VIIIÈME BIENNALE DU RAP

du 03 au 10 novembre 2016
Sainte-Anne - Guadeloupe

Programme des journées techniques et scientifiques de la 8ème Biennale du RAP, 7-9 novembre 2016, Guadeloupe

Lundi 7 novembre (début 7h30)

7H30 **Introduction à la biennale** Philippe Guéguen, Françoise Courboulex

Quoi de neuf sur les réseaux régionaux RAP-RESIF ?
Animateur: Michael Langlais

7h45	**Le réseau accélérométrique des Iles de Guadeloupe**. Thierry Kitou, André Anglade, Arnaud Lemarchand, Jean-Marie Saurel
7h55	**Le réseau accélérométrique de la Martinique**. Frédéric Jadélus, David Mélézan, Bernard Naigre, Jean-Marie Saurel, Arnaud Lemarchand, Valérie Clouard
8h05	**Le réseau Observatoire Côte d'Azur**. Jérôme Chèze, Didier Brunel, C. Maron, X. Martin, F. Peix.
8h15	**Le réseau Observatoire Midi Pyrénées**. Helène Pauchet
8h25	**Le réseau Auvergne.** Jean-Michel Douchain
8h35	**Le réseau Alpes**. Isabelle Douste-Bacqué, Fabrice Hollender, Mickael Langlais
8h45	**Les stations accélérométriques gérées par le BRGM.** Didier Bertil, François Benjamin
8h55	**Les réseaux régionaux RAP-RESIF au CEA.** Charly Lallemand
9h00	**Modernisation et Développement du RAP dans le Nord-Est de la France**. Cécile Doubre, Jund H., Grunberg M., Wodling H.

9h15 Intervention des représentants locaux et du représentant de la DGPR

Pause

Séismes récents
Animateur: Claudio Satriano

10h30	**Le séisme d'Amatrice (Italie, Mw 6.0) du 24 août 2016.** C. Satriano, O. Scotti
10h45	**Le séisme de Pédernales (Equateur, Mw 7.8, avril 2016).** F. Courboulex, A. Laurendo, F. Bonilla, D. Castro, D. Mercerat, P. Guéguen, A. Sladen, J-M Nocquet et le Laboratoire Mixte International
11h	**Séisme de la Rochelle: de l'enquête internet aux résultats terrain**. C. Sira, M. Schaming

14h Séminaire 1 **Eric Calais : Le risque sismique en Haïti: y-a-t-il un avant et après 2010?**

14h50 Session technique 1 Animateurs : Jean-Michel Douchain et Jean-Marc Saurel

14h50	**Discussions sur les problèmes abordés et solutions apportées dans les réseaux** : JM Douchain
15h35	**Réglages des offset des Episensor** : M. Langlais, I. Douste-Bacque
16h05	**Démonstration en ligne du système de supervision SyNapSE** : J. Chèze

14h50 Aléa sismique aux Antilles Animateurs : Céline Dessert et Didier Bertil

14h50	**Bilan de l'activité sismologique de l'arc des Petites Antilles 2014-2016. Observatoires Volcanologiques et Sismologiques de Guadeloupe et de Martinique (IPGP).** C. Dessert, V. Clouard, A. Anglade, T. Kitou, J.M. Saurel
15h05	**Etude des paramètres de source de la sismicité aux Antilles**. C. Satriano, A. Ricardo, M. Quiche, J.M. Saurel **(Financé par AO-RAP)**
15h20	**Gap sismique du segment nord des Petites Antilles: ce que nous apprend le réseau OBS Antithesis 2**. V. Clouard, B. Marcaillou, M. Moyzan, T. Monfret, A. Deschamp, J-M. Saurel, J-F. Lebrun, B. Yates, D. Oregioni. **(Financé par AO-RAP)**

15h35	**Exploitation des questionnaires macrosismiques originaux de l'OVSG-IPGP: premier aperçu des effets sismiques en Guadeloupe de 1959 à 1988**. R Evariste, M. Delatre, M.L. Bernard, F. Beauducel, S. Auclair, C. Dessert, D. Bertil
15h50	**Intégration des microzonages sismiques en Haïti et en République Dominicaine dans les instruments législatifs visant à réglementer la construction et l'utilisation des sols.** M. Belvaux, D. Bertil, A. Roullé, J. Abad

Mardi 8 novembre (début 7h30)

7h30 Réseaux temps réels, shakemaps, intensités macrosismiques
Animateurs : Christophe Sira et Samuel Auclair

7h30	**Rapidité, volume et précision des témoignages sur les séismes – être proche du temps réel et permettre la diversité des recherches.** Sira C., Schaming M. et Schlupp A.
7h45	**Estimation de l'intensité aux Antilles : loi B3 et communiqué**. Saurel J.M., Beauducel F., Clouard V., Dessert C. et les équipes de l'OVSG, de l'OVSM et de l'IPGP
8h	**Les imagettes : un moyen rapide et efficace de collecte des témoignages à l'échelle globale.** Bossu R.
8h10	**ShakeMaps en temps quasi réel dans le Sud-Est de la France.** Ambrois D., Chèze J., Peix F., Deschamps A., Bertrand E., Courboulex F., Delouis B., Maron C., Mercerat D.
8h20	**Vers une ShakeMapTM nationale à partir des données instrumentales et macrosismiques (Métropole et Antilles).** Schlupp A. *et le Groupe de Travail "ShakeMap"*
8h35	**Retour d'expérience des ShakeMaps Sispyr autour de Lourdes**. Bertil D. *et équipe Sispyr*

8h45 Effets de surface : les effets de site effets induits, leur variabilité, les effets non linéaires
Animateur : Etienne Bertrand

8h45	**Caractérisation des conditions de site des stations : où en est-on ?** (Résultats, méthodologie, perspectives). F. Hollender, K. Oghalaei, C. Cornou, A. Dechamp, le groupe caractérisation de site
9h	**Propriétés des glissements de terrain cosismiques**. Patrick Meunier.
9h15	**Prediction of non-linear site response using downhole array data and numerical modeling: the Belleplaine** (Guadeloupe) case study. E.D. Mercerat, L.F. Bonilla, P. Guéguen, F. Lopez-Caballero, C. Gélis. **(Financé par AO-RAP)**
9h30	**GMPEs et Conditions de site : performances comparées de différents proxies de site.** B. Derras, P.-Y. Bard, F. Cotton
9h45	**Prédiction des mouvements au rocher très raide : différences entre données KiKnet et approche "ajustement hôte-cible".** A. Laurendeau, P.-Y. Bard, F. Hollender, V. Perron, L. Foundotos, B. Hernandez → **POSTER**
9h50	**Host to target : enjeu et questions**. Ludmila Provost et Céline Gélis --> **POSTER**

9h55 - Pause

10h30 Source, Atténuation, simulation des mouvements du sol
Animateur: Mathieu Causse

10h30	**Les répliques "outer-rise" pour détecter la rupture superficielle des zones de subduction**. A. Sladen, J. Trévisan.
10h45	**Utilisation des répliques pour caractériser la propagation des ondes en champ proche. Application à l'étude de la rupture du séisme d'Emilia Romagna (2012, Mw=5.9).** M. Causse, G. Cultrera, F. Courboulex, A. Herrero.
11h00	**Physics-based broadband ground motion simulations in near fault conditions: the L'Aquila (Italy) and the Upper Rhine Graben (France-Germany) case of studies**. S. Del Gaudio, S. Hok, M. Lancieri.
11h15	**Génération de signaux synthétiques par couplage de simulations numériques et réseaux de neurones artificiels**. F. Gatti, C. Smerzini, R. Paolucci → **POSTER**

14h Séminaire 2

Fabrice Cotton : Prédiction des mouvements sismiques: pouvons-nous faire mieux ? Avec quelles données ?

14Hh45 Session technique 2 Animateurs : Jean-Michel Douchain, Jean-Marc Saurel

14h45	**Vérification de réponses instrumentales.** J-M Douchain
15h15	**Comparaison entre signaux accélérométriques et vélocimétriques**. J-M Saurel
16h	**Présentation des évolutions instrumentales en accélérométrie**. M. Langlais

14h45 Aléa probabiliste : éléments du calcul, incertitudes

Animateurs : Oona Scotti et Pierre-Yves Bard

14h45	**Catalogue de sismicité à partir des données d'intensité macrosismique: propagation des incertitudes.** L. Provost et O. Scotti
15h	**Un catalogue de sismicité homogène en Mw pour la France métropolitaine (463-2009).** K. Manchuel, P. Traversa, D. Baumont, M. Cara, J. Benjumea, E. Nayman, C. Durouchoux **→POSTER**
15h05	**Constitution d'une banque de données des séismes historiques et analyse de la sismicité, Nord-est de l'Algérie.** M. Hamidatou
15h20	**Estimation des temps de récurrence des forts séismes à la jonction Alpes occidentales - Bassin Ligure : intégration des données géologiques, géodésiques et sismologiques**. C. Larroque, F. Courboulex, O. Scotti et J. Trevisan
15h35	**Modélisation des failles dans le calcul probabiliste de l'aléa sismique.** T. Chartier, O. Scotti, H. Lyon-Caen. A. Boiselet
15h50	**RESORCE : une base de données de mouvements sismiques, nouvelles implémentations et applications**. P. Traversa, G. Ameri, S. Drouet, L. Frobert, S. Godey, B. Hernandez, M. A. Sandikkaya, S. Akkar

15h05 Pause

16h45 Les thèses en cours

Animateurs : Alessia Magi et Tony Monfret **2mn à l'ORAL + POSTER**

16h45	**Site-specific psha: combined effects of single station sigma, host-to-target adjustments and non-linear behavior.** C. Aristizábal, P-Y. Bard, C. Beauval
16h47	**Détermination non-linéaire des paramètres hypocentraux et structuraux : application à la sismicité intracontinentale du Massif armoricain.** Méric Haugmard, Éric Beucler, Antoine Mocquet
16h49	**Seismic response of a Taiwanese ridge.** Claire Rault, Laboratoire de géologie, ENS Paris
16h51	**Evaluation of non-linear behavior in soil response using the Kik-Net data (Japan).** David Alejandro Castro Cruz, Etienne Bertrand, Julie Regnier, Françoise Courboulex
16h53	**Strong motion assessment in the near-field.** Rosemary Fayjaloun, Christophe Voisin, Cecile Cornou, Mathieu Causse
16h55	**Modélisation numérique de la propagation des ondes par une méthode éléments finis Galerkin discontinue : prise en compte des rhéologies non linéaires.** Simon Chabot, Fabian Bonilla, Nathalie Glinsky, Diego Mercerat
16h57	**Multidimensional spectral element modeling of seismic wave propagation in linear and nonlinear media with pore pressure effects.** Elif Oral, Céline Gélis, Luis Fábian Bonilla and Elise Delavaud
17h59	**Nonlinear elasticity in buildings**. Ariana Astorga, Philippe Guéguen, Toshihide Kashima
17h01	**Building resonance frequency and damping in real-case buildings: application to the fluctuation-dissipation theory.** M.A. Brossault, P. Guéguen, P. Roux
17h03	**Variabilité spatiale des mouvements sismiques – Enregistrements sur un barrage voûte.** E. Koufoudi, E. Chaljub, F. Dufour, P.Y Bard, N. Humbert, E. Robbe

17h05	**Simulation numérique de l'interaction sol-structure sous action sismique : comparaison entre modèles 1D et 3D.** Reine Fares, Maria Paola Santisi d'Avila, Anne Deschamps
17h07	**Seismic response of embankments taking into account site effect.** C. Durand, E. Chaljub, P.-Y. Bard, L. Baillet, J.-J. Fry, R. Granjon, F. Renalier
17h09	**Mesures des amplifications locales et simulations des mouvements forts à Port-au-Prince (Haïti).** S. Saint-Fleur, E. Bertrand, F. Courboulex, D. Boisson **(Financé par AO-RAP)**
17h11	**Identification des paramètres mécaniques d'un bâtiment à partir des vibrations ambiantes Préfecture de Nice (06).** Guillermo Fernández Lorenzo, Étienne Bertrand **(Financé par AO-RAP)**

SESSION POSTER jusqu'à 19h30

Mercredi 9 novembre (début 8h)

8h : Séminaire 3

Rémi Bossu : Application LastQuake : de l'information sismologique en temps réel à la réduction du risque sismique

De la sismologie de l'ingénieur au génie parasismique
Animatrice : C. Berge

8h45	**Conception parasismique de bâtiments en béton armé sous charge sismique faible et forte.** Maria Paola Santisi d'Avila, Anne Deschamps, Guillermo Fernandez Lorenzo
9h00	**Simulations numériques préliminaires du scénario sismique à large échelle du tremblement de terre MW6.6 de Niigata (2007).** F. Gatti, F. Lopez-Caballero, R. Paolucci, L. De Abreu Corrêa
9h15	**Numerical evaluation of fragility curves for earthquake-liquefaction-induced settlements of an embankment.** F. Lopez-Caballero, C. Khalil and I. Rapti
9h30	**Outils numériques pour l'évaluation de la vulnérabilité des Structures : modélisation et identification.** Frédéric Ragueneau
9h45	**Evaluation de la vulnérabilité sismique des structures existantes : Apport des mesures in-situ par vibrations ambiantes dans la conception des modèles numériques,** Cédric Desprez

10h00 - Pause

10h30	**Utilisation de mesures de vibration ambiantes pour la caractérisation dynamique d'un ouvrage d'art (vallée du Var).** Julie Régnier, Diego Mercerat, Etienne Bertrand et Denis Davi
10h45	**Effet site-ville observé à Grenoble lors du séisme de l'Ubaye de 2012.** Philippe Guéguen
11h	**Génération d'accélérogrammes synthétiques en accord avec des données sismologiques** Irmela Zentner
11h15	**Approches expérimentale et simulation dans l'estimation de la vulnérabilité sismique des ouvrages et des composants – activités R&D/expertise du CEA.** Evelyne Foerster

11h30 **Retour sur les sessions techniques : résumé des discussions et conclusions**

14h - 15h **Discussions-Perspectives**

16h30/18h30 TABLE RONDE : Gestion de crise et diagnostic d'urgence : Quelles informations sismologiques pour quelle utilité ?

Keynote Lundi 07 novembre - 14h00

Le risque sismique en Haïti: y-a-t-il un avant et après 2010?

Eric Calais
Ecole normale supérieure, département de Géosciences, PSL Research University, Paris, France

---

Le séisme du 12 janvier 2010 en Haïti fut une catastrophe humanitaire sans précédent. Pour de nombreux pays voisins, il fut le rappel d'un fait géologique bien connu: les territoires caraïbes sont tous situés à proximité de - ou traversés par - des failles actives. En Haïti, la relative quiescence sismique depuis la série de tremblements de terre destructeurs du 18ème siècle, ajoutée à une instabilité politique et économique chronique qui y ont empêchés le développement scientifique, ont contribué à effacer la menace des mémoires. Dans le même temps, une urbanisation galopante incontrôlée installait une vulnérabilité dont il est maintenant difficile de se débarrasser. “Année zéro" titrait Le Monde du 12 janvier 2010: cette année-là marque-t-elle une rupture dans les pratiques scientifiques, l'acquisition de connaissances nouvelles sur le sous-sol, la construction parasismique, l'aménagement du territoire, l'information des citoyens? Nous apporterons une réponse dans laquelle des éléments positifs - nouvelle cartographie de l'aléa, microzonages, formation de nouveaux docteurs en géosciences, code de construction - contrastent avec une difficulté évidente à maintenir la réduction du risque sismique dans l'agenda de la reconstruction et du développement du pays. La mise en oeuvre systématique des mesures - bien connues - qui permettent cette réduction dépendent en effet de conditions politiques et économiques qui, malheureusement, continuent de se dégrader en Haïti. De plus, l'aide internationale dont dépend le pays continue de minimiser son soutien à la prévention des catastrophes. Le séisme est déjà oublié face à l'urgence des cyclones et du changement climatique. De fait, il est clair qu'une répétition du séisme de 2010 produirait la même catastrophe aujourd'hui. La communauté scientifique - en particulier caraïbe - doit prendre conscience de ses capacités à influencer positivement le développement en aidant les scientifiques haïtiens à construire puis accompagner une masse critique de sismo-scientiques (sismologues, géologues, géodésiens, géotechniciens, ingénieurs civils) formés au plus haut niveau.

Eric Calais est professeur et directeur du département géosciences à l'Ecole normale supérieure (ENS Paris), directeur du laboratoire de recherche commun “Yves Rocard” (ENS/CEA/CNRS) et membre senior de l'Institut Universitaire de France. Normalien, il obtient une thèse de doctorat à l'université de Nice en 1991, fut chercheur postdoctorant à Scripps Institution of Oceanography (San Diego, USA) jusqu'en 1995, chargé de recherche au CNRS (Géoazur Nice) jusqu'en 2001, puis professeur à l'université de Purdue (USA) jusqu’en 2012. Il fut conseiller scientifique auprès des Nations Unies en Haïti de 2010 à 2012. Il est co-auteur de plus de 130 publications internationales, est lauréat du prix Frank Press de la société américaine de sismologie et du prix Jacob-Jérémine de l'académie des sciences.

##############

Keynote Mardi 08 novembre - 14h00

Prédiction des mouvements sismiques : pouvons-nous faire mieux ? Avec quelles données ?

Fabrice Cotton
Université de Potsdam et GFZ German Research Institute for Geosciences

---

Les données permettant de mesurer les vibrations générées par des forts séismes ont longtemps été rares. Les modèles de prédictions des mouvements sismiques développés au début des années 2000 étaient ainsi basés sur l’analyse de moins de quelques centaines d’enregistrements. Comme dans nombre de disciplines, la qualité et la quantité des données accélérometriques a augmenté de manière exponentielle dans les pays à forte sismicité (le seul séisme de Tohoku a produits plus de 2500 accélérogrammes) mais aussi dans les pays à sismicité plus faible comme la France métropolitaine. Dans cet exposé, j’essayerai tout d’abord d’identifier l’impact de ces nouvelles données sur nos méthodes de prédiction des mouvements sismiques. Nous discuterons ensuite les « surprises » et changements de paradigmes issus des données accélérométriques collectées ces dix dernières années. La dernière partie de l’exposé abordera la question des futurs réseaux acceléromètriques. Nous discuterons les limites des modèles de prédictions actuels afin

d'identifier les stratégies instrumentales possibles dans les contextes de subduction (Antilles) et les zones à sismicité plus modérées (Europe de l'Ouest). Les résultats récents de la fondation GEM (Global Earthquake Model) et les projets de la fondation prévus dans les Caraïbes seront ensuite décrits brièvement.

Fabrice Cotton est professeur de l'Université de Potsdam (Allemagne) et responsable de l'équipe Aléa sismique et champs de contraintes tectoniques du centre national allemand en sciences de la Terre (GFZ German Research Institute for Geosciences). Président du conseil scientifique de la fondation GEM (Global Earthquake Model), il étudie la source sismique et les vibrations générées par les séismes. Cette recherche fondamentale s'accompagne d'une activité de recherche plus appliquée concernant l'évaluation de l'aléa sismique (prédiction probabiliste des vibrations générées par les forts séismes). L'ensemble de ces travaux a pour point commun l'analyse de données sismologiques accélérométriques.

##############

Keynote Mercredi 09 novembre - 08h00

Application LastQuake : de l'information sismologique en temps réel à la réduction du risque sismique

Rémy Bossu
Centre Sismologique Euro-Méditerranéen

L'objectif de cette présentation est de montrer comment des applications pour smartphone LastQuake et les sites Internet du CSEM peuvent contribuer à la réduction du risque sismique à l'échelle globale. Smartphones et sites Internet contribuent à la réduction du risque par deux biais distincts. Les témoignages collectés dans les minutes suivant une secousse destructrice permettent d'améliorer l'efficacité des opérations de secours. De plus, les smartphones offrent la possibilité de conseiller en temps réel les personnes affectées sur les comportements à suivre et à éviter (restez éloignés des bâtiments ; ne téléphonez aux services d'urgences qu'en cas de blessés ; préférez les SMS aux appels vocaux pour ne pas encombrer les réseaux de communications…). Bien entendu, aucune application smartphone n'empêchera l'effondrement d'un bâtiment, mais en limitant les comportements inadaptés ou dangereux, ces développements peuvent contribuer à la réduction du risque à moindre coût et de manière immédiate.

Que se passe-t-il immédiatement après un séisme ? Les gens se ruent sur Internet et les réseaux sociaux pour trouver de l'information et partager leur expérience. Les outils développés au CSEM, notamment l'application pour smartphone LastQuake, visent à répondre à cette demande d'information en temps réel et à optimiser la collecte d'information auprès des témoins. Ces outils s'appuient sur une communication visuelle afin de s'affranchir des barrières linguistiques. Et les résultats sont étonnants. Ainsi, 400 témoignages sont collectés en moins de 10 minutes pour un séisme au fin fond des montagnes de l'Afghanistan, ou encore plus de 500 dans la même période de temps pour un séisme de magnitude 3 qui secoue en pleine nuit la ville de Skopje (République de Macédoine de l'ex-Yougoslavie). Mais la demande du public ne s'arrête pas à l'information sismologique : ce sont les Népalais à la suite du séisme destructeur d'avril 2015 qui nous ont demandés de compléter l'application en intégrant les comportements à suivre après une secousse violente. C'est maintenant chose faite. Nous présenterons les outils, les observations, le retour d'expérience sur des séismes récents et les pistes pour les développements à venir.

Rémy Bossu est sismologue, responsable du centre Sismologique Euro-Méditerranéen (CSEM) et spécialiste de l'information sismologique en temps réel à destination du public et de la sismologie citoyenne. Il a toujours été passionné par les thématiques à l'interface entre sismologie et société et a fait du CSEM un des acteurs de premier plan de l'information sismologique à l'échelle globale. Il coordonne en outre le déploiement de réseaux sismologiques citoyen en Europe et étudie l'utilisation des nouvelles technologies dans la gestion des crises et la réduction du risque.

##############

Quoi de neuf sur les réseaux régionaux RAP-RESIF ? Animateur: Michael Langlais

Le Réseau accélérométrique des Iles de Guadeloupe.

Kitou T., Anglade A., Lemarchand A., Saurel J.M., le personnel des observatoires OVSG, OVSM, IPGP.

Les Iles de Guadeloupe possèdent 19 sites de mesures de l'accélération du sol. C'est grâce aux 12 stations financées par le RAP à compter de 2002, et l'achat de 8 stations par le projet CDSA (BRGM, IPGP, UAG) en 2004 que le réseau de Guadeloupe a pu être constitué. (Figure). A l'exception de la station BERA, les instruments sont installés au sein d'établissements publics, permettant de profiter des installations électriques du lieu pour alimenter le matériel. Le réseau est équipé principalement d'acquisitions Agecodagis en mode déclenché, de capteurs Kinémetrics réglés en 2 G, et de transmissions téléphoniques. Il fait l'objet d'une évolution technique à partir de 2011 pour quatre de ses stations SMMA, GBGA, THMA et CDSA qui passent en mode continu avec des acquisitions Nanometrics (pour les 3 premières), et Mykerinos ainsi qu'une transmission Ethernet (ADSL). De 2008 à 2016 l'IPGP fait installer 7 stations multi-paramètres qui fonctionnent en mode continu avec transmission satellitaire, équipées d'acquisition Nanometrics et de capteurs Kinémetrics. La Guadeloupe dispose donc à ce jour d'un parc de 25 stations accélérométriques. La distribution spatiale des sites, fait que certaines stations satellitaires VSAT sont redondantes aux stations RAP. De plus le niveau d'obsolescence du matériel Agecodagis, pousse la Guadeloupe à la réflexion quant à la mise a niveau de son parc et à l'arrêt de station redondante. Le passage en mode continu du réseau RAP, permet à la fois une amélioration du taux de bon fonctionnement et l'enregistrement des séismes potentiellement ressentis et de faible magnitude. Cependant cette modernisation induit une augmentation du coût de fonctionnement d'une station, surtout en ce qui concerne la transmission des données. Par conséquent le passage du mode déclenché en mode continu ne pourra se faire que progressivement. Actuellement l'utilisation de routines spécifiques pour le rapatriement des séismes enregistrés par les acquisitions RAP en mode déclenché est possible grâce aux évènements mis dans le catalogue sismique de l'observatoire.
Depuis 2013 la Guadeloupe s'est dotée d'outils capables d'intégrer dans ses routines journalières de localisation sismique les données des stations accélérométriques RAP et VSAT. Elles peuvent donc être validées en même temps que l'évènement sismique dépouillé. Cette capacité opérationnelle permet d'apporter des solutions moins lourdes pour la supervision des pannes et le rapatriement des données.

Réseaux accélérométrique RAP et VSAT. RAP / VSAT

##############

Le réseau accélérométrique de la Martinique

Jadélus F., Mélézan D., Naigre B., Saurel J.-M., Lemarchand A., Clouard V., OVSM/IPGP, CTM

Le réseau accélérométrique de la Martinique opéré ou co-opéré par l'OVSM-IPGP est constitué de 19 stations de mesures distribuées de la manière suivante :

- Réseau associé (code WI), opéré par l'OVSM-IPGP: MPOM-BIM-SAM-ILAM : continu à transmission satellitaire.
- Réseau RAP (code RA), opéré par l'OVSM-IPGP: MADI-MALA-MAMA-MAME-MASM-MASP-MATR-MAZM : à déclenchement.

• Réseau associé (code RA)co-opéré par l'OVSM-IPGP et la CTM: CGCA-CGPL-CGCP-CGLR : à déclenchement et CGMH-CGMB: continu.
• Bâtiment instrumenté du Collège de Basse-Pointe du réseau RAP (code RA), co-opéré par l'OSUG, la CTM, le BRGM et l'OVSM-IPGP: CGBP: continu.

En complément, le réseau associé (code RA) opéré par la CTM, et qui comprend une vingtaine de stations Geosig SMACH32, n'est plus opérationnel. La Collectivité Territoriale de Martinique étudie sa rénovation. Les stations fonctionnant sur déclenchement ont été installées à partir de 2001 et sont équipées d'une acquisition Agecodagis, d'un capteur Kinémetrics réglé en 2 G. Elles sont interrogées quotidiennement par modem téléphonique sur la base du catalogue établi à l'OVSM-IPGP. Un courrier électronique contenant les informations techniques clés de l'interrogation (tension batterie, signalement de défaut de communication, etc…) est émis vers les techniciens de l'OVSM-IPGP afin d'améliorer le suivi du fonctionnement du réseau. La validation des événements sismiques se fait par l'intermédiaire d'un script permettant de visualiser rapidement les données filtrées pour ensuite les mettre à disposition du nœud A RAP-RESIF à Grenoble. Deux stations à déclenchement (MATR-MAME) font l'objet d'un projet de modernisation pour un passage en continu avec communication par ADSL.
Le réseau WI correspond à de nouvelles stations multiparamètres (accéléromètre, sismomètre et GPS) à transmission satellitaire installées entre 2011 et 2013 en Martinique et dans les îles voisines dans le cadre du projet Interreg Caraïbe IV TSUAREG piloté à l'OVSM-IPGP. Elles sont équipées d'un capteur kinemetrics ES-T de Nanometrics. Les données mseed continues sont intégrées en temps réel à l'utilitaire de localisation SCOLV de SEISCOMP3 de l'observatoire et peuvent être pointées.
En début d'année 2016, l'OVSM et la CTM ont procédé à la modernisation des deux stations accélérométriques Geosig (GSR24 et TSA100) du barrage de la Manzo dans le cadre d'une convention sur la surveillance de ce barrage. Du matériel Nanometrics (capteur/numériseur Titan EA, connection via POE, transmission temps réel seedlink) y a été installé.

Stations RAP et VSAT Martinique (OVSM et CTM)

##############

Quoi de neuf sur les réseaux: RAP-AZUR

Chèze J. - GeoAzur, Université Cote d'Azur

RAP-AZUR regroupe 9 stations mixtes et 11 stations uniquement accélérométriques parmi lesquelles 7 sont localisées dans l'agglomération de Nice. Petite précision pour la station NCAD qui est une station particulière car il s'agit d'un bâtiment entièrement instrumenté. Cette station est composé de 18 capteurs mono-composante et 3 capteurs tri-composante soit un total de 27 canaux répartis sur 2 numériseurs. De plus, cette station inclue une station météo qui produit 2 canaux de mesure de vent (direction et vitesse) et 2 canaux de température.
Ces 2 dernières années, le réseau a connu quelques évolutions majeures. Des travaux importants d'infrastructure se sont produit à la station SMPL en avril 2015. Une jouvence du matériel scientifique a eu lieu sur 5 stations (BELV, CALF, MENA, REVF, SLAF). Ces stations sont désormais toutes instrumentées avec un capteur Kinemetrics Episensor ES-T et un numériseur Stanéo D6BB-DIN. Très récemment, la station SAUF jusqu'alors uniquement large-bande, intègre désormais un capteur accélérométrique.

Gauche: Stations SM (rouge) et couplées SM/BB (vertes) gérées par l'OCA - Droite: Stations RAP à Nice

##############

Quoi de neuf sur le réseau RAP-OMP ?

Pauchet H. - Observatoire Midi-Pyrénées

Le réseau RAP-OMP est constitué de 12 sites dont 9 transmettent leurs enregistrements en temps-réel, et 3 sur appel téléphonique (mode déclenché). Deux sites sont co-localisés RLBP/RAP : PYLO depuis 2010 et ATE depuis 2015. La station RAP ATE en place depuis 2001 dans le village d'Arette a été déplacée sur le site RLBP qui est également un site CENALT (alerte tsunami).
Les dernières jouvences de numériseurs (D6BB-DIN et Centaur) concernent les stations de Saint-Jean Pied de Port (PYPP), Prades (PYPD) et Arudy (PYAD). A noter que sur les deux numériseurs Centaur, nous avons observé des perturbations impulsives (glitches) qui n'étaient pas présentes sur les anciens Mykerinos. Ce problème a été réglé en SAV.
On dénombre actuellement cinq types de numériseurs différents sur le réseau RAP-OMP (2 Kephren, 2 Centaur, 4 D66BB-DIN, 1 Mykerinos, et 3 Titan).

Les différents modèles de numériseurs sur le réseau RAP-OMP -> Centaur (bleu); D6BB-DIN (vert); Kephren (jaune); Mykerinos (orange); Titan3 (rouge)

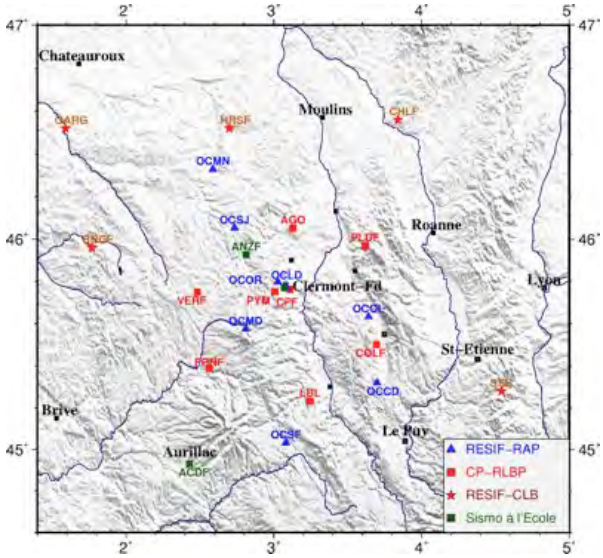
##############

Quoi de neuf sur le Réseau Sismologique Auvergne »

Douchain J-M., Observatoire de Physique du Globe de Clermont-Ferrand

Nous allons aborder les principaux développements et améliorations apportés sur le réseau accélérométrique dans les domaines :

- de l'instrumentation,
- du traitement des données,
- du contrôle des signaux,
- de la supervision SyNApSE développée à l'OCA,



Le réseau sismologique Auvergne

##############

Quoi de neuf sur le RAP-ISTERRE

Douste-Bacqué I., Hollender F., Langlais M. - ISTerre

Actuellement le RAP-ISTerre gère 33 sites accéléromètriques (dont 14 colocalisées avec des vélocimètres large bande) dans la zone d'intérêt de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble. L'ensemble de ces sites, correspondant à 117 canaux accéléromètriques, sont tous en acquisition et transmission continues. La transmission de ces données se fait selon le protocole seedlink et un algorithme de complétion automatique des données a été développé et mis en place avec succès. Le service Observations d'ISTerre assure en outre la supervision de 7 sites pour le RAP-Central (3 sites pilotes + sites UBO) avec le cas échéant une gestion collaborative de la maintenance (merci aux personnels de l'OMP, de l'UBO, de l'OVSG et de l'OVSM). Durant la période 2014-2016, sur le réseau RAP-ISTerre, 10 stations ont été modernisées et une nouvelle station a été installée. Des actions de durcissement de site ont accompagné ces modernisations lorsque l'état initial des stations le justifiait. En particulier les infrastructures des sites du forage de Montbonnot (OGFO) et de Sixt-Fer-à-Cheval (OGSI) ont été complétement refondus. De façon générale ces modernisations et durcissements entrainent une diminution significative de l'activité de maintenance.

En cette fin d'année 2016, le parc de 39 numériseurs déployés par le RAP-ISTerre se décompose de la façon suivante : 15 couples Agécodagis-Mykerinos-Titan3, 6 Agécodagis-KephrenBB, 9 Nanometrics-Taurus/Trident, 9 Nanometrics-Centaur. L'effort de remplacement des Mykerinos sera maintenu dans les années à venir (3 à 5 par an) si le financement le permet. En particulier le projet de rénovation de l'instrumentation de l'Hôtel de Ville de Grenoble doit être engagé. Par ailleurs les capteurs de fond de puits du forage de Montbonnot donnent des signes inquiétants de vieillissement, un diagnostic approfondi va être mené prochainement pour cerner au mieux l'état des capteurs installés dans les deux forages. Par ailleurs une migration d'une partie de nos moyens de transmission via ADSL sur du data-3G/4G est en réflexion afin de réduire nos coûts de fonctionnement.

Répartition des sites SM (cercles concentriques) et BB-SM (étoiles) pour le RAP-ISTerre (zoom sur les régions de Grenoble et d'Annecy)

##############

Les stations accélérométriques gérées par le BRGM.

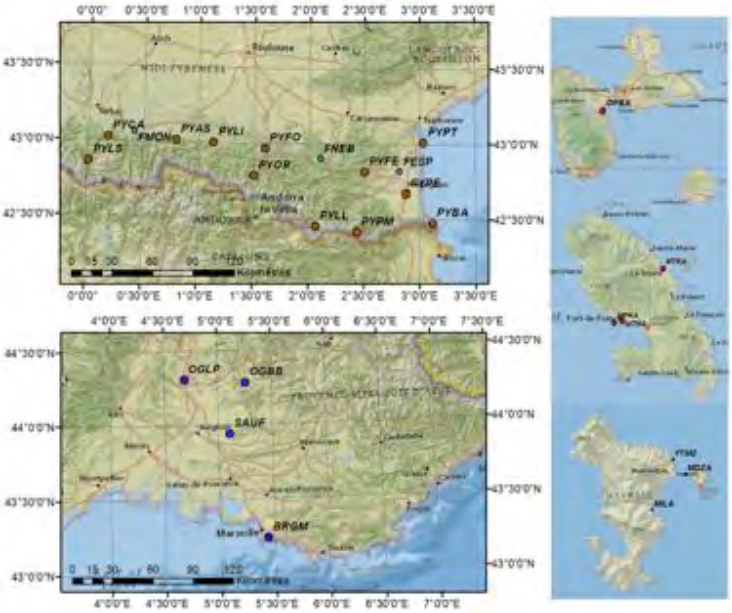
Bertil D., Benjamin F., BRGM

En 2016, le BRGM gère 27 stations accéléromètriques, 19 en métropole (Pyrénées, Provence), 8 dans les DOM (Guadeloupe, Martinique, Mayotte). 18 sont des stations RAP, 3 des stations BRGM des projets ISARD-SISpyr, 5 sont des stations RAP-associées dans les DOM.

Apres une période difficile pendant laquelle de nombreuses stations sont restées hors-service, depuis Juin 2015 le réseau se remet progressivement en place :

- En métropole 6 stations sont passés du mode déclenché en mode temps réel : PYFE, PYOR, PYPT, PYLL dans les Pyrénées, OGLP, OGBB en Provence. Un accéléromètre a été rajouté à la station SAUR en remplacement de la station d'Avignon OGAV. De plus le remplacement de Mykerinos par des Centaur est prévu sur PYLS, PYAS, PYLI avant la fin de l'année. Toutes les stations de métropole du BRGM sont maintenant passées en temps réel.
- Une mission à Mayotte en juin 2016 a permis de reconfigurer le réseau. La station YTMZ (Mamoudzou) a été réinstallée définitivement après une période de test en temps-réel depuis Juillet 2015. La station YTGL (Glorieuses) a été démantelée (maintenance trop difficile dans une zone trop peu sismique). 2 nouvelles stations ont été installées en mode déclenchée : MDZA (Kephren/episensor RAP) à Dzaoudzi et MILA (Geosig Rap associé) à Iloni. En parallèle, un projet Sismo à l'Ecole est en cours de mise en place avec un large bande Guralp qui sera implanté au collège de Chicon en 2017. Pour rappel, Mayotte est située en zone de sismicité modérée mais avec un état de connaissance médiocre du contexte sismotectonique récent et un seuil de détection des séismes par les réseaux internationaux à Mw=4.3. 4 séismes régionaux ont été enregistrés sur YTMZ entre 2012 et 2016.
- Aux Antilles, 3 stations RAP associées en Martinique (à Fort de France au BRGM et au Theatre, à la Trinité) et une en Guadeloupe (nouveaux locaux du BRGM à Petit Bourg) sont maintenues.

Pour gérer les flux de stations temps-réel, le BRGM est en train de passer à Seiscomp3, avec cependant quelques difficultés notamment pour la communication avec les stations Mykerinos. La remise en service des stations Isard-Sispyr est prévue pour 2017.



Stations accélérométriques gérées par le BRGM

##############

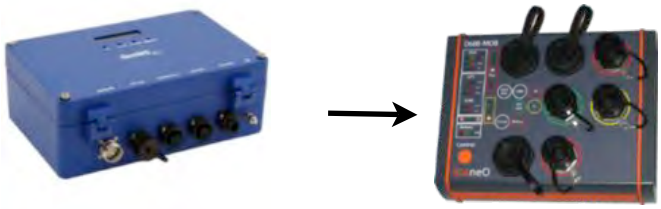
Quoi de neuf sur les réseaux régionaux du RAP-RESIF au CEA?"

Lallemand C., CEA, DAM

Actuellement, le CEA maintient trois stations (QUIF, SMFF et BAIF) faisant partie du GIS-RAP (Groupement d'Intérêt Scientifique - Réseau Accélérométrique Permanent), piloté par le Ministère de l'Environnement et de l'Energie, dont le CEA est un membre actif. A cela s'ajoute deux stations accélérométriques (EPF et CABF) financées entièrement par le CEA, et dont les données sont partagées avec la communauté scientifique. Ces deux dernières stations sont équipées de numériseur « Geosig » permettant l'acquisition «

en déclenché » du signal. Actuellement ces deux dernières font l'objet d'une évolution afin de passer en acquisition « en continu ». Elles seront équipées de numériseur Staneo D6BB-MOB en 2017.

L'objectif du CEA est de passer toutes nos stations sous la même technologie. Certains de nos numériseurs Geosig ont déjà fait l'objet d'un remplacement par un numériseur Stanéo. Cette modification a permis de passer les stations en acquisition continue et d'enregistrer des séismes lointains. L'expérience a montré qu'ils sont beaucoup plus faciles à installer et à maintenir en état que les précédents numériseurs.

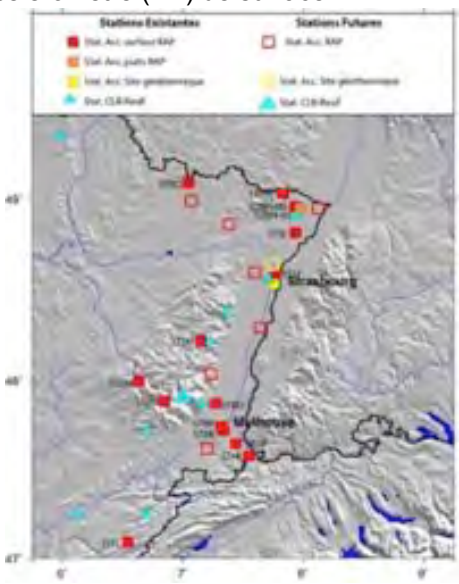


##############

Modernisation et Développement du Réseau Accélérométrique Permanent dans le Nord-Est de la France.

Doubre C., Jund H., Grunberg M., Wodling H. - EOST, Unistra.

L'Observatoire Sismologique du Nord-est de la France (ObsNEF, EOST) gère depuis une quinzaine d'années 13 stations accélérométriques principalement en Alsace, mais aussi dans les Vosges, le Jura et la Moselle. La modernisation de ce réseau (numériseurs Nanometrics / capteurs Kinemetrics) se termine, avec plus que 4 stations accélérométriques "ancien modèle" fin 2016. Le réseau connait actuellement un fort développement de par son implication dans la surveillance de la sismicité régionale autour des activités industrielles de géothermie haute température.
Dans le cadre du 'LabEx G-eau-thermie profonde', une station fond-de-puits (FR-SZBH) a été installée sur le site d'exploitation géothermique de Soultz sous Forêts pendant l'été 2016 à 200 m de profondeur. Celle-ci comporte en plus de capteurs large-bande, deux accéléromètres (type CMG5), l'un en profondeur et l'autre en surface. Du fait de la multiplication des projets de construction et d'exploitation de centrales géothermiques dans la région Alsace, l'ObsNEF/EOST a collaboré avec la DREAL sur la réglementation préfectorale. Celle-ci prévoit qu'en plus des réseaux de surveillance privés, une station multi-instruments, comprenant un sismométrie large bande (120s), un accéléromètre, une antenne-récepteur GNSS et des réflecteurs coins (InSAR) doit être installée à proximité du site par l'exploitant, avec des recommendations techniques précises, pour mesurer en continu la déformation sismique ou asismique, en surface et en profondeur. Ainsi, deux nouvelles stations (FR) accélérométriques ont d'ores et déjà été installées sur la communauté urbaine de Strasbourg, et au moins deux autres projets sont en cours de préparation. De plus, afin de garantir l'obtention d'une magnitude complétude de 1.5 sur l'ensemble de l'Alsace, ainsi q'une surveillance indépendante, notamment pour la sismicité induite, 8 nouvelles stations sont en cours de construction. En plus d'un capteur sismologique bande moyenne en puits de 5 m pour 6 d'entre elles, chaque station comporte un accéléromètre (FR) de surface.



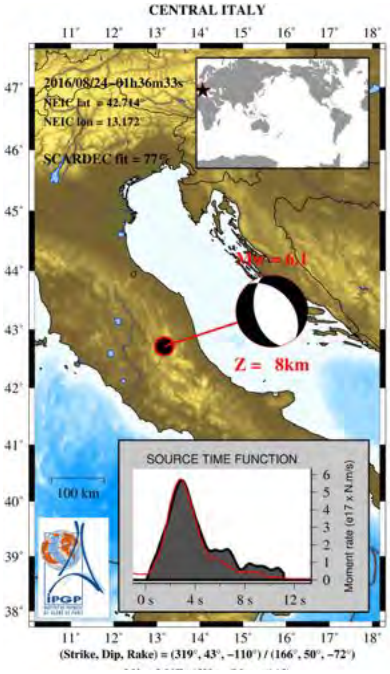
Stations accélérométriques gérées par l'EOST

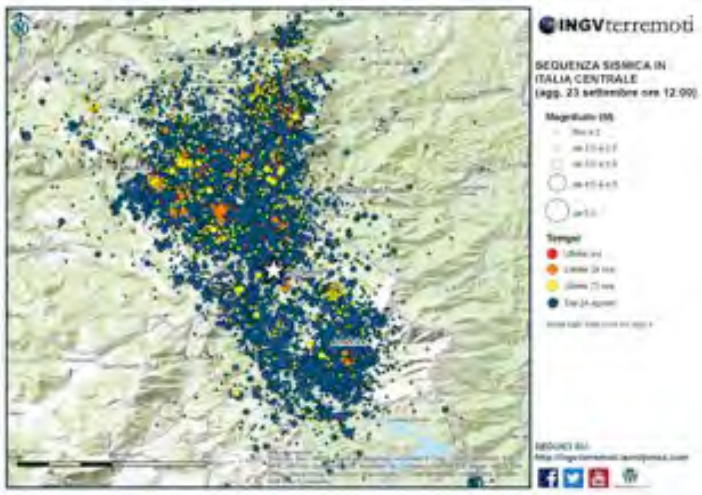
Séismes récents Animateur: Claudio Satriano

Le séisme d'Amatrice (Italie, Mw 6.0) du 24 août 2016

Satriano C., Scotti O. (IPGP, IRSN)

Le 24 août 2016, à 03h36 (heure locale), un séisme de magnitude Mw 6.0 a frappé une portion de l'Italie centrale, le long des Apennines, entre les villes de Norcia et Amatrice. Cette région, caractérisée par un aléa sismique très élevé, a été touché dans le passé historique par plusieurs séismes majeurs (1627, 1639, 1672, 1703; http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15). L'abondance de données sismologiques (RSN, réseau sismique national de l'INGV ; données télésismiques), accélérométriques (RAN, réseau accélérométrique national), géodésiques (RING, réseau intégré national GPS ; réseaux GNSS régionaux ; InSAR), géologiques (ex., ITHACA – ITaly HAzard from CApable faults) et macrosismiques (http://quest.ingv.it) a permis de tracer assez rapidement un cadre de ce séisme, en terme de faille causative, mécanisme de rupture, mouvement du sol produit et effets macrosismiques.
Dans la première partie de cet exposé, on présentera la sismotectonique de ce secteur des Apennines et on passera en revue les différents résultats préliminaires, publiés jusqu'à présent, concernant le mécanisme de rupture et la séquence sismique.
La deuxième partie de l'exposé sera consacrée à un compte rendu de la mission de reconnaissance des ruptures de surface, conduite par le CEREGE, l'IPGP, l'EOST et l'IRSN.





Gauche - Inversion de source SCARDEC du choc principal (tenseur de moment + fonction source), stations à distance télésismique (source : http://geoscope.ipgp.fr) - Droite: Séquence sismique d'Amatrice, au 23/09/2016 (source : https://ingvterremoti.wordpress.com).

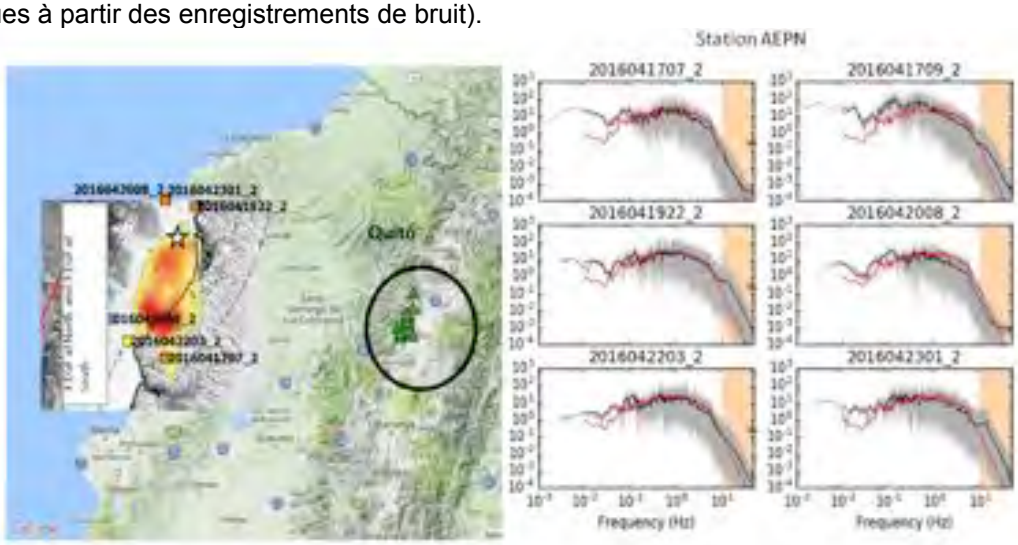
##############

Le séisme de Pédernales (Equateur, Mw 7.8, avril 2016): source et mouvements du sol

Courboulex F. et al. - GeoAzur, EPN-IG, IFSTTAR, CEREMA, ISTerre, Laboratoire Mixte International Séisme et Volcans

Le séisme de magnitude qui a frappé l'Equateur le 16 avril 2016 a eu lieu sur l'interface de subduction entre la plaque océanique Nazca et la NAS : North Andean Sliver qui se déplace de 8-11mm/an vers le nord-est par rapport à la plaque Amérique du sud (Nocquet et al, 2014) . Ce séisme a été bien enregistré par les stations sismologiques mondiales et également par le réseau Equatorien sismologique et géodésique permanent (RENAC). L'inversion des différentes données (sismologiques et géodésiques : GPS et INSAR) a permis de montrer que la rupture s'est propagée préférentiellement vers le sud pendant une quarantaine de secondes (Nocquet et al, soumis). Ce séisme a vraisemblablement cassé la même zone que lors du séisme de 1932, estimé à la même magnitude.

Le séisme de Pédernales a fait des dégâts très importants dans les villes côtières et a été bien ressenti jusqu'à Quito (capitale) située à 170 km de la côte. Nous montrerons d'abord comment les enregistrements accélérométriques proches de la côte mettent en évidence des effets de source (effets de directivité) et des effets locaux (effets de site et effets non linéaires).
Nous nous concentrerons ensuite sur Quito, capitale de l'Equateur située dans une vallée Andine à 3000 mètres d'altitude. Quito est menacée à la fois par des séismes de magnitude modérée venant d'un réseau de failles directement sous la ville, par des séismes plus forts (M~7) venant de la cordillère située à plus de 60km et par des mega-séismes de subduction (tel que le séisme de 1906 de magnitude 8.8 qui a cassé une faille estimée à 500km) issus de la même zone que le récent séisme de Pédernales. A Quito, la plupart des bâtiments ont été construits sans code de construction parasismique et sont souvent situés sur des zones instables. La population de Quito atteignant 3 millions d'habitants, les conséquences d'un séisme important seraient certainement dramatiques.
Dans la ville de Quito, un réseau accélérométrique permanent a été installé en 2010. Il comprend actuellement 17 stations. Ce réseau a enregistré en 5 ans plusieurs séismes proches mais aucun séisme de magnitude importante avant le séisme de Pedernales. Nous profitons de ces enregistrements nouveaux pour tester une méthode de simulation de mouvements forts basée sur une approche simple par fonctions de Green empiriques (FGE), dont les paramètres d'entrée de source sont contraints par une base de données mondiale de fonctions sources temporelles SCARDEC.
Deux étapes seront présentées dans ce travail : une étape de validation et de tests à partir de 6 répliques de magnitudes 5.8 à 6.1 utilisées comme FGE en exploitant pour chaque événement les paramètres déterminés à partir des données et une étape de tests en aveugle basée sur la méthodologie proposée.
Les résultats montrent qu'après une simple correction d'atténuation due à la distance et à l'azimut des arrivées des ondes issues des EGF (3 au sud de la rupture et 3 au nord), on parvient à reproduire de manière satisfaisante les valeurs de pic (PGA et PGV) et les durées dans la capitale. Il n'est par contre pas possible avec cette approche d'obtenir une bonne reproduction des basses fréquences. Il sera nécessaire pour cela de réaliser un couplage avec d'autres méthodes (fonctions de Green numériques ou fonctions de Green obtenues à partir des enregistrements de bruit).



A gauche : L'étoile montre le point de nucléation du séisme de Pedernales (Mw 7.8) qui a frappé l'Equateur le 16 avril 2016. La partie la plus rouge correspond à la zone de glissement principal durant la rupture (Noquet et al, soumis). Les carrés représentent les épicentres des 6 répliques utilisées comme fonctions de Green empiriques. A droite : exemple de superposition entre le signal enregistré (rouge) et les signaux simulés (en noir la simulation moyenne, en gris les simulations individuelles) sur la station AEPN de Quito en utilisant les 6 EGF différentes.

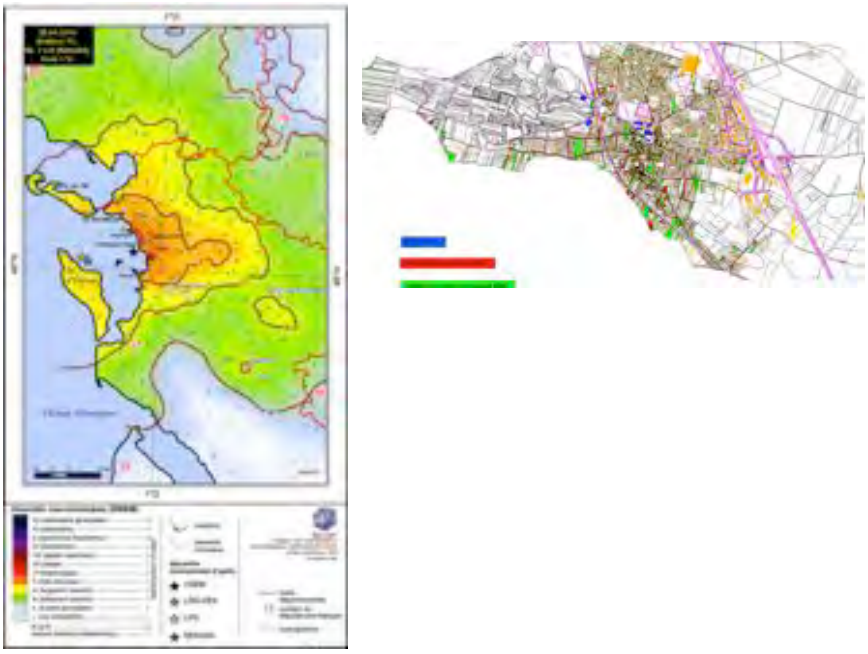
###############

Séisme de la Rochelle – macrosismique : de l'enquête internet aux résultats terrain.

C. Sira BCSF, M. Schaming EOST

Le séisme du 28 avril 2016 s'est produit à 6h46 TU (8h46 min heure locale) en Charente-Maritime.
L'épicentre estimé par le CSEM est à environ 6 km au sud-sud-ouest de la commune d'Angoulins (localisation préférentielle du BCSF). La magnitude varie selon les organismes de 5,1 (ML LDG) à 4,9 ML (RéNaSS). La magnitude Mw à considérer est comprise entre 3, 8 et 3,9 selon les organismes. La profondeur de l'hypocentre est d'environ 10 km. Le séisme a été ressenti dans 24 départements de l'ouest de la France. Les témoignages individuels collectés par Internet sur le site www.franceseisme.fr du BCSF

ont été nombreux dès les premières minutes. Plus de 110 000 personnes ont suivi l'information diffusée sur les réseaux sociaux (Twitter et Facebook). L'enquête a permis de collecter 437 formulaires communaux (mairies, gendarmeries, pompiers) et 2659 formulaires individuels renseignés par les Internautes sur les effets produits par le tremblement de terre. L'intensité maximale préliminaire calculée par le BCSF à partir de ces données individuelles (moyennées à la commune) indiquait une valeur maximale de V. Le CSEM indiquait une intensité maximale IV (144 formulaires). Après quelques jours cependant, les retours de terrain remontés par la préfecture de Charente-Maritime auprès du BCSF laissent supposer une intensité maximale plus importante et sans doute proche de VI. Ces informations ont motivé l'activation du GIM (Groupe d'Intervention Macrosismique) afin d'affiner les valeurs préliminaires en zone épicentrale. Un binôme du GIM, est arrivé à La Rochelle le 11 mai, soit 2 semaines après le séisme. Durant cette mission de 3 jours, 5 communes ont été évaluées permettant de définir les profils de vulnérabilité sismique des communes et des bâtiments affectés, les niveaux de dommages et leur pourcentage par type de construction ainsi que les effets sur les autres indicateurs de l'échelle EMS-98 (personnes, objets, mobiliers).
Cette enquête de terrain sur la zone épicentrale, dans les communes affectées s'est avérée indispensable. Elle a permis d'évaluer avec précision les intensités épicentrales. Il est à noter que les valeurs préliminaires d'intensités déduites des questionnaires internet se sont avérées sous-estimées dans la zone épicentrale, ce qui reste caractéristique de ce type d'information rapide. A grande distance (150 - 200 km) des biais légers (de l'ordre d'un demi-point d'intensité), peuvent exister sur les valeurs d'intensités estimées très certainement liées aux types de données collectées (témoignages individuels uniquement) et à l'information ou non du public par les media régionaux. La prise en compte de l'étage dans l'analyse des formulaires individuels reste essentielle à l'estimation de l'intensité, notamment pour éviter la surestimation des valeurs d'intensités à grandes distances. L'intensité maximale déterminée par le BCSF est de VI à Angoulins (Charente-Maritime) et V-VI pour Fouras et Châtelaillon-Plage (figure). Vraisemblablement grâce à la localisation en mer de l'épicentre, les dégâts, malgré la magnitude de 4,9 ML (RéNaSS) sont fort heureusement restés assez légers et principalement de degré 1 ; quelques dégâts de degré 2 (dégâts structuraux légers, et non-structuraux modérés) sont toutefois présents dans de rares bâtiments de vulnérabilité A et B. Les dommages des particuliers ont pu être analysées sur place, parfois permettant jusqu'à la localisation précise des dommages sur une carte (fig. 2, commune d'Angoulins).
Toutefois, nous avons été assez surpris de voir de nombreux dégâts déclarés, déjà présents sur les images de Google Street View en 2013 ou 2015. Ceux-ci ont donc été écartés de notre analyse. L'enquête macrosismique du BCSF (formulaires individuels, formulaires communaux, enquête de terrain) a permis de collecter les effets produits par le séisme sur 1053 communes. Les effets macrosismiques suivent une orientation principalement nord-ouest sud-est correspondant à l'orientation des failles hercyniennes. Si l'on prend en compte la surestimation des intensités au-delà des 150 kilomètres, on peut considérer que l'isoséiste III s'étend approximativement jusqu'à 95 km de l'épicentre.



Gauche: Carte macrosismique (zone épicentrale); Droite: Carte de localisation des dommages (commune d'Angoulins)

##############

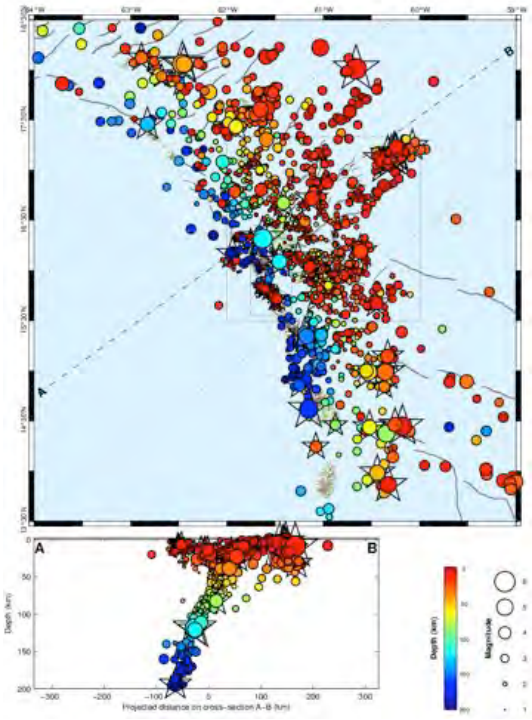
Aléa sismique aux Antilles Animateur: Céline Dessert et Didier Bertil

Bilan de l'activité sismologique de l'arc des Petites Antilles 2014-2016. Observatoires Volcanologiques et Sismologiques de Guadeloupe et de Martinique (IPGP).

Dessert C. et al. - IPGP, OVSG et OVSM

L'arc insulaire des Petites Antilles résulte du plongement des plaques Américaines sous la plaque Caraïbe. C'est une subduction active avec une vitesse de convergence de 2cm/an, faisant de notre archipel une région à fort aléa sismique.
La mutualisation des données sismologiques entre les partenaires régionaux des Petites Antilles, le SRC de l'Université de Trinidad et Tobago, le KNMI des Pays Bas, l'Observatoire Volcanologique de Montserrat, l'USGS, le PRSN de Porto Rico, les OVS des Antilles de l'IPGP, permet de construire un réseau à l'échelle de l'arc. Les données de chaque station de ce réseau sont reçues à l'OVSG et l'OVSM, soit par satellite, soit par Internet. Ainsi, depuis 2009, la localisation des séismes se fait à l'échelle de l'arc. Cet effort améliore considérablement notre vision de la sismicité, maintenant à l'échelle pertinente de l'objet géologique majeur de la région, pour améliorer la compréhension des processus sismotectoniques et volcaniques de la subduction antillaise.
Dans cet exposé , nous allons présenter un bilan de l'activité sismologique de l'arc depuis le 01/01/2014, en nous attardant sur les séismes majeurs (en magnitude et/ou en intensité) :

18/02/2014 : nord Barbade - M 6,5 - V
16/05/2014 : nord-est Guadeloupe - M 6,1 - V
16/07/2015 : nord-est Barbade - M 6,6 - VI
19/03/2016 : nord-est Barbuda - M 6,0 - IV
Sismicité importante dans la zone des Saintes



Carte des épicentres entre le 01/01/2014 et le 25/09/2016 correspondant aux séismes enregistrés et localisés par l'OVSG autour de la Guadeloupe. Traits noirs = failles principales connues (d'après Feuillet et al. 2000) ; Etoile = séisme ressenti.

###############

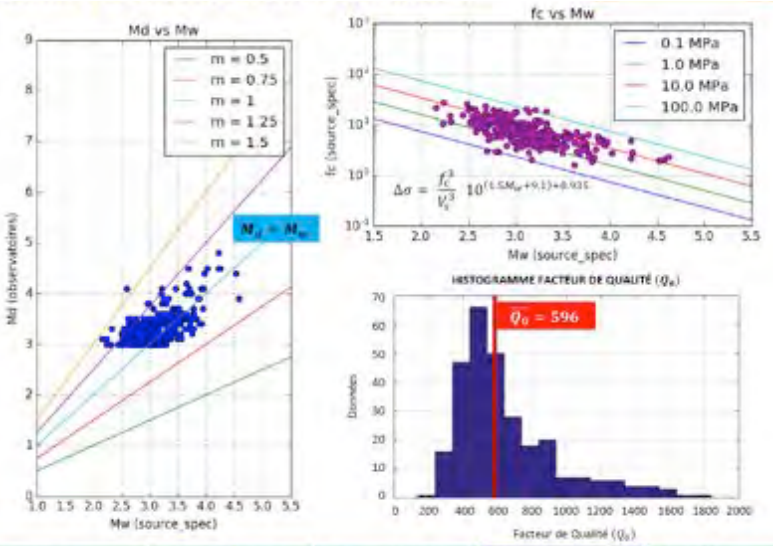
Étude des paramètres de source de la sismicité aux Antilles

Satriano C. et al. - IPGP - ***Projet financé par l'AO du RAP***

Le développement de modèles statistiques ou déterministes du cycle sismique est un ingrédient fondamental pour l'évaluation de l'aléa sismique. Ces modèles nécessitent d'être calibrés sur des catalogues sismiques « enrichis », où les informations classiques (localisation et magnitude) sont complétées par d'autres paramètres de source, telles que le moment sismique, la fréquence coin, l'énergie rayonnée. A l'état actuel un catalogue de ce genre n'est pas disponible pour la sismicité à l'échelle de l'arc des Petites Antilles : une analyse de ce type n'a été conduite que pour la séquences des Saintes (Drouet et al, 2011).Afin de créer un catalogue enrichi de la sismicité aux Antilles, contenant la magnitude de moment et d'autres paramètres de source, nous avons appliqué une méthodologie de modélisation spectrale aux données du nouveau réseau régional large-bande WI (West Indies) dans la période 2008-2013.
Le jeu d'évènements sélectionnés comprend 1166 séismes extrait du catalogue CDSA (www.seismes-antilles.fr), dans l'intervalle de temps 2008-2013, avec magnitude de durée (calculé par les Observatoires de l'IPGP) supérieure à trois. Les trois domaines principaux de sismicité –crustale, subduction inter-plaque, intraplaque profondes– ont été analysé séparément.
Les résultats montrent que :

I. La magnitude de durée tend à surestimer la magnitude de moment, notamment pour les séismes d'interface.
II. La loi d'échelle entre la magnitude de moment et la fréquence coin (Aki, 1967) est bien respectée, avec une chute de contrainte comprise entre 1 et 10 MPa. Ce résultat est compatible avec les résultats de Drouet et al. (2011) pour les petits séismes (Mw < 4) de la crise des Saintes, ainsi qu'avec les résultats de Oth (2013) pour la subduction du Nord-Est du Japon.
III. Les valeurs d'atténuation (facteur de qualité) sont compatibles avec les valeurs attendues dans une zone de subduction similaire (ex., Liu et al., 2014 – Nord-Est du Japon)

On discutera également l'intégration du code de mesure spectrale dans le système automatique d'analyse des évènements (basé sur SeisComP) des Observatoires de l'IPGP.
Cette activité, financée par l'appel d'offre RAP 2015, s'est en partie déroulée dans le cadre du stage M1 d'Alexis Mejia à l'IPGP.



Résultats de l'analyse pour les séismes de subduction à l'interface. À gauche : comparaison entre Md (calculée par les observatoires) et Mw. En haut à droite : relation d'échelle entre la fréquence coin (fc) et la magnitude de moment (Mw) ; les droites montrent, pour référence, différentes valeurs de chute de contrainte, entre 0.1 et 100 MPa. En bas à droite : histogramme des valeurs du facteur de qualité Qo.

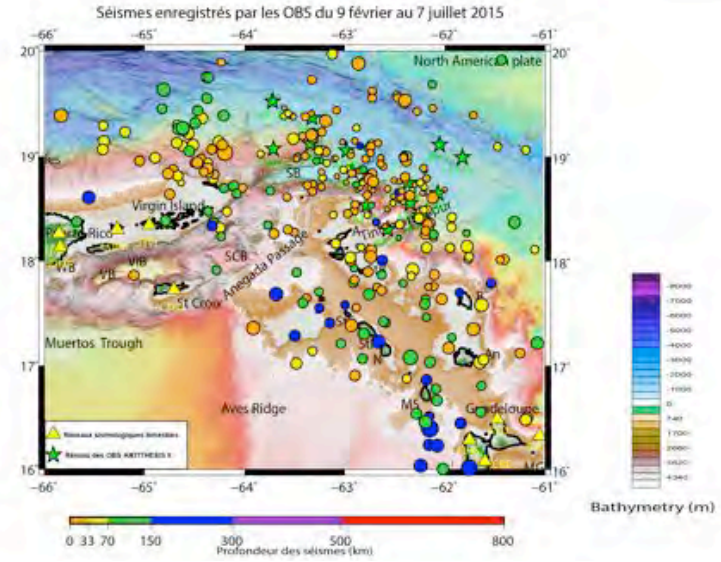
###############

"Gap sismique" du segment nord des Petites Antilles: ce que nous apprend le réseau OBS Antithesis 2.

Clouard V. et al., IGP/OVSM, GeoAzur, Université des Antilles, Géoscience Montpellier - ***Projet financé par l'AO du RAP***

Le segment nord de la subduction des Petites Antilles (Saint Martin – Iles Vierges), à la transition avec les Grandes Antilles est encore très mal connu. L'absence de séismes historiques majeurs et un catalogue sismique semblant indiquer une lacune sismique pourraient conduire à sous-estimer son potentiel sismogénique et donc le risque sismique en particulier pour les Iles du Nord toutes proches. Dans le cadre du projet Antithesis, la campagne en mer Antithesis 2 à bord du N/O L'Antea a permis le déploiement de 14 sismomètres fond de mer de février à juillet 2015. Cette campagne a été co-financée par la Région

Guadeloupe, un CPER-Martinique, l'IRD et l'INSU. Nous présentons ici les premiers résultats du traitement de ces données pour lequel un co-financement du RAP et du CDSA a été obtenu en 2015.
Après la conversion des données et métadonnées au standard sismologique SEED, nous avons utilisé SDP (Seismic Data Player), un ensemble d'outils graphiques développé à l'OVSM autour de la bibliothèque ObsPy en interaction forte avec la suite logicielle gratuite SeisComP3 (SC3). Une fois les paramètres optimaux de détection déterminés, cette interface permet à des personnes non-expertes de traiter rapidement (1 journée en ~15-20mn) et efficacement un jeu de données issues de déploiements temporaires de sismomètres, à partir de formats de données standardisés (SEED) et permet d'injecter le catalogue sismique d'événements directement dans une base de données SC3. Les événements ainsi déclenchés ont été ensuite localisés sous scolv (SC3 OriginLocatorView) en utilisant les données de l'hydrophone et des stations continues à terre. Sur les 391 événements tectoniques localisés, 229 n'existent pas dans les catalogues des opérateurs de réseaux traditionnels (PRSN vers le nord-ouest et OVSM-OVSG vers le sud). Nos analyses préliminaires semblent indiquer que le taux de sismicité de notre zone d'étude est comparable avec celui de l'arc antillais, mais inférieur à celui du segment voisin des Grandes Antilles.

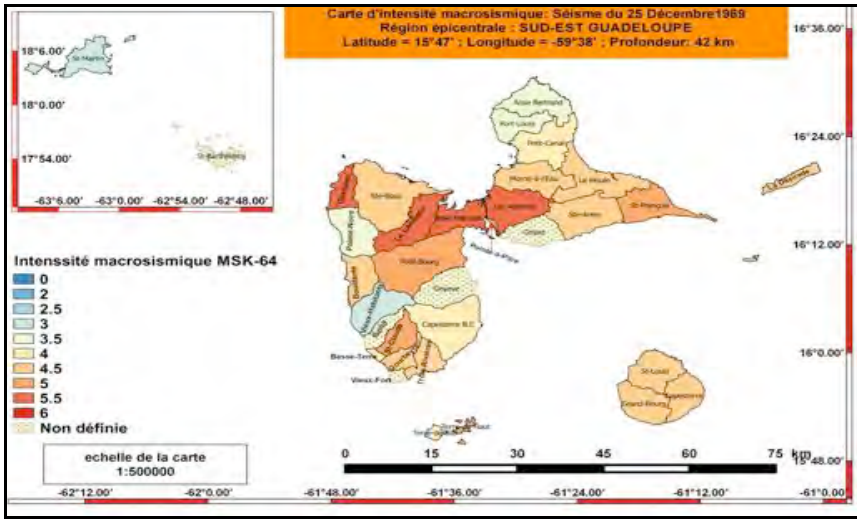


##############

Exploitation des questionnaires macrosismiques originaux de M. Feuillard: premier aperçu des effets sismiques en Guadeloupe de 1959 à 1988.

Evariste R. et al. - Université des Antilles et de la Guyane, BRGM et IPGP/OVSG

Bien avant la standardisation des procédures d'enquête macrosismique entre France Métropolitaine et les Antilles françaises, des initiatives locales ont permis la collecte de d'informations macrosismiques de grande qualité décrivant les effets des secousses sismiques sur les communes de Guadeloupe. Le directeur de l'Observatoire Volcanologique et Sismologique de Guadeloupe (OVSG), M. Feuillard, avait élaboré, dès 1959, un questionnaire d'enquête macrosismique collectif qui était envoyé aux groupements de gendarmerie via la Préfecture lors de séismes ressentis. Les données collectées étaient ensuite interprétées en intensité macrosismique pour chaque commune. Dans son « catalogue macrosismique de la Guadeloupe et de la Martinique » publié en 1986, M. Feuillard a fait une synthèse et une analyse de certaines de ces sources documentaires. Si des tableaux donnent les intensités pour chaque séisme et chaque commune, le lien avec les sources de témoignages d'origine a été perdu.
Les travaux menés dans le cadre du Centre Sismologique des Antilles (CDSA) en 2014-2015 ont été l'occasion de redécouvrir les archives de M. Feuillard traitant de la période 1959-1988 et de les sauvegarder sous forme de scans numériques. Ces archives comportent 450 questionnaires décrivant les effets macrosismiques de 23 séismes ressentis dans l'archipel de la Guadeloupe ainsi que dans les îles du Nord.
Un premier dépouillement de ces données a été fait dans le cadre d'un stage de Master 2 de l'Université des Antilles. Nous présentons ici le contenu de ces sources documentaires et des résultats d'analyse préliminaire de ces questionnaires.



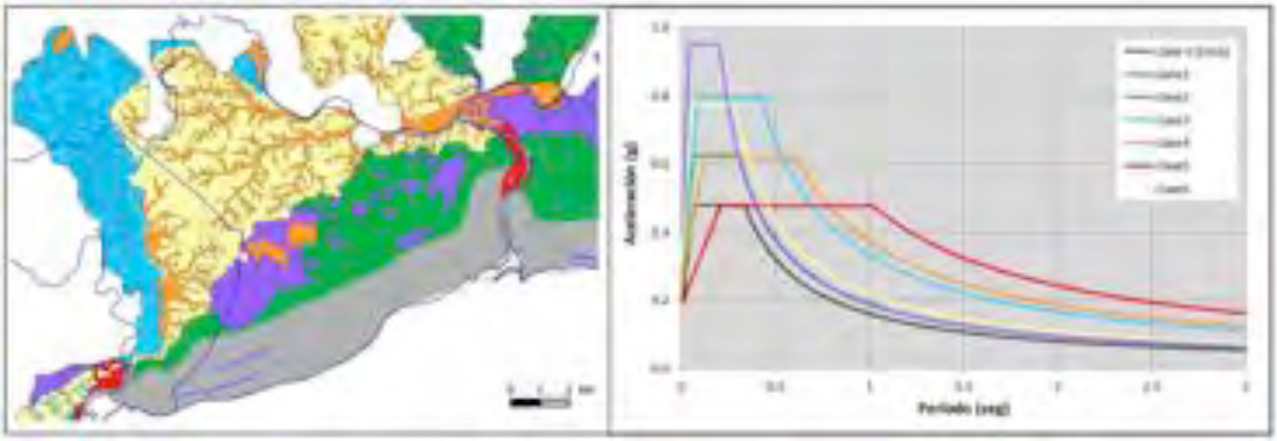
Carte d'intensité macrosismique préliminaire du séisme du 25 Décembre1969 (source : Roody Evariste, 2015)

##############

Intégration des microzonages sismiques en Haïti et en République Dominicaine dans les instruments législatifs visant à réglementer la construction et l'utilisation des sols

Belvaux M. et al. - BRGM

Dans la perspective de proposer des solutions méthodologiques de réduction du risque sismique aux Antilles et dans la Caraïbe, le BRGM mène depuis une vingtaine d'années des actions de recherche appliquée, comme par exemple l'élaboration de scénarios de risque sismique pour les villes les plus exposées. Dans cette présentation, nous nous intéressons à la problématique de transcription dans les codes de construction parasismique d'Haïti et de la République Dominicaine, des résultats des études de microzonage sismique effectuées sur les capitales Port-au-Prince et Santo Domingo. Ces pays ont chacun mis en place un code national de construction inspiré du code international IBC avec une classification des sols et des coefficients d'amplifications F_a et F_v suivant les recommandations NEHRP. En caractérisant des sols pour lesquels les V_{S30} varient entre 150 et 750 m/s, les microzonages sismiques effectués dans ces pays ont permis de fournir des cartographies des zones à effets de site. Ainsi, des spectres de réponse alternatifs aux spectres réglementaires sont préconisés et introduits dans les règlements nationaux : ils sont adaptés aux types de sols rencontrés localement, tout en respectant la formulation préconisée par l'IBC visant à faciliter leur mise-en-œuvre pratique par les bureaux d'études. Un inconvénient est que la définition simple de la forme du spectre ne permet pas de reproduire fidèlement les réponses spécifiques dans toutes les gammes de fréquences. En particulier, la comparaison des facteurs F_a, F_v recommandés par l'IBC et ceux obtenus pour les sols rencontrés à Port-au-Prince ou Santo Domingo, montrent des différences significatives : des F_a spécifiques beaucoup plus forts que ceux de l'IBC dans de nombreux cas, et notamment lorsque le substratum sismique est relativement peu profond. Il n'en reste pas moins que les microzonages fournissent des spectres de réponse spécifiques qui s'avèrent plus adaptés que ceux imposés par les règles nationales.



Carte des classes à effets de site et spectres de réponse associés pour Santo Domingo

Réseaux temps réels, shakemaps, intensités macrosismiques Animateurs: Christophe Sira et Samuel Auclair

Rapidité, volume et précision des témoignages sur les séismes – être proche du temps réel et permettre la diversité des recherches.

Sira C. et al. - EOST, BCSF

Le BCSF collecte par Internet des témoignages individuels sur les effets sismiques depuis 2000 en métropole et 2004 dans les DOM-TOM. Nous avons ainsi recueilli plus de 72 000 témoignages sur la métropole et 8000 sur les DOM-TOM (principalement aux Antilles).
Ils nous parviennent dans les premières minutes et nous permettent d'être alerté de la survenance d'un séisme avant même l'acquisition d'une première localisation. Plus important encore, ils nous informent rapidement des effets sismiques produits (espace affecté, importance et ampleur des effets observés) et nous permettent d'estimer très rapidement des intensités préliminaires (niveaux de sévérité de la secousse).
L'évolution de l'environnement informatique et les enjeux actuels (gestion de crise, nouveaux domaines de recherches) amènent le BCSF a faire évoluer le format de son formulaire après 17 ans d'utilisation tout en préservant une continuité de l'information collectée.
Au-delà du simple usage de ces informations dans l'estimation des intensités, les objectifs demandés peuvent sembler incompatibles. En effet, il faut à la fois accélérer la réponse du témoin (pour être le plus proche possible du temps réel), augmenter le nombre de témoignages (pour que l'échantillon collecté soit le plus représentatif possible des effets produits), mais aussi conserver la précision et la rigueur scientifique de l'information pour autoriser une diversité de recherches à partir de ces données.
Nous montrerons dans cette présentation comment nous procédons pour satisfaire ces objectifs aux enjeux parfois contradictoires et l'apport de cette information devenue en quelques années, grâce à Internet, une information de premier plan.

Gauche: Séisme 9 km à ESE de Goyave (Guadeloupe, 31-01-16, 12H42 locale, prof.127km, M=4,7) selon OVSG - Droite: Séisme de La Rochelle (dépt.17, 28 04-16, 8h46 locale ML=4,9 RéNaSS, prof. 8km)

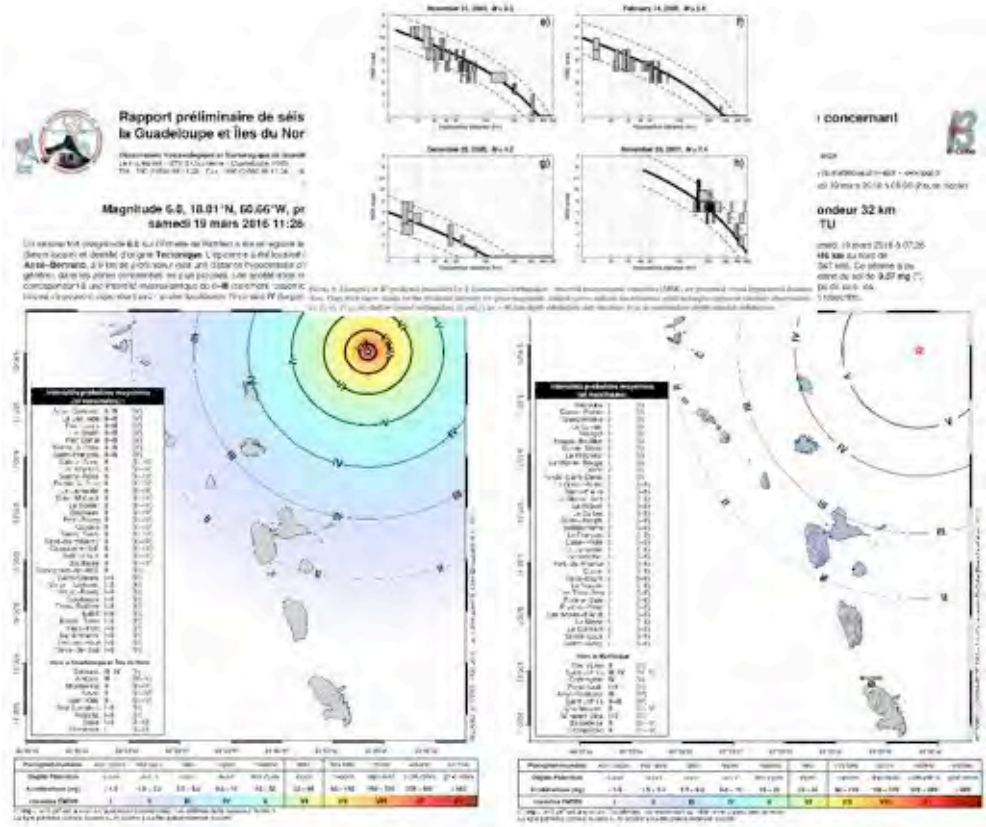
##############

Estimation de l'intensité aux Antilles : loi B3 et communiqués.

Saurel J.M., et al. et les équipes de l'OVSG, de l'OVSM et de l'IPGP

Le 21 novembre 2004 à 7h41, un séisme de magnitude 6.3 frappait l'archipel des Saintes en Guadeloupe. L'observatoire volcanologique et sismologique de Guadeloupe publie une première estimation d'intensité maximale de VI basée sur les tous premiers témoignages, valeur qui s'est révélée sous-estimée après l'enquête de terrain du BCSF qui établit une intensité maximale de VIII . Cette expérience a mis en lumière la nécessité de disposer d'une loi simple permettant d'estimer rapidement les intensités d'un événement à partir de ses caractéristiques de magnitude et localisation : ce sera la loi « B3 » utilisée en production à partir de l'année 2005 (Beauducel, Bazin et Bengoubou-Valérius, 2004, rapport interne IPGP ; Beauducel et al, 2011, CRAS).
Cette loi d'atténuation servira à produire de façon automatique des communiqués enrichis de cartes et de textes pré-formatés, allégeant d'autant le travail des scientifiques de l'observatoire et leur vitesse de réaction en cas de séisme ressenti pour communiquer auprès de la population et des autorités.
Avec une sismicité élevée (plus de 1000 séismes localisés chaque année, hors crise sismique, dans chaque observatoire) et des réseaux toujours plus étendus et performants, la loi B3 a pu être ajustée plusieurs

fois.En outre, avec une moyenne de plus de dix séismes ressentis tous les ans, les retours sur les communiqués ont permis de les améliorer et de les rendre plus lisibles et compréhensibles.
Après avoir utilisé la magnitude de durée jusqu'en 2011/2012, aujourd'hui, la loi d'atténuation B3 et l'estimation des intensités sont essentiellement basées sur le calcul d'une magnitude locale (Mlv ou MLh). De nouveaux algorithmes de calcul de la magnitude de moment pour les faibles magnitudes pourraient apporter une nette amélioration aux estimations rapides, notamment pour des profondeurs de séisme importantes (spectre des ondes S avec source_spec, Satriano et al, 2016, inversion de tenseurs régionaux avec Isola, Gonzalez et al, 2016).
Suivant les travaux en cours du Groupe Technique Shakemap (Schlupp et al, 2016, JST_RAP 2016), l'utilisation de paramètres mesurés du mouvement du sol (PGA, PGV, spectres d'accélérations) ou des témoignages recueillis permettrait d'améliorer grandement la justesse de la représentation des intensités dans un deuxième temps.
Dans cet exposé nous allons présenter l'évolution de la loi B3 conjointement à celle des communiqués des observatoires de Guadeloupe et Martinique. Nous allons aussi présenter ce que pourraient apporter des calculs de magnitude de moment.



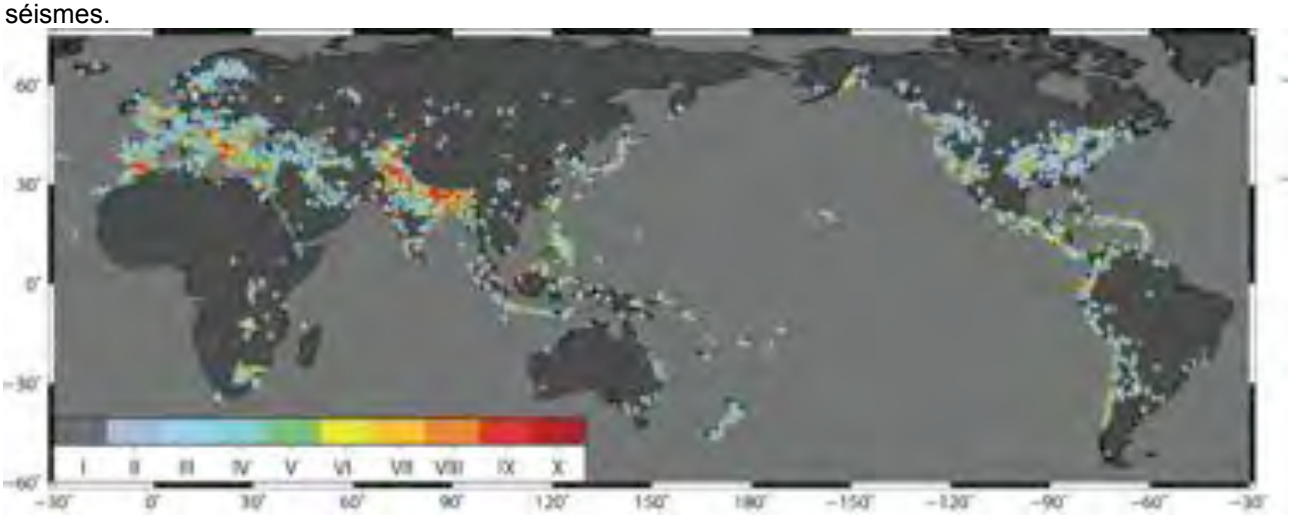
##############

Les imagettes : un moyen rapide et efficace de collecte des témoignages à l'échelle globale

Bossu R. et l'équipe du CSEM

La collecte des témoignages suite à des séismes est essentielle aux études macrosismiques et, lorsqu'elle est réalisée rapidement à apporter des contraintes sur l'étendue et la sévérité des dommages. Dans cette présentation nous présenterons les résultats de la collecte par imagettes telle qu'implémentée sur le site Internet pour appareils nomades et l'application nomade du CSEM. Dans les deux cas, le témoin choisi parmi les 12 imagettes représentant chacune un niveau d'intensité EMS98 celle correspondant el plus à son expérience vécue. Nous montrons que les témoignages sont collectés dans l'ensemble des régions actives du globe ce qui suggèrent qu'une communication visuelle permet de supprimer les barrières linguistiques. En outre, ils sont collectés en plus grand nombre et plus rapidement par imagettes que par les traditionnels questionnaires en ligne.
Nous observons aussi que l'application seule n'est pas suffisante : les sites Internet restent de loin les premiers canaux de collecte lors d'une première secousse dans une région donnée. L'usage de l'application s'amplifie au cours de secousses successives comme lors des répliques. Enfin, les comparaisons effectuées avec les résultats de « Did You Feel it ? » et de 3 jeux de données macrosimiques analysées indépendamment et manuellement montre une bonne cohérence même si une tendance pour les imagettes

du CSEM de sous-estimer les intensités modérées à fortes est visible. Un simple ajustement linéaire est proposé pour compenser cet effet, ajustement qui devra être confirmé sur les données de prochains séismes.



De juillet 2014 à mai 2016, le CSEM a collecté 87 521 témoignages à l'échelle du globe.

##############

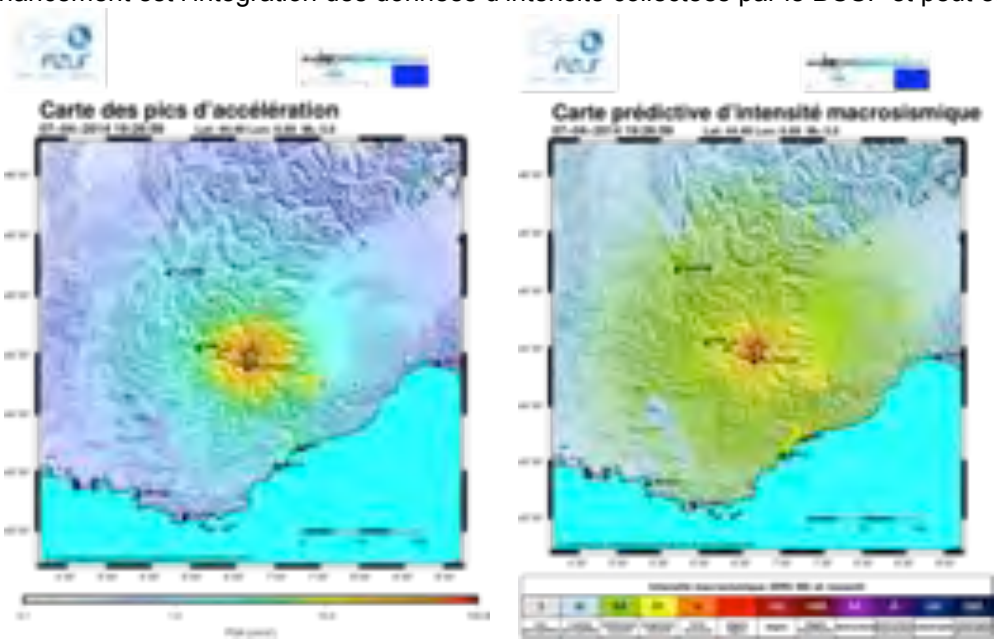
ShakeMaps en temps quasi réel dans le Sud-Est de la France.

Ambrois D., et al., GeoAzur, CEREMA

Dans le cadre du projet INTERREG Alcotra CASSAT, et pour la valorisation de l'échange des données sismologiques à travers la frontière, la production de shake maps à partir du logiciel de l'USGS a été mise en œuvre à Géoazur (OCA). Le calcul est interfacé avec le système SeisComp qui tourne pour la détection et la localisation automatique des séismes dans la région Sud-Est. La présentation de cette implémentation a déjà été faite aux dernières journées du RAP. Nous en ferons donc simplement un bref rappel.

Nous avons sélectionné une loi d'atténuation dans la littérature. Mais le recul pour la validation sur la région est insuffisant : le séisme de Barcelonnette d'avril 2014 (M=5) a servi de support à la mise en œuvre. Mais depuis, les événements sur lesquels des shakemap ont été calculées sont peu nombreux, et de magnitude d'au moins une unité inférieure. Les effets de site sont pris en compte par une estimation de Vs30 à partir de la topographie pour la zone globale ; mais, lorsque c'est pertinent nous produisons une carte zoomée sur la zone Nice et basse vallée du Var où le facteur d'amplification est déduit de l'ensemble des mesures disponibles dans les études du CEREMA. Enfin les données aux stations modulent ces informations pour constituer une carte finale. Nous utilisons l'option « bias » qui permet une adaptation de la magnitude.

Les cartes produites (pga et pgv) sont affichées sur la page web correspondant à l'événement. Un GUI permet une révision rapide par un sismologue. Une conversion en intensité est faite pour produire une carte en intensité dont la présentation a été adaptée aux couleurs utilisées par le BCSF. L'étape suivante, en attente de financement est l'intégration des données d'intensité collectées par le BCSF et peut être l'INGV.

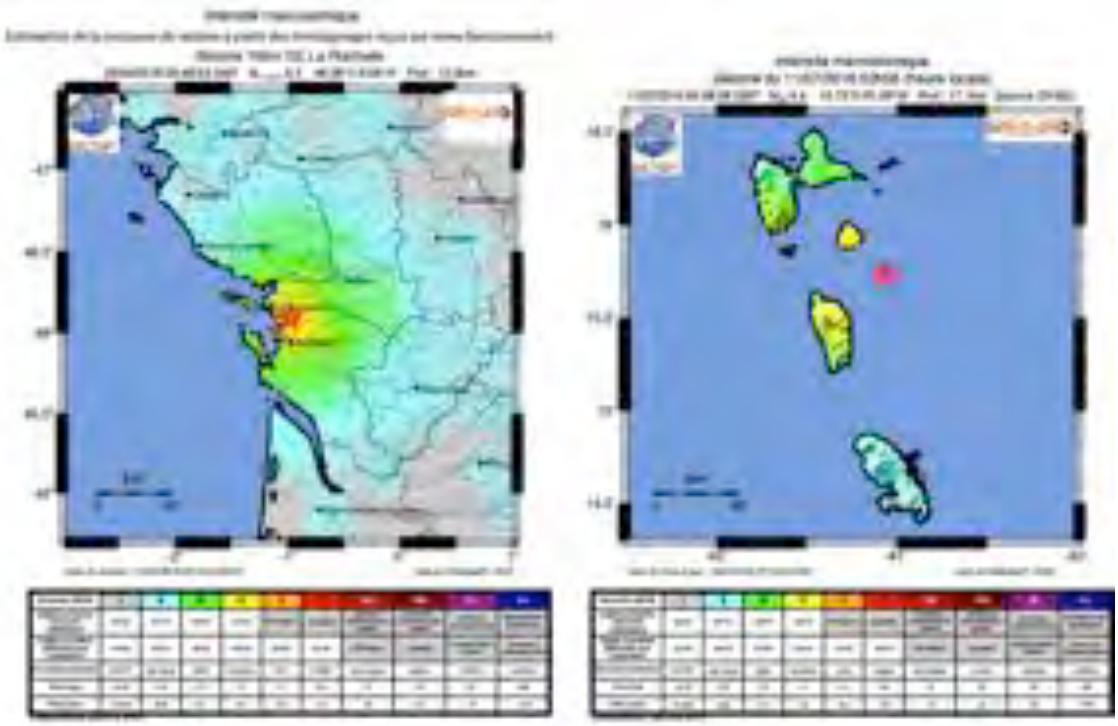


##############

Vers une ShakeMap™ nationale à partir des données instrumentales et macrosismiques (Métropole et Antilles).

Schlupp A. BCSF et le Groupe de Travail RAP "ShakeMap"

Nous disposons de plus en plus de données temps quasi réel, que ce soit des données instrumentales (accéléromètres et vélocimètres RESIF, dont RAP et RLBP, autres réseaux) ou macrosismiques (intensités issues des témoignages collectées au BCSF) mais celles-ci restent très peu utilisées pour des ShakeMap™ alors qu'elles ont un apport important pour la connaissance de l'étendu de la secousse et de son intensité (PGA, PGV, PSA, Intensité macrosismique). En effet, ces données permettent de passer d'une modélisation théorique, basée sur une localisation, magnitude, et des GMPE, IPE, (du type de la loi B3 en place aux Antilles par les observatoires de l'IPGP depuis 2005, voir Saurel et al, ce volume) et GMICE vers une estimation plus fine, basée sur des mesures et observations de terrain, permettant de recaler des lois "générales" à la particularité d'un évènement.
Deux initiatives régionales existent déjà, SisPyr couvrant le massif des Pyrénées depuis 2012 (intégrant des données instrumentales et macrosismiques notamment du BCSF) et CASSAT couvrant la région SE de la France métropolitaine depuis 2015 (intégrant des données instrumentales). Un groupe de travail RAP a été mis en place début 2015, coordonné par le BCSF, dont l'objectif est d'optimiser les paramètres de calcul d'une ShakeMap™ de référence nationale pour l'ensemble de la France métropolitaine et des Antilles françaises, à partir des données instrumentales et macrosismiques. Ce projet s'insère depuis 2016 dans l'axe transverse sismicité de RESIF (action 4). Les membres de ce groupe de travail sont issus de plusieurs organismes et OSUs: BRGM, CEA, CEREMA, EOST, IPGP (OVSG-OVSM), OCA, OMP, OSUG, OSUNA. Des discussions entre ce GT et nos partenaires frontaliers devront se faire pour la mise en place d'échanges de données concernant des évènements affectant plusieurs pays.
Depuis le printemps 2016, le calcul de la ShakeMap™ est opérationnel sur le site du BCSF (www.franceseisme.fr) pour les séismes faisant l'objet d'une alerte en France et depuis cet automne pour ceux générant des intensités IV et plus aux Antilles. Cela a permis depuis d'identifier divers biais et corrections nécessaires. Notamment on a pu observer des biais parfois importants liés aux magnitudes diffusées, mais qui sont corrigés dès l'introduction de données caractérisant la secousse (instrumentales ou macrosismiques). La localisation a un impact fort sur le résultat. Les lois utilisées (GMPE, IPE) doivent encore être optimisées ainsi que leur régionalisation. Enfin, une intégration plus précise des effets de site est nécessaire. Les données macrosismiques (Intensités issus des témoignages au BCSF) ont un impact fort du fait de leur densité et répartition spatiale. L'emploi de GMICE récemment publiées donne une bonne cohérence entres les données instrumentales et macrosismiques. Les résultats sur les séismes ayant eu lieu depuis début 2014 seront présentés et discutés. Les conclusions issues des travaux du "GT ShakeMap", important par sa diversité, complémentarité, expérience et implication dans les améliorations, seront présentées.



Exemple de ShakeMap réalisées pour les séismes de La Rochelle (28 avril 2016) et du SE de la Guadeloupe (11 juillet 2016)

##############

Retour d'expérience des ShakeMaps Sispyr autour de Lourdes

Bertil D., *BRGM* et l'équipe Sispyr.

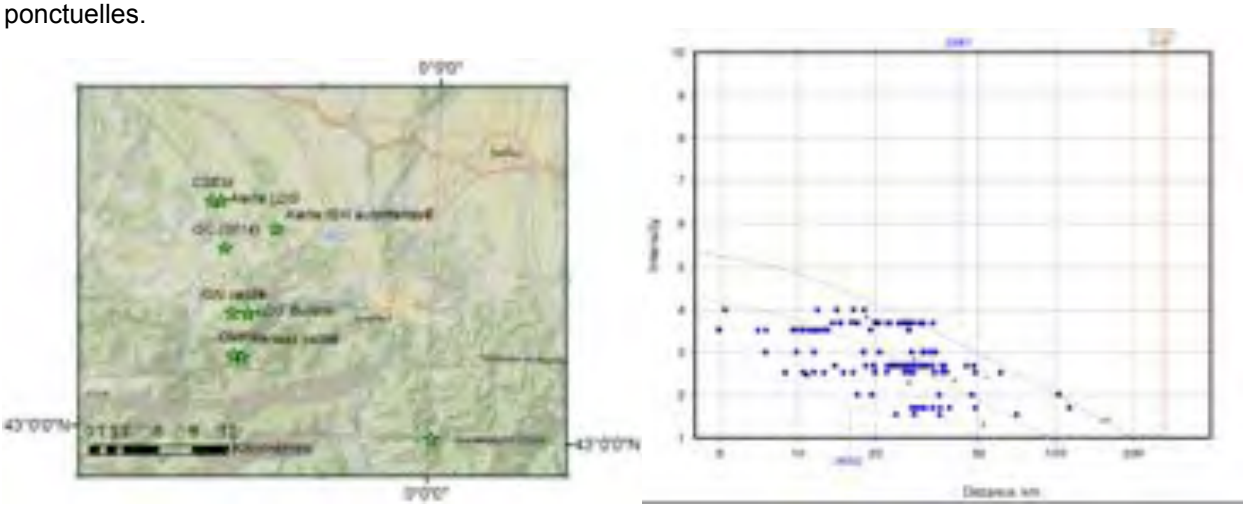
75 ShakeMaps ont été produites dans les Pyrénées depuis 4 ans pour des magnitudes entre 3.0 et 4.5 avec l'outil monté par le projet Sispyr. Pour la zone de Lourdes, où se sont produits les séismes les plus forts, nous disposons de 16 Shakemaps. Des écarts systématiques de localisation d'épicentre existent entre les localisations rapides (Localisation automatique de l'IGN-Madrid à T0+2 mn, Localisation du LDG à T0+20mn) et les localisations finales des différents organismes (IGN, LDG, RENASS…). Nous avons regardé si de tels écarts de localisations pouvaient induire des erreurs significatives dans les ShakeMaps finales obtenues à T0+12h.

Pour les magnitudes proches de 4.0, les intensités macrosismiques de cette région couvrent les courtes distances jusqu'à 50 km. Les données instrumentales sont peu nombreuses dans cette gamme de distance (2 à 5 stations) et couvrent plutôt les distances jusqu'à 200 km. Les deux sources de données sont complémentaires et cohérentes entre elles. Les courbes de régression montrent une forte variabilité de l'intensité macrosismique pour une distance épicentrale donnée, variabilité qui ne se réduit pas avec les localisations finales validées.

La ShakeMap utilise les données d'observations de 2 façons :

- globalement, en appliquant un « biais » qui ajuste les modèles d'atténuations utilisés à l'ensemble des observations proches de l'épicentre,
- ponctuellement avec des pondérations sur les données dans un rayon de 10 km autour du point de calcul.

Les erreurs de localisations observées (~10 km) auront peu de conséquences sur la ShakeMap finale quand les données d'observations sont nombreuses et bien réparties spatialement. Mais des écarts d'un ordre de grandeur d'intensité (ou plus, si effets de site) peuvent apparaitre dans les zones sans observations. Il faut rappeler que l'ensemble des approximations faites par la démarche ShakeMap (utilisation de localisation automatique, modèle d'amplifications d'effets de site, modèle d'atténuation, valeurs d'intensité d'une commune ramenées à un point) ne donne qu'un aperçu du mouvement du sol très moyenné à courte distance, mais suffisant pour une vision globale de la situation peu de temps après la secousse. Néanmoins, pour une vision plus détaillée à courte distance de l'épicentre (moins de 20 km), il faudrait vérifier que les lissages et approximations de la méthode ne masquent pas trop fortement certaines observations ponctuelles.



Epicentres du séisme du 30/12/2012 (M_{Ldg}=4.7) et données d'observations utilisées

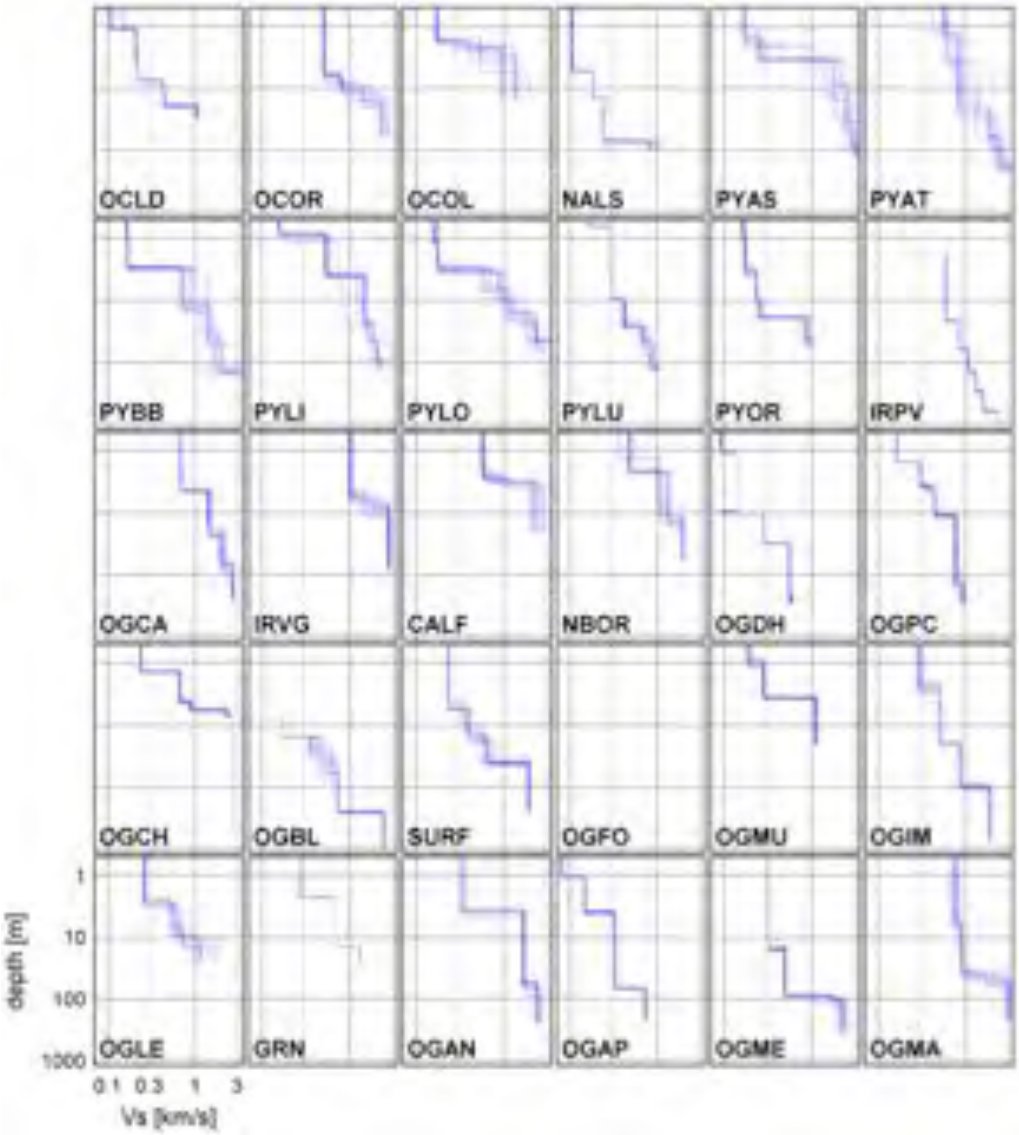
##############

Effets de surface: les effets de site, effets induits, leur variabilité, les effets non linéaires Animateur: Etienne Bertrand

Caractérisation des conditions de site des stations : où en est-on ? (Résultats, méthodologie, perspectives)

Hollender F. et le groupe "caractérisation de site" du RAP, CEA, ISTerre, EOST, OMP, BRGM

Des actions de caractérisation ont débuté en 2012 pour établir les classes de sols, V_{S30} et profils de vitesse des sites accueillant des stations accélérométriques du RAP. Ces campagnes utilisent les méthodes basées sur la mesure des vitesses de propagation des ondes de surface, permettant d'établir des courbes de dispersion (vitesse de phase en fonction de la fréquence) puis d'inverser ces dernières en profils de vitesse.
En 2012, 9 stations dans les Pyrénées, 3 stations en Auvergne et une station niçoise avaient fait l'objet de mesures ; en 2014, 20 stations Alpes et « PACA » se sont ajoutées à la liste, complétées en 2016 par 8 stations « Nord-Est » (dans la cadre d'un financement RESIF). C'est donc aujourd'hui 41 stations RAP qui ont bénéficié de mesures.
Ces campagnes de mesure successives nous ont permis de progresser sur le plan méthodologique, que ce soit pour l'organisation logistique des mesures elles-mêmes, mais aussi et surtout pour le traitement des données. Si les premières mesures ont fait l'objet de nombreuses « reprises de traitement », la dernière campagne a pu être traitée (et donc produire des résultats) en quelques semaines grâce à une certaine systématisation des traitements à réaliser et aux retours du projet « InterPacific ».
Par rapport aux études précédentes (notamment le projet RAP-ID qui avaient valorisé toutes les mesures alors disponibles, mais qui se basaient souvent sur des méthodes plus indirectes ou sur des mesures relativement distantes des stations elles-mêmes), la tendance générale va à une diminution des V_{S30} estimées et à un certain nombre de « déclassement » (par exemple station précédemment considérée en classe A qui passe désormais en classe B).
Il s'agira d'échanger pour établir quelles sont les stations « prioritaires » à envisager pour la campagne de mesures 2017.



Profils de vitesse estimés pour 30 stations RAP (campagnes 2012 et 2014). Attention, pour pouvoir présenter toutes les stations avec la même échelle, nous avons utilisé une échelle log-log.

##############

Propriétés des glissements de terrain cosismiques

Meunier P., ENS Paris.

Les séismes continentaux déclenchent de très nombreux glissements de terrains dans leurs zones épicentrales. Depuis le milieu des années 80, l'imagerie satellitaire ou aérienne permet une cartographie relativement précise de ces réponses « érosionnelles », ouvrant l'accès à l'étude quantitative. Je tenterai de présenter un ensemble exhaustif des résultats issus de l'étude de ces catalogues. Je présenterai les relations entre les ondes sismiques (PGA, atténuation) et la quantité de glissements cosismiques dans la zone épicentrale. Je traiterai ensuite des effets de site topographiques qui concentrent les glissements de terrains autour des crêtes topographiques. J'aborderai enfin l'aspect temporel de la réponse érosionnelle en mettant en évidence la prolongation de cette réponse sur une durée de plusieurs années après le séisme. La généralisation de ces relations permet d'établir une loi générale de production de glissements de terrain en fonction du moment sismique et des paramètres locaux (gradient topographique, lithologie). A partir de cette relation, j'aborderai finalement la question des bilans de masse des séismes (érosion versus surrection) et j'introduirai les possibles conséquences que ces résultats posent sur l'évolution topographique des piedmonts à plus long terme.

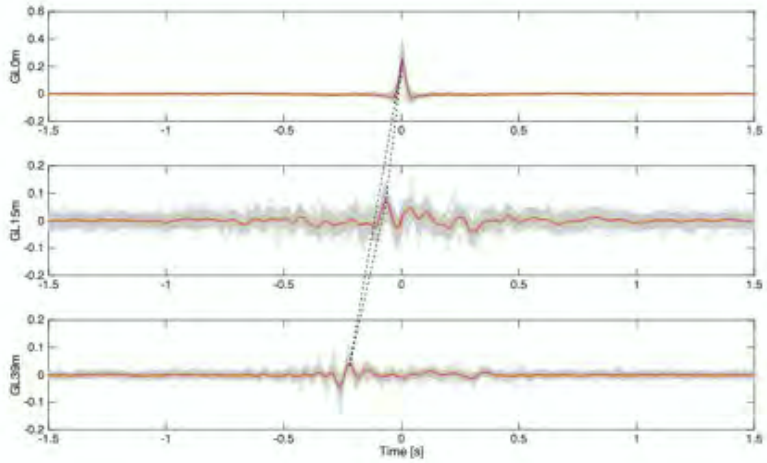
Multiples glissements de terrain activés pendant le séisme du Finisterre, Papouasie N−G (MW=6.9 1993). M. Tutton, PNG Geological Survey.

##############

Prediction of non-linear site response using downhole array data and numerical modeling: the Belleplaine (Guadeloupe) case study

Mercerat E.D. et le groupe RAP γ-G - CEREMA, IFSTTAR, ISTerre, CentralSupélec, IRSN - ***Projet financé par l'AO du RAP***

In this study, we analyze the acceleration time histories data at the Belleplaine (Guadeloupe, French West Indies) vertical array, recorded between 2008 and 2014, to evaluate the seismic response of sediments. First, we apply the seismic interferometry by deconvolution method to compute the in-situ shear wave velocity between the sensor at the surface and the two shallow sensors located at GL-15m and GL-39m depth. The efficiency of this method is discussed by studying the variability of the velocity profile obtained and comparing with the in-situ geophysical survey of the site. Computed strains between sensors remain very weak, lower than 10^{-5}, meaning that nonlinearities are not expected for these events. Moreover, the small dispersion of shear wave velocities values deduced from seismic interferometry may be related to the elastic behavior of the soil column. Furthermore, the transfer functions between each sensor combination are inverted to obtain a new velocity profile compatible with the geological knowledge of the site. The lag times calculated by seismic interferometry are then used to constrain random perturbations of the inverted velocity profile, allowing to study the variability of the 1D soil response. Finally, using strong motion events from a worldwide dataset, we numerically predict the nonlinear response of the site based on shear wave velocity variation and the strain proxy computed by the particle velocity versus shear wave velocity ratio. We conclude that seismic interferometry by deconvolution is a robust and accurate solution to help extracting the shear wave velocity profile and to monitor the soil nonlinear response. This technique can be used when strong earthquakes will be recorded at this experimental site in order to track and assess nonlinear effects in the soil column.



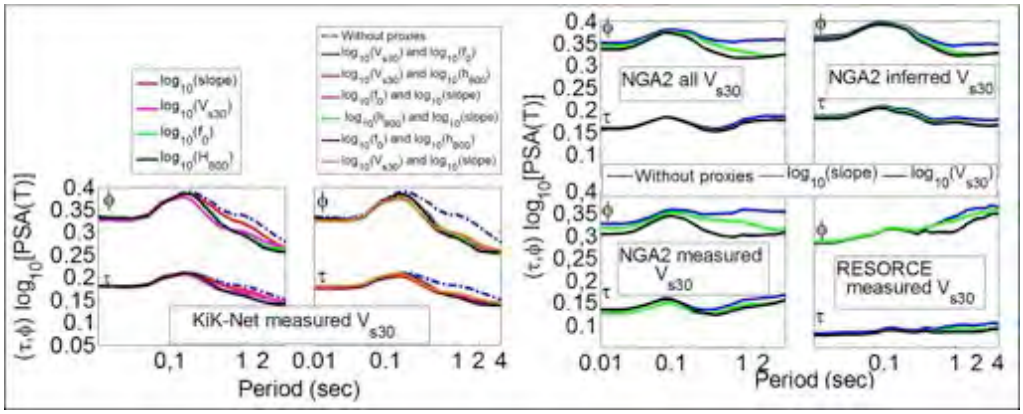
Seismic interferometry by deconvolution results at LIQF. Gray line is for each event and red line corresponds to the mean impulse response. Dashed lines are the time lag picking used for computing the shear waves velocity.

##############

GMPEs et Conditions de site : performances comparées de différents proxies de site

Derras B. et al., Isterre, GFZ, Université de Potsdam, Université de Tlemcen

L'objectif principal de ce travail est de tester les performances des différents proxies des conditions de site (PCS), utilisés dans les GMPEs, à réduire la variabilité aléatoire du mouvement sismique (VAMS). Les PCS utilisés dans cette étude sont V_{s30} (mesurée ou estimée), la pente topographique (« slope »), la fréquence prédominante du site (f_0) et la profondeur à laquelle la vitesse des ondes de cisaillement dépasse les 800 m/s (H_{800}). Trois jeux de données sont considérés, à savoir RESORCE, NGA-West 2 et KiK-Net. Chaque PCS est d'abord considéré individuellement, puis couplé avec un autre PCS (« 2PCS »). Les performances de chaque PCS ou 2PCS sur la VAMS sont mesurées en relatif sur la base des écarts types associés aux GMPEs, et plus particulièrement de la variabilité intra-événement. Ces GMPEs sont dérivées avec une approche par réseau de neurones artificiels intégrant le modèle à effet aléatoire. Ces GMPEs relient le PGA, PGV et les pseudo-spectres en accélération PSA à un nombre réduit de paramètres d'entrée : magnitude du moment (M_W), distance Joyner-Boore (R_{JB}) et PCS ou 2PCS. Il en ressort que quelque soit le jeu de données, la médiane des GMPEs n'est quasiment pas affectée ni par la qualité de V_{s30} (mesurée ou estimée) ni le type du PCS, dont l'effet est cependant très notable sur la variabilité intra-événement. L'utilisation de valeurs V_{s30} simplement "estimées" engendre une perte de plus de 15 % sur la réduction de la VAMS par rapport à des mesures effectives de V_{s30}. Cette dernière approche s'avère la plus performante parmi les 4 PCS à courte période, tandis qu'à longue période ce sont f_0 et H_{800} qui montrent les meilleures performances ; le paramètre « slope » ne doit être considéré que comme un pis-aller en l'absence de toute autre information quantitative, et s'avère être un indicateur essentiellement basse fréquence. En revanche, il est remarquable de constater que tous les 2PCS permettent une réduction significative de la VAMS, avec une attention particulière pour les deux 2PCS [V_{s30}-f_0] et [f_0-slope] ce dernier étant de loin le plus économique à obtenir.

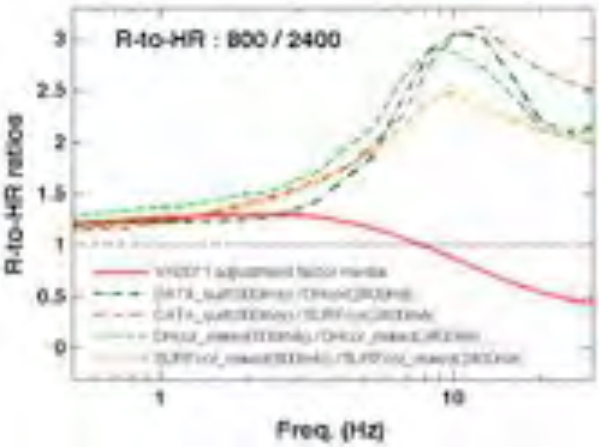


Sensibilité de la variabilité aléatoire aux proxies des conditions de site utilisés comme entrés dans les modèles neuronaux

##############

Prédiction des mouvements au rocher très raide : différences entre données KiKnet et approche "ajustement hôte-cible"
Laurendeau A. et al. - ISTerre et CEA - *POSTER*

L'évaluation de l'aléa sismique pour des sites au "rocher dur" (V_{S30} entre 1000 et 3000 m/s) est nécessaire soit pour les installations construites sur de tels sites, soit pour estimer le mouvement de référence pour des sites alluviaux dont le substratum est très rigide. Comme la majorité des "EPMS" (équations de prédiction de mouvement du sol ou GMPEs) sont établies à partir de jeux de données présentant très peu de tels sites, l'approche actuellement utilisée pour de telles estimations consiste à faire des ajustements "hôte-cible" (H2T = host-to-target) basés principalement sur des valeurs de V_{S30} et κ_0. Dans le cadre du projet SIGMA, une autre approche a été testée pour estimer les mouvements au rocher très dur via un traitement original des enregistrements japonais KiK-net obtenus sur sites raides (VS30 > 500 m/s). Les paires d'enregistrements surface / profondeur, ainsi que la connaissance du profil de vitesse, ont permis de dériver deux jeux de données virtuelles "rocher dur affleurant" correspondant à des sites ayant des vitesses dans l'intervalle [1000 - 3000 m/s]. Ces deux corrections sont basées d'une part sur les enregistrements en profondeur ("DATA_dh")corrigés des effets d'interférence ("DHcor"), et d'autre part sur une déconvolution des enregistrements de surface ("DATA_surf") sur la base du profil de vitesse connu et de simulations 1D ("SURFcor"). Chacun de ces 2 jeux de données virtuelles "rocher dur affleurant" a ensuite servi de base à l'établissement d'EPMS avec des formes fonctionnelles simples, en utilisant comme proxy de site la vitesse des ondes S en profondeur (V_{SDH}), allant de 1000 à 3000 m / s. Les deux jeux conduisent à des prédictions très similaires, qui s'avèrent beaucoup plus faibles à hautes fréquences (f> 10 Hz) que celles obtenues avec l'approche H2T classique (d'un facteur allant jusqu'à 3-4). Ces différences diminuent quand la fréquence diminue et deviennent négligeables à basse fréquence (f <1 Hz).
Ces différences importantes sont liées aux hypothèses implicites ou explicites de chacun des deux types d'approche. Notre interprétation actuelle privilégie l'existence d'une amplification haute fréquence significative en surface de sites raides à "rocheux standard" liée à des formations peu épaisses à vitesse modérée. Non seulement cette amplification est de type résonante et n'est pas correctement prise en compte par l'approche en impédance (QWL = "quart de longueur d'onde") utilisée dans les modèles stochastiques sous-jacents à l'approche en ajustement H2T, mais cela peut aussi biaiser les mesures de kappa, et donc les corrélations (V_{S30}- κ_0) implicitement utilisées par cette même approche.



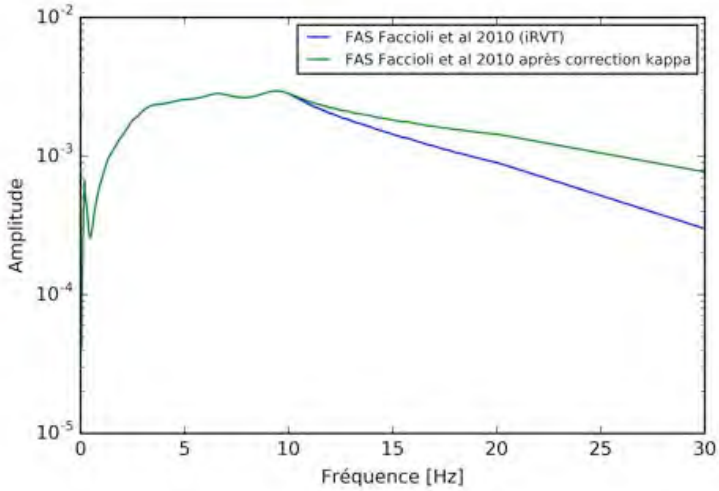
Rapports entre mouvements prédits au "rocher standard" (R, VS = 800 m/s) et au "rocher dur" (HR, VS = 2400 m/s) pour un scénario de séisme (Mw=6.5, Rrup = 20 km) selon différentes approches. En rouge: approche H2T avec les relations V_{S30}-κ_0 de VanHoutte et al (2011); en traits pointillés de différentes couleur avec les GMPE "rocher dur" établies à partir des différents jeux de données virtuelles (DHcor, SURFcor, éventuellement regroupés avec les enregistrements de surface DATAsurf)

##############

Host to target : enjeu et questions
Provost L. et al. - IRSN - *POSTER*

Une manière d'obtenir une estimation du mouvement du sol est d'utiliser les équations prédictives de ce mouvement (ou GMPE). Il existe un nombre important de ces équations, qui ont été développées en exploitant des bases de données du mouvement sismique provenant de régions différentes dans le monde. Au cours des dernières années, une méthode a été mise en place afin de pouvoir adapter une GMPE calibrée pour une région spécifique du monde à un site se trouvant dans une autre région. Cette méthode est appelée le host to target (HTT).
Le HTT, dans sa formulation d'origine (Campbell 2003), prend en compte diverses corrections, dont une correction liée à la vitesse caractéristique du milieu et une correction associée au paramètre kappa, qui

représente l'atténuation du mouvement sismique à hautes fréquences. Dans cette présentation, seules ces deux corrections seront évoquées.
Les GMPEs testées ici seront des GMPEs établies principalement sur des données non- européennes. Les résultats de l'application du HTT sur celles-ci seront comparés à des signaux du mouvement sismique réels, enregistrés sur des stations du RAP à Nice lors du séisme du 25 février 2001. Les questions qui se sont posées lors de la mise en œuvre de ces corrections, en particulier la correction liée au paramètre kappa, seront aussi présentées et discutées.



FCorrection du paramètre kappa sur l'amplitude du spectre de Fourier calculée avec la « inverse random vibration theory » (iRVT) à partir du spectre de réponse issu de l'équation de Faccioli et al (2010), pour un séisme ayant une distance de rupture de 30km, une magnitude Mw de 4.5, pour une classe de sol A (Eurocode 8) et un mécanisme au foyer de type inverse.

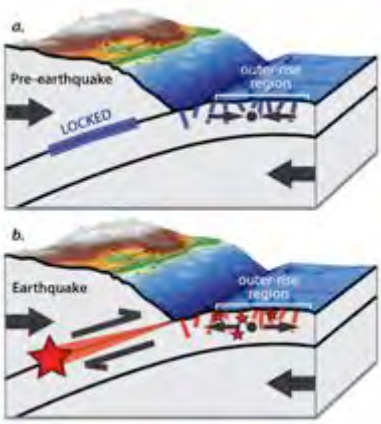
###############

Source, atténuation, simulation des mouvements du sol Animateur: Mathieu Causse

Les répliques "outer-rise" pour détecter la rupture superficielle des zones de subduction.

Sladen et al. - GeoAzur

Les "tsunami-earthquakes" sont des séismes particulièrement efficaces pour générer des ondes de tsunami et dont le spectre sismique est nettement décalé vers les basses fréquences. Ils représentent une menace particulière pour les populations locales car ils ne génèrent pas les fortes secousses sismiques qui permettent habituellement d'anticiper le risque tsunami. Il est communément admis que les caractéristiques des "tsunami earthquakes", à savoir spectre décalé vers basses fréquences et vitesse de rupture lente, sont liées à une propagation dans la partie la plus superficielle de l'interface de subduction, milieu composé de roches faiblement consolidées. Leur existence va donc à l'encontre de l'idée largement répandue que la partie superficielle de l'interface de subduction ne puisse pas accumuler de contraintes. Les "tsunami earthquakes" sont de magnitude relativement modérée (Mw<8), mais les études du séisme magnitude M9.0 au Japon en 2011, ont montré que cette partie superficielle de l'interface de subduction pouvait également être le lieu de déplacements colossaux (~60m). Se pose donc, de manière générale, la question de l'ubiquité des ruptures superficielles dans les zones de subduction : toutes les zones de subduction peuvent-elle accumuler des contraintes dans leur partie superficielle et générer des séismes superficiels majeurs ? Pour répondre à cette question, nous avons analysé, dans les zones de subduction, la distribution spatiale des répliques (catalogues USGS et ISC) d'une douzaine de grands séismes interplaques très bien caractérisés. Les résultats montrent un lien systématique entre la rupture superficielle de l'interface de subduction et la présence de répliques au sein de la plaque océanique juste avant son passage en subduction : la zone dite "outer-rise". Ces séismes "outer-rise", détectés depuis plusieurs décennies par les réseaux mondiaux, offrent donc l'opportunité de quantifier la proportion de grands séismes ayant rompu l'interface de subduction jusqu'en surface, et d'explorer leur répartition géographique globale et dans le temps.



##############

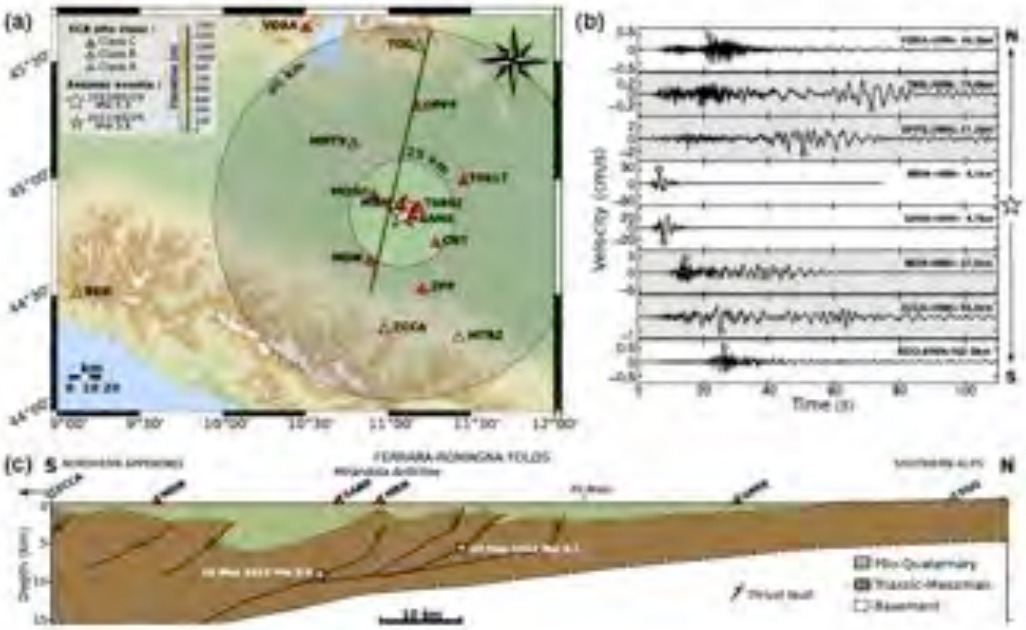
Utilisation des répliques pour caractériser la propagation des ondes en champ proche. Application à l'étude de la rupture du séisme d'Emilia Romagna (2012, Mw=5.9)

Causse et al. - ISTerre, GeoAzur, INGV

En mai-juin 2012 a eu lieu la plus forte crise sismique jamais enregistrée dans la plaine du Po (Italie du Nord) depuis le développement des réseaux accélérométriques digitaux. Cette crise s'est déroulée dans la région d'Emilia Romagna, causant la mort de 27 personnes et engendrant des dégâts importants, notamment sur les monuments historiques. Le premier choc principal a eu lieu le 20 mai (Mw=6.1), suivi d'un second choc le 29 mai (Mw=5.9) et de milliers de répliques. Ce dernier choc a été particulièrement bien enregistré, par un réseau accélérométrique temporaire installé par l'Institut National de Géophysique et Volcanologie italien (INGV) autour de la zone épicentrale, et par les stations du Réseau Accélérométrique National (RAN).

Le contexte géologique de la région d'Emilia Romagna est unique, la plaine du Po étant l'un des plus grands bassins sédimentaires au monde. La forte variabilité spatiale de l'épaisseur sédimentaire résulte en un champ d'onde complexe, marqué par la présence d'ondes de surface de forte amplitude (Figure 1). Cette complexité explique en partie la grande difficulté à modéliser les mouvements forts, même à des fréquences relativement faibles (<1 Hz), et par conséquent à obtenir des informations robustes sur la propagation de la rupture sur la faille.

Dans cette étude, nous proposons d'utiliser les nombreuses répliques enregistrées pour construire un modèle de propagation des ondes entre la faille et les stations situées en champ proche pour le séisme du 29 mai (13 stations situées à des distances épicentrales inférieures à 20 km). Chaque réplique est d'abord déconvoluée de son effet de source de manière à extraire la réponse impulsionnelle du milieu. Etant donnée la distribution spatiale hétérogène des répliques, une interpolation est réalisée afin de caractériser la propagation des ondes entre chaque point de la faille et chaque station. Le modèle de propagation ainsi construit, nous proposons d'analyser la propagation de la rupture sur la faille à partir de l'inversion des données accélérométriques. L'inversion est réalisée à partir d'un algorithme de type MCMC (Monte Carlo Markov Chain), afin de caractériser la distribution du glissement et la vitesse de propagation de la rupture.



Vitesses du sol enregistrées dans le plaine du Po pour le séisme d'Emilia-Romagna du 29 mai 2012 (Mw=5.9). D'après Dujardin et al. (2016).

###############

Physics-based broadband ground motion simulations in near fault conditions: the L'Aquila (Italy) and the Upper Rhine Graben (France-Germany) case of studies

Del Gaudio et al. - IRSN

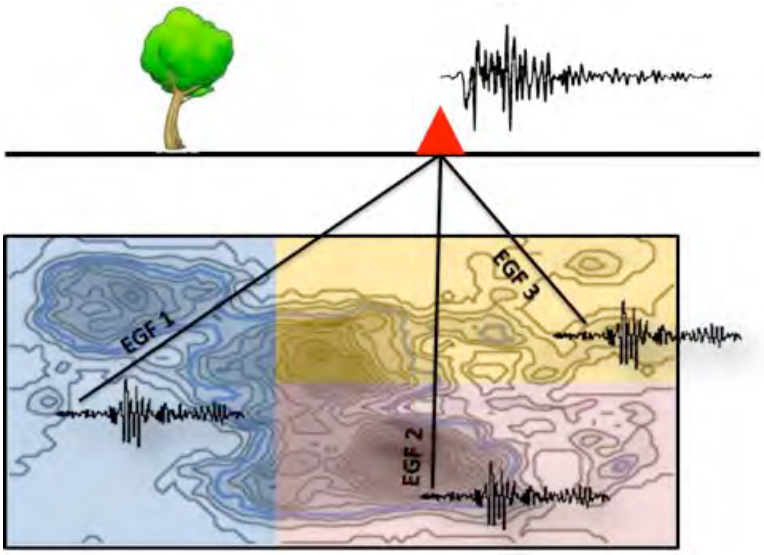
Predictions of realistic ground motion for potential future earthquakes are always an interesting task for seismologists and are also the main objective of seismic hazard assessment. While, on one hand, numerical simulations have become more and more accurate and several different techniques have been developed, on the other hand ground motion prediction equations (GMPEs) have become a powerful instrument (due to great improvement of seismic strong motion networks providing a large amount of data). Nevertheless GMPEs do not represent the whole variety of source processes and this can lead to incorrect estimates especially in the near fault conditions because of the lack of records of large earthquakes at short distances. In such cases, physics-based ground motion simulations can be a valid tool to complement prediction equations for scenario studies, provided that both source and propagation are accurately described.

We present here a comparison between numerical simulations performed in near fault conditions using two different kinematic source models, which are based on different assumptions and parameterizations: the "k^{-2} model" and the "fractal model".

Wave propagation is taken into account using hybrid Green's function (HGF), which consists in coupling numerical Green's function with an empirical Green's function (EGF) approach. The advantage of this technique is that it does not require a very detailed knowledge of the propagation medium, but requires availability of high quality records of small earthquakes in the target area.

The first application we show is on L'Aquila 2009 M 6.3 earthquake, where the main event records provide a benchmark for the synthetic waveforms. Here we can clearly observe which are the limitations of these techniques and investigate which are the physical parameters that are effectively controlling the ground motion level.

The second application is a blind test on Upper Rhine Graben (URG) where active faults producing micro seismic activity are very close to sites of interest needing a careful investigation of seismic hazard.



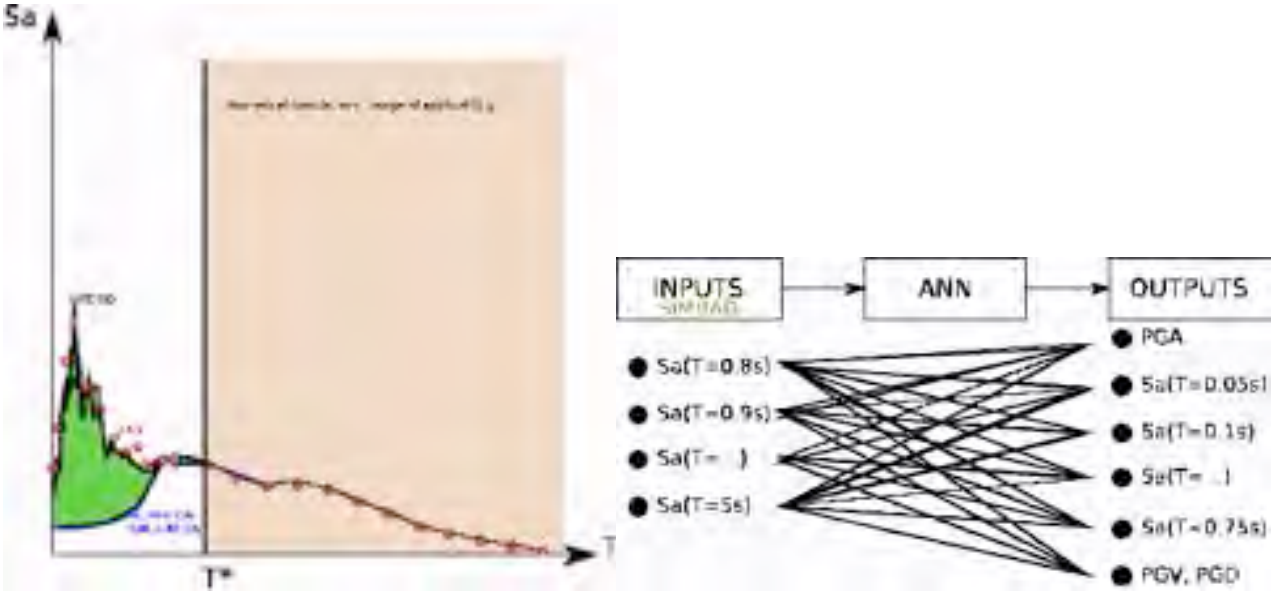
##############

Génération de signaux synthétiques par couplage de simulations numériques et réseaux de neurones artificiels

Gatti et al. - Politecnico di Milano et CentraleSupélec (Université Paris-Saclay) - *POSTER*

Dans cette étude, une nouvelle stratégie est proposée pour générer des signaux synthétiques de mouvement fort en large-bande. La méthodologie couple les résultats de deux analyses différentes et indépendantes: (1) les formes d'onde obtenues par simulation numérique déterministe du scénario sismique (Physics-Based Simulation, PBS) et (2) les spectres de réponse estimés par Réseau de Neurones Artificiel (RNA). Les traces en temps obtenues avec PBS incarnent les effets de propagation dus au modèle sismologique à l'échelle régionale (la source, le parcours de propagation et les effets de site), mais elles sont limitées aux basses fréquences (BF) (jusqu'à 1.5-2 Hz) à cause des limites computationnels. D'autre part, le RNA est entraînée sur une base de données hétérogène et elle prédit la réponse spectrale à courte période (CP) (points rouge en Figure 1a), où les valeurs du PBS n'ont aucun sens (du aux effets de dispersion numérique, cf. ligne bleu en Figure 1a). Cette prévision est contrainte aux ordonnées spectrales à longue période (LP) données par le PBS. En fait, les synapses et neurones du RNA sont entraînés en prenant en input les ordonnées spectrales *Sa*-LP de la base de données de référence (Figure 1b) et calés sur les *Sa*-CP des ces enregistrements. Avant l'application du RNA, les simulations numériques sont enrichies à haute-fréquence (HF), par hybridation avec des synthétiques obtenues indépendamment, notamment par méthodes empiriques / stochastiques. Le spectre de réponse hybride (ligne noire en Figure 1a) est alors calé itérativement (*spectral-matching*) pour le faire correspondre aux prédiction CP du RNA. L'étape d'hybridation classique est nécessaire juste pour augmenter l'efficacité du spectral-matching sur le prédictions de *Sa*-CP, qui conservent la cohérence spatiale et les effets de champ-proche montrés (à BF) par le simulation numérique.

Les cas d'étude présentés ont été obtenus en appliquant la méthodologie aux simulations numériques faites avec le code numérique de propagation d'onde SPEED (SPectral Elements in Elastodynamics with Discontinuous Galerkin [1]), basée sur la méthode des éléments spectraux, pour les tremblements de terre italiens de L'Aquila 2009 (Mw 6.3) et de la Plaine du Po' (Emilia) 2012 (Mw 6.0), présentés réspectivement par Smerzini et Villani [2] et Paolucci et al. [3].



(a) (b)

(a) Spectre de réponse synthétiques générés par simulation numérique (ligne bleu), comparé aux prédictions faites par Réseau de Neurones Artificiel (points rouges). La ligne noire représente le spectre de réponse hybride, obtenu par couplage entre simulations numériques fiable à basses fréquences avec synthétiques à hautes fréquences, générés par méthodes empiriques où stochastiques.

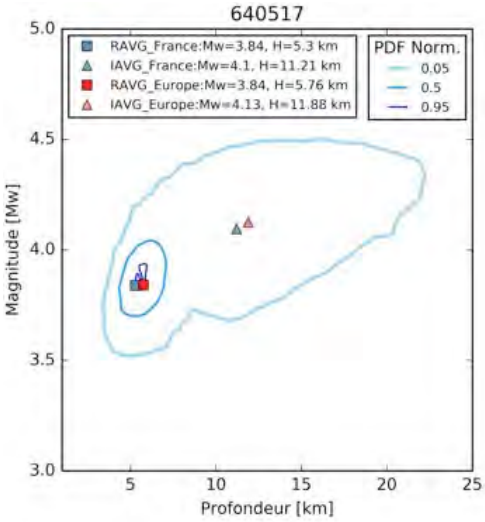
##############

Aléa probabiliste: éléments du calcul, incertitudes Animateurs: Oona Scotti et Pierre-Yves Bard

Catalogue de sismicité à partir des données d'intensité macrosismique: propagation des incertitudes

Provost L. et Scotti O. - IRSN

L'IRSN développe depuis de nombreuses années des méthodologies pour estimer les caractéristiques des magnitudes et profondeurs des séismes historiques. Les méthodologies développées permettent de propager l'incertitude associée à cette estimation lors des différentes étapes du calcul. Ces méthodologies de propagation seront présentées, ainsi que les diverses incertitudes et choix rencontrés lors du calcul.
Les données d'intensité macrosismique sont obtenues par la recherche et l'analyse de témoignages sur les tremblements de terre, conservés dans le patrimoine littéraire de la région considérée. Ces témoignages sont traduits en intensité à l'aide d'échelles d'intensité. De nombreuses incertitudes sont liées à cette première étape : information parcellaire, témoignages indirects, différentes échelles d'intensité utilisées, etc.
Ces données ponctuelles d'intensité sont ensuite utilisées pour l'estimation de la magnitude, et parfois de la profondeur. Différents choix peuvent être faits quant à l'utilisation de ces données : utilisation de la distance épicentrale ou hypocentrale, regroupement des données par classes de distance ou d'intensité, choix de la forme de l'équation empirique d'atténuation de l'intensité macrosismique, etc.
La robustesse de ces équations empiriques d'atténuation de l'intensité dépend enfin du choix des séismes de calibration. Ceux-ci devraient dans l'idéal représenter une large gamme de magnitudes, décrits par des données d'intensité nombreuses et bien réparties dans l'espace, et dont la magnitude de Moment sismique et la profondeur instrumentale sont bien contraintes. En réalité, le champ macrosismique est souvent parcellaire, la gamme de magnitude des séismes de calibration réduite, les magnitudes instrumentales plus ou moins bien connues, des conversions vers la magnitude de Moment sismique effectuées et les profondeurs mal contraintes.
Cet état des lieux a conduit l'IRSN à développer différentes approches afin de quantifier l'incertitude des caractéristiques des séismes historiques. Quelques approches développées seront illustrées au travers de différents exemples. Le choix de la métrique (regroupement par classe d'intensité ou par classe de distance) sera notamment abordé.



Magnitudes et Profondeurs pour un évènement de la base de donnée SISFRANCE, ayant eu lieu dans les Pyrénées le 19 décembre 1988, pour des lois calibrées sur la France ou sur l'Europe et pour deux métriques différentes : une par classe d'intensité (RAVG) et une par classe de distance (IAVG). L'incertitude liée au calcul est représentée par une densité de probabilité normalisée (PDF Norm.).

###############

Un catalogue de sismicité homogène en Mw pour la France métropolitaine (463-2009)

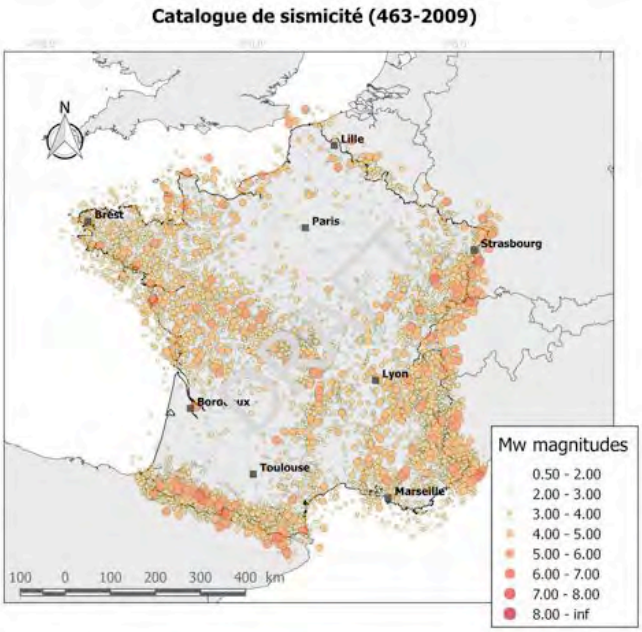
Manchuel et al. - EDF, FUGRO-GEOTER, EOST - *POSTER*

Les catalogues de sismicité constituent une des données de base des calculs d'aléa sismique, qu'ils soient réalisés par le biais d'une approche déterministe ou probabiliste. On distingue :

- la période instrumentale, au cours de laquelle des stations sismologiques enregistrent les ondes sismiques générées par les séismes (elle débute en France en 1962), permettant ainsi de déterminer un catalogue de sismicité paramétrique, établi à partir d'informations quantitatives ;

- la période historique (antérieure à l'avènement des instruments de mesure) dont le catalogue de sismicité est constitué à partir d'informations qualitatives se basant uniquement sur les témoignages relatant les effets des séismes.

Au regard des faibles taux de déformation en France métropolitaine, l'étude et l'utilisation de la sismicité historique dans les études d'aléa sismique est primordiale afin d'étendre la fenêtre d'observation sismologique et être ainsi plus représentatif du comportement sismogénique des structures géologiques. Un des objectifs du programme de recherche SIGMA (EDF-AREVA-CEA-ENEL) était de produire un catalogue de référence homogène en Mw (magnitude de moment) pour le territoire français métropolitain, couvrant à la fois les périodes historique et instrumentale. La période instrumentale du catalogue de référence est constituée par le catalogue SiHex [Cara et al., 2015]. En bénéficiant des magnitudes Mw fournies par le catalogue SiHex, de celles estimées pour 15 évènements majeurs de la première moitié du XXème siècle (postdoc de J. Benjumea – projet SIGMA) et des données macrosisimiques mises à disposition par la base de données SISFRANCE (EDF-IRSN-BRGM), des modèles d'atténuation en intensité ont été établis sur la base d'un set de séismes de calibration robuste [Baumont et al., soumis]. Ils ont par la suite été utilisés pour déterminer les magnitudes Mw, profondeurs et incertitudes associées de l'ensemble des évènements recensés dans la base de données SISFRANCE [Traversa et al., soumis]. Pour cela un schéma d'inversion basé sur une approche d'arbre logique a été mis en place, permettant de caractériser les incertitudes épistémiques inhérentes au processus. La concaténation des parties historiques et instrumentales a finalement permis de produire un catalogue de sismicité homogène en Mw sur l'ensemble des deux périodes (Figure 1) [Manchuel et al., soumis], directement utilisable en entrée des études d'aléa sismique.



Catalogue de sismicité issu de la concaténation du catalogue de sismicité instrumentale SiHex [Cara et al., 2014] et des données paramétriques des séismes historiques SIGMA [Baumont et al., soumis ; Traversa et al., soumis ; Manchuel et al., soumis].

##############

Constitution d'une banque de données des séismes historiques et analyse de la sismicité, Nord-est de l'Algérie

Hamidatou M., Département de Génie Civil, Université 20 Aout 1955-Skikda, Algérie

L'objectif de cet article est le traitement statistique du catalogue sismique. La première étape consiste à la compilation du catalogue de sismicité pour l'Est de l'Algérie à partir des différentes sources et agences (CRAAG, IGN, USGS, ISC,...). Dans ce cadre, les questions d'uniformatisation et d'homogénéisation ont fait l'objet d'une attention particulière, ce qui a permis de suggérer des relations appropriées aux données acquises. Pour la seconde étape de ce travaille, la notion de Declustering (élimination des répliques) et completness (analyse de la complétude du catalogue) ont été largement abordées. L'adaptation de la méthode de Gardner et Knopoff (1974) ou encore celle de Reasenberg (1982) au fichier établi a permis d'une part une maitrise complète de cette notion, qui est considérée comme une étape essentielle pour l'acquisition d'événements qui ont un caractère poissonien. L'introduction des deux méthodes de lecture graphiques (Nombre cumulé de séismes et la méthode de Stepp (1972), ont permis d'avoir les périodes de complétude pour chaque classe de magnitude.

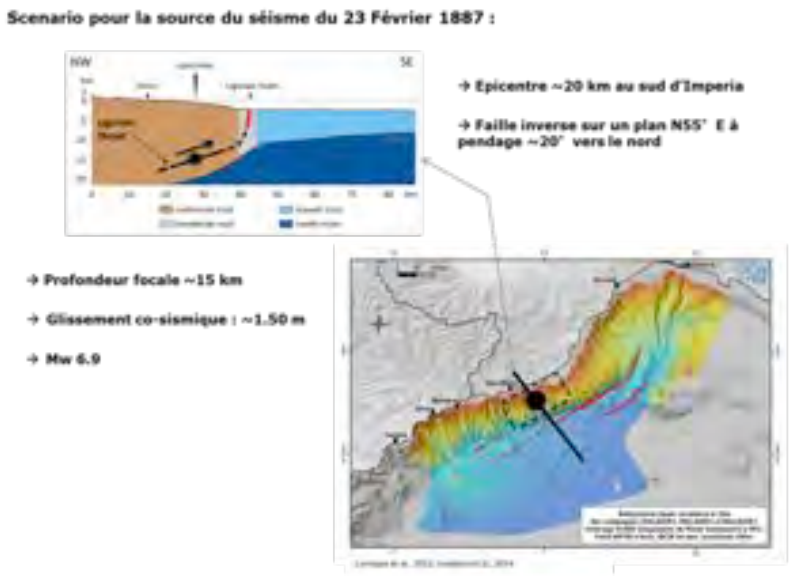
##############

Estimation des temps de récurrence des forts séismes à la jonction Alpes occidentales - Bassin Ligure : intégration des données géologiques, géodésiques et sismologiques

Larroque et al., GeoAzur, Université de Nice Sophia Antipolis et IRSN

Le séisme Ligure du 23 février 1887 (M_w 6,7-6,9) s'est produit au large de la Riviera franco-italienne sur la marge nord ligure. C'est le plus fort séisme historique connu dans cette région et l'un des plus forts connu en Europe occidentale. A la jonction entre les Alpes occidentales et le bassin océanique Ligure, la marge nord Ligure est le siège de nombreux séismes modérés (M_w <5) avec, sporadiquement, des événements dont la magnitude dépasse 6. Comme dans la plupart des zones à faible taux de déformation, la détermination des temps de récurrence de ces forts séismes est difficile, d'autant plus lorsque la faille active est en mer.
L'essentiel des séismes modérés se produisant sur la marge nord Ligure présentent des mécanismes au foyer en faille inverse et attestent d'un état de contrainte compressif. L'analyse morphotectonique a permis de mettre en évidence d'une part un système de failles inverses actives en pied de marge (le système de faille nord ligure) qui déforment les dépôts quaternaires et d'autre part le soulèvement d'ensemble de la marge depuis au moins 5 Ma (Messinien). L'analyse du séisme Ligure montre qu'il correspond à un séisme en faille inverse qui active un chevauchement profond à faible pendage nord (le chevauchement Ligure dans

lequel s'enracine certainement le système de failles nord ligure) qui contrôle le soulèvement de l'ensemble de la marge.
Nous faisons ici l'hypothèse simple que le soulèvement de la marge est accommodé par le chevauchement Ligure et résulte essentiellement du cumul de séismes équivalents au séisme de 1887 (géométrie de la faille, glissement co-sismique…). Nous utilisons plusieurs repères temporels : sur le littoral (replats d'érosion du stade MIS 5.5 d'une part et d'âge Holocène d'autre part) et sur la marge (décalage des marqueurs messiniens) afin d'estimer la vitesse moyenne de soulèvement du compartiment nord du chevauchement sur ces intervalles de temps, d'en déduire la vitesse de glissement sur le chevauchement et le temps de récurrence pour des séismes de magnitude 6,7-6,9. Le même travail a été réalisé à partir du taux de raccourcissement horizontal mesuré par les stations GPS permanentes de Nice et d'Ajaccio depuis 15 ans. L'ensemble de ces résultats conduit à des temps de récurrence proches, compris dans une fourchette allant de 1500 à 4000 ans. Ces temps de récurrence sont comparés aux résultats d'une analyse de la sismicité instrumentale par des courbes fréquence/magnitude de Gutenberg-Richter à partir du catalogue LDG pour la zone sismotectonique nord Ligure.

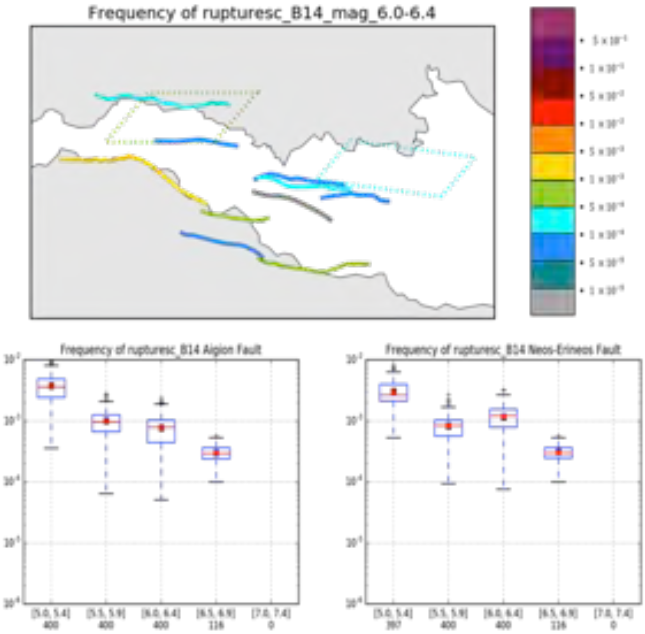


##############

Modélisation des failles dans le calcul probabiliste de l'aléa sismique

Chartier et al., IRSN et ENS

La modélisation de l'activité sismique des failles actives est une étape essentielle du calcul probabiliste de l'aléa sismique (PSHA). Une estimation correcte du taux de récurrence des séismes sur les failles est nécessaire pour obtenir une probabilité de mouvement du sol ou de rupture de surface. La majorité des études PSHA considèrent les failles comme des structures indépendantes et négligent la possibilité de rupture simultanée de plusieurs failles ou segments de failles. Le récent modèle californien (UCERF–3 2013) considère la possibilité de rupture multiple et adopte une approche au niveau du système de faille plutôt que au niveau de chaque faille individuellement. Malheureusement, l'approche UCERF-3 n'est applicable qu'en Californie où les données sont suffisamment abondantes et détaillées. Dans l'optique de développer une méthodologie plus versatile, nous nous tournons vers les découvertes récentes dans l'ouest du Golfe de Corinthe ont révélé un système complexe de failles accommodant l'importante extension Nord-Sud. Après avoir défini les scénarios de ruptures multi-failles possibles, nous proposons une approche systémique afin d'estimer la récurrence des séismes sur les failles du réseau. Nous forçons le système de failles à produire une sismicité de type Gutenberg-Richter. Notre méthode montre que pour satisfaire cette distribution, certaines failles doivent glisser de manière partiellement asismique. Malgré la distribution de type GR régionale, certaines failles montrent une distribution et type Young-Coppersmith (caractéristique). Un calcul d'aléa est réalisé pour la ville d'Aigion, sur la côte sud du Golfe. Nous explorons l'impact de différents paramètres et hypothèses via un arbre logique afin d'établir un lien clair entre les paramètres concernant les failles et le résultat du calcul d'aléa. Ceci nous permet d'identifier les paramètres clefs contrôlant l'incertitude sur le niveau d'aléa et d'orienter les stratégies d'exploration des failles actives afin de collecter les données permettant de réduire l'incertitude sur l'aléa sismique. L'analyse du résultat révèle que l'incertitude sur l'aléa sismique est principalement liée à l'équation de prédiction du mouvement du sol (GMPE) utilisée dû aux très faibles distances entre le site et les sources sismiques. La définition des scénarios de rupture multi-failles a un impact sur le taux de récurrence des séismes sur les failles et donc sur le niveau d'aléa.



Haut : fréquence de rupture des failles pour des séismes de magnitude entre 6. et 6.4. Bas gauche : distribution de sismicité pour la faille d'Aigion. Bas droite : distribution de sismicité pour la faille de Neos-Erineos.

##############

RESORCE : une base de données de mouvements sismiques, nouvelles implémentations et applications

Traversa et al., EDF, CSEM, FUGRO-GEOTER, METU, CEA

Pour déterminer et tester des modèles de mouvement sismique et pour toutes les applications d'aléa sismique et d'ingénierie parasismique, disposer d'une base de données de mouvements sismiques de haute qualité est un élément essentiel. Dans cette optique, une base de données accélérométriques à l'échelle pan-européenne a été développée dans le cadre du programme de recherche & développement SIGMA (EDF – CEA – AREVA – ENEL).

Les principales caractéristiques de cette base de données sont les suivantes:

- Traitement homogène des enregistrements ;
- Homogénéité de format des informations disponibles associées aux enregistrements (méta-paramètres) ;
- Estimation des incertitudes associées aux paramètres principaux (M, vs30, distances);
- Portail internet d'accès aux données permettant des requêtes en fonction de différents paramètres ;
- Processus d'assurance Qualité (revue et validation avant publication de chaque version de la base) ;
- Base de données versionnée. Une fois publiée, chaque version est « figée » et reste accessible à tout moment.

La première version de RESORCE (Akkar et al., 2014) a été utilisée pour déterminer plusieurs modèles de mouvement sismique pan-européens récents (e.g. Douglas et al., 2014). L'intégration de données françaises dans la seconde version (Traversa et al., 2015) a permis de déterminer un modèle de mouvement plus adapté au contexte français (Ameri et al., in prep.). Actuellement, la collecte des données et l'amélioration des informations associées se poursuivent à l'échelle de la France métropolitaine, avec l'objectif de valoriser les données françaises pour qu'elles puissent être utilisées dans chacune des différentes étapes qui mènent à la détermination de l'aléa sismique. Cela permettra, à terme, d'obtenir des estimations mieux adaptées au contexte de la France métropolitaine.

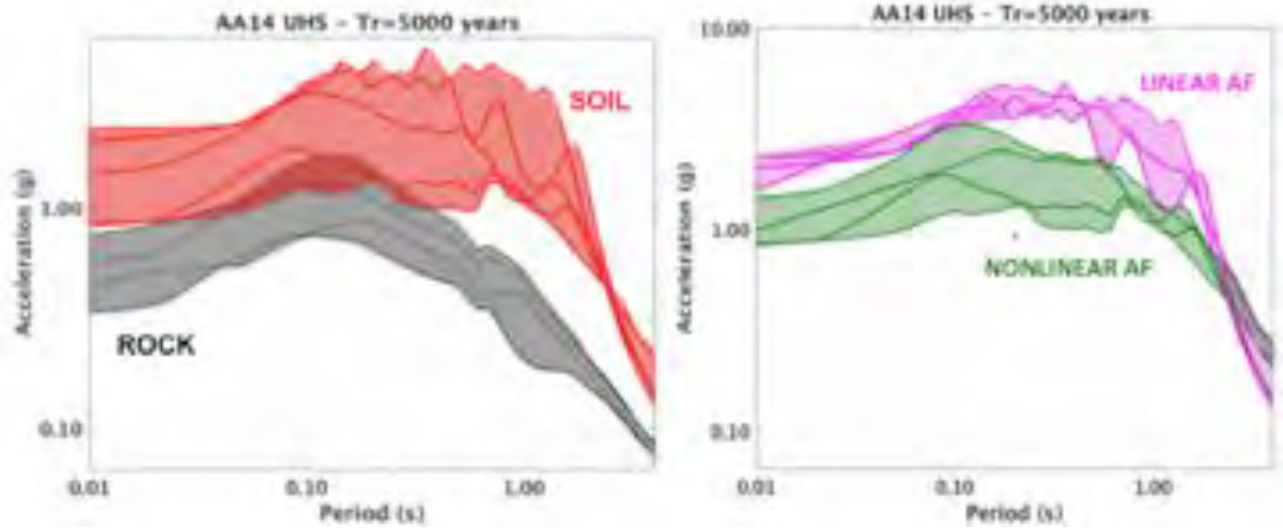
##############

Les thèses en cours Animateurs: Alessia Maggi et Tony Monfret

Site-specific PSHA: combined effects of single station sigma, host-to-target adjustments and non-linear behavior

Aristizábal C., ISTerre - *POSTER*

This work contributes to provide recommendations for the incorporation of site response in PSHA estimates, showing the lessons learnt from an example application. Site-specific PSHA should in principle combine the use of single-site sigma, site-specific characterization, host-to-target adjustments and non-linear behavior of a soil column; the first item of this list leads to a significant reduction of the hazard estimate for long return periods, while the complexity of the other items introduce additional epistemic uncertainties. Most recent developments regarding the probabilistic seismic hazard assessment ("PSHA") methods have however focused mainly on rock sites, although many cities and critical ficilities are located on (soft or stiff) soil sites. Also, in most PSHA studies where soil properties are considered, the amplification of the soil at the site had been taken into account in a crude way, where hazard estimates can be both under-estimated (e.g. site specific resonance effects are ignored) or over-estimated (nonlinear effects are ignored or improperly assessed). This study will illustrate the case of site-specific hazard assessment for a 5000 year return period at the middle of the EUROSEISTEST valley (30 km east of Thessaloniki, Greece). A site where site effects have been extensively studied, both experimentally and numerically. We have successively implemented nonergodic PSHA calculations by including single station sigma on the ground motion models, we perform host to target adjustments to the rock hazard when required, and we considered various ways to account for site amplification (site-specific residuals, instrumental site-to-reference spectral ratios, 3D linear and 1D non-linear simulations) with respect either to an outcroppoing rock site or to a downhole reference. Their respective impact on hazard estimates and the associated uncertainties will be presented and discussed, and some practical recommendations will be issued.



Overall comparison of soil and rock spectra obtained with the various approaches, for Akkar et al. 2014 GMPE and 5000 years return period. Left: Variation on soil (red) and rock (gray) hazard estimates due to the implementation of different rock corrections and soil amplification functions. Right: Soil hazard estimates derived using linear (magenta) and nonlinear (green) soil amplification functions.

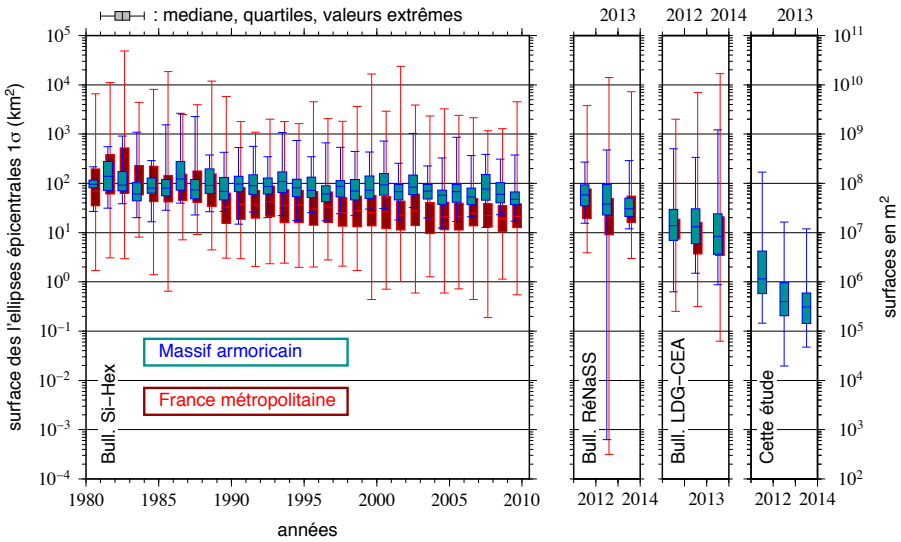
##############

Détermination non-linéaire des paramètres hypocentraux et structuraux : application à la sismicité intra-continentale du Massif armoricain

Haugmard M., Laboratoire de Planétologie et Géodynamique, Université de Nantes - *POSTER*

La détermination de la source d'un séisme (épicentre, profondeur et temps origine) par les algorithmes déterministes classiques, dépend fortement de connaissances *a priori.* Une procédure non-linéaire est développée permettant la détermination jointe des paramètres hypocentraux et structuraux d'un ou plusieurs séismes, locaux ou régionaux. Cette procédure s'affranchit alors d'une solution initiale et minimise l'influence des vitesses sismiques mal contraintes utilisées pour le calcul des temps de propagation. La méthode repose sur des explorations de type Monte-Carlo par chaînes de Markov, échantillonnant en parallèle les distributions de probabilités *a posteriori* des paramètres recherchés. Les incertitudes sur les temps d'arrivées des ondes directes et réfractées sur le Moho sont pointées manuellement puis pleinement exploitées par l'inférence bayésienne, guidant ainsi l'exploration. L'étude des covariances entre les paramètres, tout comme la projection des variations des paramètres de structure dans l'espace des paramètres de source, caractérise l'influence d'un réseau de stations peu dense et hétérogène, ou d'un modèle de vitesse inadéquat. Cette procédure est appliquée à la sismicité modérée et diffuse du Massif armoricain, socle intra-continental en contexte de marge passive, dont on n'appréhende encore la structure qu'avec de grandes incertitudes. La localisation précise de 350 séismes, grâce à l'acquisition de plus de 7 000 temps d'arrivées

d'ondes sismiques sur les réseaux permanents et temporaires déployés entre 2011 et 2013, offre un nouveau regard sur la sismicité et la structure du Massif armoricain.

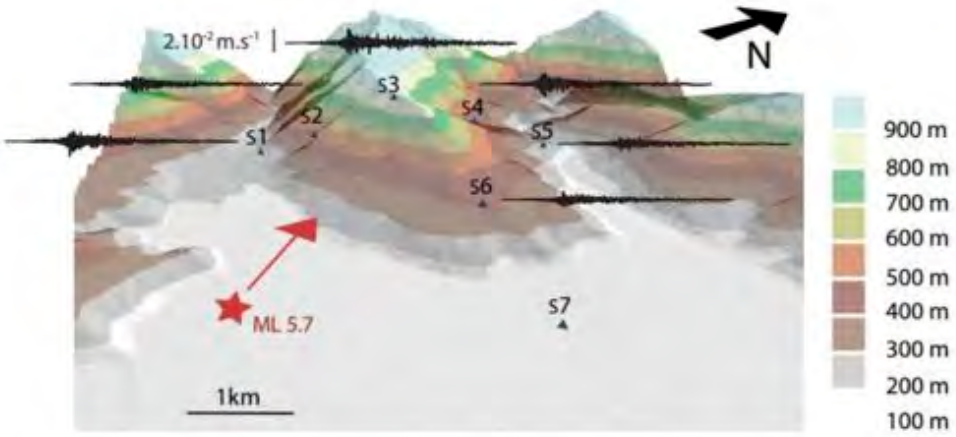


##############

Seismic response of a Taiwanese ridge

Rault C., Laboratoire de géologie, ENS Paris - *POSTER*

A line of 6 broadband seismometers have been deployed across a ridge in the Hualien County (Eastern Taiwan) in order to study topographic amplification. From March 2015 to June 2016, the network has been continuously recording waves incoming from the Taiwanese regional seismicity. The hill is well approximated by a triangular topography of 3600m in length by 900m in height. We present the primarily analysis performed on 1272 earthquakes of magnitude (Ml) greater than Ml=3 and less than 200km distant to the study site. We show that most of the uphill records exhibit a systematic amplification of seismic waves (peak to peak velocity) on the resonance frequency band of the ridge [0,5-3Hz] with respect to the referenced records at the base of the hill. Amplification on sharp frequency band also occurs in other sites, reflecting complex local site effects. We found that the average amplification at the top on the transverse component to the ridge elongation is found to be three time higher than the one on the parallel. This amplification is found to be independent of the incoming shaking (PGV). But we show that it strongly depends on the parameter α defined as the angle between the azimuth of incoming wave and the azimuth of the ridge divide.



Location of the 7 seismometers set along the hill profile. Records of the 13th of August 2015 earthquake.

##############

Evaluation of non-linear behavior in soil response using the Kik-Net data (Japan)

Castro Cruz D., CEREMA DTer Méditerranée and GEOAZUR University of Nice Sophia Antipolis - *POSTER*

Seismic ground motion is strongly dependent on the site geotechnical characteristics. This phenomenon, called site effect, must be taking into account in risk mitigation. The soil response to a cyclic solicitation is not

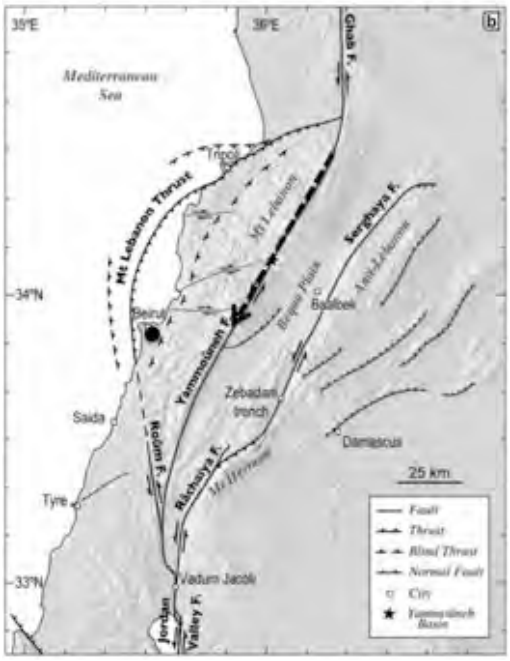
only depending on the soil parameters but also on the level of the shaking. This non-linear behavior is especially important to consider when modeling strong ground motion. We analyzed this effect through the analysis of seismological data recorded in Japan and through numerical simulations. We are using a data set from 668 stations, composed of two sensors, one at surface and another at depth. From the recorded data we are estimating the ground motion amplifications due to the site by computing experimental transfer functions. These empirical responses are compared with numerical simulations considering the non-linear behavior of the soil.
The main effect of the non-linear behavior of the soil is a shift of the amplification towards the lower frequencies. This shift is related to the decay of the shear modulus with the deformation. We thus propose to characterize the non-linear behavior of a soil by quantifying the shift of the fundamental resonance frequency. We investigate the relationship between this shift and the plastic strain of the soil using numerical models. We also study how the non-linear effects are linked with some site parameter such as *Vs30* (the quadratic average shear wave propagation velocity in the 30 first meters of the soil column) or *f0* (the fundamental resonance frequency at low deformation). We observe that non-linear effects are depending on more site characteristics than only *Vs30*. We found that the impedance and the geometric of the soil layers have a large influence in the soil response.
We are using this methodology for ground motion prediction. First, we are modelling the decrease of stiffness in function of the ground motion intensity. Then we compare the surface spectra of the specific site under large solicitation with the estimation using the trend curves. As example we show an earthquake of 2008 Mw 6.8, generating a movement with a PGA of 4.30 m/s2 at surface at the station IWTH02. For this event, we are simulating the surface ground motion following our approach of the non-linearity; estimating the movement at bedrock with stochastic method (SMSIM). The results of our approach and the recorded answer for the real case are shown in the following figure presenting the Fourier's spectra at surface computed from the acceleration time histories. Additionally, we show two cases computed from the numerical models, one taking into account the non-linear behavior of the soil and the other one is the classic method just taking the component of the elastic case.

##############

Strong motion assessment in the near-field

Fayjaloun R., ISTerre - *POSTER*

Assessing ground motion due to a potential large earthquake is a key issue to reduce seismic hazard. This is especially true in moderate seismicity areas, but characterized by the presence of large faults (e.g. the 2010 Haiti earthquake) due to: (1) large uncertainties on seismic hazard ; (2) ruptures on large faults associated with potential devastating effects (directivity, supershear rupture, site effects) ; (3) poor *a priori* knowledge on the likely rupture mechanisms ; (4) partial knowledge on the geological structures.
One of the actual biggest challenges in seismology is then to develop reliable methods to assess ground motion in the near field that account for the lack of *a priori* knowledge on the rupture process and for the lack of instrumental data (earthquake recordings). This PhD topic thus proposes to couple the complexity of the rupture process with an innovative approach based on seismic noise to extract information about the wave propagation between the fault and the site (Denolle et al., 2013, 2014). The first stage pertains to the rupture modeling on the fault plane. We propose to account for the natural variability of the rupture process (Causse et al., 2010, 2014) by defining joint probability distributions of source parameters like rupture velocity, stress drop, slip heterogeneity, etc. These distributions will be derived from the database of finite-fault rupture models SRCMOD (Mai & Thingbaijam 2014) and from the database of source functions SCARDEC (Vallée et al. 2011). They will be compared to worldwide observations of the ground motion variability.
Once the source model has been defined, the second stage is to propagate the rupture information towards the target site. This information is represented by the Green's functions, defined for each fault point. Green's functions are classically computed in simple structures (e.g. AXITRA, Cotton & Coutant 1994). In this PhD, we will use seismic noise recorded at different stations along the fault and at the site. We will first define the velocity model. Next we will account for the wave attenuation between the source and the site, and tempt to interpolate Green's functions laterally and in depth.
Finally, we propose to apply this new methodology to the city of Beirut, where large strike slip ruptures are expected on the Yammouneh fault. We will use the continuous seismological data recorded by a dense array (3-component broadband sensors) installed in Lebanon during 18 months (LIBRIS project 2011-2014, Figure 1). Assuming various rupture scenarios, we will finally compute the probability density function (pdf) of ground motion. This pdf will be compared to an independent assessment using populations of speleothemes (Lacave et al. 2014).



Map of the Levant Fault crossing Lebanon (Daeron et al., 2007).

##############

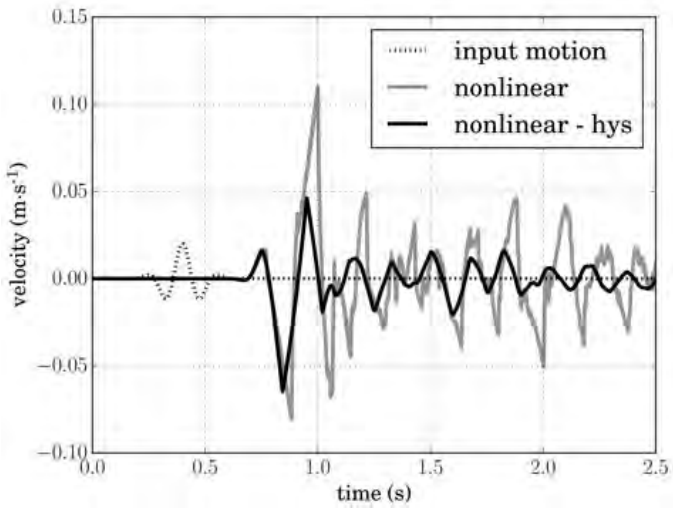
Modélisation numérique de la propagation des ondes par une méthode éléments finis Galerkin discontinue : prise en compte des rhéologies non linéaires

Chabot S., IFSTTAR, CEREMA DTer Méditerranée - *POSTER*

Lors de forts séismes, on peut observer un comportement particulier des sols où les déformations engendrées sont en dehors du domaine d'élasticité du milieu considéré. On qualifie ce comportement de "non linéaire". Il s'illustre physiquement par un décalage des pics de résonances vers les basses fréquences, une augmentation de l'atténuation avec la déformation, ainsi que la présence de boucles d'hystéresis dans la relation contrainte/déformation. Ce comportement particulier pouvant avoir un impact important sur les structures à la surface, il est nécessaire de bien pouvoir le comprendre et cette compréhension passe, par exemple, par la simulation numérique.

Durant cette thèse, nous nous intéressons à la simulation numérique de la propagation des ondes sismiques dans un milieu réaliste, hétérogène et non linéaire. Nous choisissons une méthode éléments finis Galerkin discontinue (DG-FEM) qui présente divers avantages pour produire des simulations réalistes en trois dimensions. Notamment, une gestion naturelle des discontinuités aux interfaces des éléments (et donc les propriétés des matériaux), ce qui permet une parallélisation simple des logiciels de calcul, des matrices de masses qui sont locales aux éléments et donc petites (ce qui les rends faciles à inverser). Cette méthode numérique peut également être utilisée avec des maillages complexes, non conformes, ce qui dans le cas de simulations réalistes est un atout pour représenter certains détails topographiques. Un des objectifs de la thèse est donc de chercher à tirer parti des nombreux avantager de cette méthode numérique.

La méthode DG-FEM est une méthode d'ordre élevé, basée sur le calcul d'un flux numérique aux interfaces des éléments du domaine discrétisé. La première partie de la thèse a été consacrée à la dérivation d'un flux numérique décentré qui permet de prendre en compte la non linéarité des milieux étudiés. Ce flux numérique a ensuite été testé et validé dans le cas homogène non linéaire contre une solution analytique que nous avons mis en évidence. Cette solution analytique nous a permis de confirmer la convergence d'ordre élevé de la méthode numérique. Le flux numérique que nous proposons étant relativement général, pourvu que l'on dispose d'une expression de la contrainte en fonction de la déformation, nous avons pu réaliser des simulations où cette relation présente des boucles d'hystéresis. Ce comportement a été modélisé dans un premier temps grâce aux relations empiriques de Masing, puis dans un second temps grâce au modèle d'Iwan. La prise en compte des boucles d'hystéresis est plus proche de la physique observée et permet, par exemple, de rendre compte des déformations permanentes du milieu ainsi que de la dissipation de l'énergie. Pour le moment, nous nous sommes intéressés seulement aux ondes de cisaillement. La suite de la thèse consistera à adapter le flux numérique et la méthode DG-FEM pour prendre en compte les trois composantes des contraintes et du mouvement (modèle 1D-3C). Enfin, il s'agira d'introduire ces développements liés au non linéaire dans un code numérique DG-FEM 3D dans le but de pouvoir réaliser des simulations numériques et ainsi mieux prévoir l'aléa.

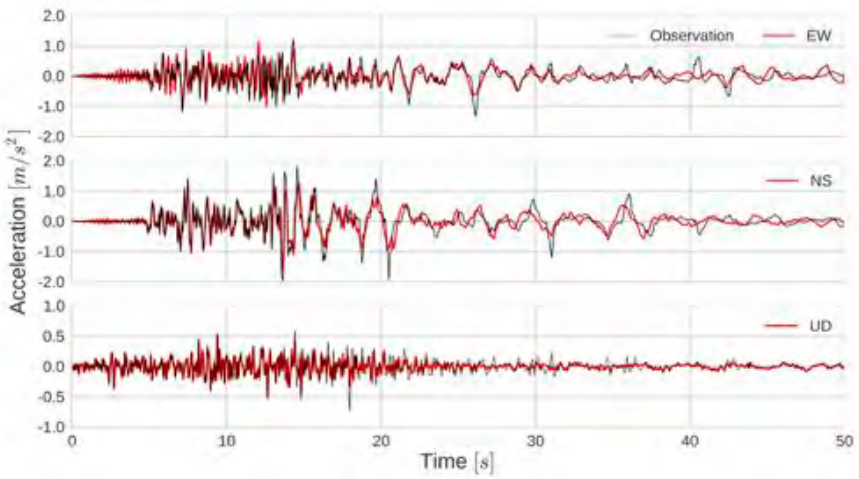


##############

Multidimensional spectral element modeling of seismic wave propagation in linear and nonlinear media with pore pressure effects

Oral E., IRSN and IFSTTAR - *POSTER*

Numerical modeling of seismic wave propagation has been a major topic on ground motion studies using a number of different numerical integration schemes. The consideration of soil nonlinearity holds an important place in order to achieve simulations consistent with real observations for strong seismic shaking. Additionally, in the presence of strong ground motion in saturated soils, pore pressure becomes an important parameter to take into account for related phenomena such as flow liquefaction and cyclic mobility. In this study, first, one component (1C) - seismic wave propagation is modeled in linear and nonlinear media in 1D based on the spectral element numerical method. Viscoelastic and nonlinear soil rheologies are implemented by use of the memory variables technique and Iwan's elastoplastic model, respectively. Then, the same study is extended to a 1D - three component (3C) model and a preliminary comparison on the effect of using 1C and 3C approaches is made. Then, the influence of excess pore pressure development is included in the 1D-3C model and the developped numerical model is applied to realistic case on the site of Wildlife Refuge Liquefaction Array (USA) which is affected by the 1987 Superstition Hills event. The ground motion modification for different assumptions of the soil rheology in the media and different input motions is studied. The calculated motion is found to be amplified on low frequency and damped in high frequency range due to excess pore pressure development. Furthermore, the soil is found to be more nonlinear under triaxial loading in 3C approach and more dilative due to higher nonlinearity. Despite the similitude in surface acceleration and velocity results, significant differences in surface displacement results of 1C and 3C approaches are remarked. Lastly, the 2D SEM code is developped by taking into account soil nonlinearity and pore pressure effects similary to 1D-3C SEM code. The developped 2D SEM code is applied to a 2D sedimentary basin site where the basin geometry is asymmetrical and soil profile consists of layers with different nonlinearity properties. Total and effective stress analyses are performed on the 2D basin for P-SV and SH wave propagation models. The calculated surface motion is shown to differ significantly under synthetic and realistic input motion loading conditions and the resultant deformation in superficial layers is found to be very high in effective stress analysis compared to total stress analysis. Also, wave propagation takes longer time inside basin media and the reflections on bedrock-basin boundaries lead the soil in basin edges to higher nonlinearity. This study shows the possibility of modeling nonlinear soil behavior including pore pressure effects in seismic wave propagation studies by coupling different models with spectral element method. These analyses help identifying and understanding dominant phenomena occurring in superficial layers, depending on local conditions and input motions. This is of great importance for site-specific studies.



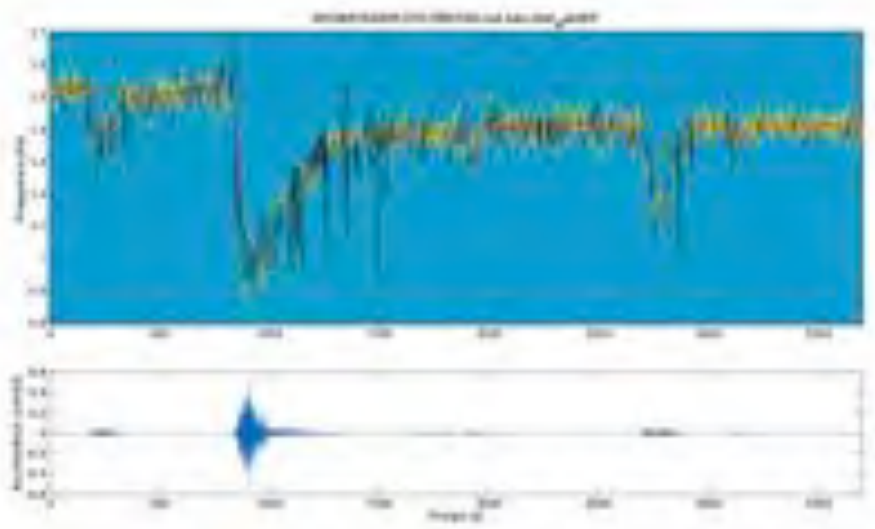
Surface acceleration time histories calculated using the visco-elastoplastic model with pore pressure effects (in red) and real records (in black) for the Wildlife Refuge Liquefaction Array site.

###############

Nonlinear elasticity in buildings

Astorga A., ISTerre - *POSTER*

Response of materials and systems to a pattern of loading has been traditionally simplified in two types of behavior: linear-elastic and non-linear. Linearity means that the deformation is directly proportional to the excitation and elasticity implies that the deformation is reversible. On the other hand, a non-linear response involves large deformations for small values of force and this typically goes together with a residual deformation that represents certain level of degradation or damage. However, a behavior known as *nonlinear elasticity* has recently been observed in different materials and at different scales (from laboratory tests to the crust of the Earth). This behavior is evidenced by nonlinear response accompanied by *slow dynamics*, a process in which elastic properties recover (fully or partially) values previous to the excitation. In this study we found that nonlinear elasticity can be also observed at buildings scale, where this type of response seems to be controlled by the system of cracks, and therefore, it might be associated to the level of structural damage. Slow dynamics shows a linear tendency with the logarithm of time and can be perceived in both short and long-term observation. Testing several ground motion parameters, we analyze nonlinear elasticity in buildings while facing strong motions, with the objective of monitoring structural health by analyzing time variations of elastic properties like fundamental frequency and damping. By using extensive data from different countries and buildings of diverse properties and characteristics, this study aims at assessing correlations between changes of elastic properties and levels of structural damage (mainly represented by the drift). This might become a very useful and valuable way to monitor the time evolution of vulnerability, and hopefully, a predictive method to estimate deterioration and likely structural damage over time.



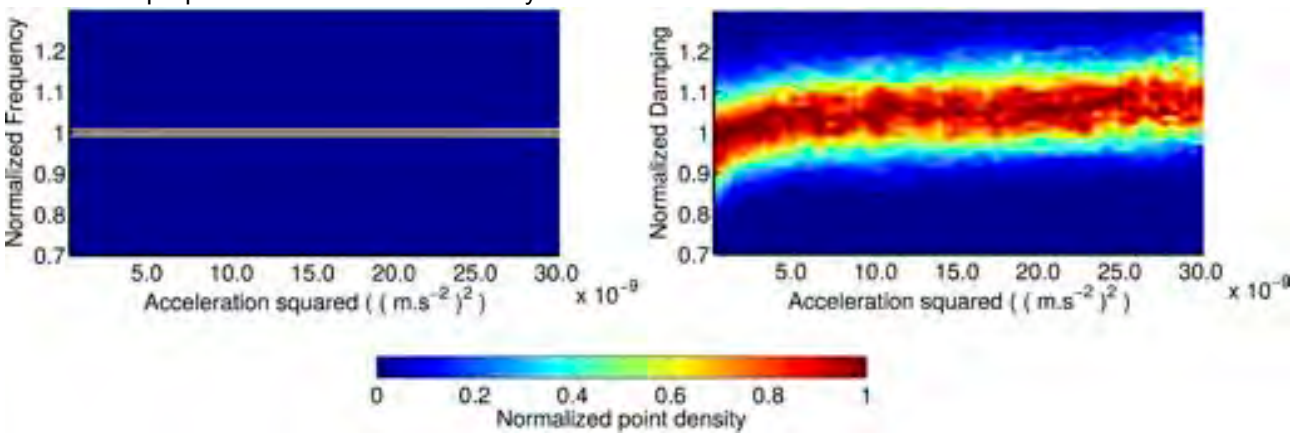
Recovery of elastic properties of the IG-EPN building in Ecuador after the Mw 7.8 earthquake (16 April 2016) (Guéguen et al., 2016).

##############

Building resonance frequency and damping in real-case buildings: application to the fluctuation-dissipation theory

Brossault M.A., ISTerre - *POSTER*

The frequency and damping of an engineering structure control its dynamic response via Newton's second law. These two modal parameters are likely to vary in time due to environmental conditions, to the appearing of damage in the system or to dynamic loading. These variations lead to a modification of its vulnerability but their analysis could thus give information on the state of health of the monitored structure. Being related to energy dissipation, damping is a critical parameter to be determined for risk assessment for any engineering structure. Its precise evaluation is thus primordial but its measurement is riddled with uncertainty considering the very strong scattering of its monitoring over time even if solicitation remains at ambient vibration level. Any dependency of damping on the ambient vibration amplitude has been ignored so far. However, experimental results on metric beams in the lab representing simplified building models exhibit a positive correlation between damping and acceleration whereas frequency remains constant. This observation has also been made on three buildings such as the Grenoble City Hall (see Figure). The linear definitions of frequency and damping command an equal relative variation of these two for any alteration of the structure's stiffness. This violation of the linear assumption is yet explained by mathematical results derived from the Helmholtz equation and the fluctuation-dissipation theorem which lead to the expression of a specific attenuation proportional to the noise intensity.



Point density of normalized frequency (left) and damping (right) as a function of acceleration squared for the first bending mode of the Grenoble City Hall. These plots are obtained by processing four years (2012-2015) of ambient vibration recorded at the top of the building.

##############

Variabilité spatiale des mouvements sismiques - Surveillance du barrage voûte à Saint Guérin

Koufoudi E., Fondation Grenoble INP, Univ. Grenoble Alpes, CNRS, 3SR - *POSTER*

Le terme variabilité spatiale des mouvements sismiques du sol désigne les différences en termes d'amplitude et phase de mouvements sismiques enregistrés sur des zones étendues ou même dans les dimensions d'une structure. L'effet de cette variabilité spatiale sur le comportement des infrastructures civiles telles que les barrages reste toujours une question ouverte. Les expériences sur site peuvent être utiles afin de répondre aux questions concernant à la fois la quantification de la variabilité spatiale du mouvement sismique dans les dimensions d'une structure et l'effet sur sa réponse dynamique. A cet effet, le barrage-voûte à Saint Guérin, de 70 m de haut situé à proximité du village de Beaufort, Savoie, France, a été instrumenté avec un réseau sismologique. Le réseau très dense (distances de séparation entre les stations de quelques mètres) est composé de dix-neuf vélocimètres déployés pendant un an au total (Juin ici à 2015 - Juin 2016). La configuration du réseau est telle que la variabilité spatiale des mouvements sismique peut être capturée sur la crête, à l'interface de roche barrage-fondation et au champ libre. Les fonctions de cohérence, calculées sur les enregistrements de 58 séismes (M>1.5, D<350 km), fournissent des informations sur l'effet de la topographie irrégulière du site et de l'interaction avec le barrage sur la variabilité spatiale. En outre, les mesures le long de la crête fournissent un aperçu sur la façon dont le barrage subit la variabilité spatiale à sa base. Selon les observations, les mouvements sont plus variables autour des fréquences de vibration de la structure. De plus, la variabilité sur l'interface de roche barrage-fondation est

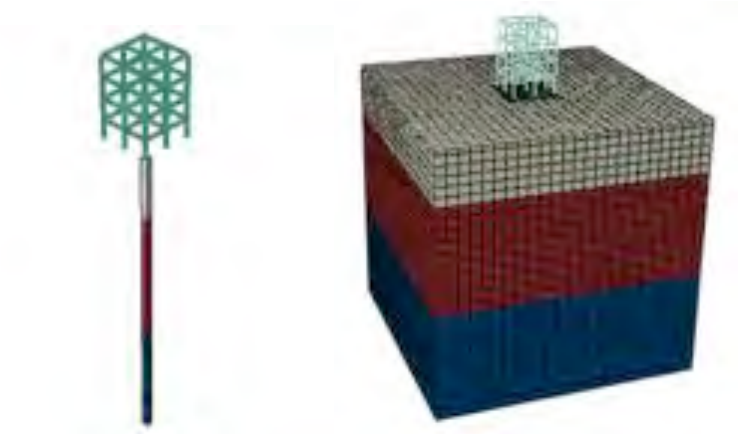
plus forte que dans le champ libre. Par conséquent, les observation sur site indiquent que la topographie locale où se situe le barrage, ainsi que la présence de la structure elle-même contribuer à la perte supplémentaire de cohérence. Simulations du site et du barrage à Saint Guérin en SPECFEM3D confirment les observations in-situ.

##############

Simulation numérique de l'interaction sol-structure sous action sismique: comparaison entre modèles 1D et 3D

Fares R., Université Côte d'Azur - *POSTER*

L'interaction sol structure (ISS) n'est pas prise en compte par les normes européennes actuelles pour des bâtiments de hauteur moyenne avec une fondation superficielle. Pourtant, on observe par simulation numérique que l'effet de l'ISS et de l'interaction structure-sol-structure (ISSS) n'est pas négligeable. Pour mettre en œuvre la simulation, un modèle de propagation unidirectionnelle (1D) est couplé à un modèle de bâtiment tridimensionnel (3D) dans l'hypothèse de propagation d'onde verticale et de fondation superficielle rigide. Cette formulation est adaptée à la description de la colonne de sol par les données géotechniques généralement disponibles et permet de réduire le temps de calcul. Il est encore assez rare de connaître la géométrie et la stratigraphie d'un bassin sédimentaire qui serait nécessaire à une modélisation 3D plus complète. La loi de comportement d'Iwan a été utilisée pour décrire le comportement non linéaire du sol sous chargement cyclique, en termes de contraintes totales. La solution du problème d'ISS est obtenue par solution directe de l'équation d'équilibre dynamique de l'ensemble. L'intégration dans le temps nécessite un algorithme explicite. L'hypothèse de sol infiniment étendu dans les directions horizontales est traduite par une condition de périodicité latérale. Le mouvement sismique est imposé à la base de la colonne de sol en utilisant une condition absorbante qui prend en compte l'effet de l'élasticité du substratum rocheux. Le modèle 1D a été vérifié, dans le cas de comportement linéaire et en utilisant un algorithme d'intégration implicite, par comparaison avec les résultats obtenus par le code maison SWAP_3C, déjà vérifié dans le cadre du benchmark Prenolin. Ensuite, le modèle 1D est validé, dans le cas de comportement non linéaire et en utilisant un algorithme d'intégration explicite, par comparaison avec les enregistrements du tremblement de terre de Tohoku au Japon en 2011.
L'objectif est de prouver la pertinence du modèle de propagation 1D dans un problème d'ISS, comparé à un modèle 3D. Conceptuellement, ce dernier donne l'avantage de pouvoir modéliser la dalle de fondation par des éléments finis solides et donc de prendre en compte sa déformabilité. Par contre, dans le modèle de propagation 1D, la présence de la dalle rigide est modélisée en imposant le même mouvement à la base de tous les poteaux du bâtiment. L'estimation quantitative de la fiabilité des signaux obtenus par le modèle 1D est effectuée en termes de pics en amplitude, d'intégrale d'Arias, d'intégrale en énergie, de spectre de Fourier et de réponse et de rapport de corrélation. Les résultats obtenus dans le cas de propagation verticale montrent la fiabilité du modèle 1D pour le sol quand les hypothèses de couches horizontales suffisamment étendues et de fondation superficielle rigide sont respectées. Le cas d'un champ d'onde incliné fera partie d'une étude ultérieure.



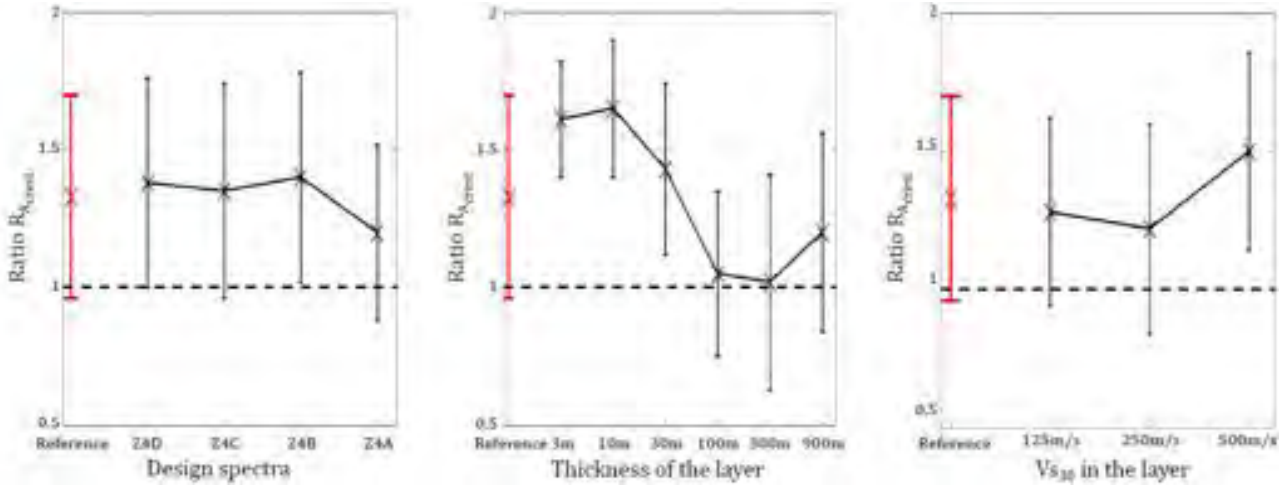
Représentation des modèles d'interaction sol-structure. Modèle de sol avec surface unitaire (à gauche) et modèle étendu (à droite)

##############

Seismic response of embankments taking into account site effects.

Durand C., ISTerre, EDF, Compagnie Nationale du Rhône, geophyConsult - *POSTER*

Given the very large length of embankments along rivers, there is a need for a reliable, simple and affordable method to assess the stability of these structures in case of earthquake. However, most of the existing simplified methods have been developed considering earth dams. They are usually not representative in terms of height and frequency range of the particular case of a river embankment. Moreover, river embankments generally do not lie directly on the rigid bedrock but on a (soft or stiff) soil foundation. In regards to the determination of the parameters of the site, civil engineers usually deduce them from uncertain correlations or costly invasive investigation campaigns. For the last decade the reliability of the methods based on ambient vibrations measurements have been largely admitted for microzonation applications (Bard (1999), SESAME (2004)). Despite their low cost and efficiency, the applicability of these technics to the particular case of an embankment have never been studied. This work aims to fill in the lack of an efficient and simple method to study the seismic response of an embankment resting on a soil layer. It extends from the characterization of the site to the calculation of the accelerations suffered by the embankment.
In order to determine an efficient in-situ protocol, the HVSR is used on three sites of embankments and combined with other geophysical techniques. Some additional numerical computations of noise vibrations propagation in the case of an embankment had been performed in order to explain the observations. The first results show that the only HVSR at crest and toe of the embankment cannot lead directly - and in any situation - to the necessary parameters to perform the seismic assessment. It may be explained by the need for a sufficient impedance contrast between the embankment and the soil layer and by 2D effects.
A preliminary numerical parametric study is conducted to assess the peak response of an embankment in several situations. The peak response of a unique embankment resting on 18 different soil layers loaded by 26 accelerograms is considered. The obtained results are compared with those provided by an existing simplify method developed by Sarma (1979). In the cases studied, Sarma's method generally leads to an overestimation of peak response of the embankment (Figure). The discrepancies are mostly explained by the less accurate predictions of higher modes with Sarma's method and by the assumption of a rigid bedrock under the foundation layer. Moreover, an analysis of the strain distribution indicates that Sarma's (1979) assumption of a uniform damping in the embankment and the foundation layer is far from being always justified, especially for equivalent linear computations.



Mean values of the ratio RAcrest (peak acceleration at crest from Sarna (1979/peak acceleration at crest from numerical analysis) calculated for: (left) a given level of loading (design spectra), (middle) a given thickness of the soil layer and (right) a given Vs30 value in the soil layer. The reference value (in red) corresponds to mean values of the ratio calculated when considering all cases

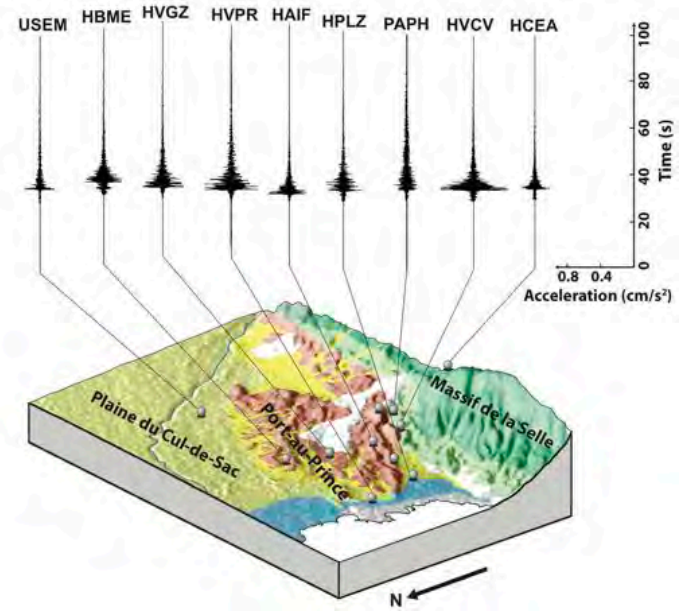
##############

Mesures des amplifications locales et simulations des mouvements forts à Port-au-Prince (Haïti)

StFleur S., GeoAzur, Université de Nice Sophia Antipolis - *POSTER*

Afin de fournir une meilleure prévision du mouvement du sol attendu dans la région de Port-au-Prince (Haïti), nous avons détecté et quantifié les effets de site, puis simulé des accélérogrammes synthétiques réalistes que produirait un séisme futur. A cette fin, nous proposons d'analyser les signaux de 78 séismes qui ont eu lieu entre mars 2010 et février 2013 en appliquant les méthodes de rapports spectraux H/V séisme et SSR. Une forte variabilité spatiale a été observée dans les amplifications mesurées, ce qui est tout à fait cohérente avec la géologie de surface très hétérogène de la zone. On note des amplifications à basse fréquence sur les sédiments marins proches de la côte. Sur les contreforts du massif de la Selle, les réverbérations des ondes sismiques amplifient fortement le mouvement sismique au sommet de la colline. De plus, sur certaines stations nous mettons en évidence, un allongement du signal dû à la présence

d'ondes de surface. Pour la génération des accélérogrammes synthétiques, nous utilisons d'abord la méthode des fonctions de Green empiriques. Les résultats obtenus montrent que les accélérations maximales du sol les plus fortes sont attendues dans les sédiments quaternaires près de la côte et sur les crêtes des collines du Sud de Port-au-Prince. Ensuite, une méthode hybride de simulation combinant fonctions de transfert complexes et simulations EGF au rocher a été mise en place, et validée à partir de test sur des sites instrumentés de la région métropolitaine de Port-au-Prince.



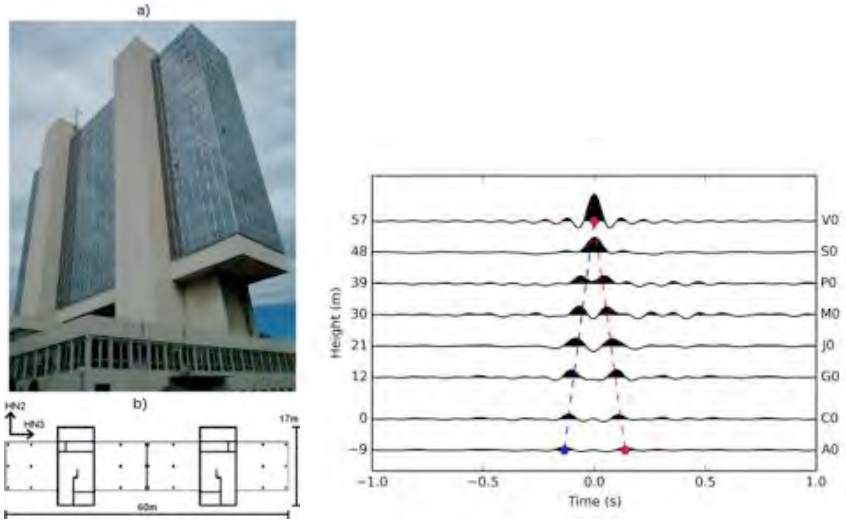
Bloc diagramme montrant la répartition spatiale du mouvement sismique pour le séisme du 3 mai 2010, 19h21(mb=4.4; composante nord-sud). Cet événement a été localisé au large des côtes de Léogâne (latitude = 18,538; longitude = -72,643; profondeur = 12 km) à 20 km à l'ouest du réseau sismologique de Port-au-Prince. Les données topographiques ont été fournis par Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) avec une résolution de 90m environ. Les sphères grises représentent les stations du réseau sismologique de Port-au-Prince

##############

Identification des paramètres mécaniques d'un bâtiment à partir des vibrations ambiantes: cas de la Préfecture de Nice (06).

Fernández Lorenzo G., GeoAzur, LJAD, CEREMA - **Projet financé par AO-RAP**

La modélisation numérique des effets d'interaction site-ville constitue aujourd'hui un enjeu majeur dans l'estimation quantitative de l'aléa sismique dans des régions fortement urbanisées. La prise en compte des différentes échelles (eg : bassin, ville, bâtiment individuel) aura un impact fort sur la complexité dans la création de maillages et sur l'efficacité de calculs. Pour cela, des modèles simplifiés de bâtiment sont un challenge tout particulier. Dans ce travail, une procédure d'identification des paramètres mécaniques équivalents d'une poutre Timoshenko est proposée afin de reproduire la réponse dynamique d'un bâtiment de grande hauteur sans faire appel aux plans de construction. La technique d'interférométrie par déconvolution est utilisée pour calculer les fonctions de réponse impulsionnelle de la structure (IRF). Les dimensions de la section horizontale, le coefficient de Poisson et le rapport entre module de Young et densité sont estimés dans l'hypothèse d'un matériel élastique, isotrope et homogène. Les fonctions de transfert et les images de dispersion des ondes dans la structure sont utilisées pour caler le modèle simplifié du bâtiment. Des fenêtres de 60 secondes de vibrations ambiantes sont suffisantes pour calculer des IRFs avec un rapport signal sur bruit convenable. En outre, des variations de vitesse de propagation dans le bâtiment en fonction des conditions environnementales sont clairement observées. La technique d'identification proposée semble bien adaptée pour des campagnes de caractérisation d'un grand nombre de bâtiments en un temps raisonnable.



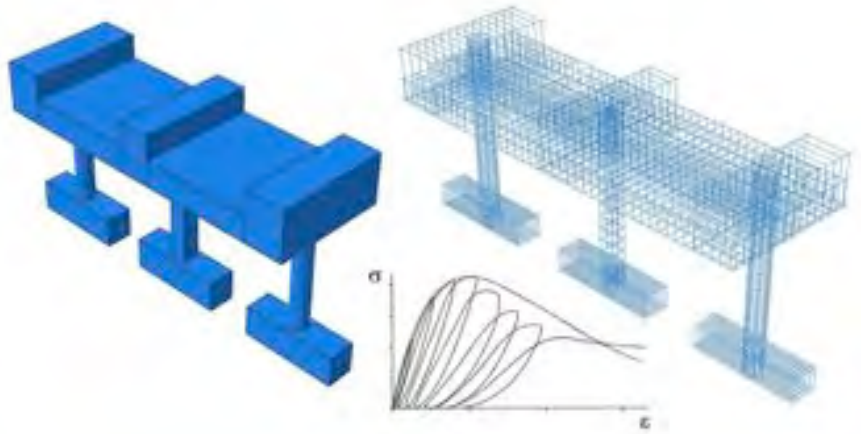
Gauche (a) Vue en perspective du bâtiment de la Préfecture de Nice. (b) Section horizontale de la structure du bâtiment. Droite: Fonctions de réponse impulsionnelle (IRF) calculées à partir des enregistrements du séisme de Barcelonnette (avril 2014). L'identification de la propagation des ondes acausales et causales pour estimer leur vitesse est représentée en bleu et rouge, respectivement.

###############

Conception parasismique de bâtiments en béton armé sous charge sismique faible et forte

Santisi d'Avila et al., GeoAzur et LJAD, Université Côte d'Azur

La conception parasismique des bâtiments en béton armé, selon les principes proposés par les normes européennes actuelles, se base sur les concepts de régularité en plan et en élévation. Les critères de bonne conception parasismique prônent la simplicité de la descente des charges pour éviter des localisations d'efforts, et l'hyperstaticité de la structure porteuse pour que l'endommagement n'affecte pas la stabilité globale. Ces principes généraux de conception parasismique sont vérifiés et discutés pour les bâtiments de la préfecture de Nice et le collège de Basse-Pointe en Martinique. Ces deux bâtiments sont considérés de catégorie d'importance plus élevée selon la règlementation, en tant que locaux qui accueillent, respectivement, la cellule de gestion des risques de la ville de Nice et un établissement scolaire.
Nous présentons la modélisation 3D par éléments finis du bâtiment de la Préfecture de Nice et du collège de Basse-Pointe en Martinique. Les modèles sont réalisés en se référant aux plans de construction pour la structure porteuse et les propriétés des matériaux. Comme certains paramètres mécaniques ne sont pas donnés, la calibration des modèles a été faite par essais-erreur. Les modèles obtenus ont finalement été validés par comparaison des propriétés dynamiques calculées numériquement avec celles estimées par l'analyse des enregistrements du mouvement aux étages, disponibles grâce à l'instrumentation déployée par le RAP.
Ne pouvant pas profiter d'enregistrements en France métropolitaine pour valider les modèles de comportement des matériaux et des structures sous séisme fort, des essais de laboratoire ont été exploités. Les mesures obtenues pendant des essais sur des poutres en béton armé sous charge quasi-statique croissante, sur un échantillon de béton sous charge de compression cyclique, sur une poutre sous charge cyclique et sur un portique sous charge dynamique à la base, ont été employées pour la validation des modèles numériques 3D par éléments finis.



Modélisation 3D d'un portique en béton armé et comportement du béton sous charge de compression cyclique

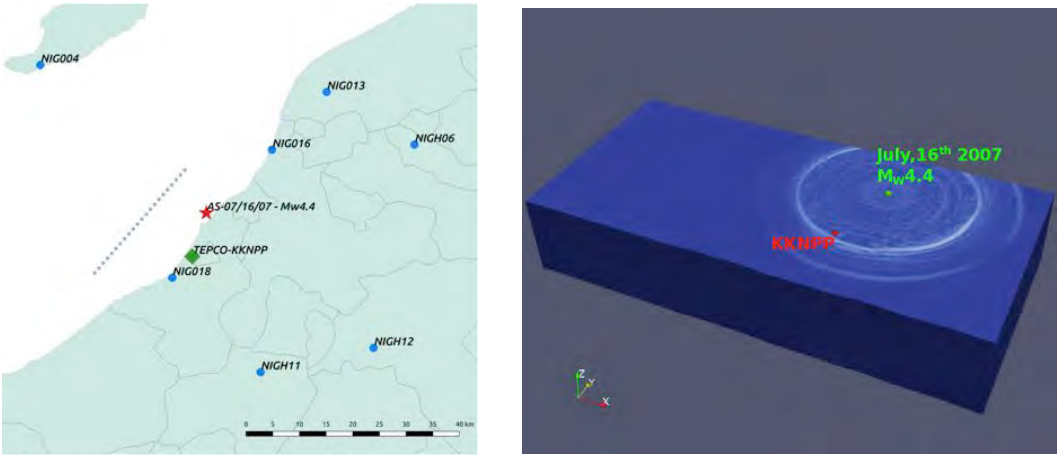
##############

Simulations numériques préliminaires du scénario sismique à large échelle du tremblement de terre Mw 6.6 de Niigata (2007)

Gatti et al., CentralSupélec et Polimi

Dans cette étude on montre des résultats préliminaires concernant la simulation numérique d'un scénario sismique à l'échelle régionale, comprenant la source sismique. Notamment, on considère le contexte sismotectonique et géologique de la région de Niigata (Japon), pendant la séquence sismique de juillet 2007. L'objectif est l'estimation du mouvement sismique à la centrale nucléaire de Kashiwazaki-Kariwa, placée en cette zone. Ici on montre des résultats préliminaires concernants le calibrage du modèle géologique (cf. différent profils 1D pris en compte sur la Figure), en comparant les enregistrement avec les

résultats d'analyses simplifiées effectuée par la méthode de fonctions de Green dynamiques pour demi-espace multicouche (en utilisant le code de Hisada) et avec des simulations numériques directes (en utilisant le code SEM3D aux élément spectraux) à large échelle (dizaines de km). La réplique est reproduite en le considérant comme une source sismique ponctuelle, dont ont assume connue la fonction de glissement. Le maillage comprend la topographie de la région et différents raffinements des couches en surface sont considérés.



Situation de la centrale et simulation du séisme du 16 juillet 2007.

##############

Numerical evaluation of fragility curves for earthquake-liquefaction-induced settlements of an embankment

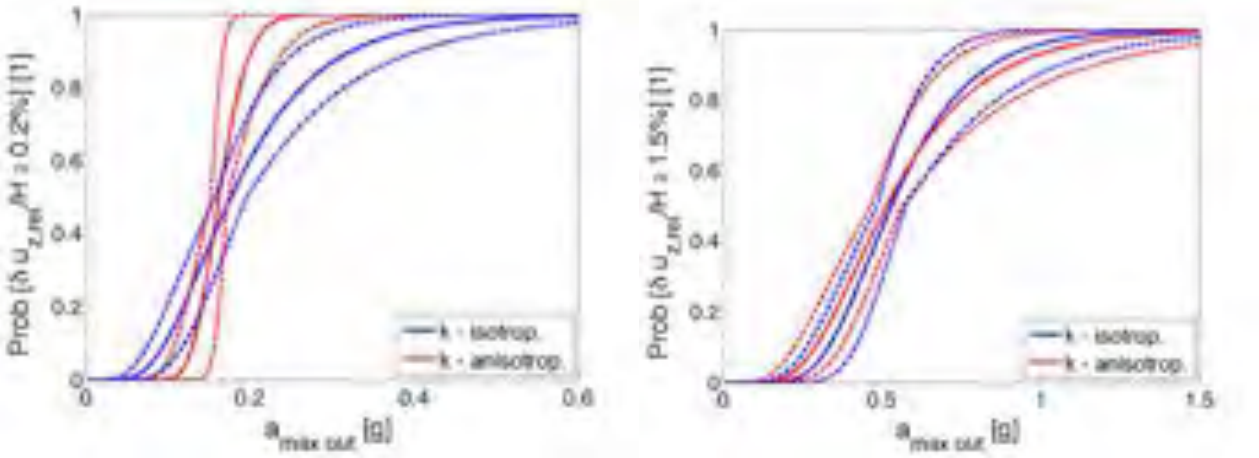
Lopez-Caballero et al., Laboratoire MSS-Mat, CentraleSupélec Paris-Saclay University, France

In the methodology of the Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center in the performance-based earthquake engineering, four stages must be studied: the hazard analysis, the structural analysis, the damage analysis and the loss analysis. Each stage has its own relation with the design model. In order to study the damage of an embankment due to liquefaction-induced ground deformations of the soil foundation; it is necessary to quantify the effects due to varied ground motion on the global response.

It is well known that the liquefaction appears when the soil loses its shear strength due to the excess of pore water pressure. This phenomenon leads to several disastrous damages. According to Swaisgood (2003), these damages are divided into four levels based on the crest settlement of the embankment and the peak ground acceleration (PGA) of the input signal. In addition to the soil disruption, taking into account the anisotropic case will lead to almost real estimation of the soil behaviour. Hence, the consideration of the soil variability and uncertainties by the change in the permeability will encounter larger settlements.

The aim of this work is to assess numerically the effect of the liquefaction-induced settlements of soil foundation on an embankment due to earthquake loading. For this purpose, a 2D finite element model of an embankment founded on a layered soil/rock profile was considered. An elastoplastic multi-mechanism model was used to represent the soil behaviour. To account for the natural hazards, both real and synthetic input motions were used.

So as to quantify the structural damage, the crest settlement of the embankment was selected. Fragility functions were also used to give a probability of exceedance of some proposed levels as a function of a seismic severity parameter (e.g. peak ground acceleration or peak ground velocity). In addition, the anisotropy was tested by the change in the soil permeability and a comparison with the isotropy was held. According to the results, the crest settlement increases with the peak ground acceleration and the fragility functions showed that above 0.2g, the probability to have moderate damage in the anisotropic case reaches unity whereas it is lesser in the isotropic case (Figure).



Fragility function based on the percentage crest settlement for a) moderate damage level and b) serious damage level

##############

Outils numériques pour l'évaluation de la vulnérabilité des Structures : modélisation et identification.

Ragueneau F., ENS Paris Saclay

Les Structures de Génie Civil en France, majoritairement construites en béton armé ou précontraint présentent la caractéristique principale d'exhiber un comportement fortement non linéaire sous sollicitations accidentelles de type sismiques. La fissuration du béton, la plastification des aciers de renforcement, le glissement propre entre ces matériaux ainsi que l'interaction du bâtiment avec le sol environnant génèrent des réponses de structures fortement dépendantes du niveau de sollicitation, que ce soir en termes de raideur ou d'amortissement.

Les outils numériques aujourd'hui développés permettent de prendre en considération tout ou partie de ces mécanismes à différentes échelles. En cela les modèles développés ces dernières années permettent de décrire avec un niveau de raffinement important le comportement tridimensionnel d'éléments structuraux. Toutefois, des sollicitations accidentelles de type sismiques revêtent des caractéristiques tout à fait particulières au regard :

- de la sollicitation proprement-dite : définie de manière non déterministe, l'aléa inhérent à la source ainsi que la méconnaissance des sols environnants rend illusoire la définition unique d'un chargement
- le type de critère de défaillance prépondérant dans la réponse de la structure elle-même : accélération maximum, déplacements maximums et ductilité répondant aux objectifs de non effondrement. Fissuration maximum pendant et post-séisme intégrant des caractéristiques de durabilité et/ou de sureté.
- La réponse dynamique de la structure, impliquant la mise en œuvre d'efforts d'inertie et de sollicitations alternées nécessitant de prendre en compte des caractéristiques fines telles que la dissipation d'énergie ou l'amortissement.

Selon le type d'analyse souhaité, les outils et modèles ne pourront être les mêmes. Des modèles simplifiés à différentes échelles devront être mis en œuvre. Un effort important d'identification et de correspondance des modèles doit être effectué. L'objectif des travaux menés à l'ENS Paris Saclay dans le domaine du comportement structurel des structures sous séismes, en collaboration avec le laboratoire EMSI du CEA-Saclay dans le cadre du projet PIA SINAPS@ et de l'Institut SEISM se focalisent sur ces différents aspects en permettant :

- Le développement de lois de comportement adaptées aux chargements dynamique
- L'identification de mécanismes fondamentaux sur éléments structuraux tels qu'évolution de raideur et d'amortissement dans des domaines très fortement non linéaires
- La mise en œuvre d'outils de réduction de modèles permettant d'introduire la variabilité du chargement.

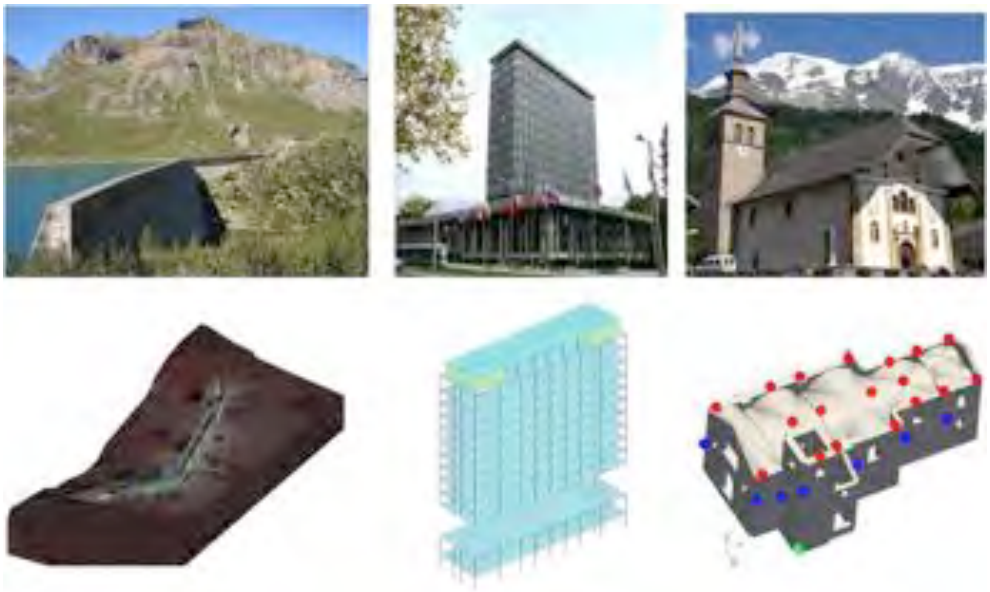
La présente contribution aura pour but de faire un point exhaustif sur ces différents aspects.

##############

Evaluation de la vulnérabilité sismique des structures existantes : Apport des mesures in-situ par vibrations ambiantes dans la conception des modèles numériques.

Desprez C., IFSTTAR Marne-la-Vallée

L'évaluation de la vulnérabilité sismique des structures existantes est un enjeu majeur du génie parasismique, notamment dans un contexte de réévaluation de l'aléa et d'évolution des exigences réglementaires.
Dans le cadre de l'analyse d'un ouvrage, la modélisation numérique est un outil souvent nécessaire pour aboutir à une évaluation fine de sa vulnérabilité. Dans ce cas, le niveau de l'information que l'on cherche à obtenir dépend très fortement des connaissances disponibles sur l'ouvrage considéré; alors même que celle-ci sont souvent limitées.
Sur la base de plusieurs cas d'études, cette présentation explicite l'intérêt que peut représenter l'utilisation des mesures structurelles par bruit de fond, dans le processus de conception d'une maquette numérique ainsi que dans l'analyse qui en résulte.
Le premier cas d'étude concerne un immeuble en béton armé des années 60 pour lequel une analyse de vulnérabilité a été conduite sur la base d'un modèle éléments finis de type multifibres. Le second cas est relatif à l'évaluation d'un barrage hydroélectrique en béton, avant et après travaux de confortement. La modélisation à été réalisé avec des éléments finis tridimensionnels. Le troisième cas s'intéresse à l'application de ce type de mesures dans le cadre de la modélisation simplifiée des monuments en maçonneries.
Pour chacun de ces cas, les informations issues des mesures de bruit de fond furent particulièrement intéressantes puisqu'elles ont permis notamment d'accéder aux caractéristiques modales des ouvrages, éléments primordiaux dans la réponse structurelle d'un ouvrage. L'application de cette technique à des typologies d'ouvrage diverses en démontre la robustesse et les perspectives associées en terme de représentativité dans la modélisation numérique.



Barrage hydroélectrique *Bâtiment en béton armé* *Monument en maçonnerie*

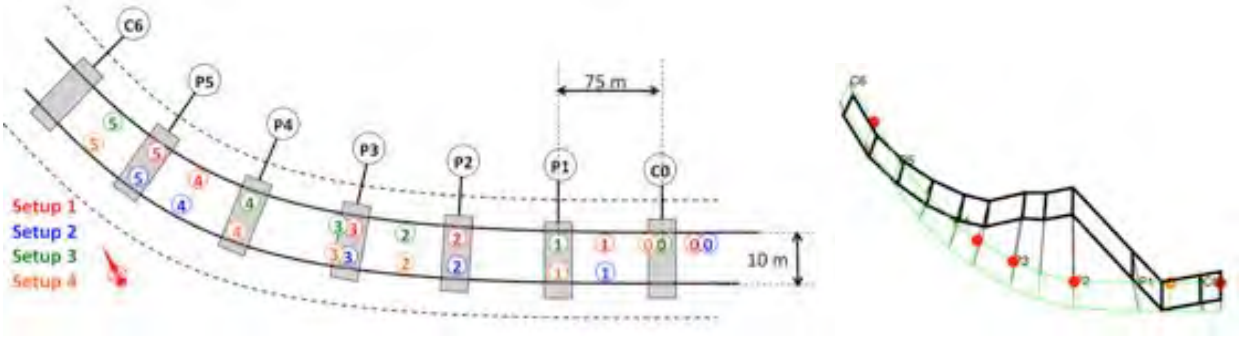
##############

Utilisation de mesures de vibration ambiantes pour la caractérisation dynamique d'un ouvrage d'art de la RN202 bis (vallée du Var).

Régnier et al., CEREMA DTMed

Des enregistrements de vibrations ambiantes sont analysés afin de déterminer la réponse dynamique d'un pont routier de grande dimension traversant le Var (06). Il s'agit d'un pont en béton précontraint construit en 2002, d'une longueur de 438 m répartie en 6 travées de 72 à 75 m. Selon la direction transversale, le principe de conception parasismique retenu repose sur l'utilisation de butées de blocage transversal sur chacun des appuis et sur la formation de rotules plastiques au pied de chacune des piles intermédiaires, tandis que selon la direction longitudinale seule la pile centrale P3 équipée d'une butée longitudinale est susceptible de plastifier en pied et des amortisseurs longitudinaux ont été disposés au droit des piles P2 et

P4 afin de mieux répartir les efforts sismiques et limiter les déplacements sous séisme, permettant ainsi notamment l'utilisation de joints de chaussée usuels. La conception parasismique adoptée est une solution de comportement ductile de l'OA avec acceptation d'un certain niveau d'endommagement en cas de séisme. Une analyse non-linéaire avec accélération calée sur les spectres EC8 a été menée sur l'OA permettant de déterminer ses modes de vibration: Le premier mode longitudinal est à 0.35Hz et les trois modes suivants transversaux à 0.4, 0.64 et 1Hz.
Quatre configurations d'installation (Setup) de 6 capteurs vélocimètres (Lennartz3D 5s), 3 composantes, ont été réalisées tout au long de l'ouvrage d'art et de part et d'autre de la travée avec un point d'enregistrement commun entre deux installations (Figure 1). Cette configuration permet d'analyser les enregistrements de deux installations simultanément pour déterminer le comportement dynamique de l'ensemble du tablier comportement en torsion compris. 24 heures d'enregistrements avec une fréquence d'échantillonnage de 150Hz ont été réalisées pour chaque installation.
Les enregistrements de vibrations ambiantes sont analysés en utilisant deux techniques différentes afin d'évaluer les contributions complémentaires de chaque méthode. La première technique est une analyse modale opérationnelle basée sur la méthode du décrément aléatoire (Asmussen, 1997; 1999) associée à une analyse fréquentielle et la seconde méthode porte sur l'interférométrie sismique par déconvolution. Les deux techniques sont complémentaires et permettent d'obtenir l'ensemble de la réponse dynamique de la structure, caractérisée par des déformées modales, des vitesses de propagation et l'atténuation intrinsèque de chaque mode. L'atténuation étant le paramètre le moins bien contraint par les deux méthodes.
L'analyse fréquentielle préliminaire indique un mode de résonance commun aux 3 directions à 1.1 Hz. Les premières analyse indiquent qu'en dessous de cette fréquence aucun mode de résonance ne semble être visible sur les enregistrements contrairement à ce qui est souligné par les modélisations numériques. La figure 2 illustre la déformée modale du premier mode de résonance de l'ouvrage en utilisant les enregistrements du setup 1. Pour la représentation de la déformée modale, la composante transversale à l'axe de l'OA du capteur 1 a été utilisée comme référence. Une déformation marquée dans les 3 directions est visible. Bien qu'il s'agisse de la première fréquence amplifiée dans le spectre, les premières analyses modales n'indiquent pas à priori un mode de résonance fondamental pour l'une des directions (transversale, longitudinale ou verticale).



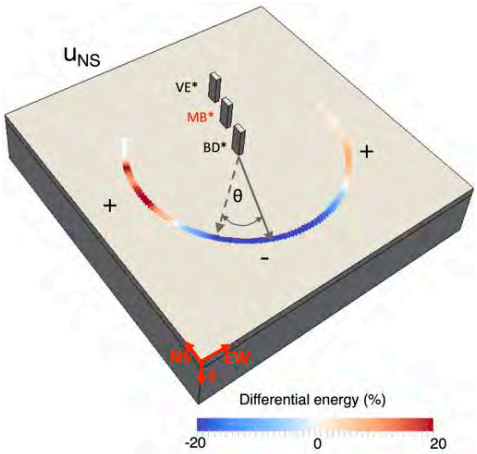
Gauche: Position des capteurs sur l'Ouvrage de la RN 202 Bis. Droite: Déformée modale du premier mode

##############

Effet site-ville observé à Grenoble lors du séisme de l'Ubaye de 2012.

Guéguen et al., ISTerre

Dans cette présentation, nous interprétons la réponse au séisme de l'Ubaye de 2012 de trois tours alignées Nord-Sud à Grenoble à partir du ressenti des habitants, questionnés via les imagettes proposées par le BCSF. Ces trois bâtiments sont identiques d'un point de vue de leur conception mais leur réponse semble très différentes, en particulier entre la tour du milieu et les tours situées aux extrémités de l'alignement. Un effet de groupe est identifié, comparable à un effet site-ville, qui entraine une différence de perception des vibrations par les habitants. L'effet de groupe est confirmé par une modélisation numérique par éléments spectraux, et nous montrons que la variation de la réponse du bâtiment central dépend de l'azimut de la source sismique. L'effet principal est la séparation en deux de sa fréquence de résonance, accompagnée d'une diminution de l'amplitude des vibrations. Nous concluons que l'effet de groupe n'est pas négligeable, ayant un impact sur les effets urbains, et nous questionnant sur la validité du dimensionnement parasismique, qui considère les bâtiments situés dans les zones urbaines comme des constructions isolées, et sur l'interprétation des enquêtes macro-sismiques menées dans les zones urbaines denses.



Différence d'énergie de la vibration du bâtiment central (MB) isolé ou dans le groupe de bâtiment en fonction de la position de la source sismique (θ).

##############

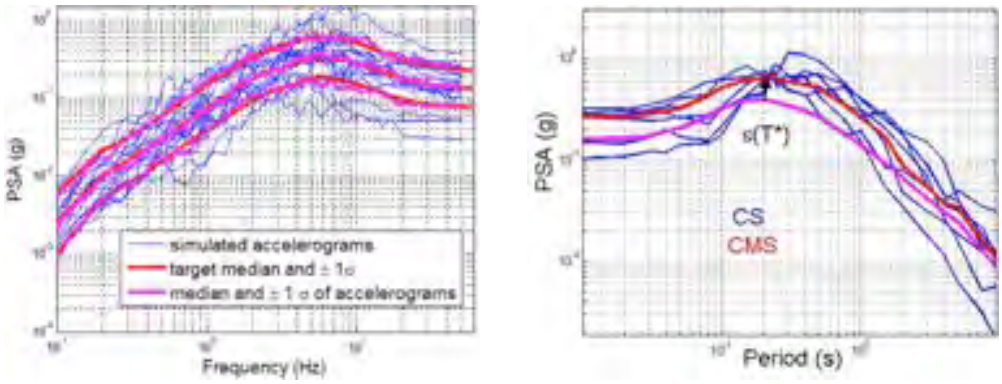
Génération d'accélérogrammes synthétiques en accord avec des données sismologiques

Zentner I., EDF

Cette présentation propose un bref aperçu de la littérature sur les méthodes de génération d'accélérogrammes artificiels. On présente ensuite une méthodologie qui s'appuie sur la notion de densité spectrale (évolutive) et qui permet de générer des signaux synthétiques en accord avec des spectres cible mais aussi un certain nombre d'autres indicateurs du mouvement sismique. Les avantages et verrous liées aux signaux synthétiques seront discutés.

Dans les études de dimensionnement et de réévaluation de la sûreté des structures, le spectre cible est généralement un spectre de « design » enveloppe, incluant plusieurs types de séismes pouvant se produire sur un site. Or, un tel spectre ne permet pas de définir des signaux temporels ayant une forme spectrale en accord avec un réel scénario sismique. La méthode des spectres conditionnels développée aux US a pour vocation de remédier à ce problème. Cette approche permet de définir des mouvements sismiques adéquats pour le design, e.g. en termes de période de retour, tout en gardant une forme spectrale « réaliste » selon les études d'aléa. On illustre l'intérêt et la mise en œuvre de la méthode à l'aide de signaux synthétiques.

Les figures ci-dessus illustrent la génération d'accélérogrammes pour des spectres de scénario (gauche) et des spectres de scénario conditionnels (droite).



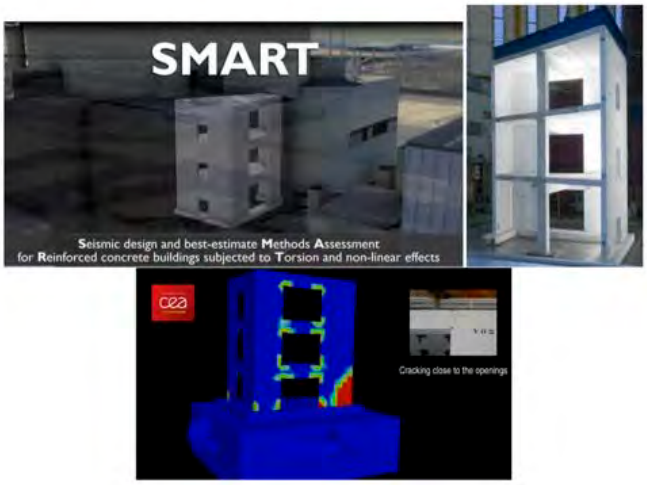
Gauche: Spectres de 50 accélérogrammes dont la médiane et les valeurs à ±1 sont en accord avec le scénario cible (GMPE de Campbell & Bozorgnia 2008) - Droite: Jeu de spectres de scénario conditionnels (CS, bleu) à la période T_0=0.2s et la moyenne conditionnelle (CMS, rouge). La courbe en magenta représente la médiane du spectre de scénario.

##############

Approches expérimentale et simulation dans l'estimation de la vulnérabilité sismique des ouvrages et des composants – activités R&D/expertise du CEA.

Foerster E., CEA

Au sein de la Direction de l'Energie Nucléaire du CEA et du Département de Modélisation des Systèmes et des Structures, le Laboratoire d'Etudes de Mécanique Sismique (EMSI) est en charge d'actions d'études et de recherche dans les domaines de la dynamique des structures et des équipements, en interaction éventuelle avec les sols et les fluides. Un des atouts du laboratoire est de disposer de compétences et de moyens couvrant aussi bien la modélisation physique, la simulation numérique et les essais analytiques ou de validation (tables vibrantes, mur de réaction) sur ses installations propres (Plateforme TAMARIS), en lien direct avec les activités industrielles de ses partenaires historiques (EDF, IRSN et AREVA) et la recherche académique, notamment dans le cadre de l'Institut SEISM Paris-Saclay (www.institut-seism.fr). L'objectif ici est de présenter quelques actions représentatives des activités R&D actuelles du laboratoire en lien avec l'estimation de la vulnérabilité sismique des ouvrages et des composants. Nous présenterons notamment les travaux récents réalisés dans le cadre des projets SMART (*Seismic design and best estimate Methods Assessment for Reinforced concrete buildings subjected to Torsion and nonlinear effects*) et SINAPS@.



Exemple du projet SMART

Avec le soutien de:

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

REGION GUADELOUPE

CONSEIL DÉPARTEMENTAL DE LA GUADELOUPE

Université des Antilles

cnrs INSU
Institut national des sciences de l'Univers

RESIF

OVSG

LabEx OSUG 2020

Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble

afps

seism Paris Saclay Institute

RNVOR

BCSF

Géosciences pour une Terre durable
brgm

IFSTTAR

GeoAzur
TERRE - OCÉAN - ESPACE
Observatoire de la Côte d'Azur - OCA
http://geoazur.oca.eu

UNIVERSITÉ Grenoble Alpes

cea

Cerema

IRSN
INSTITUT DE RADIOPROTECTION ET DE SÛRETÉ NUCLÉAIRE

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG