



LA LETTRE DU PLAN SEISME

2^e TRIMESTRE 2018

ACTUALITES

DOSSIER

POUR FINIR

Nouvel arrêté concernant la réglementation parasismique pour les installations classées

L'arrêté du 4 octobre 2010 relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement fixe, dans sa section II, des règles de tenue au séisme applicables aux établissements Seveso « seuil haut » et « seuil bas », en imposant des règles plus exigeantes que celles dites de « risque normal » aux équipements susceptibles d'engendrer des morts hors du site en cas de séisme. Cet arrêté a été modifié par un arrêté du 15 février 2018.

L'arrêté précédemment en vigueur imposait de réaliser de manière systématique des études sismiques particulières, sur la base du zonage sismique français, déterminant les travaux à réaliser sur les équipements industriels afin qu'aucune zone d'occupation humaine permanente (essentiellement les habitations) ne se trouve dans une zone de danger mortelle en cas de séisme. Le périmètre des établissements concernés par cette exigence, ainsi que les échéances, ont été revus :

Zone sismique	Classe de sol	Avant		Maintenant	
		Seveso seuil bas	Seveso seuil haut	Seveso seuil bas	Seveso seuil haut
1	A, B, C, D, E	31/12/2019	Non exigé	Non exigé	Non exigé
2	A, B, C				31/12/2021
	D, E				31/12/2020
3	A, B, C, D, E	31/12/2016	31/12/2018	31/12/2022	31/12/2020
4					
5					

L'ensemble des installations Seveso devront désormais réaliser un plan de visite des équipements identifiés comme critiques au séisme dans l'étude de danger du site, afin de s'assurer de l'intégrité de ces équipements et de leurs fixations. Ce plan de visite doit être élaboré et mis en œuvre par l'exploitant avant le 1^{er} janvier 2020.

AU SOMMAIRE

ACTUALITES

- Nouvel arrêté sur les ICPE
- Sismicité récente en France
- Restitution de la mission post-sismique AFPS au Mexique
- Lancement du projet POCRISC
- Workshop RESIF « Aléa sismique et shakemaps »

DOSSIER

- Des structures capables de dévier les ondes sismiques

POUR FINIR

- Ça s'est passé par chez vous : Exposition Risque Sismique (Lourdes)
- Allô la FAQ ?
- Quezaco ? Risque spécial



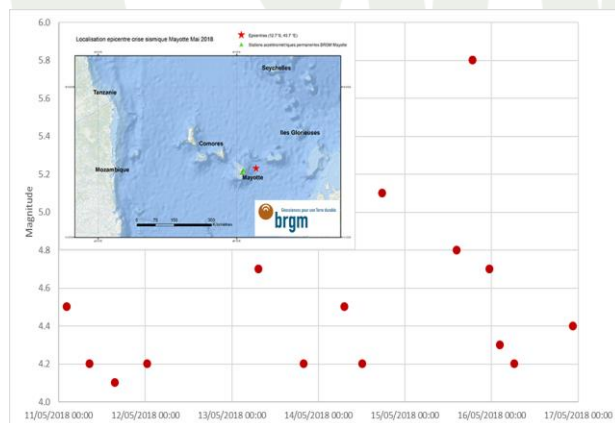


Le nouvel arrêté introduit également la possibilité de réaliser une étude de zonage sismique locale, en remplacement du zonage de sismicité national. Cette étude doit être réalisée par un organisme agréé par le Ministère en charge des installations classées.

Sismicité récente en France

Essaim sismique à Mayotte¹

Depuis le 10 mai 2018, Mayotte est secouée par des centaines de séismes dont une dizaine, de magnitude supérieure à 4, ont pu être ressentis par la population. Seuls 6 de ces séismes ont été détectés par les réseaux sismologiques internationaux (USGS) : il s'agit des séismes du 13 mai à 04h28 TU (M=4.6), du 14 mai à 04h12 TU (M=4.5), du 14 mai à 14h41 TU (M=5.1), et du 15 mai à 11h26 TU (M=4.7), 15h48 TU (M=5.8) et 20h25 TU (M=4.7). Le premier séisme ressenti par la population est celui du 10 mai à 23h19 TU (non détecté par les réseaux internationaux), alors que le séisme le plus important de cette crise sismique demeure à ce jour celui du 15 mai de magnitude 5.8, suite auquel la préfecture de Mayotte faisait état de trois blessés légers et de dommages a priori légers sur des bâtiments vulnérables.



Magnitude, et position de la zone d'occurrence des séismes (sources : BRGM, USGS)

Cet essaim a pu être enregistré localement grâce aux trois stations du Réseau Accélérométrique Permanent (RAP) gérées par le BRGM et opérant à Kawéni, Dzaoudzi et Iloni. Environ 270 secousses ont été enregistrées à Iloni entre le 10 mai 08h et

le 14 mai 08h dont environ 45 de magnitude supérieure à 3.0.

L'archipel des Comores présente, le long de ses 500 kilomètres, une sismicité diffuse et mal connue qui a probablement une double origine volcanique et tectonique. Cette sismicité est régulière avec une fréquence relativement importante de séismes de magnitude proche de 5. En revanche, aucun séisme destructeur de magnitude supérieure à 6 n'a à ce jour été enregistré à proximité de Mayotte.

Alors que Mayotte était hors du cadre réglementaire national jusqu'en 2011, la nouvelle réglementation parasismique s'y applique désormais. Le département de Mayotte est ainsi entièrement situé en zone de sismicité modérée (zone 3).

Pour en savoir plus, [consultez la note d'information du BRGM](#).

Séisme en Alsace

Le 4 mai 2018, un séisme de magnitude 3.5 selon le Laboratoire de Détection et de Géophysique du CEA (CEA-LDG), est survenu au niveau de la frontière franco-allemande, à une dizaine de kilomètres à l'Est de Mulhouse.

Largement ressenti en France dans le Haut-Rhin et notamment à Mulhouse, il a également été ressenti au Sud dans le département du Territoire de Belfort, et au Nord jusqu'à Strasbourg. Il a par ailleurs été ressenti en Allemagne dans la région de la Forêt-Noire.

Le niveau d'intensité des secousses rapportées par les témoignages recueillis par le Bureau Central Sismologique Français (BCSF) demeure cependant modéré, avec localement des intensités de IV.

Séisme à la Réunion

Dans la nuit du 27 au 28 février 2018, à 23h25 heure locale (19h 25 TU), un séisme a été ressenti à la Réunion, « principalement dans les régions des Plaines et dans le secteur sud sud-ouest, et

¹ Situation au 16 mai 2018

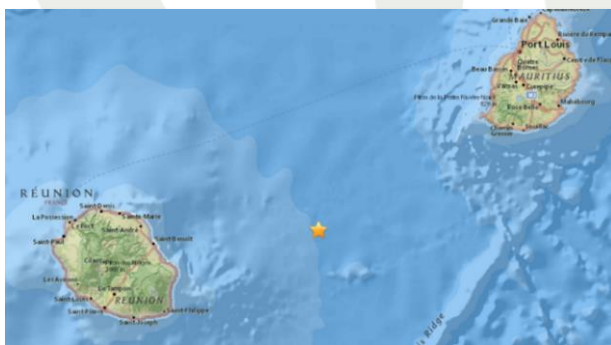


dans une moindre mesure jusqu'à Saint Denis » selon le communiqué de l'observatoire volcanologique du piton de la Fournaise (OVPF).

Rien d'exceptionnel au premier abord. Des petits séismes sont régulièrement ressentis à la Réunion (un par an en moyenne), trop petits pour occasionner des dommages, même légers, aux habitations. Trop petits pour être détectés par les réseaux de surveillances sismologiques mondiaux. Seul l'OVPF, avec ses stations de surveillance du volcan, permet de préciser la localisation de ces événements, généralement sur l'île ou à faible distance des côtes, pour des magnitudes qui ne dépassent que très rarement 3.0.

Celui du 27 février est inhabituel d'abord par sa localisation : en plein Océan Indien à environ 60 km à l'Est-Nord-Est des côtes de la Réunion, ensuite par sa magnitude, 4.0, suffisamment forte pour que le séisme soit détecté par les réseaux de surveillance internationaux.

Le séisme a également été ressenti (mais plus faiblement) à l'île Maurice située à environ 110 km de l'épicentre. Il faut remonter au 6 Janvier 1863 (155 ans !) pour avoir un événement similaire, ressenti à la fois à La Réunion et à Maurice. Le séisme était plus fort que celui du 27 février, ressenti très largement sur les deux îles mais plus fortement à Maurice.



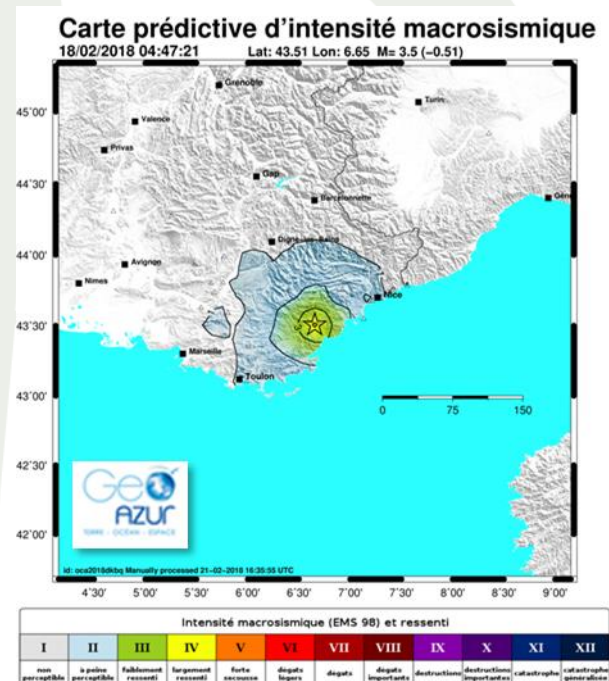
Localisation du séisme du 27 février 2018 qui a touché l'île de la Réunion (source : USGS)

De tels séismes restent encore inexpliqués : non liés aux dorsales océaniques situées à 1000 km, non liés à l'activité volcanique de la Réunion. Parmi les hypothèses la flexure de la plaque lithosphérique sous le poids de l'île. En tout cas

cela montre que même dans ce contexte intraplaque, des séismes de magnitude 4.0 ou plus restent possibles tout en étant exceptionnels.

Séisme dans le Var

Un séisme de magnitude $M_w=3.2$ (MLDG=3.5), localisé à environ 18 km au nord de Fréjus (Var), a frappé le Var le 18 février 2018 à 05h47 heure locale. Sa profondeur est estimée à 12 à 20 km selon Géoazur. D'après le BCSF, ce séisme a été ressenti dans une zone d'environ 15 km autour de l'épicentre avec une intensité maximale estimée à IV sur la base d'environ trois-cents témoignages recueillis dans la zone par le BCSF.



Carte d'estimation de la sévérité des secousses sismiques du séisme du 18 février 2018 dans le Var (source : GéoAzur)

Séisme en Vendée

Un séisme de magnitude modérée M_w 4.0, localisé à une profondeur comprise entre 2 et 10 kilomètres de profondeur selon le RéNaSS, a frappé la Vendée le 12 février 2018 peu après quatre heures du matin en heure locale. D'après le CEA-LDG, l'épicentre de ce séisme a été localisé à environ 21 km au nord-est de Fontenay-le-Comte. Ce séisme a été largement ressenti dans une zone allant de Fontenay-le-Comte à Parthenay avec une intensité maximale estimée à V dans la zone



proche de l'épicentre selon le Bureau Central Sismologique Français (BCSF) sur la base d'environ quatre-cents témoignages recueillis dans la zone.

Restitution de la mission post-sismique AFPS au Mexique

L'AFPS a organisé une mission post-sismique suite au séisme de Puebla du 19 septembre dernier, avec le soutien du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. Ce séisme, de profondeur 56 km et de magnitude Mw 7.1, était localisé dans l'état de Puebla, à une centaine de kilomètres du centre de la ville de Mexico. Il s'est produit 32 ans jour pour jour après le séisme de Mexico de 1985. Le bilan du séisme du 19 septembre 2017 a fait état de plus de 200 morts, et de dégâts matériels situés principalement dans la région épiscopale et dans la ville de Mexico. Le profil géologique de la ville de Mexico, construite sur les sédiments d'un ancien lac asséché, a eu pour effet de modifier localement l'amplitude et le contenu fréquentiel du mouvement du sol (effet de site). Les pertes sont estimées à environ 43 milliards de dollars US.



La mission AFPS s'est déroulée du 7 au 16 novembre, et a été dirigée par Marc Givry, architecte et chef de la mission. Elle était constituée d'un groupe de 8 personnes, travaillant dans des bureaux d'étude privés et organismes techniques et scientifiques publics, représentant diverses spécialités : architecture, aléa, géotechnique, et mécanique des structures. Certains des membres étaient également Inspecteurs d'urgence AFPS.

La Restitution de cette mission a eu lieu à Paris, le vendredi 23 mars 2018 après-midi, dans les locaux du Ministère de la Transition Écologique et Solidaire. Lors de cette demi-journée, l'équipe de la mission a présenté les principales observations qu'elle a pu faire sur le terrain, ainsi que les enseignements qui ont pu en être tirés. Les présentations faites lors de cette journée sont maintenant disponibles en ligne sur le [site internet de l'AFPS](#).

Réunion de lancement du projet POCRISC

Le 16 mars 2018, a eu lieu à Barcelone (Espagne) la réunion de lancement du projet POCRISC financé par le programme européen POCTEFA, et consacré à la thématique du risque sismique à l'échelle du territoire Pyrénéen transfrontalier franco-italien-andorran.

L'objectif du projet POCRISC est de promouvoir une culture commune du risque sismique dans les Pyrénées, par le développement d'approches harmonisées d'évaluation du risque, la diffusion d'informations partagée à destination des collectivités locales et du grand-public, et la mise en place d'outils d'aide à la décision adaptés aux besoins des gestionnaires de crise.

Ce projet, qui fait suite à deux précédents projets Interreg (ISARD et SISPy), fédère dix partenaires, dont cinq partenaires français : le BRGM, le BCSF, L'Entente Valabre, l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes (ENIT) et la société DEVERYWARE. Sont également associés au projet, la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) Occitanie, l'AFPS, l'Observatoire Midi-Pyrénées (OMP) et l'Etat-major interministériel de zone (EMIZ) Sud.





2nd workshop RESIF « Aléa sismique et shakemaps »

Dans le cadre du Réseau Sismologique et Géodésique Français (RESIF), un colloque sur le thème « Aléa sismique & Shakemaps » a été organisé du 29 au 31 janvier 2018 à Montpellier. Ce colloque a réuni une cinquantaine de participants autour de deux thèmes principaux :

- Processus et taux de déformation à l'origine de la sismicité en France métropolitaine, modélisation et confrontation aux données géophysiques et géologiques ;
- Shakemaps nationales de référence : objectifs, données, méthodes et outils dans le contexte national et international.

Les présentations et débats ont été suivis par des chercheurs, ingénieurs et techniciens, étudiants, et praticiens impliqués dans l'étude de la sismicité, le calcul de l'aléa sismique, et le calcul de Shakemaps au sein de laboratoires de recherche, observatoires et entreprises français. Un tiers des participants représentait le monde de l'industrie ayant un intérêt fort en termes de mise à jour des connaissances et de suivi de l'orientation des futurs chantiers de recherche. Enfin, la participation de collègues de l'Observatoire Royal de Belgique, de l'ICGC Catalogne, et de l'ETH Zurich a apporté un complément international très utile et apprécié.

L'ensemble des documents de ce workshop sont disponibles sur le [site internet de RESIF](http://www.planseisme.fr).

Le Chiffre

89

C'est le nombre de sismomètres déployés en

France autour du massif Alpin dans le cadre du programme de recherche européen AlpArray, dont 9 sismomètres en fond de mer.

Agenda

7 juin 2018 (Paris)

Assemblée générale de l'AFPS

6 au 8 novembre 2018 (Lourdes)

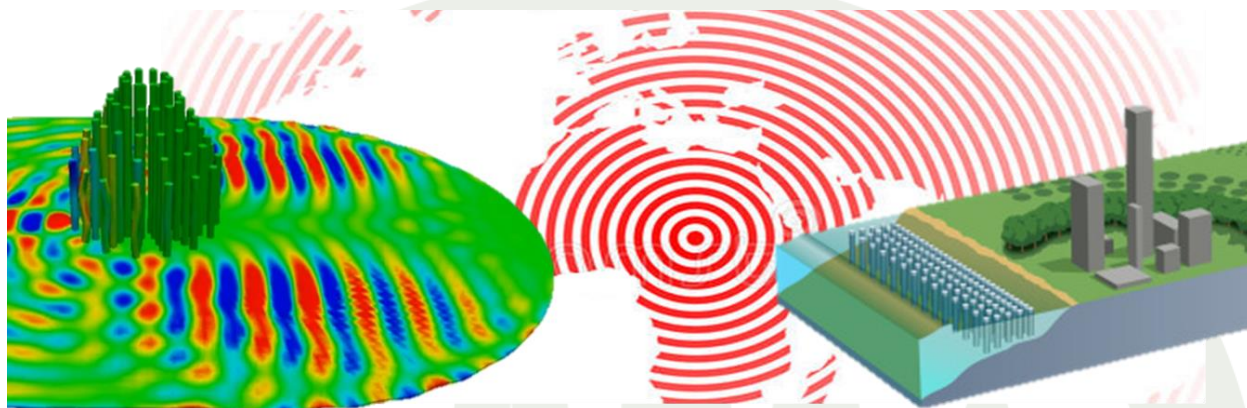
9^{ème} Biennale du RAP





Dossier : Des structures capables de dévier les ondes sismiques

L'Homme ne peut empêcher la survenue des séismes. En revanche, il pourrait bientôt être capable d'influencer la trajectoire et l'intensité des ondes dévastatrices pour protéger un secteur. De récents travaux ont démontré que certains types de structures, enfouies ou en surfaces, sont capables de dévier les ondes. De la même façon que les spécialistes de l'optique savent rendre un objet invisible en déviant les ondes lumineuses, des chercheurs ont démontré que l'on pouvait sur le même principe dévier, atténuer ou filtrer les ondes sismiques... Des zones ou des bâtiments pourraient ainsi devenir « invisibles » pour les séismes. Ce n'est déjà plus de la science-fiction.



La possibilité de dévier les ondes sismiques est parfois présentée dans les revues scientifiques sous le terme « d'invisibilité sismique ». La propagation des ondes sismiques se traduisant par une mise en mouvement des sols traversés, il s'agit plus exactement de transposer le principe « d'invisibilité » propre aux ondes lumineuses, en un principe « d'inamovibilité » applicable aux ondes sismiques. Ce parallèle entre l'optique et la sismologie est à la base des travaux de Sébastien Guenneau et Stefan Enoch. Ces chercheurs de l'Institut Fresnel, spécialistes de l'optique, ont mis en avant l'analogie entre le comportement des ondes lumineuses et celui des ondes sismiques et donc l'adaptation des récentes avancées en matière d'invisibilité à la protection contre les séismes.

Cape d'invisibilité

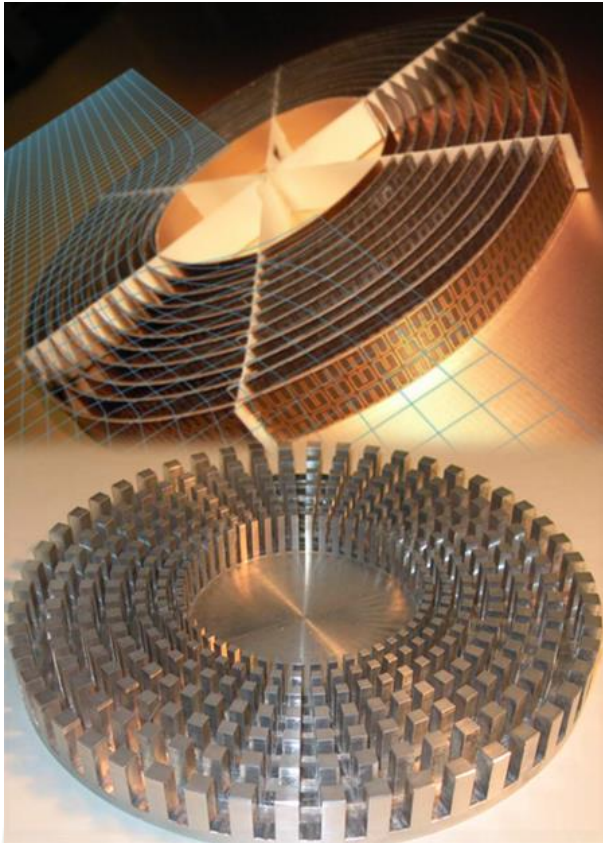
Tout est parti des travaux menés en 2006 par l'anglais John Pendry du Collège Impérial de Londres. Ce chercheur démontre que les trajectoires des ondes lumineuses peuvent être courbées lorsqu'elles arrivent sur un métamatériau, c'est-à-dire un matériau composite constitué par l'ajout dans une matrice d'inclusions dont les propriétés mécaniques –

par exemple la vitesse de propagation de la lumière en leur sein – diffèrent notablement de celles de cette matrice. A l'aide d'un modèle mathématique, il définit les caractéristiques d'un métamatériau capable de rendre invisible, sans le soustraire au regard de l'homme, l'objet (par exemple un bâtiment) placé en son centre. Les ondes lumineuses contournent la structure et se reforment à l'identique derrière cette structure. L'objet placé au centre est alors rendu invisible puisque les ondes ne le traversent pas et ne sont donc pas affectées par sa présence. Cette structure en métamatériaux est couramment appelée « cape d'invisibilité » et fait toujours l'objet de nombreuses recherches pour traduire cette expérimentation en dispositif fonctionnel.

Les scientifiques ont d'ailleurs déjà relevé ce défi pour les micro-ondes.

De la lumière aux vagues et aux séismes

Sébastien Guenneau a collaboré durant plusieurs années avec John Pendry au Royaume-Uni et a acquis la conviction que ces phénomènes peuvent être transposés aux ondes sismiques et hydromécaniques (vagues).



En haut : Cape d'invisibilité pour les micro-ondes (source : Duke University, Imperial College 2006)

En bas : Cape à vagues. Ce type de structure pourrait servir à préserver certaines zones côtières de l'érosion ou protéger certaines installations maritimes des lames de fond (source : CNRS)

Devenu chercheur au CNRS et membre de l'institut Fresnel, il participe à la démonstration en 2009 qu'une structure inspirée des métamatériaux peut détourner les vagues et créer une zone de calme en son centre. L'expérience consiste à disposer dans une cuve d'eau des piliers bien agencés jouant le rôle des inclusions dans les métamatériaux. Là encore, la disposition des piliers est étudiée en amont à l'aide de simulations informatiques.

L'étape suivante est alors de tester cette théorie sur terre en agissant sur les ondes sismiques dites « de surface » (ondes de Rayleigh et de Love), qui comme leur nom l'indique sont guidées à la surface du globe. L'idée des chercheurs est cette fois de remplacer les inclusions des métamatériaux par des puits creusés dans le sol ou par des piliers de béton enterrés pour créer là

encore de brusques changements de milieu capables de perturber la propagation des ondes. Les simulations confirment l'effet recherché mais les chercheurs se heurtent à un problème d'échelle. Les ondes sismiques présentent en effet des longueurs d'onde de l'ordre du kilomètre voir plus. Agir sur leur propagation suppose alors de modifier la structure du sol sur plusieurs kilomètres...

Une rencontre avec Stéphane Brûlé en 2011, ingénieur et sismologue de l'entreprise Ménard spécialisée dans les fondations spéciales, va cependant débloquent la situation. De par sa connaissance des phénomènes sismiques en bassins sédimentaires, il fait prendre conscience aux chercheurs de l'Institut Fresnel que la longueur d'onde des ondes sismiques se réduit fortement dès leur arrivée dans ces terrains mous épais. Les longueurs d'onde constatées ne sont alors plus que de quelques dizaines de mètres. Ces ondes sismiques peuvent alors être perturbées par une zone de sol structurée de puits ou de piliers sur seulement quelques dizaines de mètres.

Réduire l'application potentielle de cette technique aux zones sédimentaires n'en réduit pas l'intérêt. De nombreuses villes menacées par les séismes sont situées sur des bassins sédimentaires. Le cas de Mexico est à ce titre exemplaire puisque la ville est construite sur un ancien lac asséché. En France, on peut notamment citer l'exemples des vallées alpines sédimentaires largement urbanisées, qui abritent de grandes villes telle que Grenoble.

Du laboratoire au terrain

L'implantation de nombreux éléments béton dans un terrain fait partie du cœur de métier de l'entreprise Ménard qui propose à ses clients cette technique pour renforcer le sol lors de constructions lourdes sur des terrains mous. Toutes les conditions sont donc réunies pour tenter une nouvelle expérience cette fois grandeur nature menée par Stéphane Brûlé sur l'un des chantiers de l'entreprise. L'objectif est alors de prouver que les simulations



informatiques et en laboratoire supportent le changement d'échelle et se vérifient bien dans la réalité. Le sol est par nature très hétérogène et difficile à modéliser.

En 2012, deux expériences sont donc réalisées successivement, la première à Grenoble et la seconde à Lyon. Toutes les deux permettent de tester la perturbation des ondes engendrées par un sol structuré de simples puits. La seconde est la plus intéressante car les vibrations sont obtenues par la chute d'une masse de 17 tonnes d'une hauteur de 20 mètres lâchée depuis une grue. Les microséismes obtenus sont d'une magnitude 4 sur l'échelle de Richter et les fréquences des ondes produites sont comprises entre 3 et 10 hertz et donc similaires aux ondes de surfaces constatées lors de tremblements de terre. Sur un terrain nu, un réseau d'une vingtaine de trous verticaux de 2 mètres de diamètres et 5 mètres de profondeur espacés de 7 mètres de distance a été réalisé et l'ensemble du dispositif est équipé de capteurs. Les mesures permettent d'affirmer que les ondes ont bien été refocalisées à l'intérieur du dispositif.

« Nous avons ainsi prouvé qu'un sol structuré peut avoir le même comportement qu'un métamatériau en obtenant un indice de réfraction négatif. Les résultats devraient être encore meilleurs avec des colonnes de béton. On peut ainsi espérer filtrer les ondes arrivant sur un bâtiment et le préserver de certaines fréquences très nuisibles » présente Stéphane Brûlé. Les résultats grandeur nature sont conformes à ceux obtenus par les simulations. « Les travaux sur les modèles vont donc se poursuivre pour les affiner et proposer une plus grande diversité de propositions concrètes adaptées à la variabilité des situations sur le terrain : effet bouclier, effet lentille plate, amortissement... » affirme Sébastien Guenneau qui souligne cependant qu'il n'a pas été aisé de convaincre la communauté scientifique. « Nos travaux se situent à la croisée de plusieurs disciplines scientifiques et du génie civil. Il a fallu

24 mois de revue et 7 rapporteurs pour aboutir à la publication des résultats en décembre 2017² » précise-t-il.

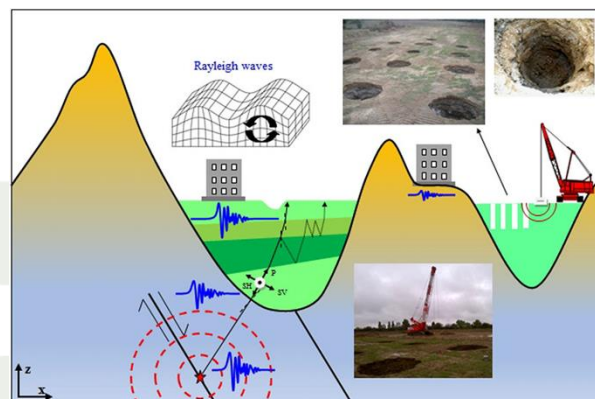


Illustration du phénomène d'effet de site dans une vallée sédimentaire (à gauche) et dispositif expérimental du dispositif d'invisibilité sismique avec trous verticaux dans le sol et séismes simulés par la chute d'une masse (à droite) (source : S. Brûlé et al., 2017)

La forêt, une « cape d'invisibilité » naturelle

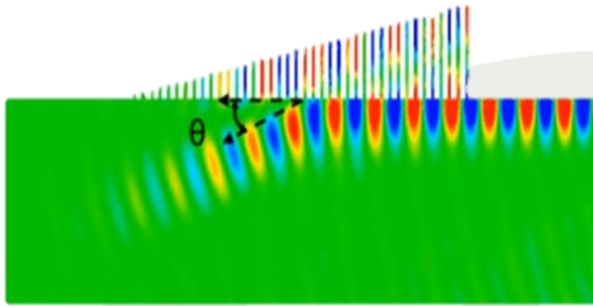
En parallèle, un autre chercheur s'intéresse aux travaux de Sébastien Guenneau. Philippe Roux est physicien spécialiste des ondes acoustiques et chercheur au sein de l'Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) où il travaille avec des sismologues. Là encore, sa vision multidisciplinaire lui permet de transposer l'approche initiale sur les métamatériau à un espace structuré de colonnes mais en surface cette fois. Il fait une première expérience en laboratoire avec une plaque sur laquelle sont fixées de petites colonnes. Les résultats sont concluants et il décide de tester sa théorie grandeur nature avec des piliers naturels déjà en place : des forêts. C'est la naissance du projet Metaforet (<https://metaforet.osug.fr>) qui associe l'ISTerre mais aussi l'Institut Fresnel, l'Institut Langevin, le Collège Impérial de Londres, l'entreprise Ménard, l'institut allemand GFZ et le centre régional de la propriété forestière de Nouvelle-Aquitaine.

Philippe Roux a l'intuition que les arbres peuvent agir comme des résonateurs couplés qui piègent

² S. Brûlé et al. (2017). Flat lens effect on seismic waves propagation in the subsoil. *Scientific Reports* volume 7, Article number: 18066



l'énergie et la réémettent différemment telle une bouteille vide sur laquelle on souffle au bout du goulot et qui résonne. Les arbres pourraient garder les ondes plus longtemps voire les faire plonger en profondeur à condition de faire varier la hauteur des arbres.



Simulation numérique de l'effet d'une forêt sur la propagation d'ondes sismiques (source : projet Metaforet)

Pour confirmer les résultats obtenus en laboratoire et par simulations numériques, une première expérience à taille réelle est menée en octobre 2016. Elle prend place dans une forêt de pins dans les Landes près de Mimizan. Une surface de 1,4 ha (120 m sur 120 m) à l'interface entre un champ ouvert et une forêt est instrumentalisée avec un millier de capteurs pour mesurer la propagation des ondes sur le sol et sur les arbres, avec une source de vibration produisant des ondes verticales comprises entre 10 et 100 hertz. Les résultats sont très encourageants et confirme une fois de plus ceux obtenus en laboratoire et les simulations. Une forêt dense se comporte bien comme un métamatériau et perturbe fortement la propagation d'ondes sismiques. « L'effet de chaque arbre cumulé se conjugue avec un effet collectif lié à la densité. Le résultat est spectaculaire car on obtient une annulation des ondes derrière la forêt » affirme Philippe Roux qui rappelle cependant les limites de cette première expérimentation. « Ces résultats ont été obtenus pour des fréquences comprises entre 40 et 50 Hertz bien différentes des ondes sismiques destructrices dont les fréquences sont plutôt comprises entre 1 et 5 Hertz. Et cela ne concerne que les ondes de surfaces pas les ondes de volumes transverses également nuisibles lors de séismes ».

Des éoliennes protectrices

Mais l'équipe du projet Metaforet ne compte pas en rester là. Les simulations numériques montrent en effet qu'en augmentant la masse des piliers, on pourrait agir sur des ondes de surfaces de plus faibles fréquences. En 2019, une autre expérimentation devrait être menée sur une forêt de peupliers dont la masse est 4 fois plus importante que celle des pins. D'après les simulations, des ondes de fréquences comprises entre 15 à 20 Hertz pourraient être annulées. Enfin, un projet vient d'être déposé pour compléter Metaforet par une dernière expérience sur un champ d'éoliennes dense en Allemagne. Cette fois, les ondes annulées pourraient bien être similaires aux ondes sismiques destructrices. A ce stade de nombreuses questions restent cependant posées notamment sur l'influence de la nature du sol et de la nature des piliers. Le couplage entre le sol et les piliers a beaucoup d'importance sur le comportement des ondes. Les propriétés mécaniques entre le sol et des piliers de type éolienne ne seront-elles pas trop éloignées pour permettre une transmission des ondes de l'un à l'autre...

Des applications bien concrètes

Malgré ces interrogations, Sébastien Guenneau est convaincu des applications potentielles dans le domaine parasismique. « Les résultats de Metaforet montrent aussi une action très significative sur les ondes de surfaces de Love y compris avec des pins. Elles sont moins délétères que les ondes de surface de Rayleigh mais agir sur ces ondes pourrait parfois suffire à maintenir l'impact d'un séisme en dessous d'un certain seuil de nuisance et à éviter une bonne partie des dégâts » affirme le chercheur, convaincu que ces avancées apporteront un vrai bénéfice pour les populations y compris là où les moyens financiers sont modestes. « Et si des vergers bien agencés en plus d'avoir une fonction nourricière pouvaient protéger un village d'une partie des ondes sismiques en cas de tremblement de terre ? » avance-t-il.



Les applications sont également potentiellement nombreuses pour protéger le littoral des vagues. Cette fois, les piliers seraient plantés dans les fonds marins. « *A la place de grosses digues sur lesquelles viennent se fracasser les vagues, ces nouvelles structures inspirées des métamatériaux pourraient guider les vagues vers une zone moins sensible voire vers une zone où elles pourraient être valorisées par des centrales hydroélectriques. Dans d'autres cas, atténuer les vagues sera suffisant pour protéger les côtes* » explique-t-il.

Dans le domaine du génie civil sismique terrestre, Stéphane Brûlé de l'entreprise Ménard entrevoit des applications concrètes pour protéger de nouveaux bâtiments (cf. interview de Stéphane Brûlé dans la rubrique *3 questions à*).

Le clin d'œil d'Éric Appéré

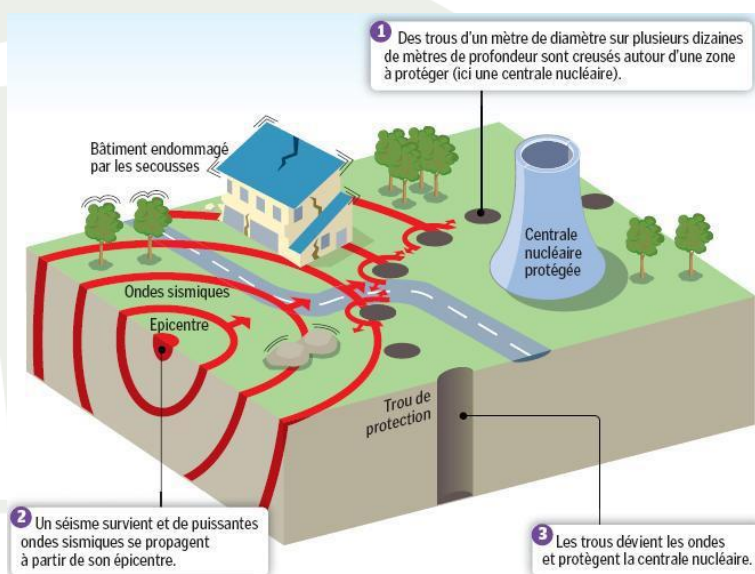




Des perspectives pour l'urbanisation

Au-delà des solutions concrètes en génie parasismique, Stéphane Brûlé est convaincu que l'apport de ces recherches est considérable pour une prise de conscience des effets locaux sur les ondes sismiques de la structure du sous-sol et de la couverture en surface que ce soit de façon naturelle (modification brusque du type de sol, couvert végétal) ou artificielle (éléments de béton dans le sol ou bâti). « Lors des derniers tremblements de terre importants à Mexico, des effets très contrastés des séismes selon les zones de la ville avaient déjà été repérés » rappelle-t-il. Ce phénomène a d'ailleurs été largement analysé par le sismologue Philippe Gueguen qui a étudié l'interaction sismique entre le sol et le bâti. « Grâce aux recherches sur les métamatériaux, on peut désormais aller plus loin dans la compréhension et envisager de nouveaux leviers d'action » avance Stéphane Brûlé « A l'échelle d'une ville, pourquoi ne pas envisager d'intégrer ces données à la programmation urbaniste en jouant sur la distance et la taille des bâtiments ».

Un nouveau champ d'exploration est donc ouvert pour protéger les villes et les sites sensibles des séismes. Sébastien Genneau insiste d'ailleurs sur la mise à disposition des données : « Les fondements sont désormais suffisamment solides pour que d'autres scientifiques, ingénieurs voire décideurs politiques s'en emparent dans leurs domaines de compétence de façon à aboutir à des réalisations concrètes à moyen terme » affirme-t-il avec enthousiasme.



Principe « d'invisibilité sismique » appliquée à la protection d'une centrale nucléaire (source : Le Parisien)

POUR ALLER PLUS LOIN :

- Dossier de *La Recherche* : Dévier les séismes avec des trous et du béton
- « Métamatériaux ou l'invisibilité réinventée » : Dossier du CNRS et Conférence du musée des Arts et Métier du 25 février 2016
- Conférence « Forum du CNRS – Que reste-t-il à découvrir » : Une cape d'invisibilité... contre les séismes



3 questions à Stéphane Brûlé

Stéphane Brûlé est ingénieur et sismologue chez Ménard, entreprise spécialisée en fondations spéciales.



« Des applications bien concrètes... »

Pensez-vous que les travaux auxquels vous avez collaboré puissent conduire à rendre des bâtiments « invisibles » pour les ondes sismiques et ainsi à les protéger ?

De façon pragmatique, nous ne cherchons pas à obtenir une « invisibilité sismique » parfaite, il n'est d'ailleurs par forcément souhaitable que les ondes sismiques se retrouvent à l'identique à l'arrière de la zone protégée. Nous recherchons une atténuation susceptible de faire la différence entre une situation où un bâtiment s'effondre et une situation où le tremblement est ressenti mais le bâtiment ne s'effondre pas et n'occasionne pas de victimes. C'est bien l'objet du génie parasismique.

Ces travaux montrent qu'il est désormais tout à fait envisageable de filtrer les fréquences grâce à ces structures de type métamatériaux. Le contenu fréquentiel d'un séisme est très variable d'un tremblement de terre et à l'autre y compris au sein d'une même région. Nous savons que certaines fréquences sont particulièrement destructrices. Préserver certains bâtiments des fréquences les plus nuisibles serait déjà une très belle avancée. Les vibrations seraient ressenties mais la structure serait préservée au moins dans un premier temps pour permettre de sauver un maximum de vies humaines.

Vous semble-t-il réaliste de mettre en œuvre sur le terrain cette technique parasismique ?

Dans le cas de constructions importantes sur des terrains sédimentaires qui nécessitent de toute façon un renforcement de sol par l'inclusion de piliers béton, cela peut s'appliquer de façon pragmatique. Ces avancées sur les effets des métamatériaux vont permettre d'agencer ces inclusions de telle façon que nous obtenions un effet additionnel parasismique sans surcoût important. Quand seul l'effet parasismique sera recherché, cette technique des métamatériaux sera plus certainement utilisée de façon très ciblée et en combinaison avec d'autres solutions comme les isolateurs sismiques pour optimiser l'efficacité et les coûts.

Est-ce d'ores et déjà opérationnel ?

Avant l'application, une prochaine étape serait souhaitable pour tester cette fois l'effet de colonnes de béton enterrées à la place des puits. D'après les simulations informatiques, les résultats devraient être encore meilleurs. Même si jusqu'ici les observations sur les expériences terrains sont bien corrélées aux simulations, cela reste selon moi à vérifier avant d'aller plus loin. Nous espérons bientôt réunir les conditions matérielles à une telle expérimentation grandeur nature.



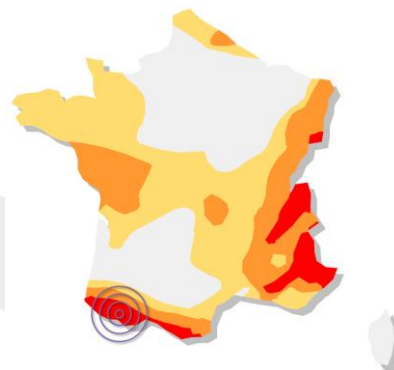


Ça s'est passé par chez vous

Exposition organisée par le C-PRIM et la DDT65 sur le risque sismique dans les Pyrénées du 26 au 30 mars 2018 (Lourdes)

Du 26 au 30 mars 2018, le C-PRIM a organisé en partenariat avec la Direction Départementale des Territoires des Hautes-Pyrénées une semaine de communication sur le risque sismique au Palais des Congrès de Lourdes.

A cette occasion, une exposition photos de séismes passés (Lambesc – 1909, Arette – 1967, Lorca – 2011) a été notamment présentée à la Galerie du Palais des Congrès de Lourdes. La semaine s'est clôturée le vendredi 30 mars par une conférence de Guy Sénéchal (sismologue et maître de conférence à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour) sur le thème « Lourdes et la sismicité des Pyrénées : que savons-nous ? ». Elle a été suivie d'une présentation du projet du Plan de Prévention du Risque Sismique de Lourdes faite par les services de l'Etat.



Allô la FAQ

Qu'est-ce qu'une ICPE ?

Les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) sont « *les usines, les ateliers, les dépôts, les chantiers, et d'une manière générale, les installations exploitées ou détenues par toute personne physique ou morale, publique ou privée, qui peuvent présenter des dangers ou des inconvénients soit pour la commodité du voisinage, soit pour la santé, la sécurité, la salubrité publiques, soit pour l'agriculture, soit pour la protection de la nature et de l'environnement, soit pour la conservation des sites et des monuments ainsi que des éléments du patrimoine archéologique* » (article L.511-1 du code de l'environnement).

[Lien vers le descriptif des règles parasismiques applicables aux ICPE « à risque spécial »](#)

QUEZAC ?

Le risque spécial

Les ouvrages à « *risque spécial* » regroupent certains équipements et installations, les barrages, les installations classées pour la protection de l'environnement et les installations nucléaires de base.

Les installations nucléaires de base sont l'objet de recommandations et de règles de sûreté spécifiques, dites règles fondamentales de sûreté (RFS), établies par l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN).

Parmi les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), les installations classées dites « à risque spécial » sont les équipements, au sein des établissements Seveso seuil haut et seuil bas, susceptibles, en cas de séismes, de produire des effets létaux à l'extérieur des sites.

Par ailleurs, un guide « Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques » a été établi sous l'égide du ministère en charge du développement durable, pour servir de référentiel technique unifiant les pratiques pour la vérification de la sécurité vis-à-vis du risque sismique des ouvrages hydrauliques, barrages et digues, situés en France.

