

LA Recherche

L'actualité des sciences

NUCLÉAIRE & RISQUES NATURELS

*L'état des lieux
en France*



**La carte
des zones
sensibles**

M 01108 - 453 - F: 6,20 €



MENSUEL DOM 6,70 € BEL 7,20 € LUX 7,20 € D 7,90 € ESP 7,20 € GR 7,20 € IIA 7,20 € PORTCONT 7,20 € CAN 9,75 \$ CAN CH 12,40 \$ MAR 60 DH TUN 6,10 TND MAYOTTE 8,70 € TOM SURFACE 920 XPF TOM AWION 1600 XPS - ISSN 002956711

38 Dossier

Nucléaire et risques naturels



Le 11 mars dernier, un séisme et un tsunami frappaient le Japon, posant crûment la question de la préparation des centrales nucléaires vis-à-vis des risques naturels. Les centrales françaises - dont 5 sont en zone sismique et 14 à proximité de fleuves - sont-elles plus à même de faire face que celles du Japon ? Il est urgent de le savoir.

- 40 **Les centrales face au risque sismique** par Fabienne Lemarchand
- 44 **Les sites exposés aux séismes en Europe**
- 46 **Inondations et canicules menacent les réacteurs** par Xavier Müller
- 50 **Philippe Jamet : « Fukushima a montré que l'improbable est possible »** propos recueillis par Cécile Klingler

- 56 **Cognition**
Les massages aident les prématurés à se développer
par Fleur Lejeune et Édouard Gentaz
- 60 **Environnement**
Une marée noire éclaire l'origine des aérosols par Hugh Coe
- 64 **Santé**
Bientôt un vaccin contre le paludisme par Sandrine Etien
- 68 **Technologie**
Des carburants verts pour les avions ? par Muriel de Véricourt
- 72 **Portrait Martine Peeters**
« En Afrique, j'observe le passage de maladies de l'animal à l'homme »
par Nicolas Chevassus-au-Louis

76 **L'entretien du mois**
avec Nicolas Ruff



« Sur Internet, la sécurité est perçue comme un frein au business »

propos recueillis par Pierre Vandeginste

80 **Déchiffrage**
331 tués sur les routes en janvier 2011

par Pablo Jensen

81 **Le grand débat**
Les universités doivent-elles passer à l'anglais ?

avec Jean-Yves Chemin et Claude Truchot

84 **Question d'éthique**
Les neurosciences entrent dans la loi

par Cécile Klingler

86 **L'invité**
Anselm Kiefer
Je ne suis pas scientifique mais...

propos recueillis par Pascaline Minet

92 **Histoire de science**
Alzheimer fait trembler les marchés financiers

par Yves Gingras

87 **Les livres**

96 **L'agenda**

98 **Curiosités**

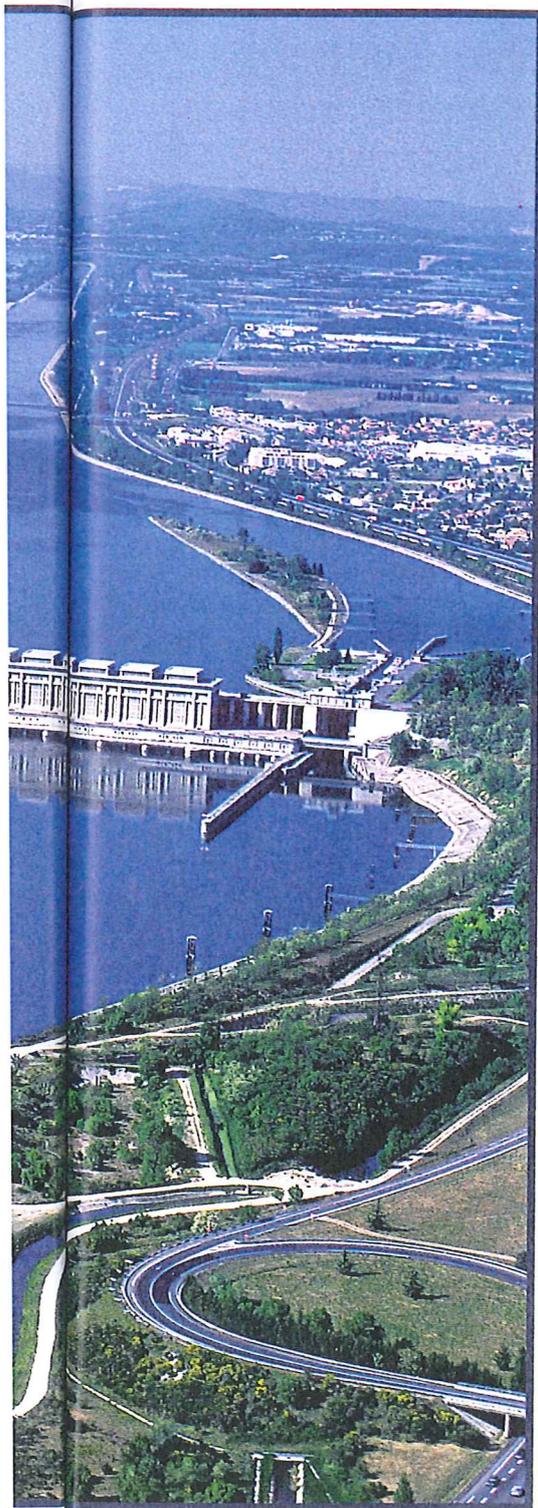
Nucléaire et ris



© P. GUIGNARD/URBAIR IMAGES SERVEUR

La centrale de Tricastin domine le barrage de Donzère sur le Rhône. Elle est également implantée à proximité des failles des Cévennes et de Nîmes.

risques naturels



Le 11 mars dernier, un séisme et un tsunami frappaient le Japon et posaient crûment la question de la préparation des centrales nucléaires vis-à-vis des risques naturels. Depuis, la centrale de Fukushima endommagée libère en effet des éléments radioactifs. Pour le géophysicien japonais Eiji Ohtani, le constat est sans appel : « *Les règles de sécurité actuelles [des centrales japonaises] ne sont pas suffisantes, même contre des séismes attendus* » [1]. Les centrales françaises sont-elles mieux préparées aux séismes et aux inondations ? Il est urgent de le savoir. Selon le cabinet Ubyrisk, la France a connu 670 événements naturels dommageables depuis dix ans, dont 136 inondations. Or 5 de nos centrales sont en zone sismique et 14 sont situées à proximité d'un fleuve.

[1] bit.ly/gMWjM3

- 1 Les centrales face aux risques sismiques** par Fabienne Lemarchand
- 2 Les sites exposés aux séismes en Europe**
- 3 Inondations et canicules menacent les réacteurs** par Xavier Müller
- 4 Philippe Jamet : « Fukushima a montré que l'improbable est possible »** propos recueillis par Cécile Klingler

1 • Les centrales face au risque sismique

La catastrophe de Fukushima a jeté le doute sur les capacités de nos centrales nucléaires à résister à un séisme. À quel type de séisme peut-on s'attendre en France ? Certaines centrales révèlent-elles des fragilités ?

PAR **Fabienne Lemarchand**,
journaliste
scientifique.

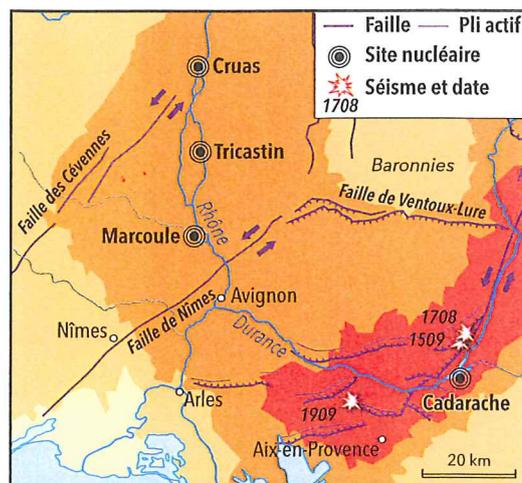
1 En France, quelles installations nucléaires sont les plus exposées aux séismes ?

Sur les vingt et une installations nucléaires françaises en activité, sept sont situées dans des zones sismiques : les centrales de Fessenheim, de Bugey, de Saint-Alban, de Cruas et de Tricastin, exploitées par EDF ; le centre de recherche du CEA, à Cadarache ; et l'Institut international Laue-Langevin, à Grenoble. Ainsi, la vallée du Rhin, où se trouve la centrale nucléaire de Fessenheim, a connu plusieurs séismes destructeurs au cours des derniers siècles. Aujourd'hui, on estime que la magnitude* du plus violent d'entre eux, qui a endommagé la ville de Bâle le 18 octobre 1356, était comprise entre 6,2 et 7,1. Son foyer était situé en Suisse, à une quarantaine de kilomètres seulement au sud de la centrale. Dans le sud de la France, Cruas et Tricastin sont implantées à proximité des failles des Cévennes et de Nîmes dans une zone qui a connu elle aussi plusieurs séismes de magnitude 5 à 6 (voir carte ci-contre). Quant au centre de Cadarache, il est situé près de la faille de Trévaresse, à l'origine du tremblement de terre de Lambesc du 11 juin 1909, et, surtout, de celle de la moyenne Durance. « Cette faille est la mieux connue

en France métropolitaine, précise David Baumont, qui dirige le Bureau d'évaluation des risques sismiques pour la sûreté des installations à l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Elle est susceptible d'engendrer un séisme de magnitude 6,5. D'après les indices laissés dans les couches géologiques superficielles, on sait qu'une telle secousse s'est produite il y a 9 000 à 26 000 ans. »

2 Sont-elles à l'abri d'une secousse sismique importante ?

Non, même si l'activité sismique est modérée, la France métropolitaine n'est pas à l'abri d'une secousse de magnitude 6, voire 7. Cette sismicité résulte du lent rapprochement des plaques africaine et européenne (5 millimètres par an en



Cette carte répertorie les 3 plus gros séismes historiques et les failles autour de 4 installations nucléaires. Ces informations, combinées à la sismicité mesurée, permettent de calculer les vibrations (de faibles en jaune à moyennes en rouge) auxquelles les installations doivent résister.

L'essentiel

- > EN FRANCE, 5 CENTRALES NUCLÉAIRES sur 19 sont situées dans des zones sismiques.
- > POUR CHAQUE SITE d'implantation, EDF évalue les vibrations du sol auxquelles les structures doivent résister.
- > PLUSIEURS INSTALLATIONS ont été renforcées pour mieux résister aux séismes.

La France métropolitaine a connu au cours du dernier millénaire de nombreux séismes d'intensité supérieure à V. Les secousses plus fortes d'intensité IX sont plus rares et situées dans les Pyrénées, les Alpes et la Provence, le Jura et le fossé Rhénan.

moyenne) à l'œuvre depuis 60 millions d'années. Sous la pression, les roches de la croûte terrestre se déforment puis finissent par casser le long de failles, provoquant un séisme. Toutefois, les gros séismes sont rares. En effet, la quantité d'énergie relâchée lors de la secousse – et donc sa magnitude – dépend des tensions accumulées le long de la faille qui casse, de la taille de la faille et du glissement des deux blocs de part et d'autre de celle-ci. Or les tensions sont faibles au niveau de l'Europe. « Les mesures de géodésie réalisées grâce au système de positionnement par satellite (GPS) montrent que seuls 10 % à 20 % de la déformation induite par le mouvement de compression entre l'Afrique et l'Europe sont absorbés en Europe occidentale », indique Robin Lacassin, de l'Institut de physique du globe de Paris (IPGP). En outre, en France métropolitaine, cette déformation se répartit non pas sur quelques grandes failles comme au Japon ou en Californie, mais sur de nombreuses failles plus modestes. Conséquence directe : « Sur chacune de ces failles, les déplacements sont faibles, au maximum de l'ordre du millimètre par an. »

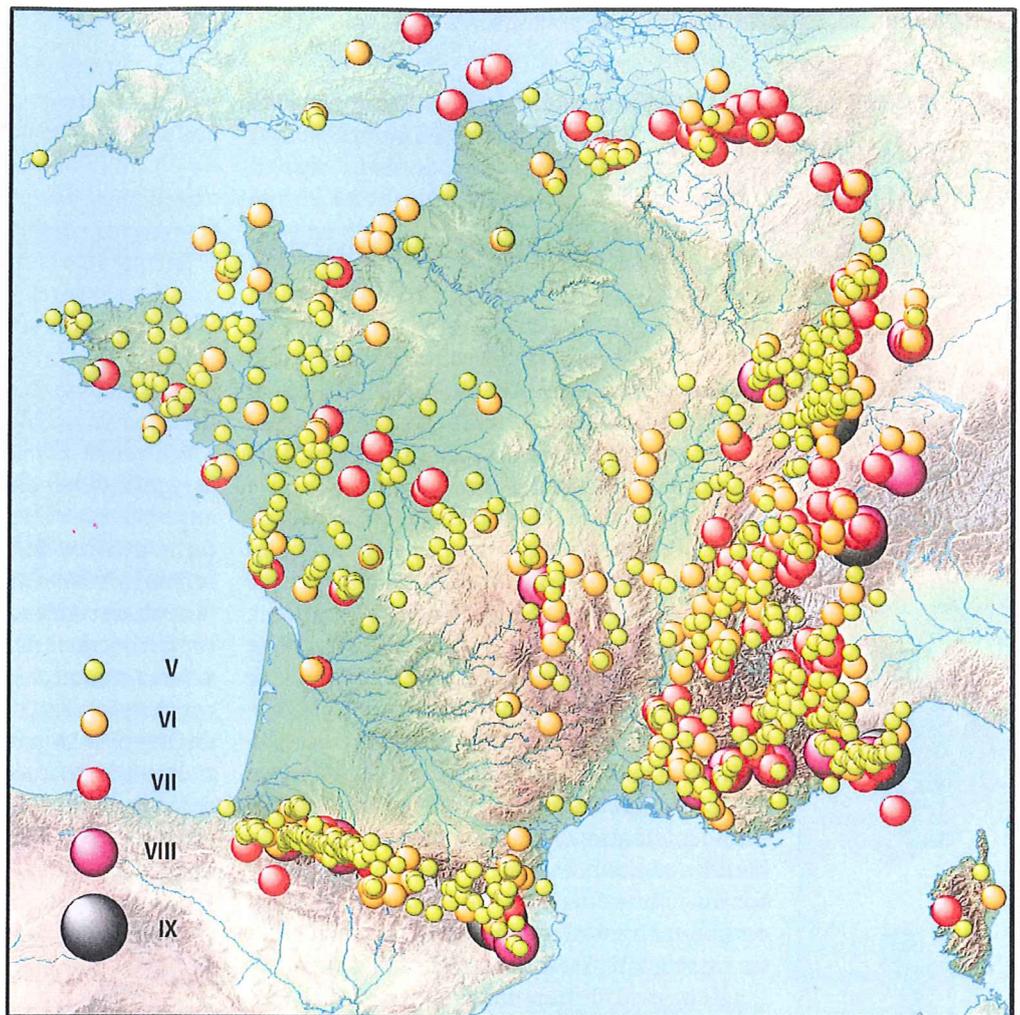
3 À quel rythme les plus gros séismes arrivent-ils ?

En moyenne, un à trois séismes de magnitude 6 à 6,5 se produisent par siècle. Le dernier en date a détruit la petite ville provençale de Lambesc et plusieurs villages alentour, le 11 juin 1909. Mais des secousses plus fortes ont pu se produire dans un passé plus lointain. Cette estimation est en effet réalisée à partir de mesures délivrées en continu

par les sismomètres et les accéléromètres. Or celles-ci n'existent que depuis un demi-siècle. Quant au catalogue des séismes historiques – enrichi par les experts du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), de l'IRSN et d'EDF –, il couvre à peine un millénaire [1]. Pour mieux estimer la récurrence des gros séismes, l'idéal serait d'avoir une connaissance précise des failles actives et de leur histoire depuis au moins cent mille ans. Ce qui, en France métropolitaine, est loin d'être le cas. Seule certitude : « Aucune de ces failles n'est suffisamment longue pour générer un séisme de magnitude 9, comme celui qui s'est produit au Japon en mars dernier », affirme Robin Lacassin.

4 En France, où la sismicité est-elle la plus forte ?

Dans les Pyrénées, les Alpes et la Provence, le Jura, le fossé Rhénan et, à un degré bien moindre, au niveau de la Charente et des Limagnes de l'Allier et de Loire. Toutes ces régions connaissent régulièrement des petits ou moyens séismes, de magnitude inférieure à 5. Les bassins Parisien et Aquitain sont, à l'opposé, quasi asismiques. Cette sismicité se poursuit à travers l'Europe, là où >>>



© BRGM - SISFRANCE, 2011

*** LA MAGNITUDE** mesure l'énergie libérée lors d'un séisme.

Les centrales face au risque sismique

s'affrontent l'Afrique et l'Europe, le long des Alpes et des chaînes montagneuses qui les prolongent (Apennins, Carpates, Dinarides et Hellénides).

5 Comment cette sismicité est-elle prise en compte dans les centrales nucléaires ?

Les centrales sont soumises à une réglementation propre, émise par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN). Pour chaque site, EDF est tenu d'évaluer l'aléa sismique, c'est-à-dire les vibrations du sol auxquelles les structures doivent résister. Cet aléa est calculé de façon « déterministe » : « On choisit le séisme qui par le passé a eu les effets les plus forts au voisinage du site, à partir du catalogue de la sismicité historique et instrumentale et, quand elles existent, des traces géologiques, explique David Baumont, de l'IRSN. Puis on considère que ce séisme historique de référence pourrait se produire à proximité de l'installation nucléaire. Il est ensuite majoré d'un demi-point en magnitude pour obtenir le « séisme majoré de sécurité ». » Les experts calculent ensuite l'amplitude des vibrations que ce séisme serait susceptible de produire et les effets d'amplification locale liés à la nature du sol (les « effets de site »). Ce sont ces paramètres qui serviront de base pour établir les caractéristiques antisismiques de la centrale nucléaire. Ces calculs sont réalisés en parallèle par l'IRSN. Si les écarts sont trop importants avec les paramètres déterminés par EDF, l'ASN organise la discussion entre les deux organismes pour arriver à un point d'accord. Une même méthode est appliquée à toute installation nucléaire.

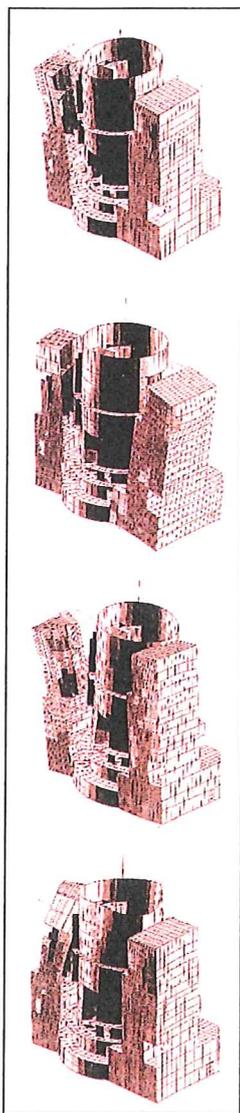
6 La centrale de Fessenheim crée la polémique : à quels séismes pourrait-elle résister ?

« La centrale a été conçue pour résister à un séisme de magnitude 6,7 juste sous elle », note Pierre Labbé, d'EDF. Pour arriver à ce chiffre, un demi-point de magnitude a été ajouté au séisme le plus violent de la région, « celui de Bâle qui a eu lieu en 1356 et qui était d'une magnitude estimée de 6,2 ». Mais cette magnitude, calculée au moment de la conception de la centrale dans les années 1970, est régulièrement remise en question. Dans une étude de 2009, des chercheurs du service sismologique suisse l'évaluaient entre 6,7 à 7,1 [2]. Ce qui conduirait à des séismes majorés de sécurité non plus de 6,7 mais de 7,2 à 7,6 ! La centrale de Fessenheim sortirait-elle indemne de tels séismes ? Nous l'ignorons. Pour Jérôme Lambert, qui gère au BRGM le catalogue national des séismes historiques, ces

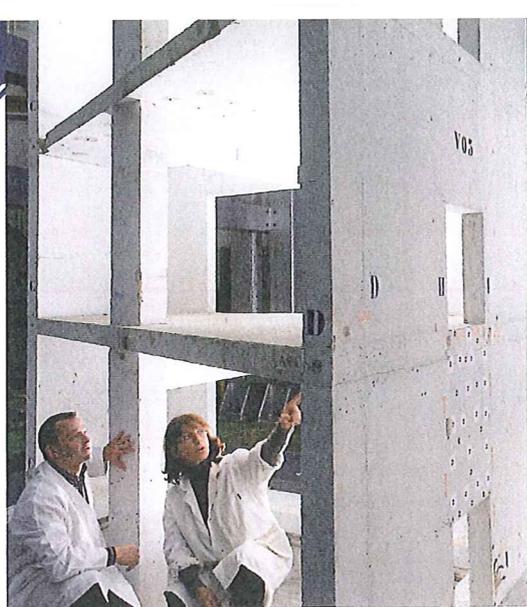
valeurs sont toutefois trop élevées. Les chercheurs suisses auraient estimé la magnitude du séisme de Bâle à l'aune de dégâts très importants qui s'expliquent non pas par une magnitude de 6,7 à 7,1 mais par « des effets liés à la nature du sol et par le fait que plusieurs secousses se sont succédé dont les effets se sont cumulés ». Autre source de débat : l'amplitude des vibrations retenues pour établir les caractéristiques parasismiques de la centrale de Fessenheim. Pour David Baumont, de l'IRSN, un autre séisme doit être intégré dans le calcul. « Bien que de moindre intensité*, celui qui a frappé la région allemande du Kaiserstuhl le 28 juin 1926 engendrerait, s'il se reproduisait sous la centrale, un mouvement de haute fréquence plus fort que ne le ferait le séisme de Bâle. » Dans cette hypothèse, la centrale serait sous-dimensionnée. « Les désaccords n'ont donc rien d'étonnant et ne relèvent pas nécessairement de la malhonnêteté intellectuelle », constate Fabrice Cotton, sismologue à l'université de Grenoble. La marge d'un demi-point en magnitude sur le séisme majoré de sécurité est justement là pour intégrer de manière « forfaitaire » ces incertitudes. La vraie question est de savoir si cette marge est suffisante ou non.

7 En quoi consiste une construction parasismique pour une centrale nucléaire ?

Toutes les centrales nucléaires françaises sont bâties selon les mêmes règles de base. Celles-ci doivent permettre d'éviter qu'une structure ne soit endommagée, et surtout de garantir le confinement de la radioactivité. « Les formes simples et symétriques, qui se comportent le mieux lors de séismes, sont privilégiées, précise Ghislaine Verrhiest-Leblanc, inspectrice de sûreté nucléaire à la division marseillaise de l'ASN. Les bâtiments complexes sont fragmentés en blocs séparés par des joints parasismiques (des espaces vides de tout matériau), ce qui leur permet d'osciller librement, sans s'entrechoquer. Les structures sont construites de façon à conserver un comportement élastique, c'est-à-dire une capacité à osciller et à se déformer lorsque le sol se met en mouvement, pour revenir ensuite à leur état initial. » Ces constructions, datant parfois de plusieurs dizaines d'années, sont renforcées au fil du temps. Des outils de simulation et d'expérimentation permettent d'évaluer les améliorations à apporter. « Nous pouvons simuler en trois dimensions le comportement des structures lors d'un séisme, étudier les effets de torsion et les effets de site », indique Pierre Labbé, d'EDF. Les zones de faiblesse des centrales peuvent aussi être évaluées de



Cette simulation montre le comportement de la centrale de Bugey en fonction des modes de vibration du sol. Elle a été réalisée avant les travaux de renforcement.



Cet édifice en béton de trois étages est une réplique d'un bâtiment nucléaire typique. Sa capacité de résistance aux séismes a été testée en 2008 sur la table vibrante du CEA, Azalée. © P. STROPPA/CEA

façon plus concrète. En 2008 par exemple, la capacité de résistance d'un bâtiment nucléaire typique, construit selon les normes en vigueur, a été testée sur une maquette baptisée Smart. « *Cet ouvrage en béton de trois étages, mesurant 3,6 mètres de haut et d'une masse de 42 tonnes, a été installé sur une table vibrante du CEA et soumis à des mouvements sismiques d'intensité croissante, explique Pierre Labbé. La maquette n'a pas été endommagée même après avoir subi un séisme cinq fois supérieur à son séisme majoré de sécurité.* »

8 Le risque sismique est-il réévalué au cours de la vie de l'installation ?

Il est obligatoirement lors de la visite de sûreté menée par l'ASN tous les dix ans (lire « Philippe Jamet : "Fukushima a montré que l'improbable est possible" », p. 50). « *On vérifie que le vieillissement de l'installation et les éventuelles modifications apportées au cours de sa vie n'ont pas affecté la sûreté. On peut aussi être amené à demander des renforcements afin de tenir compte de l'évolution des connaissances que ce soit en matière d'aléa sismique ou de construction parasismique pour toujours conserver des marges suffisantes* », observe Ghislaine Verrhiest-Leblanc, de l'ASN. Des contrôles intermédiaires sont aussi faits qui concernent le génie civil ou encore la gestion d'une éventuelle crise sismique. Les renforcements nécessaires sont parfois impossibles à réaliser. Dans ce cas, l'ASN peut demander l'arrêt et le démantèlement de l'installation. À Cadarache, l'Atelier de technologie du plutonium ouvert en 1962 a ainsi été mis à l'arrêt en 2009 en raison de ses faiblesses en matière de tenue au séisme. Il est en cours

de démantèlement. Le Laboratoire d'études et de fabrication de combustibles avancés a quant à lui fait l'objet de renforcements parasismiques lourds. En 2010, l'ASN a imposé à l'exploitant la pose de drains afin d'éviter les phénomènes de liquéfaction du sol en cas de séisme. Une opération de 3 millions d'euros... Côté EDF, les travaux de renforcement les plus récents concernent les installations électriques de la centrale de Bugey après une réévaluation du risque sismique lors de la troisième visite décennale. Enfin, la tenue aux séismes va être réévaluée dans les mois qui viennent dans le cadre des tests de résistance qui vont être conduits dans toutes les installations européennes après la catastrophe de Fukushima.

9 La réglementation actuelle est-elle suffisante pour garantir la sûreté nucléaire ?

Émises en 2001, les règles de sûreté en vigueur aujourd'hui sont en adéquation avec l'état actuel des connaissances d'alors. Mais peut-on s'en contenter, surtout après la catastrophe japonaise qui a montré que le scénario le plus improbable pouvait se réaliser [3] ? Pour certains, une façon de réduire les incertitudes serait de calculer un aléa sismique de façon probabiliste, comme pour le nouveau zonage sismique de la France. « *En un lieu donné, on considère tous les événements sismiques possibles et toute la gamme de vibrations associées, et l'on associe chacun à une probabilité d'occurrence* », explique Fabrice Cotton. « *Les études comparatives que nous avons menées récemment montrent que les incertitudes ne sont pas moindres* », nuance David Baumont. Ces deux chercheurs soulignent que, quelle que soit la démarche, le problème essentiel est que nous n'avons pas le recul suffisant pour évaluer le risque sismique du fait des courtes mémoires des catalogues de sismicité instrumentales et historiques. En outre, l'amplitude des vibrations produites par un séisme reste difficilement estimable. « *Lors du séisme de Sendai, en mars dernier, des accélérations du sol supérieures à 2,5 g (environ 20 mètres par seconde au carré) ont été atteintes localement, un niveau inimaginable il y a encore quelques décennies*, remarque Fabrice Cotton. *Une autre voie sur laquelle nous travaillons actuellement pourrait être d'estimer la taille des failles potentiellement dangereuses et d'en déduire les séismes maximaux possibles.* » Autrement dit de considérer le risque maximal envisageable même si c'est sur une durée de plusieurs milliers, voire dizaines de milliers, d'années. ■

L'INTENSITÉ est appréciée d'après les effets ressentis en surface, elle est mesurée par l'échelle MKS, qui comprend 12 degrés.

[1] www.sisfrance.net

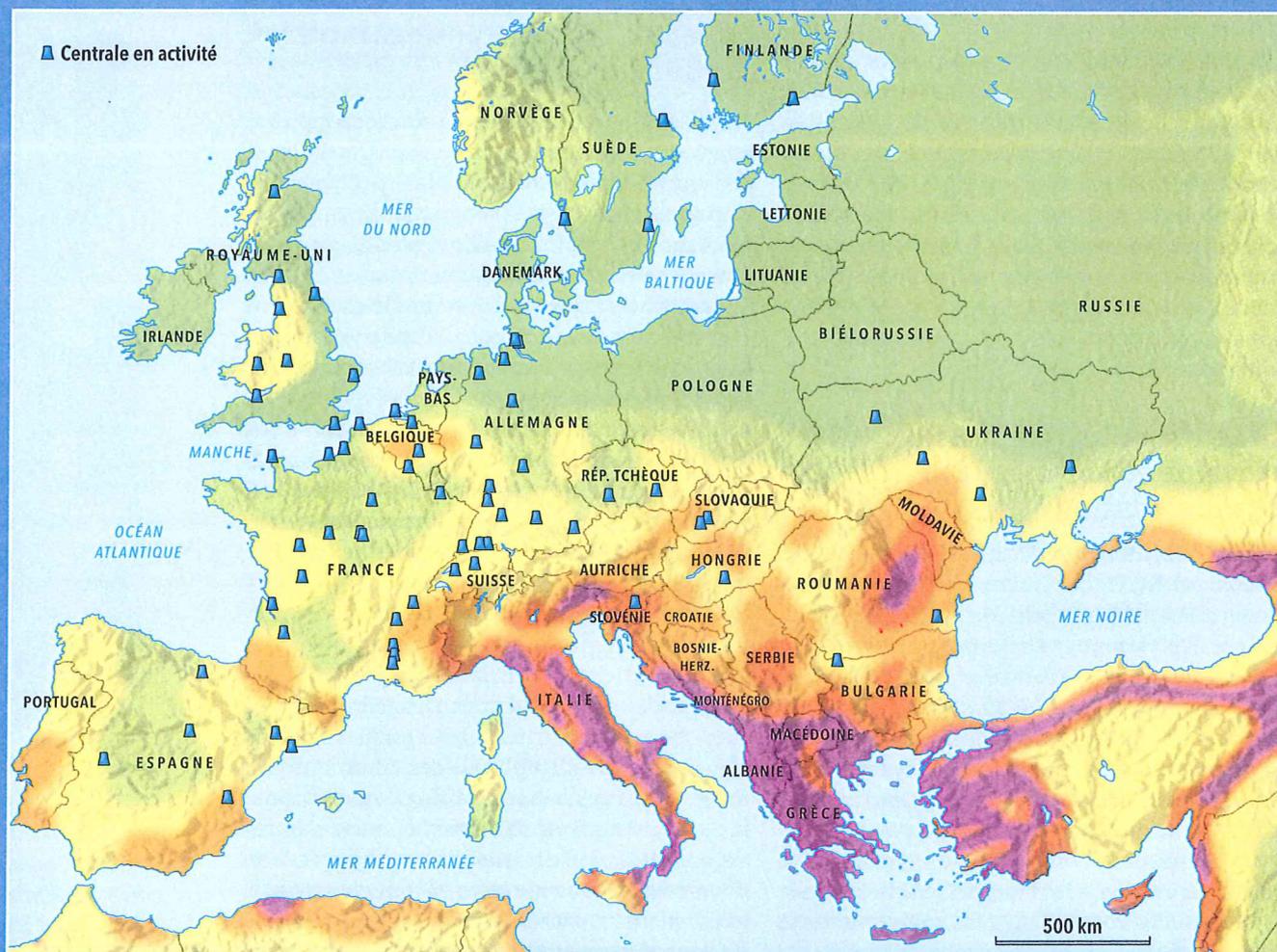
[2] D. Fäh et al., *Geophys. J. International*, 178, 351, 2009.

[3] « Le nucléaire civil après Fukushima », *La Recherche*, mai 2011, p. 8.

2 • Les sites exposés aux séismes en Europe

Plusieurs centrales, en France et en Europe, ont été construites dans des régions où le risque de survenue d'un séisme est avéré. Une nouvelle carte de la sismicité française délimite les zones les plus à risque.

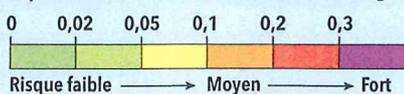
LES CENTRALES EUROPÉENNES



SOURCE : EUROPEAN SEISMOLOGICAL COMMISSION - © LÉGENDES CARTOGRAPHIE

Risques sismiques

probabilité de 10% que l'accélération du sol dépasse le seuil maximum en 50 ans (unités : g)



Le parc nucléaire européen est, plus encore que le parc français, exposé au risque sismique : deux centrales dans l'ouest de l'Allemagne, deux centrales en Suisse, les centrales slovène et roumaine sont implantées dans des zones sismiques. Cette sismicité résulte, comme celle qui affecte la France, du lent rapprochement des plaques africaine et européenne.

LE RISQUE SISMIQUE EN FRANCE

Mise en place le 30 avril 2011, cette toute nouvelle carte de la sismicité en France présente les zones où le risque de survenue d'un séisme est le plus fort. En métropole, celles-ci se situent dans le sud de l'Alsace, au niveau du fossé Rhénan, des Pyrénées et des Alpes. Sept installations nucléaires sur 21 en activité en France se situent dans des régions où l'aléa sismique est modéré.



Risques sismiques

Aléa	Mouvement du sol
Très faible	accélération < 0,7 m/s ²
Faible	0,7 m/s ² ≤ accélération < 1,1 m/s ²
Modéré	1,1 m/s ² ≤ accélération < 1,6 m/s ²
Moyen	1,6 m/s ² ≤ accélération < 3 m/s ²
Fort	3 m/s ² ≤ accélération

Installations nucléaires de base

- REP : réacteur à eau sous pression
- RNR : réacteur à neutrons rapides
- REP en construction
- REP en démantèlement
- Réacteur à graphite/gaz ou gaz/eau lourde en démantèlement

Autres installations nucléaires

- Usine du cycle de combustible (enrichissement, fabrication, retraitement)
- Stockage des déchets
- Centre d'études et de recherche
- Atelier, laboratoire

SOURCE MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE