

Le séisme dans la conception et l'évaluation des centrales nucléaires

■ Pierre LABBE, EDF-Division Ingénierie Nucléaire

On procède à une revue critique des méthodes d'ingénierie utilisées dans le processus de conception des centrales nucléaires en examinant les aspects géotechniques et structurels. Le cas de la centrale de Cruas, construite sur isolation sismique, est présenté dans les grandes lignes. On décrit ensuite les méthodes disponibles en situation de réévaluation sismique, avant de terminer par les perspectives d'évolution de la pratique d'ingénierie et les actions de R&D d'accompagnement.

1. Introduction

Pourquoi mettre en avant les questions de tenue au séisme ou de comportement sous séisme des centrales nucléaires dans une thématique générale consacrée au génie civil de la conception à l'exploitation ? Il a quelques raisons à cela.

Une première est que le cas de charge séisme est souvent déterminant dans le dimensionnement des bâtiments nucléaires. A titre d'exemple récent illustrant la chose, nous pouvons prendre le bâtiment combustible de l'EPR ; rapportés à ceux du palier 1300 MW, sa masse et son élancement, associés à l'augmentation du niveau de séisme de 0,15 g à 0,25 g, suffisent à expliquer l'accroissement de ferrailage, d'un facteur 2,5 environ, dans les voiles "de façade"¹. Exception notable à cette règle du rôle déterminant du chargement sismique, les enceintes de confinement ne sont pas, avec les niveaux actuels, dimensionnées par ce cas de charge. La pratique de dimensionnement sous séisme est cadrée par des documents de référence parmi lesquels chacun connaît en France un guide ASN et le code de conception et construction de l'EPR, l'ETC-C. Des documents de ce type existent internationalement, en particulier aux USA [1] et au Japon [2].

Le chargement sismique peut à ce point être déterminant qu'il conduit à des choix de conception radicalement innovants comme ce fut le cas pour la centrale de Cruas-

Meysse dont on rappellera que ses îlots nucléaires sont entièrement construits sur isolation sismique. D'autres installations nucléaires en France sont construites sur le même principe.

Peut-être encore plus qu'en dimensionnement, le séisme peut être amené à jouer un rôle considérable en situation de réévaluation des installations existantes. En effet il est beaucoup plus délicat de renforcer une structure existante de façon à ce qu'elle soit en mesure de supporter un certain niveau d'agression que de la dimensionner *ex nihilo* pour ce même niveau. Par nature l'exercice de réévaluation de l'existant conduit à exploiter les marges de conception de la structure telle que construite. Deux méthodes sont reconnues internationalement pour mener cet exercice difficile, une méthode de recherche de marges sur un ensemble ciblé de composants de l'installation et une approche probabiliste du risque sismique ; nous les introduirons dans les grandes lignes. Puis nous présenterons l'exemple de la réévaluation sismique de la centrale du Bugey.

Les questions progressivement soulevées par la pratique de conception ou de dimensionnement des installations, encore plus délicates à traiter dans le contexte de réévaluation, amplifiées par une pression croissante venant de l'extérieur du milieu nucléaire, vont engendrer une évolution des méthodes d'ingénierie dont nous dirons quelques mots pour conclure.

2. Revue de la pratique d'ingénierie de conception

Même si leur mise en œuvre a pu évoluer au cours du temps en fonction des moyens de calcul disponibles, quelques grands principes constants d'analyse ont présidé aux études sismiques.

2.1 Chargement sismique

La détermination du mouvement sismique se fait en France sur une base déterministe partant de la connaissance d'événements réels. Le processus de détermination du mouvement, que nous n'examinons pas ici, finit par aboutir à une description d'un spectre de réponse propre au site qui porte le nom de spectre SMS, pour Séisme Majoré de Sécurité. Il est ensuite enveloppé par un SDD, pour Spectre De Dimensionnement. Comme certaines analyses nécessitent de disposer d'une description du

¹ L'augmentation de ferrailage dans les autres voiles, est plutôt imputable à leur manque de régularité géométrique, résultant d'une recherche de compacité de l'installation et à d'autres facteurs.

mouvement sismique sous forme de séries temporelles ou accélérogrammes, on s'est doté d'algorithmes et d'outils numériques qui permettent d'obtenir de tels signaux, compatibles avec un spectre de réponse donné.

En réalité ce SMS (ou ce SDD), qu'il se présente sous forme spectrale ou sous ses avatars de séries temporelles, ne doit plus être considéré comme une représentation d'un événement susceptible de se produire, mais comme un cas de charge visant à concevoir une installation correctement protégée contre les événements en question. En effet, l'état actuel des réflexions sur ces questions montre que si on souhaite conduire une approche de type expertise, c'est-à-dire si on souhaite examiner de façon réaliste les conséquences d'un événement sismique susceptible de se produire sur un site, il ne faut pas se contenter d'employer des accélérogrammes compatibles avec le spectre SMS (ou SDD). Il faut ré-interroger plus en profondeur la physique à l'origine des mouvements et exhiber des signaux réellement adaptés au site. En pratique, qu'elle s'intéresse au dimensionnement d'installations neuves ou à l'évaluation d'installations existantes, et sauf cas très particuliers, la pratique d'ingénierie reste donc celle du "séisme cas de charge".

2.2 Questions de géotechnique

Il y a bien sûr une très grande variété dans les sols de fondations d'installations nucléaires, depuis le rocher jusqu'à des sols relativement mous. Pour ce qui est de leur caractérisation en ingénierie sismique, une classification rapide peut se faire sur la valeur de la vitesse des ondes de cisaillement, V_S , sous le radier. A titre d'exemple, la norme de sûreté de l'AIEA sur les aspects géotechniques [3] distingue

- le type 1 : $V_S > 1100$ m/s qu'on qualifierait en français de rocher,
- le type 2 : 1100 m/s $> V_S > 300$ m/s qu'on qualifierait en français de sols durs à moyens,
- le type 3 : 300 m/s $> V_S$ qu'on qualifierait en français de sols mous.

La norme précise quels sont les paramètres dont les valeurs doivent être renseignées pour définir des profils de sol exploitables (stratigraphie, vitesse des ondes de compression et de cisaillement ...) et encadre la pratique d'ingénierie par une série de recommandations parmi lesquelles on peut citer les suivantes :

- Les cas où la vitesse des ondes de cisaillement n'est pas croissante avec la profondeur nécessitent des examens approfondis.
- Lorsque le mouvement sismique est donné en surface, il est recommandé

d'en effectuer une déconvolution sauf pour les sites de type 1.

- Les sites du type 3 nécessitent un traitement particulier du mouvement sismique de façon à obtenir un spectre en surface compatible avec le profil de sol.
- Des études paramétriques minimales (précisées dans la norme) doivent être effectuées pour couvrir les incertitudes.
- On doit tenir compte du comportement non-linéaire des sols. La méthode de linéarisation équivalente est acceptable pour cela. Nous allons développer ce dernier point.

La méthode de linéarisation équivalente a été mise au point par Seed et Idriss [4] à la fin des années 60 et par Hardin et Drnevich [5]. Elle est bien adaptée au calcul de la réponse d'un site dont la stratigraphie est raisonnablement

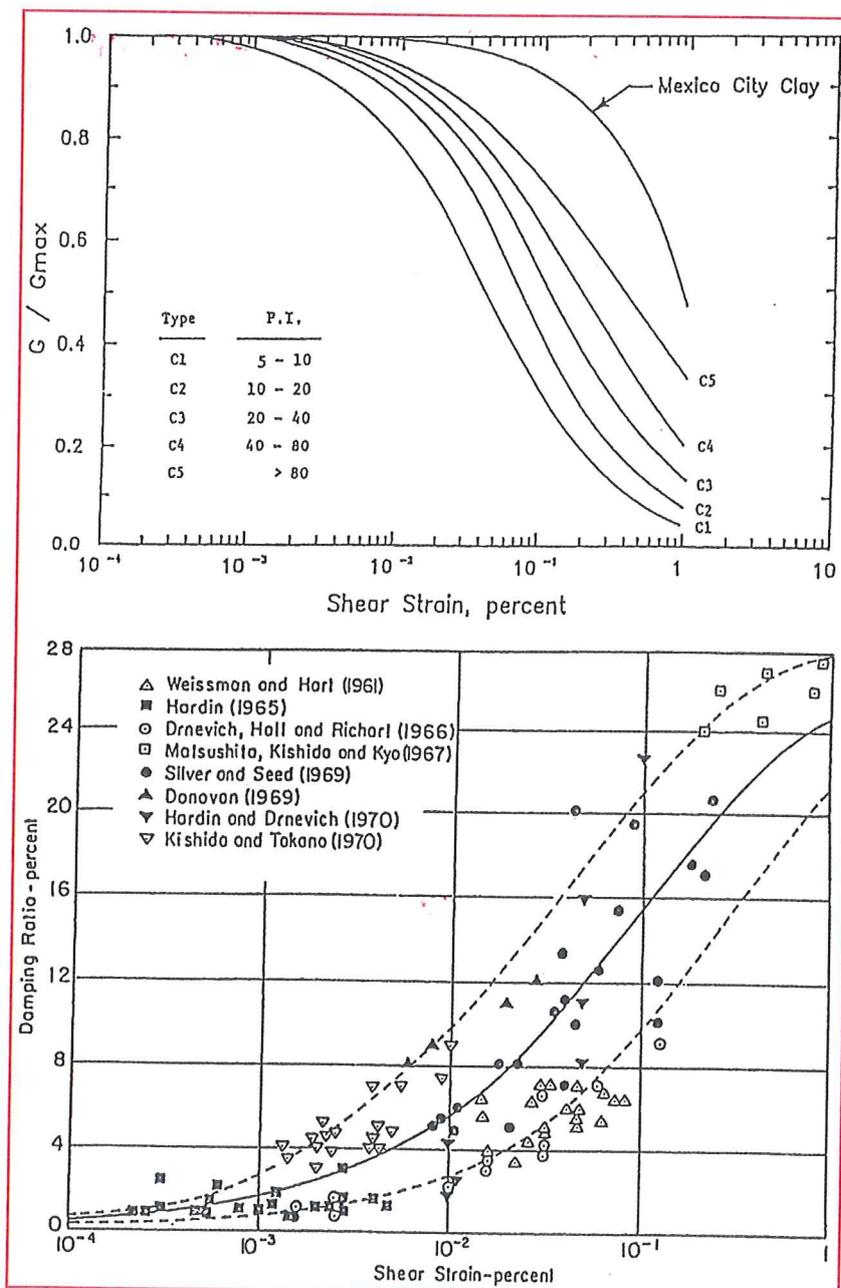


Fig. 1 - Exemples de courbes d'atténuation du module de cisaillement et d'augmentation de l'amortissement couramment utilisées en géotechnique pour rendre compte du comportement non-linéaire des sols.

horizontale, soumis à un mouvement sismique se présentant comme un train d'ondes de cisaillement à propagation verticale, ce qui est l'hypothèse la plus courante. Elle repose sur la caractérisation de la diminution du module de cisaillement et de l'augmentation de l'amortissement interne en fonction de la déformation de cisaillement éprouvée par le sol, comme illustré sur la figure 1. La méthode est itérative et est en général initialisée par un calcul en comportement élastique (très petites déformations). Ce calcul fournit en chaque couche du modèle la déformation de cisaillement engendrée par le séisme. Cette déformation est utilisée pour actualiser les valeurs de module de cisaillement et d'amortissement et relancer le calcul. La convergence est obtenue en quelques itérations. Cette méthode est très largement répandue dans les bureaux d'étude en géotechnique ; elle fait partie des pratiques industrielles courantes.

Par rapport à cette méthode de référence, on peut trouver des pratiques plus simples et d'autres plus élaborées. Un exemple de pratique plus simple est celle employée par EDF en phase de dimensionnement de ses centrales nucléaires. Plutôt que de procéder à un examen site par site, le choix d'une politique de paliers a conduit à privilégier un dimensionnement qui enveloppe une large gamme de modules de sol. Pour cela on considère des sites idéaux constitués de semi-espaces infinis, homogènes et isotropes à comportement linéaire, dont la rigidité varie dans un large registre couvrant tout type de sol, du plus rigide (rocher) au plus mou (sans descendre toutefois au dessous de V_s de l'ordre de 300 m/s). Ensuite on peut vérifier site par site que la situation géotechnique est effectivement enveloppée par les études du palier. Si ce n'est pas le cas on procède à des études complémentaires.

Dans d'autres cas de figure on peut mettre en œuvre des méthodes plus élaborées. Par exemple sur certains sites à l'étranger on a mis en place une instrumentation permettant de mesurer la première fréquence propre du site de façon à diminuer les incertitudes inhérentes aux études géotechniques. Il faut aussi garder à l'esprit que la méthode linéaire équivalente a un domaine de validité limité. Pour des mouvements forts engendrant des déformations élevées, on est amené à faire des calculs non-linéaires au sens strict. Ce type de calcul est en général indispensable si on cherche à estimer un effet irréversible, comme le tassement sous séisme. Un degré de complication supplémentaire est atteint dans l'analyse des sites susceptibles d'être affectés par le risque de liquéfaction.

2.3 Interaction sol-structure

L'ampleur au sol et la masse des installations nucléaires font qu'il n'est pas possible de négliger les effets d'interaction sol-structure (sauf sur les sites de type 1 dans la norme AIEA). La décomposition de ces effets en interaction cinématique et interaction inertielle est bien connue. Dans le cadre du présent article nous n'évoquons que quelques aspects de l'interaction cinématique.

L'interaction cinématique étudie comment le train d'ondes sismiques est modifié par la présence de la structure, celle-ci fût-elle sans masse. Dans les situations où le train d'ondes est à propagation verticale et la structure fondée en surface, il n'y a pas d'interaction cinématique. Les études des centrales nucléaires d'EDF ont été faites avec cette hypothèse qui à l'examen s'avère conservatrice. On comprendra bien sûr que la chose soit regardée plus attentivement dans les pays comme le Japon où les installations sont profondément enfoncées dans le sol.

Les études d'interaction cinématique ont trouvé un regain d'intérêt ces dernières années pour la raison suivante : on est de plus en plus souvent confronté à des mouvements sismiques ayant un fort contenu à hautes fréquences ; mais en même temps on dispose maintenant d'informations sur la variabilité spatiale des mouvements, laquelle est d'autant plus forte qu'on examine une composante à haute fréquence. Dans ces conditions, la construction d'un radier de grandes dimensions produit deux effets : le radier joue un rôle de filtre, réduisant considérablement le contenu à hautes fréquences du mouvement incident ; et en même temps le radier se voit animé d'un mouvement de rotation autour de la verticale, même si le mouvement sismique lui-même n'est que translation.

Les questions soulevées par l'interaction sol-structure ont été débattues récemment dans un contexte OCDE [6]. Les conclusions ont été que les améliorations suivantes sont à apporter en priorité :

- Mieux cerner les limites de validité de l'approche usuelle du train d'ondes à propagation verticale, en considérant le cas d'autres types d'ondes, en particulier inclinées.
- Mieux cerner, à la lumière des outils probabilistes, quel plage d'incertitudes est couverte par l'approche usuelle (un profil de sol "best estimate" encadré par deux profils représentant un sol plus dur et un sol plus mou).
- Modéliser de façon réaliste les dissipations d'énergie dans le sol, au contact sol-structure et dans la structure ; examiner le cas des structures sur isolation sismique.

2.4 Structures et spectres de planchers

La pratique industrielle courante dans le domaine de la modélisation, du calcul de la réponse et de la vérification des structures de génie civil peut se résumer de la façon suivante :

- La structure est modélisée comme répondant dans le domaine du comportement élastique correspondant aux très petites déformations.
- Contrairement à la pratique d'ingénierie du bâti courant, on n'applique pas de coefficient de comportement² avant d'entrer dans le processus de vérification ; en revanche les critères appliqués sont ceux de la profession, correspondant à des vérifications aux états-limites ultimes puisque le séisme est considéré comme une situation accidentelle.
- Des variations sur le chargement sismique couvrent les incertitudes de modélisation.

² Ce coefficient réducteur appliqué au chargement sismique vise à tenir compte du fait qu'on admet un certain endommagement sous séisme et que, étant donné ce que sont les fréquences des bâtiments, le déplacement en régime post-élastique est voisin de celui qu'on aurait en régime élastique. Sa valeur dépend du type de construction ; elle est typiquement de l'ordre de 3. La pratique nucléaire est de la prendre égale à 1.

Concernant la modélisation des bâtiments, les pratiques d'ingénierie ont considérablement évolué depuis la conception des premières tranches PWR. Alors qu'à la conception du palier 900 MW, et même au moment des premières visites décennales, la pratique courante était, principalement pour des raisons de capacité de calcul, de réduire un bâtiment à un modèle-brochette ("stick model"), l'emploi systématique des modélisations 3D était la règle pour les récentes troisièmes visites décennales.

Cependant la sophistication des modèles n'a concerné que la géométrie. Du côté des lois de comportement on en est resté au comportement élastique linéaire, en raison d'une part de la difficulté à expliciter les éventuelles non linéarités et d'autre part du corpus réglementaire ou normatif qui interdit de procéder autrement. A cet égard, il est important de noter que, contrairement à une idée très répandue, le calcul en élasticité et la vérification des structures sans recours au coefficient de comportement :

- ne forment pas *a priori* un ensemble d'hypothèses cohérent ; cette cohérence n'existe que pour de très faibles chargements, bien en deçà de ceux qui sont admis au titre des critères de vérification même avec un coefficient de comportement égal à 1,
- n'ont pas pour conséquence de garantir que la structure reste effectivement dans le domaine de comportement linéaire.

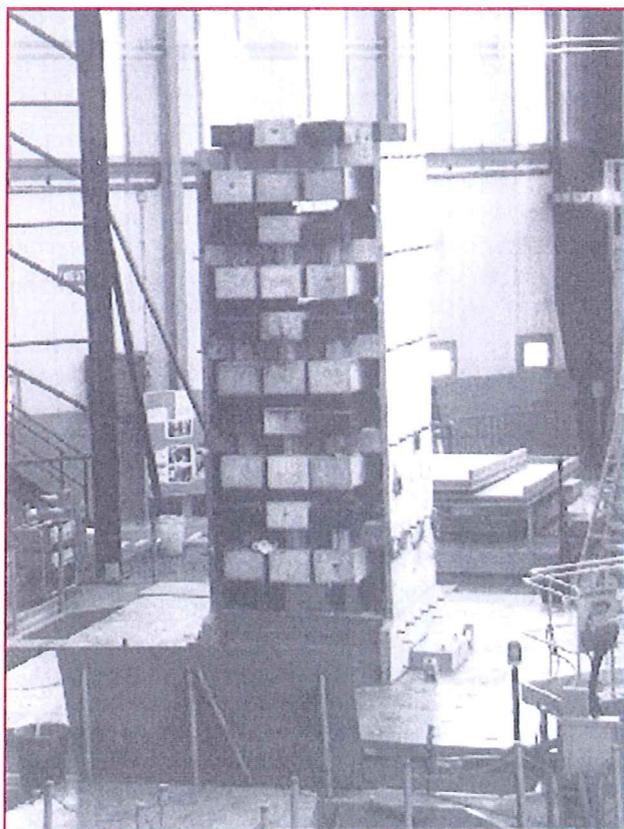


Fig. 2 - Maquette CAMUS sur la table vibrante Azalée.

Cette incohérence de la pratique usuelle a été mise en évidence et partagée par la communauté scientifique internationale à l'occasion d'un récent programme de recherche de l'AIEA [7], organisé autour d'un benchmark international portant sur l'interprétation d'essais de la maquette CAMUS (figure 2), testée sur la table vibrante Azalée du CEA-Saclay. (L'AIEA en a tiré des conclusions exposées plus loin sur les nécessaires évolutions de la pratique d'ingénierie.) L'origine de cette incohérence réside dans le fait que la fissuration apparaît pour des chargements relativement peu élevés et que la structure exhibe donc un comportement non-linéaire bien avant de plastifier les aciers de ferrailage ou d'atteindre les critères de dimensionnement. Le phénomène est résumé sur la figure 3 où est présentée la relation moment-courbure à la base d'un voile de la maquette CAMUS.

Sans en être totalement méconnue, cette incohérence est entretenue par la réglementation, au prétexte que cela va dans le sens de la sûreté pour le dimensionnement des bâtiments. En effet, au sens de la terminologie des mécaniciens, cette pratique revient à considérer le chargement sismique comme un chargement primaire, ou force imposée. Il faut cependant souligner deux effets pervers mis en évidence par l'AIEA [7] :

- A accélération donnée, cette pratique surestime beaucoup plus le caractère endommageant des mouvements à haute fréquence (mouvements en champ proche des séismes de faible-moyenne magnitude) que des mouvements à basse fréquence (mouvements dus à un séisme lointain de forte magnitude).
- Cette pratique produit des spectres de planchers calculés sur une hypothèse erronée du comportement des structures en situations de petites déformations³, ce qui ne va pas nécessairement dans le sens de la sûreté.

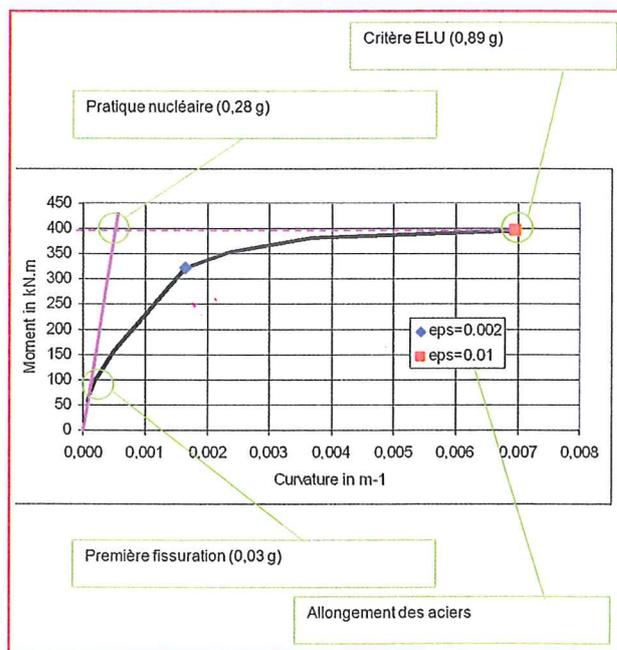


Fig. 3 - Relation moment courbure du voile CAMUS et niveaux d'accélération aux différents états.

³ Petites déformations : Domaine qui va de l'apparition des premières fissures jusqu'à une déformation correspondant à ce qui est admis sans excéder les critères de dimensionnement.

3. Centrale de Cruas-Meyssse et autres installations sur isolation sismique

Dans le parc nucléaire d'EDF la centrale de Cruas-Meyssse, construite au début des années 80, est un cas à part car elle est fondée sur appuis parasismiques (figure 4). Cette décision a été prise pour rendre la conception de l'installation (palier 900 MW dimensionné pour une accélération de 0,2 g) compatible avec l'accélération de 0,3 g retenue sur le site. La fourniture et la mise en place des appuis ont été assurées par la société Freyssinet. En construisant de cette façon, l'ambition était aussi de démontrer un savoir-faire contribuant à l'exportation de la technologie française. De fait la centrale de Koeberg (Afrique du sud) a ensuite été construite par des entreprises françaises sur un système d'appuis du même type qu'à Cruas, équipés en tête d'une plaque de glissement (Brevet EDF Spie-Batignolles).

Avec ce type de fondation, l'ensemble du bâtiment se comporte pratiquement dans le plan horizontal comme un corps solide. Les spectres de plancher horizontaux sont les mêmes à tous les niveaux et présentent un contenu fréquentiel très affaibli par rapport à des spectres obtenus sur la même installation sans appuis. Des compléments de vérification sont à apporter pour les équipements à très basse fréquence s'il y en a. La contrepartie des faibles accélérations est que les déplacements différentiels entre le bâtiment isolé et le monde extérieur sont importants et que des dispositifs ou des dispositions doivent être prévus pour accommoder ces déplacements. Le lecteur trouvera dans la référence [8] une revue des principes de conception d'un tel système de fondation ainsi que des informations complémentaires sur la centrale de Cruas-Meyssse.

Rappelons que la construction d'installations nucléaires sur ce type d'appui n'a pas commencé avec Cruas. Les caissons UNGG français et ceux de Vandellos sont fondés de cette façon. Il en va de même des piscines de La Hague, construites après Cruas. Des projets de centrales nucléaires isolées sismiquement ont été étudiés par EDF pour les sites de Karun en Iran et Laguna Verde au Mexique, ainsi qu'un projet de réacteur à neutrons rapides de grande puissance dont le puits de cuve était en outre isolé dans la direction verticale. Plus récemment Areva a construit l'usine Georges Besse II sur appuis parasismiques, pour des questions non de sûreté nucléaire mais de protection de l'investissement. Le réacteur de recherche Jules Horowitz est actuellement en construction avec ce type de fondation et le réacteur ITER sera aussi construit de cette façon.

La technique des appuis parasismiques retrouve aujourd'hui un regain d'intérêt en particulier au Japon [9] où elle est perçue, pour la construction conventionnelle aussi bien que pour la construction nucléaire, comme un voie prometteuse de résolution des questions de sécurité et de sûreté posées par le risque sismique. Il est possible que cette technique soit maintenant considérée internationalement comme suffisamment mûre pour que l'AIEA en fasse l'objet d'une norme de sûreté.

4. Réévaluation de l'existant

Le retour d'expérience du séisme de Nigata Chuetsu-Oki (2007) a illustré la robustesse des centrales nucléaires vis-à-vis du risque sismique. Cette robustesse est liée aux marges explicites et implicites de conception, incorporées dans la méthode décrite plus haut, encore renforcées dans le cas japonais par des règles propres à ce pays. Selon la pratique internationale consacrée par l'AIEA [10] [11], deux démarches sont possibles pour mener les études de réévaluation sismique des installations existantes. Les deux démarches font un large appel au retour d'expérience du comportement sous séisme de structures, systèmes et équipements similaires à ceux qu'on trouve dans les installations nucléaires.

4.1 Méthode d'évaluation des marges de conception

La première méthode est identifiée sous le nom de SMA pour "Seismic Margin Assessment". Elle consiste à déterminer un nombre limité d'équipements, la SSEL pour "Safe Shutdown Equipment List", dont le bon fonctionnement sous séisme suffit pour replier la centrale en situation sûre, puis à s'assurer qu'on dispose des marges suffisantes pour garantir ce bon fonctionnement. En ce qui concerne le génie civil et les équipements mécaniques, le principe énoncé par l'AIEA est que, sauf justification dûment documentée, les critères peuvent être moins sévères que ceux retenus en conception mais doivent rester plus exigeants que pour le bâti courant. La réévaluation sismique en VD3 de la centrale du Bugey (voir ci-dessous) s'est faite selon une méthode de ce type; l'ASN a toutefois étendu le contenu de la SSEL à l'ensemble des structures systèmes et équipements initialement qualifiés au séisme.

L'AIEA laisse ouverte la possibilité d'utiliser des critères moins sévères à condition de les justifier sur une base expérimentale complétée par une analyse appropriée. En pratique ceci signifie qu'on pourra, pour certains éléments structuraux (poutres, poteaux, nœuds d'ossatures, voiles, planchers...), adopter des facteurs de dissipation d'énergie plus élevés que ceux figurant dans la référence [11] à condition de les soumettre, en reproduisant les dispositions constructives en place, à des essais montrant leur bon comportement sous séisme.

La méthode préconisée par l'AIEA s'apparente à celle bien connue dans ingénierie non-nucléaire du coefficient de comportement, la différence venant du fait que le coefficient réducteur est appliqué sur le résultat d'un calcul en élasticité au lieu de l'être sur le chargement. Cependant l'AIEA note qu'il s'agit là d'un pis aller s'inscrivant dans une culture de génie civil basée sur des calculs où le cas de charge séisme se présente comme une force imposée et le produit du calcul comme des efforts internes. Le texte insiste sur le fait qu'une bonne protection contre le risque sismique réside davantage dans la capacité des structures à accommoder des grandes déformation que dans leur capacité à supporter des efforts importants, et qu'en conséquence les démonstrations de bon comportement basées sur les estimations de déformations sont les bienvenues et doivent être encouragées.

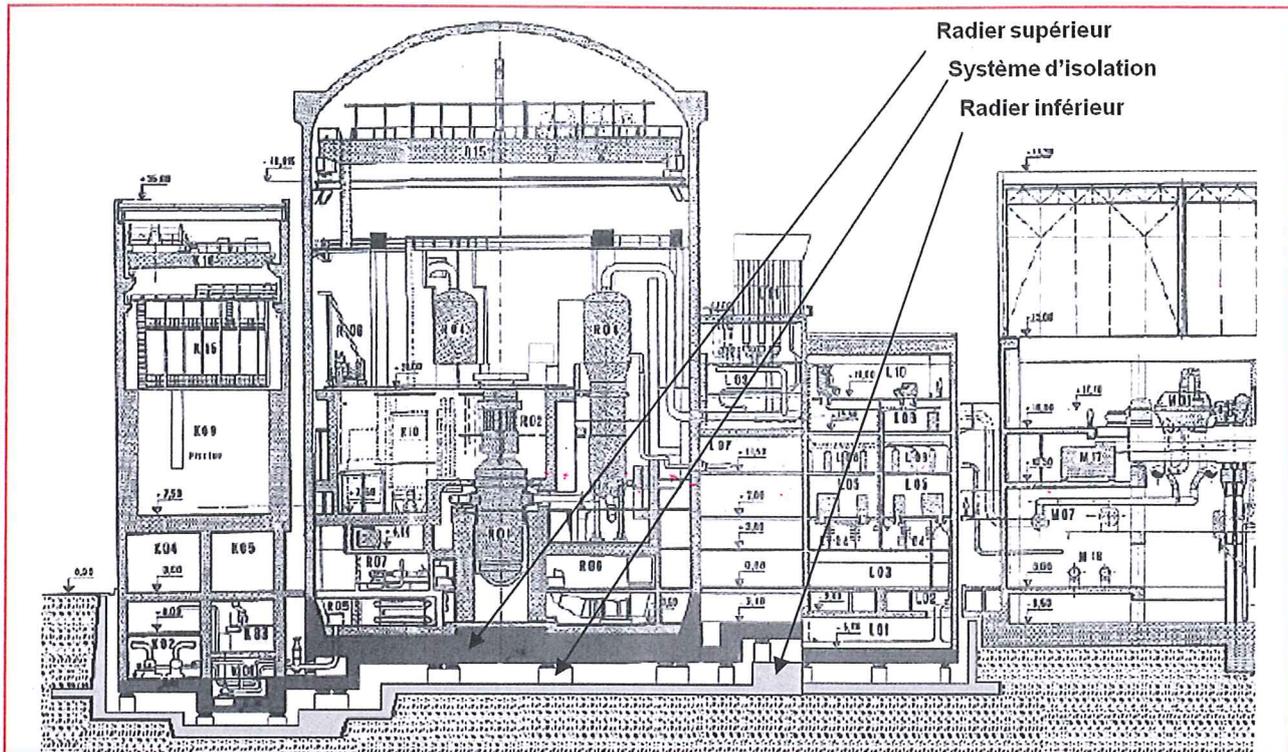


Fig. 4 – Coupe de la centrale de Cruas-Meysses, montrant l'îlot nucléaire sur appuis parasismiques

A cet égard, il faut observer que les approches en déplacement se développent actuellement en dehors de l'ingénierie nucléaire et sont même codifiées (Eurocode 8, ATC-40, règlement néo-zélandais). Leur succès tient au fait qu'elles s'appuient sur une meilleure compréhension de la physique des phénomènes en jeu depuis les modes de dégradation des capacités de la structure jusqu'aux mécanismes de ruine potentiels. Ces approches constituent une véritable révolution de la façon d'analyser le comportement sous séisme des ouvrages et les marges disponibles. Dans leur état actuel de développement, leur application à des structures complexes comme celles des installations nucléaires n'est pas immédiate, mais leur esprit peut être conservé.

4.2 Approche probabiliste du risque sismique

La seconde méthode (par ailleurs applicable à tout type d'aléa externe) est une évaluation probabiliste du risque. Par exemple pour une centrale nucléaire on cherche à estimer la probabilité annuelle de fusion du cœur sous séisme. Cette approche veut :

- que l'aléa sur le site soit décrit de façon probabiliste,
- que le comportement sous séisme des structures, systèmes et équipements soit aussi décrit de façon probabiliste. Ceci se fait sous la forme de courbes de fragilité ou de défaillance qui décrivent la probabilité pour que, à un niveau d'aléa donné, telle structure subisse tel dommage ou que tel équipement ait un comportement défaillant⁴.

Pour se familiariser avec cette pratique, EDF a fait évaluer en 2010 la sûreté sous séisme de la centrale de Saint-Alban. La conclusion en a été que la probabilité de fusion du cœur se situait de façon très favorable par

rapport à ce qui est habituellement calculé. L'intérêt de cette méthode n'est pas tant dans la valeur absolue du résultat, que dans l'analyse des principaux contributeurs au risque. Dans une approche "risk informed" cette analyse permet d'optimiser les interventions à faire en vue d'améliorer la sûreté de l'installation.

En ce qui concerne plus précisément les structures de génie civil, la méthode voudrait qu'en considérant par exemple une voile dimensionnée pour tel niveau de séisme selon la pratique nucléaire, on puisse dire, en fonction d'un niveau d'agression qui peut varier de 0 à environ 10 fois le niveau de dimensionnement, quelle est la probabilité d'apparition d'un état fissuré qui rende ce voile impropre à assurer le supportage d'équipements chevillés. On comprend bien que l'état actuel de développement de la méthode est loin de présenter une mise en œuvre aussi précise et que le comportement des voiles y est décrit de façon plus rustique.

Dans ce domaine, il est intéressant d'observer que l'ingénierie nucléaire semble en avance sur l'ingénierie du bâti courant, mais qu'en revanche des progrès résultant d'une R&D active s'observent davantage dans le domaine du bâti courant que dans celui de la construction nucléaire. Par exemple on trouve dans la référence [12], pour un type d'immeubles d'habitation répandu en Italie, une description, en fonction de l'accélération du sol, de la probabilité d'apparition des 5 niveaux de dommage répertoriés dans l'échelle d'intensité EMS98. Des publications de plus en plus nombreuses présentent des probabilités d'apparition du dommage en fonction du déplacement en tête des immeubles, dans une perspective d'emploi des approches en déplacement.

⁴ Par exemple certains relais sont réputés pour les fausses alarmes qu'ils engendrent sous séisme.

4.3 Réévaluation de la centrale du Bugey

En application de la RFS 2001-01, et à l'occasion de la troisième visite décennale de sûreté, le niveau de séisme à considérer sur le site du Bugey a été évalué à 0,145 g, alors que le dimensionnement avait été fait en retenant 0,1 g. De plus, et comme à l'accoutumé, l'exercice a été conduit en employant les méthodes d'ingénierie correspondant à l'état de l'art et en appliquant le référentiel en vigueur au moment de la réévaluation. Ces facteurs conjugués expliquent l'ampleur de la réévaluation. Le lecteur trouvera une description complète de cette opération dans la référence [13].

La modélisation des structures de la centrale du Bugey illustre de façon spectaculaire les progrès accomplis dans ce domaine, puisqu'on est passé en 30 ans d'un modèle de masses et ressorts à un modèle tridimensionnel aux éléments finis (figure 5), qui a permis en particulier de tenir compte des effets de torsion et des effets d'amplification verticale non considérés au moment de la conception.

La vérification du dimensionnement des bâtiments s'est faite sur la base de la méthode SMA cadrée par l'AIEA [11]. Les principales étapes en sont :

- Recueil de données et vérification in situ de la conformité de l'installation aux données collectées.
- Calcul de réponse sismique en adoptant les valeurs d'amortissement préconisées.
- Vérification de l'absence de mode de ruine fragile et emploi des facteurs de dissipation d'énergie. Dans le cas présent leur valeur a été limitée à 1,5. Il faut cependant noter que les dispositions constructives en place satisfont aux exigences du BAEL, ce qui associé aux standards de

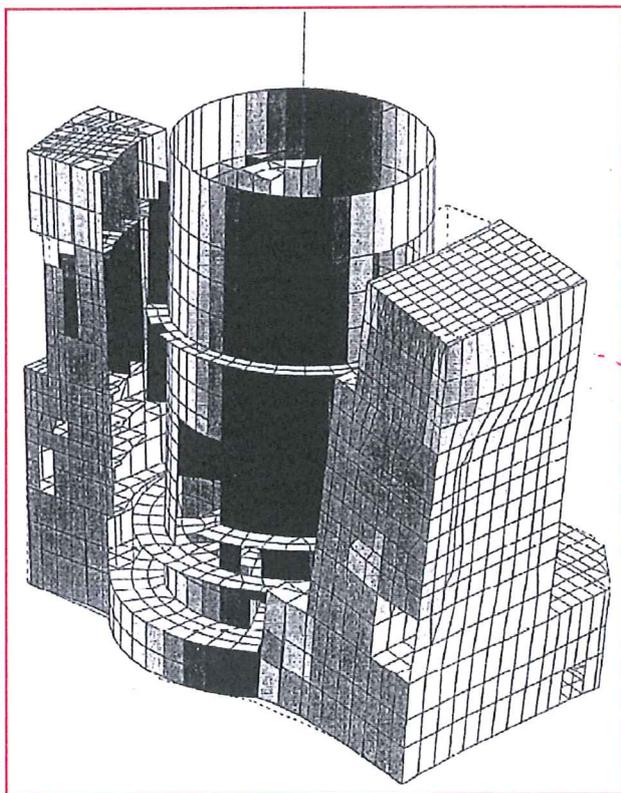


Fig. 5 – Une déformée propre du modèle de la centrale du Bugey

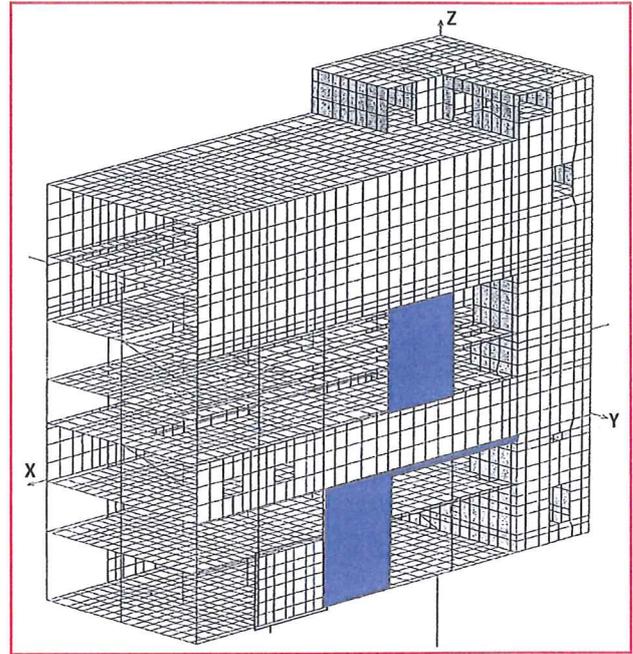


Fig. 6 – Présentation schématique de travaux de renforcement du bâtiment électrique.

qualité de la construction en France justifierait l'emploi de valeurs plus élevées. L'installation dispose donc encore de marges significatives disponibles si nécessaire.

- Combinaison des efforts sismiques aux autres cas de charge et vérification des critères réglementaires.
- Réalisation de travaux aux endroits où les critères ou bien les dispositions constructives ne sont pas respectés.

Les travaux de renforcement les plus importants sont effectués dans le bâtiment électrique ; ils consistent principalement en l'adjonction de voiles qui limitent les effets de torsion (figure 6). Quelques connexions entre voiles et planchers sont aussi à renforcer, et quelques travaux à réaliser dans le bâtiment des auxiliaires nucléaires pour en consolider le contreventement.

Concernant les spectres de planchers, on y discerne dans la direction horizontale un glissement vers les basses fréquences qui correspond au fait qu'en autorisant les mouvements de torsion, le modèle tridimensionnel présente aussi une plus grande souplesse d'ensemble que les modèles d'origine. Les dépassements par rapport aux spectres initiaux apparaissent surtout dans la direction verticale ; ceci s'explique par le fait que les méthodes mises en œuvre à la conception ne tenaient compte que de façon forfaitaire des effets verticaux d'amplification dynamique.

5. Perspectives et recherche-développement

Il n'a été que peu question du mouvement sismique dans cet article, mais il est évident que sa caractérisation joue un rôle crucial. Ce sujet est actuellement à l'ordre du jour avec la publication des décrets instituant le nouveau zonage de la France et de l'arrêté fixant les valeurs d'accélération applicables au bâti courant (JO de 24 octobre 2010). D'une façon générale la tendance est à une hausse

sensible des niveaux de protection, et ceci va conduire inéluctablement à un questionnement de l'industrie en général et de l'industrie nucléaire en particulier. Cette tendance à la hausse est en grande partie liée aux fortes incertitudes qui accompagnent l'estimation de l'aléa sismique. Pour apporter sa contribution à la résolution de ce problème, EDF a pris en 2009 l'initiative de lancer un ambitieux programme de recherche-développement sur la caractérisation des mouvements sismiques, SIGMA, pour Seismic Ground Motion Assessment, qui va se déployer sur 5 ans. D'autres industriels français et européens, sont associés au financement de ce programme dont la recherche sera menée à l'échelle européenne, en associant aussi des partenaires américains et/ou japonais sur les questions méthodologiques.

En ce qui concerne les aspects géotechniques et l'interaction sol-structure, les pratiques d'ingénierie sont appelées à évoluer dans le sens indiqué plus haut à la suite des conclusions de l'OCDE. En particulier il sera de plus en plus nécessaire de tenir compte des non-linéarités qui se développent dans le sol de fondation et à l'interface entre le sol et la structure.

Cependant c'est dans le domaine de la modélisation des structures qu'il faut se préparer aux plus grandes évolutions. Dans les conclusions de son programme de recherche sur la nocivité des mouvements sismiques [7], l'AIEA énonce clairement que la pratique courante telle que décrite ici au début du paragraphe 2.4 est à bout de souffle. Elle demande à l'ingénierie nucléaire de poursuivre son effort vers l'emploi de techniques de modélisation qui rendent correctement compte du comportement réel des ouvrages, et en particulier des non linéarités qui apparaissent dans le domaine des petites déformations. Cependant l'AIEA proscrit l'emploi de méthodes non-linéaires sophistiquées qu'elle qualifie de "controversial". Elle demande au contraire à l'industrie nucléaire d'œuvrer à un emploi systématique et codifié de méthodes simples, comme la linéarisation équivalente.

Cette position appelle deux commentaires :

- La linéarisation équivalente est déjà précisément une pratique d'ingénierie courante dans le domaine de la géotechnique, comme indiqué au paragraphe 2.2. Il ne s'agit donc ici que de demander aux ingénieurs de structures d'être aussi imaginatifs que le furent les géotechniciens il y a 40 ans ! A cet égard il est tout à fait paradoxal d'avoir une pratique qui interdit de ne pas tenir compte du comportement non linéaire des sols mais interdit aussi de tenir compte de celui des structures !

- Depuis les années 90, la pratique japonaise fournit un exemple de codification telle que souhaitée par l'AIEA et déjà à l'œuvre. La figure 7, extraite de la norme japonaise traduite en anglais [2], illustre la façon dont le comportement non-linéaire des structures en béton armé y est codifié.

Un des enjeux de l'évolution des méthodes d'ingénierie est de disposer d'un cadre de travail propre à accéder à une description plus réaliste du comportement, et en particulier à estimer les marges dont dispose une installation donnée.

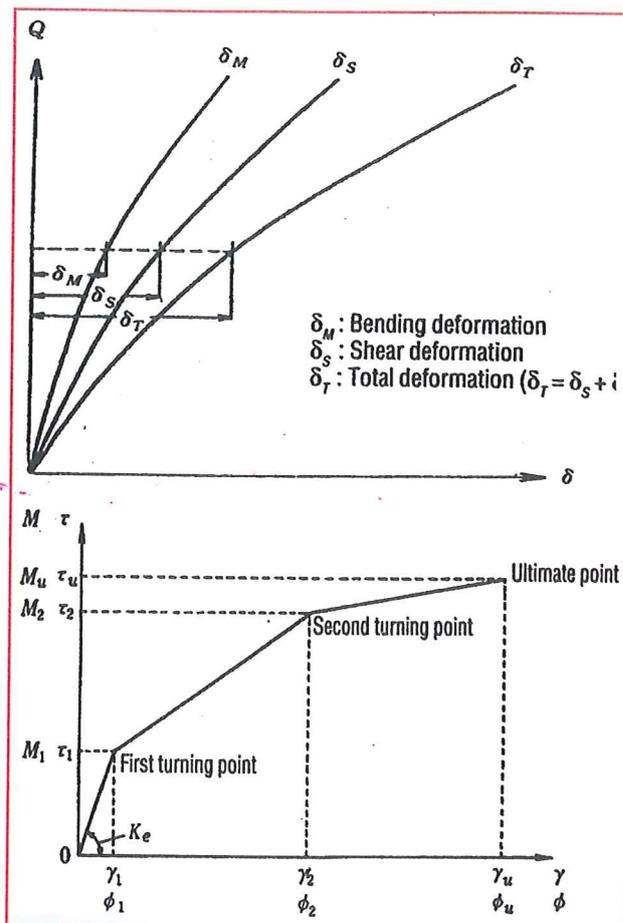


Fig. 7 - Extrait de [2], illustrant la codification du comportement non-linéaire du béton armé dans la pratique japonaise

Il faut aussi s'attendre à un développement de l'emploi des évaluations probabilistes du risque sismique. Pour ce qui est du rôle joué par le génie civil dans cette approche, il s'exprime dans la détermination des courbes de fragilité des voiles, planchers, poutres et poteaux qui font l'essentiel des structures porteuses. Ces courbes sont mal connues à l'heure actuelle.

Sur ces deux questions, marges et courbes de fragilité, EDF et le CEA ont lancé le programme de recherche SMART dans lequel une maquette à échelle $\frac{1}{4}$ de bâtiment nucléaire sensible à la torsion est testée sur la table vibrante Azalée. Une première maquette, SMART-2008 (figure 8) était destinée à mettre en évidence les marges de conception, ce qui a été fait de façon très démonstrative. Le programme a donné lieu à un benchmark international auquel ont participé 35 organismes de 19 pays différents [14]; un tel exercice permet de faire partager par des acteurs extérieurs au milieu nucléaire la connaissance de la robustesse des installations nucléaires. Une seconde maquette, SMART-2011, identique à la première mais qui sera soumise à un programme d'essai différent, est dédiée à la connaissance des courbes de fragilité. Elle donnera aussi lieu à un benchmark international.

⁵ On pourrait aussi bien parler de courbes de robustesse mais le terme 'fragilité' semble consacré par l'usage.



Fig. 8 – La maquette SMART-2008 sur la table vibrante Azalée du CEA Saclay, en haut, et dommage observé pour une accélération de 0,7g, en bas. (La maquette est dimensionnée à 0,2 g selon la pratique nucléaire).

De façon plus générale la connaissance de la vulnérabilité du bâti existant est un thème de recherche-développement actuel. Il est clair qu'on ne peut pas à l'échelle d'une ville ou d'un quartier mener des études fines, bâtiment par

bâtiment, comme on peut se le permettre pour des ouvrages remarquables ou des installations à risque. Néanmoins il est nécessaire que les deux types d'approche soient en cohérence. L'établissement de cette cohérence est un des aspects du programme de recherche MARS (Méthodologie d'Analyse du Risque Sismique) piloté par EDF R&D et qui associe de nombreux partenaires du monde industriel et du monde universitaire.

References

- [1] American Society of Civil Engineers (ASCE), "Seismic Design Criteria for Structures Systems and Components in Nuclear Facilities", Rep. 43-05, New York, NY, 2005.
- [2] Nuclear Regulatory Commission, "Technical Guidelines for Aseismic Design of NPPs", Translation of JEAG 4601-1987, NUREG/CR-6241 BNL-NUREG-52422, NRC, Washington, DC, 1994.
- [3] International Atomic Energy Agency (IAEA), "Geotechnical Aspects of Site Evaluation and Foundations for Nuclear Power Plants", Safety Guide NS-G-3.6, 2004.
- [4] Idriss I.M. & Seed H.B. "Seismic response of soil deposits", *J. Soil Mech. & Found. Div.*, ASCE, Vol 96, SM2, March 1970.
- [5] Hardin B.O. & Drnevich V.P. "Shear Modulus and Damping in Soils" *J. Soil Mech. & Found. Div.*, ASCE, Vol 98, SM6 June 1972 & SM7 July 1972.
- [6] "Soil Structure Interaction Knowledge and Effect on the Seismic Assessment of NPPs Structures and Components", OECD/NEA IAGE / IAEA ISSC Workshop, Ottawa, Canada, 5-7 Oct. 2010
- [7] IAEA, "Safety Significance of Near Field Earthquakes for NPP Design", TECDOC xxxxx, à paraître
- [8] Coladant C. "Base isolation and aseismic bearing", in *Recent advances in earthquake engineering and structural dynamics*, Ouest Edition, Nantes, 1992.
- [9] "Seismic Isolation of Nuclear Facilities" JNES / EDF Workshop, Niigata Institute of Technology, Kashiwazaki, Niigata, Japan, 24-26 Nov. 2010.
- [10] IAEA, "Evaluation of Seismic Safety for Existing Nuclear Installations", Safety Guide NS-G-2.13, 2009.
- [11] IAEA, "Seismic Evaluation of Existing Nuclear Power Plants", Safety Report Series n°28, 2003.
- [12] Rota M. et al., "A methodology for deriving analytical fragility curves for masonry buildings based on stochastic non linear analyses". *J. Engineering Structures*, 32, 2010.
- [13] Viallet E. et al., "Seismic Re-evaluation of EDF Bugey 900 PWR Nuclear Power Plant in the Frame of the 3rd Periodic Safety Review", *Nuc. Eng. & Des.*, 240, 2010.
- [14] Lermite S. et al., "SMART-2008 Project, Experimental Test Results of a Reinforced Concrete Building Subjected to Torsion", 14th WCEE, Ohrid, Rep. Macedonia, 2010.

