



**HAL**  
open science

## Le projet SINAPS@: vers une évaluation intégrée du risque sismique pour la sûreté nucléaire

Catherine Berge-Thierry, Pierre-Yves Bard, Thomas Chartier, Régis Cottureau, Etienne Bertrand, Fernando Lopez-Caballero, Didier Clouteau, Stéphane Grange, Silvano Erlicher, Fabrice Hollender, et al.

### ► To cite this version:

Catherine Berge-Thierry, Pierre-Yves Bard, Thomas Chartier, Régis Cottureau, Etienne Bertrand, et al.. Le projet SINAPS@: vers une évaluation intégrée du risque sismique pour la sûreté nucléaire. 9ème Colloque National AFPS2015, AFPS / IFSTTAR, Nov 2015, Marne-la-Vallée, France. insu-01742674

**HAL Id: insu-01742674**

**<https://insu.hal.science/insu-01742674v1>**

Submitted on 25 Mar 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Le projet SINAPS@: vers une évaluation intégrée du risque sismique pour la sûreté nucléaire

Catherine Berge-Thierry<sup>1</sup>, Pierre-Yves Bard<sup>2</sup>, Thomas Chartier<sup>3</sup>, Régis Cottereau<sup>4</sup>, Etienne Bertrand<sup>5</sup>, Fernando Lopez-Caballero<sup>4</sup>, Didier Clouteau<sup>4</sup>, Stéphane Grange<sup>6</sup>, Silvano Erlicher<sup>7</sup>, Fabrice Hollender<sup>1</sup>, Panagiotis Kotronis<sup>8</sup>, Maria Lancieri<sup>3</sup>, Aurore Laurendeau<sup>1</sup>, Alain Le Maoult<sup>1</sup>, Nadim Moussallam<sup>9</sup>, Marc Nicolas<sup>1</sup>, Frédéric Ragueneau<sup>10</sup>, Jean-François Semblat<sup>11</sup> et François Voldoire<sup>12</sup>

<sup>1</sup> Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives, CEA/DEN Saclay, France

<sup>2</sup> ISTERRE, France

<sup>3</sup> Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, France

<sup>4</sup> CentraleSupélec, France

<sup>5</sup> CEREMA, France

<sup>6</sup> INP-Grenoble & Université Joseph Fourier, France

<sup>7</sup> EGIS, France

<sup>8</sup> Ecole Centrale Nantes, France

<sup>9</sup> AREVA, France

<sup>10</sup> Ecole Normale Supérieure de Cachan, France

<sup>11</sup> IFSTTAR, France

<sup>12</sup> EDF (R&D) and Institute of Mechanical Sciences and Industrial Applications, EDF-CNRS-CEA-ENSTA UMR



### RÉSUMÉ.

L'évaluation des marges sismiques des installations nucléaires est une priorité pour la communauté nucléaire internationale, renforcée par le séisme de Tohoku au Japon (2011). Dans ce cadre, un projet de recherche de 5 ans intitulé SINAPS@ (Séisme et les Installations Nucléaires : Améliorer et Pérenniser la Sûreté) est actuellement en cours en France, soutenu par le Programme d'Investissements d'Avenir. Une estimation fiable des marges sismiques n'est possible que si toutes les incertitudes, épistémiques et aléatoires, sont effectivement identifiées, quantifiées et intégrées dans l'analyse complète du risque sismique. SINAPS@ rassemble une communauté multidisciplinaire de chercheurs et ingénieurs du monde académique et nucléaire. SINAPS@ vise à explorer les incertitudes liées aux bases de données, aux processus physiques et aux méthodes utilisées à chaque étape de l'évaluation de l'aléa sismique, des effets de site, et de l'interaction entre le champ d'ondes, avec le sol, l'ouvrage et les composants importants pour la sûreté. Un des principaux objectifs de SINAPS@ est finalement d'identifier les sources potentielles de marges sismiques résultant d'hypothèses ou de la sélection du niveau sismique retenu pour le dimensionnement ou enfin, de la stratégie de conception. L'ensemble du projet est construit autour d'un volet "intégrateur" permettant de tester les pratiques à l'état de l'art dans l'estimation tant de l'aléa que de la vulnérabilité sismiques, et de tester de nouvelles méthodologies pour l'évaluation du risque sismique. La présente publication illustre les liens et les interactions cruciales entre tous les acteurs du projet pour atteindre les objectifs.

### ABSTRACT.

The seismic margins assessment of the nuclear plants is a priority for the whole nuclear community, further enhanced since the Tohoku Japan earthquake in 2011. In this framework a 5 years research project called SINAPS@ (Earthquake and

*Nuclear Plants: Ensuring and Sustaining Safety) is currently on-going in France. A reliable estimate of seismic margins is possible only if all uncertainties, epistemic and aleatory, are effectively identified, quantified and integrated in the seismic risk analysis. SINAPS@ brings together a multidisciplinary community of researchers and engineers from the academic and nuclear worlds. SINAPS@ aims at exploring the uncertainties associated to databases, physical processes and methods used at each stage of seismic hazard, site effects, soil and structure interaction, structural and nuclear components vulnerability assessments, in a safety approach: The main objective is ultimately to identify the sources of potential seismic margins resulting from assumptions or when selecting the seismic design level or the design strategy. The whole project is built around an “integrating” work package enabling to test state-of-the-art practices and to challenge new methodologies for seismic risk assessment. The present paper illustrates the crucial links and interactions between all actors of the project to reach the objectives.*

*MOTS-CLÉS : risque sismique, installation nucléaire, aléa sismique, vulnérabilité, incertitude, déterministe, probabiliste, marge sismique.*

*KEYWORDS: seismic risk, nuclear plant, seismic hazard, vulnerability, uncertainty, deterministic, probabilistic, seismic margin.*

---

## **1. Introduction**

### ***1.1 Contexte***

Le projet SINAPS@ (Séisme et Installation Nucléaire, Améliorer et Pérenniser la Sûreté) est une contribution ambitieuse aux efforts de recherche et aux défis que la communauté nationale et internationale doit relever. Après les récents séismes majeurs (Océan Indien 2004 séisme de magnitude (M) 9.1-9.3 et tsunami; le séisme de M 6.8 de Chuetsu Oki au Japon en 2007; et le séisme de M 9 et tsunami de Tohoku en 2011) qui ont causé des dégâts matériels et humains historiques, des pertes financières colossales, l'industrie et particulièrement les acteurs nucléaires sont questionnés. Les enseignements tirés de ces événements doivent contribuer à accroître le niveau de sûreté des installations actuelles et futures, notamment en améliorant l'évaluation du risque et réduisant les conséquences.

Les approches d'évaluation de l'aléa sismique, les hypothèses sismiques retenues pour la conception du génie civil et des équipements sont associées à des pratiques et un environnement normatif et réglementaire défini à l'échelle nationale pour chaque pays nucléarisé. En France, le risque sismique est pris en compte lors de la conception et de la réévaluation des installations nucléaires [cf. RFS 2001-01 (2001) et Guide ASN (2006)], tandis qu'à l'international d'autres références et recommandations sont publiées notamment par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA). Néanmoins le séisme de Tohoku au Japon en mars 2011, suivi d'un puissant tsunami a causé l'accident nucléaire sur le site de Fukushima Daiichi, remettant en question les pratiques voire principes de sûreté à l'égard des agressions sismiques et plus globalement externes (d'origine naturelle ou non). Les études complémentaires de sûreté (ECS) menées en France à la suite de cette catastrophe ont abouti à proposer un “noyau dur” de matériels et de mesures organisationnelles afin de maintenir le contrôle des fonctions de sûreté fondamentales, et plus généralement « d'augmenter au plus tôt, au-delà des marges actuelles de sûreté, la robustesse des installations vis-à-vis des situations extrêmes » [cf Rapport ECS ASN (2012)].

SINAPS@ vise à explorer les incertitudes associées aux données de base, à la connaissance des processus physiques et aux méthodes utilisées à chaque étape de l'évaluation de l'aléa sismique, de la vulnérabilité des ouvrages et des composants, dans le cadre d'une démarche de sûreté: In fine, l'objectif est d'identifier les sources potentielles de marges sismiques associées pour définir le(s) niveau(x) sismique(s) de dimensionnement et/ou de renforcement (conservatismes dans les hypothèses et/ou les méthodes).

### 1.2. SINAPS@: un partenariat scientifique pour progresser sur des “spécificités françaises ”

SINAPS@ doit apporter des démonstrations scientifiques et formuler des recommandations afin d’améliorer la prise en compte du risque sismique et ainsi la sûreté des installations nucléaires de bases [INBs] existantes et futures en France. Le projet rassemble ainsi l’expertise de :

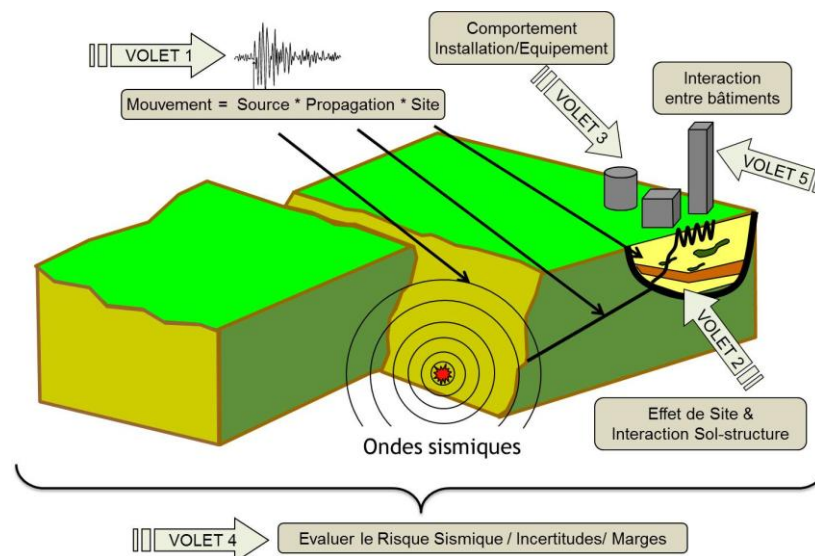
- géologues, géophysiciens, sismologues pour étudier toutes les composantes de l’aléa sismique,
- spécialistes des matériaux, de la géotechnique et de la mécanique des sols, des ingénieurs du génie civil, afin de caractériser la réponse des sols et des ouvrages sous chargement sismique,
- chercheurs à la fois du monde académique, industriel et nucléaire,
- scientifiques reconnus et impliqués dans la transcription des meilleures pratiques dans les textes réglementaires, cf. Figure 1.



Figure 1. Partenariat SINAPS@.

### 2. Présentation du projet de recherche SINAPS@

SINAPS@ est structuré en 5 volets (V) scientifiques fortement imbriqués (i) V1, "Aléa sismique", (ii) V2, "Effets de Site Non Linéaires et Interaction entre le champ d’ondes sismiques, le sol et les ouvrages", (iii) V3 "Comportement des ouvrages et des équipements sous séisme, isolation sismique et procédés de renforcement", et (iv) V4, "Evaluation du Risque Sismique" intégrateur des 3 premiers. Le 5<sup>ème</sup> volet est fondé sur une approche couplée d’expérimentation et de simulation, permettant d’aborder des thématiques peu traitées par les approches usuelles ou non contraintes par des données ou retour d’expérience. Ce volet 5 considère ainsi la problématique de l’interaction entre bâtiments, et s’appuiera notamment sur une campagne expérimentale sur la table vibrante Azalée (<http://www-tamaris.cea.fr/>).



**Figure 2.** Interactions entre les 5 volets scientifiques SINAPS@.

Enfin, la diffusion des connaissances et enseignements des volets 1 à 5 sera assurée au sein d'un 6<sup>ème</sup> volet dédié à la formation. 2 sessions de formation à l'adresse des étudiants et des professionnels seront dispensées en 2016 et en 2017, cette dernière sous l'égide de l'International Seismic Safety Centre de l'AIEA.

Le projet SINAPS@ adresse la problématique de la sûreté des INBs vis à vis de l'action sismique seulement, sans préjuger de la prépondérance de cette action sur les autres chargements (vent, neige, inondation, contraintes statiques ...).

### 3. Enjeux scientifiques clés de SINAPS@

SINAPS@ est un projet sur 5 ans, qui a débuté en septembre 2013. Dans ce chapitre, la philosophie et les enjeux les plus importants sont présentés au travers de quelques exemples/résultats préliminaires. Nous présentons le volet 4 « intégrateur », dont la vocation est de capitaliser et de tester les apports des volets 1 à 3. Quelques exemples seront développés issus des volets 1 et 2. Dans ce document les volets 3, 5 et 6 ne sont pas abordés (cf. <http://www.institut-seism.fr/projets/sinaps/>).

#### 3.1. Principal objectif de SINAPS@: vers l'identification de potentielles marges sismiques

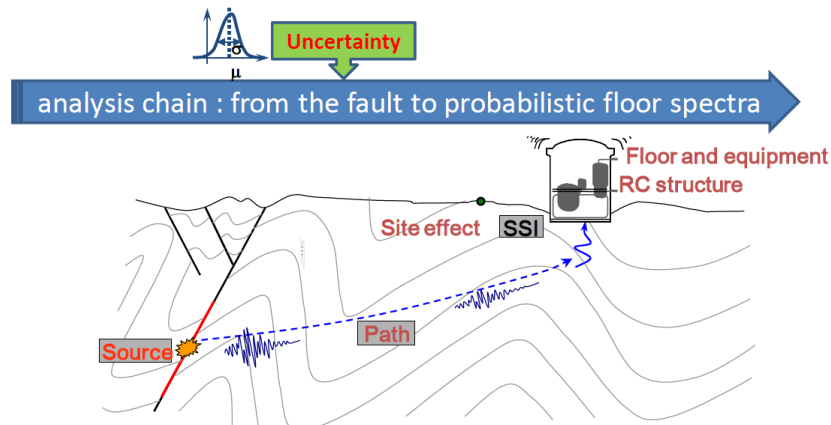
Le risque sismique est pris en compte dès la conception des installations nucléaires. Il fait l'objet d'une réévaluation, tous les dix ans, lors des réexamens de sûreté. Dans ce cadre, la suffisance du dimensionnement et des dispositions de protection est analysée au regard de l'état de l'art. La notion de marge sismique peut se définir comme l'appréciation voire la quantification d'éventuelles « provisions » qui assurent un comportement satisfaisant de l'installation pour les sollicitations sismiques révisées et au regard d'exigences de sûreté définies. Si ces marges sont insuffisantes, des modifications et renforcements de l'installation (bâtiments et/ou équipements) seront requis.

Les « provisions » peuvent provenir principalement :

- de l'intégration de conservatismes à différents stades de l'analyse sismique initiale (méthodes simplifiées avec coefficients de « sécurité », hypothèse de comportement linéaire élastique),

- lors de la réévaluation, de la prédiction du comportement plus réaliste de l'installation via des modélisations plus complexes, et en tenant compte de la capacité ductile des matériaux, du sol et des structures (cf AIEA, 2002),
- du traitement systématique des incertitudes.

L'estimation du risque nécessite de convoluer les contributions élémentaires d'aléa sismique et des estimations probabilistes de dommages, représentant la vulnérabilité des ouvrages et des équipements, tel que pratiqué via le concept des courbes de fragilité. Cette démarche est utilisée tant dans la phase de conception de l'installation que lors des réévaluations de sûreté. Intrinsèquement le concept de marge sismique est indissociable de celui des incertitudes, et ce, sur tous les maillons de l'analyse sismique (Figure 3). Les approches recommandées par les comités européens d'experts visent à construire des méthodes intégrées de modèles déterministes et/ou probabilistes pour la sûreté des réacteurs à eau légère (IDPSA) (cf. Zio 2014), avec traitement des incertitudes épistémiques et aléatoires USNRC (1991).



**Figure 3.** Une approche probabiliste continue pour l'analyse des risques depuis la source sismique, aux effets de site, de l'interaction sol-structure jusqu'aux composants sensibles, avec intégration des incertitudes.

Au sein du projet SINAPS@, le travail sur les marges sismiques se positionne dans le cadre de la réévaluation d'une installation existante, et constitue le cœur du volet 4 focalisé sur un cas démonstratif autour du cas réel de la centrale de Kashiwazaki-Kariwa [KK] (déjà considéré pour le benchmark KARISMA organisé par l'AIEA en 2010, cf référence AIEA 2013). Il est fondé sur le retour d'expérience de l'installation suite au séisme de Chuetsu Oki (16 juillet 2007), au cours duquel des données sismiques spécifiques au site (sol et structure) ont été enregistrées et sont disponibles pour l'analyse (base de données mise à disposition par TEPCO).

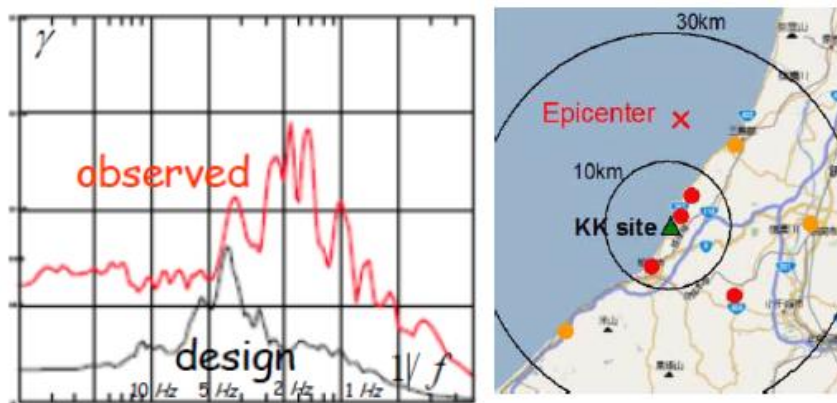
L'étude démonstrative du volet 4 mettra en œuvre les différentes contributions/apports des volets 1 à 3 du projet SINAPS@ sur chacun des maillons de la chaîne de l'analyse sismique, permettant d'identifier les phénomènes contributeurs du « best-estimate » de la réponse sismique globale (cf. Voltaire (2006)). Le cas KARISMA concerne un séisme de niveau plus élevé qu'habituellement considéré en France (type « Séisme Majoré de Sécurité ou paléoséisme »), mais comparable et pertinent avec un niveau plus élevé comme suggéré dans le cadre post-Fukushima où des événements extrêmes doivent être investigués. De cet « exercice », il est escompté l'établissement de nouvelles méthodes de justification des structures et équipements vis à vis des exigences de performance, validées par la confrontation à des données réelles. Ces méthodes pourraient être implémentées dans les évolutions futures de la réglementation française, tel que suggéré par le groupe de travail ASN/IRS /EDF group (2012).

Les travaux et études de sensibilité conduites dans le volet 4, et particulièrement sur le cas démonstratif KK, doivent permettre aux partenaires du projet d'identifier et de hiérarchiser les sources de potentielles marges sismiques, mais nécessitent de définir clairement la référence en termes de critères de dommages et/ou de performance.

### 3.2. Présentation du volet 4 "Evaluation du risque sismique" et de son rôle pivot dans le projet SINAPS@

Comme introduit ci-avant le volet 4 vise 2 objectifs:

(i) construire la méthodologie globale à partir des « produits » du projet SINAPS@ (V1 à V3) et la confronter à des données réelles dans une démarche de validation, préparant le transfert technologique vers l'ingénierie. Il a été choisi de travailler sur le cas également retenu pour le benchmark KARISMA organisé par l'AIEA entre 2010 et 2012, en collaboration avec TEPCO. Cette configuration est issue d'un cas réel d'installation nucléaire (unité 7 du site de Kashiwazaki-Kariwa) ayant subi un séisme dont les mouvements ont systématiquement dépassé ceux retenus lors de la conception de l'INB. En outre, une base de données riche (accélérogrammes, données géotechniques, d'interaction entre le sol et les structures, données sur le comportement de l'ouvrage) est disponible [AIEA TECDOC-1722 (2013)]. Le dépassement des niveaux de dimensionnement de KK lors du séisme NCOE en 2007 (Figure 4) a engagé la communauté internationale dans la caractérisation et quantification des marges sismiques des installations existantes.

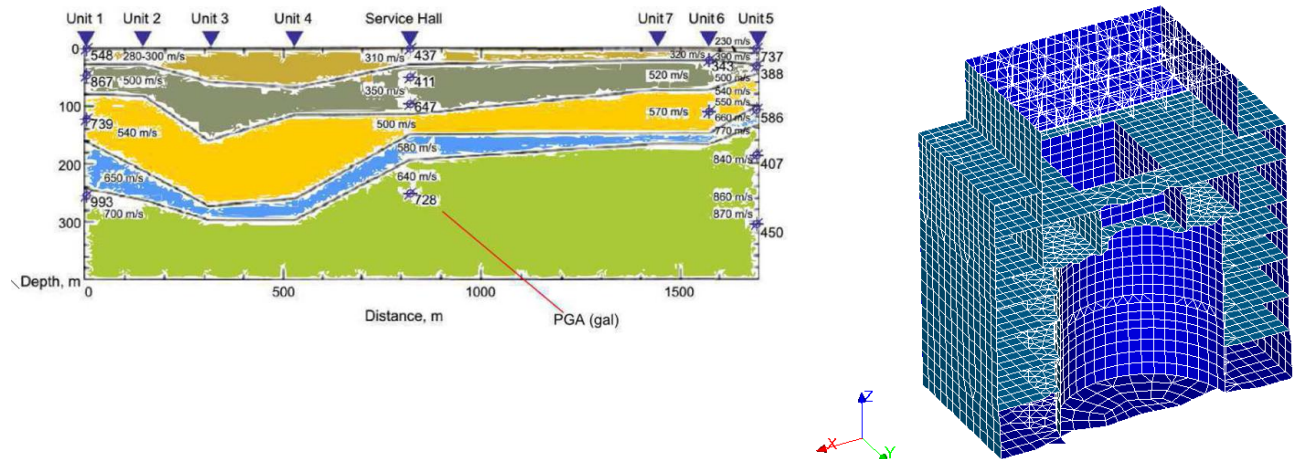


**Figure 4.** Séisme de Chuetsu Oki en 2007 et localisation de la centrale de Kashiwazaki-Kariwa. Illustration des mouvements forts enregistrés sur le site par rapport au niveau de conception (gauche).

L'implémentation du cas test KARISMA consistera en des simulations non linéaires transitoires de la réponse sismique du bâtiment réacteur, en tenant compte des effets de site, de l'interaction entre le sol et la structure et des grands équipements. Finalement, des courbes de fragilité et des faibles probabilités de défaillance "HCLPF" [high confidence low probability of failure] seront évaluées par des méthodes numériques avec propagation des incertitudes. Ce travail au sein du volet 4 sera mené en 2 phases pendant le projet : (1) une première phase au cours de laquelle la connaissance et les pratiques reconnues actuellement (méthodes simplifiées linéaires, incertitudes prises en compte via des coefficients standards) seront mises en œuvre dès le début de SINAPS@ et (2) une seconde phase, où les principaux enseignements et nouvelles méthodologies (non-linéaires, incertitudes propagées) issues du projet seront implémentées. La Figure 5 illustre le modèle géologique et structural du bâtiment réacteur utilisés comme données d'entrée de la phase 1. L'identification et l'appréciation des sources (hypothèses, données, méthodes, incertitudes) qui impactent les provisions ou marges sismiques seront appréciées au travers des résultats des 2 phases.

(ii) consolider les méthodes d'évaluation probabiliste du risque sismique, en incluant les aspects de performance des algorithmes de calculs.

Il se peut que certains verrous scientifiques notamment dans le champ de l'analyse statistique nécessitent d'être levés au-delà de SINAPS@ dans d'autres projets.



**Figure 5.** (Gauche) Stratigraphie 2D du site KK (O. V. Pavlenko and K. Irikura), (Droite) Exemple de modèle structural de l'Unité 7 du BR, tel qu'utilisé lors du benchmark de 2010 et utilisé dans la phase 1 du cas test KARISMA du volet 4 SINAPS@ [Banci and Zentner 2015].

Le volet 4 joue un rôle pivot dans le projet SINAPS@ notamment en raison du besoin de:

- l'expertise du volet 1 sur les hypothèses pour définir le chargement sismique;
- l'outil numérique pour calculer l'interaction non-linéaire entre le sol et l'ouvrage, l'analyse spécifique de l'effet de site non-linéaire, et finalement le couplage de ces deux phénomènes pour simulation de la réponse sismique : ces actions nécessitent de fortes interactions avec les volets 2 et 3;
- modèles prédictifs non-linéaires de béton armé adaptés au volet 4 fournis par le volet 3, ainsi qu'une expertise sur les méthodes de calcul des spectres transférés aux équipements;
- caractériser, quantifier et propager les incertitudes tout au long de l'analyse sismique.

### 3.3. Le volet 1 "Aléa Sismique": une expertise clé dans SINAPS@ sur la pertinence des chargements sismiques utilisés dans toute la chaîne d'évaluation du risque

Le volet 1 est focalisé sur l'évaluation de l'aléa sismique sur le territoire métropolitain français, caractérisé par un faible taux de sismicité et spatialement hétérogène. Une question clé adressée au volet 1 consiste à analyser si les méthodes utilisées pour évaluer l'aléa sont adaptées vis-à-vis du degré de connaissance ou méconnaissance de la sismicité et des processus physiques associés. Historiquement, les approches déterministes ont été plébiscitées et développées dans les réglementations notamment dans les pays à faible sismicité et pour la sûreté des installations nucléaires (RFS 2001-01 en France). Les références et les pratiques internationales (AIEA 2002) traduites dans les guides et les standards, l'implémentation de l'Eurocode 8 soutiennent le développement des approches probabilistes. Cette tendance a même gagné des pays réputés de faible sismicité et de tradition déterministe comme la France : cette évolution a été confirmée après l'accident de Fukushima, par le nécessaire questionnement de la pertinence des hypothèses et des méthodes retenues par les Japonais pour l'estimation de l'aléa sur le site. Les études complémentaires de sûreté (ECS) menées en France ont été instruites par des experts européens qui ont recommandé de compléter les estimations fondées sur les méthodes



déterministes par une évaluation probabiliste de l'aléa sismique [PSHA]. En effet, la capacité du probabiliste à intégrer et propager les incertitudes aléatoires et épistémiques rend cette approche intéressante et populaire. En revanche, les niveaux sismiques "probabilistes" sont souvent plus élevés et associés à de larges intervalles de confiance. L'utilisation des résultats du PSHA adresse donc des questions nouvelles autour de débats d'experts (récents retour d'expérience du projet suisse PEGASOS et de l'étude PSHA pour le site nucléaire de Thyspunt cf. Bommer et al. 2014). Au-delà de débats méthodologiques ou idéologiques, les véritables enjeux du Volet 1 SINAPS@ sont (i) de systématiquement identifier, quantifier toutes les incertitudes et de clarifier leur traitement lors de l'estimation de l'aléa, et (ii) de transmettre aux chercheurs et ingénieurs des Volets 2, 3 et 4 des sollicitations sismiques fiables et adaptées aux méthodes utilisées par ailleurs pour estimer les effets de site, l'interaction sol-structure et in fine calculer le risque sismique. A ce titre, une thèse SINAPS@ est spécifiquement orientée sur l'adéquation de la sélection des sollicitations sismiques avec les « besoins de l'ingénieur ».

Les objectifs du volet 1 sont:

- (1) de caractériser les données typiques françaises par les méthodes les plus appropriées et validées pour générer les métadonnées et leurs incertitudes,
- (2) de proposer un classement des paramètres clés dans la méthodologie d'évaluation des risques sismiques et d'estimer les incertitudes associées afin d'orienter les futures recherches,
- (3) d'évaluer la sensibilité des approches déterministes telles que la RFS 2001-01 et des approches probabilistes vis-à-vis des données d'entrée,
- (4) faire des recommandations pour l'évolution des normes réglementaires françaises,
- (5) de fournir une description pertinente de l'aléa sismique pour les besoins d'ingénierie.

Dans les études actuelles menées par le volet 1, les travaux de Laurendeau et al. en cours (2015), devraient avoir un fort impact sur l'évaluation de l'aléa sismique, quelle que soit l'approche retenue (déterministe ou probabiliste). L'objectif final de Laurendeau et al. (2015) est de comparer diverses méthodes pour évaluer les mouvements sismiques pour un sol de type « rocher de référence » (les effets de site étant par ailleurs pleinement estimés par le volet 2), et si possible de proposer une équation empirique prédictive du mouvement du sol (Ground Motion Prediction Equation). Actuellement, une part importante de la dispersion dans les évaluations provient de l'utilisation de GMPE's classiques associées à des incertitudes élevées (« $\sigma$  standard»). Parmi les sources qui contribuent fortement à ces incertitudes (i) l'hypothèse ergodique utilisée pour calculer les GMPEs et (ii) la géologie / rhéologie du site défini par le proxy  $V_{s30}$  généralement très mal contrainte. Des travaux récents (cf. PSHA réalisé sur le site nucléaire de Thyspunt, Bommer et al (2014), voir Figure 6) proposent d'appliquer plusieurs coefficients de correction de la GMPE d'origine afin d'être cohérente avec l'étude "site spécifique": ces corrections sont connues sous le terme de «single station sigma" (permet de corriger l'hypothèse ergodicité), et la correction dite « Host to Target » correction introduisant un nouveau proxy  $K_0$  (en plus du  $V_{s30}$ ). Laurendeau et al. (2015) considèrent que cette approche reste difficile à appliquer, notamment en raison de l'absence de mouvements forts réels enregistrés pour des stations bien caractérisées « au rocher », la plupart des GMPEs étant dérivées de données acquises en surface c'est-à-dire impactées par l'altération superficielle du sol, même pour les stations dites « au rocher ». La stratégie proposée par Laurendeau et al. (2015) pour éviter ces biais est la suivante : (1) une première approche consiste à utiliser les mouvements forts enregistrés en profondeur au substratum « rocher de référence » et de les corriger des effets liés à la profondeur; (2) une deuxième approche serait d'utiliser les mouvements forts enregistrés à la surface sur divers types de sols (sols ou rocher) et de les corriger de la réponse des matériaux de surface. Dans le cadre de SINAPS @ le calcul de l'effet de site réaliste (i.e. géométrie 1D, 2D, 3D, linéaire ou comportement non-linéaire) sera réalisé par le volet 2 considérant le mouvement d'entrée fourni par le volet 1 au « rocher rigide de référence en profondeur ».

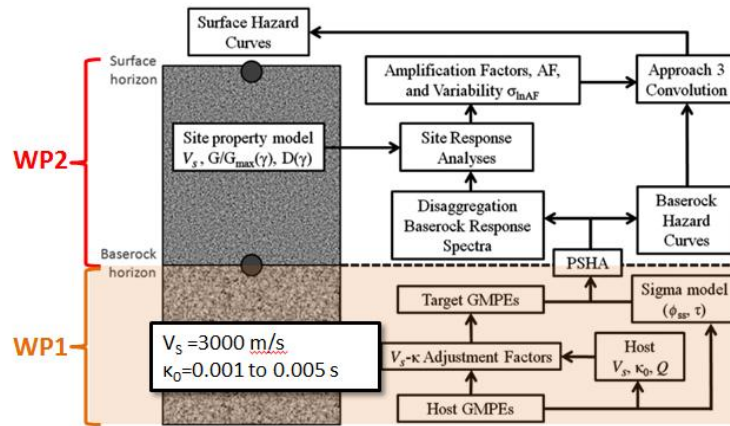


Figure 6. D’après Rodriguez et al. (BSSA, 2014). Approche utilisée dans le cadre d’un PSHA site-spécifique pour le site nucléaire de Thyspunt (Bommer et al., 2014).

L’une des pratiques actuelles en France qui sera testée dans le volet 1 SINAPS@, est la représentation de la source sismique et son potentiel pour évaluer l’aléa. En effet, dans le cadre de l’approche RFS2001-01 la source sismique et les mouvements du sol associés sont évalués en considérant que l’énergie sismique est concentrée sur un point (approximation du «point source»). La réalité est différente, une source sismique, quelle que soit l’ampleur considérée (i.e. la magnitude du séisme) correspond à un défaut géométriquement étendu (i.e. la faille), habituellement complexe et segmenté. Ignorer cette complexité conduit à simplifier la réalité, et du point de vue de l’estimation de l’aléa associé il peut y avoir sous ou sur estimation du mouvement fort attendu, selon l’emplacement du site par rapport à la source : certains effets de « source proche », tels que la directivité (focalisation des ondes sismiques dans la direction de la propagation de la rupture) sont effectivement ignorés alors que de nombreux tremblements de terre ont souligné ces effets qui contribuent à une grande variabilité des mouvements forts enregistrés. Certains de ces signaux sismiques s’avèrent particulièrement nocifs vis-à-vis des constructions en raison d’un contenu fréquentiel spécifique et de grande amplitude. Une première étude réalisée dans le volet 1 par T. Chartier et al. (2014) en utilisant une approche probabiliste s’est intéressée à l’influence de modèles de failles et du zonage, et a analysé l’impact sur les résultats de certaines hypothèses, telles que (i) la géométrie des failles (ii) leur potentiel sismique (i.e. taux de glissement), comme le montre la figure 7. Cette étude a porté sur une zone dans le Grabben Est du Haut-Rhin en France. Une forte variabilité des résultats PSHA apparaît, principalement induite par l’incertitude sur les taux de glissement associés aux failles. Ce dernier paramètre (qui n’est pas directement utilisé dans la pratique française actuelle SHA déterministe) est très mal contraint en France, et devrait être amélioré grâce à des études sismologiques et paléosismiques ainsi que des mesures géodésiques à long terme. Dans cette étude, le choix de la GMPE apparaît également crucial et contrôle clairement le niveau absolu sismique (figure 8) (à noter que les GMPE’s considérées dans l’étude ne rendent pas compte des effets spécifiques de « source proche »).

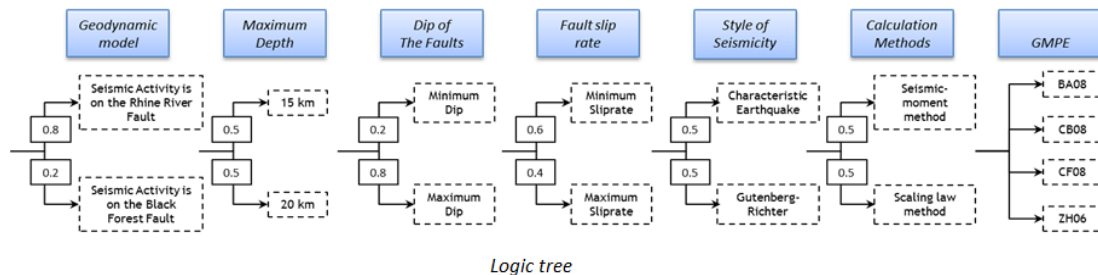
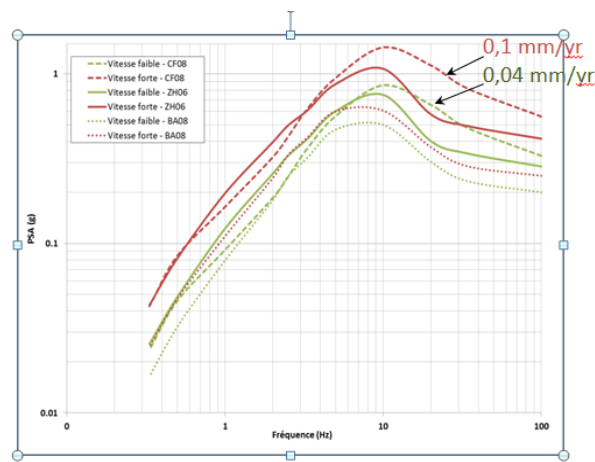


Figure 7. Exploration de l’incertitude épistémique par arbre logique dans l’étude de T. Chartier et al. 2014.



**Figure 8.** Etude de sensibilité sur les résultats PSHA en termes de Spectre Uniforme d'Aléa [UHS]: influence du taux de glissement (courbe rouge fort taux, courbe verte faible taux), en considérant 3 GMPE's, T. Chartier et al., 2014.

### 3.4. Portée du volet 2 : Interaction non-linéaire entre le champ d'ondes proche et lointain, le sol et les structures

Dans le cadre de la propagation de l'onde de la source à la structure puis à l'équipement, le volet 2 se place à l'interface entre le sol et la structure, la sismologie et la dynamique de la structure, le risque et la vulnérabilité de la structure. Même si les effets sol-structure sont bien connus depuis les années 70, ils ont souvent été pris en compte dans la conception des installations via des hypothèses simplifiées: ressorts de Winkler, champ incident uniforme, fondations superficielles ou le comportement rigide du sol par approche linéaire équivalente ...

Nombre de ces hypothèses ont été améliorées au cours des dernières années, et ont permis d'exhiber des marges de sécurité (Mylonakis et Gazetas 2008). Ces travaux ont également montré la sensibilité aux larges incertitudes sur les hypothèses de chargement sismique et propriétés du sol environnant la structure. En outre, afin de tenir compte des événements extrêmes dans le comportement post-élastique des structures, il est nécessaire d'avoir une description plus détaillée de la charge sismique, à la fois dans le temps et l'espace, dépassant l'accélération ou une valeur spectrale maximale donnée selon la réglementation actuelle. Enfin, la sismologie instrumentale et théorique a mis en évidence la complexité et la variabilité du champ d'ondes sismiques: effets de champ proche, effets de site, filtrage non linéaire des mouvements forts, variabilité spatiale (Luco et de Barros 2004). Ces avancées permettent maintenant de construire une approche certes plus complète mais complexe, avec différentes méthodes parfois difficiles à combiner et aussi parfois incompatibles avec les règlements et les méthodes couramment utilisées dans le monde (Pitilakis 2010, Cottreau 2007 et 2008).

Les principaux objectifs du volet 2 sont les suivants:

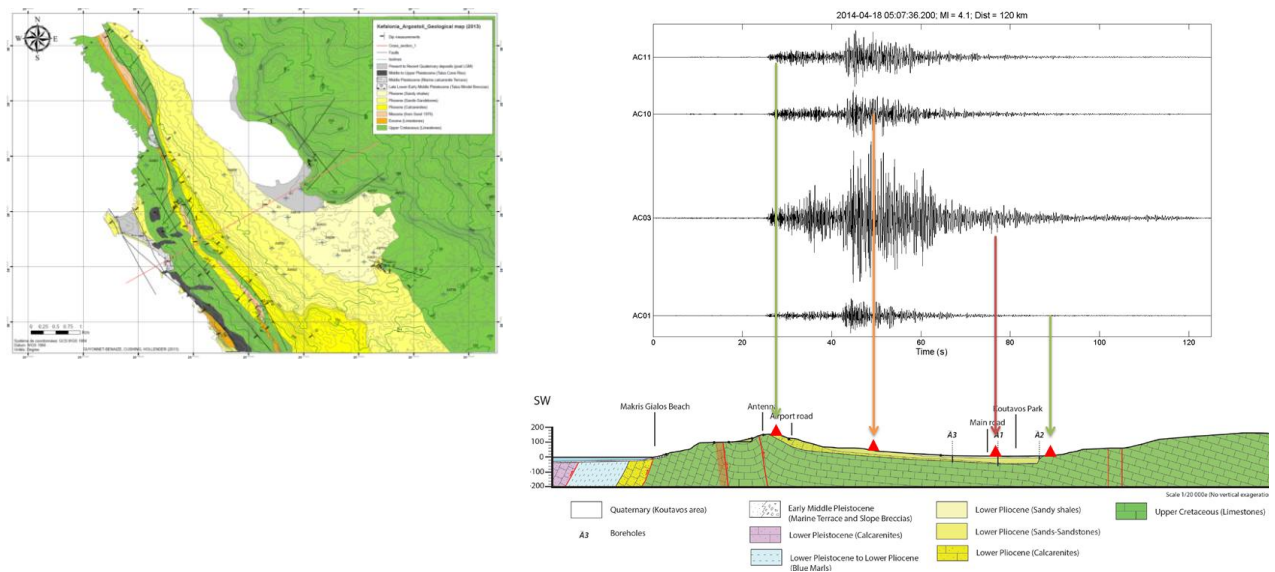
(1) Proposer une méthodologie globale fondée sur des méthodes et outils existants: i) utilisation de bases de données d'enregistrements de séismes, ii) analyses non-linéaires à la fois pour le sol et la structure, iii) définition de la validité des approches simplifiées, iv) prise en compte de la variabilité des mouvements sismiques et quantification des incertitudes.

(2) Développer un outil de calcul à l'état de l'art et unifié pour étudier la propagation des ondes depuis la source sismique jusqu'à la structure, capable de réduire les incertitudes.

(3) Comparer ces méthodes aux données récentes de manière à mettre en évidence les principales sources d'incertitudes, aléatoires et épistémiques et enfin proposer des campagnes expérimentales pour réduire la composante épistémique.

Sans entrer dans le détail des nombreuses actions de recherche menées dans ce volet 2, nous soulignons brièvement deux sujets actuellement en cours : (i) le choix d'«un site de validation» et (ii) le développement d'un outil de simulation de la propagation des ondes sismiques tenant compte des incertitudes depuis la source jusqu'à la structure.

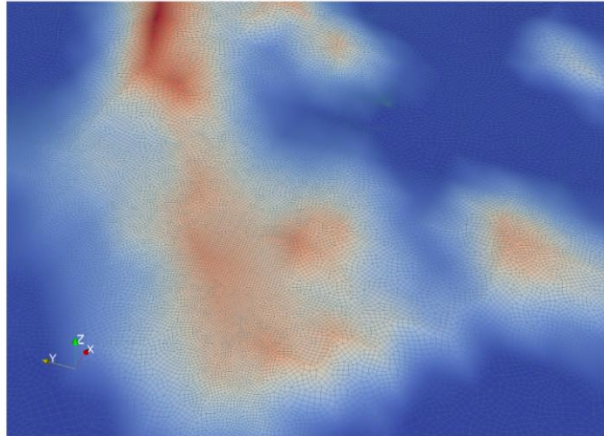
(i) Le 26 Janvier 2014, un séisme de magnitude  $M_w = 6.2$  a secoué l'île de Céphalonie en Grèce (Figure 9 Gauche). Il a été décidé de lancer une mission post-sismique SINAPS@ avec deux objectifs principaux: (1) l'installation d'accéléromètres temporaires en avance de l'installation du réseau permanent afin d'enregistrer de possibles fortes répliques, (2) l'installation d'un réseau dense de capteurs afin d'obtenir une base de données pour l'étude de la variabilité spatiale à courte échelle. Ce type de base de données, même si elle ne traite pas de la question de la non-linéarité, est essentielle pour caractériser la variabilité spatiale et la cohérence du mouvement sismique. Le réseau accélérométrique temporaire a enregistré plusieurs milliers d'événements. Une première analyse de cette base de données a permis le calcul de rapports spectraux standards entre un site de référence au rocher et plusieurs sites dans le bassin. Le réseau dense est composé de 21 sismomètres à large bande, disposés sur une étoile à cinq branches avec un rayon maximum de 180 m. Il a été en fonctionnement pendant une période de 5 semaines. Une base de données de plus de 1800 tremblements de terre bien enregistrés a été élaborée. Ces deux bases de données sont disponibles et déjà largement utilisées au sein de l'ensemble du projet SINAPS@. La Figure 9 (droite) illustre les effets linéaires de site induits par la rhéologie et la géométrie et enregistrés par le réseau accélérométrique SINAPS@.



**Figure 9.** (Gauche) Nouvelle carte géologique de la région d'Argostoli, Céphalonie (Cushing and Guyonnet-Benaize 2013), (Droite) Mouvements faibles enregistrés à travers le bassin d'Argostoli (séisme de magnitude 4,1 localisé à 120km, mettant en évidence les effets de site), Hollender et al. 2014.

(ii) La mise au point d'un modèle non-linéaire probabiliste et à grande échelle, depuis la source sismique jusqu'à la structure est l'objectif principal du Volet 2. L'enjeu est de proposer une approche probabiliste pour conduire l'analyse de risque et des scénarios en tenant compte des variabilités et incertitudes sur la source sismique et les propriétés du sol. Le choix du Volet 2 est de développer cet outil en utilisant la méthode des éléments spectraux en 3D (SEM3D), et le travail est en cours (Figure 10).

Kefalonia test-site (ECP)  
 $60 \times 60 \times 20 \text{ km}^3$ ,  $45 \times 10^4$  elements,  $5 \times 10^7$  DOFs, 24 CPU days over 144 processors



**Figure10.** Simulation préliminaire sur le site test SINAPS@ de Céphalonie avec l'outil SEM3D (Cottureau et al., 2014).

#### 4. Conclusion

SINAPS@ s'attèle à une analyse de la complétude et des lacunes dans les bases de données (tous les types de données, de la géologie, la sismologie, la caractérisation du site et des matériaux), de la fiabilité ou l'insuffisance de modèles disponibles pour décrire les phénomènes physiques (prédiction du mouvement sismique, les effets de site, l'interaction sol-structure, les lois de comportement des matériaux dans le domaine non-linéaire), et de la pertinence ou de la faiblesse des méthodes utilisées pour l'évaluation du risque sismique. Cette analyse critique confronte les méthodes et les données disponibles à l'état de l'art international et traitera systématiquement la question des incertitudes. Ce travail est essentiel pour porter un regard critique sur les approches réglementaires actuellement applicables en France concernant les risques sismiques dans le contexte de la sûreté nucléaire (RFS2001-01 [1] pour estimer le niveau d'aléa sismique spécifique au site et le GUIDE/ASN2/01 précisant les dispositions de conception parasismique des ouvrages et équipements civils, et les méthodes acceptables pour estimer la réponse sismique des structures en interaction avec l'équipement). Puis des propositions et/ou des recommandations seront formulées quant à l'applicabilité de nouvelles approches qui représentent de façon plus réaliste le comportement du sol, des structures et matériaux sous fortes sollicitations sismiques, avec intégration explicite des incertitudes. L'ambition du projet SINAPS@ est de promouvoir les meilleures données, de développer, d'améliorer, valider et diffuser de nouvelles méthodologies pour l'évaluation du risque sismique, quantifier leur fiabilité, et enfin permettre aux autorités de prendre des décisions consolidées. SINAPS@ devrait permettre à tous les acteurs de mieux justifier le niveau de sûreté des installations et de définir les modalités appropriées afin de maintenir l'installation, à ce niveau de sûreté, au cours de toute sa durée de vie.

#### 5. Remerciements

Le travail effectué dans le cadre du projet SINAPS @ reçoit le soutien financier du programme «Investissements d'avenir» (SINAPS@ référence n° ANR-11-RSNR-0022) géré par l'Agence nationale de la recherche. SINAPS@ est un projet de l'institut SEISM (<http://www.institut-seism.fr/>). Les travaux présentés sont réalisés par les acteurs du partenariat SINAPS@ (près de 60 chercheurs, ingénieurs, étudiants en thèses et collaborateurs).

## 6. Références

- “RFS2001-01, Règle fondamentale de sûreté n°2001-01 relatives aux installations nucléaires de base. Détermination du risque sismique pour la sûreté des installations nucléaires de base”, (2001), *Nuclear Authority Safety website* (<http://www.asn.fr/index.php/Divers/Autres-RFS/RFS-2001-01>).
- “Guide/ASN/2/01, Prise en compte du risque sismique à la conception des ouvrages de génie civil des installations nucléaires de base, à l'exception des stockages à long terme des déchets, radioactifs”, (2006), *Nuclear Authority Safety website* (<http://www.asn.fr/index.php/Divers/Autres-RFS/Guide-ASN-Guide-2-01-ex-RFS-V.2.g>).
- ECS, “Evaluations Complémentaires de Sûreté, rapport de l'Autorité de Sûreté ”, (December 2011), *Nuclear Authority Safety website* <http://www.asn.fr/index.php/L-ASN-en-region/Division-de-Marseille/Actualites-de-votre-region/Rapport-de-l-ASN-sur-les-evaluations-complementaires-de-surete-ECS>).
- Zio Enrico, Integrated deterministic and probabilistic safety analysis: concepts, challenges, research directions, (2014) *Nuclear Engineering and Design*, pp.1-7.
- International Atomic Energy Agency (IAEA), 2002. Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants, Safety Guide N NS-G3.3.
- IAEA-Tecdoc, Review of Seismic Evaluation Methodologies for Nuclear Power Plants Based on a Benchmark Exercise. International Atomic Energy Agency, (2013). Altinyollar A. et al., VIENNA, IAEA-TECDOC-1722.
- USNRC, Procedural and Submittal Guidance for the Individual Plant Examination of External Events (IPEEE) for Severe Accident Vulnerabilities, (June 1991), US-NRC. NUREG-1407.
- Voldoire F., Computational methods applied to the seismic margin assessment of power plants and equipment, (September 2006), Paper Number: 1038. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland.
- Laurendeau A., Foundotos, L., Hollender F., Ktenidou, O-J. and Hernandez, B. (2015). Towards the Definition of Reference Motions (1000< VS <3000 m/s): Estimating Transfer Functions to Correct KiK-net 'Rock' Sites (500<VS30<1500 m/s) for Site Effects. *Seismological Research Letters* 86 (2B), pp. 661-662. doi: 10.1785/0220150017.
- Rodriguez-Marek, A., Rathje, E. M., Bommer, J. J., Scherbaum, F., & Stafford, P. J. (2014). Application of Single- Station Sigma and Site- Response Characterization in a Probabilistic Seismic-Hazard Analysis for a New Nuclear Site. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104: 1601-1619.
- Bommer, J.J., K.J. Coppersmith, R.T. Coppersmith, K.L. Hanson, A. Mangongolo, J. Neveling, E.M. Rathje, A. Rodriguez-Marek, F. Scherbaum, R. Shelemebe, P.J. Stafford & F.O. Strasser (2014). A SSHAC Level 3 probabilistic seismic hazard analysis for a new-build nuclear site in South Africa. *Earthquake Spectra* doi: <http://dx.doi.org/10.1193/060913EQS145M>.
- Chartier Thomas, Christophe Clément and Hervé Jomard, “Etude probabiliste de l'aléa sismique pour un site du Fossé Rhénan Supérieur” (2014), Rapport IRSN/PRP-DGE-2014-00027, SINAPS@-WPI.
- Mylonakis G. and Gazetas G., Seismic soil-structure interaction: beneficial or detrimental, (2008) *J. Earthquake Engineering*, 4:3, 277-301.
- Luco, J.E., F. C. de Barros, Assessment of predictions of the response of the Hualien containment model during forced vibration tests, (2004) *Soil Dyn. Earth. Engng.* 24, 1013–1035, 2004.
- D. Pitilakis and D. Clouteau, Equivalent linear substructure approximation of soil-foundation-structure interaction: model presentation and validation, (2010), *Bull. Earth. Engng.* 8, 257–282.
- Cottureau R, Clouteau D, Soize C. Construction of a probabilistic model for impedance matrices, (2007), *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*; 196(17–20):2252–2268.

Cottureau R, Clouteau D, Soize C., Probabilistic impedance of foundation: Impact of the seismic design on uncertain soils, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, (2008), Vol. 37, Issue 6, pages 899–918.

Hollender F., V. Perron, Sinaps@ Kefalonia test-site: results of the preliminary geophysical survey and presentation of database resulting from the post-seismic campaign, (2014) *Abstract for the 2014 SINAPS@ plenary session*, 20 & 21 November 2014.

Cottureau et al. 2014, Common developments of an integrated simulation tool for the source-to-structure seismic wave propagation, (2014) *Abstract for the 2014 SINAPS@ plenary session*, 20 & 21 November 2014.