

## Règle fondamentale de sûreté n°2001-01

Domaine d'application : Installations nucléaires de base à l'exception des stockages à long terme de déchets radioactifs

Objet : Détermination du risque sismique pour le sûreté des installations nucléaires de base de surface.

### 1. OBJET DE LA REGLE

### 2. ENONCE DE LA REGLE

2.1. Définition et principes de détermination des caractéristiques des séismes représentatifs de la sismicité du site

2.2. Procédure d'évaluation des SMHV

2.3. Calcul des mouvements sismiques

2.4. Prise en compte des mouvements sismiques

### ANNEXE I

### ANNEXE 2

### ANNEXE 3

### GLOSSAIRE

### 1. OBJET DE LA REGLE

La pratique réglementaire française prévoit que le maintien des fonctions importantes de sûreté d'une installation nucléaire de base en surface, notamment et selon ses caractéristiques précises, l'arrêt sûr, le refroidissement et le confinement des produits radioactifs, puissent être assurés pendant et/ou à la suite de séismes plausibles pouvant affecter le site de l'installation considérée. La présente règle a pour objet de définir une méthode acceptable pour la détermination des mouvements sismiques qui doivent être pris en compte pour la conception de l'installation à l'égard du risque sismique.

Dans les régions où les taux de déformation sont faibles, comme en France métropolitaine, la période de retour des forts séismes est grande et il peut être malaisé de rattacher certains séismes à des failles connues. De plus, malgré d'importants progrès dans les dernières années, il est difficile, dans le contexte sismotectonique français, d'identifier les failles potentiellement sismogéniques\* et de déterminer les caractéristiques des séismes qu'elles

pourraient produire. Aussi, la démarche proposée dans cette Règle Fondamentale de Sûreté vise à pallier cette difficulté en prenant en compte tous les éléments directs et indirects qui peuvent jouer un rôle dans l'apparition de séismes ainsi que toutes les connaissances de la sismicité.

Par ailleurs, dans le domaine du calcul du mouvement sismique, la rareté des enregistrements de mouvements forts sur le territoire métropolitain nécessite de faire appel à des données provenant d'autres régions du monde.

## 2. ENONCE DE LA REGLE

Pour satisfaire aux objectifs énoncés en 1, la démarche de base explicitée ci-après est déterministe, dans le sens où les mouvements de référence sont associés à des séismes de référence. Dans une première étape, la règle se fonde sur la définition des caractéristiques de "Séismes Maximaux Historiquement Vraisemblables" (SMHV) considérés comme les séismes les plus pénalisants susceptibles de se produire sur une période de durée comparable à la période historique, soit environ 1000 ans. Dans une seconde étape, on définit les "Séismes Majorés de Sécurité" (SMS). La définition du mouvement de référence est, elle, basée sur l'utilisation d'une "sismothèque"\*.

Pour certains sites, la prise en compte des données de paléosismicité peut conduire à compléter les mouvements associés aux SMS. Le principe de ces études est esquissé au 2.3.5 et développé dans l'annexe III.

Pour chaque site, une évaluation de ces séismes est effectuée selon les procédures définies en 2.2 et 2.3.

Les études correspondantes doivent être menées de façon aussi précoce que possible. Les rapports de sûreté de l'installation nucléaire de base doivent présenter les éléments principaux permettant de caractériser le (ou les) SMHV, le (ou les) SMS et les mouvements sismiques correspondants.

### 2.1. Définition et principes de détermination des caractéristiques des séismes représentatifs de la sismicité du site

La démarche de base consiste à supposer que des séismes analogues aux séismes historiquement connus sont susceptibles de se produire dans l'avenir avec une position d'épicentre\* qui soit la plus pénalisante quant à ses effets (en termes d'intensité\*) sur le site, tout en restant compatible avec les données géologiques et sismologiques.

A cet effet, la démarche est fondée sur la prise en considération autour du site, d'une part de zones sismotectoniques, d'autre part des données sismiques, suivant une méthode qui sera précisée au paragraphe 2.2. L'investigation doit être poussée géographiquement aussi loin que nécessaire pour être sûr que tous les séismes pouvant avoir un effet significatif sur la définition du ou des SMHV ont bien été retenus.

Cette opération permet de définir, pour le site envisagé, un ou plusieurs Séismes Maximaux Historiquement Vraisemblables qui sont le ou les séismes, résultant de la démarche

précédente, susceptibles de produire sur le site les effets les plus importants en termes d'intensité macrosismique. On détermine ainsi sur le site une intensité ISMHV. Afin de tenir compte des incertitudes inhérentes à la détermination des caractéristiques des SMHV, une marge de sécurité est forfaitairement fixée de la manière définie ci-après.

Pour chacun des SMHV, on définit un "Séisme Majoré de Sécurité" (SMS), déduit du SMHV par la relation simple suivante en termes d'intensité sur le site :

$$I_{SMS} = I_{SMHV} + 1 \quad (1)$$

Sauf cas particulier traité en 2.3.5., les SMS sont considérés comme les séismes les plus agressifs à retenir pour l'évaluation de l'aléa sismique à prendre en compte pour le dimensionnement d'une installation.

On postule que les SMS peuvent être précédés ou suivis de séismes pouvant atteindre le niveau du SMHV.

## 2.2. Procédure d'évaluation des SMHV

Elle se fonde sur la délimitation de zones sismotectoniques. Celles-ci sont des volumes de la croûte terrestre homogènes du point de vue de leur potentiel sismogénique. On postule qu'un séisme qui s'est produit en un point d'une zone sismotectonique peut se produire en tout point de celle-ci.

### 2.2.1. Détermination des zones sismotectoniques

Une synthèse des documents les plus récents concernant la géologie, la géophysique et la sismicité devra être menée. Une étude détaillée, prenant en compte les caractéristiques statiques et dynamiques de la croûte ainsi que la sismicité devra être présentée en complément. Une méthode pour la détermination des zones sismotectoniques est présentée dans l'annexe I.

### 2.2.2. Etude de la sismicité

Les données de la sismicité historique comportent des imprécisions tant sur le degré de connaissance des faits que sur l'appréciation des intensités macrosismiques. Les caractéristiques des séismes qui sont susceptibles d'intervenir dans la définition du ou des SMHV doivent être établies avec la meilleure précision possible, compte tenu des connaissances sur la sismotectonique et sur la sismicité historique et instrumentale.

Il convient de s'appuyer sur l'ensemble des informations rassemblées dans une base de données macrosismiques\* actualisée (par exemple la base évolutive SISFRANCE\*) en tant que source d'informations de base. Des informations complémentaires peuvent être nécessaires et un travail d'interprétation est indispensable.

Les caractéristiques qui sont susceptibles d'intervenir dans la définition des SMHV sont les suivantes :

- intensité à l'épicentre,
- isoséistes\*,
- épicentre, foyer\* et profondeur focale\*,
- magnitude\*,
- lois d'atténuation\* régionales de l'intensité.

Une méthode pour déterminer ces caractéristiques est présentée en annexe II.

Les données de la sismicité instrumentale les plus actualisées doivent aussi être considérées pour compléter la connaissance de la sismicité.

### 2.2.3. Détermination des SMHV

Après la détermination des zones sismotectoniques, on retient comme SMHV le ou les séismes historiquement connus qui, déplacés à l'intérieur de leur zone, produisent sur le site les intensités les plus fortes, c'est-à-dire :

- a) les séismes de la zone à laquelle le site appartient sont considérés comme pouvant se produire au droit du site,
- b) les séismes des autres zones sont considérés comme pouvant se produire au point le plus proche du site de la zone à laquelle ils appartiennent.

## 2.3. Calcul des mouvements sismiques

Le mouvement\* sismique est défini par les spectres de réponse\* des composantes horizontale et verticale du mouvement à la surface des terrains du site. Cette définition peut être complétée par d'autres paramètres évoqués au paragraphe 2.3.3.

### 2.3.1. Calcul des spectres correspondant à un SMHV donné

Le calcul des spectres est fondé sur l'étude d'un grand nombre d'enregistrements rassemblés dans une "sismothèque". A partir des valeurs de la magnitude  $M$  et de la distance focale  $R^*$  du SMHV considéré, les spectres de réponse correspondant aux composantes horizontales et verticale du mouvement sont calculés selon une loi moyenne\* d'atténuation de la forme :

$$\log_{10} PSA = aM + bR - \log_{10} R + c \quad (2)$$

où PSA est la valeur du spectre de réponse (pseudo-accélération) pour une fréquence et un amortissement donnés.

Pour ce qui concerne la composante verticale, il est acceptable d'utiliser le spectre de réponse des composantes horizontales affecté d'un coefficient  $2/3$  pour toutes les fréquences.

Les coefficients de corrélation  $a$ ,  $b$  et  $c$ , fonction de la fréquence et du taux d'amortissement considérés, sont évalués pour deux catégories de site (cf. 2.3.4). Ces coefficients sont valides dans un intervalle de distance et de magnitude fonction des enregistrements de la sismothèque et de l'analyse sismologique (soit une distance  $R$  comprise entre 7 km et 100 km et une magnitude  $M$  comprise entre 4,5 et 7,3). Les spectres sont calculés au moins pour la gamme de fréquence 0,25 - 33 Hz.

Pour les distances focales inférieures à 7 km, la méthode conventionnelle suivante pourra être adoptée : le calcul des spectres est effectué en considérant que  $R$  est égale à cette distance minimale et en majorant la magnitude  $M$  pour que le séisme produise les mêmes effets sur le site (ISMHV et ISMS constantes).

Dans le domaine de validité de la loi (2), l'accélération à fréquence infinie (égale à l'accélération maximale du mouvement du sol) est considérée égale à la valeur du spectre de réponse en accélération à la fréquence de 33 Hz.

La sismothèque, la méthode de détermination des coefficients de corrélation et leur domaine de validité sont décrits dans le rapport IPSN/DPRE/SERGD/2000/0053 établi sous assurance de la qualité.

### 2.3.2. Calcul des spectres correspondant à un SMS donné

Le spectre du SMS est calculé à partir de la relation (2), dans son domaine de validité, en considérant que l'augmentation d'intensité de un degré entre le SMHV et le SMS correspond à une augmentation de la magnitude conventionnellement fixée à 0,5.

### 2.3.3. Calcul d'autres paramètres du mouvement du sol

La définition du mouvement sismique sous forme de spectre de réponse pourra être complétée notamment par les données suivantes :

- durée de la phase forte,
- accélérogrammes,
- vitesse maximale du sol,
- $A/V^*$ ,
- $CAV^*$ ,
- Intensité d'Arias\*.

Ces données doivent être compatibles avec les caractéristiques physiques du séisme (SMHV ou SMS) et les conditions de site définies au paragraphe 2.3.4.

La base de données ayant permis la détermination des coefficients de l'équation (2) peut être utilisée pour le calcul de ces différents paramètres.

### 2.3.4. Prise en compte des effets de site

Les effets de site sont généralement dus à une amplification du mouvement sismique créée par une couche de sol de faible résistance mécanique à géométrie plane située près de la surface. L'équation (2) permet de calculer les spectres pour deux conditions de site, à partir des caractéristiques dynamiques du sol déterminées conformément à la RFS I.3.c :

- les sites caractérisés par une vitesse moyenne des ondes de cisaillement\* dans les 30 premiers mètres de profondeur supérieure à 800 m/s,
- les sites pour lesquels la vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres est comprise entre 300 m/s et 800 m/s.

Lorsque le sol d'assise au droit de l'installation manque de caractérisation, a minima jusqu'à une profondeur de 30 m, ou présente de fortes variations latérales, le spectre de dimensionnement devra envelopper les spectres calculés avec les deux conditions de site.

Dans certains cas particuliers, la géométrie complexe des couches sédimentaires (présence d'une topographie ou d'une cuvette sédimentaire) ou leur grande épaisseur peut conduire à une amplification ou à un allongement de la durée du mouvement sismique. Ces effets particuliers ne sont pas dus simplement aux propriétés superficielles du sol (30 derniers mètres sous l'installation).

Dans ces cas d'effets de site particuliers ou dans les cas où la vitesse moyenne des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres de profondeur est inférieure à 300 m/s, des études spécifiques seront nécessaires pour tenir compte de ces particularités dans l'estimation des mouvements sismiques associés aux SMHV et SMS. Dans ces situations, l'utilisation du spectre de réponse calculé avec la loi 2 peut être complétée utilement par d'autres indicateurs du mouvement sismique spécifiques au site considéré.

### 2.3.5. Prise en compte des failles actives avec rupture de surface\*

Dans le cas d'un site localisé à proximité immédiate d'une faille active avec rupture de surface, une étude visant à déterminer les mouvements sismiques associés aux séismes ayant pu se produire sur cette faille, et pouvant avoir un effet sur le site, sera effectuée. Des précisions sur la manière dont peuvent être conduites ces études sont fournies dans l'annexe III.

## 2.4. Prise en compte des mouvements sismiques

2.4.1. Pour la conception des installations ou des parties d'installation à dimensionner aux séismes, les mouvements en champ libre définis en 2.3 doivent être utilisés comme suit.

2.4.1.1 Le dimensionnement de l'installation doit être réalisé pour des sollicitations sismiques enveloppes de celles induites par les mouvements associés aux Séismes Majorés de Sécurité. Ce caractère enveloppe est établi en fonction des paramètres décrivant les mouvements du sol associés aux SMS. Il sera effectué, pour un amortissement réduit de 5%, une comparaison entre les spectres retenus pour la conception de l'installation et les spectres de réponse associés aux Séismes Majorés de Sécurité. Il sera suffisant de vérifier que les spectres retenus pour la conception de l'installation enveloppent les spectres de réponse associés aux Séismes Majorés de Sécurité. L'emploi des données mentionnées au point 2.3.3. n'est pas systématique et se fera au cas par cas selon le type de site ou d'ouvrage considéré.

2.4.1.2. La prise en compte des spectres correspondant aux séismes déduits de l'étude des failles actives avec rupture de surface pour le dimensionnement de l'installation se fera au cas par cas en fonction de la période de retour\* de ces séismes, du degré de certitude attaché à la connaissance de leurs caractéristiques et de la comparaison des spectres obtenus aux spectres associés au SMS.

2.4.1.3. Le spectre retenu par l'exploitant pour le dimensionnement de son installation ne pourra pas être inférieur à un spectre minimal forfaitaire calé en accélération à 0,1 g à la fréquence infinie. En fonction des conditions de site, les valeurs d'accélération de ce spectre sont définies par :

Vitesse des ondes de cisaillement inférieure à 800 m/s  
Fréquence 0,25 Hz 2,5 Hz 8 Hz 30 Hz 33 Hz  
Pseudo accélération 0,02 g 0,21 g 0,23 g 0,1 g 0.1 g

Vitesse des ondes de cisaillement supérieure à 800 m/s  
Fréquence 0,35 Hz 3,5 Hz 9 Hz 30 Hz 33 Hz  
Pseudo accélération 0,02 g 0,21 g 0,23 g 0,1 g 0.1 g

2.4.2. Pendant la phase de construction ou d'exploitation de l'installation, des progrès dans les données et les méthodes peuvent conduire l'administration à demander une réévaluation des mouvements sismiques correspondant à un site donné.

ooOoo

## ANNEXE I

### METHODE POUR LA DELIMITATION DES ZONES SISMOTECTONIQUES

Les zones sismotectoniques sont des volumes de la croûte terrestre homogènes du point de vue de leur potentiel sismogénique. L'objectif est de caractériser chaque zone par sa géométrie et la sismicité qui s'y produit. Une zone sismotectonique peut être constituée par plusieurs volumes distincts ayant les mêmes caractéristiques structurales et sismotectoniques. Une faille ou un ensemble de failles peut à ce titre définir une zone.

La caractérisation des zones tient compte de toutes les données géologiques, géophysiques et sismiques disponibles.

#### 1. Données à retenir

##### 1.1. Etat statique

Pour définir des zones sismotectoniques on peut considérer, par exemple :

- l'épaisseur de la croûte ;
- l'épaisseur de la couverture sédimentaire ;
- la nature lithologique des terrains ;
- la structure de la croûte qui résulte des principaux épisodes tectoniques. La géométrie des structures est essentielle pour la définition des zones. La direction des paléo-contraintes de ces différents épisodes tectoniques contribue aussi à l'identification des zones ayant eu la même histoire tectonique ;
- les données géophysiques.

##### 1.2. Etat dynamique

Chaque zone sismotectonique doit présenter une homogénéité de son régime de déformation (type et intensité de déformation sismique et asismique). Celui-ci est étudié en utilisant les données sur la sismicité, la déformation et les contraintes.

##### 1.2.1. Sismicité

La sismicité est un indice de la déformation actuelle. Elle intervient à plusieurs titres pour la définition de zones sismotectoniques. Son analyse contribue à la connaissance du régime de déformation (type et intensité de la déformation sismique et asismique). Elle permet aussi la mise en évidence de caractéristiques locales. Il convient de porter une attention particulière aux points suivants :

- la localisation des épicentres ;
- l'intensité à l'épicentre ou la magnitude des différents séismes, leur distribution quantitative en fonction de ces paramètres ;
- la profondeur de leurs foyers ;
- la géométrie des aires d'intensités les plus élevées des séismes majeurs ;
- la répartition spatiale et temporelle des séismes instrumentaux (principalement des répliques de forts séismes) ou des essais d'épicentres historiques ;
- les mécanismes au foyer des séismes.

### 1.2.2. Déformations

Tous les indices de déformation néotectoniques\*, qu'il s'agisse d'indices directs (ruptures dans les terrains récents, plis, manifestations volcaniques, etc.) ou indirects (anomalies morphologiques) doivent être répertoriés et étudiés. En particulier, les failles actives avec rupture de surface seront identifiées et les données les concernant seront quantifiées dans la mesure du possible. Dans le cas de décalages de marqueurs morphologiques, il convient de les dater.

Pour la période la plus récente, c'est à dire datant de moins d'un siècle environ, il convient de tenir compte des données des comparaisons de nivellements successifs, ainsi que des données de la géodésie classique (triangulation) et de la géodésie spatiale (Global Positioning System).

Les éléments présentés ci-dessus contribuent à la définition de zones homogènes quant à leur régime de déformation caractérisé par son type et son intensité.

**Type de déformation.** Dans la mesure du possible, il convient de déterminer pour chaque faille le type de déformation potentielle, à partir des données de la déformation récente et des directions de contraintes.

**Intensité de déformation.** Avec les données actuellement disponibles, l'intensité de déformation ne peut être définie que de manière qualitative en tenant compte des vitesses de déformation, de l'intensité du relief... L'étude de la sismicité peut aussi apporter des informations sur le taux de déformation sismique.

### 1.2.3. Contraintes

L'état de contraintes actuel du secteur retenu est examiné en considérant :

- les mesures de contraintes in situ ;
- les mécanismes au foyer des séismes ;
- les mesures microtectoniques dans les terrains récents et les alignements volcaniques.



## 2. Délimitation des zones sismotectoniques

Une synthèse des éléments présentés ci-dessus permet de définir des zones sismotectoniques constituées de volume de la croûte terrestre homogènes du point de vue de leur potentiel sismogénique. On postule qu'un séisme qui s'est produit en un point d'une zone sismotectonique peut se produire en tout point de celle-ci.

Une zone sismotectonique peut être constituée par une faille, voire même par une famille de failles présentant les mêmes caractéristiques géométriques et dynamiques, et les mêmes potentialités sismiques. Lorsqu'une zone est constituée d'une ou de plusieurs failles, sa délimitation doit tenir compte du pendage de ces structures.

Pour chaque zone, les caractéristiques statiques et dynamiques doivent être détaillées. En outre, pour les zones constituées par un ou des accidents, il convient de préciser les caractéristiques géométriques, la chronologie des différents mouvements et la sismicité associée.

ooOoo

## ANNEXE II

### METHODE POUR LA DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES DES SEISMES REPRESENTATIFS DE LA SISMICITE DU SITE

Les caractéristiques utilisées dans la définition des séismes représentatifs de la sismicité du site sont :

- les coordonnées de l'épicentre ;
- l'intensité épiscopentrale ;
- les isoséistes ;
- la profondeur focale ;
- la magnitude ;
- les lois régionales d'atténuation de l'intensité.

En règle générale, les coordonnées de l'épicentre, la profondeur focale et la magnitude sont déduites des données macrosismiques. Cependant, pour les séismes récents, ces caractéristiques calculées à partir des données instrumentales peuvent être disponibles. Les valeurs doivent être comparées et leurs différences explicitées. Si les justifications sont insuffisantes pour choisir l'une de ces valeurs, la valeur la plus contraignante pour le site sera retenue.

#### 1. Coordonnées de l'épicentre et intensité épiscopentrale

Les coordonnées de l'épicentre et l'intensité épiscopentrale sont déduites de la répartition en zone proche des observations ponctuelles des intensités estimées dans les localités. La localisation de l'épicentre correspond, en général, au barycentre de l'aire de la plus forte intensité, mais

lorsque cette dernière est mal définie (par exemple, cas des épacentres en mer), la localisation approximative de l'épicentre peut être faite par des méthodes appropriées (loi d'atténuation de l'intensité, par exemple).

L'intensité épacentrale ne correspond pas nécessairement à l'intensité maximale observée (effet de site, épacentre en mer, zone montagneuse) et peut être déduite de la répartition des intensités ponctuelles en zone proche ou de l'utilisation de méthodes appropriées (loi d'atténuation de l'intensité, par exemple).

## 2. Isoséistes

Des courbes isoséistes peuvent être tracées si le nombre d'intensités ponctuelles de même valeur est suffisant et présente une distribution assez homogène. Ces courbes, qui lissent les effets locaux, permettent d'avoir une vue d'ensemble rapide des effets (niveau et extension). Lorsque leur qualité est reconnue, les courbes isoséistes permettent, au terme de l'analyse sismotectonique, de définir l'intensité sur le site des séismes représentatifs de la sismicité du site.

## 3. Profondeur focale

L'intensité, quand elle est estimée sur un nombre suffisant de points, peut présenter un schéma régulier de décroissance avec la distance à partir d'un point source explicable par un modèle énergétique très simple (relation de Sponheuer par exemple). Cette hypothèse est justifiée pour les séismes de magnitude moyenne à faible, représentatifs de la sismicité modérée de la France. La distribution des intensités peut alors être utilisée, après élimination des points particuliers (effets de site et phénomènes associés), pour estimer la profondeur du foyer du séisme. Le calcul doit être fait en utilisant de préférence l'ensemble des données macrosismiques, plutôt que des rayons de courbes isoséistes qui résultent d'une interprétation. L'estimation de la profondeur est d'autant plus précise que le nombre des intensités ponctuelles est abondant et que leur distribution est homogène, notamment en zone proche de l'épicentre. En l'absence de données macrosismiques suffisantes, la profondeur pourra être déduite de celles des séismes instrumentaux ou historiques bien documentés, localisés dans le même domaine sismotectonique ou à partir d'autres méthodes. Si des différences significatives apparaissent et que les justifications ne permettent pas de choisir l'une ou l'autre valeur, la valeur la plus contraignante pour le site sera retenue.

## 4. Magnitude

La magnitude des séismes historiques doit être déterminée à partir des corrélations disponibles les mieux adaptées au contexte français, liant la magnitude à l'intensité et à la distance focale établies à partir d'ensembles de données macrosismiques homogènes. Ces corrélations calées sur des séismes pour lesquels on dispose à la fois des magnitudes instrumentales ( $M$ ) et des intensités macrosismiques ( $I$ ) sont de la forme courante :

$M = a I + b \log R + e$ , dans lequel  $R$  est la distance focale (km).

On évitera l'utilisation de telles corrélations établies uniquement sur la seule valeur de l'intensité épacentrale. A l'épicentre, la distance focale est la profondeur du foyer.

## 5. Lois d'atténuation régionales

Dans la mesure du possible, il convient d'utiliser des lois d'atténuation régionales fondées sur un modèle de décroissance de l'intensité avec la distance (relation de Sponheuer par exemple) ; ces lois peuvent servir pour définir l'intensité sur le site d'un séisme, en l'absence de courbes isoséistes. Les lois seront établies sur l'ensemble des données macrosismiques d'un nombre suffisant de séismes contenues dans la base ayant servi à l'évaluation de l'aléa sur le site, ou bien issues d'autres ensembles de données, à condition d'apporter la preuve que ces lois sont bien adaptées au contexte régional du site.

ooOoo

### ANNEXE III

#### PRISE EN COMPTE DES FAILLES ACTIVES AVEC RUPTURE DE SURFACE

Dans le cadre de l'étude visant à déterminer les mouvements sismiques associés aux séismes ayant pu se produire sur une faille active avec rupture de surface, la méthode suivante, en trois étapes, peut être utilisée.

La première étape consiste à décrire les observations qui permettent de conclure à l'occurrence d'une ou plusieurs ruptures de surface d'origine co-sismique\* et de déterminer l'âge de ces ruptures et la valeur du glissement unitaire. La prise en compte des indices de paléosismicité est étayée par les éléments suivants :

§ une observation directe d'une ou plusieurs ruptures de surface (photo, dessin, description d'affleurement) ou évidence morphologique claire d'un décalage de marqueurs géologiques datés et identifiés (terrasses fluviales, cours d'eau, horizons repère, etc ...). Chaque rupture de surface doit être en relation avec une faille dont les dimensions (géométrie, aire, longueur) sont compatibles avec la magnitude estimée du ou des paléoséismes ;

§ une étude du caractère tectonique de la déformation. Les autres hypothèses permettant d'expliquer les déformations observées doivent être examinées (processus gravitaires, diapirisme, halocinèse, arglocinèse, glaci-tectonique, glacial, karstique, processus lié aux déformations superficielles dans l'environnement périglaciaire...) ;

§ une évaluation de l'âge du dernier niveau affecté (quelle que soit la méthode de datation) et si possible la valeur du temps de retour entre deux ou plusieurs événements.

La seconde étape consiste à évaluer le temps de retour des paléoséismes à partir de la vitesse moyenne de glissement de la faille. Cette vitesse est estimée en utilisant les données géologiques, géodésiques ou la distribution en fréquence et en magnitude des séismes de la région. Les indices paléosismiques montrant des événements séparés par un temps de retour inférieur ou égal à quelques dizaines de milliers d'années doivent être pris en compte.

La troisième étape consiste à déterminer la gamme de magnitudes associées à la rupture de surface à partir de l'étude de la longueur, de la segmentation et de la profondeur sismogénique\* de la faille. Dans le contexte français, ces paramètres sont difficiles à déterminer et on peut, le cas échéant, se reporter aux relations empiriques publiées et couramment utilisées liant la valeur du glissement et la magnitude.

La magnitude des paléoséismes doit être évaluée à l'aide de la magnitude de moment que l'on considère égale à la magnitude  $M_s$  entre  $M_w=6,5$  et  $M_w=7,5$ . Le mouvement sismique associé à chacune des hypothèses concernant la magnitude du paléoséisme est calculé en utilisant l'équation (2) du paragraphe 2.3.1.

ooOoo

## GLOSSAIRE

A/V : Ce paramètre exprimé en  $s^{-1}$ , où A et V désignent respectivement l'accélération et la vitesse maximales d'un signal, donne une information sur le contenu fréquentiel de ce signal.

CAV : On appelle CAV (Cumul en valeur Absolue de la Vitesse) la quantité suivante :

CAV :  $\int |g(t)| dt$

Il s'agit de l'intégrale, sur la durée du séisme, de la valeur absolue de l'accélération  $g(t)$ . Elle s'exprime en m/s.

Co-sismique : caractère lié à l'occurrence d'un séisme. Une rupture co-sismique est créée par la rupture tectonique instantanée de la faille qui génère le séisme. Elle se distingue d'une rupture créée par un phénomène différent de la tectonique (effondrement, glissement de terrain, etc...) ou bien de la déformation a-sismique (glissement lent le long d'une faille).

Distance focale : distance entre le foyer d'un séisme et un point donné.

Donnée macrosismique : information déduite de l'observation en surface des effets des séismes.

Durée de phase forte : La durée de la phase forte d'un signal sismologique est généralement définie par l'intervalle de temps entre le moment où le signal a atteint 5% de l'intensité d'Arias et le moment où il en a balayé 95%.

Epicentre : point de la surface du sol situé à la verticale du foyer d'un séisme.

Faille active avec rupture de surface : faille montrant l'évidence de mouvements récurrents à proximité de la surface dans une période de plusieurs dizaines de milliers d'années.

**Foyer** : point à l'intérieur de la terre considéré comme l'origine de l'énergie dissipée par le séisme.

**Intensité** : évaluation en une zone limitée de la surface du sol des effets d'un séisme, sur des bases statistiques, par référence aux critères d'une échelle descriptive.

Dans la présente règle, il est fait usage de l'intensité macrosismique MSK (Medvedev-Sponheuer-Karnik, 1964) qui a servi à évaluer l'intensité des séismes contenus dans la base de données SISFRANCE (ex-SIRENE) et, pour les séismes récents, de l'échelle EMS 1998 (European Macroseismic Scale, version 1998) prolongement de l'échelle MSK, plus adaptée aux constructions actuelles. Ces échelles comportent douze degrés; l'intensité peut s'exprimer sous forme de degré ou de demi-degré.

**Intensité d'Arias** : l'intensité d'Arias est définie par l'expression suivante

$$I = \int g^2(t) dt$$

Il s'agit de l'intégrale, sur la durée du séisme, du carré de la valeur de l'accélération  $g(t)$ . Elle s'exprime en  $m/s^2$

**Isoséiste** : courbe qui enveloppe des points de même intensité et sépare deux aires dans lesquelles les intensités observées pour un même séisme sont différentes.

**Loi d'atténuation** : loi décrivant la décroissance d'un paramètre en fonction de la distance. Dans la présente règle, il est fait référence, d'une part à l'atténuation de l'intensité en fonction de la distance focale, d'autre part à l'atténuation des ordonnées spectrales du spectre de réponse en fonction de la distance et de la magnitude.

**Loi moyenne** : les valeurs du spectre de réponse obtenues à partir des enregistrements suivent une distribution log-normale (les logarithmes de ces valeurs sont distribués de façon normale). La régression aux moindres carrés en deux étapes utilisée pour déduire les coefficients de la loi d'atténuation (2) a été établie sur le logarithme des valeurs d'accélération. La valeur moyenne du logarithme des accélérations spectrales est donc égale à la valeur médiane du fait de cette distribution normale. Cela signifie que la valeur donnée par la loi (2) représente un intervalle de confiance de 50% et celle prédite par la loi (2) augmentée de son écart type un intervalle de confiance de 84%.

**Magnitude** : grandeur obtenue par la mesure de l'amplitude des ondes enregistrées par un sismographe ; la magnitude fournit une estimation de l'énergie dissipée au foyer sous forme d'ondes sismiques. Il existe plusieurs définitions de la magnitude :

La Magnitude locale (MI) est définie à partir de l'amplitude maximale soit des ondes P, soit des ondes S. Le LDG utilise l'amplitude maximum de la phase S mesurée sur la composante

verticale de la vitesse (Plantet, 1978). Pour une distance épacentrale  $D$  :

$$ML(LDG) = \log(A/T) + B(D) + C$$

$A$  : amplitude maximum en déplacement des ondes  $S$ ,

$T$  : période associée,

$B(D)$  : coefficient d'atténuation moyen,

$C$  : correction de station.

La magnitude d'un séisme est la moyenne des valeurs calculées dans les stations situées de 100 à 1500 km de l'épicentre.

La magnitude de surface ( $M_s$ ) est mesurée à partir des ondes de surface de Rayleigh. Une définition générale de la magnitude de surface  $M_s$  est la suivante :

$$M_s = \log_{10} (A/T) + s(D,h) + s(M_s)$$

$A$  : amplitude du déplacement du sol,

$T$  : période associée,

$s(D,h)$  : fonction de calibration empirique amplitude-distance,

$s(M_s)$  : terme correctif permettant de prendre en compte les effets de site, les trajets et les mécanismes au foyer (Wilmore, 1979).

La magnitude de moment ( $M_w$ ) est reliée au moment sismique  $M_0$  du séisme.  $M_0$  s'exprime de façon simple en fonction de la surface  $S$  de la faille qui a joué, du déplacement (ou dislocation) moyen  $D$  sur cette faille et de la rigidité  $m$  du milieu, par la relation  $M_0 = m S D$ . La magnitude  $M_w$  est alors reliée à  $M_0$  par l'expression :

$$M_w = 2/3 \log M_0 - 6,0$$

Pour les magnitudes inférieures à 7,5, les valeurs trouvées pour  $M_w$ ,  $M_s$  et  $M_I$  sont quasi-identiques (Madariaga et Perrier, 1991).

Mouvement sismique : mouvement d'un point de la surface du sol en champ libre, c'est-à-dire en l'absence de toute installation.

Néotectonique : relatif à la déformation actuelle de la croûte terrestre.

Période de retour : intervalle de temps moyen entre deux séismes, dans une gamme de magnitude donnée, se produisant sur une même faille ou dans une zone spécifique.

Potentiel sismogénique : capacité d'une zone à produire des séismes de caractéristiques données.

Profondeur focale : distance entre le foyer d'un séisme et l'épicentre.

Profondeur sismogénique : profondeur maximale atteinte par les ruptures cosismiques.

SISFRANCE : base de données sur la sismicité historique (BRGM/EDF/IPSN) anciennement dénommée SIRENE. Cette base de données macrosismiques comprend des informations (dates, positions des épicentres, valeurs d'intensité ponctuelles, ...) sur les séismes historiques et contemporains en France.

Sismothèque : ensemble d'enregistrements accélérométriques obtenus à la surface du sol lors de séismes.

Spectre de réponse : courbe correspondant à l'amplitude maximale, en fonction de la fréquence, de la réponse d'oscillateurs simples pour un amortissement donné, lorsqu'ils sont sollicités par le mouvement du sol.

Vitesse moyenne des ondes de cisaillement : vitesse moyenne de propagation des ondes de cisaillement en se plaçant dans le cas des faibles déformations.