

## **Annexe 7**

### **L'évaluation de la tenue aux séismes des installations nucléaires françaises**

#### **A - Évaluation de l'aléa sismique - La réglementation applicable aux sites nucléaires français**

Pour concevoir une installation nucléaire, il importe de bien identifier les séismes susceptibles de produire des effets à l'endroit où l'installation sera construite. Ensuite, il faut définir les « séismes de référence » à prendre en compte pour dimensionner l'installation de telle sorte qu'elle ne soit pas endommagée par ces séismes. L'évaluation de l'aléa sismique, c'est la détermination de ce niveau de référence. En France, la Règle Fondamentale de Sûreté (dite RFS 2001-01) précise la démarche pour évaluer l'aléa sismique sur les sites des installations nucléaires.

La RFS 2001-01 prévoit les étapes suivantes :

- 1. Définir les zones géologiques où les séismes historiquement connus pourraient se reproduire à l'avenir (zones sismotectoniques) sur la base d'une synthèse des données géologiques et sismologiques*

La genèse des séismes répond à des lois physiques, pour l'essentiel contrôlées par l'action des forces tectoniques sur la croûte terrestre, et plus spécifiquement au niveau des zones de faiblesses de celle-ci que sont les failles. Dans le contexte sismotectonique français, caractérisé par une sismicité modérée, les failles susceptibles de générer des séismes sont rarement identifiées. Compte tenu de ce manque de connaissance, la RFS demande aux exploitants d'étudier tous les éléments qui jouent, directement ou indirectement, un rôle dans la genèse des séismes. Il s'agit d'analyser les paramètres géologiques et sismologiques et de définir des zones (dites zones sismotectoniques) considérées comme homogènes du point de vue de leur potentiel à générer des séismes. Dans les zones sismotectoniques ainsi définies, on considère que, pour une zone donnée, tous les séismes qui s'y sont produits peuvent s'y reproduire à l'avenir en n'importe quel endroit de la zone.

La figure 1 présente le zonage sismotectonique de la France le plus récent utilisé par l'IRSN dans le cadre de ses travaux d'analyse des dossiers de sûreté des exploitants, effectués pour le compte des autorités. Ce zonage est régulièrement mis à jour afin d'intégrer les nouvelles connaissances issues, soit de travaux de recherches menés par l'IRSN, soit de travaux menés par d'autres organismes, dont les exploitants, ou des équipes universitaires.

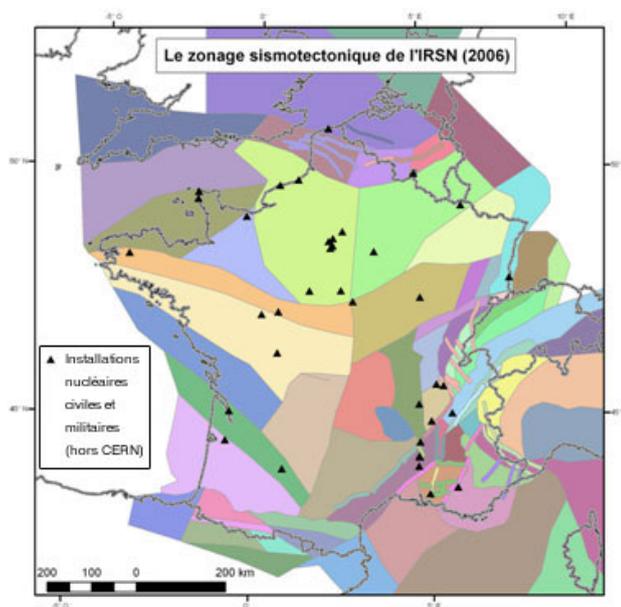


Figure 1 – Le zonage sismotectonique de la France utilisé par l'IRSN, produit à partir de la synthèse de données géologiques, géophysiques et sismologiques. Par définition, les séismes qui se sont produit dans une zone pourraient se reproduire n'importe où dans cette zone. Selon ce zonage, la France métropolitaine comporte un peu plus de 80 zones sismotectoniques. Les triangles noirs indiquent la localisation des installations nucléaires.

*2. Sélectionner les séismes qui, s'ils se reproduisaient, créeraient les effets les plus forts dans la zone du site et dans les zones adjacentes*

En s'appuyant sur le fait que, pour une zone sismotectonique, les séismes localisés dans cette zone sont susceptibles de se produire en tous points de la zone, l'étape suivante consiste à translater virtuellement les séismes les plus importants de chaque zone (celle qui contient le site considéré et celles qui lui sont adjacentes) au plus près du site. Pour la zone qui contient le site, cela revient à placer le séisme le plus important sous le site ; pour les zones adjacentes, cela conduit à translater les séismes à la limite de la zone, au plus près du site. La figure 2 montre un exemple de ces déplacements pour le site nucléaire de Paluel.

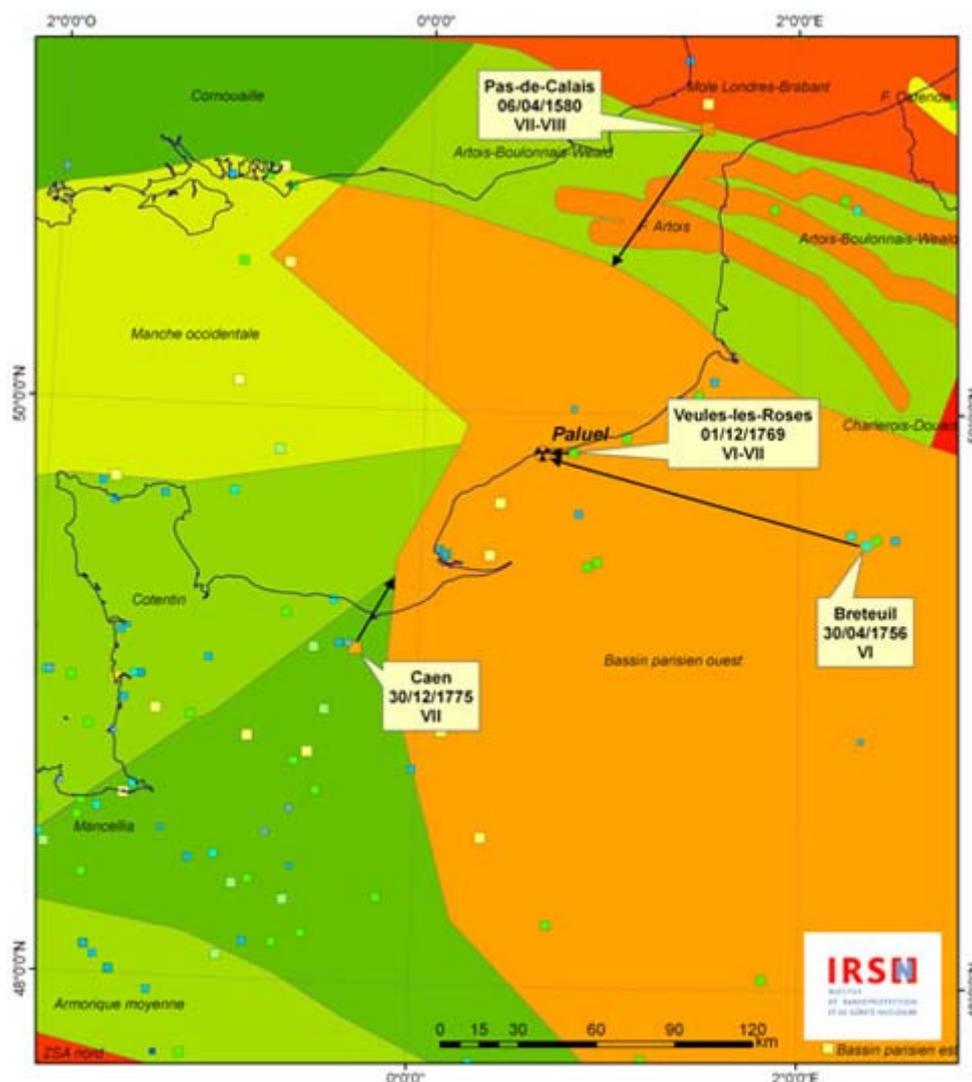


Figure 2 – Identification des séismes susceptibles de produire les effets les plus forts sur le Centre nucléaire de production électrique de Paluel. Dans chaque zone sismotectonique, une hypothèse est faite : les séismes passés pourraient se reproduire dans leur zone d'appartenance et, dans une démarche « conservative » de sûreté, les épicentres sont déplacés (flèches rouges) dans la position la plus pénalisante pour le site. Par exemple, les séismes de Veules-les-Roses (1769) et de Breteuil (1756), survenus dans la même zone que le site, sont déplacés « sous » celui-ci, tandis que les séismes du Pas-de-Calais (1580) ou de Caen (1775), survenus dans une zone voisine, sont rapprochés à environ 75 km du site.

### 3. Calculer les deux paramètres principaux (magnitude et profondeur) des séismes historiques de référence, dits Séismes Maximaux Historiquement Vraisemblables (SMHV)

En France, la plupart des séismes importants retenus pour évaluer l'aléa sismique sont des événements historiques pour lesquels il n'existe pas d'enregistrements instrumentaux, donc pas de mesure directe de leur magnitude.

Afin de préciser les principales caractéristiques de ces séismes, l'IRSN a établi des relations empiriques permettant d'estimer la magnitude et la profondeur des séismes historiques. Ces relations sont établies à partir de l'étude de la répartition géographique des intensités observées des séismes historiques rapportés par les archives et de l'étude des séismes récents pour lesquels on dispose à la fois d'informations sur les intensités observées et sur leur magnitude et leur profondeur grâce aux données instrumentales.

L'utilisation de cette méthode permet par ailleurs d'évaluer les incertitudes associées à la magnitude et à la profondeur ainsi estimées pour le séisme.

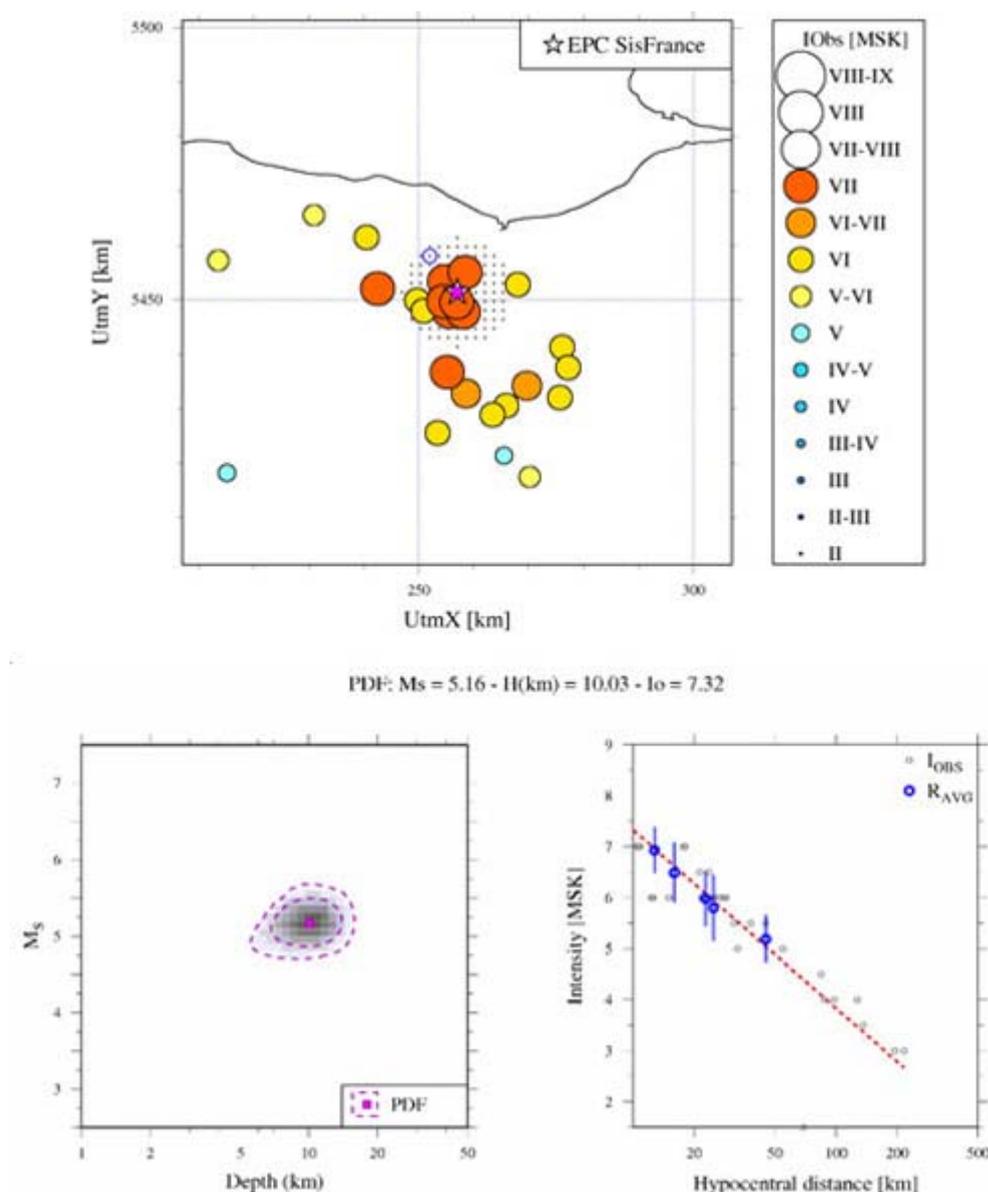


Figure 3 – Exemple d'estimation de la magnitude et de la profondeur du séisme de Caen (1775). À partir des intensités observées lors de ce séisme (figure du haut), il est possible de déterminer le couple magnitude/profondeur (et les incertitudes associées) pour ce séisme (en bas à gauche). Ce séisme a une magnitude d'environ 5,2 et une profondeur de l'ordre de 10 km.

#### 4. Augmenter la magnitude des séismes de référence ainsi déterminés de 0,5

Cette majoration forfaitaire, qui conduit à définir un ou des Séismes Majorés de Sécurité (SMS) permet de tenir compte des incertitudes inhérentes à l'estimation des caractéristiques des séismes de référence.

#### 5. Étudier les indices de paléoséismes

Au cours des dernières décennies, les recherches effectuées par les géologues ont conduit à reconnaître l'existence de forts séismes survenus à des périodes très reculées

(quelques milliers à quelques dizaines de milliers d'années). La RFS préconise de prendre en compte ces indices de séismes passés (paléoséismes), parce qu'ils complètent les catalogues existants (sismicité instrumentale et sismicité historique) qui recouvrent une période trop courte pour décrire avec suffisamment de recul dans le temps la sismicité française.

L'IRSN participe activement à la constitution d'une base de données nationale recensant les indices de paléoséismes en France ([www.neopal.net](http://www.neopal.net)); il est membre du comité d'experts correspondant.

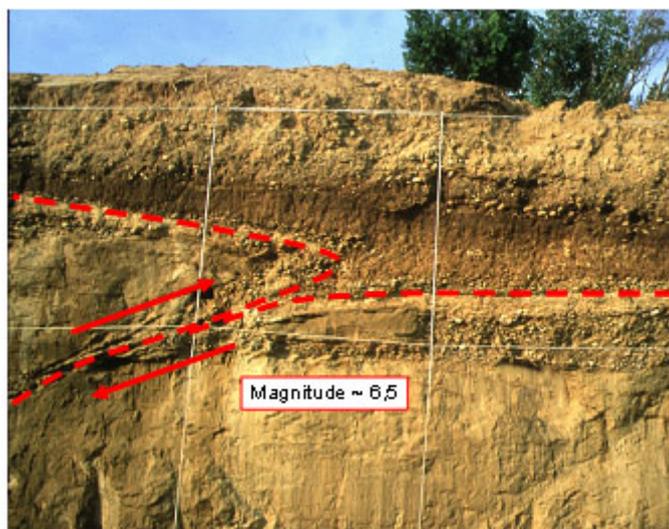


Figure 4 – Exemple d'indice de paléoséisme (Courthézon) sur la faille de Nîmes. Les couches géologiques superficielles ont été décalées par le jeu de la faille, ce qui atteste de son activité.

#### *6. Calculer les mouvements du sol à prendre en compte pour le dimensionnement des installations*

Une base de données mondiale d'enregistrements sismiques est utilisée pour calculer les mouvements sismiques qui peuvent être associés aux couples magnitude/distance précédemment déterminés.

Ces mouvements sismiques, qui sont ensuite utilisés par les ingénieurs pour établir ou vérifier le dimensionnement des installations et des équipements, peuvent être décrits sous différentes formes, par exemple l'évolution de l'accélération du sol en fonction du temps ou encore un spectre de réponse. Ce dernier, couramment utilisé, permet de déterminer, selon les fréquences caractéristiques des bâtiments et des équipements, l'accélération (et donc la force) maximale à laquelle ils seraient soumis si les séismes de référence se produisaient.

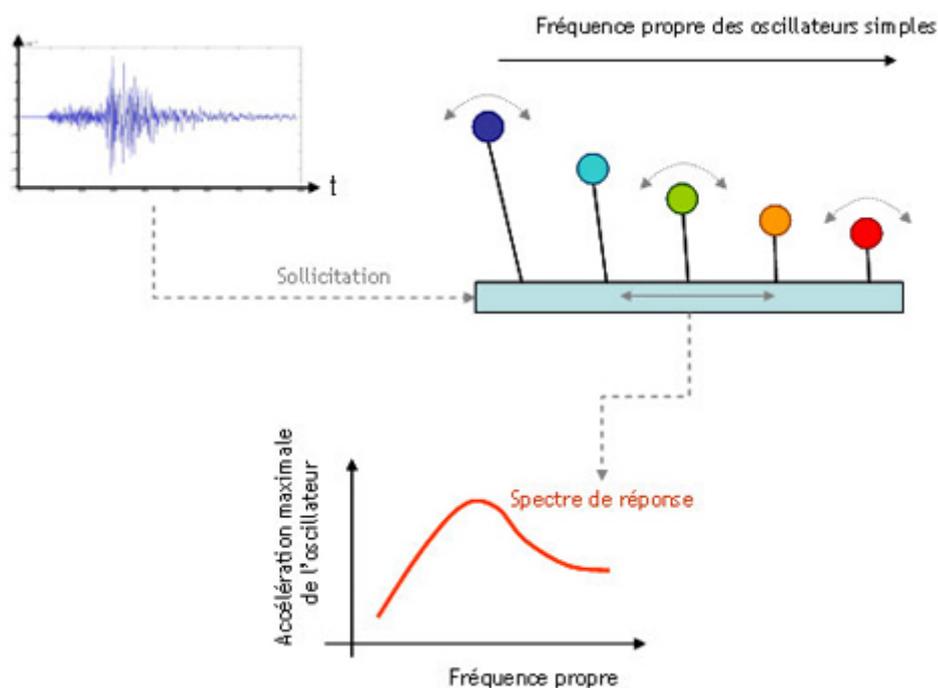


Figure 5 – Le spectre de réponse décrit le comportement d'oscillateurs simples sous sollicitation sismique. Il permet d'évaluer les forces qui s'exerceront sur un bâtiment lors d'un séisme.

### 7. Tenir compte des effets de sites

La nature des sédiments les plus superficiels peut aussi influencer le mouvement sismique en surface. La RFS recommande donc d'adapter le spectre de réponse en fonction du type de sol sur lequel repose l'installation. La RFS distingue différents types de sol en fonction d'une de leurs propriétés mécaniques, la vitesse  $V_s$  des ondes sismiques de cisaillement (ondes S) moyennée sur les 30 derniers mètres de la colonne de sol sous le site. Pour les sols ayant des vitesses  $V_s$  faibles (qualifiés de sédiments meubles), le mouvement sismique incident peut être amplifié et sa durée augmentée.

Par ailleurs, des configurations particulières peuvent aussi perturber la propagation des ondes sismiques, comme l'existence d'un bassin sédimentaire enchâssé dans un milieu rocheux. Plusieurs études ont montré que les ondes sismiques incidentes peuvent être piégées dans un bassin sédimentaire, augmentant notablement l'importance des secousses sismiques. Dans une telle situation, la Règle recommande de mener des études spécifiques en vue de déterminer le mouvement sismique à prendre en compte (aux niveaux SMHV et SMS).

Pour plus de détails, voir la page consacrée aux effets de site.

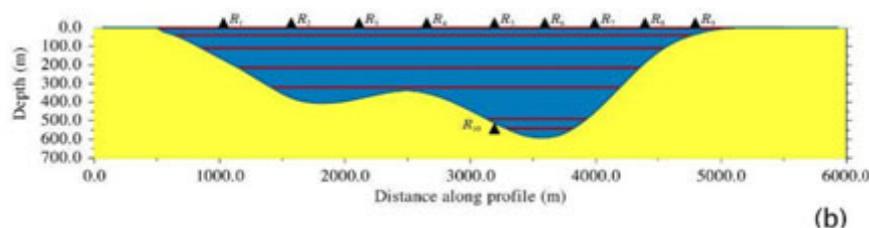


Figure 6 – La présence d'une cuvette sédimentaire (en bleu) dans un massif rocheux (en jaune) étant susceptible de modifier le mouvement sismique, il est nécessaire de conduire une étude spécifique pour tenir compte des spécificités locales du milieu géologique.

**L'application de la règle fondamentale de sûreté 2001-01 permet ainsi de définir l'aléa sismique à retenir sur le site d'une installation nucléaire.** Cet aléa est généralement défini par un spectre de réponse. La définition de l'aléa sismique sur un site nucléaire fait l'objet de réévaluations régulières (à l'occasion de la préparation des visites décennales) permettant de prendre en compte l'évolution des connaissances tant dans le domaine de la géologie que dans celui de la sismologie. Ces réévaluations peuvent conduire à une modification sensible de l'aléa, ce qui impose que soient réalisées des vérifications de la tenue au séisme des installations et des équipements avec les nouveaux paramètres ; dans certains cas, cela peut conduire l'exploitant à réaliser des travaux de renforcement.

## **B – L'évaluation du comportement sismique des ouvrages nucléaires**

La prise en compte du risque sismique dans les **installations nucléaires de base (INB)** fait l'objet d'examen spécifiques dans le cadre du contrôle de la sûreté. Que ce soit lors de la conception des nouvelles installations ou lors de la réévaluation sismique des installations existantes, l'IRSN analyse et évalue les dossiers techniques présentés à ce sujet par les exploitants nucléaires (EDF, CEA, AREVA, ANDRA...). Ces dossiers s'appuient sur des « règles fondamentales de sûreté » (RFS) et des guides qui présentent des méthodes acceptables de prise en compte des exigences de la sûreté nucléaire dans les diverses installations du territoire national.

Ainsi, la démarche permettant la détermination des caractéristiques des séismes à retenir pour les sites des installations nucléaires de base dites « de surface » (donc à l'exception des stockages à long terme de déchets radioactifs) relève de la règle fondamentale de sûreté **RFS n° 2001-01**. Le **Guide ASN 2/01** définit une démarche acceptable de prise en compte du risque sismique à la conception des ouvrages de génie civil des mêmes installations nucléaires de base ; ce document, diffusé en 2006 par l'Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) en remplacement d'une RFS, résulte d'un travail collectif de plusieurs années au sein d'un groupe de travail qui a réuni des experts français dans le domaine du génie parasismique. Ces deux documents ont fait l'objet, avant diffusion, d'un examen par les groupes permanents d'experts compétents auprès de l'ASN.

*Conception parasismique des ouvrages de génie civil des installations nucléaires*

**RÉFÉRENTIEL RELATIF AU RISQUE SISMIQUE, APPLICABLE AUX INB «DE SURFACE»**

**RÈGLES FONDAMENTALES DE SÛRETÉ (RFS) ET GUIDES**

- Détermination des mouvements sismiques : **RFS 2001-01**
- Conception et calcul sismique des ouvrages de génie civil : **Guide ASN 2/01**

**RÈGLES DE CONCEPTION ET DE CONSTRUCTION (RCC)**, établies par les exploitants nucléaires

- En conformité avec les RFS
- En complément aux règlements techniques en vigueur

Le Guide ASN 2/01 est un texte à caractère pararéglementaire concernant la conception parasismique des ouvrages de génie civil des installations nouvelles. En complément à ce guide et aux règlements techniques en vigueur, des règles de conception et de construction (RCC) des ouvrages des INB (RCC-G pour les réacteurs de type REP, ETC-C pour le nouveau réacteur EPR...) sont établies par les exploitants nucléaires. Ces règles définissent les méthodes de calcul et les critères associés aux exigences de comportement attribuées aux ouvrages de génie civil en cas de séisme, en cohérence avec l'analyse de sûreté de chaque installation.

Le Guide ASN 2/01 :

- introduit le lien entre la démarche de conception et de dimensionnement des ouvrages nucléaires et l'analyse de sûreté de l'installation relative au risque sismique en précisant notamment :
  - les exigences de comportement retenues pour le génie civil ;
  - les combinaisons d'actions à retenir (dont le séisme) pour le calcul des structures : poids propre, charges de service, charges climatiques, et pour les réacteurs de type REP, l'APRP (accident de perte de réfrigérant primaire), la RTGV (rupture de tubes de générateur de vapeur)...
- rappelle les principes fondamentaux de conception parasismique (architecture et dispositions de construction) ;
- présente des méthodes de calcul acceptables pour l'étude du comportement sismique des bâtiments et de certaines catégories d'ouvrages (digues, galeries enterrées, soutènements, réservoirs ...) ;
- indique comment utiliser les sollicitations sismiques dans les calculs de dimensionnement des structures ;
- précise les documents attendus en soutien aux demandes d'autorisation relatives aux INB.

Le Guide ASN 2/01 préconise l'utilisation de méthodes de calcul qui considèrent un comportement linéaire des structures (les contraintes et les déplacements sont proportionnels aux efforts). L'évaluation des sollicitations est fondée soit sur une méthode spectrale, soit sur des calculs temporels. Le contenu de ce guide doit être décliné en règles d'ingénierie et traduit en critères de dimensionnement.

Le Guide ASN 2/01 tient compte :

- de la méthode de détermination des caractéristiques des mouvements sismiques à la surface du sol (RFS 2001-01), qui prévoit notamment la détermination :
  - d'un spectre de séisme adapté au site ;
  - d'un spectre minimal « forfaitaire » pour les zones considérées « peu sismiques » ;
- du retour d'expérience de séismes réels qui a mis en évidence l'importance :
  - de la conception des structures (choix des éléments structuraux assurant le contreventement, régularité des ouvrages, système de fondations adapté...) ;
  - des dispositions de construction (disposition des armatures dans les éléments en béton armé, assemblages des charpentes métalliques...) ;
- des progrès des moyens informatiques pour le calcul scientifique disponibles dans les bureaux d'études et les ingénieries (recours de plus en plus systématique à des modèles aux éléments finis), avec notamment :
  - le développement d'analyses dynamiques sur des modèles tridimensionnels détaillés et leur exploitation directe par des post-processeurs ;
  - le développement de calculs temporels ;
- des avancées en termes de capacité de simulation, avec notamment :
  - l'amélioration des connaissances du comportement des sols et de l'interaction sol/structure ;
  - la prise en compte de phénomènes non-linéaires d'origine géométrique (décollement) ou rhéologique (lois de comportement plastique).

#### *Réévaluation sismique des ouvrages de génie civil des installations nucléaires existantes*

Les « réexamens de sûreté » des installations nucléaires, effectués tous les 10 ans, peuvent conduire l'exploitant à renforcer certains ouvrages de génie civil, notamment des bâtiments, compte-tenu des résultats du « diagnostic sismique ».

### **ANALYSE PAR L'IRSN DU DOSSIER DE REEVALUATION SISMIQUE D'UN OUVRAGE, ETABLI PAR UN EXPLOITANT NUCLEAIRE**

#### **LES OBJECTIFS :**

- Identifier les spécificités de la conception, les écarts par rapport aux recommandations des règles parasismiques les plus récentes
- Appréhender le comportement de l'ouvrage, le transfert des efforts et identifier les zones les plus sensibles (renforcements ou modifications),

#### **LA DÉMARCHE :**

- Examen des données, règles d'études, hypothèses et méthodes
- Examen qualitatif et quantitatif de la situation de l'ouvrage dans son environnement, de sa conception et des dispositions de construction mises en oeuvre
- Réalisation, le cas échéant, de contre-calculs.

Le diagnostic sismique d'un ouvrage nucléaire existant est un problème complexe, qui explique en partie l'absence de règles codifiées pour la réévaluation sismique :

- les règles en vigueur au moment de la construction de certains bâtiments n'impliquaient pas forcément la prise en compte de sollicitations sismiques ;

- les règles de conception et de dimensionnement parasismiques se révèlent parfois inapplicables pour :
  - l'évaluation des sollicitations sismiques ;
  - la définition des critères de justification de la structure ;
  - la vérification du respect de ces critères.

L'IRSN analyse le caractère acceptable (ou non) du comportement sismique des ouvrages pour la sûreté des installations, en s'appuyant sur les règles techniques en vigueur, après détermination des schémas de transferts d'efforts dans les structures compte tenu des dispositions de construction.

Lorsque le diagnostic sismique identifie des déficits de capacité résistante des structures, l'IRSN émet un avis sur les renforcements prévus par l'exploitant nucléaire.

Un exemple de renforcements sismiques : le réacteur de recherche CABRI du CEA (Cadarache).

