

ASSOCIATION DES RETRAITÉS DU GROUPE CEA
Groupe Argumentaire sur les Énergies Nucléaire et Alternatives

SÉISMES ET CENTRALES NUCLÉAIRES EN FRANCE

RÉSUMÉ

Après le tremblement de terre du Teil (11 novembre 2019), dans l'Ardèche (07), comme après celui de la côte pacifique qui, indirectement, a provoqué l'accident nucléaire de Fukushima Dai-Ichi (11 mars 2011), la question de la tenue au séisme des installations nucléaires est revenue sur le devant de la scène publique.

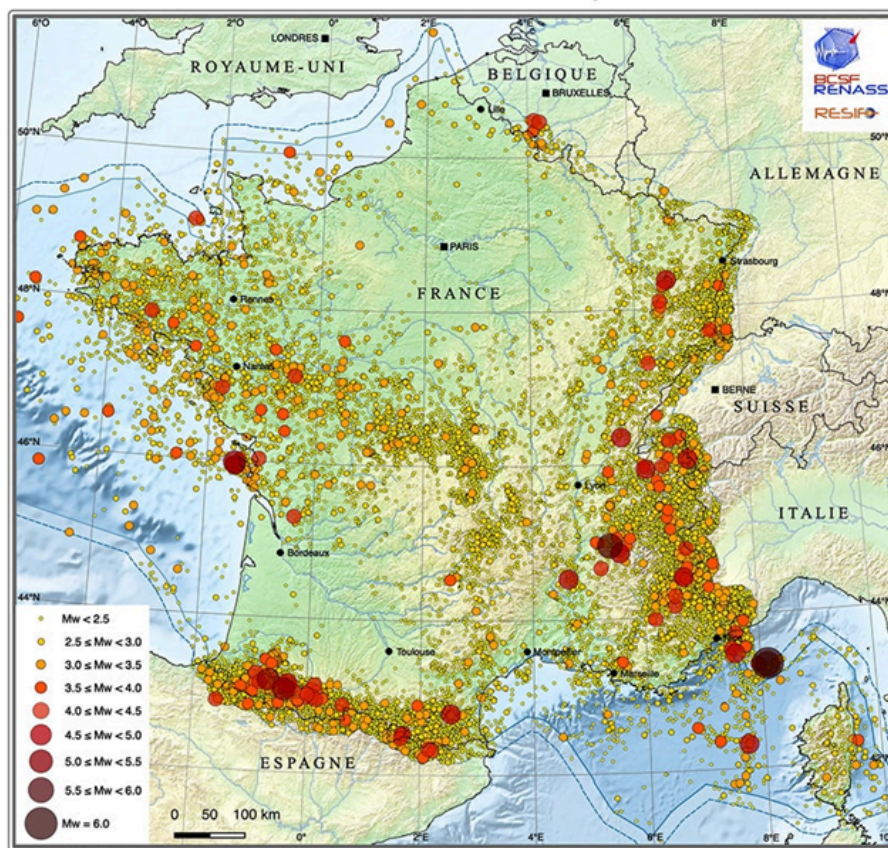
La présent fiche aborde :

- les caractéristiques d'un tremblement de terre en précisant la propagation des différentes ondes sismiques (de compression, de cisaillement et de surface),
- les mesures de l'énergie libérée (la magnitude) et de l'intensité,
- les effets « négatifs » associée à un séisme, en particulier, les dommages causés aux bâtiments et aux équipements de la centrale nucléaire,
- l'évolution des normes, l'autorité de sûreté (ASN) demande d'assurer les fonctions de sûreté suivant l'avancée des connaissances,
- les conséquences du séisme du Teil, petit village de l'Ardèche (07), sur le fonctionnement des centrales nucléaires de Cruas et du Tricastin.

Les centrales nucléaires sont équipées d'un dispositif de surveillance sismique. A la centrale de Cruas, la plus proche de l'épicentre du séisme de magnitude 5,4 (échelle de Richter) du Teil, le dépassement du seuil d'alerte sur l'un des cinq capteurs de surveillance a provoqué l'arrêt des réacteurs. Par contre, il ne sera pas observé d'effets dommageables au niveau de la centrale du Tricastin.

Après de nombreux contrôles menés par EDF, l'exploitant de la centrale, et les vérifications par l'autorité compétente (ASN) les autorisations de redémarrage ont été données les 6 et 11 décembre 2019.

Sismicité Instrumentale de la France métropolitaine 1962-2020



Epicentres des séismes d'origine naturelle dans la zone SI-Hex (France métropolitaine et zone économique exclusive en mer (ZEE), avec élargissement de 20 km). Catalogues de sismicité utilisés : sur la période 1962-2009 le catalogue issu du projet SI-Hex (Cara et al. 2015, <http://www.francesisme.fr>), sur la période 2010-2020 le catalogue BCSF-RéNaSS, pour lequel la magnitude M_L a été convertie en M_w .

LIMINAIRE

La présente fiche vient compléter la [Fiche argumentaire GAENA "Prise en compte du risque sismique dans les installations nucléaires"](#) en donnant de plus amples informations sur les mécanismes de rupture de l'écorce terrestre, la propagation des différentes ondes sismiques et l'agression des structures des bâtiments en surface.

1. LA PHYSIQUE DU PHÉNOMÈNE

1.1. NATURE ET PROPAGATION DES ONDES

L'écorce terrestre n'est pas homogène. Elle est formée d'une douzaine de plaques de 10 à 80 km d'épaisseur. Soumise à la rotation de la Terre ces plaques se déplacent et sont à l'origine de la dérive des continents (théorie de l'astronome et météorologue Alfred Wegener énoncée en 1915 et complétée dans les années 60 par celle de la « tectonique des plaques »¹).

Ces plaques tectoniques qui constituent l'écorce terrestre se déplacent les unes par rapport aux autres ce qui provoque des déformations de la croûte terrestre et l'accumulation des tensions dans la roche.

Le séisme correspond à la libération brutale de ces tensions conduisant à un déplacement brusque du terrain le long d'une faille entre deux plaques. Le lieu où s'est produite la rupture s'appelle l'hypocentre ou foyer. Le lieu de la surface terrestre situé à la verticale du foyer est l'épicentre.

Depuis l'hypocentre, une partie de l'énergie est dégagée sous forme d'ondes sismiques et une autre sous forme de chaleur dans les milieux traversés. Les ondes sismiques se composent de plusieurs types :

- ondes de compression, ondes P primaires, qui font bouger le sol de haut en bas ; ce sont les plus rapides, vitesse 5 m/s ;
- ondes de cisaillement, ondes S secondaires, qui font bouger le sol latéralement et qui sont plus lentes que les ondes P, vitesse 3,5 m/s ;
- ondes de surface, ondes L. Love et ondes R. Rayleigh, qui se propagent à la surface du sol. Ces ondes sont les plus destructrices.

La propagation des trains d'ondes à partir de l'hypocentre est sphérique, mais les différentes ondes sismiques ne se propagent pas de la même manière ni à la même vitesse dans tous les milieux.

Le plus souvent les mouvements du sol s'atténuent avec la distance au foyer. Mais on observe des phénomènes très locaux d'amplification ou d'atténuation : ce sont les effets de site.

La nature des sols joue par exemple un rôle fondamental : un sol meuble (alluvions, sédiments mal consolidés) pourra amplifier considérablement les mouvements par rapport à un socle rocheux.

On constate par ailleurs des effets topographiques : les mouvements sont beaucoup plus forts sur les reliefs (collines) que dans les vallées (si elles ne sont pas remplies d'alluvions).

La figure 1 ci-dessous présente les modifications, par réflexion et réfraction des ondes aux interfaces des milieux traversés. En sortie apparaissent les ondes de surface R.

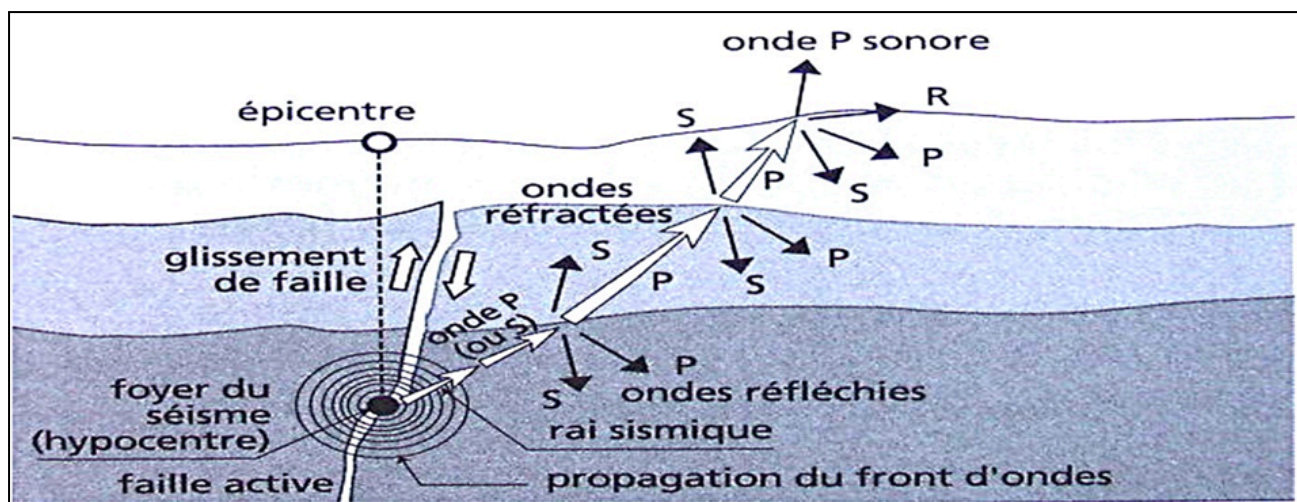


Figure 1 : Propagation des ondes sismiques

¹ La collection CEA Jeunes : Les séismes volume 17

1.2. LES MESURES

Pour caractériser un tremblement de terre, les sismologues disposent de sismomètres qui enregistrent la durée et l'amplitude des ondes ainsi que le temps séparant l'onde P et l'onde S.

L'écart de temps entre les arrivées des ondes P et S permet de déduire la distance de l'enregistreur à l'épicentre. En croisant les données de plusieurs sismomètres on peut, par une méthode de triangulation pour les séismes peu profonds (figure 2 ci-dessous), connaître la position et la puissance exacte du séisme.

La quantification du séisme se fait au moyen de 2 échelles :

- La magnitude caractérise indirectement l'énergie libérée par le séisme sur une échelle ouverte, sans limite supérieure. Il existe plusieurs échelles, la plus populaire est l'échelle de Richter (à ce jour le plus fort séisme est celui mesuré au Chili en 1960 : magnitude 9,5). L'énergie est reliée à la magnitude : plus la magnitude est élevée plus l'énergie libérée sera importante (effet de volume) ;
- L'intensité, qui caractérise l'épicentre, mesure, sur une échelle (Mercalli ou MSK) ouverte de 0 à 12, l'importance des effets ressentis et des dommages provoqués. La valeur de l'intensité décroît au fur et à mesure de la propagation des ondes à partir de l'hypocentre du séisme.

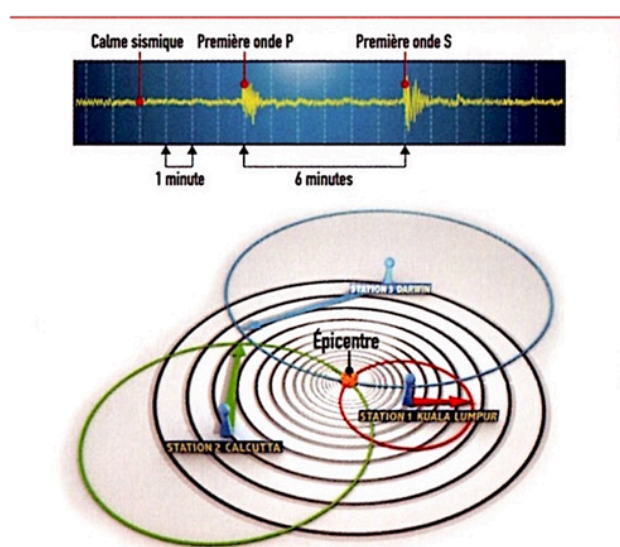
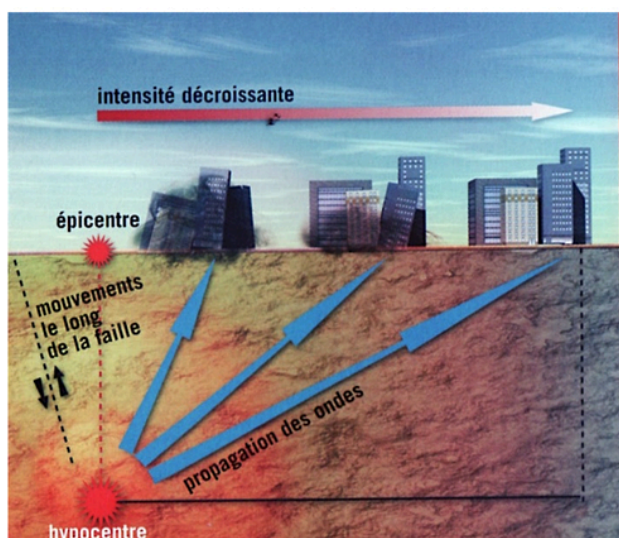


Figure 2 : Séisme de Sumatra enregistré par les stations de Calcutta, Kuala Lumpur et Darwin

Remarques :

- l'échelle de Richter est une échelle logarithmique. Une augmentation d'une unité de magnitude correspond à une multiplication de l'amplitude par un facteur de 10 et de l'énergie libérée par un facteur de 30 (ordre de grandeur).
- l'énergie libérée par un séisme de magnitude 5 correspond sensiblement à l'explosion nucléaire d'Hiroshima ($6,5 \cdot 10^{13}$ J). Pour un séisme de magnitude 9 (celui survenu au Japon en 2011) l'énergie libérée équivaut à une explosion 30000 fois celle d'Hiroshima ($2 \cdot 10^{18}$ J).

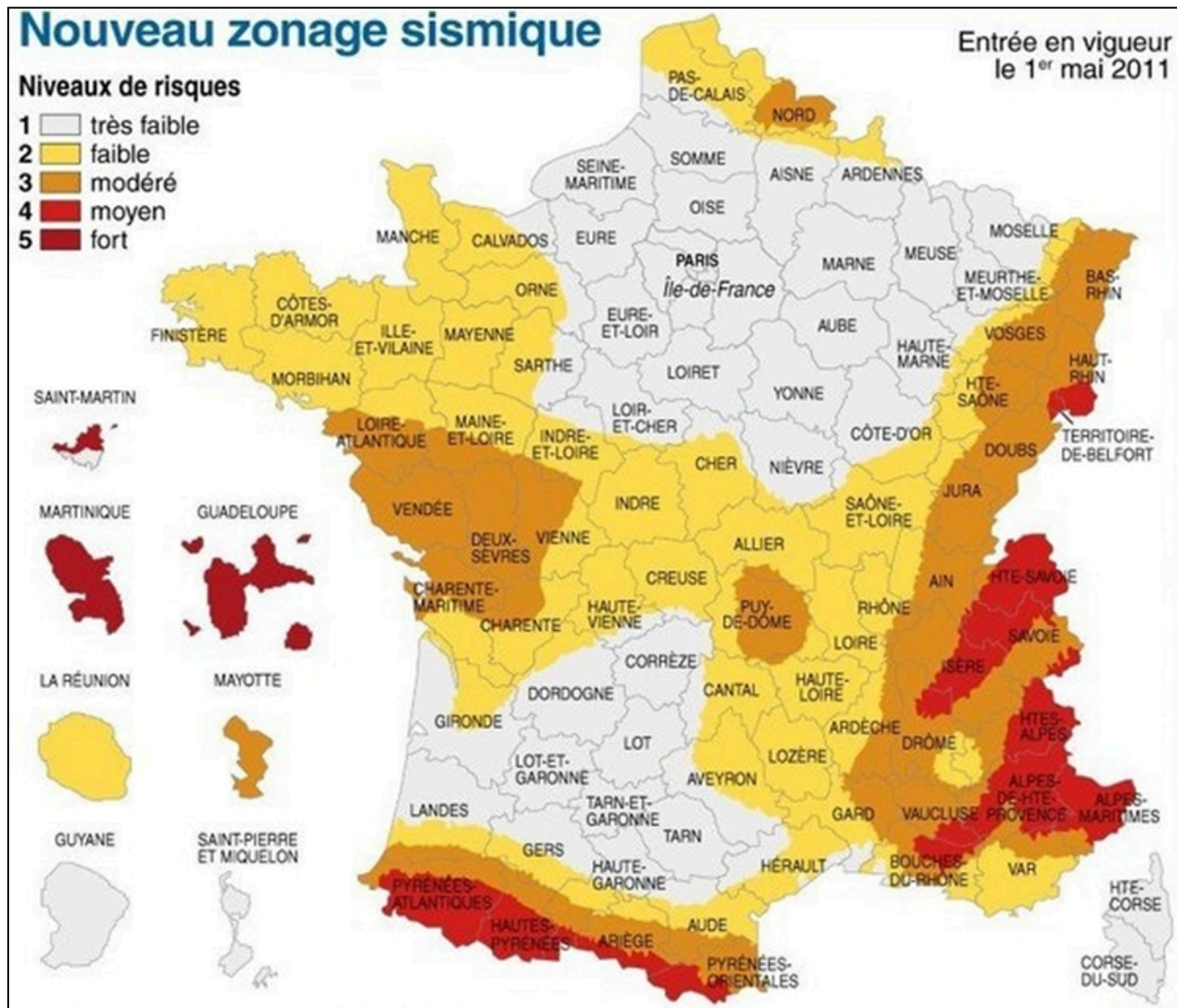
1.3. LA SISMICITÉ EN FRANCE

La France est un territoire modérément sismique sur lequel la sismicité ne se répartit pas de manière uniforme, d'où un découpage du territoire métropolitain en zonage sismique.

Les avancées scientifiques ont rendu nécessaire la révision du zonage sismique de 1991, de cantonal le maillage devient communal.

Le nouveau zonage, entré en vigueur en mai 2011, va de la zone 1 de très faible sismicité jusqu'à la zone 5 de forte intensité (voir figure 3 ci-après). Le calcul probabiliste remplace l'approche déterministe pour en déduire ce nouveau zonage sismique qui évolue en fonction des connaissances scientifiques de l'aléa sismique (on rappelle que l'aléa sismique est la probabilité qu'une secousse sismique d'une certaine importance puisse affecter une région durant une période de temps donnée).

Ce nouveau zonage s'appuie également beaucoup sur l'amélioration de la connaissance de la sismicité historique, connaissance vitale pour l'implantation d'une centrale nucléaire.



D'un point de vue global les règles parasismiques applicables sont définies par un arrêt du 24 janvier 2011 hors les installations nucléaires qui sont traitées par une réglementation spécifique la RFS 2001-01 (Règle Fondamentale de Sureté 2001# 01).

Dans ce contexte de risque sismique il faut que les installations nucléaires répondent aux quatre fonctions fondamentales de sûreté (voir [Fiche argumentaire GAENA "Sûreté et Sécurité nucléaire"](#)) édictées par l'ASN (Autorité de Sûreté Nucléaire) qui sont :

- le confinement
- le refroidissement et l'évacuation de la puissance résiduelle
- la maîtrise de la réactivité
- la réduction de l'exposition aux rayonnements

2. SÉISMES ET CENTRALES NUCLÉAIRES

2.1. QUEL DANGER REPRÉSENTE UN SÉISME POUR UNE CENTRALE NUCLÉAIRE

Les deux principaux effets associés à un séisme sont :

- la rupture des roches au niveau d'une faille,
- l'émission d'ondes sismiques.

La rupture d'une faille dans les profondeurs de la terre engendre un séisme, la cassure créée peut atteindre la surface terrestre. Pour les séismes de fortes magnitudes (à partir du niveau 5 de l'échelle de Richter) l'émergence de la faille en surface est fréquemment observée et les bâtiments construits sur cette faille peuvent être fortement endommagés.

Les ondes sismiques engendrées par la rupture d'une faille se propagent rapidement dans toutes les directions dans et à la surface de la terre : pour un site donné une analyse fréquentielle (le spectre de réponse) des signaux fournis par les sismomètres permet d'obtenir les niveaux de déformation. On associe à un spectre de réponse l'accélération appelée « valeur de calage » correspondant aux fréquences élevées.

Le sol, soumis à ces vibrations, peut alors causer de graves dommages :

- aux bâtiments : un exemple récent de séisme de magnitude 5,4 est celui du Teil (vallée du Rhône) avec de nombreux dégâts aux bâtiments anciens de la ville mais sans conséquences majeures sur les bâtiments des centrales nucléaires voisines implantées sur trois sites localisés dans un rayon de 50 km autour de l'épicentre. Les conséquences sur le fonctionnement de la centrale sont précisées dans le paragraphe 2.2,
- aux équipements : en 2002 et 2003 EDF a déclaré deux incidents génériques, de niveau 1 sur l'échelle INES (International Nuclear Event Scale), relatifs à la tenue au séisme de composants des réacteurs (les réservoirs permettant d'assurer le refroidissement du réacteur, les tuyauteries, ...).

L'implantation des centrales nucléaires en bordure d'un fleuve, d'un océan introduit la possibilité d'un risque d'inondation, deux exemples :

- suite à une forte tempête en décembre 1999 arrêt d'urgence de la centrale du Blayais implantée en bordure de la Gironde,
- au Japon le 11 mars 2011 un séisme d'une magnitude 9 survenu au large de la côte Pacifique (80 kilomètres) a engendré un raz de marée (un tsunami) qui a eu de graves conséquences à la centrale nucléaire de Fukushima Dai-ichi (voir [Fiche argumentaire GAENA "Le nucléaire après Fukushima"](#)). Cet incident a été classé de niveau 7 sur l'échelle INES.

En France, le risque de tsunami n'est pas pris en compte car la topographie des fonds marins ne permet pas le développement d'un tel phénomène face à des centrales nucléaires situées en bord de mer.

2.2. PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE LORS DE L'IMPLANTATION D'UNE CENTRALE NUCLÉAIRE

Face à la possibilité d'un séisme et pour satisfaire aux quatre fonctions fondamentales de sûreté il faut, lors de l'implantation d'une centrale nucléaire, définir les organes qu'il faut absolument protéger :

- l'enceinte de confinement du réacteur
- les équipements assurant l'alimentation en courant électrique et en eau pour le refroidissement

Il en résulte :

- l'interdiction de construction d'une centrale à l'aplomb d'une faille capable de rompre la surface terrestre,
- la prise en compte de la résistance aux séismes des centrales dès la conception des installations.

Pour cela il faut évaluer le niveau de séisme qui peut être atteint sur les lieux de l'implantation de la future centrale nucléaire.

La règle est de rechercher le plus gros séisme historique de la zone d'implantation et d'en majorer la magnitude de 0,5, trois exemples :

- **Centrale de Cruas** : le plus fort séisme connu était de 4,7 à Châteauneuf du Rhône en 1873. L'infrastructure a été conçue pour résister à des phénomènes d'une intensité maximale de 5,2. Le récent tremblement du Teil a résulté d'un séisme d'une intensité de 5,4 à l'épicentre. La centrale n'étant pas construite sur une faille potentielle, le niveau d'accélération sur le site est la donnée qui caractérise les effets destructeurs. Le niveau d'accélération n'était que de 0,045 g (g valeur de l'accélération de la pesanteur) en dessous de la valeur de calage de 0,26 g au niveau de la centrale, ce qui a entraîné son arrêt immédiat sans provoquer de dégât,*
- **Centrale de Tricastin** : le « spectre de réponse » en vigueur est celui utilisé pour le troisième réexamen de sûreté de ce réacteur. Il est calé à 0,285 g,
- **Centrale de Fessenheim** : construite en bordure du grand canal d'Alsace (proximité avec l'Allemagne et la Suisse) : c'est le tremblement de terre de Bâle en 1356, de magnitude 6,2, qui a été pris comme séisme de référence ; la centrale a donc été conçue pour résister à un tremblement de terre de magnitude 6,7.

2.3. ÉVOLUTION DES NORMES

Comme toutes les industries (automobiles, aéronautiques, bâtiment, ...) l'industrie nucléaire met l'accent sur la recherche-développement et sur la maintenance de ses produits.

La sûreté des réacteurs français bénéficie ainsi d'améliorations continues tenant compte des évolutions sur la perception des risques, des nouvelles connaissances acquises et sur l'expérience acquise en matière d'exploitation.

Pour les risques sismiques, il convient d'assurer les fonctions fondamentales de sûreté suivant l'avancée des connaissances.

Le niveau des séismes de référence à prendre en compte doit être régulièrement réévalué notamment lors des réexamens périodiques de sûreté.

C'est ainsi que l'IRSN (l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) a créé le concept de noyau dur (voir [Fiche argumentaire GAENA "REX accidents nucléaires dans le monde"](#)) qui consiste à définir les équipements les plus cruciaux des installations afin de les renforcer de façon significative et de les rendre capables de résister à des agressions extrêmes d'un niveau supérieur à celui pris en référence pour la conception des installations.

Dans ce cas les installations concernées doivent être mises à niveau par l'exploitant EDF, ceci tout spécialement si l'on se fixe l'objectif, dans le cadre de la transition énergétique, de permettre au parc nucléaire français de fonctionner au-delà des 40 années d'existence prévues à l'origine.

À titre d'exemple, la prolongation de la centrale de Fessenheim aurait nécessité de renforcer le radier qui supporte la cuve du réacteur et d'installer des dispositifs de secours permettant d'évacuer la puissance résiduelle.

3. CONSÉQUENCES DU SÉISME DU TEIL SUR LES CENTRALES NUCLÉAIRES DE CRUAS ET DU TRICASTIN

La centrale nucléaire de Cruas, comme toutes les centrales nucléaires françaises, est équipée d'un dispositif de surveillance sismique. Lors du séisme de 11 novembre 2019, un des cinq capteurs a dépassé le seuil d'alerte au-delà duquel les réacteurs doivent être arrêtés pour que soient menées des vérifications approfondies. Les mouvements du sol enregistrés ont toutefois été environ cinq fois inférieurs au niveau pris en compte pour la conception des réacteurs.

EDF a ainsi réalisé un diagnostic approfondi de ses installations dont le contenu a été soumis à l'ASN. EDF a en particulier contrôlé les structures de génie civil et l'état des matériels importants pour la sûreté. À la demande de l'ASN, EDF a réalisé des essais pour vérifier le bon fonctionnement des systèmes de sauvegarde des réacteurs.

L'îlot nucléaire de la centrale de Cruas est construit sur des appuis parasismiques qui permettent d'atténuer les mouvements sismiques. EDF a contrôlé l'état de ces appuis à la suite du séisme du 11 novembre 2019.

L'ASN a vérifié par sondage certains des contrôles menés par EDF lors de deux inspections les 20 et 22 novembre. Les résultats de l'ensemble de ces contrôles ont été examinés par l'ASN avant le redémarrage des réacteurs. Les autorisations de redémarrage ont été données les 6 et 11 décembre 2019.

En ce qui concerne la centrale nucléaire du Tricastin, aucun des capteurs de surveillance sismique n'a atteint le seuil de 0,285 g nécessitant des vérifications approfondies.

4. CONCLUSION

L'ASN, autorité indépendante du gouvernement, qui assure au nom de l'Etat le suivi des installations nucléaires, impose un réexamen décennal en vue d'une amélioration continue de la sûreté des installations. Ainsi grâce aux précautions prises lors de la conception et pendant l'exploitation des réacteurs il n'y a pas eu, tant en France que dans les nombreuses centrales électronucléaires en service dans le monde, d'accident nucléaire provoqué par un séisme de moyenne ou forte intensité ; les réacteurs ont bien résisté à l'onde de choc et se sont arrêtés automatiquement y compris à Fukushima- Dai-ichi.

Des recherches complémentaires seraient nécessaires afin de pouvoir intégrer la possibilité d'une rupture de surface dans l'évaluation de l'aléa sismique. En plus du risque nucléaire cet aléa constituerait une menace pour les réseaux (transports, gaz, eau, ...) et les infrastructures (barrage, digue) voisines.

5. FICHES GAENA LIÉES

Fiche argumentaire GAENA "[Prise en compte du risque sismique dans les installations nucléaires](#)"

Fiche argumentaire GAENA "[Sûreté et Sécurité nucléaire](#)"

Fiche argumentaire GAENA "[Le nucléaire après Fukushima](#)"

Fiche argumentaire GAENA "[REX accidents nucléaires dans le monde](#)"

6. BIBLIOGRAPHIE

- Revue RGN de la SFEN : Séismes en France : les centrales nucléaires dimensionnées. 15 mai 2020. <https://www.sfen.org>
- Wikipédia : [Résistance au séisme des installations nucléaires en France](#)
- Autorité de Sûreté Nucléaire : Séisme du Teil du 11 novembre 2019 : L'ASN fait le point sur la résistance des centrales nucléaires face aux séismes. <https://www.asn.fr>