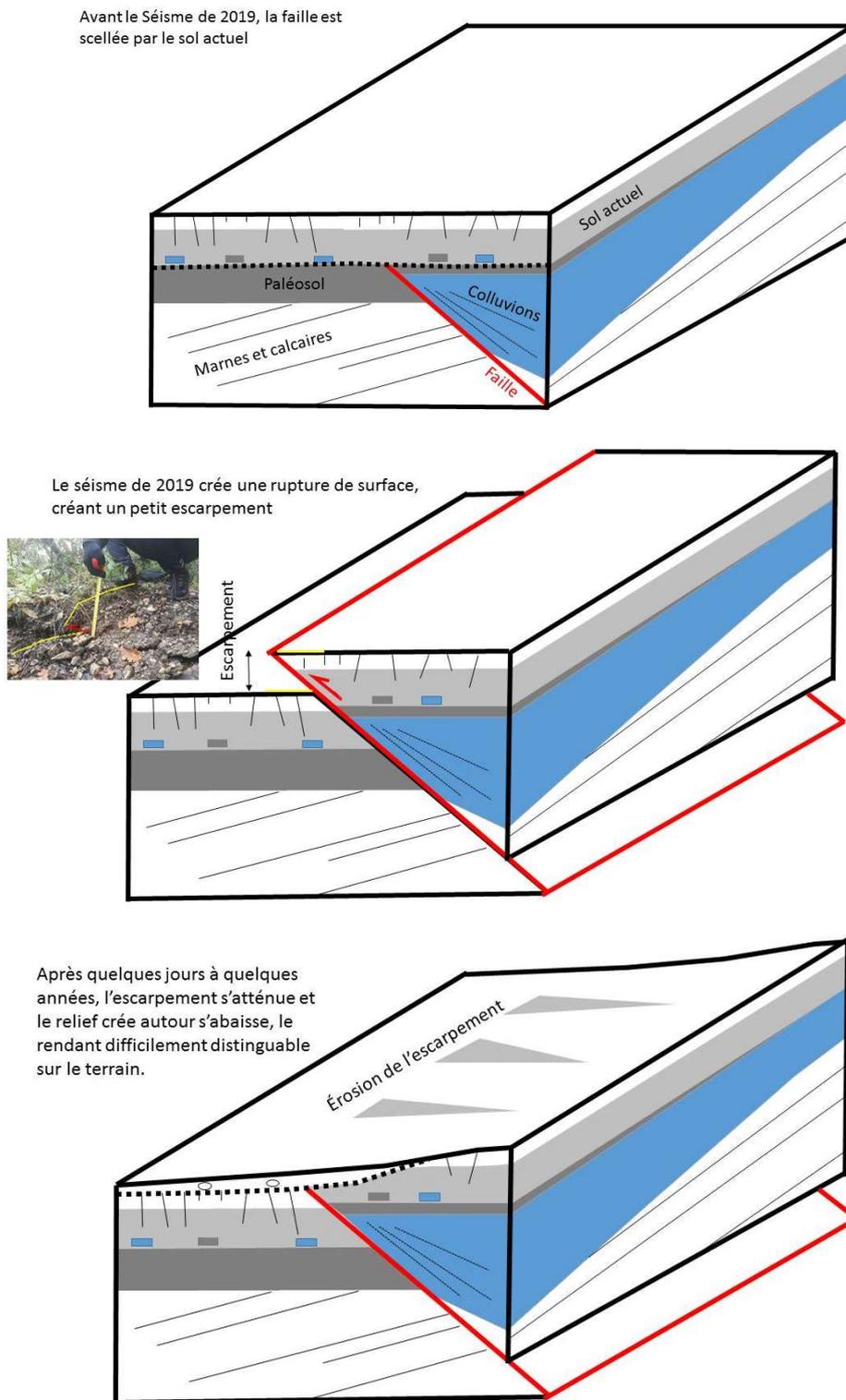


Figure 2 : Ces trois schémas, élaborés sur la base des premières observations faites sur le terrain après le séisme du Teil, résument un scénario possible de l'évolution du paysage au niveau de la rupture de surface. Ils illustrent également le fait que, dans le contexte de faible déformation dans la région, les traces laissées dans le paysage par les ruptures de surface lors de séismes sont très ténues, à cause de l'érosion et de la formation des sols, rendant très difficile leur identification par l'analyse seule de la morphologie. En revanche, les techniques d'exploration du sol et du sous-sol permettent d'accéder à des observations et des données pertinentes (amplitudes des décalages des couches, âges des couches) pour reconstituer l'histoire des séismes passés, comme sur les sections verticales perpendiculaires à la faille montrées ci-dessus.