

# Sismicité et caractérisation de l'aléa sismique pour les projets d'ingénierie

## Zonages sismiques France / Belgique

Pierre-Yves BARD<sup>1</sup> / Thierry CAMELBEECK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Chercheur IFSTTAR / ISTerre, Grenoble, France

<sup>2</sup> Observatoire Royal de Belgique, Uccle



# Plan

## Introduction : Séismes et mouvements sismiques

- Cadre tectonique général et sismicité
- Physique sous-jacente : Source / propagation / site
- Caractérisation pour l'ingénierie

## Estimation : actions de dimensionnement

- Méthodes disponibles
- Zonages réglementaires (Risque normal / risque spécial)
- Comparaisons Belgique / France / Europe

## Perspectives et conclusions

- Travaux en cours ou souhaitables
- Discussions persistantes ...

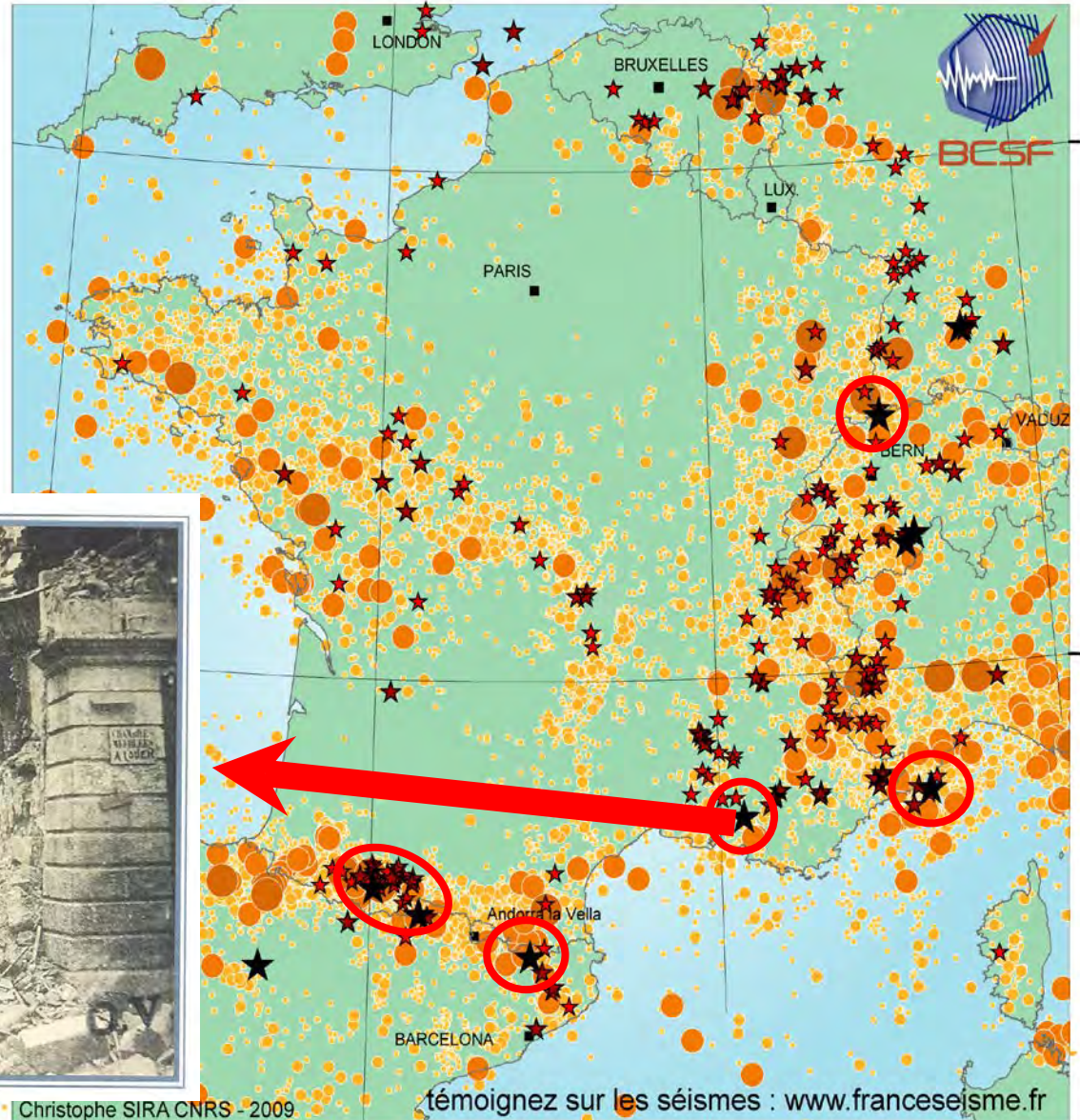
# Sismicité instrumentale et historique France + Belgique

Séismes historiques connus depuis 1000 ans  
d'intensité supérieure ou égale à VIII  
(Sisfrance)

- ★ IX - dommages généralisés aux constructions
- ★ VIII - destructions partielles de bâtiments
- ★ VII - dommages aux constructions

**M : 6+**

**Provence 1909**







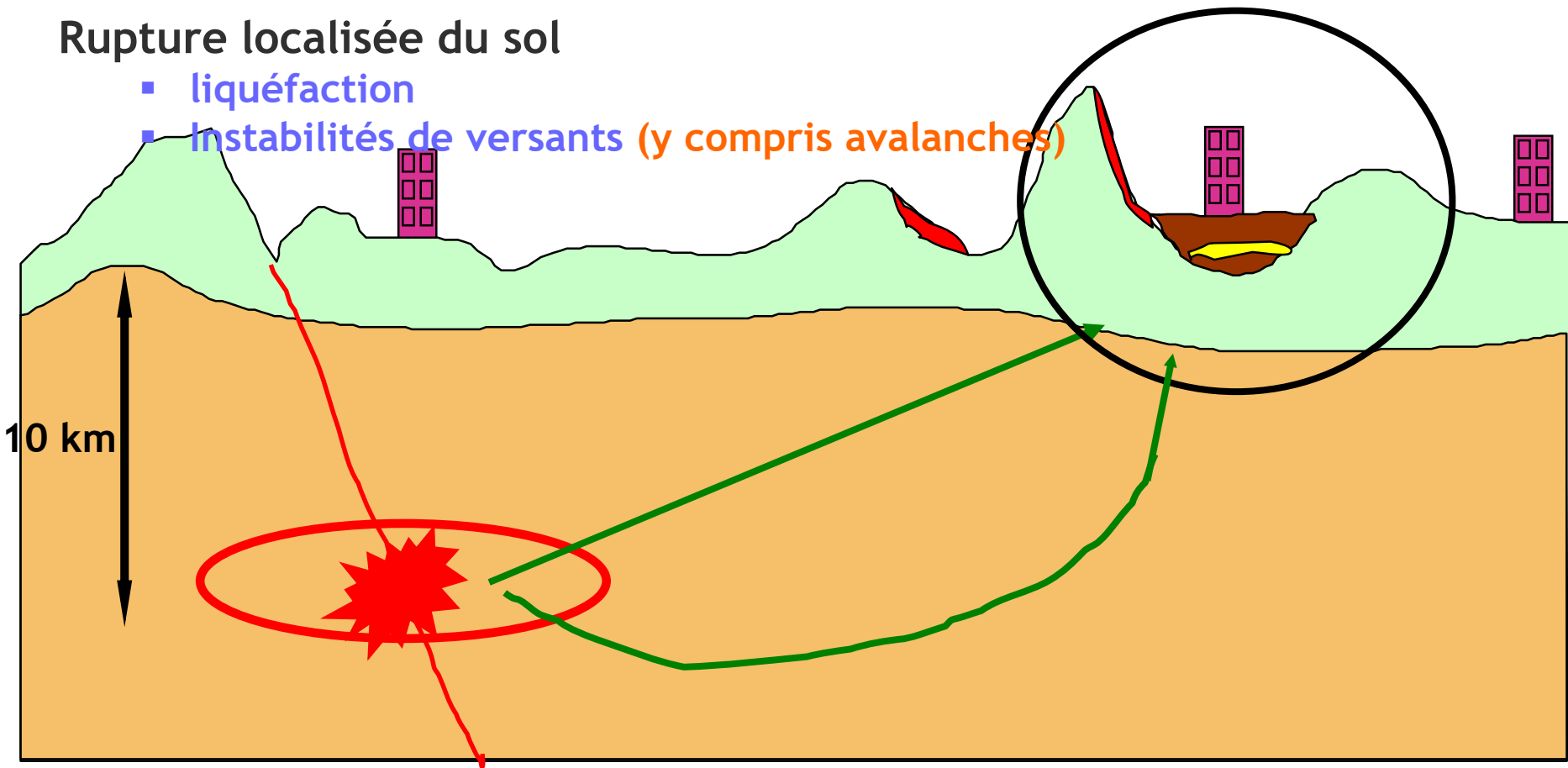
# Phénomène Séisme

## Mouvements vibratoires / Propagation d'ondes

- Effets de source: cinématique de rupture et radiation
- Effets "régionaux": propagation dans la croûte "profonde"
- Effets locaux
  - topographie
  - Sols meubles / récents

## Rupture localisée du sol

- liquéfaction
- Instabilités de versants (y compris avalanches)



# Origine des dommages

## Moyenne sur de nombreux séismes

- Vibrations (65 - 70%)
- Glissements / liquéfaction (25 - 30%)
- Tsunamis ( 5 - 10 %)
- Ruptures de surface (faille) (minime)

Objectif essentiel : estimer les mouvements vibratoires liés aux différents types de dégâts et à leur importance

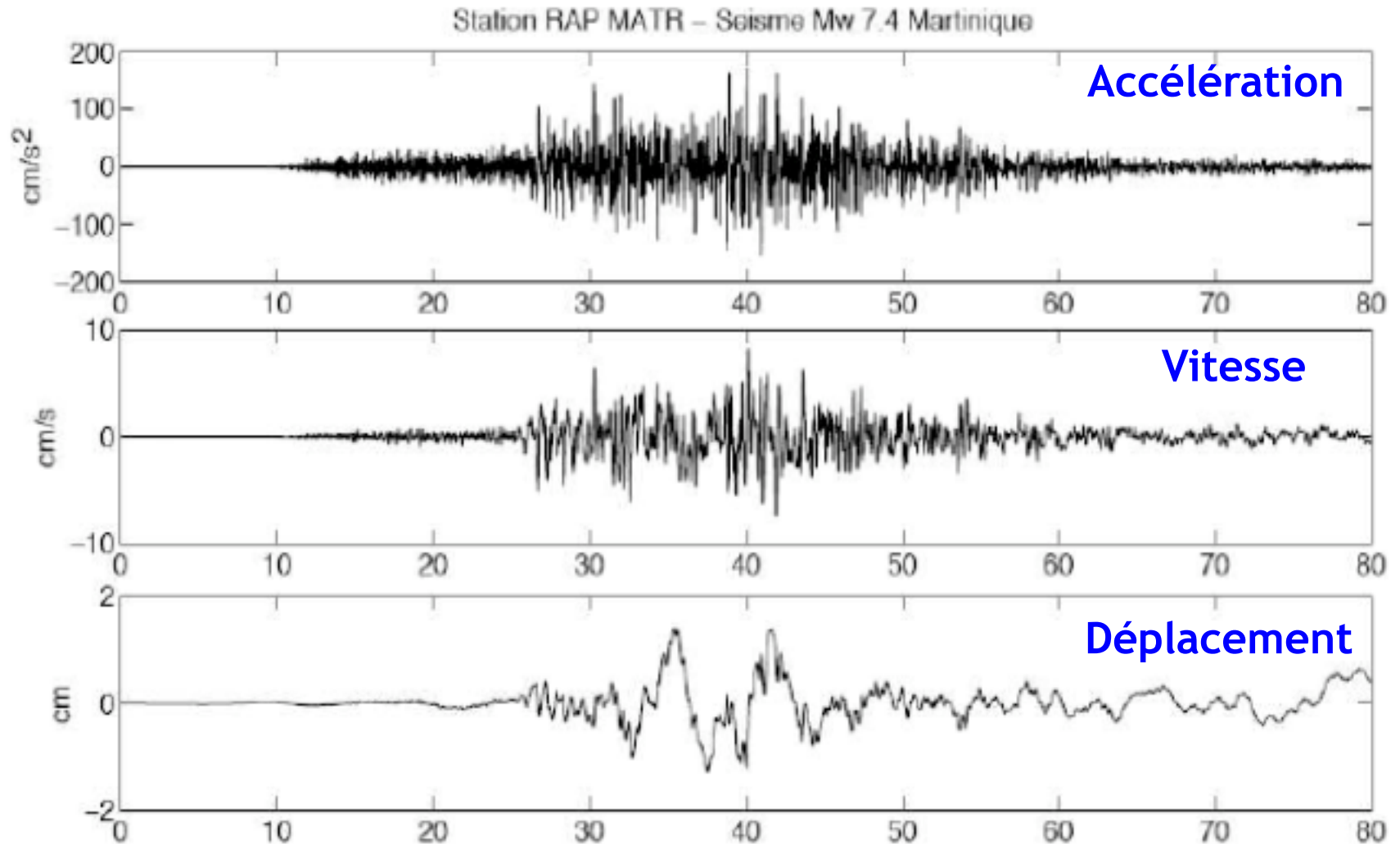
- Mesurer et caractériser
  - Comprendre les phénomènes physiques qui les gouvernent
- Estimation pour événements "futurs"

- ? Quel "futur"
- Approche "déterministe" ou "probabiliste"
- Cas particulier des événements très gros très rares
  - (incertitudes et acceptabilité sociale - y compris économique)

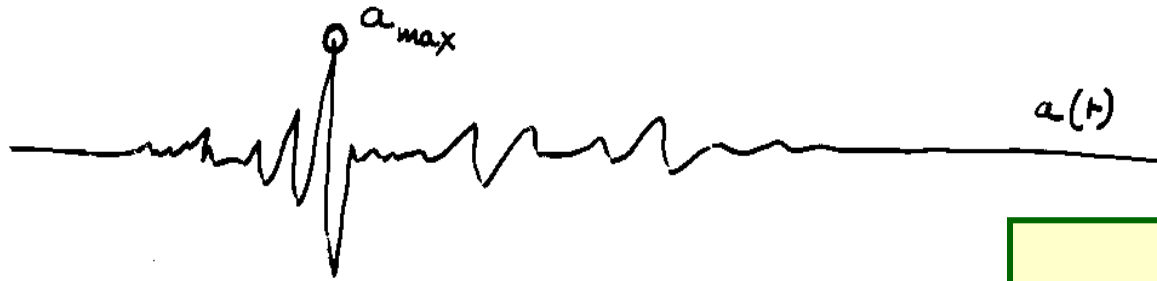
Ingénieurs  
+  
sismologues

# Exemple accélérogramme

(Martinique 2007,  $M = 7.4$ ,  $H = 110$  km)



# Caractérisation des actions sismiques: (1) par les valeurs maximales



Accélération maximale  $A_{max}$  ou  $p_{ga}$

Mesure très simple

Ordre de grandeur (si dommages)

- 0.10 à 2 g

Mesure trop simple

- Ne tient compte ni de la durée ni du contenu spectral
- Très mauvaise corrélation avec intensité (= dommages)

Reste cependant très utilisée

- Structures rigides
- Ancrage du spectre de réponse

## Aussi utilisés

### $V_{max}$ ( $p_{gv}$ )

- Ordre de grandeur (si dommages)
  - 0.1 à 2 m/s
- Fréquences: 0.5 à 2 Hz

### $D_{max}$ ( $p_{gd}$ )

- Ordre de grandeur (si dommages)
  - 1 cm à qqs dizaines de cm
- Fréquences: < 0.5 à 2 Hz

### Corrélation avec dommages

- Pas meilleure !

### Mesure moins immédiate



## (2) Caractérisations spectrales

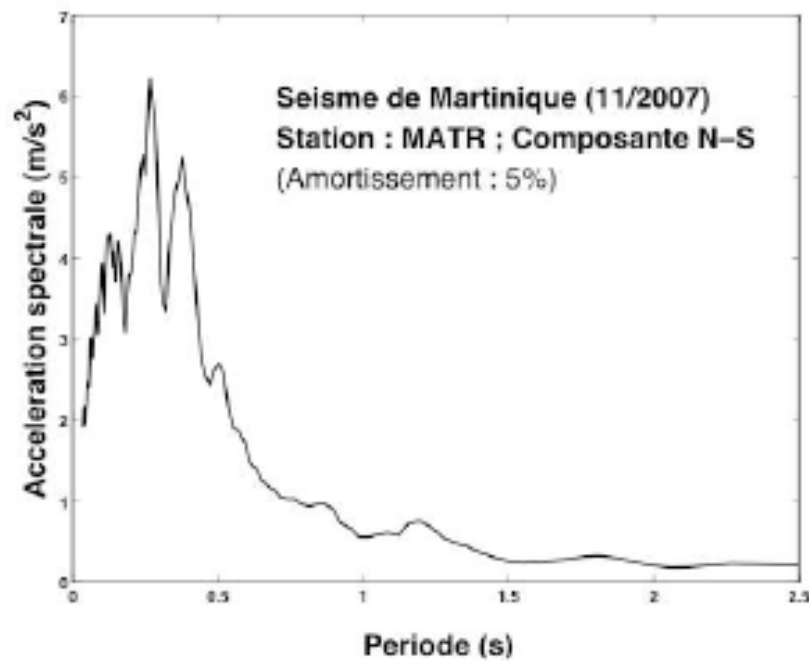
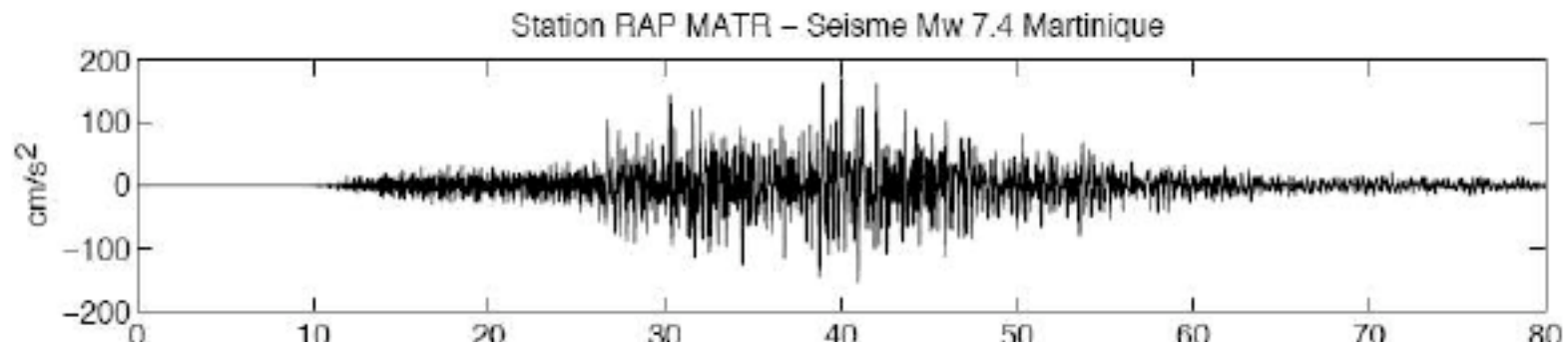
### Spectres de réponse $S_{avd}(T, \zeta)$

- Réponse maximale (a, v, ou d) d'un oscillateur à 1° de liberté, de période T et d'amortissement  $\zeta$ , excité par a(t)
- Analogie immeuble - oscillateur 1ddl
  - → réponse au centre de gravité
- Quelques relations remarquables très utiles
  - $S_a(0, \zeta) = p_{ga}$
- Très utilisé en ingénierie, mais peu maniable mathématiquement
  - (pas de réciprocity temps-fréquence)

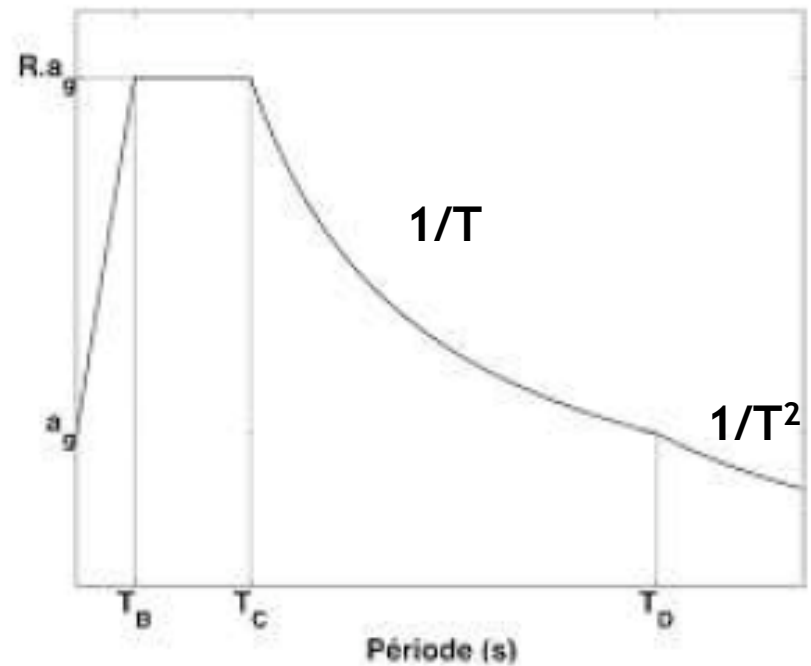
### Spectres de Fourier

- $a(t) \rightarrow A(f) = \int a(t) e^{-i 2\pi f t} dt$
- Facilité de traitement mathématique
  - convolution/multiplication, Parseval, ... : relations avec phénomènes physiques liés à: source, propagation, site
  - Réciprocity temps - fréquence
    - très utilisé par sismologues

# Exemple : Martinique 2007 ( $M=7.4$ , $H=110$ km)



a



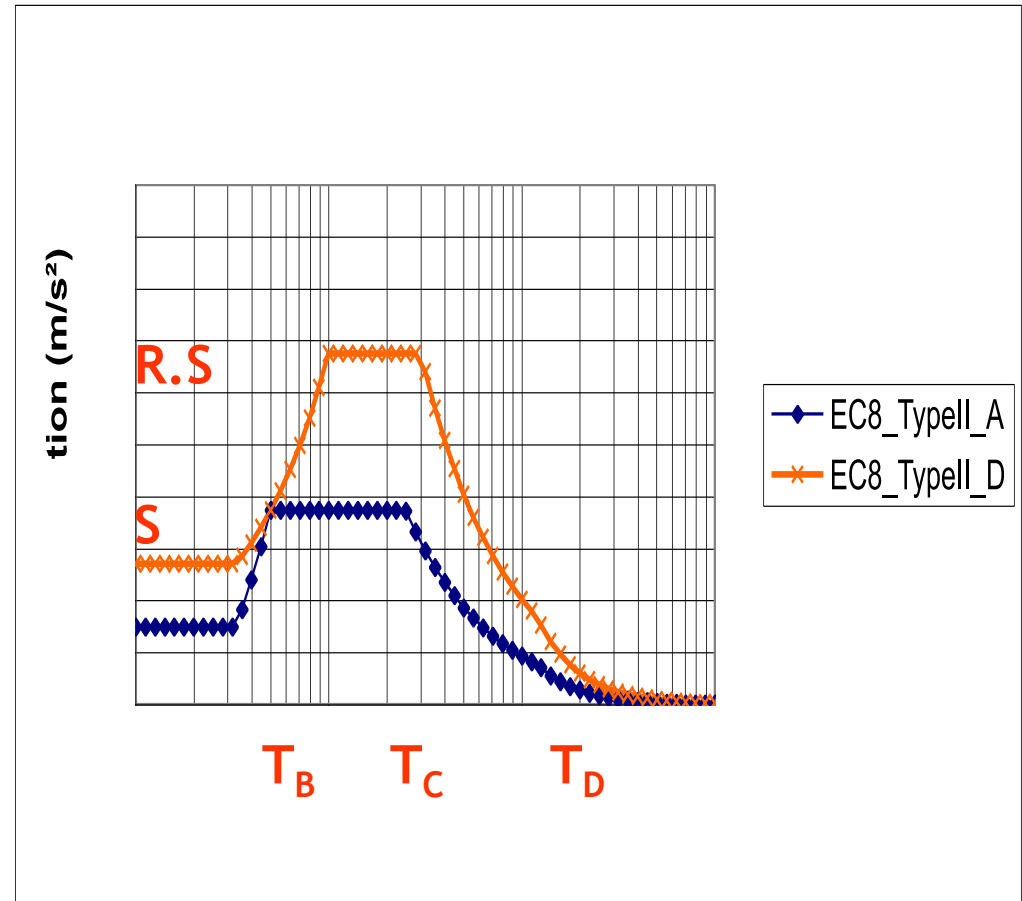
b

# Formes spectrales

## Paramètres de contrôle

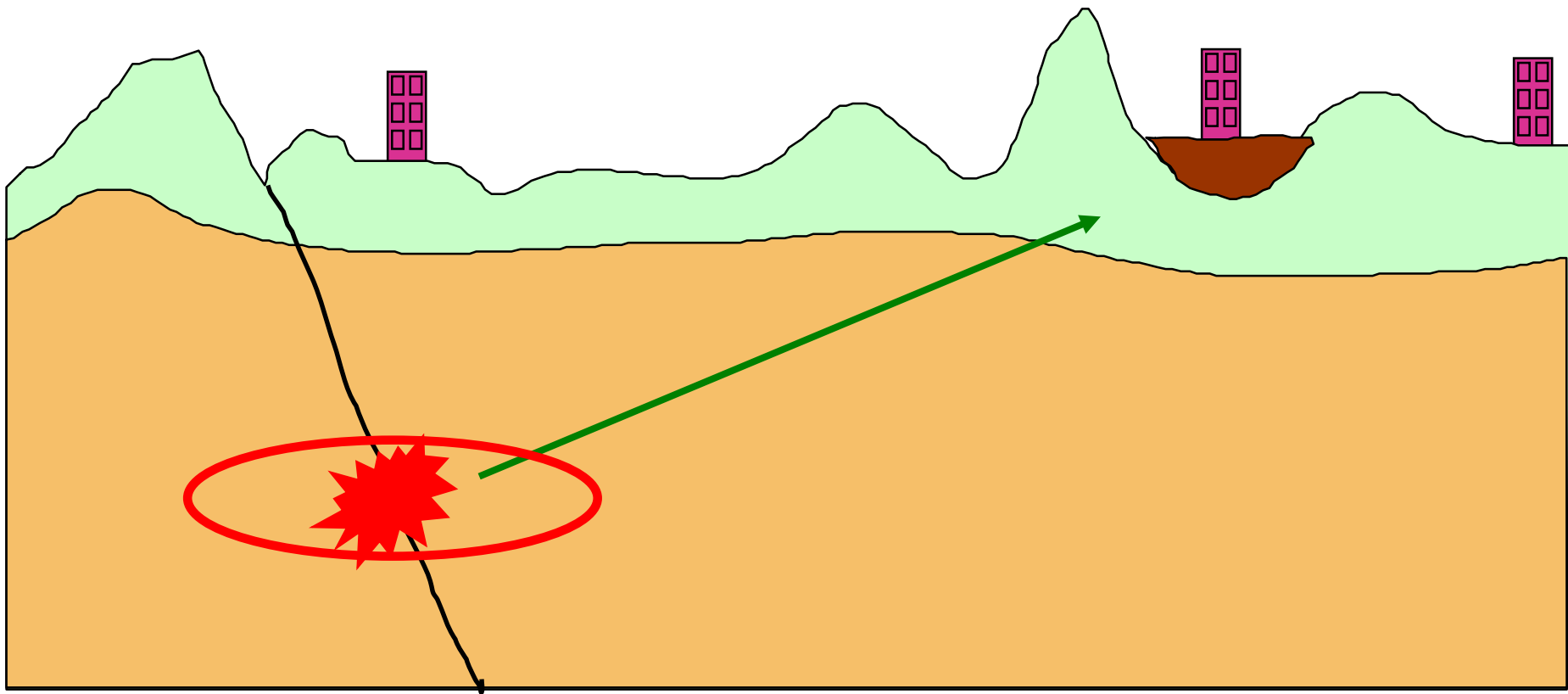
- $S$  : amplification de l'accélération maximale
- $R$ , niveau relatif du plateau
- $T_B, T_C$  : position et largeur du plateau
- $T_D$  : niveau longue période
- $+ T_E / T_F$

**! Dépendent des conditions de site**



# Mouvements sismiques : physique sous-jacente

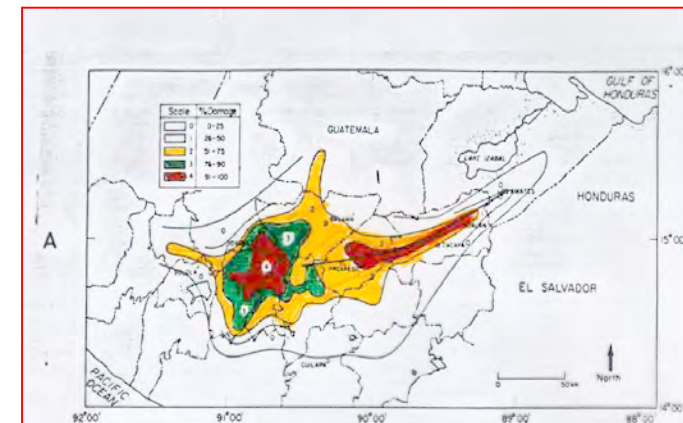
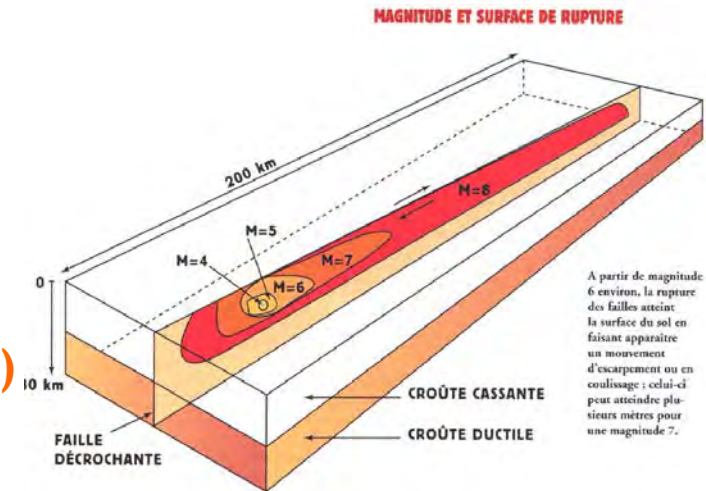
Source + Propagation + Site



# Aléa sismique 1 : source = faille

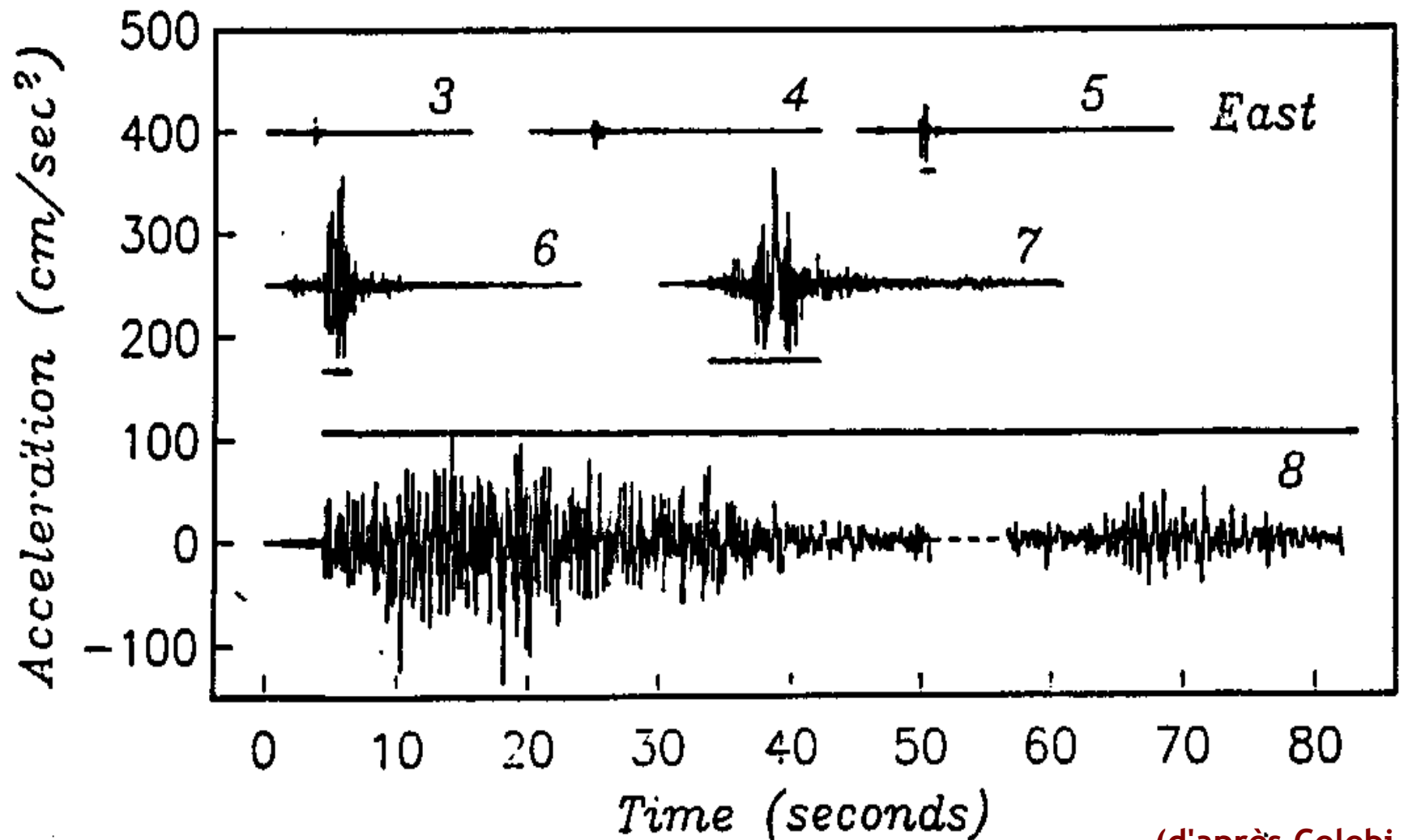
## Contrôle des caractéristiques des ondes émises

- Taille <-> magnitude : amplitude, contenu fréquentiel et durée
  - (surface de rupture, glissement moyen)
- Positionnement source / "récepteur"
  - Effets directifs ou anti-directifs ("effet doppler")
  - Non prévisible à l'heure actuelle (directif + ou anti-directif -)
- Hétérogénéités spatio-temporelles du glissement sur la faille
  - Rayonnement "haute fréquence" (1 - 20 Hz)
  - Imprévisible de façon autre que statistique



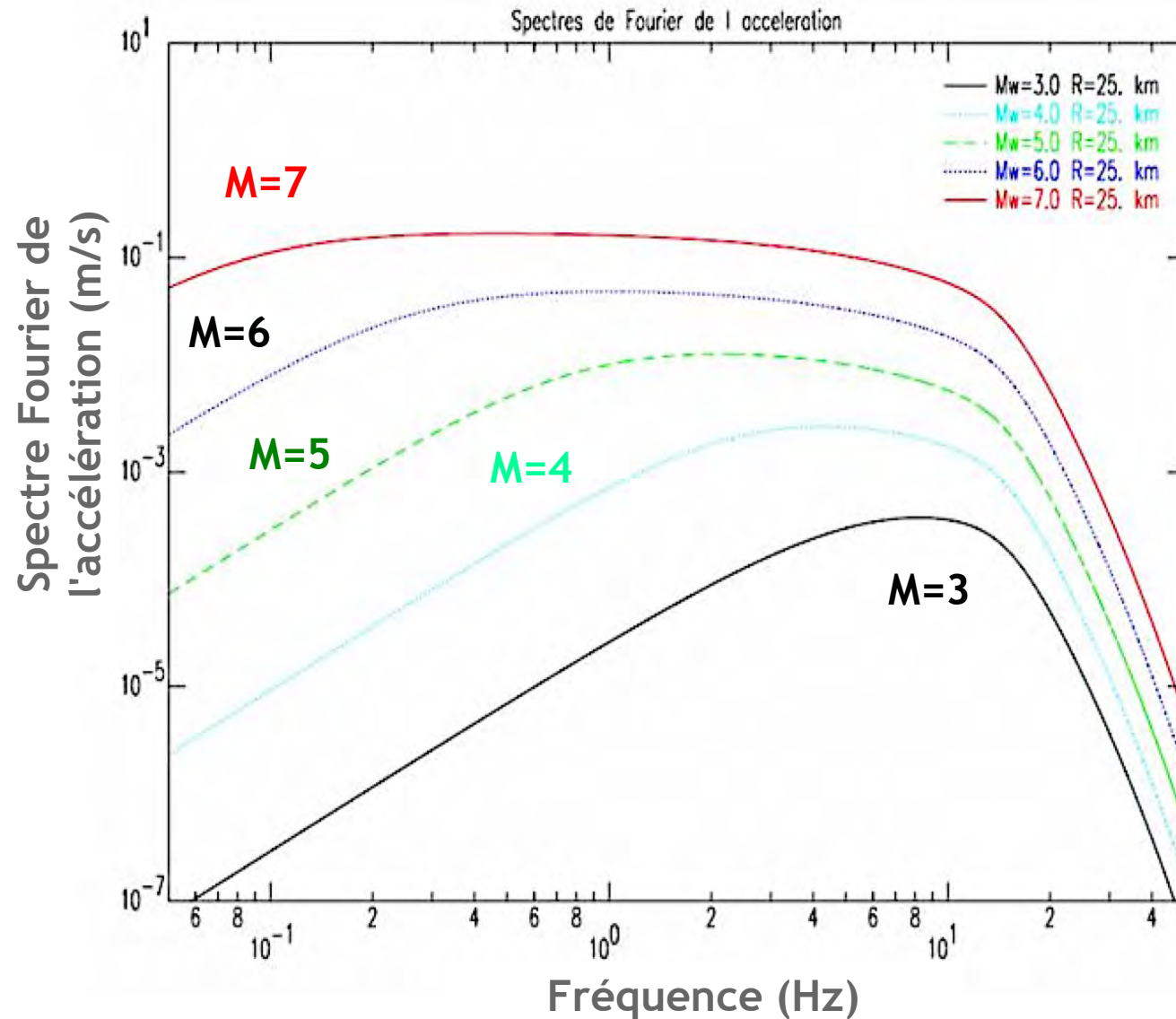


# Evolution des accélérogrammes avec la magnitude

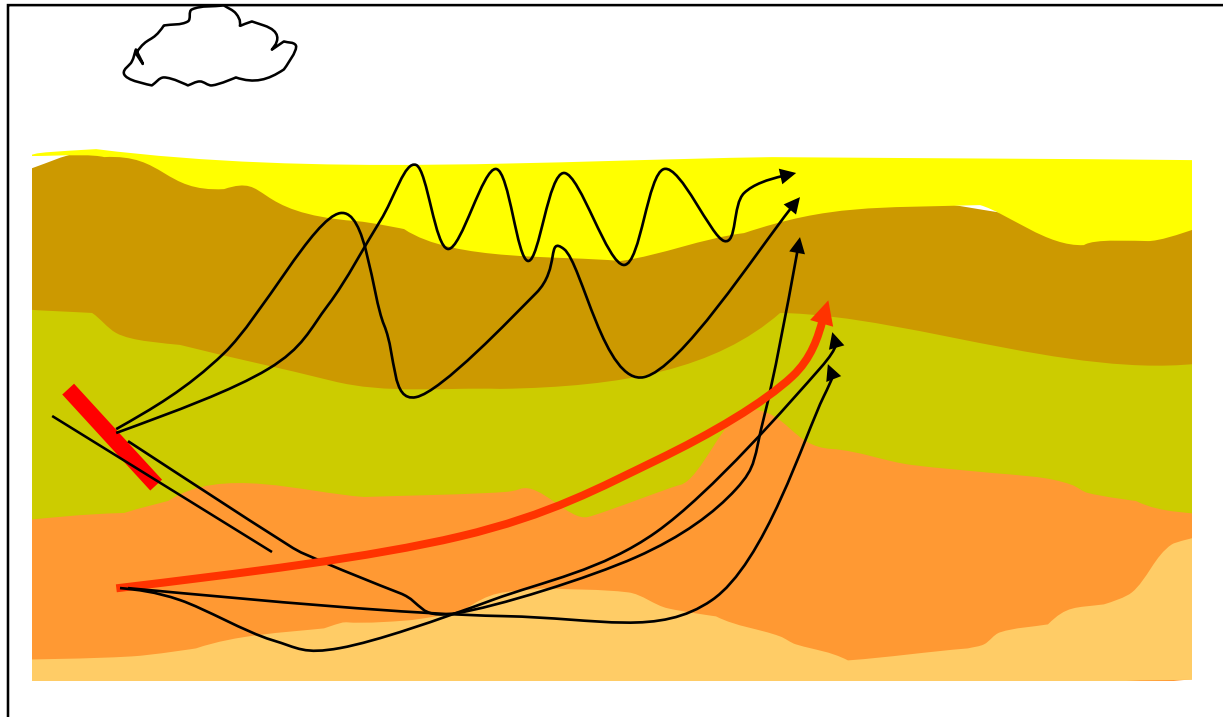


(d'après Celebi,  
1993)

# Lois d'échelle : évolution des spectres avec la magnitude



# Aléa sismique 2 : propagation crustale



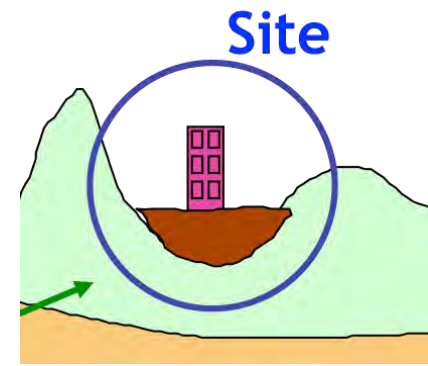
Physique simple, mais champ d'ondes complexe

- Ondes directes (volume), ondes de surface
- réflexions, réfractions
- diffraction, diffusion
- expansion géométrique ( $1/R$ ,  $1/\sqrt{R}$ , ...) + amortissement

Simulation numérique ?

- Possible mais limitée par méconnaissance du milieu...
- Fréquences  $\leq 4-5$  Hz

# Aléa sismique 3 : effets de site



"Directs" = effets de propagation d'ondes

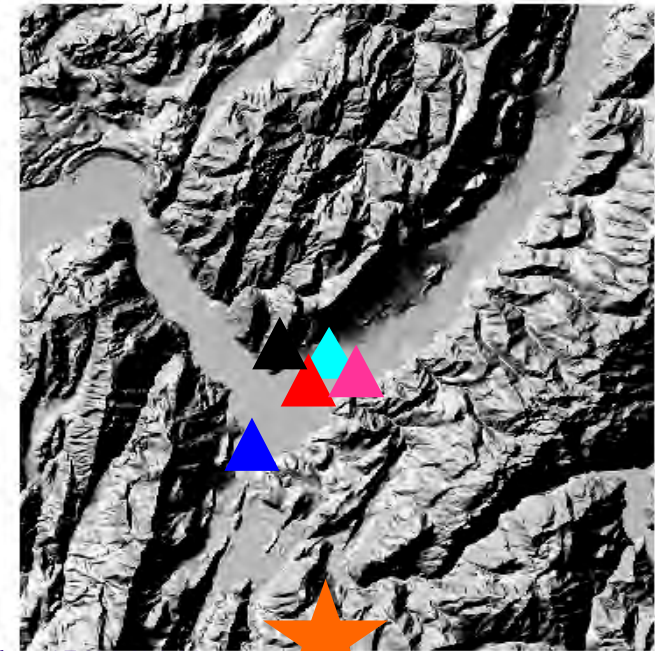
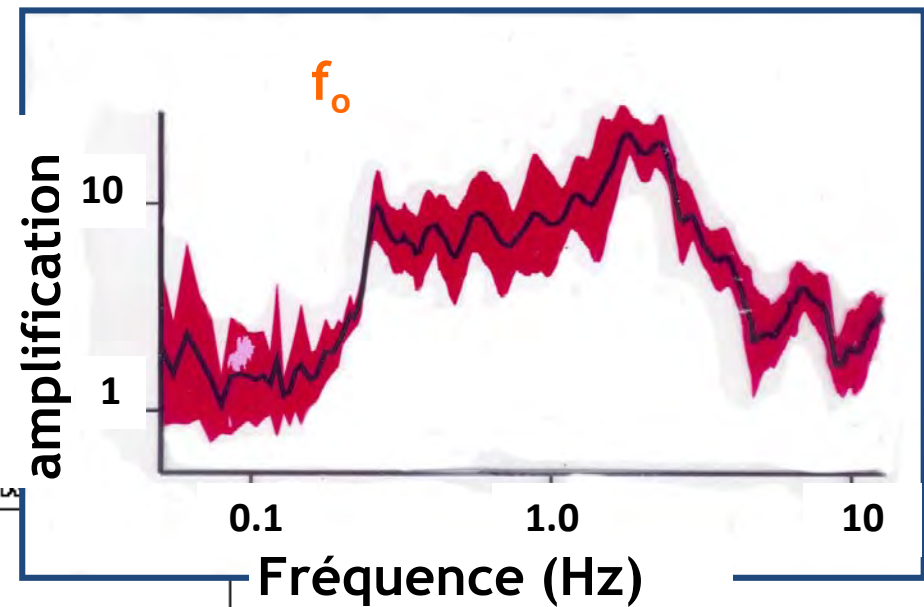
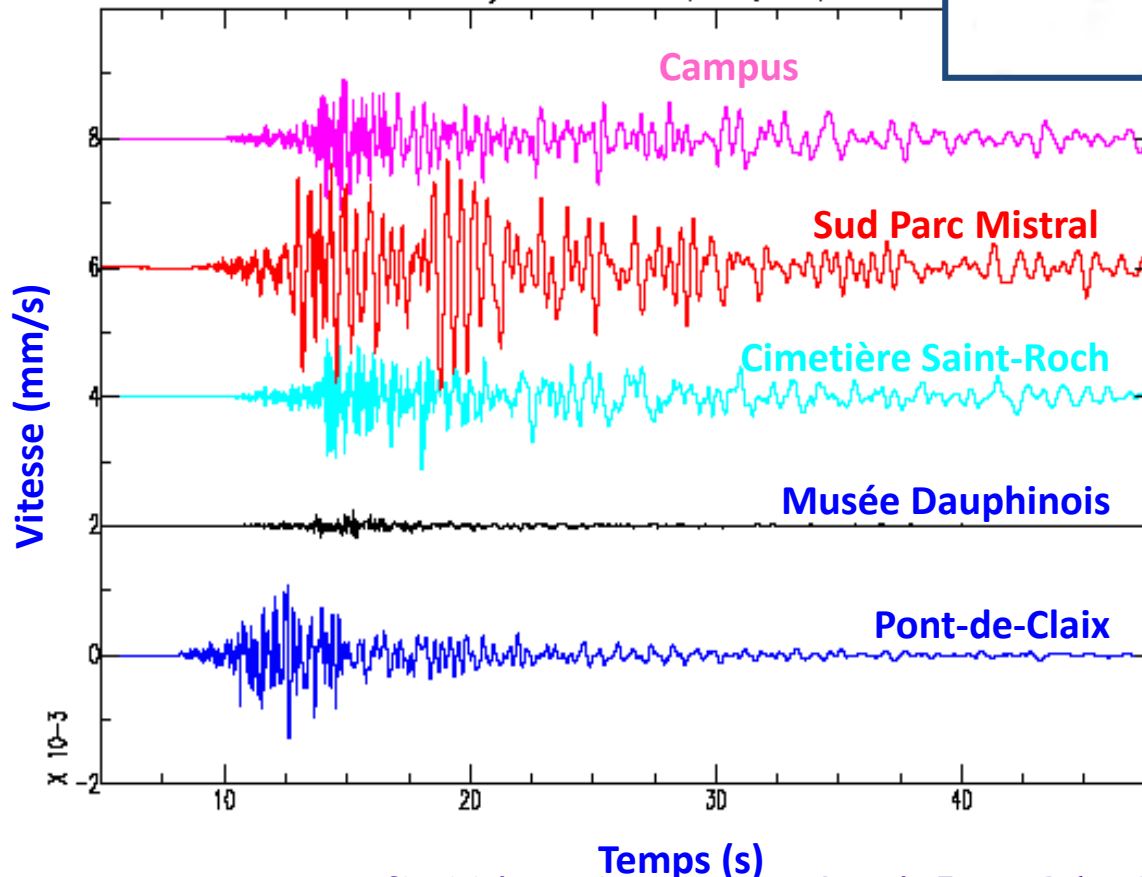
- (fortes variations mécaniques ou géométriques) : sols meubles, reliefs topographiques
- 1D/2D/3D, L/NL, interaction champ incident
- Instrumental / numérique / méthodes de reconnaissance et de caractérisation des sols

"Induits" = Endommagement / ruine localisée du sol

- Liquéfaction
  - bcp de travaux, méthodes pour identifier les zones sensibles, dispositifs de remédiation
- Déclenchements d'instabilités gravitaires (co- ou post-sismiques; y compris avalanches...)
  - Généralement plutôt qualitatif, très peu de données, encore moins de méthodes ou de parades (très complexe...)

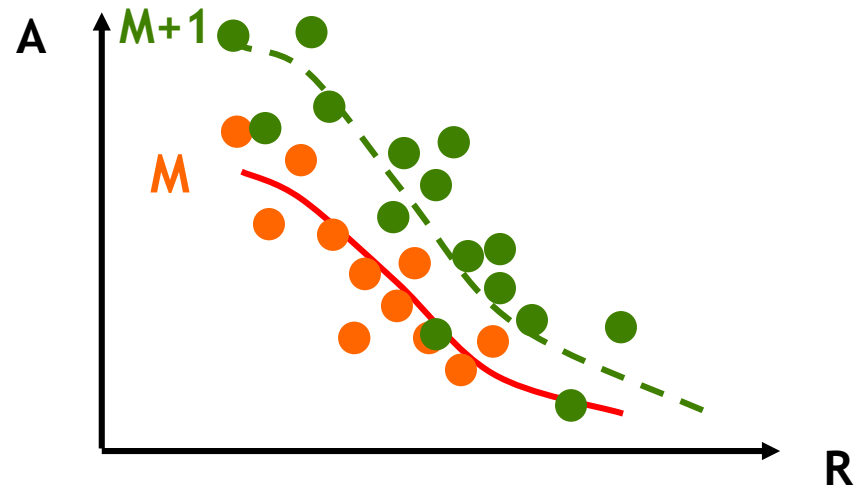
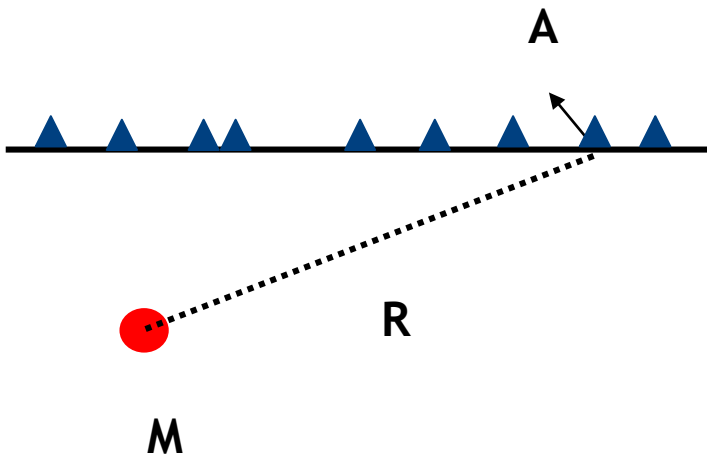
# Exemple : vallées alpines (Grenoble)

GRENOBLE - Séisme du 11 janvier 1999 - OEGPC, DGMU, OESR, OGDH et



# Estimation des mouvements : approche empirique EPMS/GMPE

$$Y = F(\text{magnitude } M, \text{ distance } R, \text{ conditions de site, ....})$$





# Relations d'atténuation empiriques : principe (GMPE / EPMS)

$$\log(PSA(f)) = a(f) \cdot M + b(f) \cdot R - \log(R) + c(i, f) + \varepsilon \sigma$$

Source

Magnitude

Propagation

Distance

Site

Caractéristiques du sol

**Dispersion / incertitudes :  $\sigma \approx 0.3 \Leftrightarrow$  facteur 2**

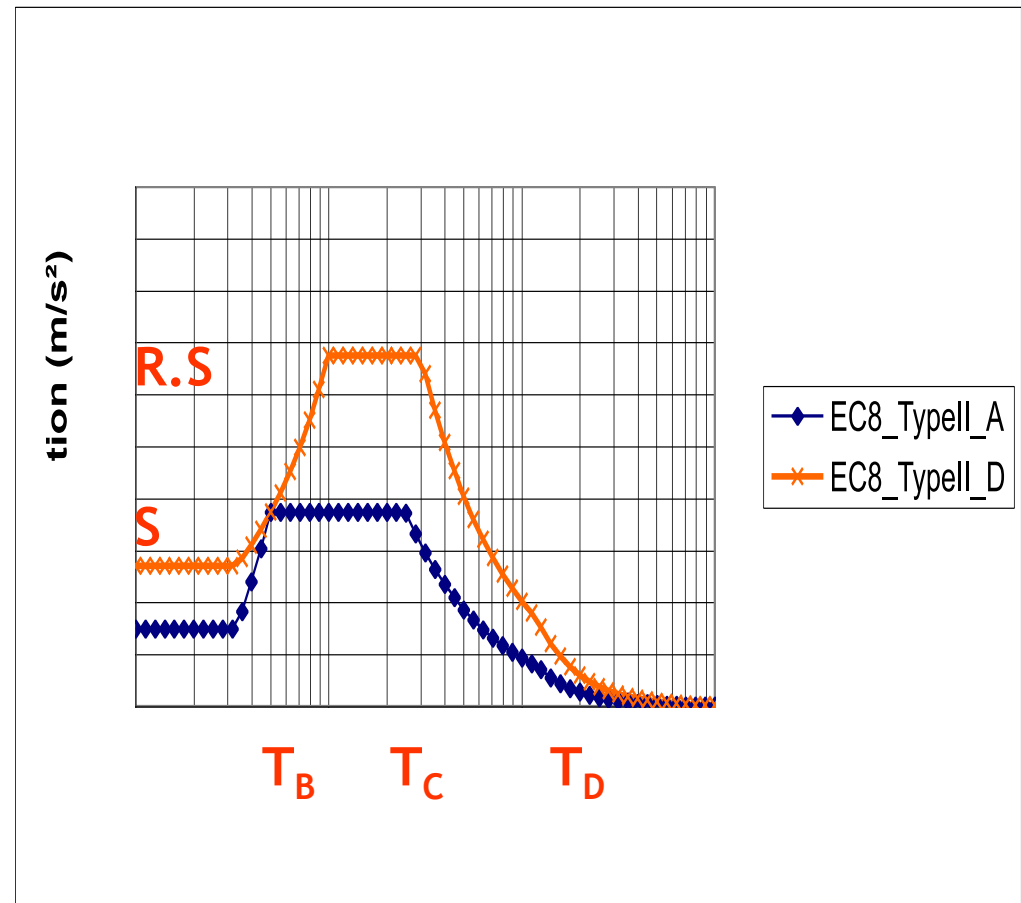
# Prise en compte forfaitaire : classes de site + modulation des formes spectrales

## Paramètres de contrôle

- $S$  : amplification de l'accélération maximale
- $R$ , niveau du plateau
- $T_B, T_C$  : position et largeur du plateau
- $T_D$  : niveau longue période

## ? Valeurs pour chaque catégorie de site

- Classification fondée sur " $V_{S30}$ "
- **A** :  $V_{S30} > 800$  m/s
- **B** :  $V_{S30} \in [360, 800$  m/s]
- **C** :  $V_{S30} \in [180, 360$  m/s]
- **D** :  $V_{S30} \in [100, 180$  m/s]
- **E** : formation peu rigide peu épaisse ( $h < 20$  m) sur substratum rigide



# Prise en compte forfaitaire : classes de sol

| Classe de sol | Description du profil stratigraphique                                                                                                                                                                            | Paramètres                |                    |          |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|--------------------|----------|
|               |                                                                                                                                                                                                                  | Vs,30 (m/s)               | NSPT (coups/30 cm) | cu (kPa) |
| A             | Rocher ou autre formation géologique de ce type comportant une couche superficielle d'au plus 5 m de matériau moins résistant                                                                                    | > 800                     | -                  | -        |
| B             | Dépôts raides de sable, de gravier ou d'argile sur-consolidée, d'au moins plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, caractérisés par une augmentation progressive des propriétés mécaniques avec la profondeur   | 360 – 800                 | > 50               | > 250    |
| C             | Dépôts profonds de sable de densité moyenne, de gravier ou d'argile moyennement raide, ayant des épaisseurs de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres                                                 | 180 – 360                 | 15 – 50            | 70 – 250 |
| D             | Dépôts de sol sans cohésion de densité faible à moyenne (avec ou sans couches cohérentes molles) ou comprenant une majorité de sols cohérents mous à fermes                                                      | < 180                     | < 15               | < 70     |
| E             | Profil de sol comprenant une couche superficielle d'alluvions avec des valeurs de Vs de classe C ou D et une épaisseur comprise entre 5 m environ et 20 m, reposant sur un matériau plus raide avec Vs > 800 m/s |                           |                    |          |
| S1            | Dépôts composés, ou contenant une couche d'au moins 10 m d'épaisseur d'argiles molles/vases avec un indice de plasticité élevé ( $I_p > 40$ ) et une teneur en eau importante.                                   | < 100 (valeur indicative) | -                  | 10 – 20  |
| S2            | Dépôts de sols liquéfiables d'argiles sensibles ou tout autre profil de sol non compris dans les classes A à E ou S1.                                                                                            |                           |                    |          |

# Classes de site et formes spectrales

- EC8 : 2 familles recommandées
  - Type 1 = forte sismicité / Type 2 = sismicité modérée
  - Mais possibilité d'en choisir une autre  
(→ non-continuité d'un pays à l'autre...)

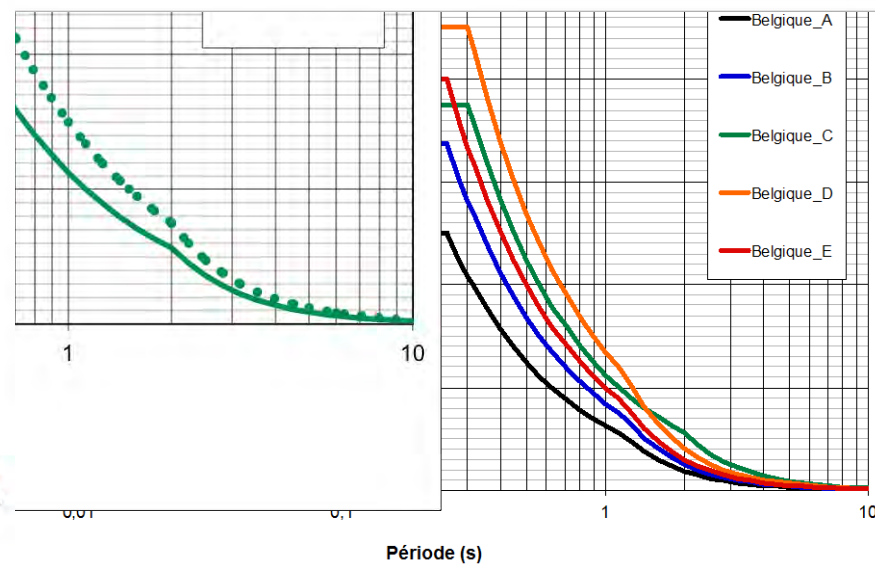
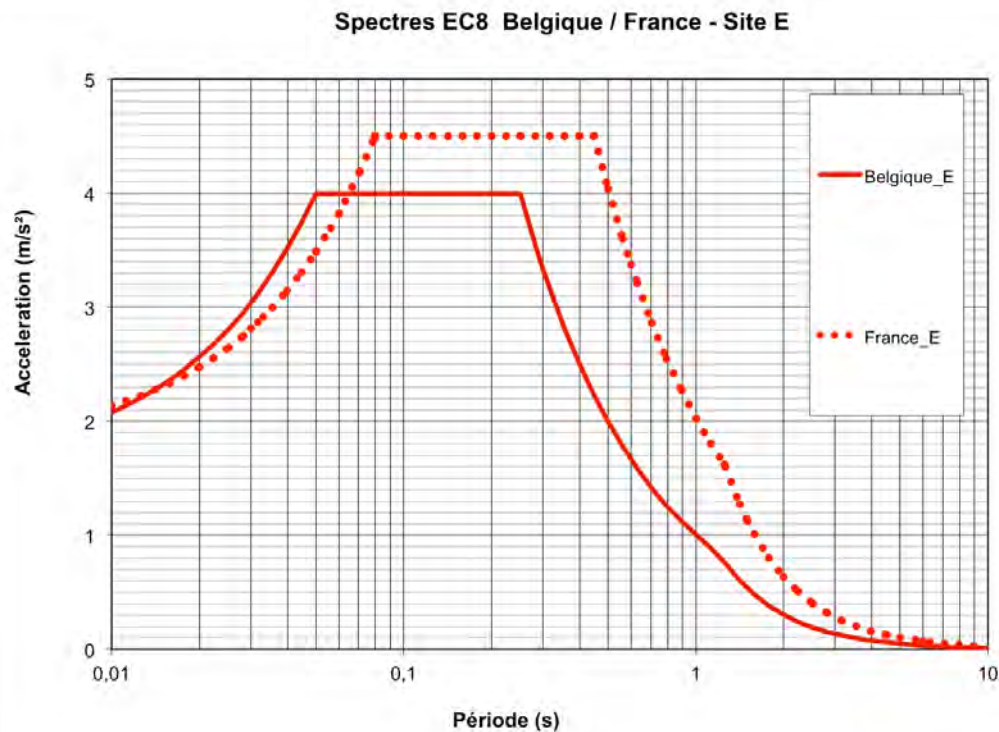
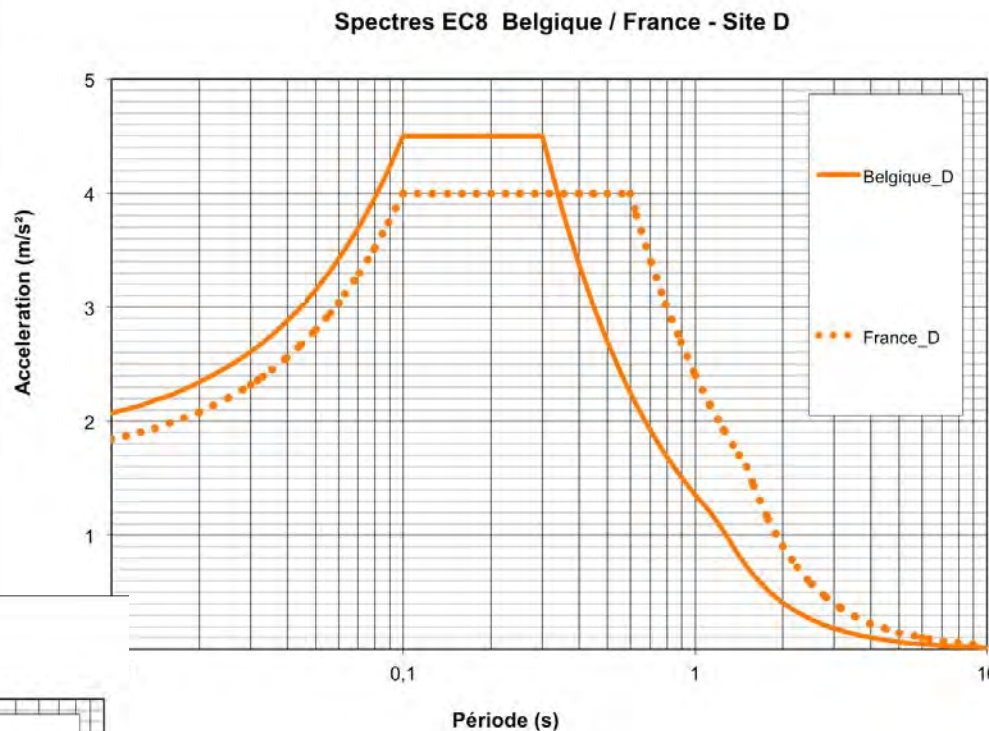
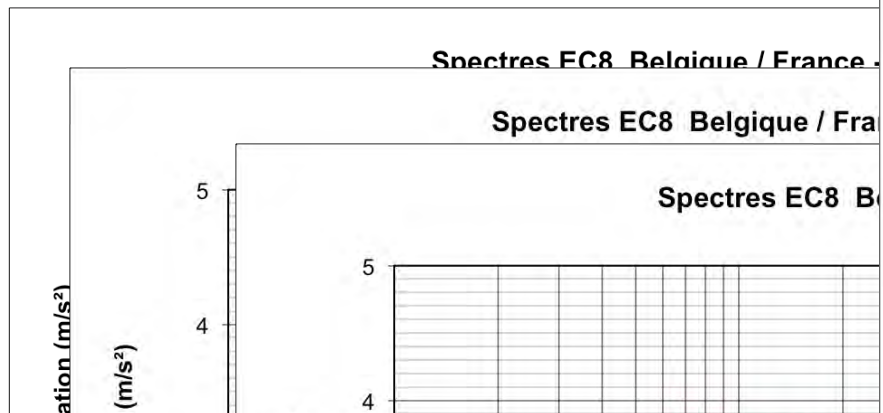
## A - France (métropole)

- Spectres type 2 NON SATISFAISANTS pour sites C-D-E
- Plusieurs propositions
  - Retenue finalement : après étude IRSN sur données KNET (Japon)

## B - Belgique

- Spectres type 2

# Formes spectrales : Comparaison Belgique / France



# Plan

Introduction : Séismes et mouvements sismiques

**Estimation : actions de dimensionnement**

- Méthodes disponibles
- Zonages réglementaires (Risque normal / risque spécial)
- Comparaisons Belgique / France / Europe

# Niveaux de dimensionnement

$$F \propto a_g \cdot \tau \cdot S'_a(T, \zeta) / R_\mu,$$

- $a_g = a_{g,R} \cdot \gamma_I$ , accélération d'ancrage dépendant essentiellement
  - de la zone de sismicité (zonage régional) : Zonage
  - de la classe d'importance
- $S'_a(T, \zeta)$  = forme spectrale normalisée par rapport au mouvement au rocher : Spectres
  - Prend en compte la magnitude des séismes les plus représentatifs,
  - mais dépend surtout des conditions géologiques de surface,



# Approche probabiliste : probabilité de dépassement d'un niveau donné sur un laps de temps donné

Détermination d'unités sismotectoniques homogènes

- Lois d'occurrence (distribution  $N, M$ )
  - $a, b, M_{\min}, M_{\max}$
- Profondeurs

Sélection d'une / plusieurs "EPMS"

- $Y = f(M, R)$

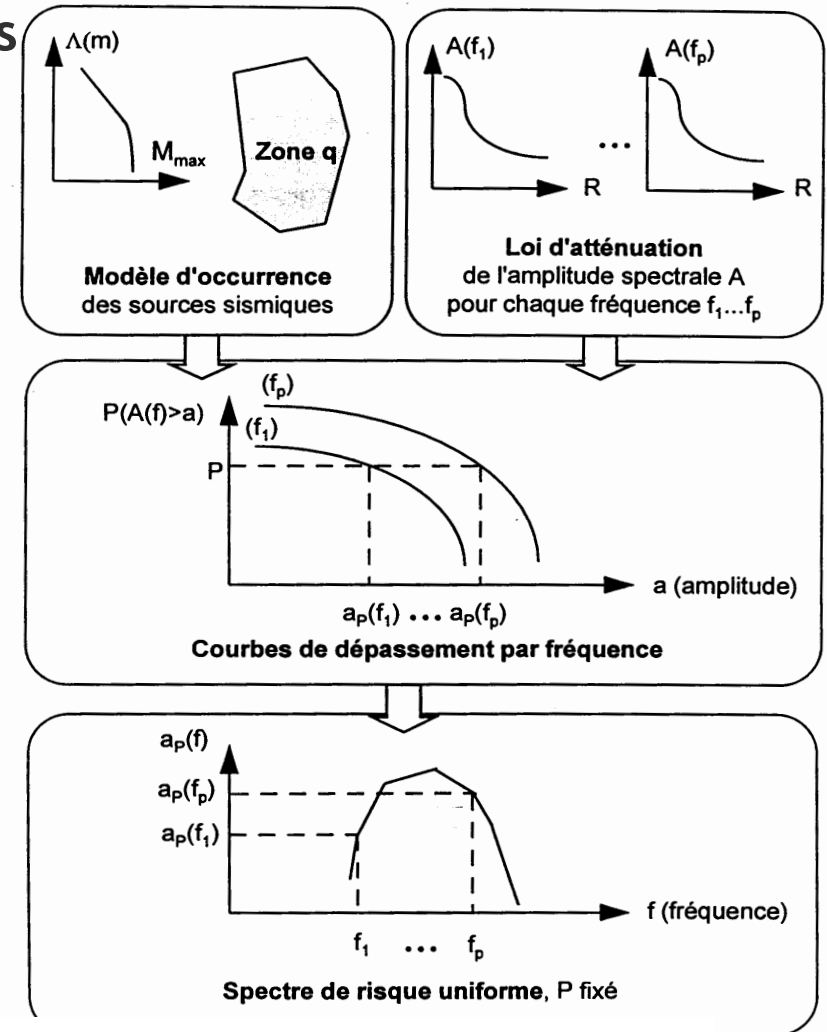
Détermination des probabilités de dépassement  $p(y_0) = P(Y > y_0)$

Boucle sur fréquence/période

- Spectres d'aléa uniforme

Boucle sur site

- Cartes d'aléa



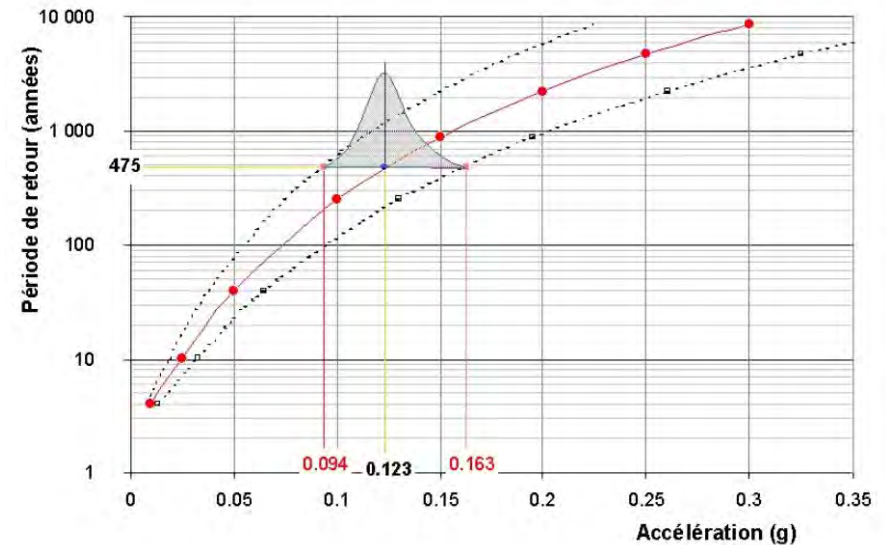
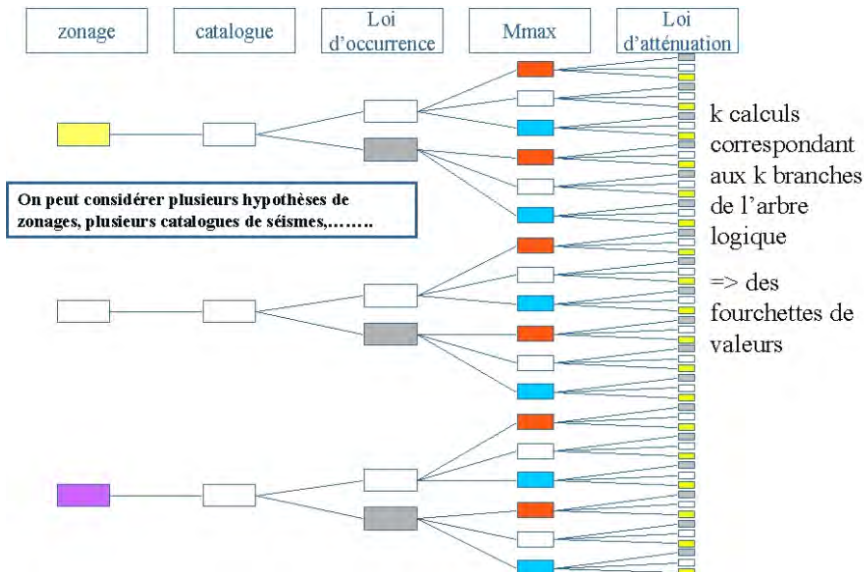
$$v(Sa > z) = \sum_{i=1}^{n_{\text{Source}}} N_i(M_{\min}) \int \int_{MR} f_{mi}(M) f_{Ri}(r, M) P(Sa > z | m, R) dR dM$$

# Prise en compte des incertitudes épistémiques dans l'approche probabiliste

Arbre logique avec poids

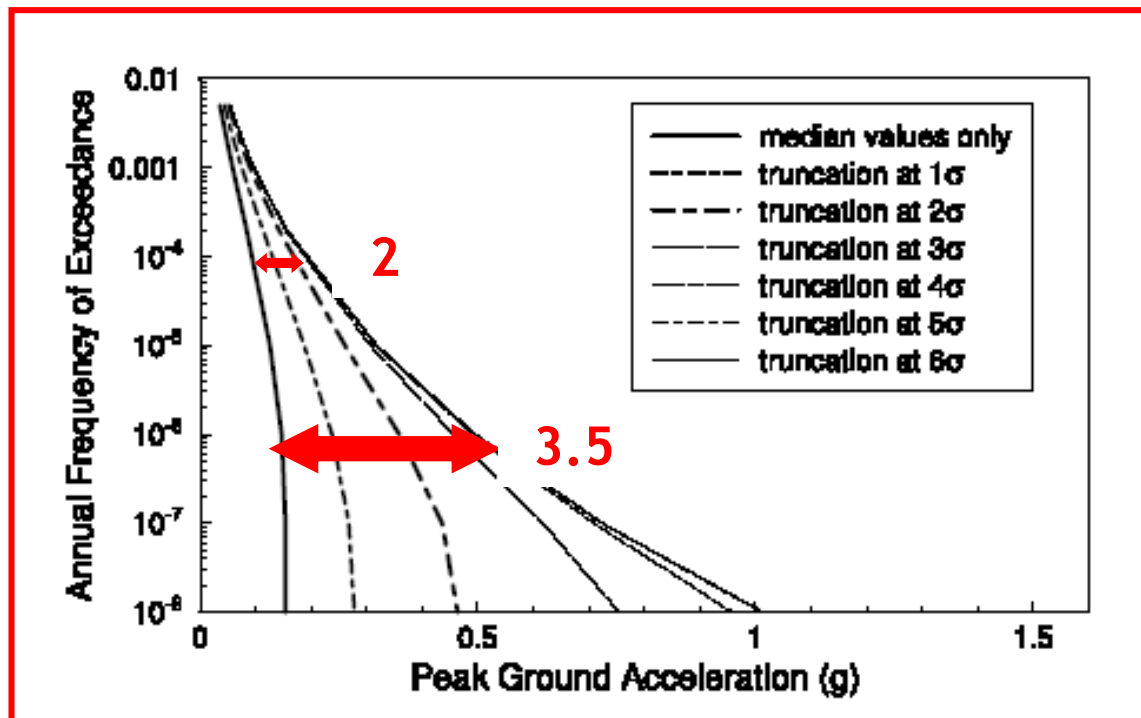
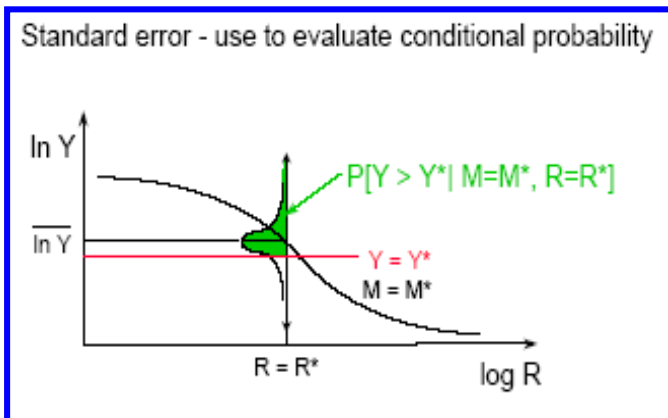


Distribution statistique des résultats - fractiles



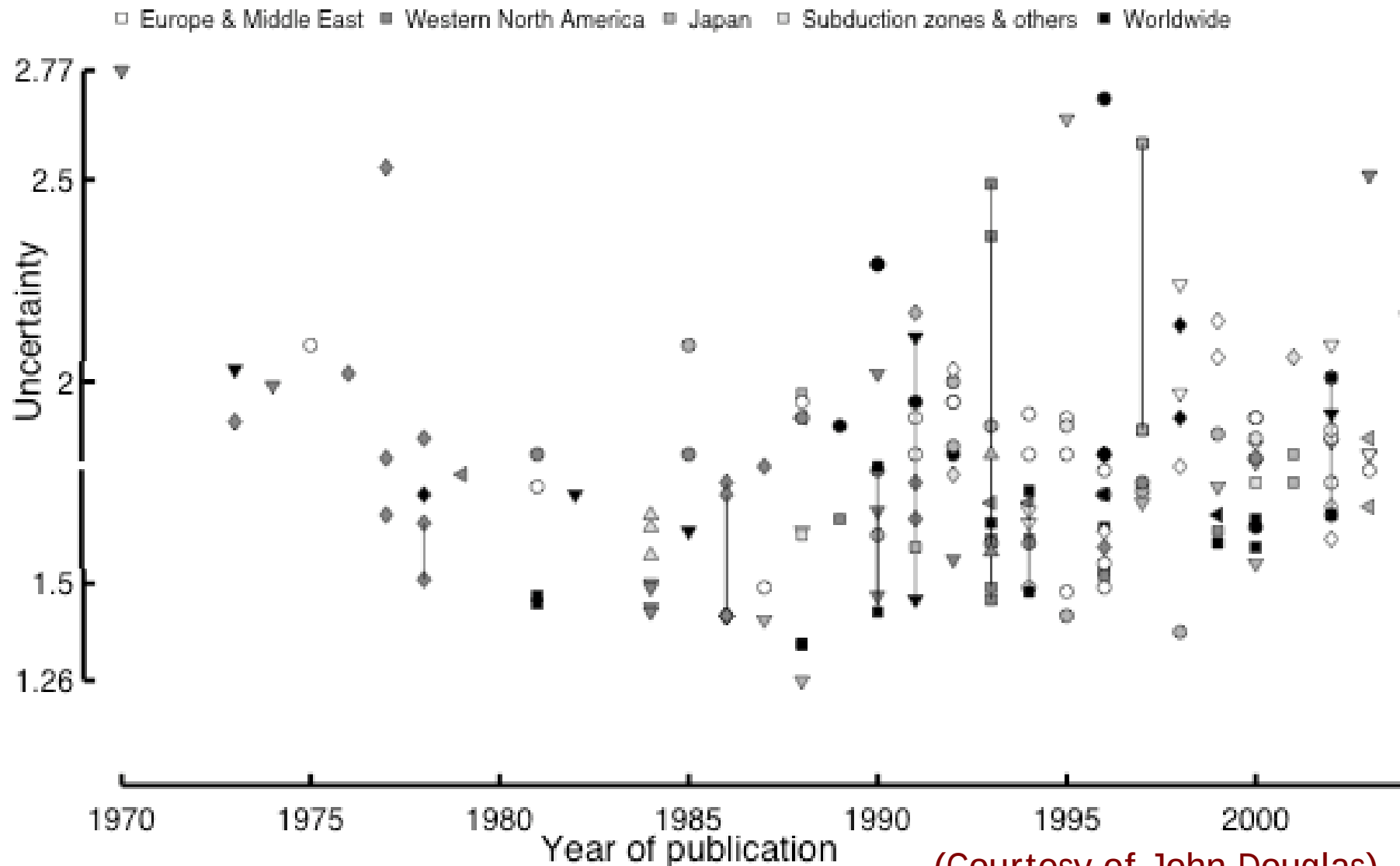
# Conséquences de la variabilité aléatoire des GMPE / EPMS

- Approche probabiliste
  - très importantes à longue période de retour
- Approche déterministe
  - non prise en compte dans l'approche "à la française"



# Evolution de l'écart-type avec le temps : pas de réduction...

(Plus de données, meilleure qualité, modèles plus sophistiqués)



# Les étapes clé

## Découpage sismotectonique

- Contours
- ? petites ou grandes zones
  - Différentes hypothèses possibles

## Attributs de sismicité dans chaque zone

- Intensité - magnitude (→ pas de catalogue officiel)
- Localisation x-y + profondeur
- $M_{\max}$  "plausible" ou distribution  $\log N = a - b M$

## "Relations d'atténuation" / EPMS

- Plusieurs centaines "disponibles"
- incertitudes épistémiques → plusieurs lois
  - (exemple SHARE - Europe : plusieurs relations retenues)
- incertitudes aléatoires
  - écart-type / facteur 2

GéoSciences  
(géologie -  
tectonique -  
géophysique -  
géodésie -  
sismicité)

+ Historiens

? Adaptation  
"régionale" de  
modèles  
développés  
ailleurs

# Etude Probabiliste France

## (GEOTER / MEDD / GEPP, 2001 - 2002 )

Territoire: Métropole + Antilles

Périodes de retour visées : 100 - 2000 ans

Catalogue de sismicité révisée (France métropolitaine)

- Intensités revues à la baisse
- Magnitudes estimées à partir des intensités avec une formule adhoc (Levret)
- Catalogue instrumental :  $M_{LDG}$

Zones sources / Unités sismotectoniques (France métropolitaine)

- EPAS/AFPS (52 zones, pas de faille) + version simplifiée (25 zones) : 80%
- Aucun zonage a priori (approche par lissage) : 20%

EPMS (métropole)

- Métropole : IRSN (1999) + Ambraseys (1995-1996)
- Antilles : IRSN + 2 autres (Takahashi 2000 + Youngs)
- Rocher
- Prise en compte des incertitudes, sans troncature
- Hypothèse conservative :  $M_S = M_{LDG}$

Etude précipitée, biais conservatif  
En partie corrigé lors de la transcription réglementaire

Paramètres de mouvements sismiques

➤  $P_g + S_a(0.2s) + S_a(0.5s) + S_a(1.0s) + P_{gv}$

# Du zonage physique au zonage réglementaire : des principes, et de la cuisine...

## Métropole : 2x2 zones

Z1-Z2 : sismicité faible à très faible

- Z1 :  $\text{pga} < 0.7 \text{ m/s}^2$ :
- Z2 :  $\text{pga} \in [0.7, 1.05 \text{ m/s}^2[$ 
  - ( $I_{\text{max}} \geq \text{VII}$ )

Z3-Z4 : sismicité avérée : EC8 pour toutes constructions neuves

- ( $I_{\text{max}} \geq \text{VIII}$ )
- Z3 :  $\text{pga} \in [1.05, 1.6 \text{ m/s}^2[$
- Z4 :  $\text{pga} \geq 1.6 \text{ m/s}^2$

Action de dimensionnement =  
Bas de la fourchette  
dans chaque zone

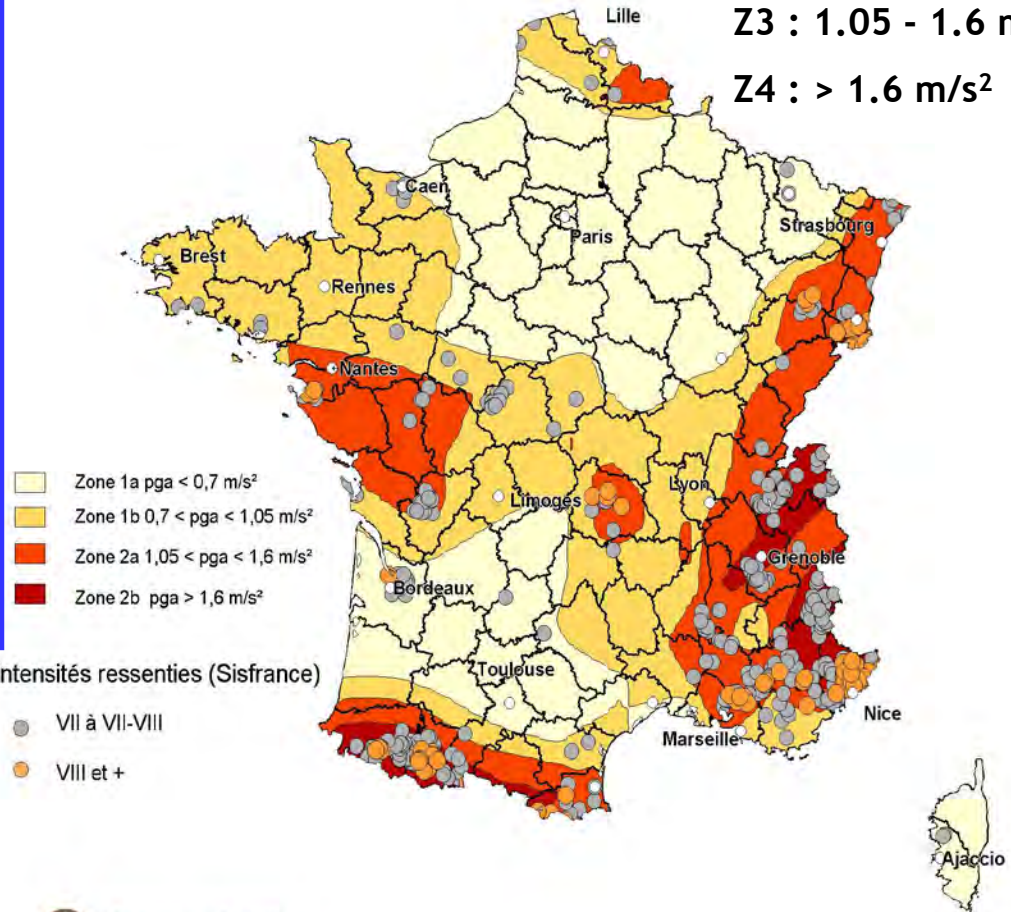
## Zonage physique proposé

Z1 :  $< 0.7 \text{ m/s}^2$

Z2 :  $0.7 - 1.05 \text{ m/s}^2$

Z3 :  $1.05 - 1.6 \text{ m/s}^2$

Z4 :  $> 1.6 \text{ m/s}^2$





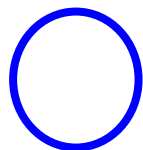
# Corrections manuelles

## Seuils

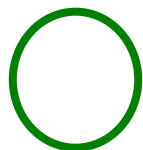
$$a_0 = 0.7 \text{ m/s}^2$$

$$a_1 = 1.05 \text{ m/s}^2$$

$$a_2 = 1.6 \text{ m/s}^2$$

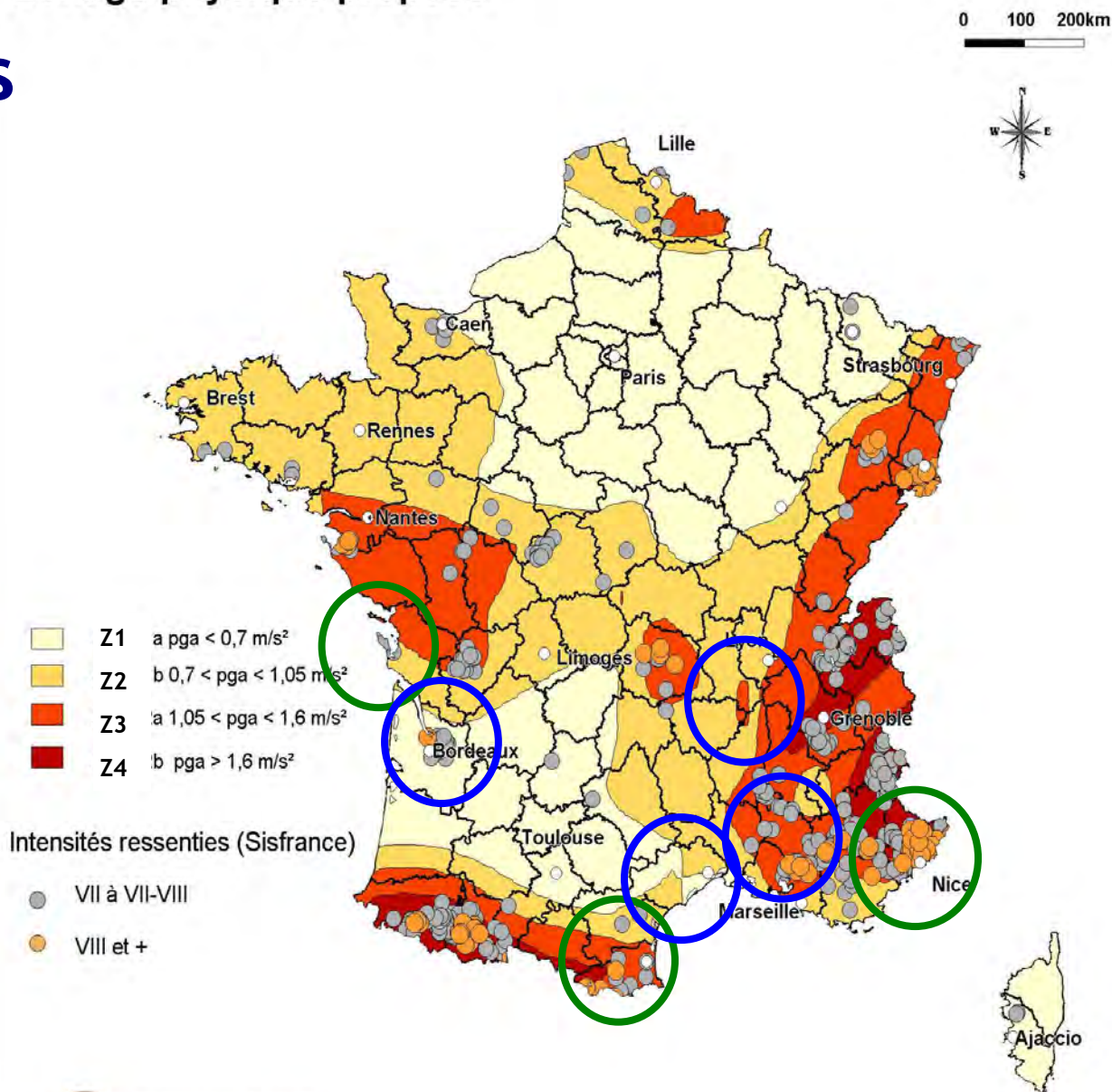


"anomalies"



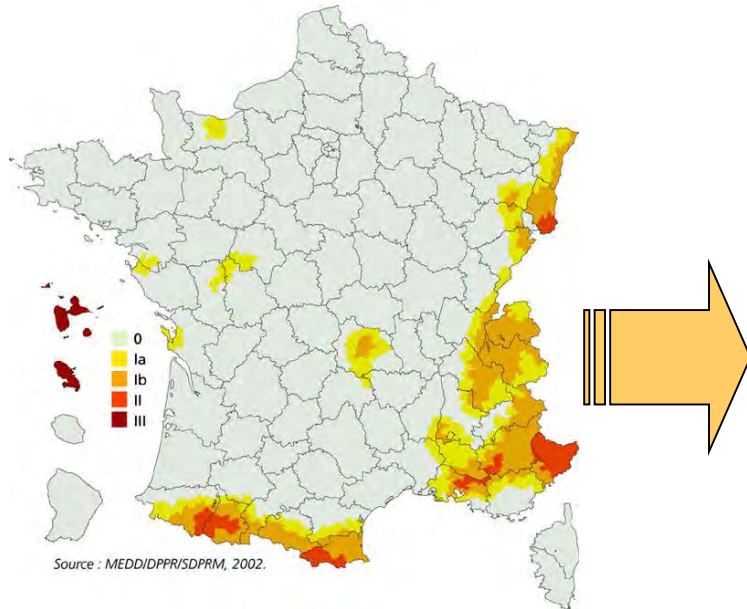
Reclassement  
Zonage 91

## Zonage physique proposé



# Zonage EC8 France

## Ancien

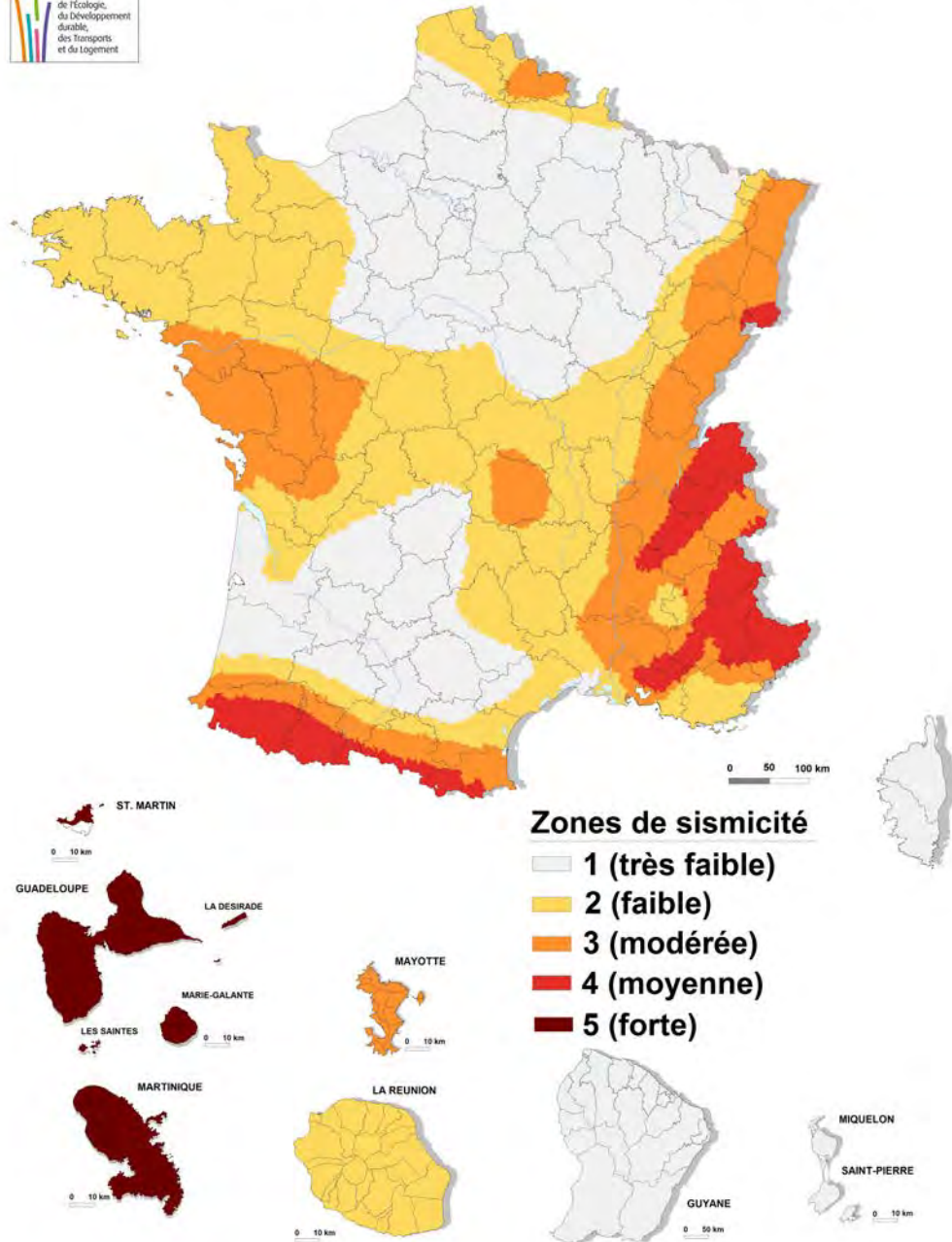


|     |                                  |
|-----|----------------------------------|
| III | Forte                            |
| II  | Moyenne                          |
| Ib. | Faible                           |
| Ia. | Très faible mais non négligeable |
| 0.  | Négligeable mais non nulle       |

et actions sismiques, Jo

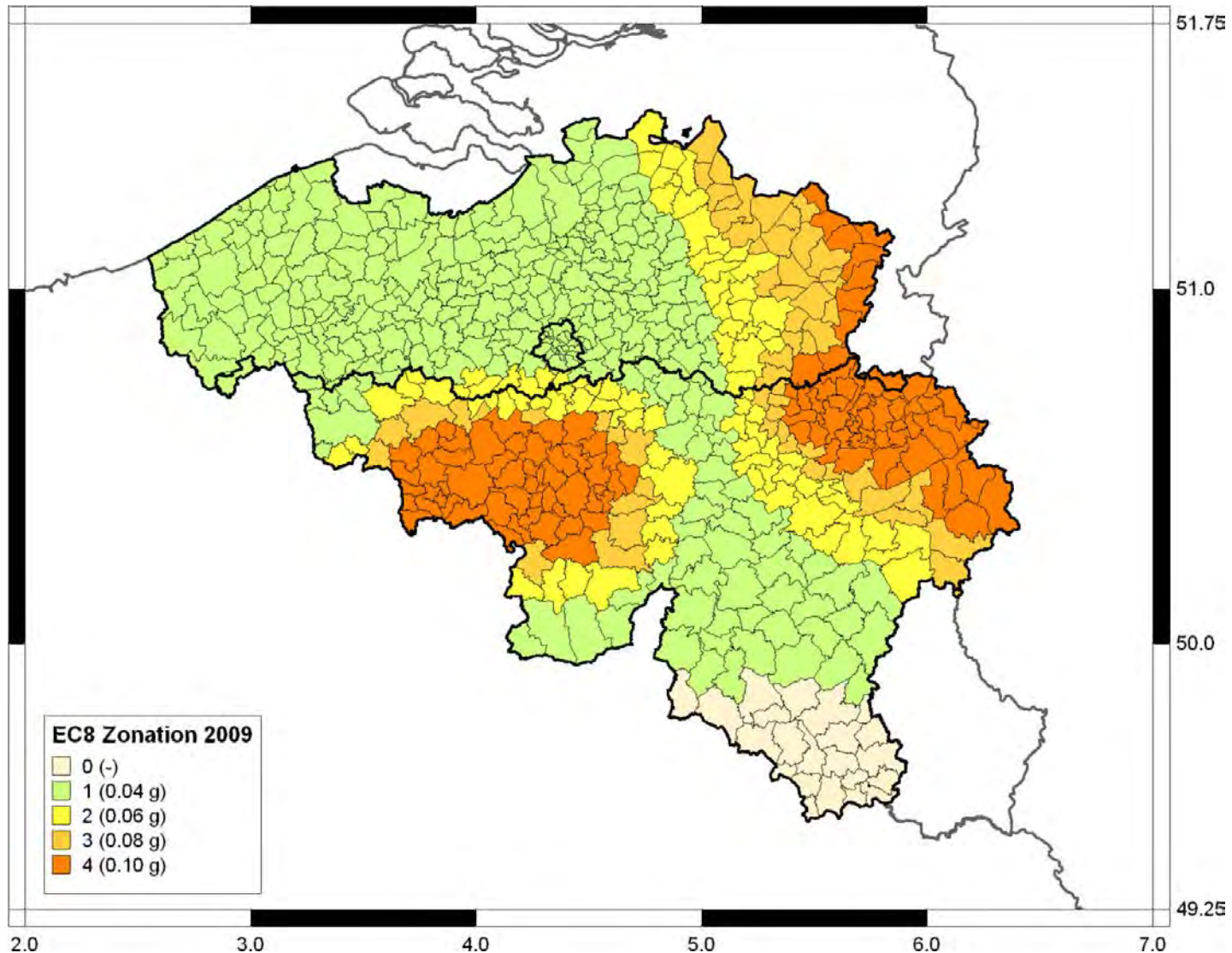


## Nouveau zonage sismique de la France





# Carte de zonage EC 8 pour la Belgique



# Etude probabiliste pour l'EC8 en Belgique

- Publiée en 2000 [réalisée en 1999]
- Magnitude utilisée:  $M_s$ , alors que la majorité des GMPEs actuelles sont calibrées en  $M_w$
- Magnitude minimum: 3.5 (= très conservatif)
- Basée sur des modèles à valeur unique (donc aucune incertitude épistémique):
  - 1 modèle source
  - 1 GMPE (Ambraseys et al., 1996)
  - 1 valeur pour  $M_{max}$  dans chaque zone ( $M_{max\_obs} + 0.5$ )
  - 1 ensemble de valeurs a-b pour chaque zone (peu contraint)
- Seulement PGA
- Valeurs les plus élevées (Mons, Liège) tronquées à 0.1 g

# Projet SEVESO, PGA, $T_R=2500$ a

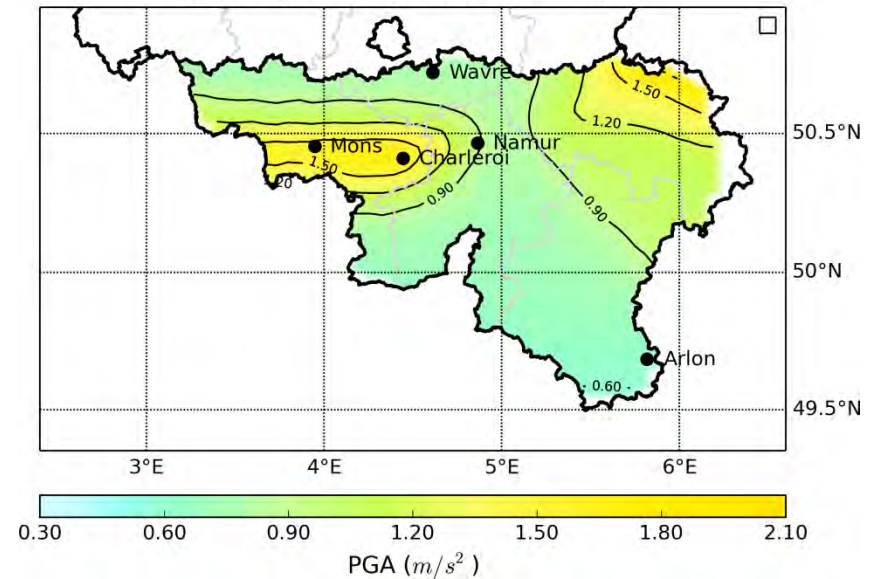
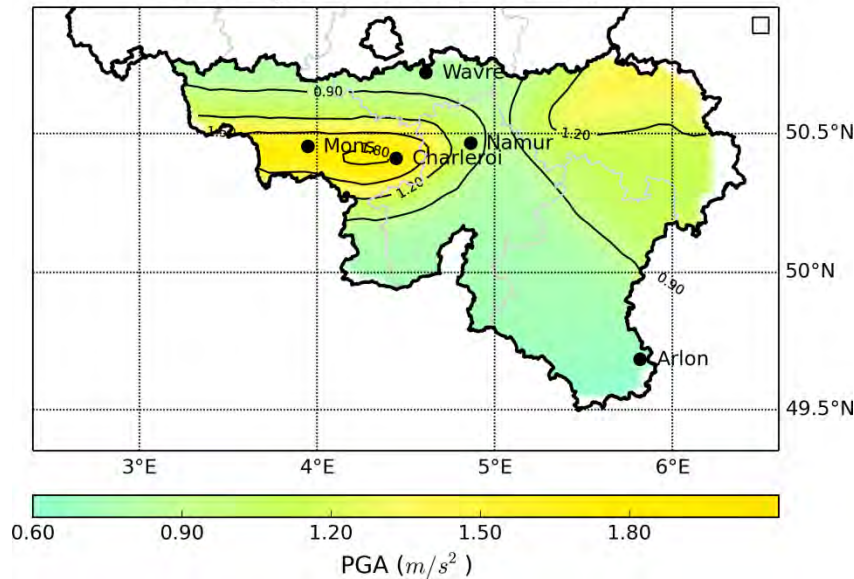
## Standard rock

Aléa sismique - Période de retour: 2500 ans

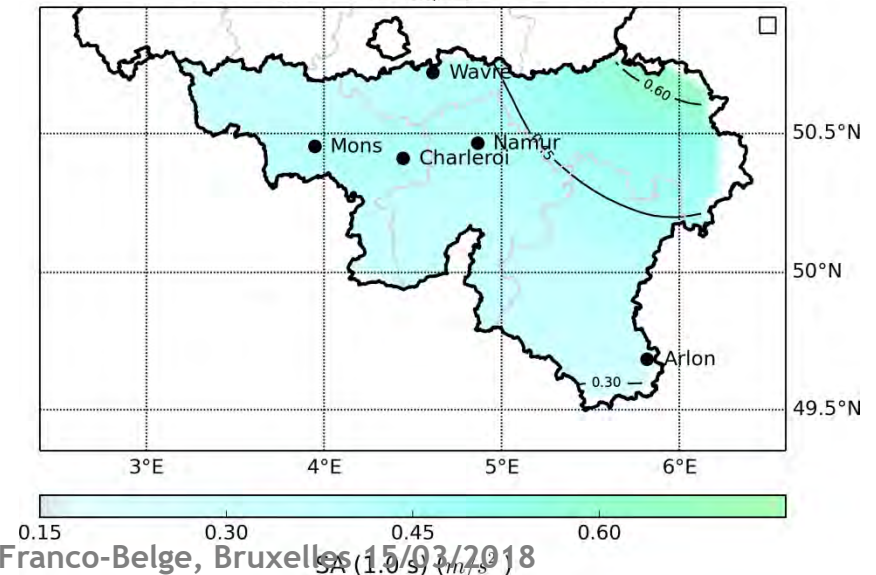
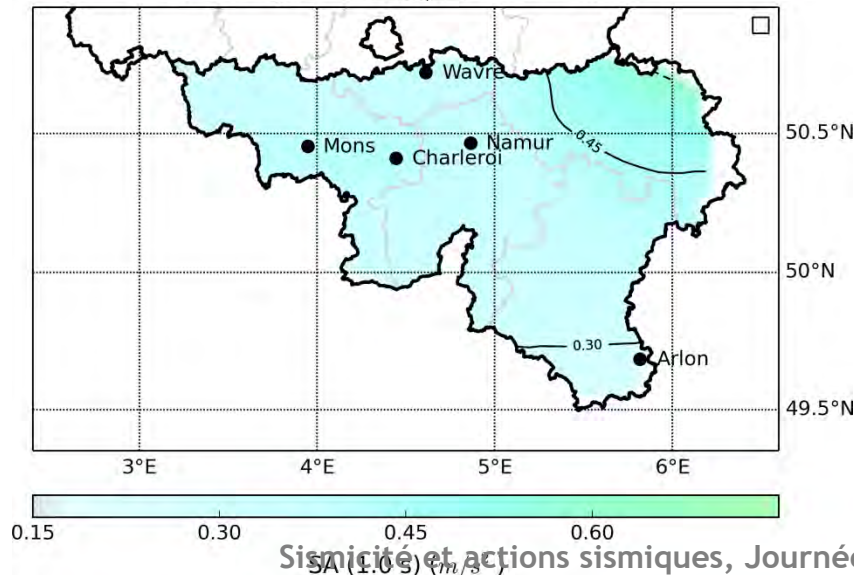
## Hard rock

Aléa sismique - Période de retour: 2500 ans

PGA



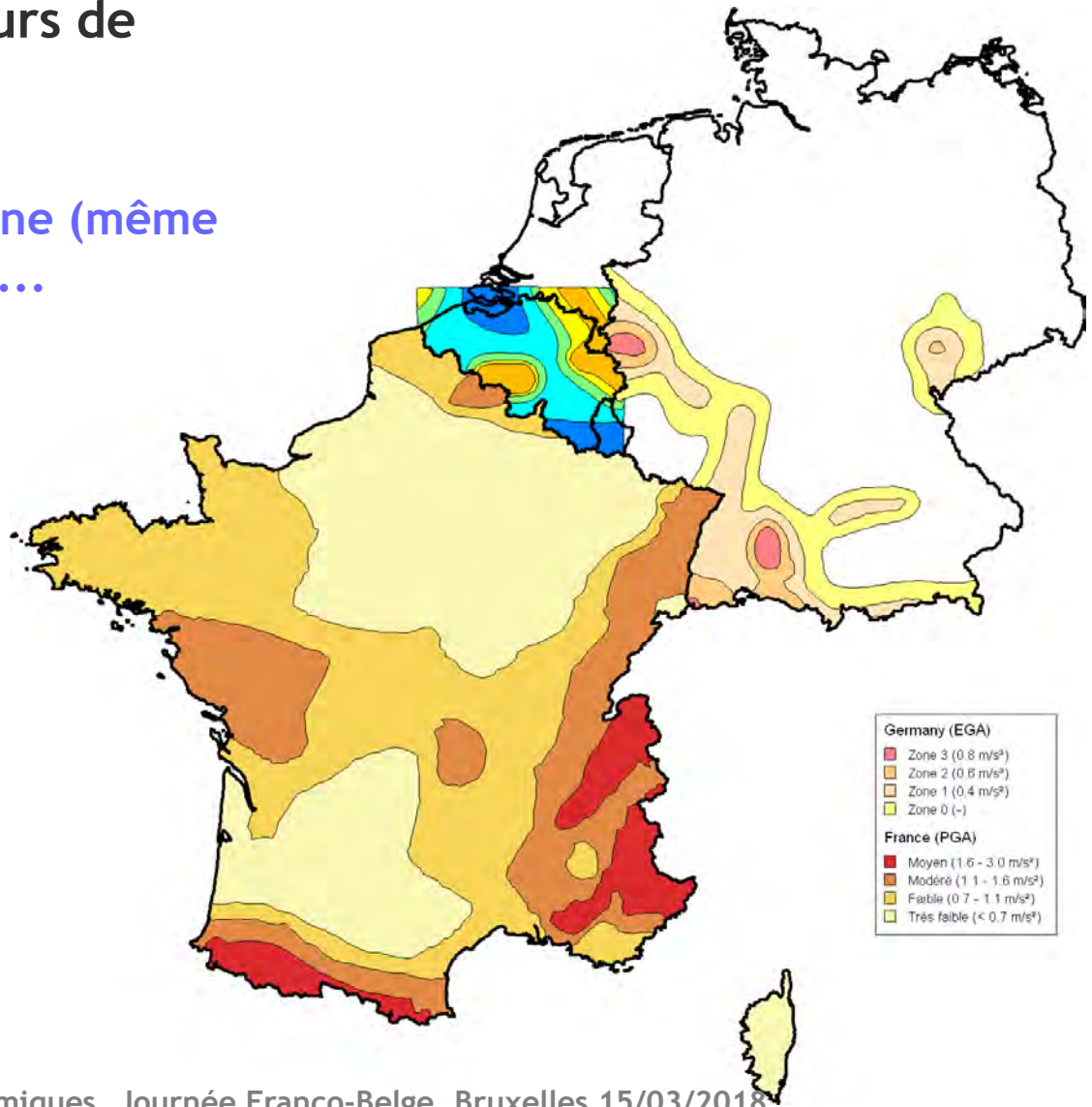
SA (1s)



# Comparison with neighbouring countries

Commentaire général : Valeurs de PGA pour la Belgique

- Plus faibles qu'en France
- Plus fortes qu'en Allemagne (même avec passage EGA - PGA) ...





# The European seismic hazard model 2013

J. Woessner, L. Danciu, D. Giardini  
and the SHARE consortium

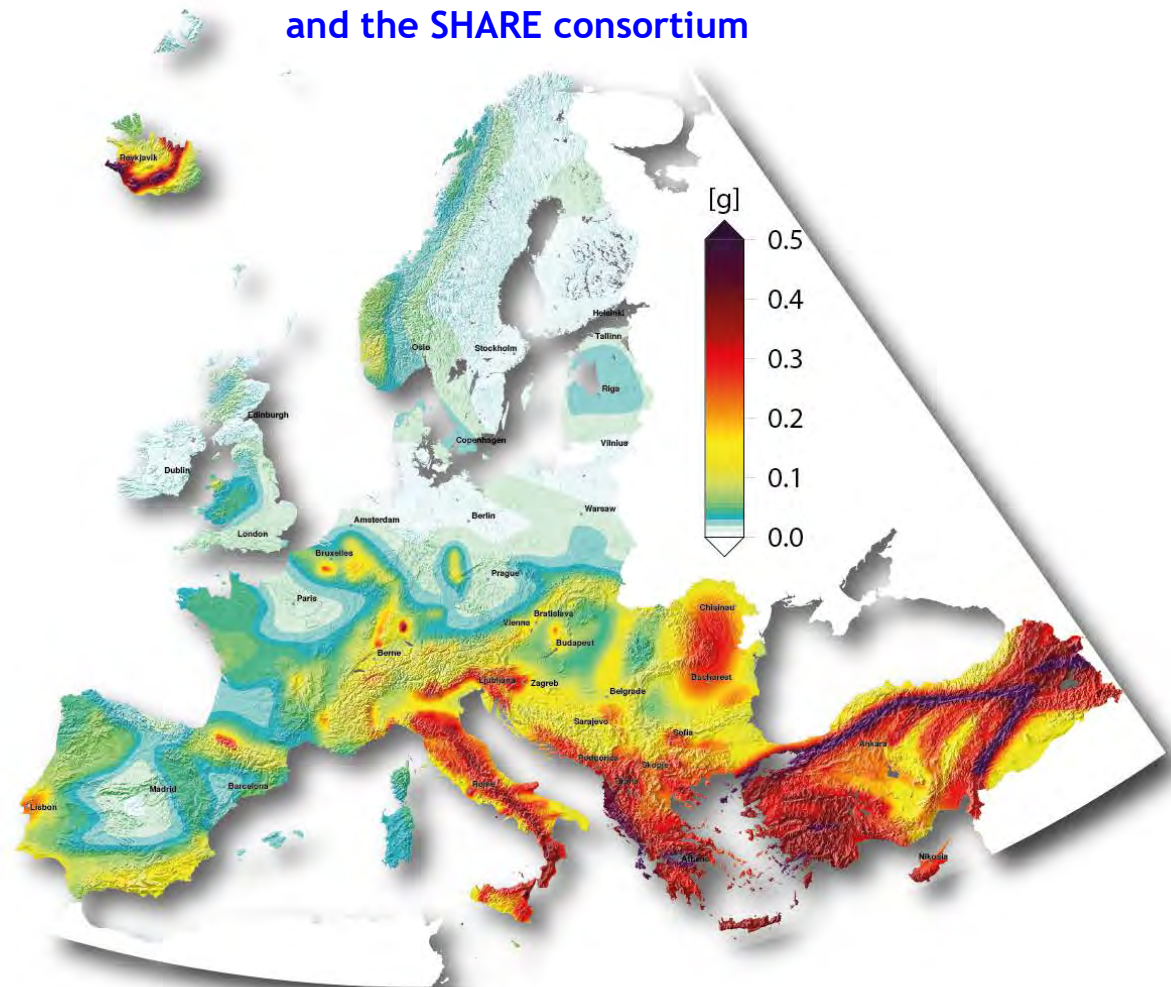
- **Intensity Measure**

**Types:**

- PGA, SA (0.1-10s)

- **Return periods:**

- 72 - 5000 years



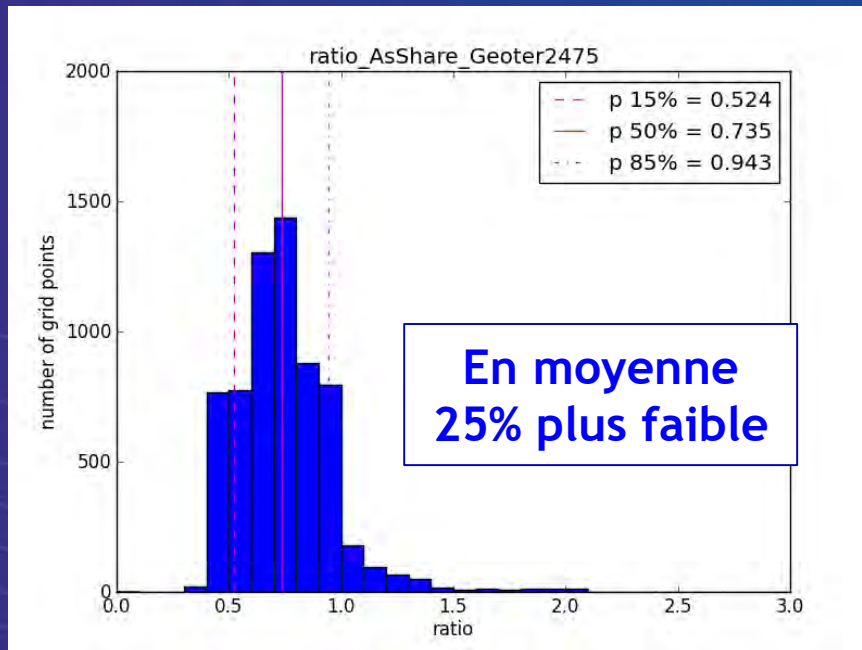
PGA, 10% Exceedance Probability in 50 years



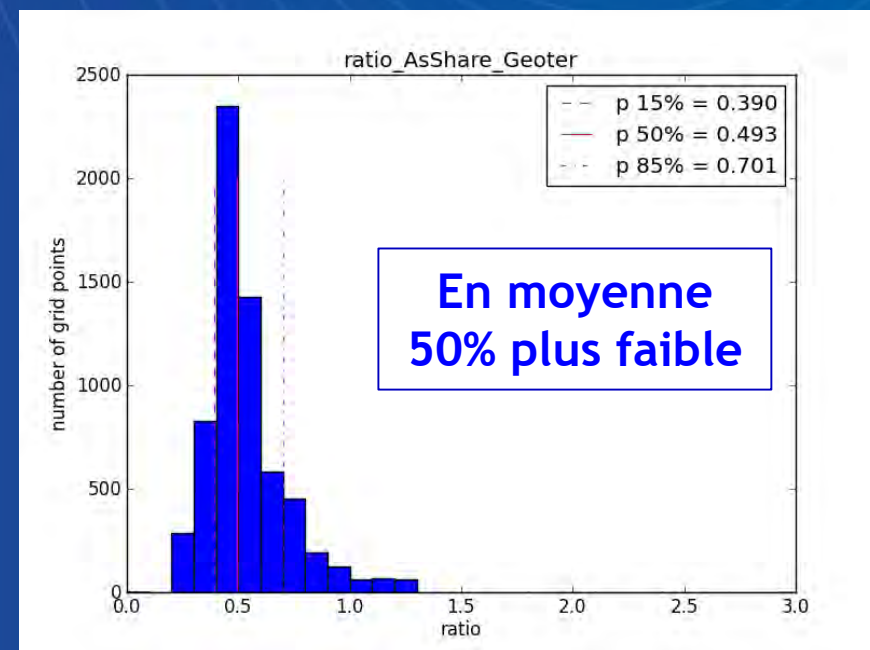
# Comparaison France : Rapport $PGA_{475}(\underline{SHARE}) / PGA_{475}(\underline{MEDD})$



**T = 2475 ans**



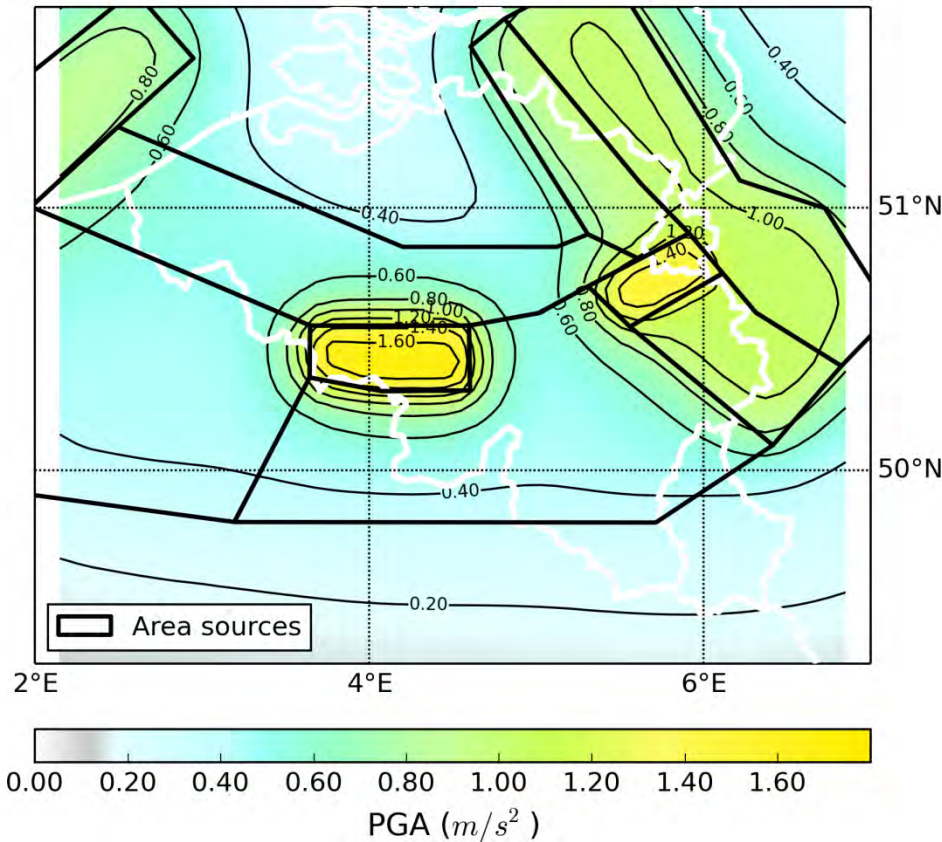
**T = 475 ans**



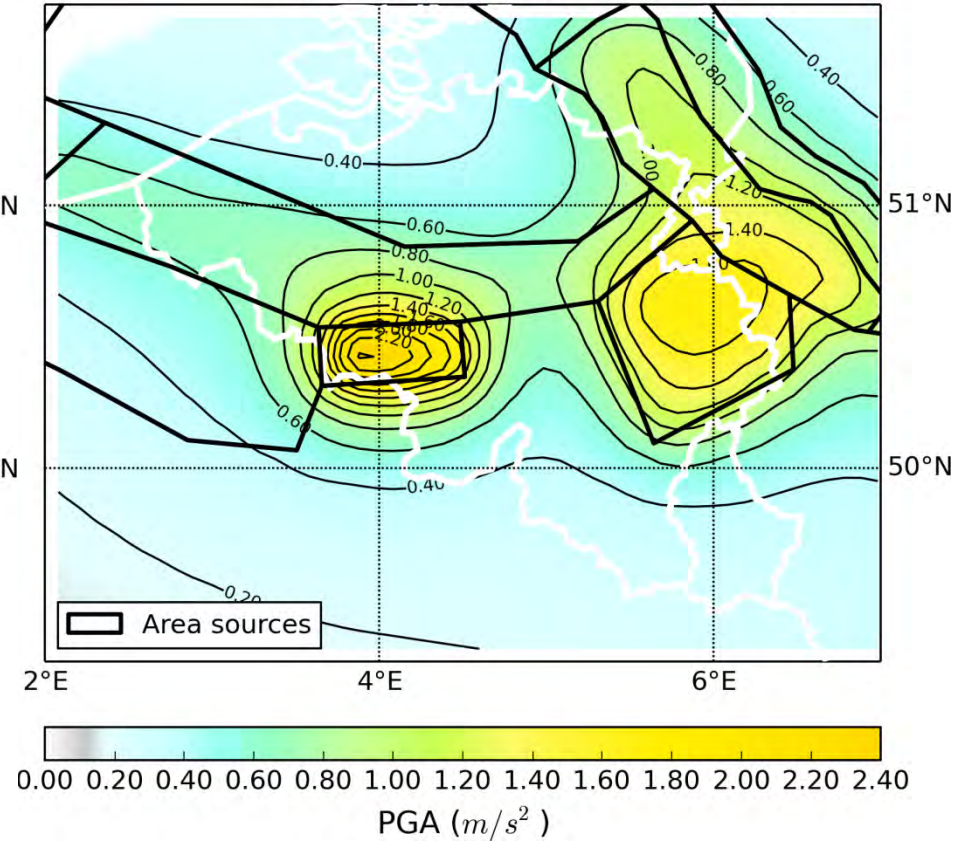
**Alea SHARE en général plus faible que l'étude MEDD2002, surtout pour les zones à faible / très faible sismicité.**

# Comparaison de la carte EC 8 en Belgique et le modèle SHARE

Eurocode 8 Belgium - TR=475 yr - PGA



SHARE - TR=475 yr - PGA



# Plan

Introduction : Séismes et mouvements sismiques

Estimation : actions de dimensionnement

**Perspectives et conclusions**

- Travaux en cours ou souhaitables
- Discussions persistantes ...

# Perspectives

- Révision EC8 en cours
  - Changement du mode de définition des spectres
    - $P_{ga}$  + spectre  $\rightarrow$  PSA (plateau) + PSA (1 s)
  - Changement des classifications de site
    - Prise en compte de l'épaisseur "H800"
      - (mais comment la mesurer ?  $\rightarrow$  2<sup>ème</sup> choix :  $f_0$ )
  - Troncature courte période
    - $PSA(T) = p_{ga}$  pour  $T \leq T_A$
    - Rampe linéaire de  $T_A$  à  $T_B$
- Mais rien d'organisé pour une harmonisation des cartes de zonage...

# Perspectives pour la Belgique

- **Mieux contraindre les EPMS pour le Hainaut**
  - (important aussi pour l'aléa en France)
- **Atteindre un consensus au sujet des EPMS à considérer dans les évaluations d'aléa**
- **Determiner les paramètres d'ajustement des EPMS pour le rocher dur**
- **Etablir une cartographie des types de sol et d'épaisseur du "bedrock" (ou de la période propre de la couche sédimentaire)**
- **Réaliser une nouvelle étude probabiliste pour la nouvelle version de l'EC8**

# Perspectives pour la France

- Mises à jour du zonage (si décision Ministère / DGPR)
  - Zonage / failles
  - EPMS
  - ? Officialisation d'un catalogue paramétrique complet ?
- Souhait des sismologues
  - Activité régulière de suivi / mise à jour de la carte de zonage
  - Mise à jour du zonage quand modifications significatives
- Etudes d'aléa site-spécifiques pour
  - Barrages
  - ICPE (Seveso)
  - (Nucléaire)



# Etude probabiliste France : Encore valable en 2018 ?

Territoire: Métropole + Antilles

Périodes de retour visées : 10 - 10000 ans

100 - 10000 ans

Catalogue de sismicité révisée (France métropolitaine)

- Intégration des revues de la sismicité
- Magnitudes estimées à partir des intensités avec
- Catalogue instrumental :  $M_{LDG}$

Nouveau catalogue instrumental  
SiHex (2014)  
+ historique !!!! (SIGMA 2017, à valider)

Zones sources / Unités sismotectoniques (France)

- EPAS/AFPS (52 zones, pas de faille) + version simplifiée
- Aucun zonage a priori (approche par lissage) : 20%

OK + failles +  $M_{max}$

Relations d'atténuation (métropole)

- Métropole : IRSN (1990) + Ambraseys (1995-1996)
- Antilles : Ambraseys (1995-1996) + Takahashi 2000 + Young 2000
- Rochers : Ambraseys (1995-1996)
- Prise en compte des particularités, sans troncature
- Hypothèse conservative :  $M_S = M_{LDG}$

Nouvelles GMPE  
RESORCE 2014 + autres  
Mouvements plus faibles  
pour magnitude modérée

Paramètres de mouvements sismiques

➤  $P_{ga} + S_a(0.2s) + S_a(0.5s) + S_a(1.0s) + P_{gv}$

UHS → CMS  
Couplage entre paramètres  
de mouvement

# Conclusions sur l'aléa...

## Estimation de l'aléa : des évolutions fortes

- Passage déterministe → probabiliste : augmentation
  - (prise en compte "correcte" des incertitudes)
- Évolutions récentes probabilistes
  - à la baisse pour sismicité modérée, faibles périodes de retour (200 - 1000 ans, meilleures EPMS)
  - Inchangées pour longues période de retour (5000 - 10000 ans)

## Et des polémiques...

- Sismologues irresponsables vs ingénieurs réalistes
  - (ou "scientifiques objectifs" / "intérêts économiques" ...)
- Plusieurs cas récents de forte sous-estimation
  - Japon 2007 (+2011...); Lorca, Espagne, 2010; Christchurch, NZ, 2011
  - Grèce 2014, Italie (L'Aquila 2009, Amatrice / Norcia 2016) :  $M_6$ ,  $\geq 0.5$  g

# Conclusions sur l'aléa

## Des améliorations nécessaires

### ➤ Aléa : Stabilisation

- meilleures données accélérométriques en zone de sismicité modérée
- prise en compte des incertitudes aléatoires / épistémiques sans "double counting"
- Études "site-spécifiques" - y compris instrumentales !

### ➤ De l'aléa "physique" aux actions de dimensionnement

- ? Quelles marges dans les méthodes de dimensionnement actuelles
  - ? Poids de l'historique
    - » (des approches "statiques" en force à 5-10% g et de leur efficacité
    - » Aux méthodes en déplacement "performance-based"...)
  - ? Besoin de plus de mesures en structure / ouvrage pour valider approches de calculs