

Vue sur la plaine alluviale du site du Tricastin et sur les contreforts occidentaux du mont Ventoux en arrière-plan.

# Mouvements sismiques : amplification sous surveillance

## CONTEXTE

> Si le risque sismique en France métropolitaine est faible en comparaison de celui que connaissent la Californie, le Japon ou la Grèce, il existe. En moyenne, chaque décennie connaît un, voire deux tremblements de terre causant des dégâts matériels. Face à ce risque, il revient à l'IRSN de s'assurer

que les niveaux sismiques retenus par les exploitants nucléaires pour le dimensionnement de leurs installations sont suffisants. Dans ce cadre, il pilote actuellement un programme de recherche pour évaluer l'incidence des effets locaux liés à la géologie de surface.

Cahier partenaire  
réalisé avec

**IRSN**

[www.irsn.fr](http://www.irsn.fr)

**Tous les sols ne réagissent pas de la même façon aux secousses sismiques. Certains environnements géologiques amplifient même les vibrations. Pour mieux évaluer ce phénomène, l'IRSN développe une approche originale qui utilise comme source d'information les faibles vibrations qui secouent en permanence la surface de la Terre.**

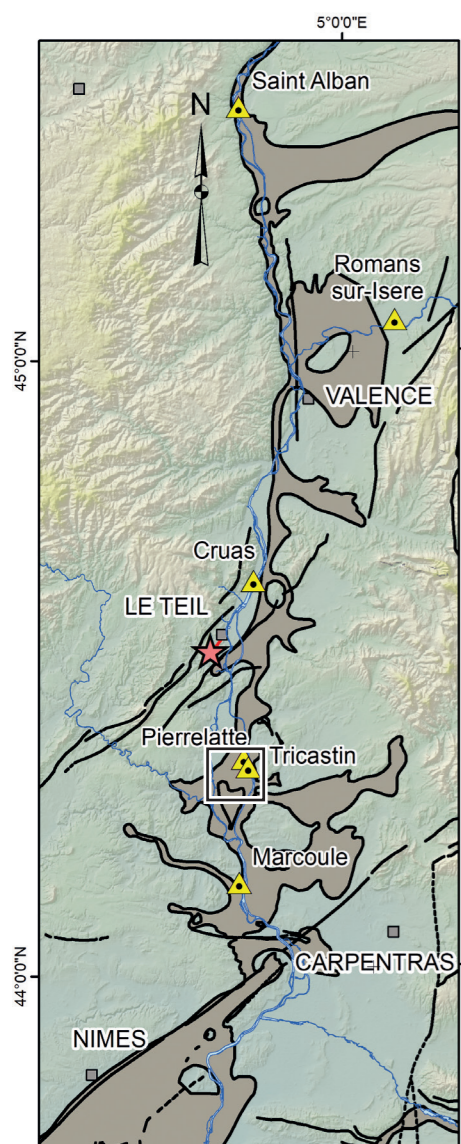
**L**e 11 novembre 2019, la Terre tremble dans la vallée-du-Rhône, au sud de Montélimar. La secousse ressentie dans tout le sud-est de la France atteint une magnitude de 5,4 sur l'échelle de Richter. Elle fait quatre blessés et provoque de nombreux dégâts dans plusieurs villages de l'Ardèche et de la Drôme. En particulier dans le village du Teil, le plus proche de l'épicentre. Cet événement vient rappeler la réalité du risque sismique dans la région et l'enjeu d'une évaluation précise de cet aléa\*, d'autant que la rupture sismique s'est produite non loin d'installations nucléaires : à une douzaine de kilomètres de la centrale de Cruas et à une vingtaine de celle du Tricastin.

Toutes ces installations sont soumises à une réglementation qui fixe aux exploitants la méthode à suivre pour dimensionner leurs structures et équipements à l'égard de l'aléa sismique et garantir la sûreté nucléaire. L'IRSN, quant à lui, vérifie que les données et hypothèses prises en compte par les exploitants nucléaires

soient cohérentes avec l'état des connaissances. À cette fin, au sein de l'institut, le bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations nucléaires (le BERSSIN) étudie non seulement la sismicité récente et la sismicité historique, répertoriée depuis 1 000 ans, de la région, mais aussi tout phénomène susceptible d'affecter les mouvements du sol.

Or les enregistrements du séisme du Teil réalisés par l'IRSN ont clairement mis en évidence un phénomène sur lequel travaille l'équipe du BERSSIN dans la vallée-du-Rhône depuis les années 2000 : un effet capable d'amplifier localement les mouvements du sol et par conséquent d'augmenter significativement le risque. De quoi s'agit-il ? « *Quand la terre tremble et que l'on mesure le mouvement du sol en un point donné, ce mouvement dépend à la fois de la source du séisme – principalement de son énergie – et de la propagation des ondes entre cette source et le point d'enregistrement. Ce qu'on appelle "l'effet de site" se joue dans les toutes dernières centaines de mètres et est lié* » >

➤ à la nature géologique et à la géométrie des couches les plus superficielles», explique Céline Gélis sismologue au BERSSIN.



La vallée-du-Rhône abrite plusieurs installations nucléaires ▲ : Saint-Alban-du-Rhône, Romans-sur-Isère, Cruas, Pierrelatte, Le Tricastin et Marcoule. Or le remplissage sédimentaire dans cette zone □ amplifie les mouvements du sol provoqués par les séismes, comme celui du Teil ★. Les caractéristiques géologiques du site du Tricastin □ en font un très bon candidat pour quantifier ce phénomène d'amplification.

L'effet de site survient dans des configurations typiques comme des vallées remplies de sédiments. Dans ces formations meubles, les ondes sismiques se propagent bien moins vite que dans les roches encaissantes plus dures. À cause de ce fort contraste, les ondes qui arrivent dans les sédiments y sont amplifiées et piégées : elles se réfléchissent sur les bords et le fond de la vallée sans pouvoir s'en échapper. Résultat, l'amplitude et la durée du mouvement du sol augmentent, et sur de tels sites les édifices sont donc soumis à des vibrations plus fortes et plus longues. Révélé en 1985, lors du séisme de magnitude 8 qui secoua fortement la ville de Mexico, construite sur un ancien lac asséché, le phénomène a ensuite été étudié dans diverses zones actives de la planète (Mexique, États-Unis, Japon), mais il restait mal connu dans le contexte peu sismique de la vallée-du-Rhône. Comment quantifier l'effet de site dans cette région ? Quelles sont les approches les plus pertinentes pour le faire ?

Pour répondre à ces questions l'équipe du BERSSIN utilise une approche empirique et une approche numérique. La première consiste à enregistrer sur le rocher

et sur les sédiments les mouvements du sol provoqués par un même séisme et à comparer ces sismogrammes. Elle permet de détecter directement l'amplification et les fréquences des ondes auxquelles elle survient. La deuxième vise à simuler cet effet de site via des modélisations de la propagation des ondes sismiques.

En 2016, cette équipe a commencé par mettre en œuvre l'approche empirique à proximité du site nucléaire du Tricastin qui s'étend sur 600 hectares entre Valence et Avignon et qui regroupe de nombreuses installations dont des usines liées à l'enrichissement de l'uranium et les quatre réacteurs de la centrale EDF. Selon le travail très complet de

reconstitution de l'histoire géologique de la zone réalisé par Marc Edward Cushing, géologue au BERSSIN, le site est implanté sur un ancien canyon. Il a été creusé par le Rhône dans des marnes et des calcaires très durs il y a environ 6 millions d'années, quand la mer Méditerranée a vu son niveau baisser de 1 500 mètres à cause de la fermeture du détroit de Gibraltar. « Environ 500 000 ans plus tard, explique le géologue, le détroit s'est ouvert, l'eau est remontée dans la Méditerranée et des sédiments meubles, tels que des sables et des argiles, se sont déposés dans l'ancien canyon profond de 400 à 500 mètres par endroit ». En surface, il peut atteindre aujourd'hui jusqu'à quelques kilomètres de large. Compte tenu du contraste fort entre les calcaires d'une part et les argiles et les sables de l'autre, tous ses attributs le désignent comme un très bon candidat pour l'effet de site.

## PREMIÈRE CAMPAGNE DE MESURES

Lors d'une première campagne de mesures d'août 2016 à juin 2017, trois stations sismologiques – deux installées à l'aplomb du canyon et une sur le rocher calcaire à l'extérieur (voir carte ci-contre) – ont enregistré une dizaine de séismes intéressants, l'épicentre du plus proche étant localisé à une centaine de kilomètres. La comparaison entre les signaux d'un même séisme montre clairement une amplification du mouvement sismique à partir de 0,5 hertz de fréquence. Il peut être jusqu'à 6 fois plus fort à l'aplomb du canyon que sur les calcaires : c'est le cas notamment pour les ondes sismiques générées par le séisme de magnitude 6,5 sur l'échelle de Richter survenu le 30 octobre 2016 à Norcia, en Italie, à environ 700 kilomètres de la vallée-du-Rhône. Des mesures complémentaires ont aussi permis une première estimation des vitesses des ondes de cisaillement – les plus énergétiques et dommageables pour les bâtiments – au droit des stations : elles sont d'environ 1 000 m/s dans les sédiments tandis qu'elles atteignent 2 500 à 3 000 m/s dans les calcaires. Ce facteur de 2,5 à 3 indique bien un contraste fort.

Ces premières observations prouvent l'existence d'une amplification des ondes sismiques sur ce site, mais une mesure aussi locale ne suffit pas à évaluer la variabilité et la complexité du phénomène à l'échelle de l'ancien canyon. Bérénice Froment – également sismologue au BERSSIN –, Céline Gélis et Marc Edward Cushing ont alors conçu un projet plus ambitieux, le projet DARE. L'objectif est bien sûr de décrire au mieux l'effet de site dans la zone du Tricastin, mais aussi d'en faire un cas d'école pour tester et asseoir une nouvelle méthodologie. En effet, si grâce aux progrès instrumentaux, il est aujourd'hui possible de déployer des réseaux

de centaines de capteurs pour multiplier les points de mesure, reste qu'en zone peu sismique on est limité par le peu d'événements à enregistrer. D'où l'idée d'utiliser une autre source d'information : le bruit sismique ambiant. On entend par là toutes les vibrations qui traversent en permanence les couches géologiques superficielles, qu'elles soient générées par des processus naturels lointains comme la houle de l'Atlantique ou de la Méditerranée, ou plus localement par des activités humaines comme le passage d'un TGV, celui des voitures sur une autoroute voisine, ou encore le bruit d'une usine.

Le premier enjeu était donc de montrer que cette « nouvelle » donnée sismique était exploitable pour mesurer l'effet de site au Tricastin. Le deuxième était de prouver qu'elle pouvait aussi servir à construire le modèle tridimensionnel de vitesse des ondes de cisaillement nécessaire pour simuler correctement la propagation et le piégeage des ondes dans le canyon. Aujourd'hui, les méthodes d'imagerie les plus performantes pour établir un tel modèle à cette échelle sont celles qualifiées « de sismique active » appliquées dans le domaine de la prospection pétrolière. Elles consistent non seulement à équiper la zone investiguée d'un grand nombre de capteurs, mais aussi à générer une source sismique bien contrôlée, en général au moyen d'un camion vibreur. Mais le coût de ces campagnes reste très élevé.

« L'imagerie dite "passive", parce qu'il suffit de laisser des capteurs enregistrer ce bruit de fond sismique sans avoir à générer les signaux, offre ainsi une nouvelle possibilité bien plus accessible », s'enthousiasme Bérénice Froment, pilote du projet DARE. La technique a déjà fait ses preuves pour produire des images de la croûte terrestre (à l'échelle de la dizaine de kilomètres) à partir des vibrations sismiques produites par la houle océanique (de fréquences inférieures au hertz). Ici l'échelle ciblée étant de quelques centaines de mètres, il faut des signaux de fréquences plus élevées (supérieures au hertz), engendrés par les processus plus locaux. Plus intermittents et très dépendants du site d'étude, ces signaux sont aussi plus difficiles à exploiter.

Pour relever tous ces défis, l'équipe du BERSSIN, aidée des sociétés EGIS et SIPROBE, a déployé 400 capteurs en février 2020 sur une zone d'environ 10 kilomètres par 10 kilomètres couvrant l'ensemble du canyon et les roches encaissantes avec pour premier objectif de mesurer le bruit sismique dans cet environnement industrialisé. En un mois d'acquisition, ils ont enregistré environ 1,2 téraoctet de données. Selon les premières analyses, les

signaux liés à l'activité industrielle locale sont de bonne qualité jusqu'à plusieurs hertz, et devraient permettre d'estimer l'amplification du mouvement sismique. Ce travail est en cours.

## CANYON À GÉOMÉTRIE COMPLEXE

Parallèlement, le modèle préliminaire de vitesse des ondes de cisaillement obtenu à partir de ces données confirme les forts contrastes – d'un facteur 2,5 environ – entre le remplissage sédimentaire et les roches encaissantes. Il dévoile la géométrie tridimensionnelle complexe de l'ensemble du canyon. Il montre par exemple que le canyon est plus profond et plus encaissé au sud qu'au nord et localise précisément la zone de confluence entre l'ancien canyon de l'Ardèche et celui du Rhône au sud-ouest. Ce modèle doit être affiné avant d'être utilisé pour la simulation numérique de l'effet de site, mais il est déjà très prometteur.

La méthodologie globale étant nouvelle, les résultats demandent à être validés par une approche plus classique. Le projet bénéficie pour cela du soutien des agences nationales de recherche française (ANR) et allemande (DFG) dans le cadre d'un partenariat avec l'université et le centre Helmholtz de Potsdam et l'université de Grenoble pour lancer une campagne complémentaire de mesures. Cette fois, ce sont 50 stations sismologiques calibrées pour enregistrer les tremblements de terre, qui, réparties sur la même zone depuis septembre 2020, collecteront des données pendant au moins six mois. Les résultats de cette collaboration franco-allemande sont attendus à l'horizon 2022. Au-delà de l'étude spécifique du site du Tricastin, ils devraient prouver l'intérêt de cette donnée abondante et rapide à acquérir qu'est le bruit sismique pour évaluer les effets de site. ■

## RÉFÉRENCES

- [www-dase.cea.fr/actu/dossiers\\_scientifiques/2019-11-11/index.html](http://www-dase.cea.fr/actu/dossiers_scientifiques/2019-11-11/index.html)
- Note d'information IRSN ([www.irsn.fr/FR/Actualites\\_presse/Actualites/Documents/IRSN\\_NI-Seisme-Teil-26112019.pdf](http://www.irsn.fr/FR/Actualites_presse/Actualites/Documents/IRSN_NI-Seisme-Teil-26112019.pdf))
- G. Clauzon, Bulletin, Société Géologique de France 24, 587–610, 1982 ; L. Mocochain et al., *Sedimentary Geology*, 188, 219–233, 2006.
- V. Perron et al., *Geophys. J. Int.*, 215, 1442–1454, 2018.

\*L'aléa sismique est la probabilité pour une région ou un site de subir un séisme de caractéristiques données. Le risque sismique, lui, correspond à la probabilité de pertes humaines et de dégâts estimés en fonction de l'aléa.

## EFFET DE SITE AU TRICASTIN

Le site du Tricastin repose sur un ancien canyon où se sont déposés plusieurs centaines de mètres de sable et d'argile. Une onde sismique qui pénètre dans ces sédiments y reste piégée : les mouvements qu'elle provoque s'en trouvent amplifiés et durent plus longtemps. On le voit ici sur des sismogrammes enregistrés le 30 octobre 2016 par les instruments installés au Tricastin : ces ondes ont été émises par un séisme de magnitude 6,5 survenu à Norcia, en Italie, à environ 700 kilomètres de là. Les mouvements horizontaux mesurés à l'aplomb du canyon (■) sont beaucoup plus importants que ceux mesurés sur le rocher (■). Sur ces signaux, dont les fréquences sont comprises entre 0,4 et 10 hertz, les amplitudes des mouvements sont jusqu'à 6 fois plus grandes.

