

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.irsnn.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.

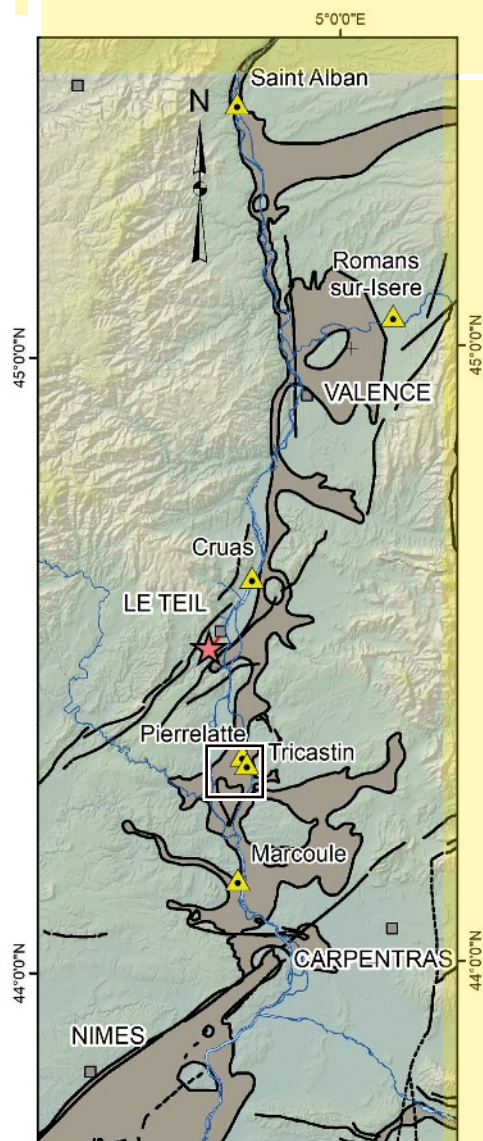
Le 11 novembre 2019, la Terre tremble dans la vallée-du-Rhône, au sud de Montélimar. La secousse ressentie dans tout le sud-est de la France atteint une magnitude de 5,4 sur l'échelle de Richter. Elle fait quatre blessés et provoque de nombreux dégâts dans plusieurs villages de l'Ardèche et de la Drôme. 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 BERSIN) 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 BERSIN 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 BERSIN.



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.

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

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 BERSIN utilise une approche empirique et une approche numérique. La première consiste à enregistrer sur le rocher

reconstitution de l'histoire géologique de la zone réalisé par Marc Edward Cushing, géologue au BERSIN, 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 désignaient 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 BERSIN –, 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

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.

