

Chapitre 8

Recherches dans le domaine des agressions externes d'origine naturelle

La prise en compte des risques d'agressions externes d'origine naturelle dès la conception des installations nucléaires et durant leur exploitation est essentielle pour la sûreté de ces installations. L'objectif général est que les fonctions de sûreté associées aux structures, systèmes et composants ne soient pas remises en cause par de telles agressions. Les connaissances scientifiques dans le domaine des sciences de la terre – comme la géologie, l'hydrogéologie, la sismologie, etc. – constituent le fondement de l'évaluation des aléas associés aux agressions externes d'origine naturelle, c'est-à-dire des caractéristiques à retenir pour la conception ou la vérification des installations (mouvements sismiques du sol, hauteur d'eau, etc.). Améliorer la sûreté des installations implique notamment un effort pour rendre plus fiable la capacité de compréhension des mécanismes en jeu dans les phénomènes naturels et leurs effets. C'est l'objectif général des actions de recherche conduites depuis une quarantaine d'années par l'IPSN, puis l'IRSN – tout particulièrement en matière de séisme.

Les agressions externes, objets de travaux de recherche et développement par l'IPSN puis l'IRSN, seul ou en collaboration, sont pour l'essentiel le séisme, l'inondation, les agressions d'origine climatique. Ces travaux visent à développer, améliorer et valider des outils (y compris des bases de données) et des méthodes permettant une meilleure détermination des aléas et de leurs conséquences. Des études de terrain, des expérimentations ponctuelles et des mesures instrumentales permanentes (réseau sismologique et GPS⁸⁵) complètent les travaux de recherche théorique et de modélisation.

85. *Global Positioning System.*

Comme l'inondation du site de la centrale nucléaire du Blayais en décembre 1999 et l'accident survenu à la centrale de Fukushima Daiichi en mars 2011 l'ont montré, la sûreté nucléaire ne peut être assurée qu'au prix d'une protection adéquate des installations contre toutes les formes d'agressions, ce qui impose d'évaluer correctement les aléas naturels à retenir, auxquels elles pourraient être confrontées, en particulier ceux liés aux événements sismiques et à la survenue d'inondation. Au Japon, le séisme de Tohoku et le tsunami qui en a résulté mais aussi celui survenu en juillet 2007 à Chūetsu-oki non loin de la centrale nucléaire de Kashiwasaki-Kariwa⁸⁶, ainsi que, dans une moindre mesure, celui survenu en août 2011 en Virginie (États-Unis) à environ 18 km de la centrale nucléaire de North Anna⁸⁷, ont conduit à souligner l'importance et les limites des connaissances et méthodes sur lesquelles reposent le dimensionnement des installations nucléaires. Le besoin d'approfondir la connaissance et l'évaluation des aléas naturels pouvant affecter gravement les sites nucléaires fait aujourd'hui l'objet d'un large consensus international – comme cela est ressorti des conclusions d'une conférence internationale organisée par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) en mars 2012. C'est en particulier vrai en France, où l'amélioration de la prise en compte du risque sismique et du risque d'inondation figure au rang des priorités fixées dans le cadre du retour d'expérience de l'accident de Fukushima par l'IRSN, l'ASN et les pouvoirs publics – répercutées dans l'appel à projets RSNR de l'Agence nationale de la recherche (ANR) avec financement par le plan d'investissement d'avenir (PIA). Dans ce nouveau contexte, la définition d'aléas extrêmes génère deux types d'enjeux en matière d'étude, de recherche et de développement, l'un relevant de la connaissance de phénomènes (y compris d'indices historiques), l'autre de méthodes pour leur prise en compte avec les incertitudes associées et aboutir à la définition des aléas maximaux à retenir pour la conception des installations nucléaires.

8.1. Séisme

La pratique de l'évaluation de l'aléa sismique en France pour les installations à risque spécial (installations nucléaires et chimiques, barrages, etc.) a historiquement suivi une approche de nature déterministe. Cette approche vise à estimer le niveau d'accélération qui serait produit par le plus fort séisme historique ramené au plus près du site, augmenté d'une marge de sécurité⁸⁸. Cette marge est définie en augmentant d'un demi-degré la magnitude⁸⁹ du séisme retenu.

D'une manière générale, pour évaluer l'aléa, il est nécessaire d'identifier les « sources » capables de produire les séismes agresseurs et de caractériser leur potentialité. Dans les zones de faible sismicité où les failles sont mal connues, l'approche déterministe revient à

86. Cette centrale n'a pas subi d'endommagements.

87. Séisme de magnitude modérée (5,8) et de faible profondeur (6 km), peu attendu eu égard à la sismicité historique de la zone de Virginie concernée.

88. Le plus fort séisme historique est dénommé SMHV (séisme maximal historiquement vraisemblable), et celui avec marge correspond au SMS (séisme majoré de sécurité).

89. La magnitude d'un tremblement de terre est une mesure de la quantité d'énergie libérée au foyer d'un séisme. Les magnitudes habituellement utilisées de nos jours sont exprimées en magnitudes de moment (notées Mw).

considérer des régions comme sources possibles de séismes. Ces zones sont définies sur la base de leur homogénéité en termes de géologie et de sismicité. Dans les régions un peu plus actives comme la Provence, l'Alsace et les Pyrénées par exemple, les failles sont souvent mieux connues et, surtout, des séismes importants peuvent être associés (par leur position cartographique) à ces failles-sources. Il reste qu'estimer l'aléa relève d'une démarche plus large qui nécessite d'apporter des réponses aux questions suivantes :

- quelle est la taille des failles qui peuvent générer des séismes ? La magnitude d'un séisme, et donc sa dangerosité, est directement liée à ce paramètre. La taille et l'extension d'une faille active peuvent être déterminées par la cartographie en surface et la localisation des microséismes, ainsi que par l'imagerie en profondeur. La caractérisation de séismes majeurs « préhistoriques » permet également d'évaluer ce paramètre ;
- avec quelle vitesse se déforme la région affectée par les failles en question ? Il s'agit d'un critère important pour savoir avec quelle période reviendront les séismes majeurs. En plus de la datation des marqueurs géologiques, les mesures de géodésie spatiale (GPS, InSar⁹⁰) apportent des données utiles pour évaluer cette vitesse.

Évaluer l'aléa sismique associé à un système de failles actives consiste à répondre aux questions précédentes grâce à la mise en œuvre d'études et de travaux de recherche et développement.

Dans le domaine de l'aléa sismique, l'IPSN puis l'IRSN ont été précurseurs sur de nombreux aspects, comme l'étude de la sismicité historique avec la base de données SisFrance, l'analyse de données de géophysique profonde, la paléosismologie ou la cartographie et la surveillance sismique de failles actives avec notamment les études du système de failles de la Moyenne Durance, caractérisée par une sismicité régulière (document en référence [1] de 2007). Les résultats acquis par ces études ont permis de caractériser la microsismicité du système de failles et de proposer une évaluation de l'aléa sismique plus précise (notamment en termes de magnitudes), utile notamment pour l'évaluation ou la réévaluation du risque sismique des installations nucléaires du centre CEA de Cadarache.

Au fil des années, les programmes de recherche mis en œuvre ont permis à l'IPSN puis l'IRSN de développer un réseau de partenariats scientifiques aussi bien en France qu'à l'étranger. Au cours des dernières années, la compétence accumulée par l'IRSN lui a permis de bénéficier de financements de l'ANR et d'être sollicité par plusieurs pays souhaitant se doter d'un parc électronucléaire (ou renforcer celui dont ils disposent) pour des études de site. Les actions engagées ont par ailleurs progressivement contribué à définir des méthodes applicables aux installations nucléaires de base, notamment formalisées dans la règle fondamentale de sûreté (RFS) 2001-01. Les connaissances et données produites viennent également alimenter les expertises effectuées par l'IRSN dans le cadre des diverses réévaluations de sûreté. Elles ont été également largement mobilisées dans le cadre de la réalisation des évaluations complémentaires de

90. *Interferometric synthetic aperture radar.*

sûreté (ECS) menées à la suite de l'accident de Fukushima Daiichi, de la présentation du rapport français lors de la *peer review* européenne ou de l'expertise des dossiers relatifs aux « noyaux durs » en cours de mise en place, notamment dans les centrales du parc électronucléaire français (équipements devant résister à des aléas d'un niveau supérieur à celui retenu pour la conception des installations). À cet égard, suite aux recommandations de l'ENSREG⁹¹, une approche probabiliste pour l'évaluation des aléas de faibles probabilités a été mise en place en complément de la méthode déterministe.

Il est également à noter que les connaissances acquises en matière d'aléa sismique ont été mises à profit par l'IRSN dans son rôle d'expert en appui au ministère de l'Environnement à l'occasion de l'élaboration de la carte de l'aléa sismique en France métropolitaine, entrée en vigueur au 1^{er} mai 2011. Ce nouveau « zonage », qui vise le bâti conventionnel et les installations à risque spécial (hors installations nucléaires et barrages), repose non seulement sur la sismicité connue historiquement – ce qui était essentiellement le cas du « zonage » précédent datant de 1991 – mais surtout sur une évaluation probabiliste de l'aléa sismique (estimation du mouvement sismique susceptible d'être atteint ou dépassé en fonction de la probabilité fixée, typiquement 10 %, sur une période de temps de 50 ans). Cependant, pour les installations nucléaires et pour répondre aux recommandations de la RFS 2001-01, l'IRSN met régulièrement à jour un « zonage sismotectonique » intégrant notamment les connaissances acquises par la recherche en général. En outre, toujours en lien avec les recommandations de la RFS 2001-01, l'IRSN a participé à la constitution d'une base de données nationale⁹² recensant les indices de forts séismes survenus à des périodes très reculées (quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'années) en France, dits paléoséismes. Dans le cadre d'un protocole avec la Direction générale de la prévention des risques (DGPR), l'IRSN a en outre récemment développé une base de données des failles actives dans un périmètre de 50 km autour des installations nucléaires.

La recherche de l'IRSN en matière d'aléa sismique concerne notamment :

- l'identification et la compréhension du fonctionnement des failles (en France et à l'étranger). Les travaux visent à identifier les failles susceptibles de produire des séismes (failles actives) et à les caractériser (localisation, géométrie, vitesse de déformation). Ils s'appuient sur l'analyse d'enregistrements et sur l'étude de la sismicité historique et d'indices paléosismiques. La caractérisation de l'activité d'une faille (*i.e.* sa capacité à générer un séisme) ou la découverte de nouvelles failles actives en France est nécessaire pour servir de base, confirmer ou améliorer les évaluations de l'aléa sismique. Ces travaux combinent différentes approches (étude des anomalies de la morphologie à l'aide de modèles numériques de terrain, de photos spot, de méthode d'imagerie spatiale, d'études géologiques de terrains, réalisations de tranchées pour retrouver des traces de paléoséismes). Depuis l'étude du système de failles de la Moyenne Durance évoquée plus haut, les travaux de recherche de l'IRSN se poursuivent en France, sur la faille du Vuache (Jura), notamment responsable du séisme qui en 1996 a provoqué des dommages

91. *European Nuclear Safety Regulators Group.*

92. Voir le site www.neopal.net.

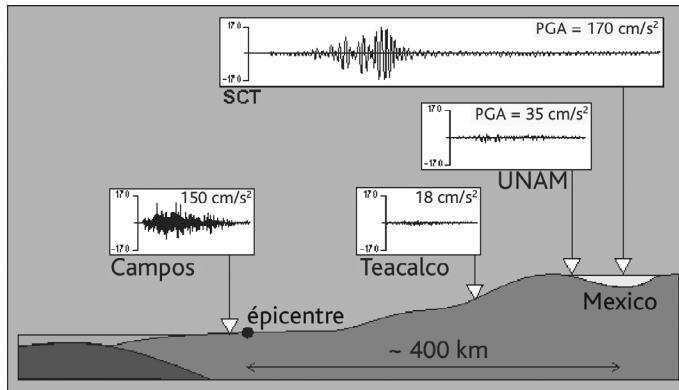


Figure 8.1. Exemple d'effets de site dans la zone lacustre de Mexico (PGA : Peak Ground Acceleratis).
© Jean-François Semblat.

à Annecy, ainsi que sur d'autres failles de l'avant-pays alpin, du Fossé Rhénan et de la Manche et à l'étranger (Équateur, Inde, Espagne) ;

- la prédiction des mouvements sismiques potentiels : les travaux sont menés sur la base d'approches empiriques (établies à partir d'observations) et de simulations numériques ;
- l'estimation de la réponse sismique du sol spécifique à un site (intégrée dans le terme « effets de site » [figure 8.1]). La recherche a permis de mettre en évidence l'importance toute particulière des « effets de site », qui peuvent conduire à des amplifications importantes des mouvements sismiques dans la gamme de fréquences d'intérêt pour les ouvrages de génie civil⁹³. Les travaux dans ce domaine nécessitent en particulier l'acquisition de données géotechniques et géologiques sur les sites et la mise en œuvre de modélisations complexes rendant compte notamment d'éventuels comportements non linéaires. Les « effets de site » recouvrent les effets liés au type de sol sur lequel repose une installation (roche, sédiment) et ceux liés à la configuration particulière du site (aussi appelés « effets de site particuliers » – ils visent par exemple le cas de sites situés dans un bassin sédimentaire enchâssé dans un milieu rocheux). Le bassin de Grenoble est historiquement le site test français d'observation d'« effets de site » dans des vallées profondes, suite à la réalisation, en 1999 et à l'instigation de l'IPSN, d'un forage profond. L'IRSN a travaillé également, en collaboration avec des instituts étrangers, dans d'autres zones de sismicité active (golfe de Corinthe en Grèce, bassin de Santiago du Chili). Les chantiers actuels se situent en France, dans la cuvette sédimentaire de Cadarache et en Grèce, près de la ville d'Argostoli.

93. Quelques Hertz. Les « effets de site » peuvent réduire les mouvements de sol pour les plus hautes fréquences et les amplifier aux basses fréquences.

L'IRSN est activement représenté au sein des principales instances fédérant les acteurs de la recherche en sismologie, comme l'Association française du génie parasismique (AFPS) et le Réseau sismologique & géodésique français (RESIF).

Par ailleurs, l'IRSN est partenaire du projet SINAPS@ (« Séisme et installation nucléaire : améliorer et pérenniser la sûreté ») avec le CEA, coordinateur du projet, l'IFSTTAR⁹⁴, l'École Centrale Paris, EDF, l'ENS⁹⁵Cachan, etc. SINAPS@ est un projet de recherche dans lequel le risque sismique est évalué dans sa globalité, de la faille aux ouvrages de génie civil et aux équipements. Il vise à explorer les incertitudes inhérentes à l'évaluation de l'aléa sismique et de la vulnérabilité des ouvrages et des équipements. L'objectif majeur est *in fine* d'identifier, voire de quantifier, les marges sismiques qui résultent des hypothèses retenues soit lors du choix du dimensionnement, soit de la stratégie de conception (hypothèses conservatives, choix des matériaux, etc.). Les principales thématiques du projet SINAPS@ auxquels contribue l'IRSN sont :

1. La quantification des incertitudes associées aux connaissances sur les données d'entrée et à la hiérarchisation des paramètres qui contrôlent la variabilité des évaluations de l'aléa sismique dans les approches déterministes et probabilistes.
2. Le benchmark (comparaison de codes et confrontation aux données) international connu sous le nom de PRENOLIN⁹⁶. PRENOLIN (2013–2015), réintégré à SINAPS@ suite à une demande de l'ANR, a pour objectif de proposer une approche pour la prise en compte des phénomènes de non-linéarité des sols dans la dimension « effets de site » de l'aléa sismique, approche qui soit validée par une confrontation aux observations de terrain. Cette approche devra pouvoir être appliquée aux contextes de sismicité faible et modérée, ce qui implique la nécessité de faire appel à des simulations, tout en valorisant les informations d'ordre empirique (enregistrement de séisme faible) sur les zones concernées.
3. La simulation numérique du mouvement sismique à proximité des failles. L'objectif de ce volet est de compléter la prédiction empirique du mouvement sismique qui est pauvre en données près des failles. En effet, la simulation numérique permet d'explorer l'origine physique de la variabilité du mouvement sismique, ce qui pourrait réduire les incertitudes inhérentes au manque de connaissances actuelles. Quantifier et réduire l'incertitude associée aux prédictions du mouvement sismique en champ proche est un enjeu important dans l'estimation de l'aléa sismique site-spécifique.
4. La sélection des signaux sismique pertinents pour l'évaluation de la tenue de bâtiments. Cette thématique se situe à l'interface entre le sismologue et les sciences du génie civil. La multiplicité de procédures de sélection en accord avec l'aléa d'une part, les évolutions des méthodes de modélisations non linéaires du comportement des bâtiments d'autre part, nécessitent d'engager des études à cheval entre ces deux disciplines. L'objectif est de fournir des éléments pour la mise à jour de guides existants.

94. Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux.

95. École nationale supérieure.

96. Amélioration de la prédiction des effets non linéaires induits par les mouvements sismiques forts.

Il est à noter un autre programme de recherche : le programme SIGMA (*Seismic Ground Motion Assessment* [2011–2015]) fédéré par EDF autour de ses besoins et de ceux des autres exploitants et concepteurs (AREVA, CEA, ENEL, etc.). Ce programme SIGMA couvre les domaines évoqués ci-dessus : la caractérisation des sources sismiques, la prédiction du mouvement de sol, les « effets de site » et les méthodes probabilistes. Les enseignements tirés et des recommandations à l'usage des concepteurs et des exploitants sont attendus vers 2016–2017.

Enfin, un sujet particulier d'investigations a été retenu dans le cadre des réévaluations sismiques des réacteurs du parc électronucléaire français : il s'agit de l'identification des failles actives susceptibles de conduire à des déplacements à la surface du sol ou au voisinage de cette surface, appelées couramment failles capables⁹⁷. Il a été demandé⁹⁸ à EDF de présenter un état des connaissances concernant l'identification d'éventuelles failles capables dans un rayon de 25 km autour des sites⁹⁹ et, le cas échéant, la méthodologie de prise en compte pour la réévaluation du risque sismique des sites. Le traitement de ce sujet a conduit l'IRSN à engager de nouveaux travaux en termes d'études, de recherche et de développement au sein de groupes internationaux (AIEA et INQUA¹⁰⁰).

8.2. Inondation externe

Pour ce qui concerne les autres agressions d'origine naturelle, l'essentiel des efforts concerne l'inondation d'origine externe aux installations, avec des études relatives à l'applicabilité de méthodes statistiques pour expliquer des événements de type horsain, aux pluies extrêmes, au traitement des hétérogénéités dans le traitement statistique de données (crues fluviales notamment), à l'analyse historique d'événements exceptionnels (tsunamis sur la côte Atlantique, etc.) ou encore à l'évaluation du risque de percolation à travers des digues. Les acquis récents de la recherche dans ce domaine sont présentés dans l'ouvrage cité en référence [2], résultant des travaux d'un groupe piloté par l'IRSN qui a réuni des représentants de nombreux organismes (ANDRA, AREVA, CEA, EDF, Centre d'études techniques maritimes et fluviales (CETMEF), Compagnie nationale du Rhône (CNR), Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM), Météo-France, Bureau d'études techniques et de contrôle des grands barrages (BETCGB). Des spécialistes du Bureau de recherche géologique et minière (BRGM) et du Centre national du machinisme agricole, du génie rural, des eaux et des forêts (CEMAGREF) ont également participé aux réflexions du groupe, ainsi que des universitaires.

97. En anglais : *capable faults* (voir à cet égard le guide de l'AIEA SSG-1, de 2010).

98. Demande faite par l'Autorité de sûreté nucléaire dans le cadre du réexamen de sûreté associé aux troisièmes visites décennales (VD3) des réacteurs de 1 300 MWe, étendue aux VD4 900 MWe et VD2 « N4 » (courrier CODEP-DCN 2014-051797 du 18 décembre 2014).

99. Rayon d'investigation proposé dans le guide IAEA SSG-9 (*near regional investigations*). Ce guide retient quatre échelles spatiales associées à un degré croissant d'investigations : *regional, near regional, site vicinity* et *site area*. Ce guide recommande de rechercher les indices de failles capables jusqu'à des périodes très reculées, au moins 10 000 ans.

100. *International Union for Quaternary Research*.

Pour chaque phénomène (les niveaux hauts marins – y compris par phénomène de tsunami –, les crues fluviales, les pluies et le ruissellement, les remontées de nappes d'eau souterraines, les ruptures de barrage), ont été examinés :

- les données de base,
- les paramètres physiques à quantifier (intensité, volume, niveau d'eau, etc.),
- les méthodes de caractérisation existantes (déterministes ou statistiques), en identifiant les limites de ces méthodes,
- l'identification et la prise en compte des incertitudes,
- l'influence des évolutions climatiques,
- la dépendance entre les différents phénomènes/événements.

Cet état de l'art a notamment servi de support à l'élaboration d'un guide de l'Autorité de sûreté nucléaire destiné notamment aux exploitants, qui détaille les recommandations pour l'évaluation et la quantification des risques d'inondation externe, ainsi que pour la définition des moyens de protection adaptés pour y faire face¹⁰¹. Son élaboration s'est inscrite dans la continuité des enseignements tirés de l'inondation partielle de la centrale du Blayais lors de la tempête de décembre 1999, qui avait conduit les exploitants à réévaluer la sûreté des installations face au risque d'inondation, dans des conditions plus sévères qu'auparavant, et à mettre en œuvre un renforcement de la protection de leurs installations. Au-delà de ces améliorations, l'état de l'art [2] a permis une réflexion de fond s'appuyant sur les progrès des connaissances pour assurer une prise en compte plus complète et plus robuste du risque d'inondation externe. Le guide ASN constitue ainsi un texte de référence non seulement pour les nouveaux projets d'installations nucléaires mais aussi pour les réévaluations de sûreté décennale de celles en exploitation.

La poursuite des travaux de l'IRSN concerne – notamment dans le contexte post-Fukushima – des aspects méthodologiques tels que :

- les méthodes statistiques pour la détermination d'événements hydrométéorologiques extrêmes, les approches paléo-sédimentaires ;
- la modélisation d'écoulements et des phénomènes de ruissellement, avec des applications à des cas concrets.

De plus, concernant l'aléa tsunami, l'IRSN est partenaire du projet TANDEM¹⁰² (2014–2018) financé par l'ANR dans le cadre RSNR, auquel sont associés le CEA, EDF, le BRGM, l'Ifremer, l'Inria et l'Université de Pau. Ce projet de recherche vise à évaluer les effets d'un tsunami sur les côtes françaises avec un accent particulier sur les côtes de l'Atlantique et de la Manche, où des installations nucléaires civiles sont exploitées. Ce projet doit mettre en œuvre de nouvelles méthodes d'analyse numérique qui seront

101. Guide ASN n° 13 « Protection des installations nucléaires de base contre les inondations externes » - version du 8 janvier 2013.

102. *Tsunami in the Atlantic and the English Channel: Definition of the Effects through numerical Modeling.*

adaptées et testées sur les bases de données concernant le tsunami du 11 mars 2011 au large de Tohoku au Japon. Une fois ces méthodes validées, elles seront appliquées aux côtes françaises dans le but de définir les conséquences qu'aurait un tsunami d'une telle ampleur. À long terme, les conclusions devront permettre de produire de nouvelles orientations pour l'évaluation des risques sur les installations nucléaires.

Références

- [1] Étude du potentiel sismique et de l'enracinement de la faille de la Moyenne Durance, rapport scientifique et technique 2007, IRSN, 2007.
- [2] L'aléa inondation – État de l'art préalable à l'élaboration du guide inondation pour les installations nucléaires, IRSN, série Avis et rapports/rapports d'expertise/sûreté nucléaire, 2013.