



## Procédure de sélection de signaux sismiques pour l'analyse fiabiliste de la vulnérabilité sismique de charpentes industrialisées en bois

Didier Bertil\*, Julien Rey\*, Myriam Belvaux\*

\* BRGM, Service Risques Naturels et Sécurité du Stockage de CO<sub>2</sub>

3, avenue C. Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2

d.bertil@brgm.fr

**RÉSUMÉ.** Pour étudier la vulnérabilité sismique des charpentes industrialisées en bois, le projet SISBAT comporte la réalisation de modélisations numériques probabilistes et des essais sur tables vibrantes. Pour cela, des signaux sismiques numériques sont sélectionnés devant répondre à des contraintes de variabilité, de représentativité et de conformité aux recommandations de la réglementation parasismique. La méthodologie de sélection définit 4 scénarios de séismes représentatifs des zones d'aléa modéré, moyen et fort du zonage sismique réglementaire. Les séismes de scénarios sont choisis à partir de l'aléa sismique probabiliste à une période de retour de 475 ans. Pour la modélisation numérique, une quinzaine d'accélérogrammes sont sélectionnés pour chaque scénario parmi des signaux naturels non modifiés, pour des sols de type A, B, C, D. Pour les essais dynamiques, 3 signaux sont calés sur des spectres cibles, 2 spectres représentatifs de séisme des zones d'aléa moyen, fort, et le dernier calé sur un spectre réglementaire EC8.

**ABSTRACT.** To study the seismic vulnerability of industrialized timber roofs, the SISBAT project includes numerical probabilistic modeling and tests on shaking tables. For this, digital seismic signals are selected to fill the needs of variability, representativeness and compliance with the recommendations of the seismic regulations. The selection methodology defines four scenarios of earthquakes representing seismic hazard zones of moderate, medium and high seismic activity in the regulatory framework. The scenario earthquakes are selected from the probabilistic seismic hazard assessment at a return period of 475 years. For numerical modeling, fifteen time histories are selected for each scenario among natural unmodified signals, for soil type A, B, C, D. For dynamic tests, three signals are matched on target spectra: 2 spectra representative of moderate and medium seismic hazard zones and the last matched on regulatory EC8 spectrum.

**MOTS-CLÉS:** accélérogrammes, vulnérabilité sismique, méthodologie, charpente en bois, signaux naturels, spectres d'aléa uniforme.

**KEYWORDS:** time histories, seismic vulnerability, methodology, timber roof, natural signals, uniform hazard spectra.

## 1. Introduction

Le projet ANR-SISBAT, en cours de réalisation, cherche à analyser la vulnérabilité sismique de maisons individuelles (à mur maçonné ou à ossature bois) avec toitures en charpentes industrialisées en bois. Le projet comporte à la fois des modélisations numériques probabilistes (dites analyses fiabilistes) et des essais dynamiques sur table vibrante.

Il est nécessaire de définir les signaux accélérométriques numériques qui seront utilisés. Pour chacun des processus, le nombre des signaux diffèrent. Dans le premier cas, la variabilité du mouvement sismique en entrée peut être caractérisée à partir d'un grand nombre de signaux. Pour les essais dynamiques, ce nombre est forcément très limité.

La sélection de mouvements sismiques de référence n'est pas définie pour un site particulier mais doit être applicable à de larges zones en France métropolitaine et aux Antilles françaises. Les signaux doivent être représentatifs du contexte sismotectonique de ces zones. Enfin les spécificités liées à la réglementation EC8 doivent être respectées.

L'étude présentée ici, faisant aussi l'objet du rapport Bertil et al. (2010), cherche donc à définir une méthodologie de sélection de signaux qui répond au mieux à toutes ces contraintes. Intervenant dans la partie amont du projet SISBAT, l'impact de ces signaux sur les modélisations et essais dynamiques ne pourra être analysé qu'en fin de projet.

## 2. Signaux d'entrée pour l'analyse fiabiliste

### 2.1 Méthodologie

Les critères de choix des accélérogrammes peuvent être extrêmement larges. Pour mieux les définir on s'appuie sur 4 principes de base.

- 1 : **des signaux réalistes pour le contexte France métropolitaine et Antilles Françaises.** Nous recherchons des signaux correspondant à des configurations site/séisme possibles dans le contexte sismotectonique à considérer et en termes de magnitude/distance.
- 2 : **un aléa sismique défini selon les critères probabilistes.** Les niveaux d'accélération du sol s'appuieront sur l'aléa sismique probabiliste. Concernant le bâti courant d'habitation, nous choisissons la période de retour de 475 ans correspondant à une probabilité de dépassement de l'accélération de 10% sur 50 ans.
- 3 : **la recherche d'accélérogrammes naturels plutôt que synthétiques.** Du fait de la complexité du modèle de calcul fiabiliste de la charpente, le nombre de signaux d'entrée est limité à une sélection de signaux représentatifs choisis dans les banques de données d'accélérogrammes naturels.
- 4 : **La prise en compte de types de sols les plus représentatifs possibles.** Ceux-ci sont définis selon la classification des EC8.

La procédure de sélection peut se décomposer en 4 étapes comme illustrée sur la figure 1 et détaillée ci-dessous.

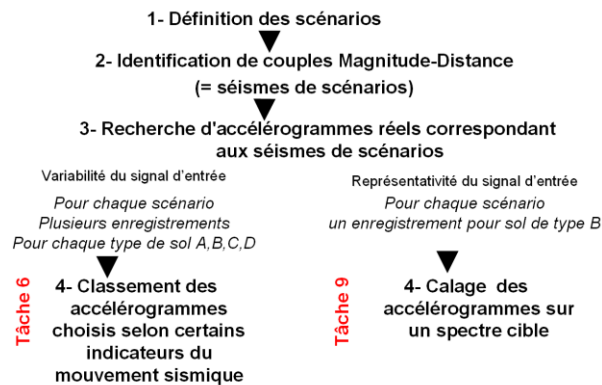


Figure 1. Procédure de sélection des accélérogrammes

## 2.2 Définition des scénarios :

La recherche de séismes de scénario impose de **définir des sites représentatifs** des zones réglementaires d'aléa modéré, moyen et fort. Ces sites sont choisis de préférence dans la partie haute de la gamme d'accélération de ces zones d'aléa (Figure 2):

**Aléa fort (accélération  $\geq 3.0 \text{ m/s}^2$ )** Le site sélectionné est la **ville du Moule** située sur la côte Est de la Guadeloupe correspondant à une accélération (=475 ans) élevée aux Antilles Françaises selon le calcul de Martin et al. (2002)

**Aléa moyen (1.6- 3.0  $\text{m/s}^2$ )**. Nous avons choisi le site où l'aléa est le plus fort en France, c'est-à-dire sur la partie Ouest de la chaîne des Pyrénées au niveau de la **ville de Lourdes**.

**Aléa modérée (1.1 – 1.6  $\text{m/s}^2$ )**. Cette zone est présente sur une grande partie de la France en larges bandes sur le pourtour des zones d'aléa moyen (Est de la France et Pyrénées). Le site choisi est **la ville de Nice**.

## 2.3 Séismes de scénarios

Le choix des séismes de scénarios est effectué à partir d'un calcul d'aléa probabiliste sur les 3 sites et de la désagrégation de l'aléa pour identifier les couples magnitude/distance qui contribuent le plus à l'aléa.

Les modèles de zonages et les paramètres d'activité sismiques associés sont ceux définis dans l'étude de Martin et al. (2002) qui a servi de base à la carte de zonage sismique réglementaire. Les modèles d'atténuation retenus sont la relation Berge-Thierry et al (2003) pour la France Métropolitaine, Takahashi et al. (2000) et Youngs et al. (1997) pour les Antilles. Le calcul est effectué sur 12 périodes spectrales (au lieu de 4 pour Martin et al., 2002) pour mieux définir la forme des spectres d'aléa uniforme.

La désagrégation est effectuée sur deux périodes spectrales 0.2 s et 1.0 s pour vérifier si des différences importantes sont constatées. La figure 3 montre les résultats de la désagrégation pour les sites de Nice et du Moule et pour une période spectrale 1.0 s. A Nice, la distribution des contributions est unimodale. Pour le Moule, on distingue nettement deux types de sources : des séismes superficiels proches et des séismes de subduction à plus de 60 km de distance. Les séismes de scénarios retenus sont résumés dans le tableau 1.

Pour l'aléa modéré et moyen, les contributions principales sont à des distances courtes inférieures à 30 km. Pour l'aléa fort, il est nécessaire de distinguer deux types de sources : l'une proche de sismicité intraplaque superficielle, l'autre lointaine, associée au plan de subduction.

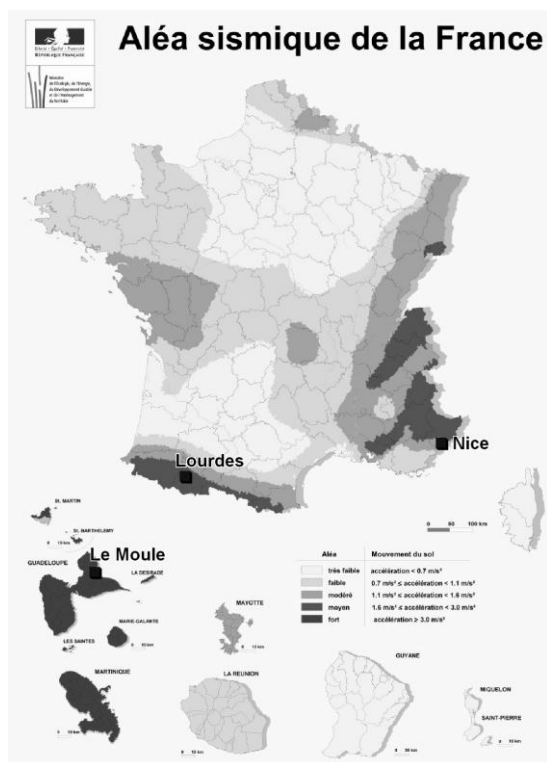


Figure 2. Carte d'aléa sismique de la France et position des sites choisis

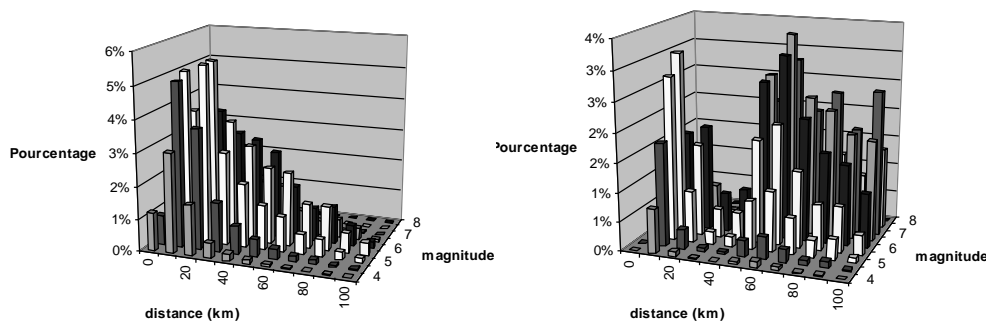


Figure 3. Désagrégation de l'aléa (période de retour 475 ans, période spectrale 1.0 s)

Zone d'aléa	Site	PGA- 475 ans	Distance	Magnitude	
modéré	Nice	0.16 g	20-30 km	Ms 5.5 - 6.0	
moyen	Lourdes	0.26 g	20-30 km	Ms 5.5 - 6.0	
fort	Le Moule	0.33 g	10-20 km	Mw 4.5 - 5.0	Séisme proche
fort	Le Moule	0.33 g	60-70 km	Mw 6.5 - 7.0	Séisme lointain

Tableau 1. Séismes de références pour les scénarios des zones d'aléa modéré, moyen et fort

#### 2.4 Sélection des signaux d'entrée pour la modélisation numérique d'analyse fiabiliste

Nous recherchons une quinzaine de signaux pour chaque scénario. La sélection s'effectue successivement en trois niveaux:

- premier niveau : gamme de **magnitudes et de distances**. Cette gamme est systématiquement d'un demi-degré en magnitude, mais peut être plus ou moins étendue en termes de distance (par exemple,  $d_{\text{cible}} / 2 < d < d_{\text{cible}} * 2$ ).
- deuxième niveau : **PGA à  $\pm 25\%$  du PGA cible**. Cette sélection s'effectue sur une des deux composantes du signal enregistré.
- troisième niveau : **type de sol**. Par souci de représentativité, nous cherchons à fournir autant que possible des enregistrements sur des types de sol variés, c'est-à-dire les classes A, B, C et D (Eurocode 8, 2005). La catégorie de sols B, est la plus représentée dans les bases de données accélérométriques. Du fait du très faible nombre de données enregistrées au rocher de type A ou sur sols « mous » de type D ou E, le domaine de recherche est étendu aux bases de données californiennes et japonaises.

Les critères de sélection pour les 4 scénarios sont résumés sur le tableau 2. Les caractéristiques des 15 enregistrements retenus pour l'aléa modéré (site de Nice) et les accélérogrammes correspondants sont représentées sur le tableau 3 et la figure 4.

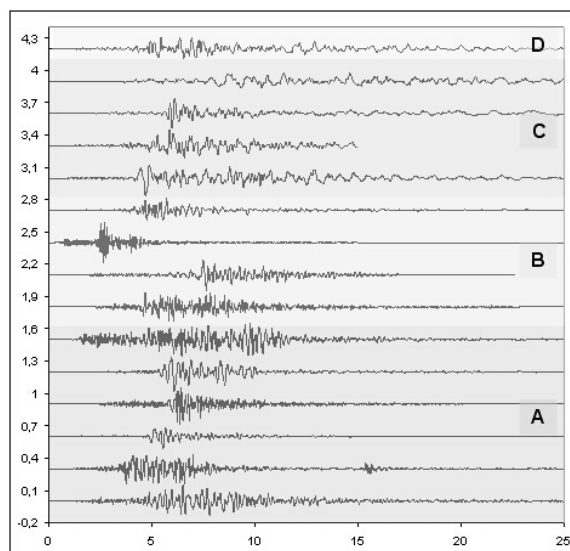
Un classement des signaux d'entrée est proposé à partir de plusieurs indicateurs du mouvement sismique (PGA, PGV, intensité d'Arias, CAV, durée de phase forte, intensité) pour indiquer les signaux potentiellement les plus pénalisants pour les structures. Ainsi il sera possible, après les modélisations numériques et les essais dynamiques, de voir la pertinence de ces indicateurs par rapports aux évaluations de dommages.

	Ville	Nice	Lourdes	Le Moule proche	Le Moule lointain
étape 1	Magnitude	$5,5 \leq M_s \leq 6,0$	$5,5 \leq M_s \leq 6,0$	$4,5 \leq M_w \leq 5,0$	$6,5 \leq M_w \leq 7,0$
étape 2	Dist. hypocentrale	0 – 50 km	0 – 50 km	0 – 30 km	40 – 100 km
étape 3	PGA	0,12 - 0,20 g	0,20 - 0,32 g	0,24 - 0,40 g	0,24 - 0,40 g
étape 4	Base de données privilégiée	Europe	Europe	Caraïbes subduction	Caraïbes subduction
étape 5	Base complémentaire.	Californie	Californie	Europe Californie	Japon
Nb. enregistrements		15	14	11	13

Tableau 2. Processus de sélection d'accélérogrammes naturels pour les quatre séismes de scénario retenus

Pays	Séisme	Année	Ms	Mw	Station	Rh	Re	EC8class	PGA
Californie	Whittier Narrows	1987	5.9	6.0	Carson - Water St.	31.5	28	D	1.3074
Italie	Basso Tirenno	1978	5.8	6.1	Patti (cab.)	23	18	C	1.5696
	Lazio Abruzzo	1984	5.8	5.9	Cassino (Sant Elia)	19	16	C	1.4153
	Umbria Marche (choc 2)	1997	5.9	6.0	Castelnuovo (Assisi)	23	22	C	1.6003
Turquie	Izmit (réplique)	1999	5.8	5.8	Adapazari Seker Fb.	29	25	C	1.3870
Grèce	Ano Liosia	1999	5.9	6.0	Athens 2	26	20	B	1.5696
Turquie	Izmit (réplique)	1999	5.8	5.8	Adapazari Bahtiyat Topcu Ev	27	23	B	1.8980
Italie	Frioul (réplique)	1976	6.0	6.1	Kobarid-SL	38	37	B	1.3797
					Tarcento	14	12	B	1.3387
Italie	Basso Tirenno	1978	5.8	6.1	Naso	23	18	A	1.4737
	Valnerina	1979	5.8	5.9	Cascia	6	5	A	1.9896
	Umbria Marche (choc 1)	1997	5.5	5.7	Assisi	25	24	A	1.5256
	Umbria Marche (choc 2)	1997	5.9	6.0	Assisi	22	21	A	1.8365
	Umbria Marche (choc 1)	1997	5.5	5.7	Borgo (Cerreto Torre)	24	23	A	1.8227
	L'Aquila	2009	6.2	6.3	GSA	20	18	A	1.5056

**Tableau 3.** Caractéristiques des enregistrements retenus pour l'aléa modéré (Nice). Les distances hypocentrales (Rh) et épacentrales (Re) sont exprimées en km ; les PGA en  $m/s^2$



**Figure 4.** Signaux retenus pour l'aléa modéré (Nice), classés par catégorie de sol. En échelle horizontale, le temps en seconde ; en échelle verticale, l'accélération en g (cumulée pour les besoins de la figure).

### 3. Signaux d'entrée pour les essais sur table vibrante

Pour chaque configuration de charpente en bois, les essais dynamiques sur table vibrante ne seront effectués qu'avec trois signaux d'entrée.

1. un accélérogramme proche (scénario Lourdes) représentatif d'un aléa moyen en France métropolitaine ;
2. un accélérogramme lointain (scénario Guadeloupe, subduction) représentatif d'un aléa fort aux Antilles.
3. un accélérogramme avec un contenu spectral identique à un spectre réglementaire EC8.

Les accélérogrammes 1 et 2 sont choisis parmi les signaux naturels sélectionnés pour la modélisation numérique pour une classe de sols B correspondants à des dépôts raides de sols sur-consolidés avec  $360 \text{ m/s} <$

$V_{S30} < 800$  m/s). La classe de sols B est la plus représentée dans les bases de données accélérométriques. Elle peut aussi correspondre au type de sol fréquemment rencontré dans les zones constructibles.

Chaque accélérogramme naturel a une signature spectrale qui lui est propre. Le contenu spectral du signal doit être modifié pour répondre au mieux au scénario de départ. Pour cela nous utilisons le logiciel RSPMatch 2005 (Hancock et al., 2006) qui permet de modifier un signal en le calant par rapport à un spectre cible.

- Le spectre du signal 1 est calé sur un spectre de séisme superficiel crustal calculé avec la relation Berge-Thierry et al. (2003) pour une distance 25 km et une magnitude 5.75.
- Le spectre du signal 2 est calé sur un spectre de séisme de subduction calculé avec la relation Youngs et al. (1997) pour une distance 65 km et une magnitude 6.75.

Les signaux 1 et 2 ne couvrant qu'une partie du contenu spectral d'un spectre réglementaire EC8, le troisième signal est basé sur le même signal proche que le n°1 mais calé sur un spectre cible défini comme le spectre EC8 d'un sol de classe C. Du fait de la forme particulière du spectre réglementaire et pour avoir un signal en déplacement qui ne dépasse pas la capacité de la table vibrante, le spectre cible ne suit la forme du spectre EC8 que sur la gamme 0-1 seconde.

Ainsi, les 3 signaux d'entrée permettent de prendre en compte une large gamme de contenu spectral, des durées de signal courtes et longues et des types de sols B et C.

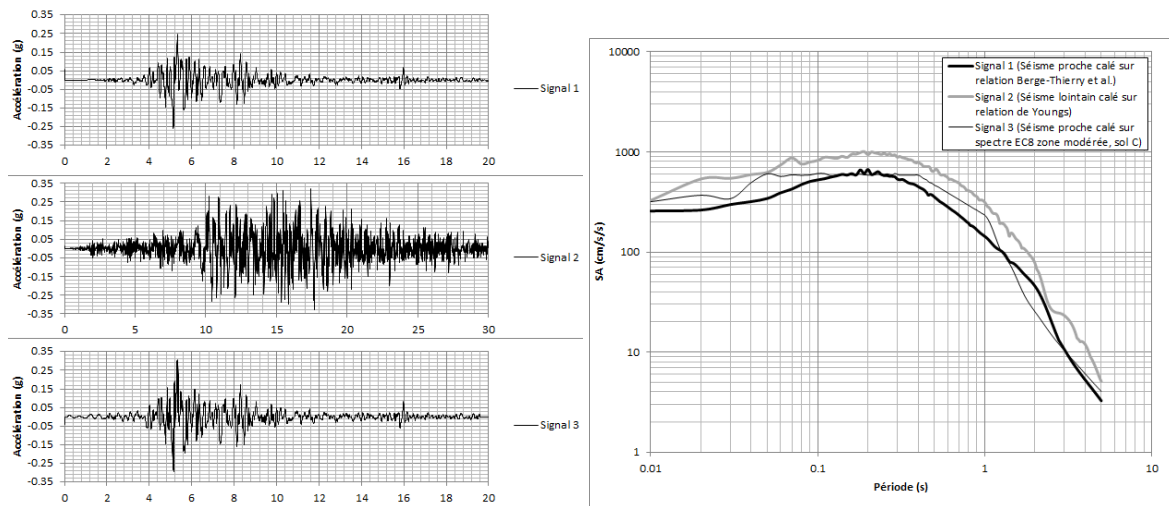


Figure 5. Signaux sélectionnés pour les essais sur table vibrante et spectres correspondants.

#### 4. Discussions-Conclusions-Perspectives

La procédure de sélection permet un choix de signaux adapté au contexte sismotectonique des zones où ces types de charpentes peuvent être construits en France métropolitaine et aux Antilles Françaises. Les contraintes de modélisation ou d'essais nécessitent de limiter les choix possibles de signaux. Les critères choisis répondent aux objectifs de variabilité ou de représentativité. L'aspect réglementaire est également respecté. Les spectres des signaux sélectionnés sont comparés aux spectres de la réglementation parasismique en vigueur.

Les accélérogrammes ainsi obtenus représentent le mouvement au niveau du sol et non au niveau de la toiture. Pour ces essais dynamiques où la charpente en bois est posée directement sur la table vibrante, il faudra modifier ce signal d'entrée avec une fonction de transfert du signal entre le sol et la toiture.

La méthodologie ne fixe aucun critère sur la fréquence fondamentale de la structure étudiée dans la mesure où celle-ci n'était pas connue. L'identification de ces fréquences permettra alors de tester d'autres critères de sélection de signaux plus adaptés à la structure comme le calage au « conditional mean spectrum » (Baker and Cornell, 2006).

## 5. Bibliographie

- Baker J.W., Cornell C.A., «Spectral Shape, Epsilon and Record Selection», *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 35, n°9, 2006, p. 1077-1095.
- Berge-Thierry C., Cotton F., Scotti O., Griot-Pommera D.-A., Fukushima Y., «New empirical response spectral attenuation laws for moderate European earthquakes» *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 7, n°2, 2003, p. 193–222.
- Bertil D., Rey J., Belvaux M., Projet ANR SISBAT – Modélisation de l'action sismique. Rapport RP-58886-FR, 2010, BRGM.
- Hancock J., Watson-Lamprey J., Abrahamson N.A., Bommer J.J., Markatis A., McCoy E., Rishmilla M., «An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets. » *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 10, Special Issue 1, 2006, p. 67-89.
- Martin C. et al., Révision du zonage sismique de la France, Approche probabiliste, Rapport GTR/MATE/07/01-150, 2002., GEOTER.
- Takahashi, T., Kobayashi, S., Fukushima, Y., Zhao, I.X., Nakamura, H., & Somerville, P.G., «A spectral attenuation model for Japan using strong motion data base», *Proceedings of the Sixth International Conference on Seismic Zonation.*, 2000, Palm Springs, US.
- Youngs R. R., Chiou S.-J. Silva W. J. & Humphrey J. R. «Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes». *Seismological Research Letters*, vol. 68, n°1, 1997, 58–73.