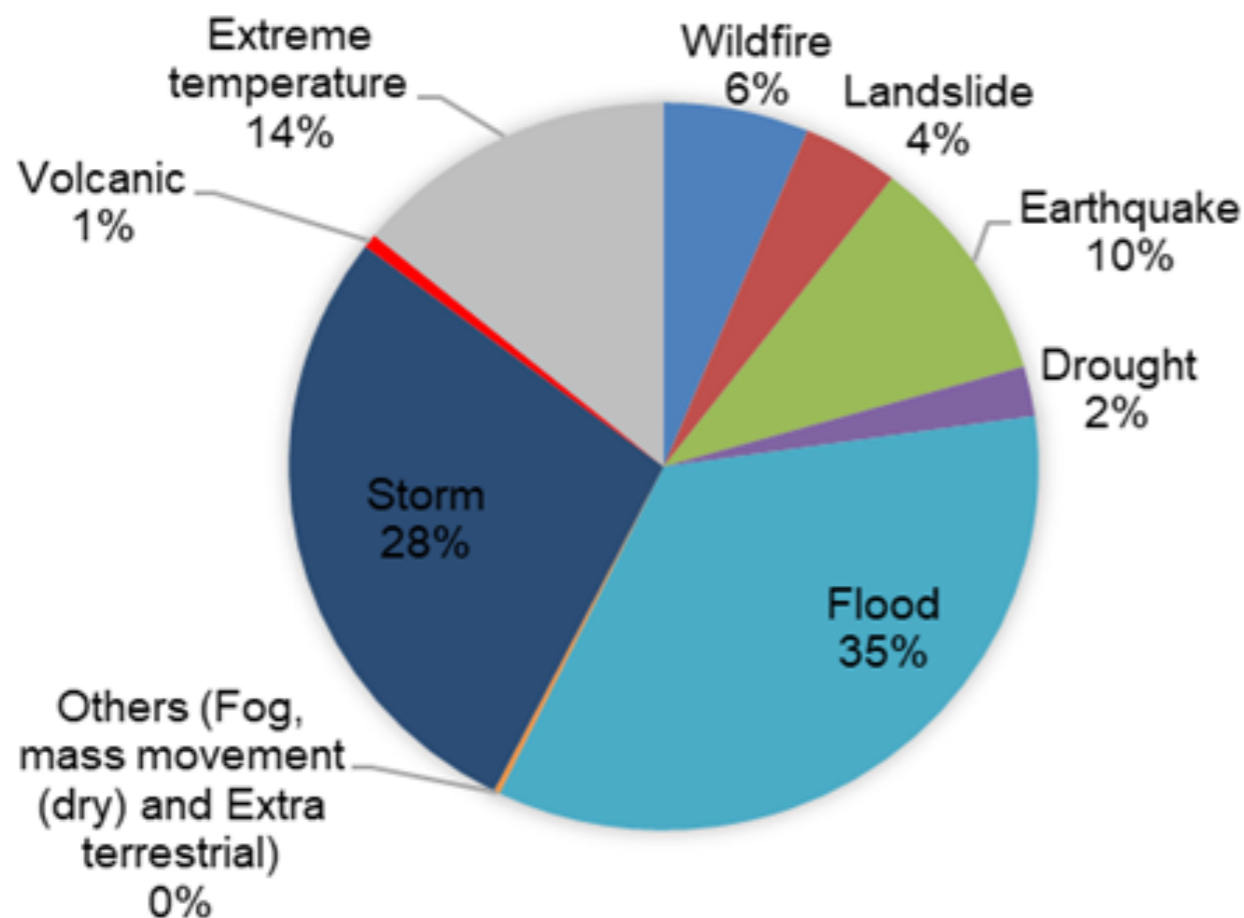


Les Catastrophes Naturelles en Europe 1900-2020



Nombre d'événements

Inondations -	35 %
Cyclones et tempêtes -	28 %
Canicule -	14 %
Séismes -	10 %

Pertes économiques

Inondations -	34 %
Séismes -	26 %
Cyclones et tempêtes -	26 %
Canicules -	4 %

Pertes humaines

Séismes -	58 %
Canicule -	34 %
Inondations -	2 %
Cyclones et tempêtes -	1 %

Ce que l'on ne saura sans doute jamais...

Donner l'heure et la date du prochain séisme

..... mais que faire de cette information si non anticipée?

Identifier toutes les failles pouvant produire un séisme

les cas de Chritschurch, L'Aquila, Napa Valley, Le Teil,...

Estimer précisément le séisme maximal possible

risque acceptable et risque soutenable

Être certain de la conception des bâtiments

La problématique du bâti historique ou déjà existant

Les outils pour prévenir le risque sismique

Décennies - Evaluation probabiliste de l'aléa sismique

- ❖ Code de dimensionnement parasismique, PLU, PPRS ...

Quelques années - Information et éducation

- ❖ Mise en vigilance et anticipation individuelle ou communautaire

Mois à heures - Prédiction de l'heure et du lieu origine du séisme

- ❖ Pas possible actuellement ni dans un futur proche

Secondes à minutes - *Early Warning systems*

- ❖ Détection rapide du séisme, puis prédiction des vibrations et des conséquences et mise en alerte/vigilance

Les outils pour prévenir le risque sismique

Décennies - Evaluation probabiliste de l'aléa sismique

- ❖ Code de dimensionnement parasismique, PLU, PPRS ...

Quelques années - Information et éducation

- ❖ Mise en vigilance et anticipation individuelle ou communautaire

Mois à heures - Prédiction de l'heure et du lieu origine du séisme

- ❖ Pas possible actuellement ni dans un futur proche

Secondes à minutes - *Early Warning systems*

- ❖ Détection rapide du séisme, puis prédiction des vibrations et des conséquences et mise en alerte/vigilance

Risque sismique

Pourquoi se produisent les tremblements de terre ?

Qu'est-ce qui provoque les séismes

Sommes nous exposés à des tremblements de terre ?

Où se produisent les séismes ?

Quel est le séisme contre lequel se protéger ?

Quand se produisent les séismes ?

Avec **quelle magnitude** ?

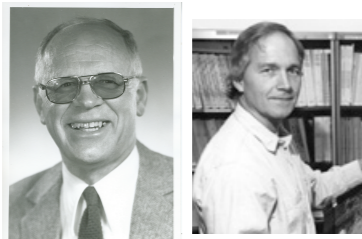
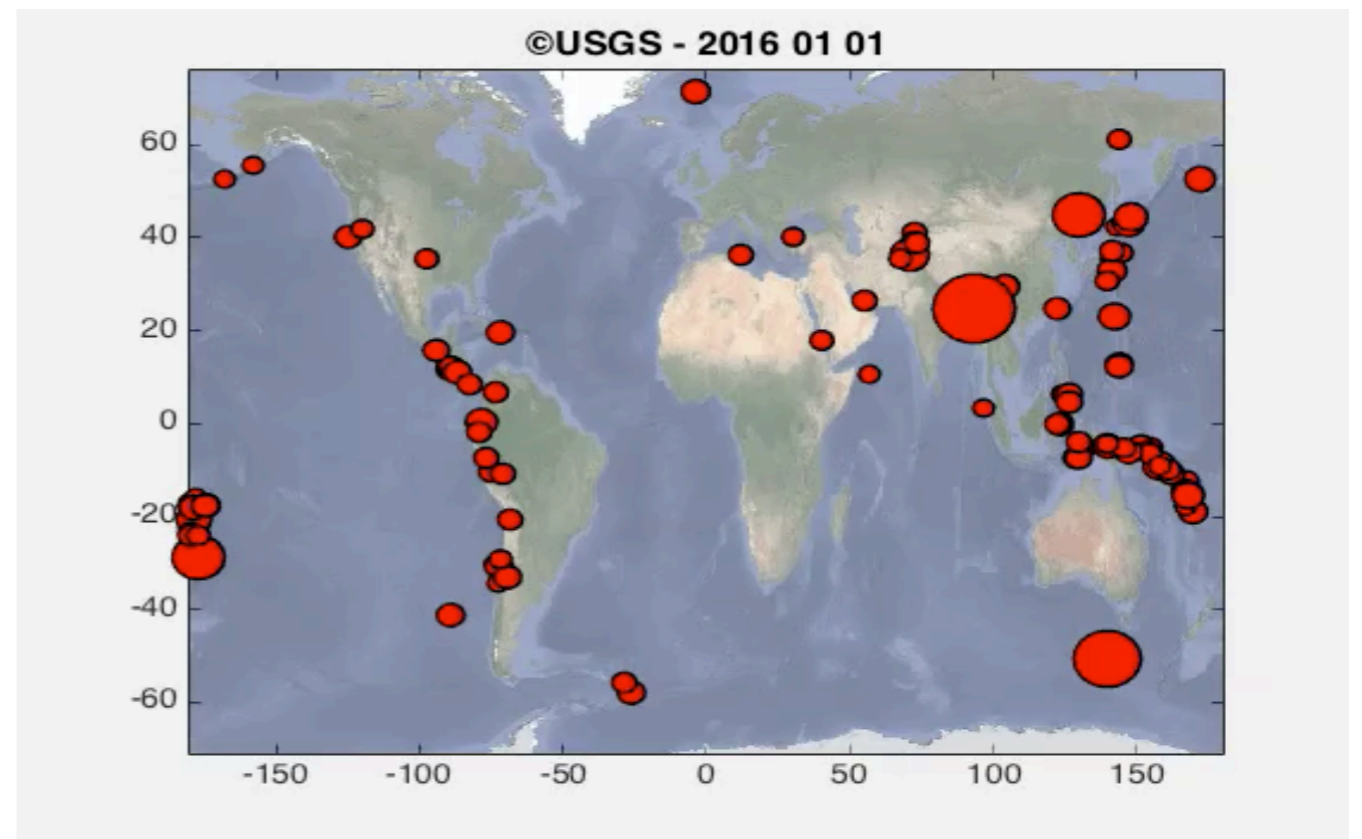
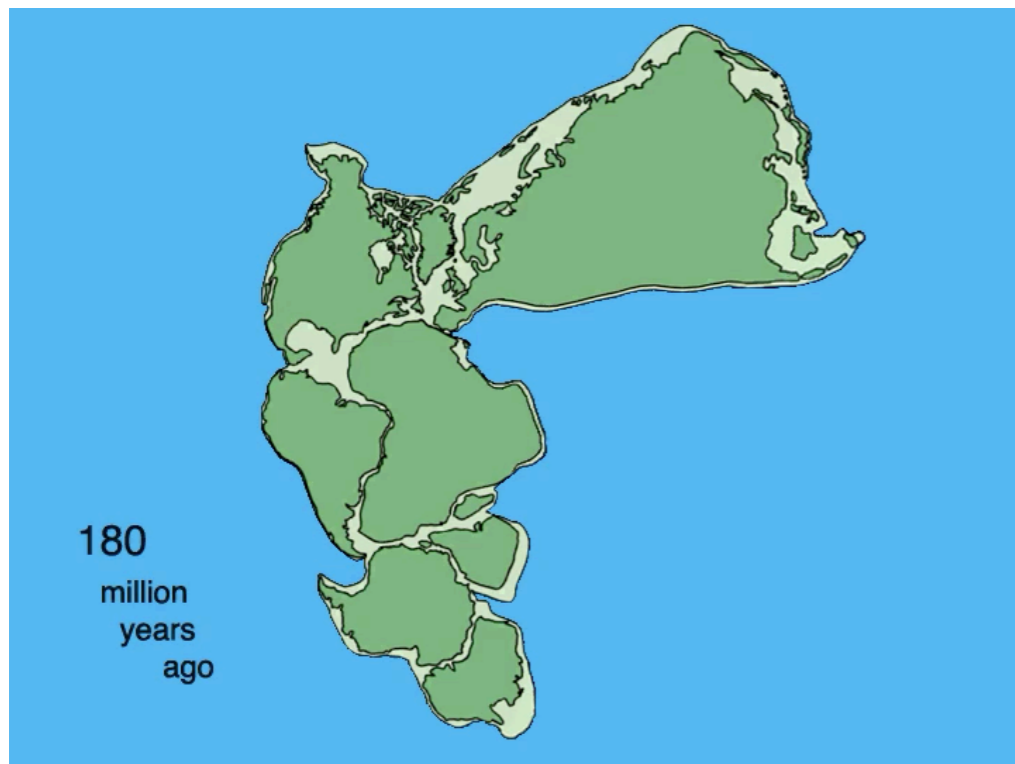
A quel niveau de risque sommes nous exposés ?

Quelles **vibrations du sol** peuvent être générées?

Quelles conséquences sont attendues ?

Pourquoi se produisent les tremblements de terre ?

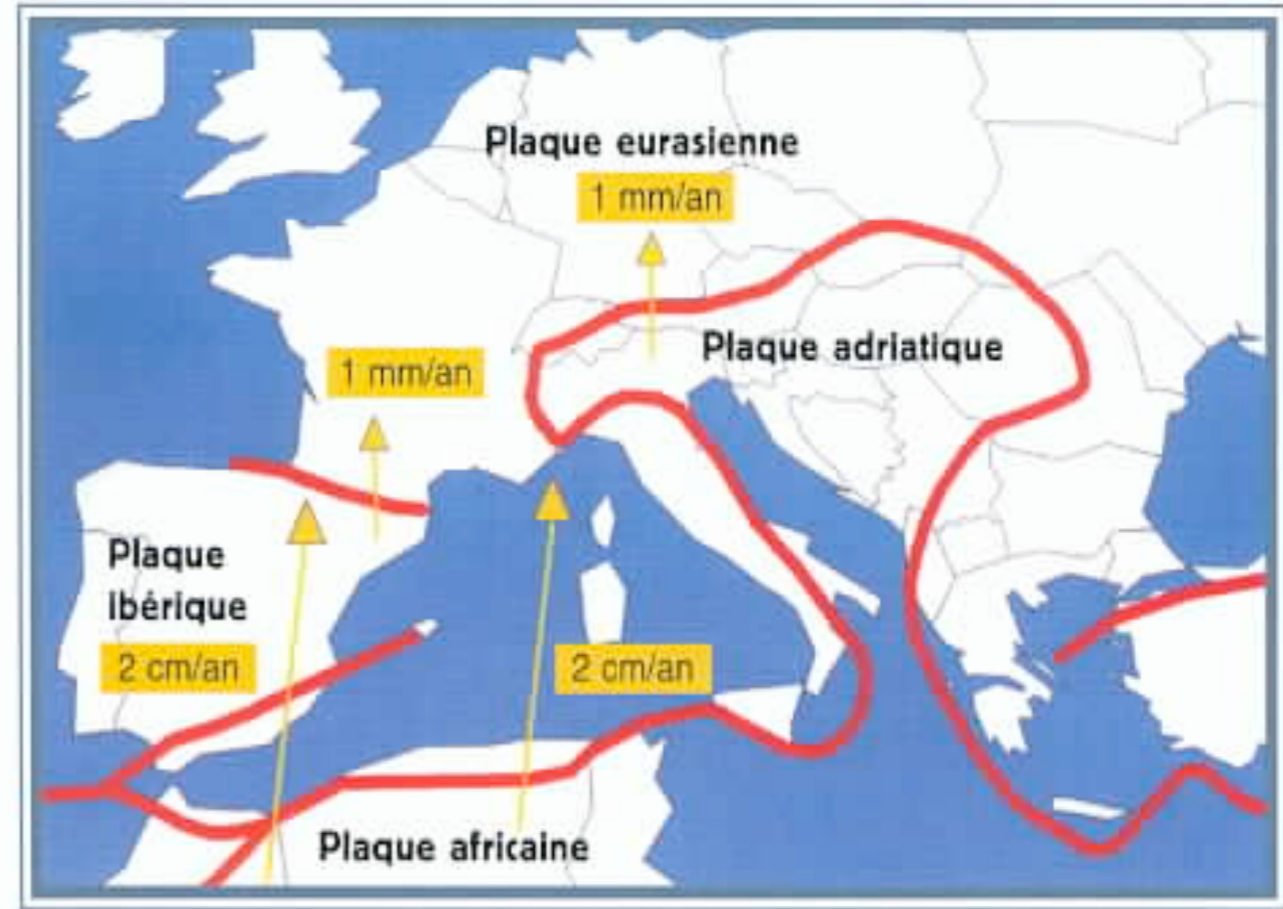
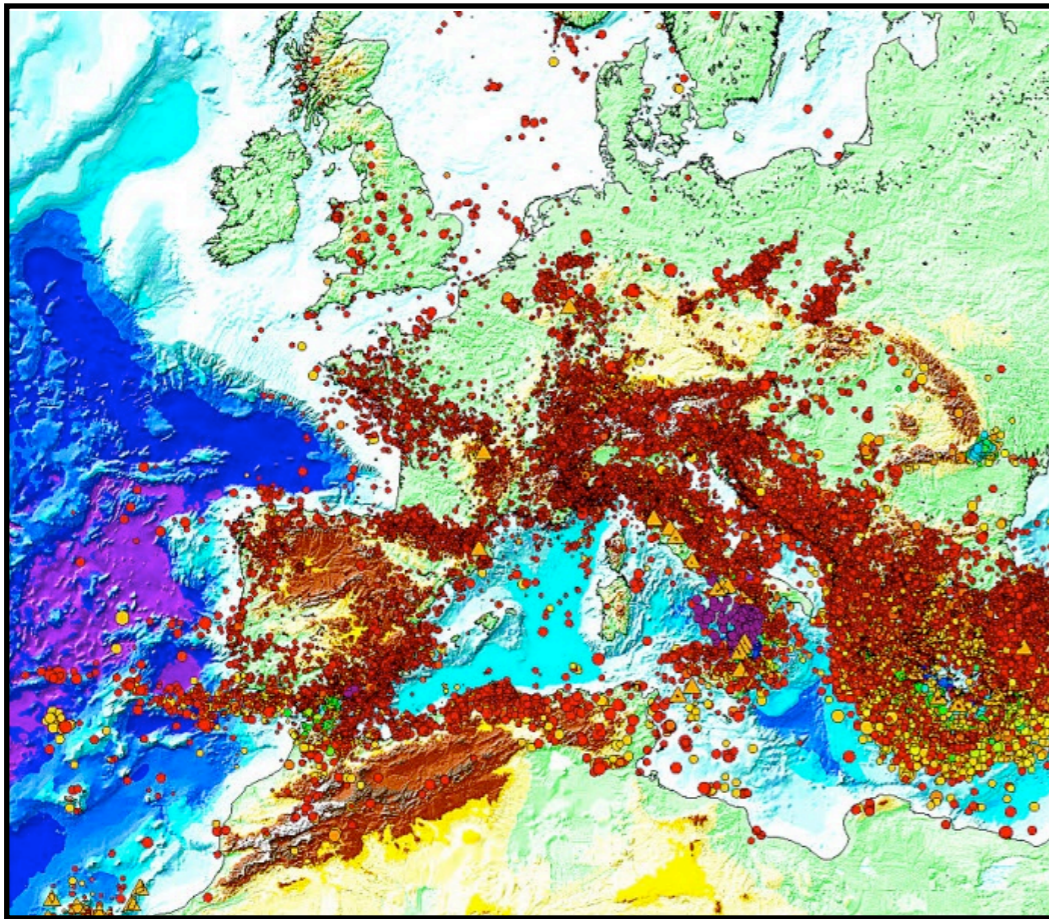
La tectonique des plaques à l'origine des séismes



Isacks, B., Oliver, J., & Sykes, L. R. (1968). Seismology and the new global tectonics. *Journal of geophysical research*, 73(18), 5855-5899.

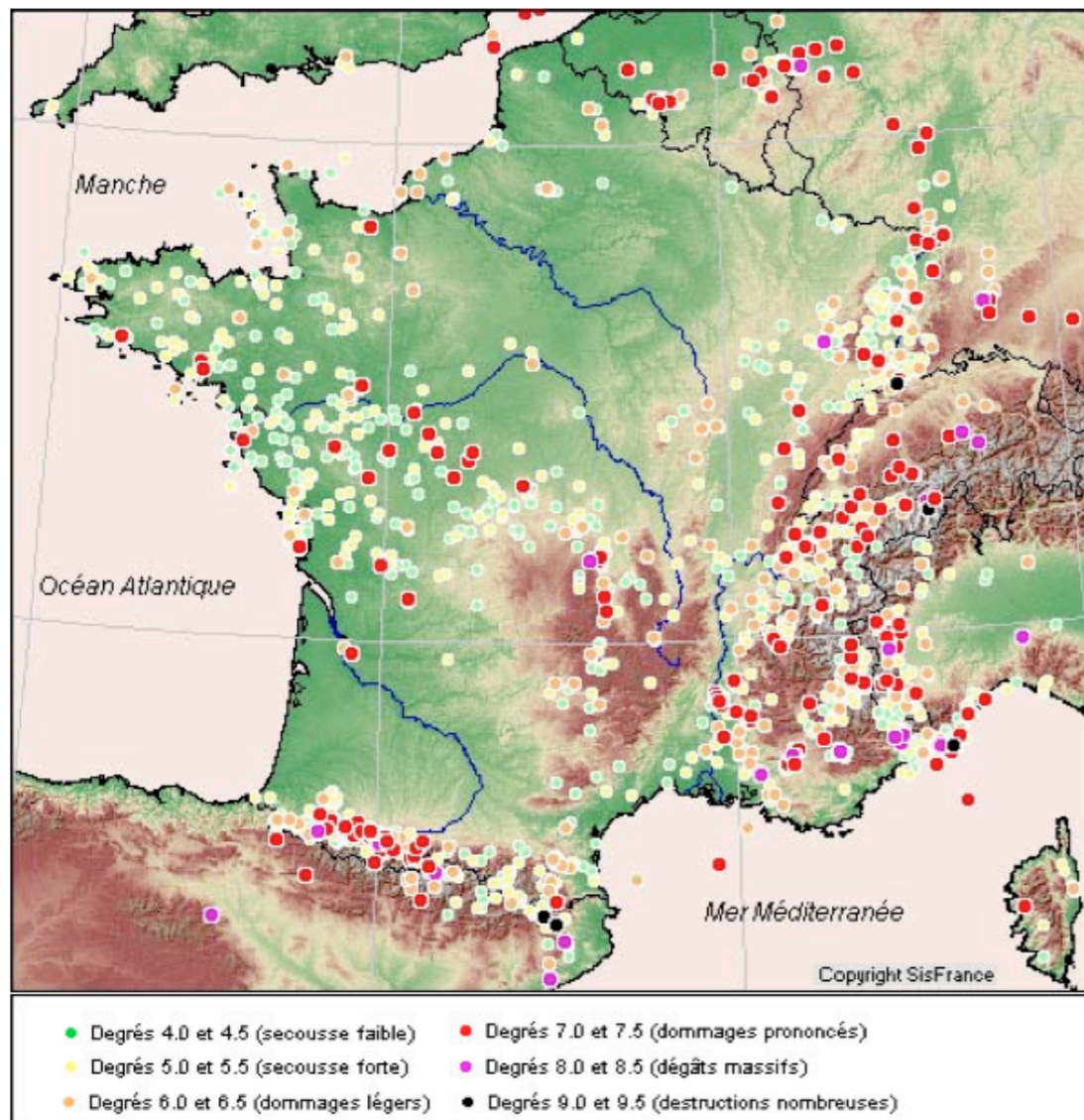
Pourquoi se produisent les tremblements de terre ?

La tectonique des plaques à l'origine des séismes

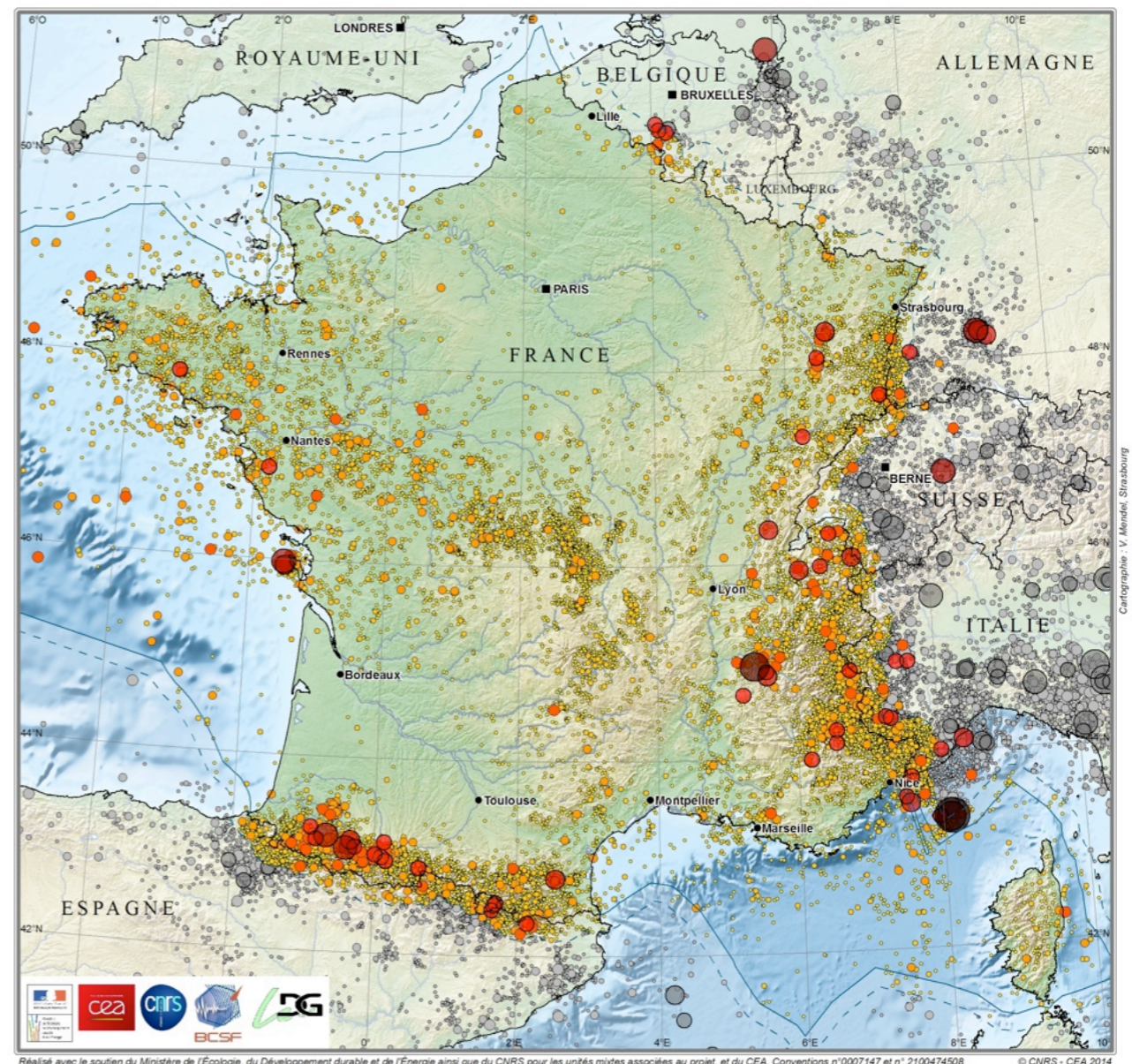


Où se produisent les séismes ?

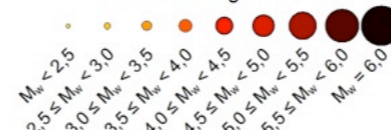
Sismicité historique de la France 1300 - 2003



Sismicité instrumentale de la France (SiHEX) 1962 - 2009



Sismicité catalogue SI-Hex



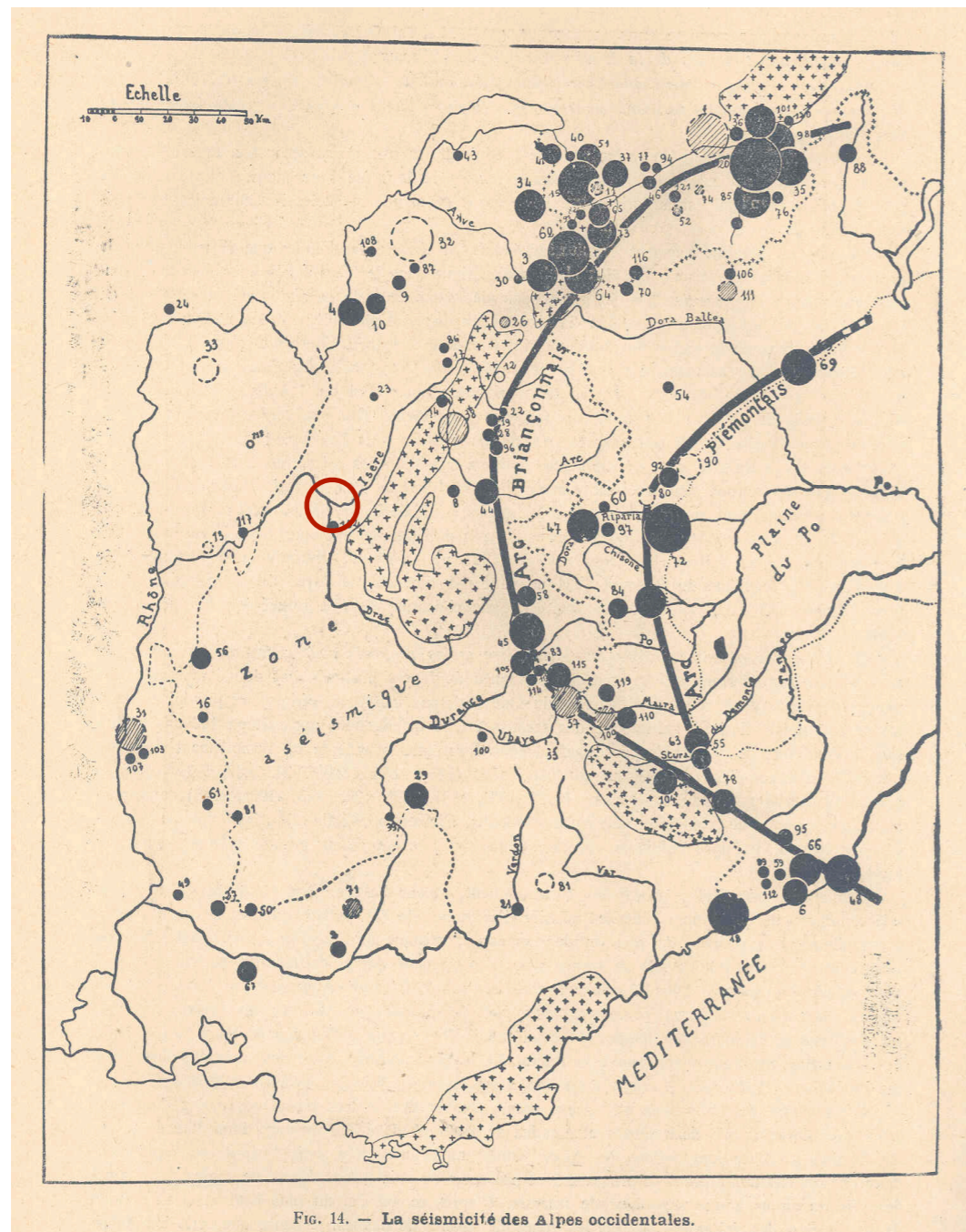
En couleur : épicentres des séismes d'origine naturelle dans la zone SI-Hex (France métropolitaine et zone économique exclusive en mer (ZEE), avec élargissement de 20 km), ainsi que les séismes ressentis en France avec une intensité EMS-98 \geq IV (BCSF). En gris : épicentres des séismes hors zone pour lesquels une magnitude M_w a été calculée dans le cadre du projet SI-Hex.

0 50 100 km

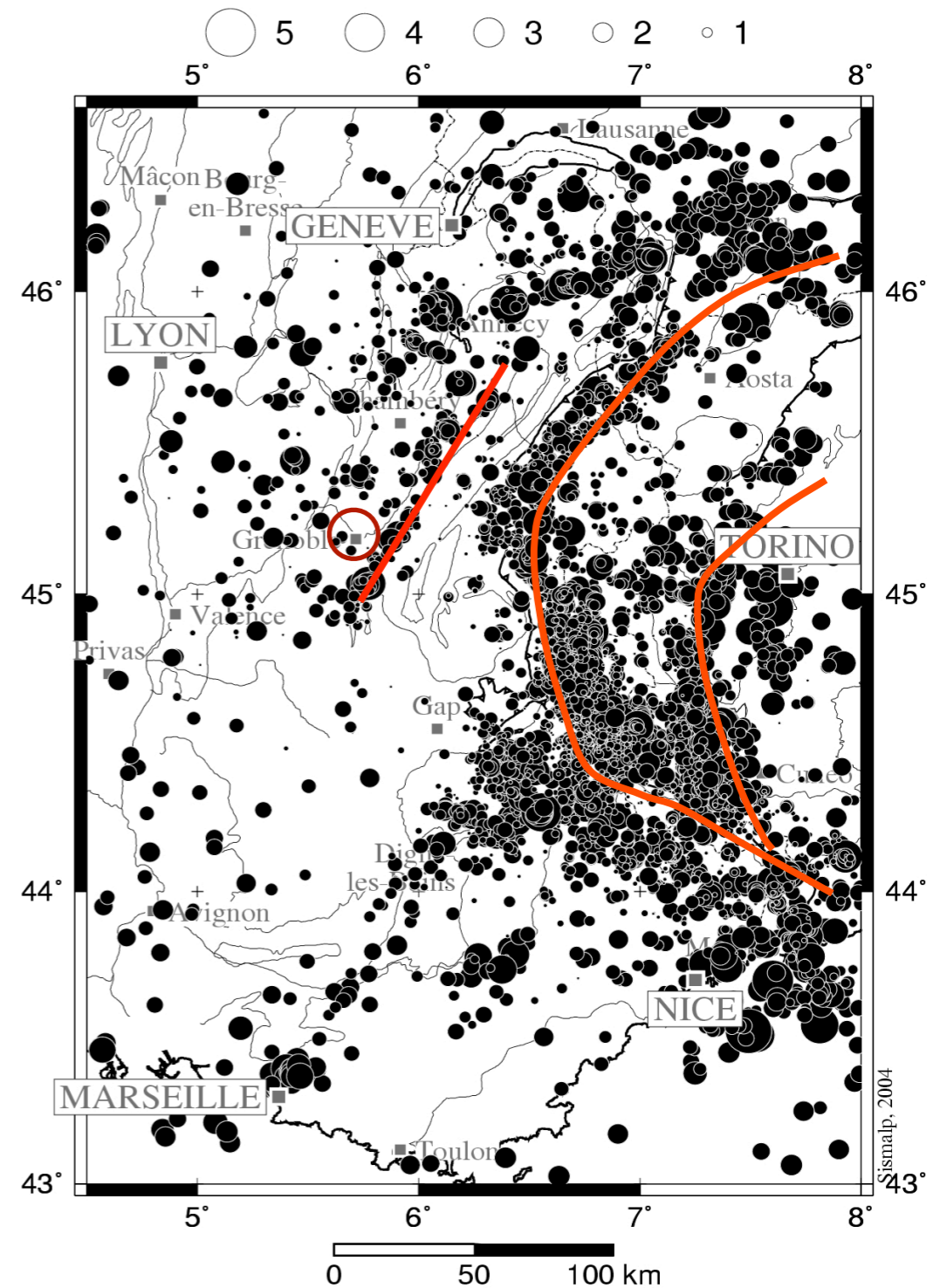
Où se produisent les séismes ?

Observer pour mieux anticiper

En 1941 (d'après Rothé)

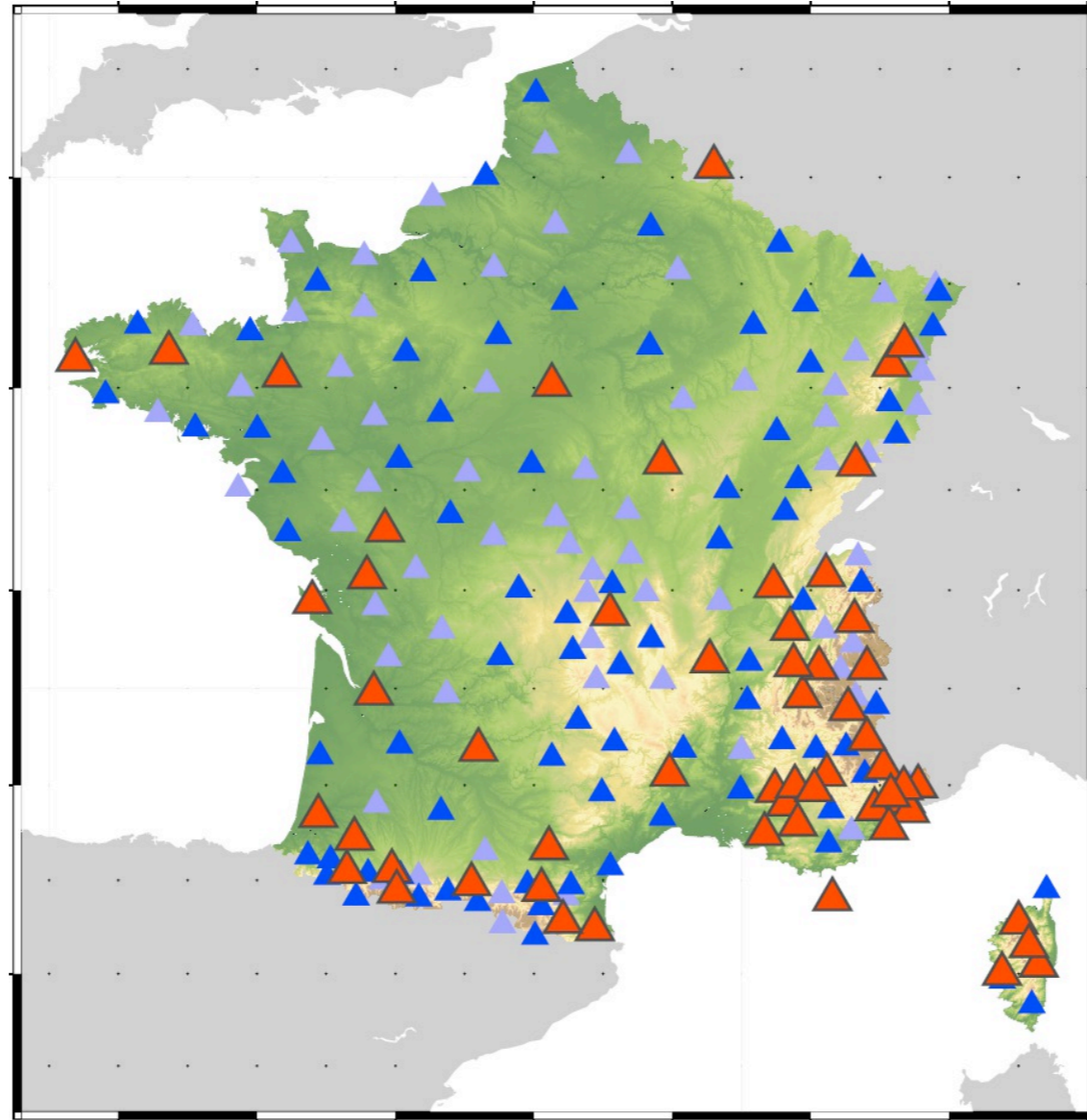


En 2006 (d'après SISMalp)



Où se produisent les séismes ?

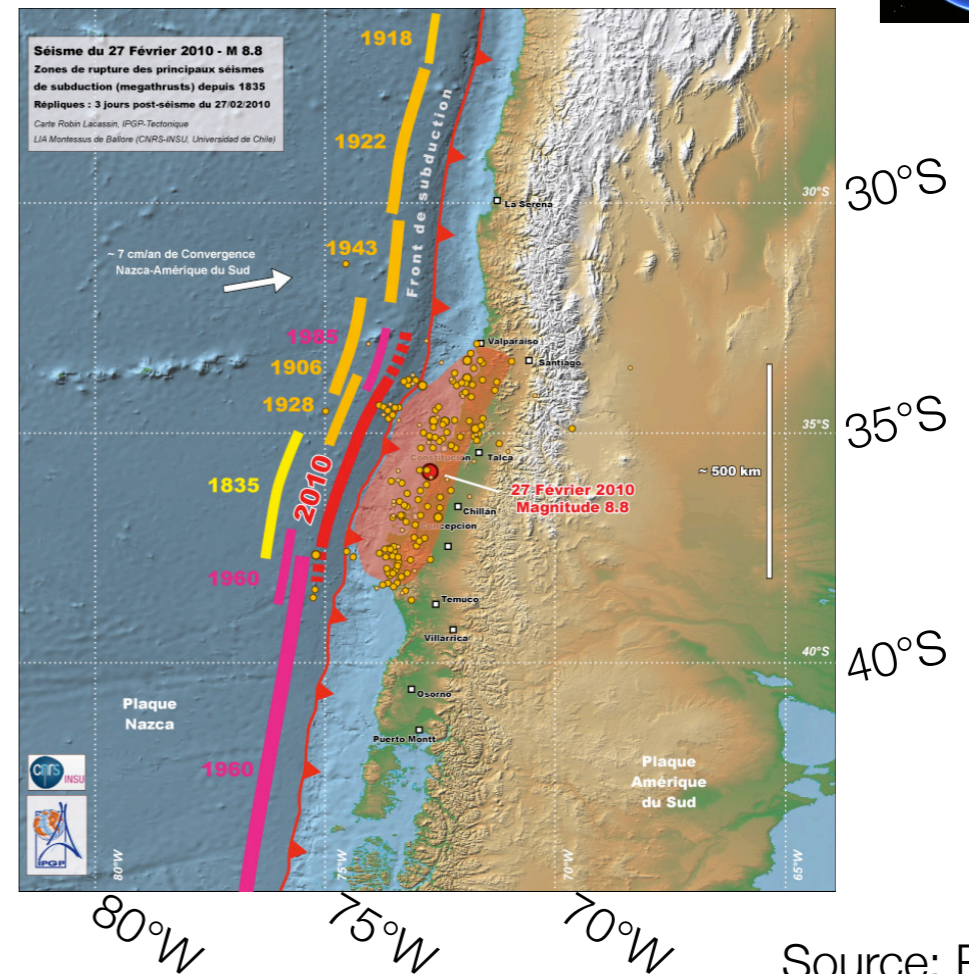
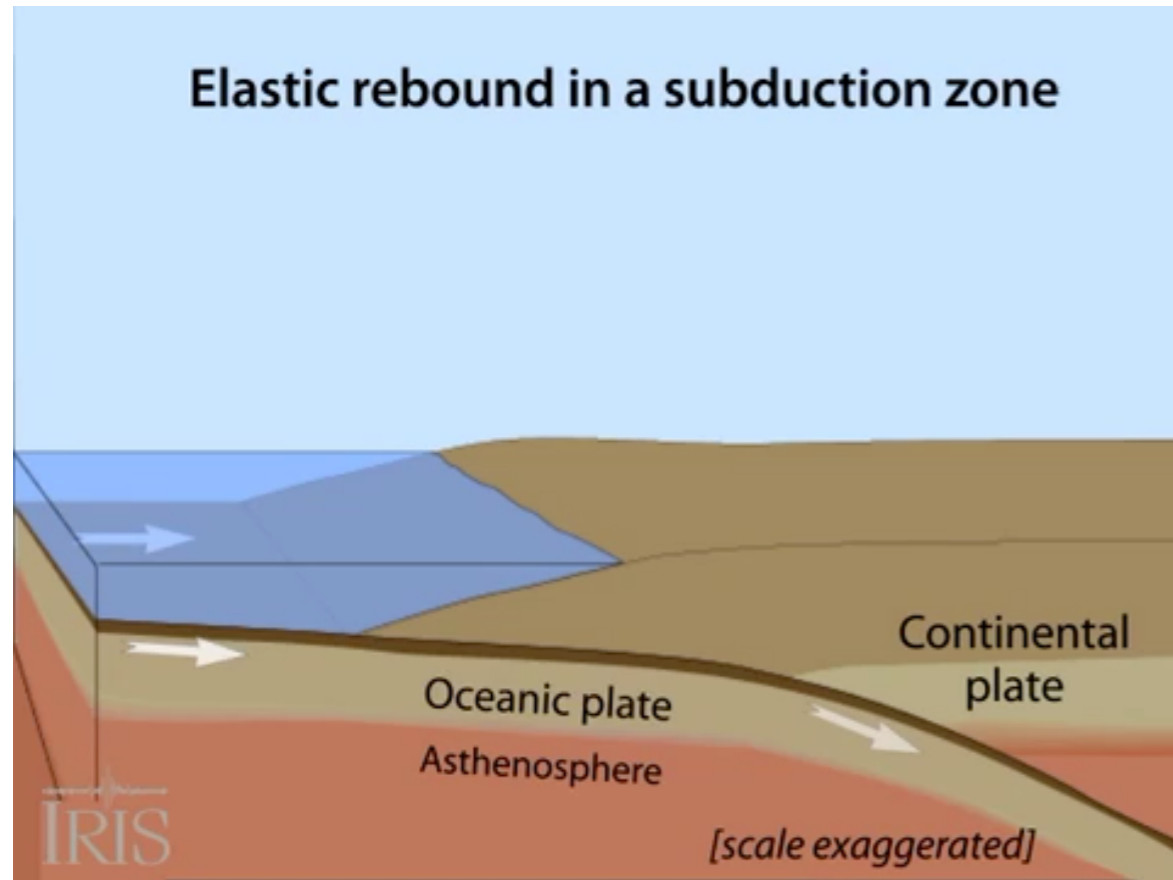
Observer pour mieux anticiper



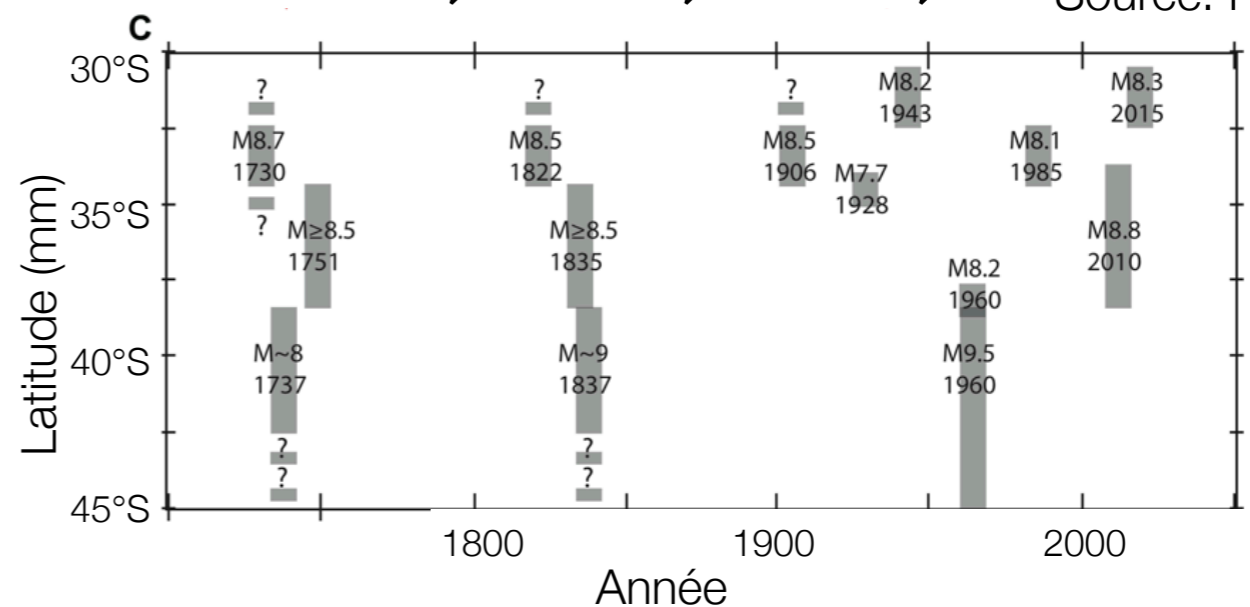
Réseau Sismologique et géodésique Français en 2020

Quand se produisent les séismes ?

Le cycle des séismes: rebond élastique

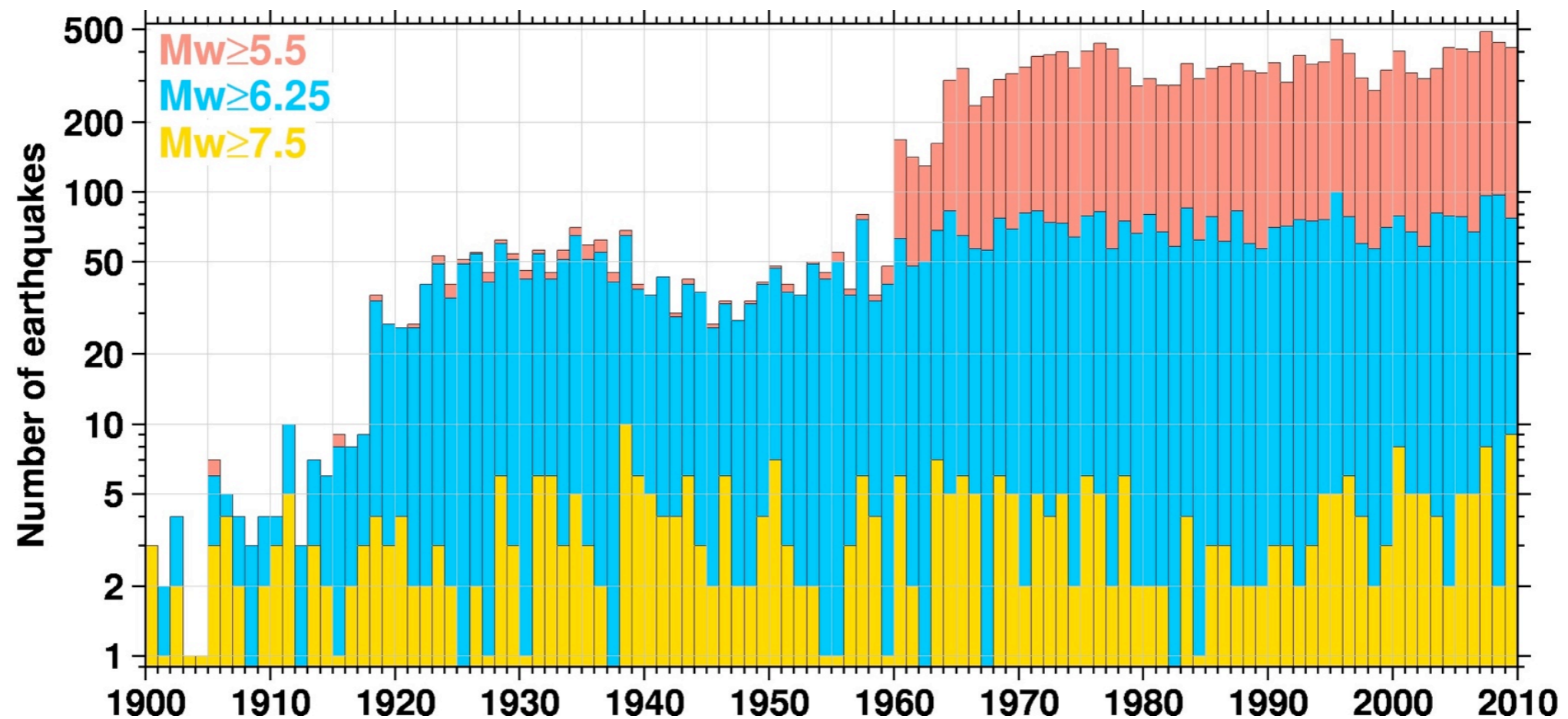


Source: R. Lacassin



Quand se produisent les séismes ?

Fréquence et période de retour



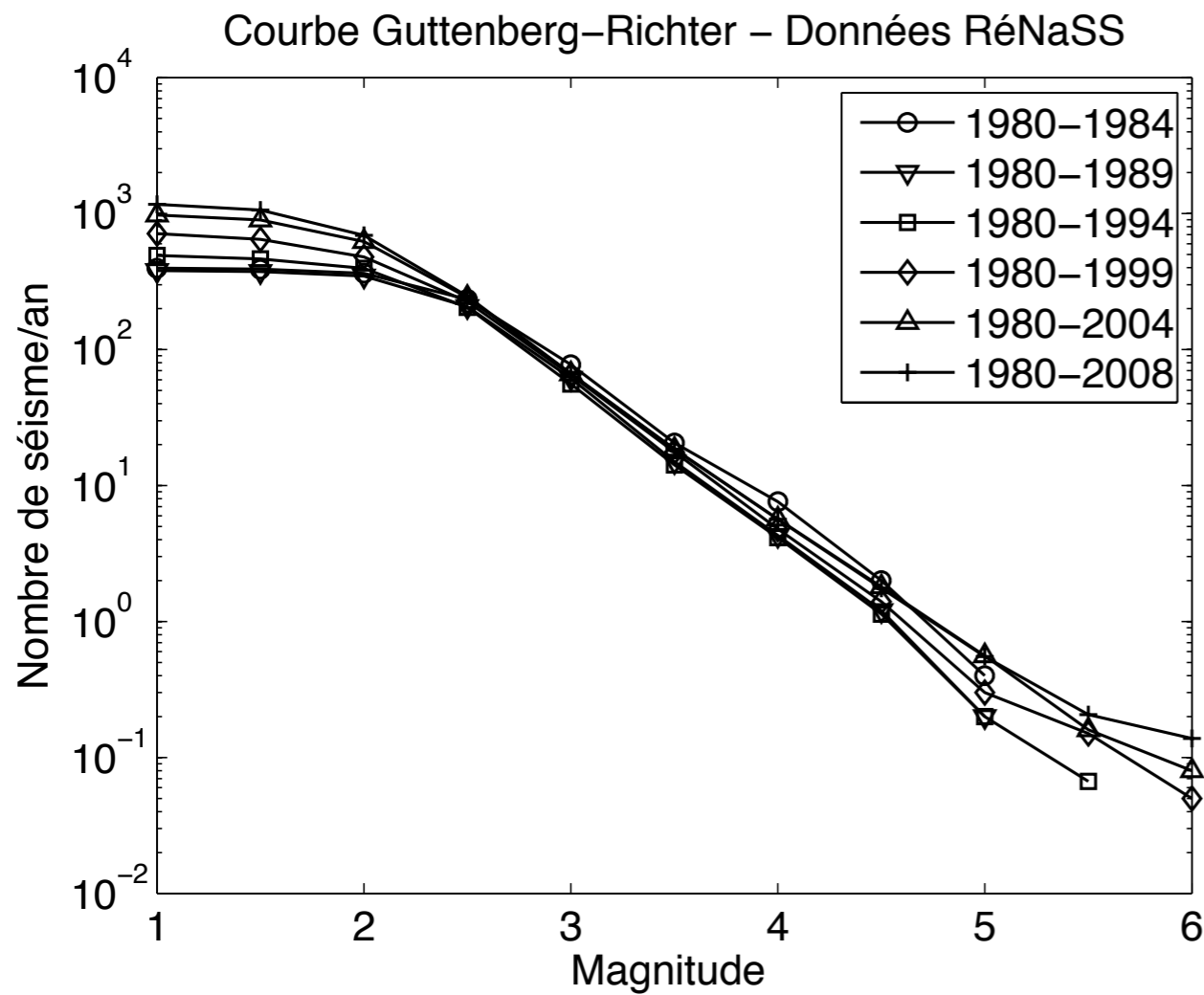
Monde

Source: ISC

- 3 000 séismes de $M > 2$ par jour
- 30 séismes de $M > 4$ par jour
- 1 séisme de $M > 6$ tous les 3 jours
- 1 séisme de $M > 7$ par mois
- 1 séisme de $M > 9$ tous les 10 ans

Quand se produisent les séismes ?

Avec quelle magnitude ?



France

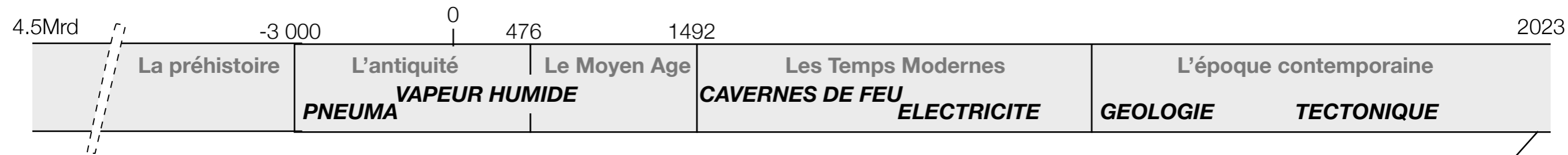
- 600 séismes de $M > 2$ par an
- 60 séismes de $M > 3$ par an
- 6 séismes de $M > 4$ par an
- 1 séisme de $M > 5$ tous les 10 ans
- 1 séisme de $M > 6$ tous les 100 ans

Sud-Est

- 300 séismes de $M > 1$ par an
- 30 séismes de $M > 2$ par an
- 3 séismes de $M > 3$ par an
- 1 séisme de $M > 4$ tous les 3 ans
- 1 séisme de $M > 5$ tous les 30 ans
- 1 séisme de $M > 6$ tous les 300 ans

A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ?

Courbe d'aléa sismique



- On suppose qu'on installe une station sismologique sur un site pendant 10 000 ans
- A partir des données enregistrées pendant 10 000 ans, on calcule le nombre de fois où chaque valeur du mouvement du sol est atteinte ou dépassée (en supposant qu'elle se produit au moins une fois sur 10 000 ans)
- Le résultat est appelé **une courbe d'aléa**

1906 - Rebond élastique (Pr Reid)

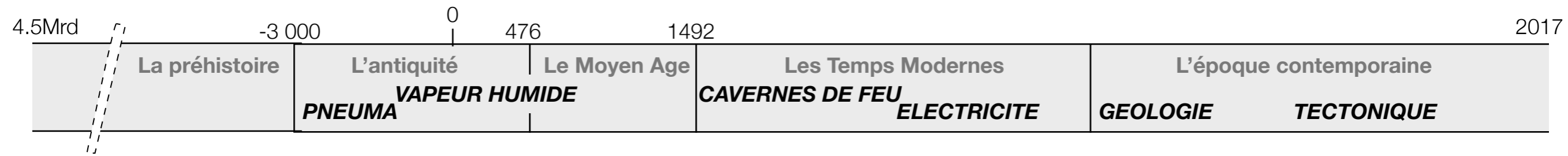
1912 - A. Wegener

1960: premier réseau de surveillance globale

1962-Tectonique des plaques (H Hess - R. Deitz)

A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ?

Identifier tous les séismes (longue période de retour) pouvant se produire

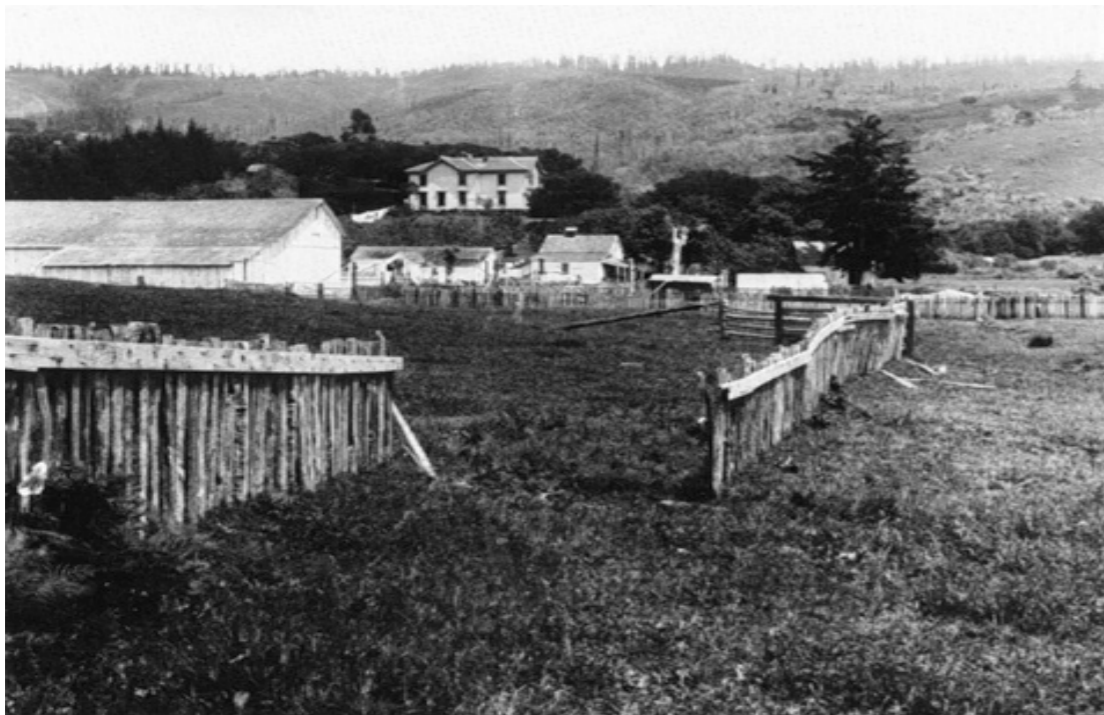


1 000 000 années

Paléosismicité

A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ?

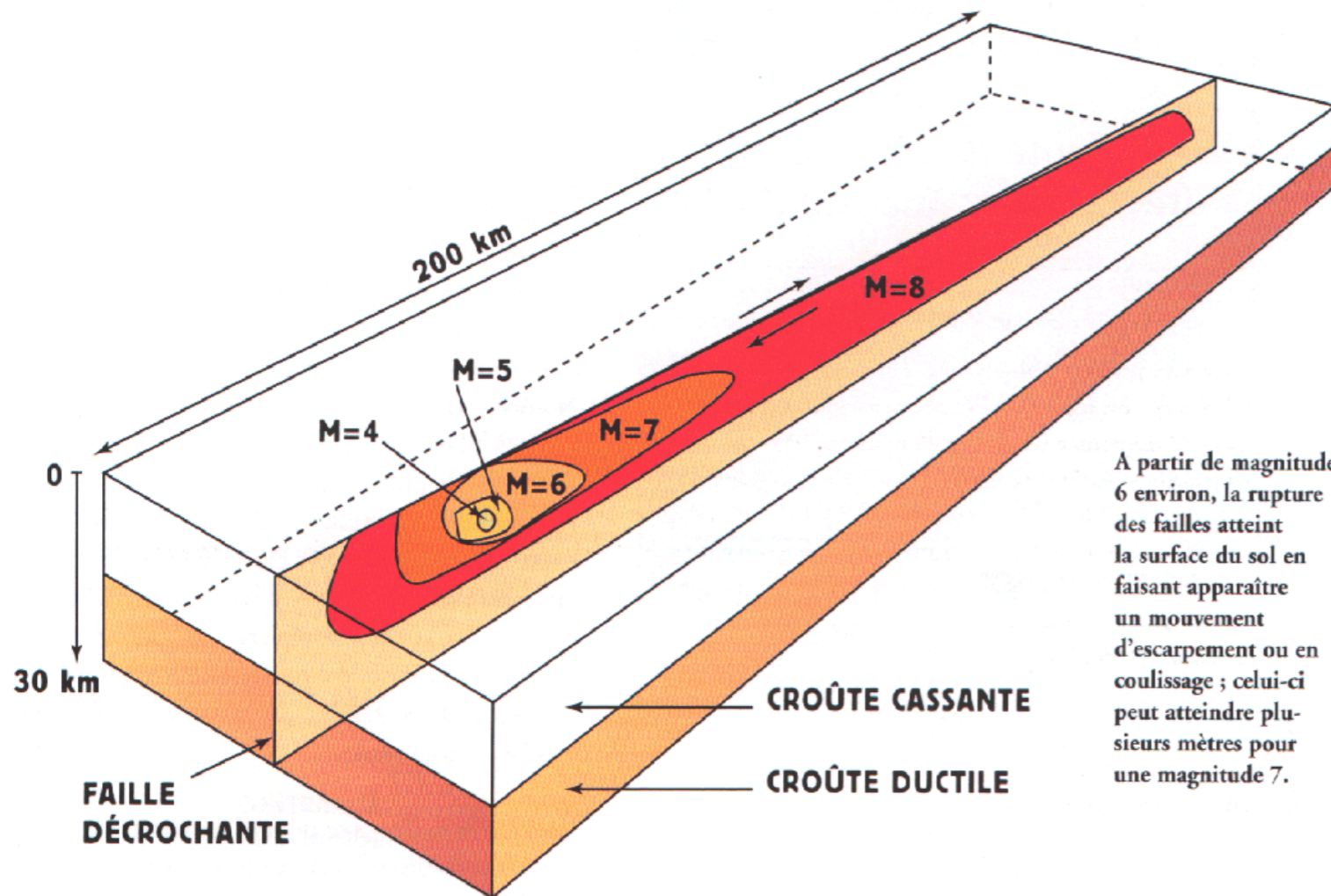
Identifier tous les séismes (longue période de retour) pouvant se produire



A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ?

Identifier tous les séismes (longue période de retour) pouvant se produire

MAGNITUDE ET SURFACE DE RUPTURE



A partir de magnitude 6 environ, la rupture des failles atteint la surface du sol en faisant apparaître un mouvement d'escarpement ou en coulissage ; celui-ci peut atteindre plusieurs mètres pour une magnitude 7.

Magnitude / glissement
Magnitude / longueur de faille

Magnitude / glissement

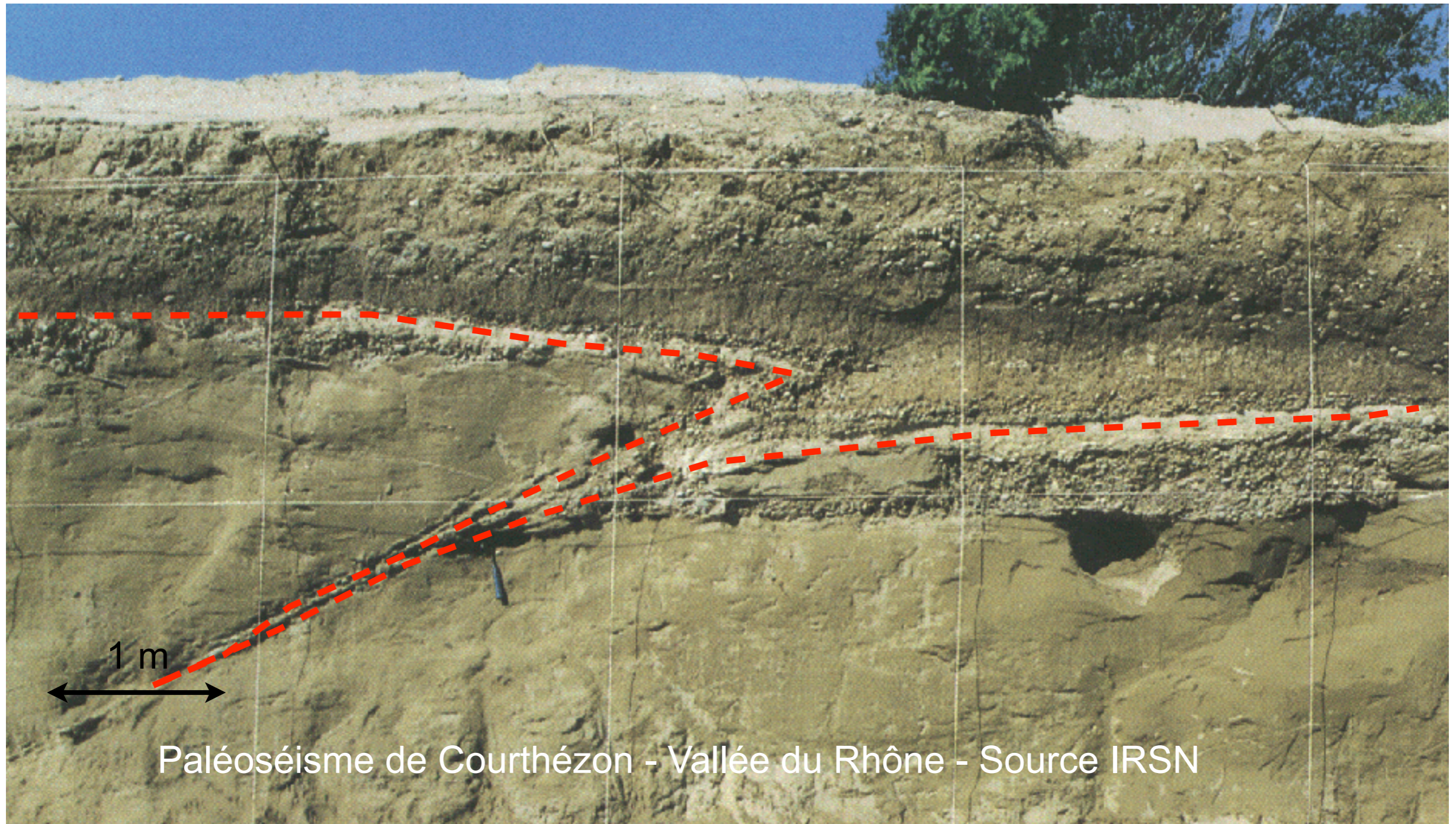
M = 2 : glissement de 0,2 cm
M = 4 : glissement de 2 cm
M = 6 : glissement de 20 cm
...
M = 9 : glissement de 20 m

Magnitude / longueur de faille

M = 2 : rupture de 100 m
M = 4 : rupture de 1 km
M = 6 : rupture de 10km
....
M = 9 : rupture de 1000km

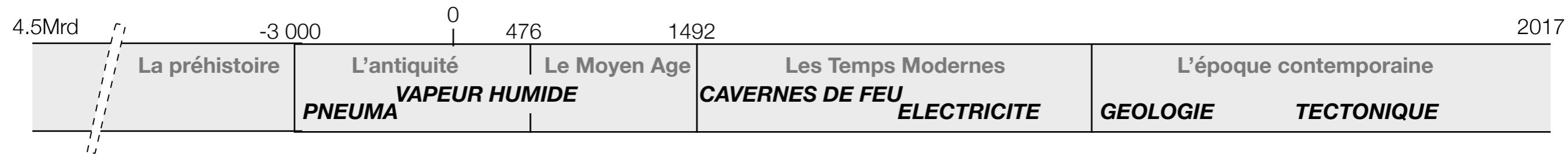
A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ?

Identifier tous les séismes (longue période de retour) pouvant se produire



A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ?

Identifier tous les séismes (longue période de retour) pouvant se produire



1 000 000 années

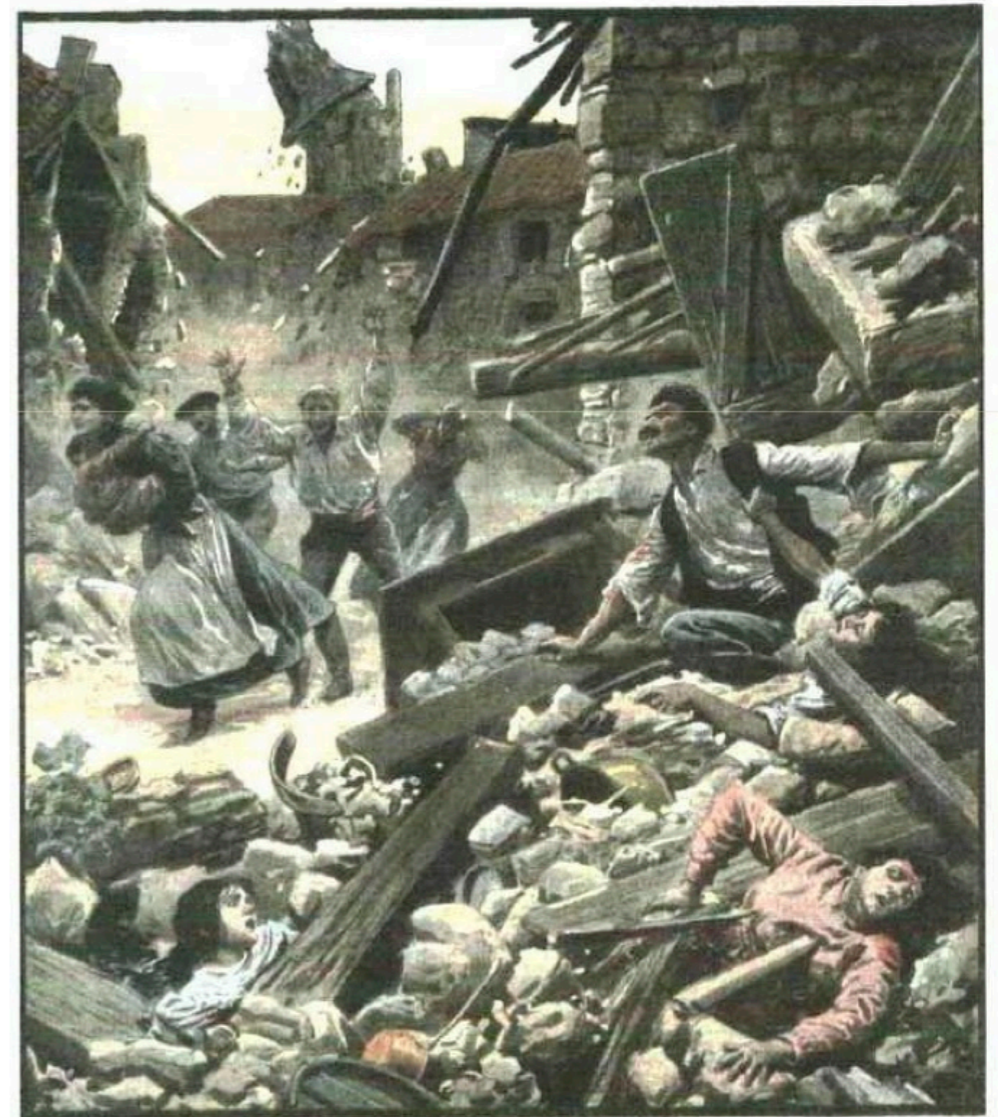
Paléosismicité

1 000 années

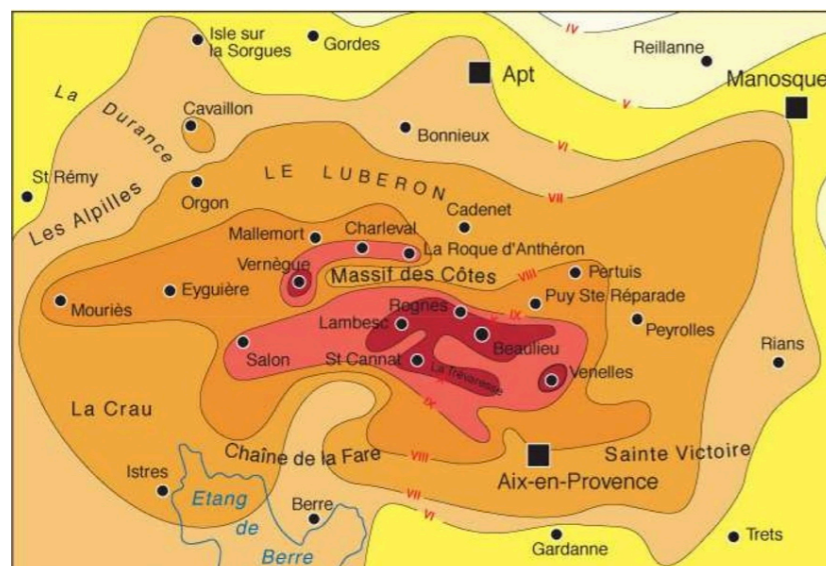
Sismicité historique

A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ?

Identifier tous les séismes (longue période de retour) pouvant se produire



LE TREMBLEMENT DE TERRE DU MIDI

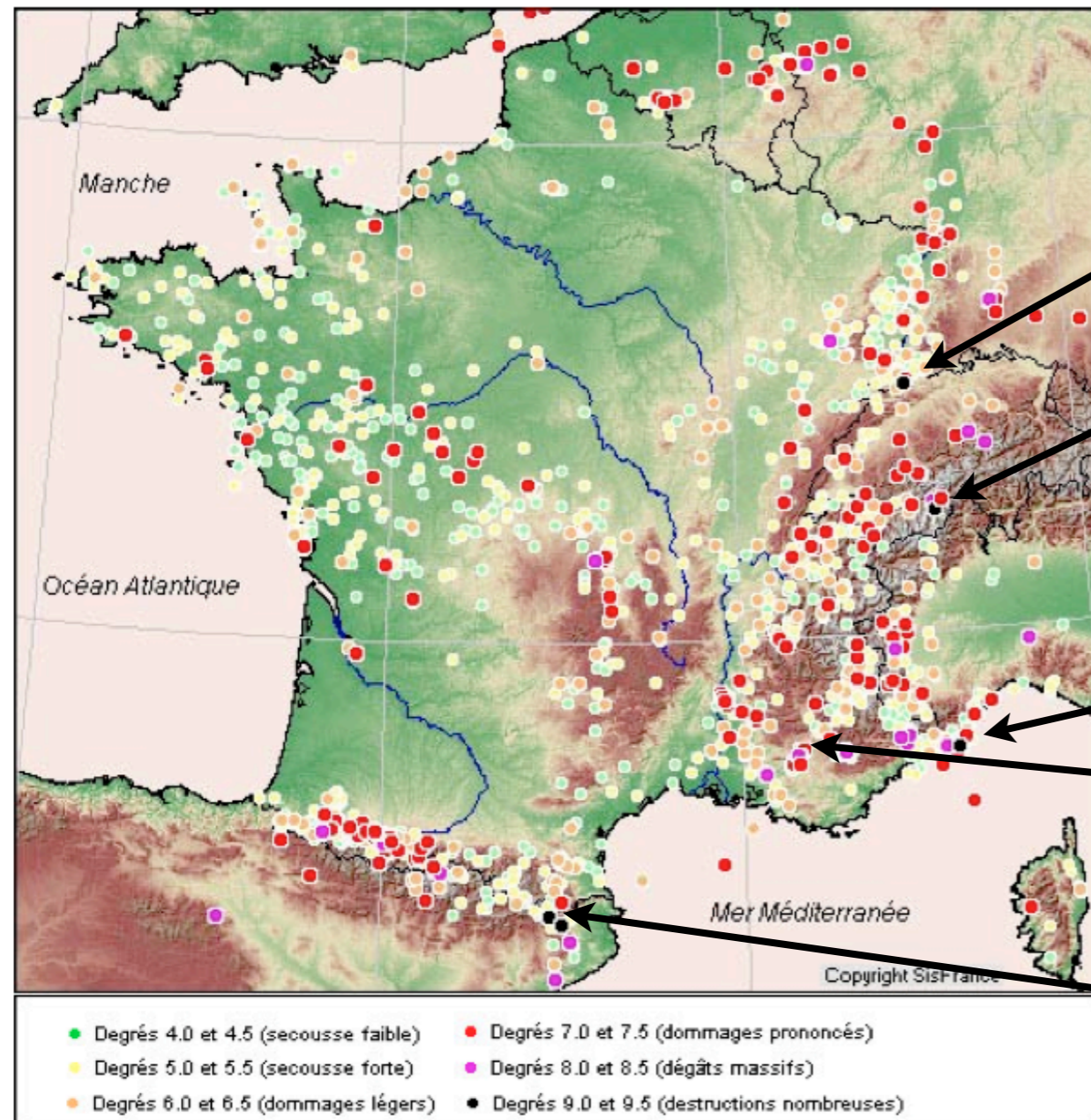


A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ?

Identifier tous les séismes (longue période de retour) pouvant se produire

Sismicité historique de la France. Carte des épicentres des séismes les mieux connus (1300-2003) figurant dans la banque de données SisFrance. www.sisfrance.net

1000 ans de sismicité en France



Séisme de Bâle 1356

Séisme du Valais 1855

Séisme Ligure 1887 (10aine de morts)

Séisme de Lambesc 1909 (42 morts)

Séisme de Catalogne 1428

A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ?

Identifier tous les séismes (longue période de retour) pouvant se produire



1 000 000 ans

Paléosismicité

1 000 ans

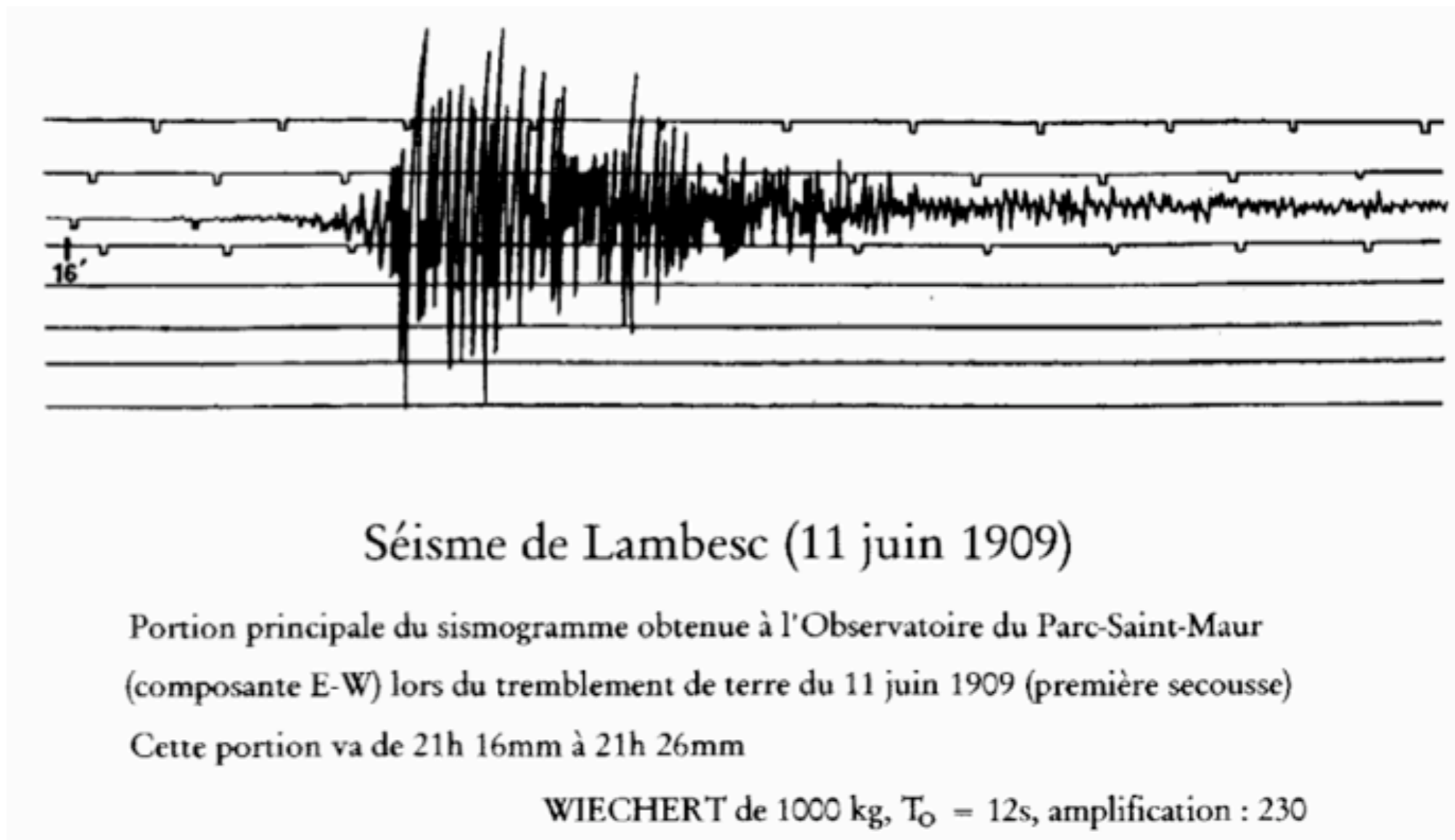
Sismicité historique

70 ans

Sismicité instrumentale

A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ?

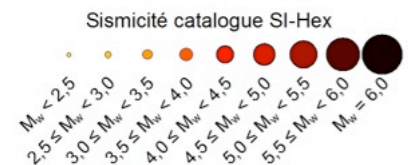
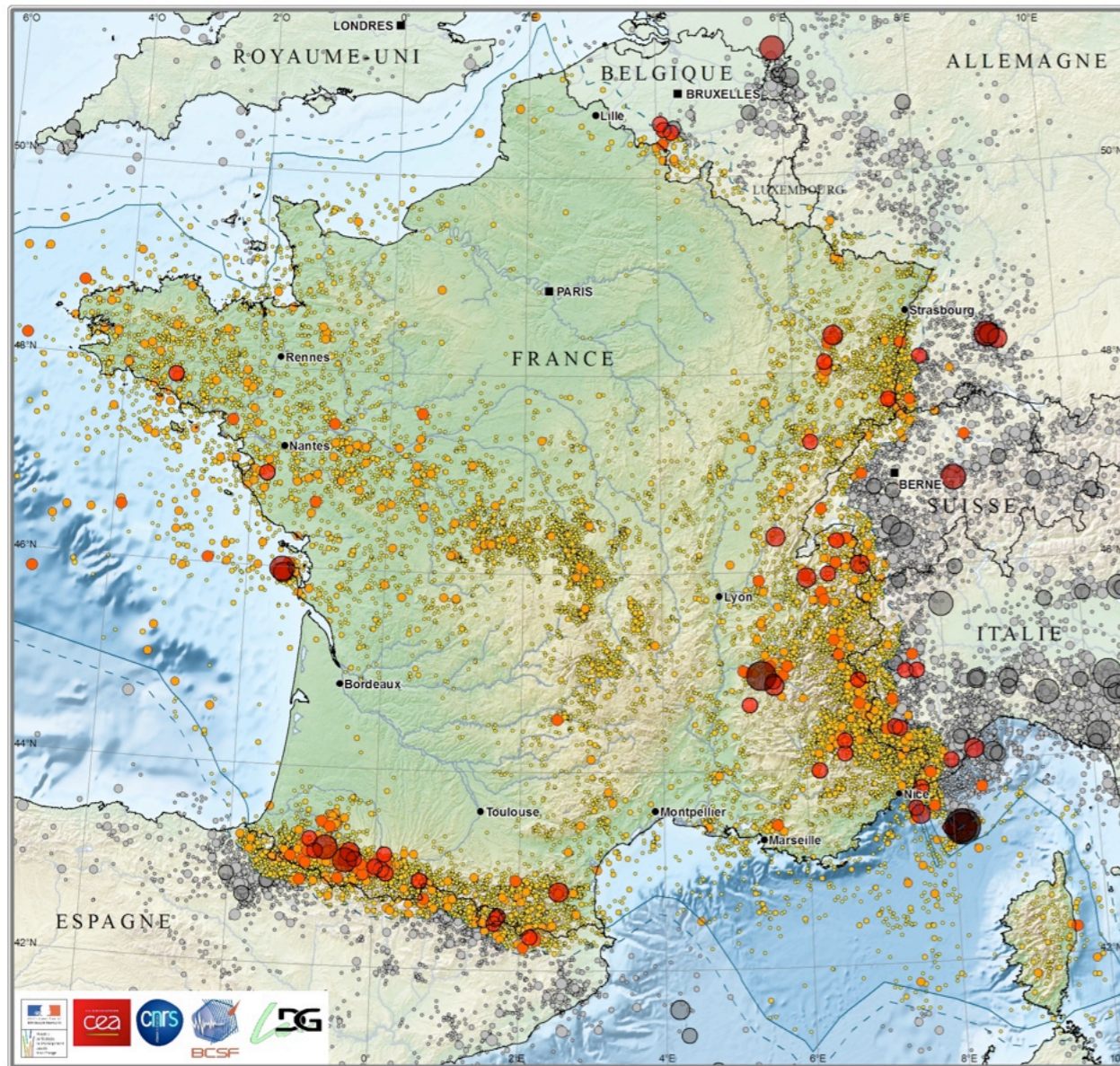
Identifier tous les séismes (longue période de retour) pouvant se produire



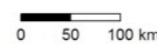
A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ?

Identifier tous les séismes (longue période de retour) pouvant se produire

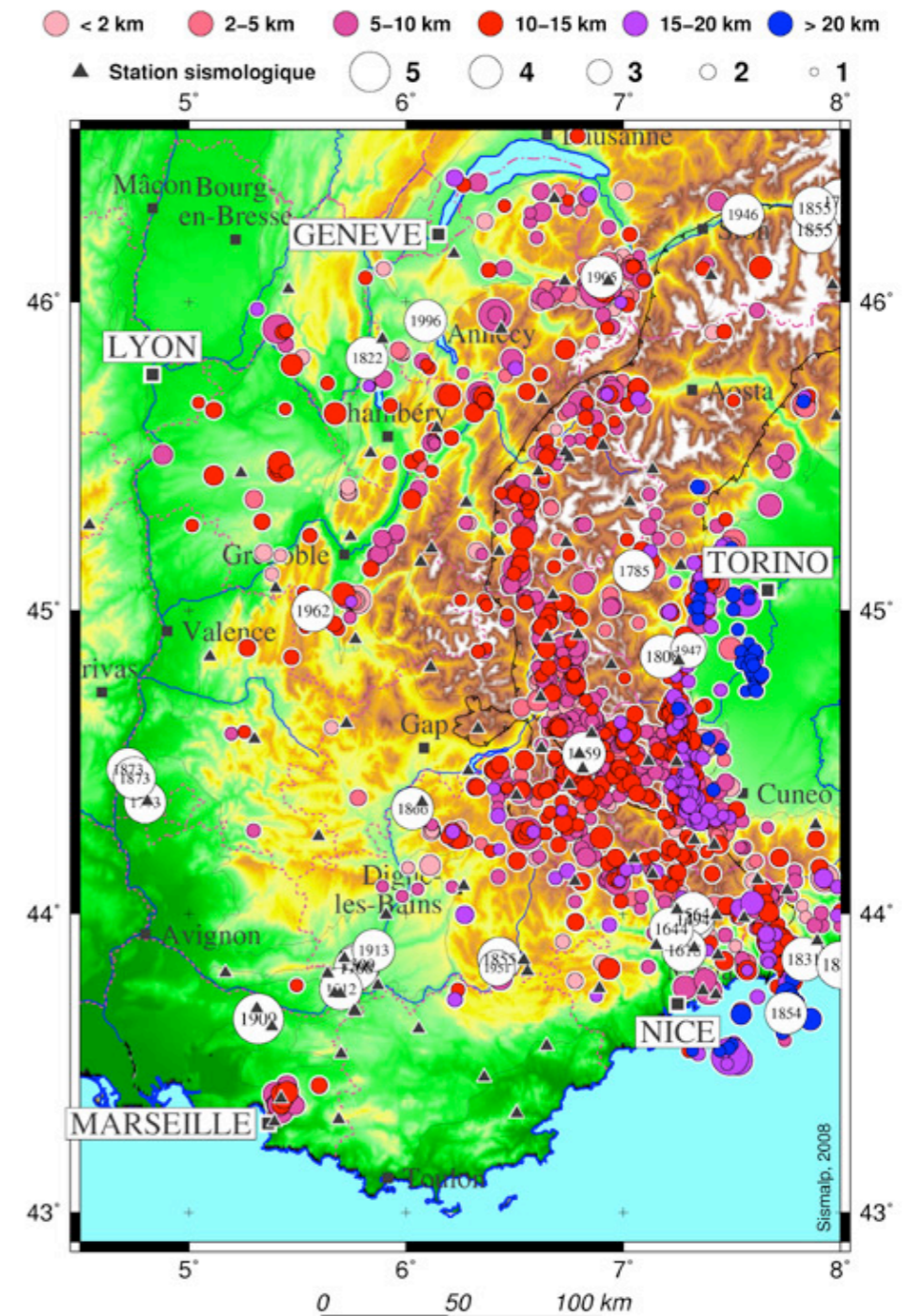
Sismicité instrumentale de la France (SiHEX)
1962 - 2009



En couleur : épicentres des séismes d'origine naturelle dans la zone SI-Hex (France métropolitaine et zone économique exclusive en mer (ZEE), avec élargissement de 20 km), ainsi que les séismes ressentis en France avec une intensité EMS-98 \geq IV (BCSF). En grisé : épicentres des séismes hors zone pour lesquels une magnitude M_w a été calculée dans le cadre du projet SI-Hex.

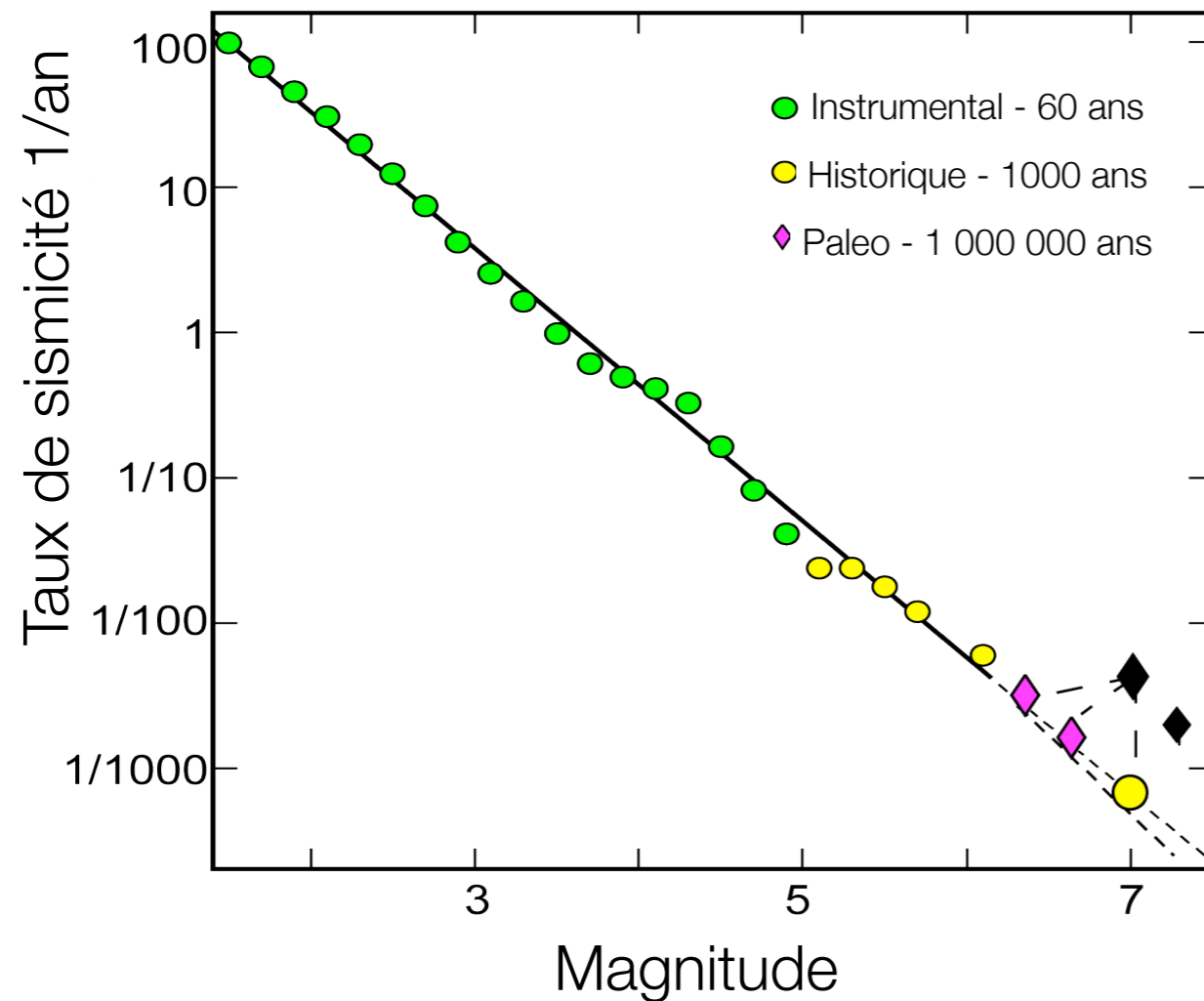


SISMalp
1989 - 2009



A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ?

Identifier tous les séismes (longue période de retour) pouvant se produire



$$\lambda_M = \lambda_0 e^{-\beta M}$$

Taux d'occurrence annuel des séismes de magnitude supérieure à M

Stein & Newman, 2004

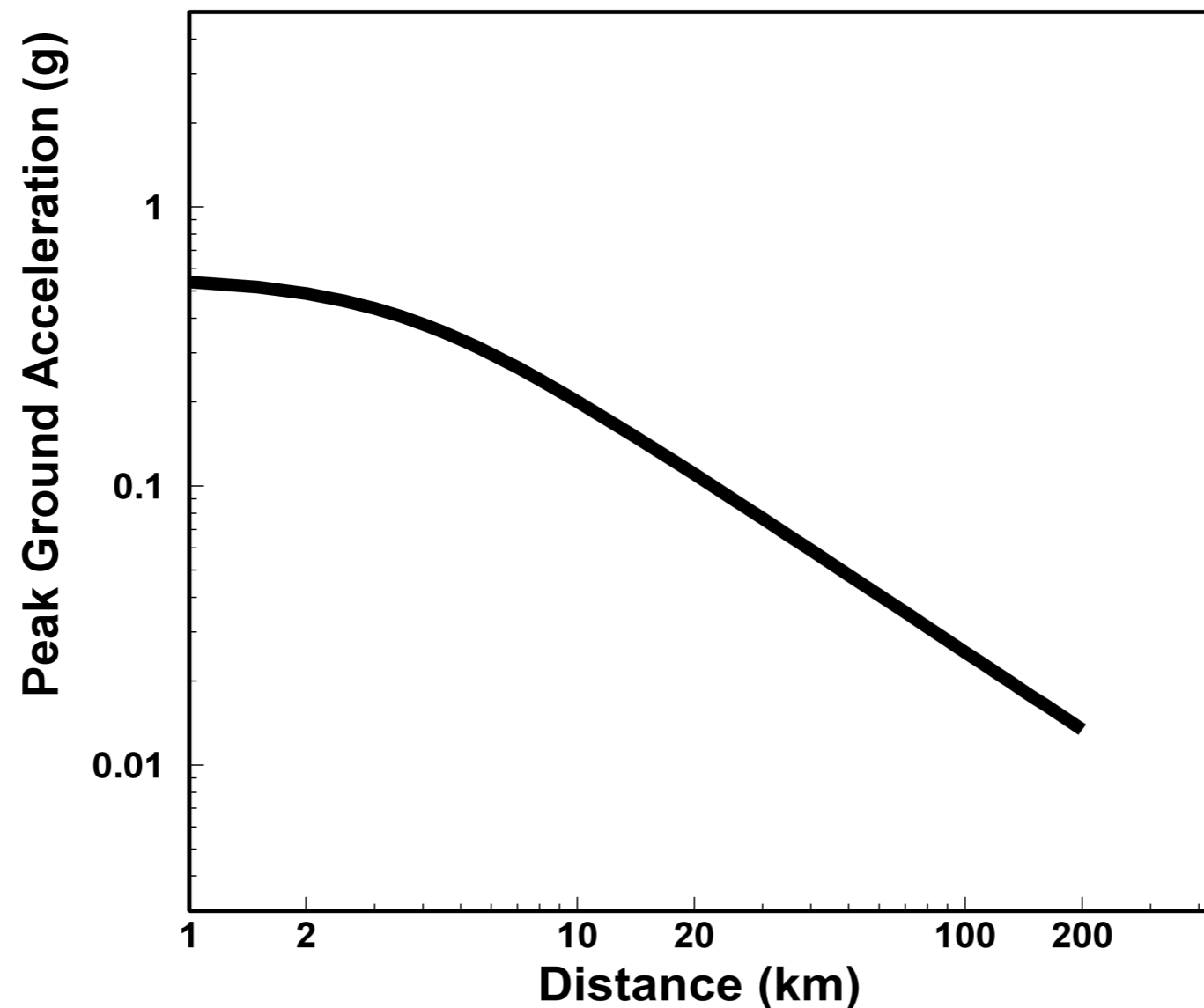
A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ?
Quelles vibrations du sol peuvent être générées?



Séisme du Népal, 2015

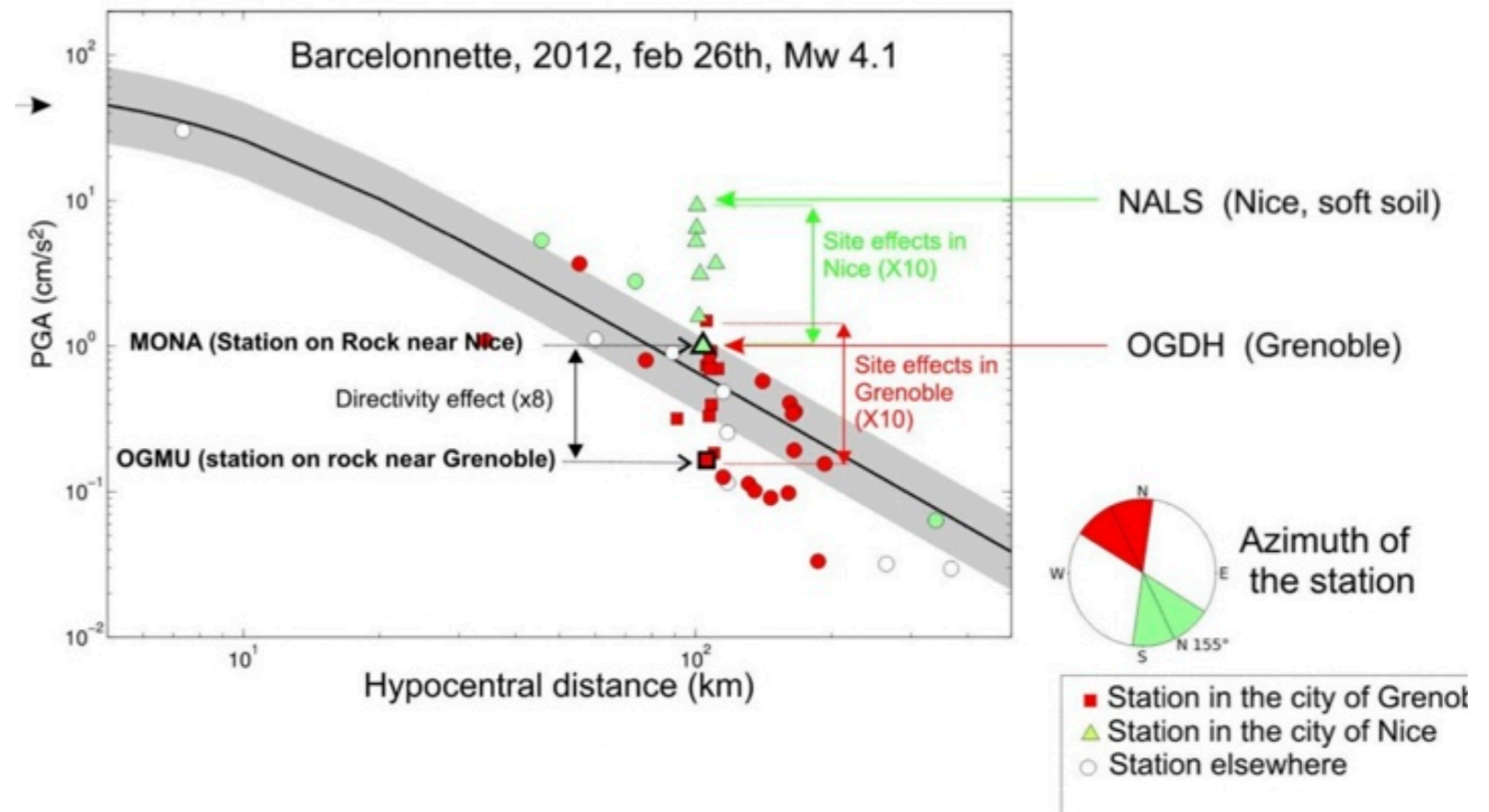
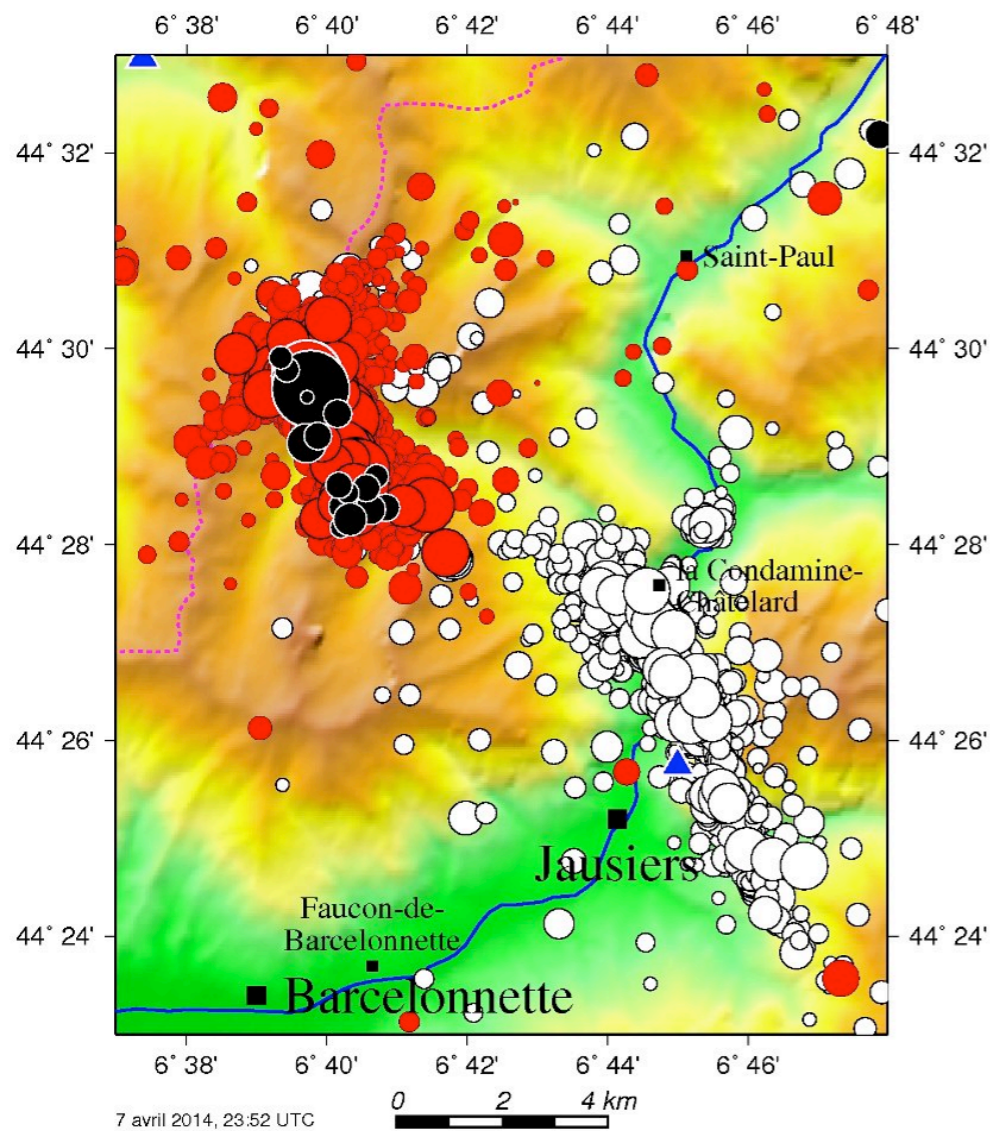
A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ? Quelles vibrations du sol peuvent être générées?

Prédiction du PGA en un site rocheux pour un séisme
 M_s 6.5 earthquake
(Ambraseys et al., 1996)



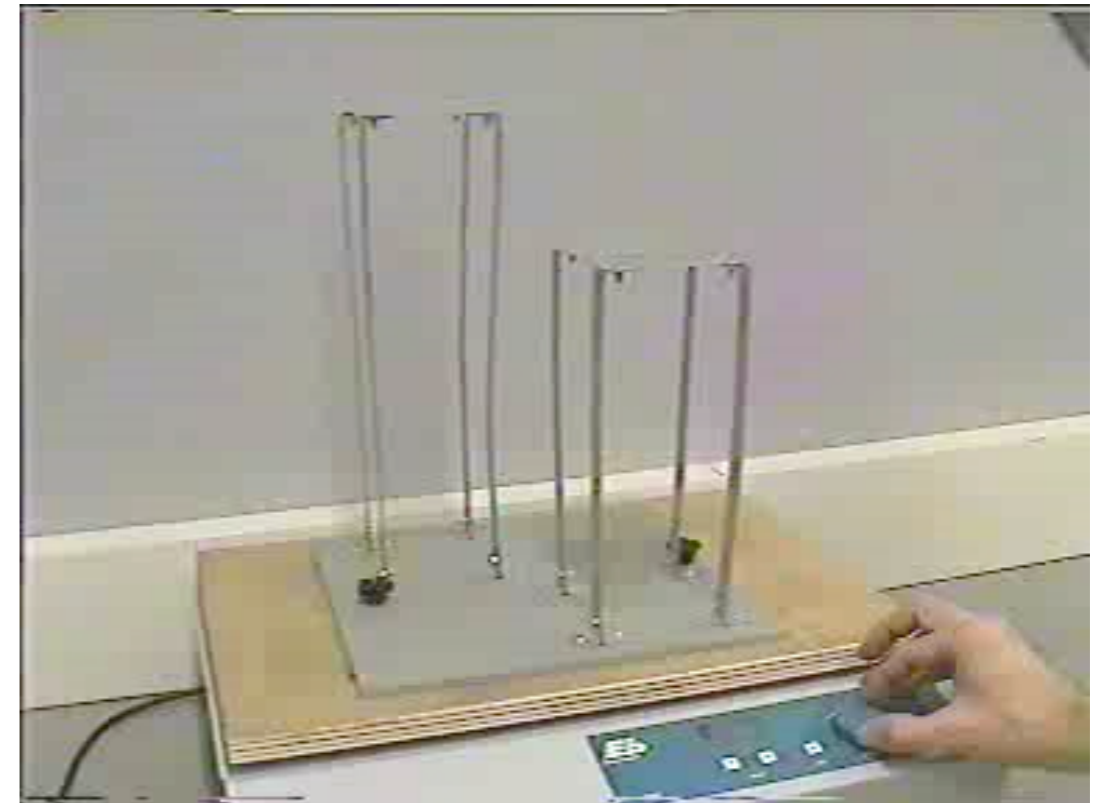
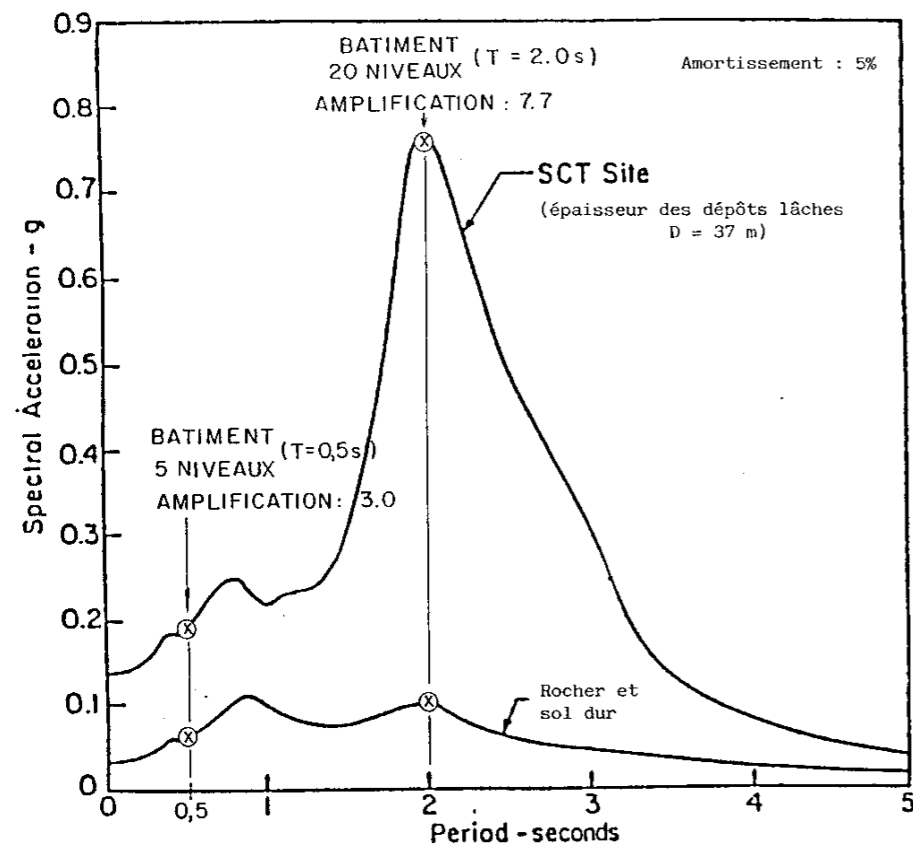
A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ?

Quelles vibrations du sol peuvent être générées ?



A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ? Quelles vibrations du sol peuvent être générées?

Séisme de Mexico - 1985



A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ?

Quelles vibrations du sol peuvent être générées?

“Probabilisons” les aléas naturels: exemple de la crue centennale

La probabilité est un nombre entre 0 et 1.

La probabilité peut s'exprimer de différentes façons:

- comme un nombre: la probabilité est 0.2
- comme un pourcentage: il y a 20% de chance
- comme un rapport: le rapport est de 1/5

Une distribution de probabilité attribue un état ou une probabilité d'être dans un état d'une quantité ou d'un événement

La **crue centennale** est un événement qui a une **période de retour** de 100 ans.

Sa probabilité d'apparition (en terme de débit ou de hauteur d'eau) chaque année est donc 1/100.

A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ?

Quelles vibrations du sol peuvent être générées?

Des événements indépendants

Utilisation d'un modèle de probabilité

La loi de Poisson décrit le comportement du nombre d'événements se produisant dans un laps de temps fixé, si ces événements se produisent avec une fréquence moyenne connue et indépendamment du temps écoulé depuis l'événement précédent.

$$P=1-e^{-\lambda/T}$$

T= période de retour

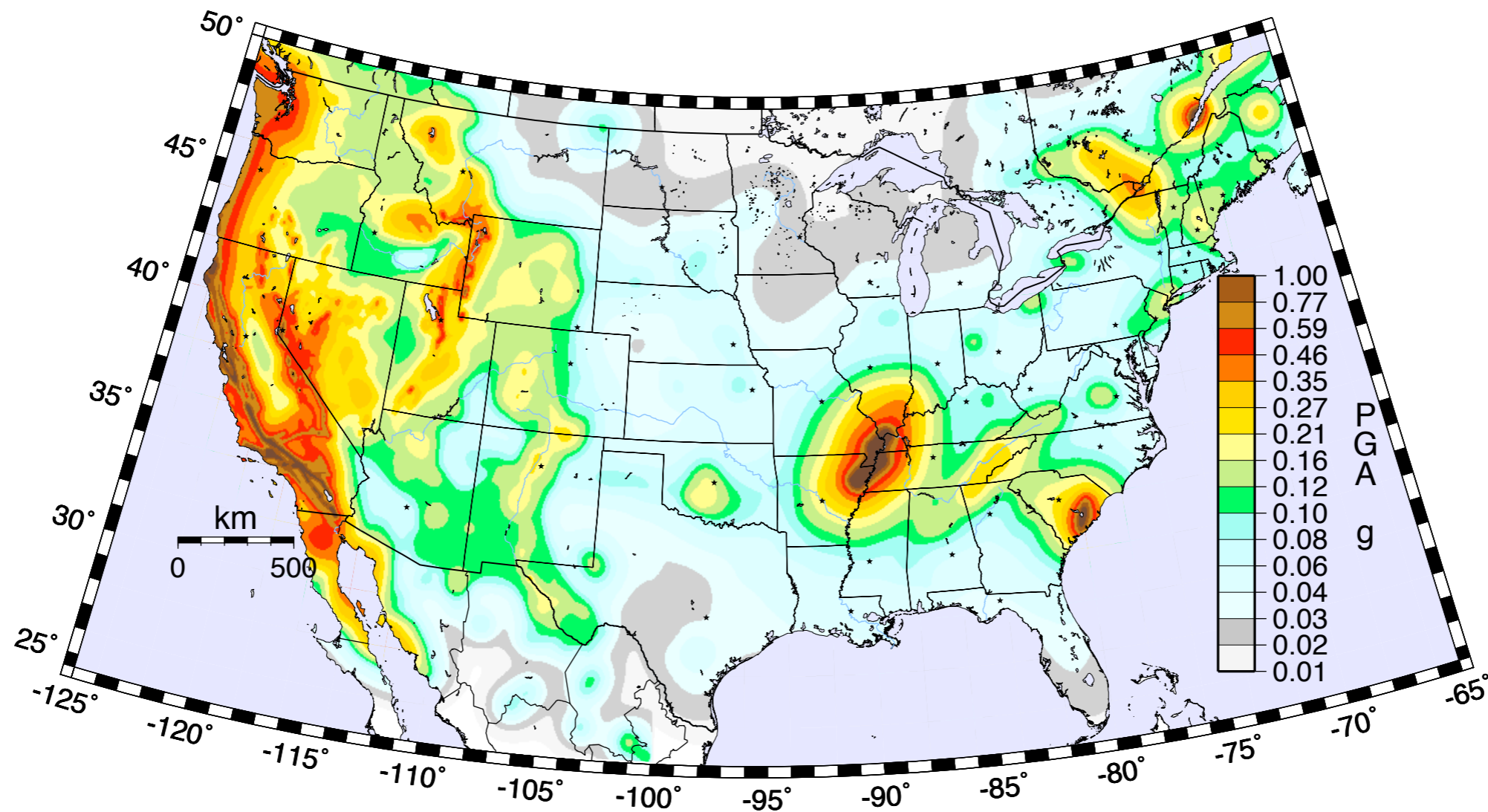
λ = durée d'observation (ou entre événement)

Exemple - Probabilité d'occurrence de la crue centennale par siècle = 0.63
(0.37 qu'elle ne se produise pas)

Sur 1 an: P=0.01 (0.99 qu'elle ne se produise pas)

A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ? Quelles vibrations du sol peuvent être générées?

PGA with 2% in 50 year PE. BC rock. 2008 USGS



$$\lambda[C > C^*] = \iint n(M, R) \Phi(C > C^* | C(M, R) \sigma_T) dM dR$$

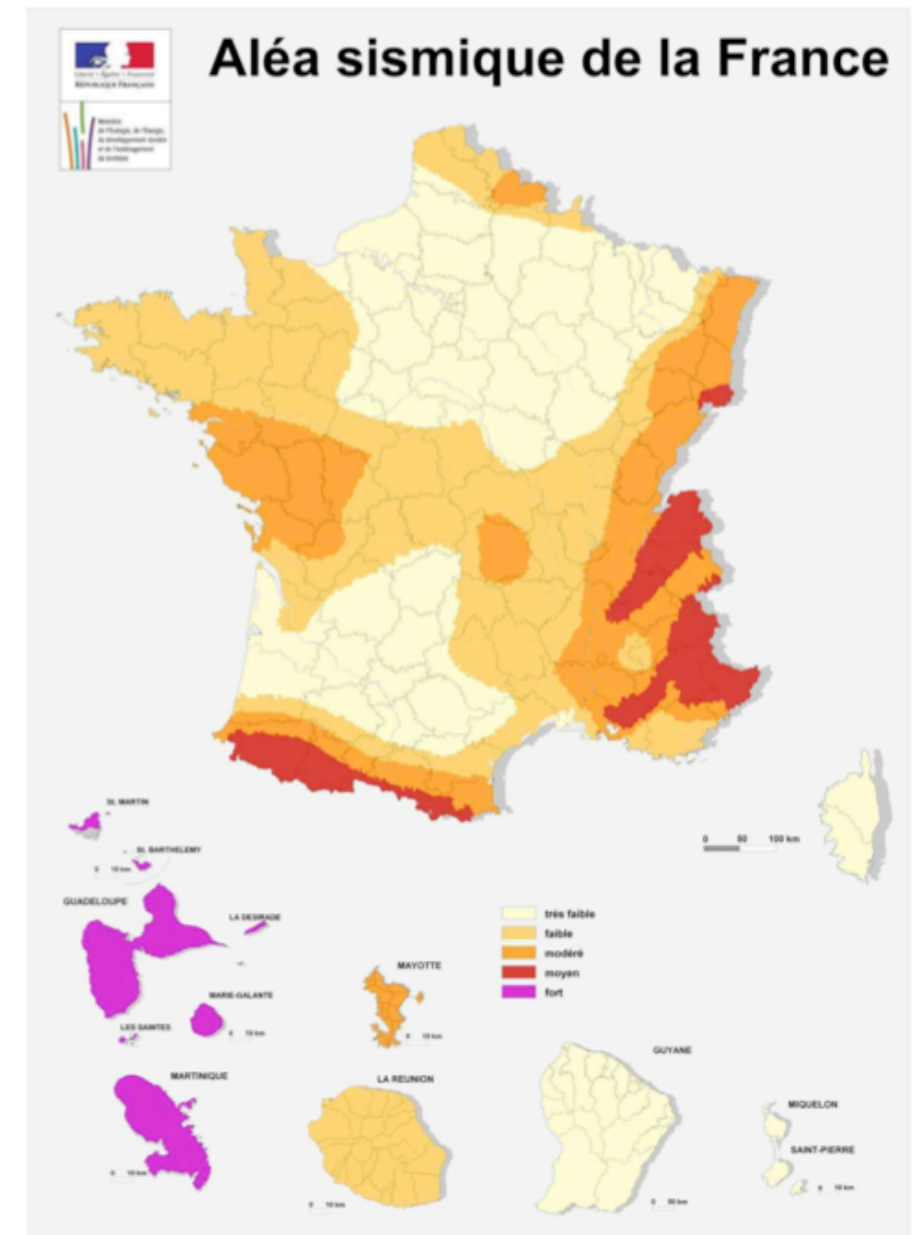
A quel niveau d'aléa sommes nous exposés ? Quelles vibrations du sol peuvent être générées?

La réglementation Française (EC8, 2011) impose pour le bâti courant :

$P (10\%) =$ risque accepté ou toléré

$t (50) =$ durée de vie d'un ouvrage à construire

Période de retour de 475 ans.



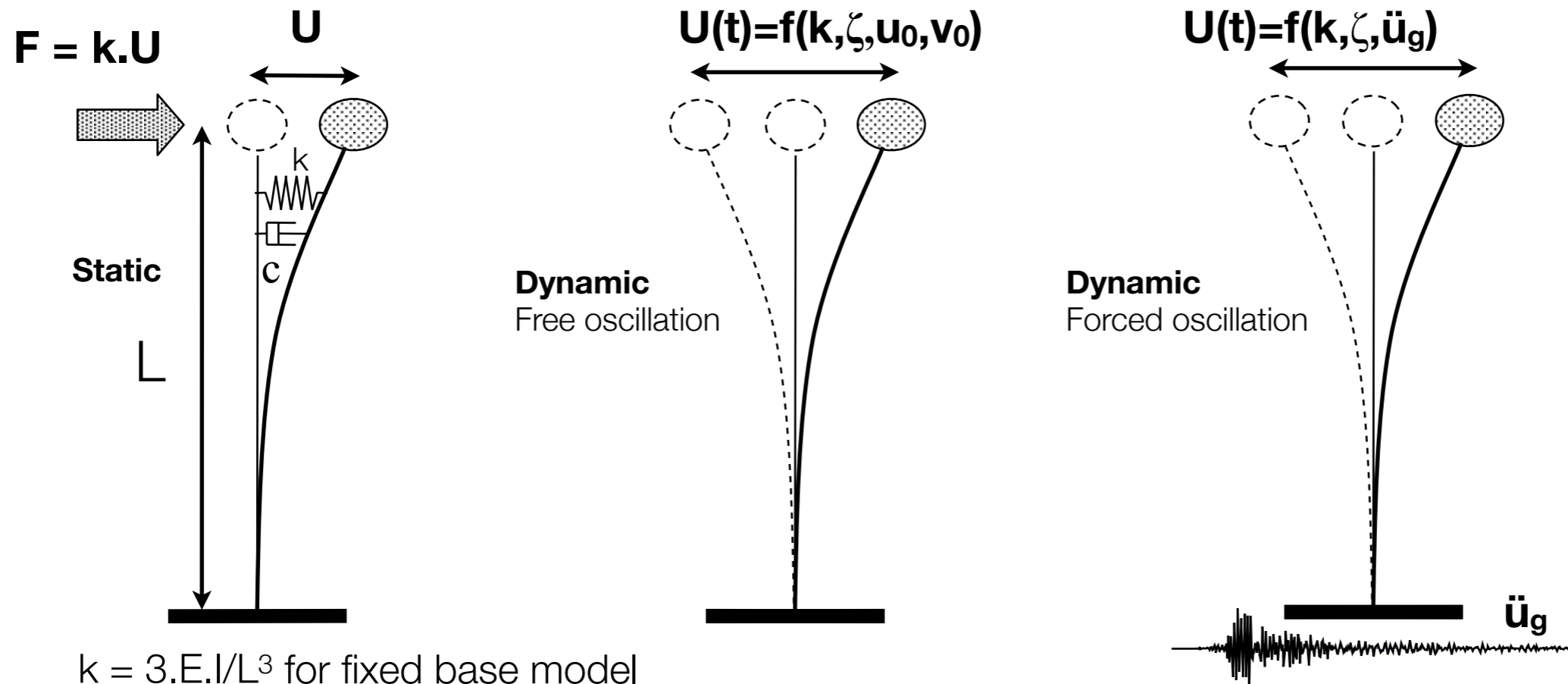
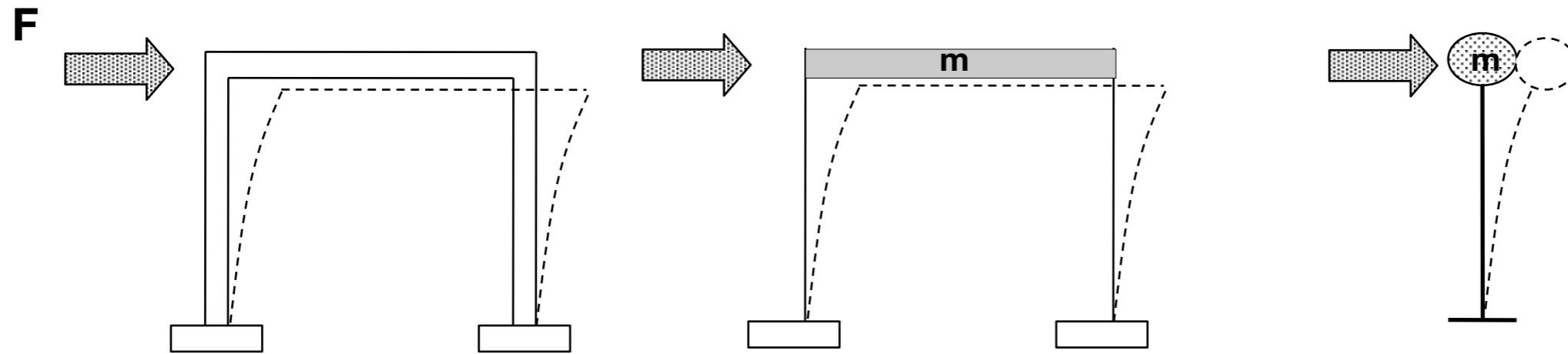
Quelles conséquences sont attendues ?

Vulnérabilité et conception parasismique



Quelles conséquences sont attendues ?

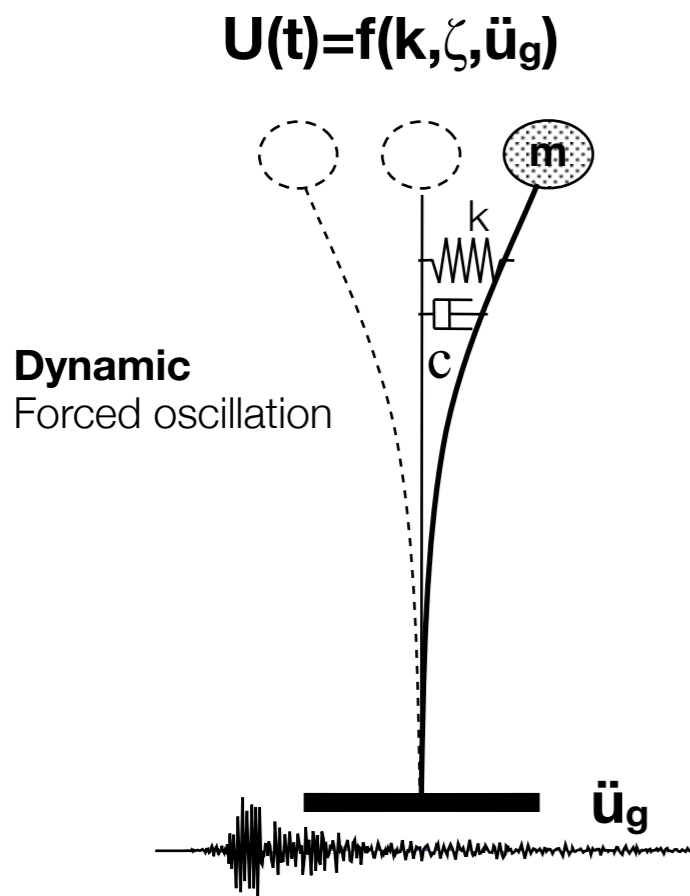
Dynamique des structures



$k = 3.E.I/L^3$ for fixed base model
(free-clamped beam)

Quelles conséquences sont attendues ?

Dynamique des structures



Equation de mouvement SDOF

-2nd Newton's law-

$$\sum F = F_k + F_c + F_m = 0$$

$$m(\ddot{u} + \ddot{u}_g) + c\dot{u} + ku = 0$$

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g$$

$$\ddot{u} + 2\zeta\omega_o\dot{u} + \omega_o^2u = -\ddot{u}_g$$

Réponse dynamique d'un SDOF

$$f_o = \frac{\omega_o}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$
$$\zeta_o = \frac{c}{2\omega_o m} = \frac{c}{2\sqrt{km}}$$

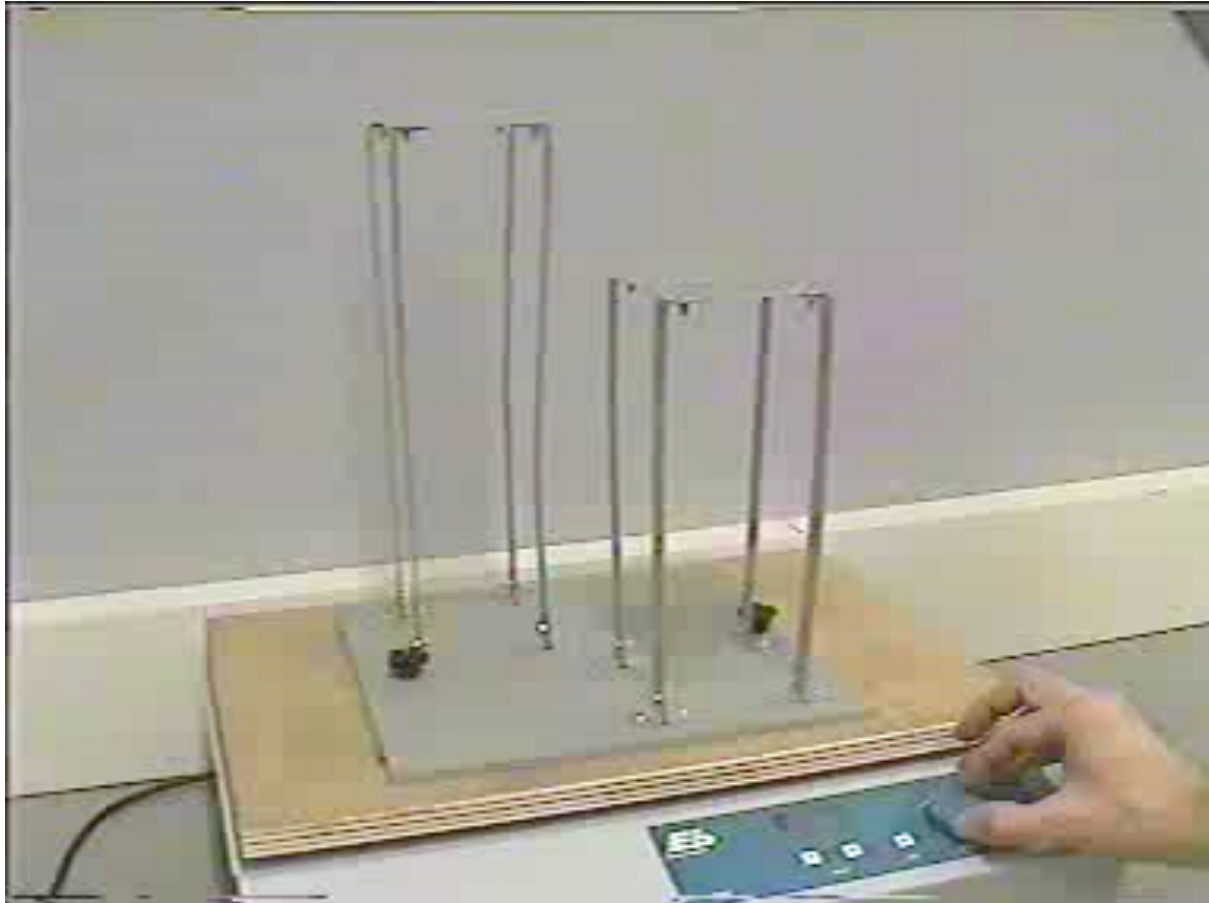
fréquence de résonance

Amortissement

Quelles conséquences sont attendues ?

Dynamique des structures

Nombre d'étages



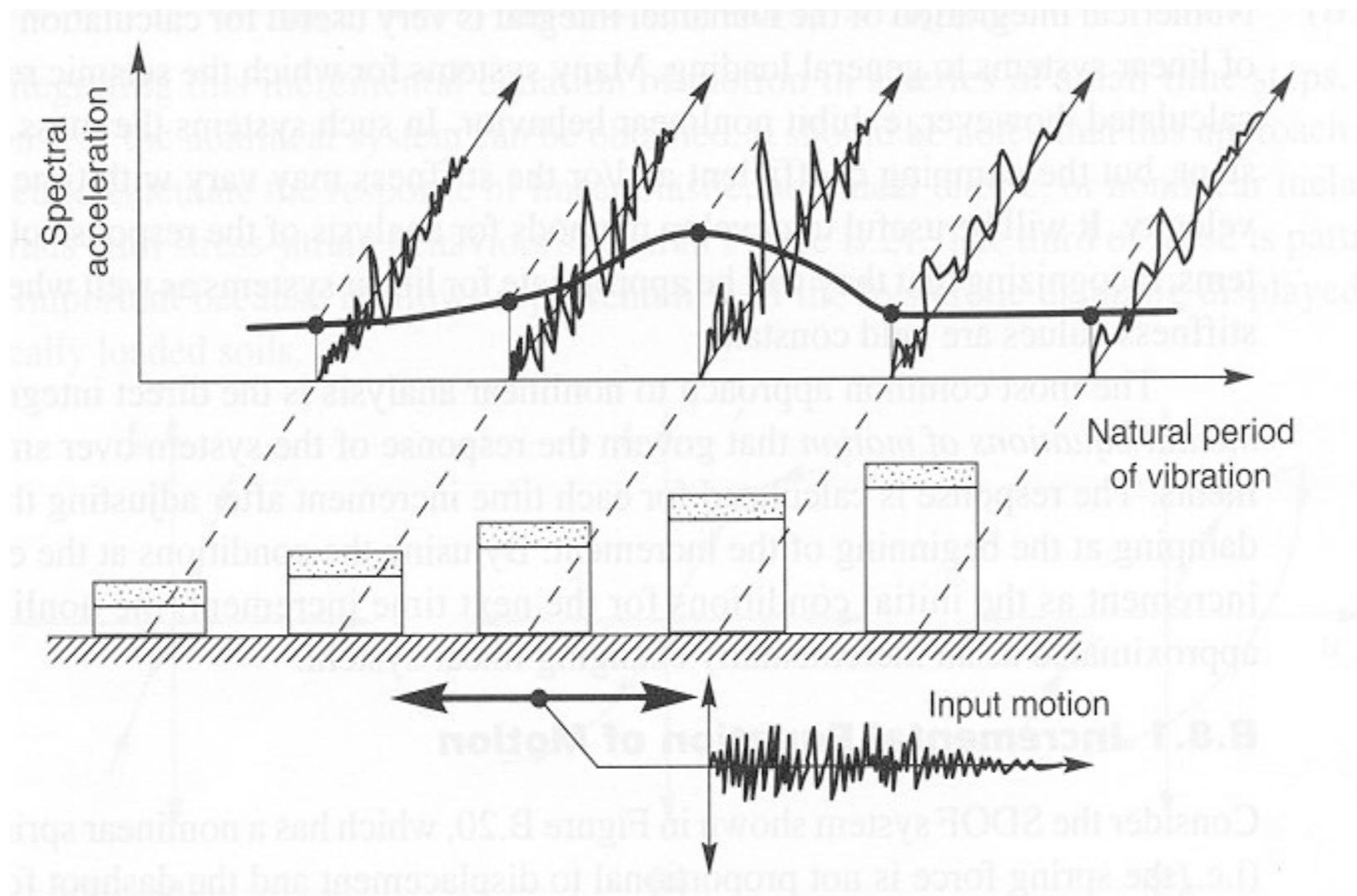
Matériaux



Quelles conséquences sont attendues ?

Spectre de réponse

Rechercher la réponse de la structure en déplacement, vitesse ou accélération par la méthode du spectre de réponse.

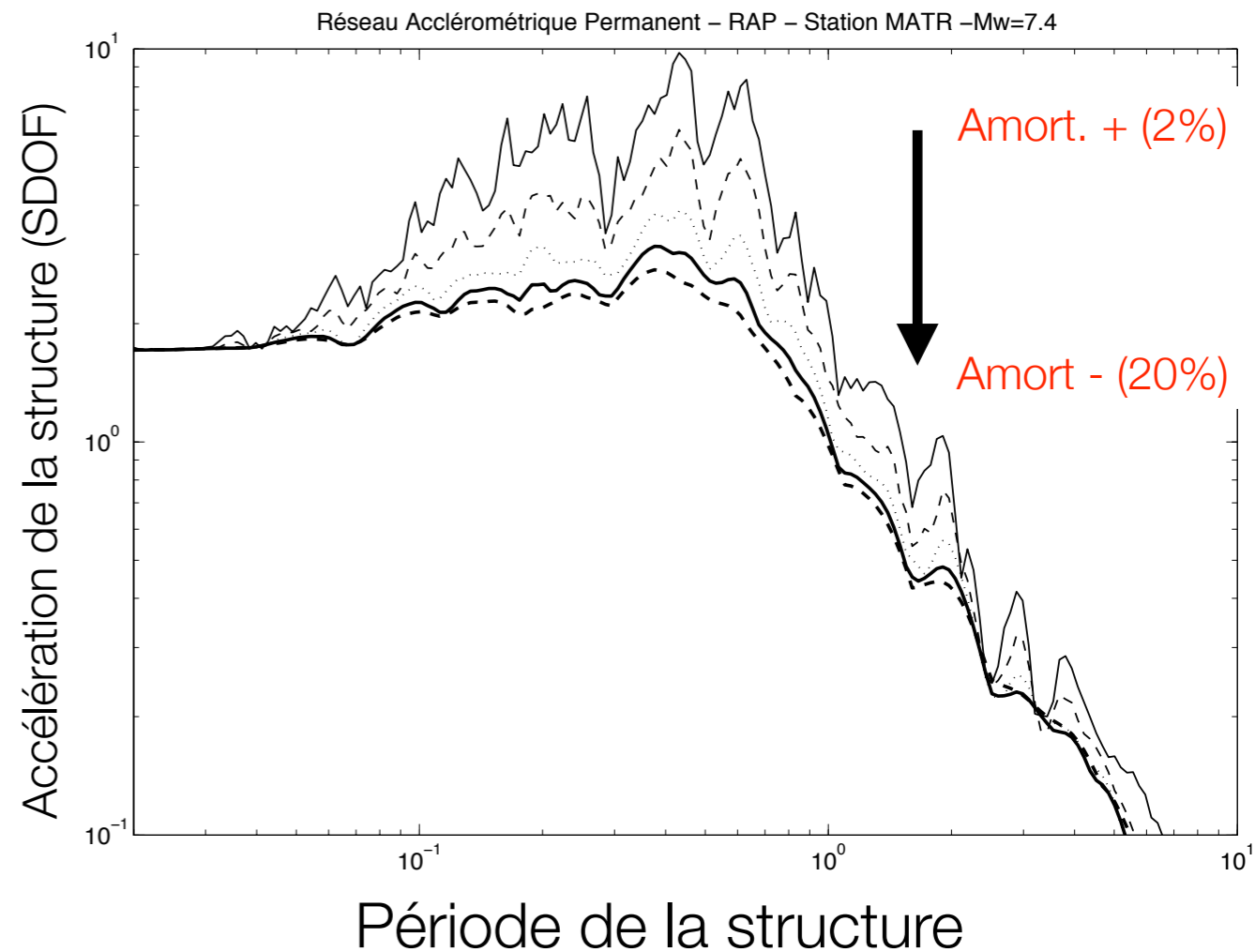
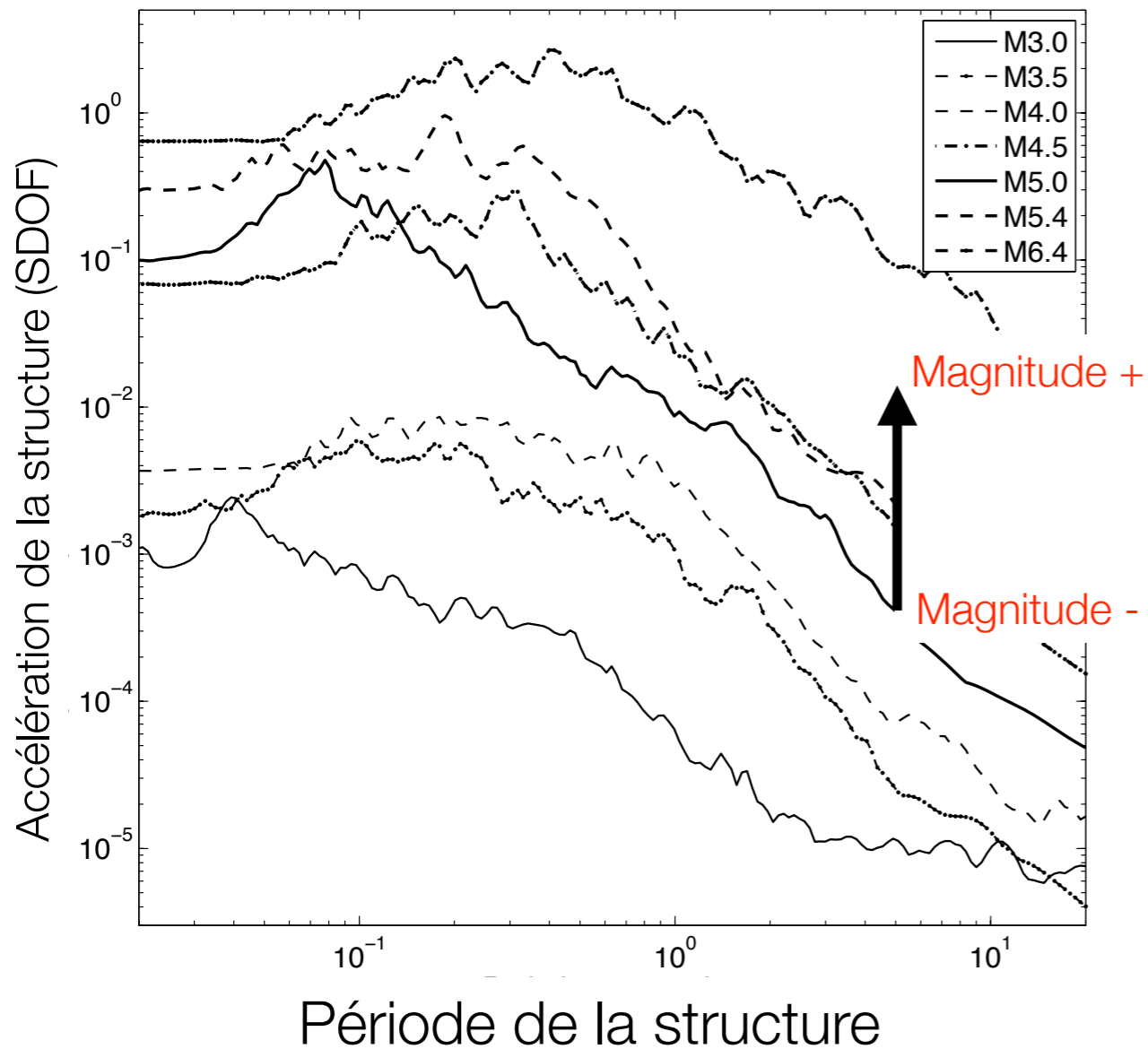


Accélération maximale de l'oscillateur à 1-DDL soumis à un séisme=utilisation de l'intégrale de Duhamel

Quelles conséquences sont attendues ?

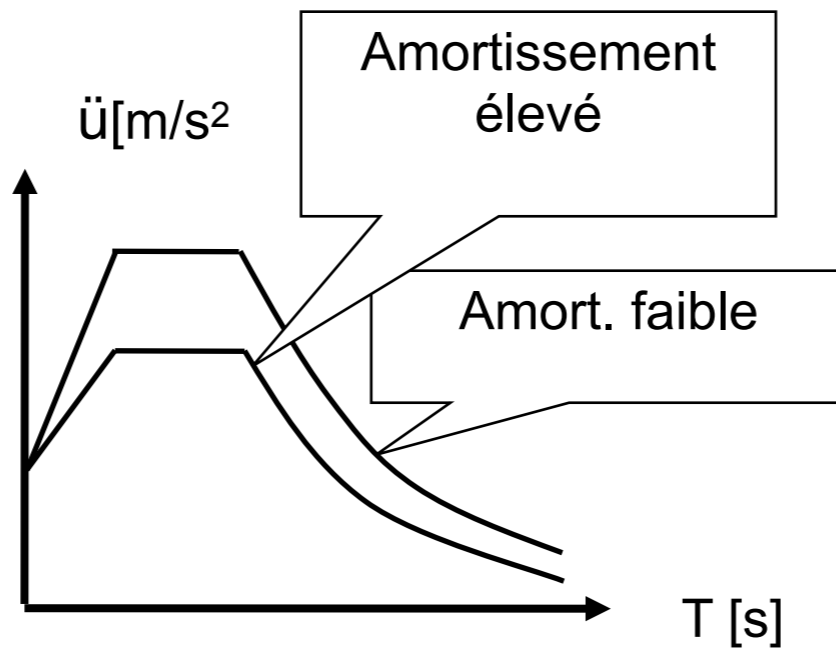
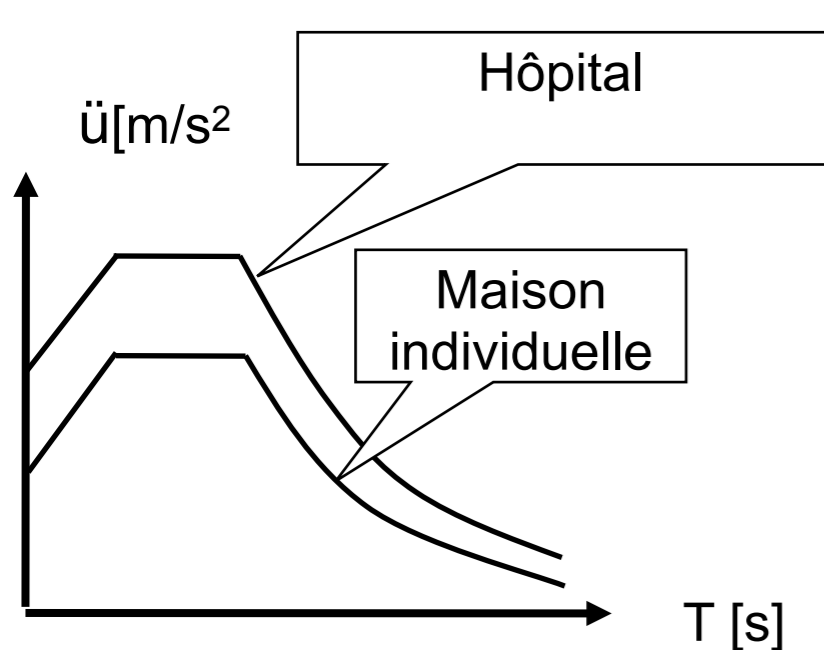
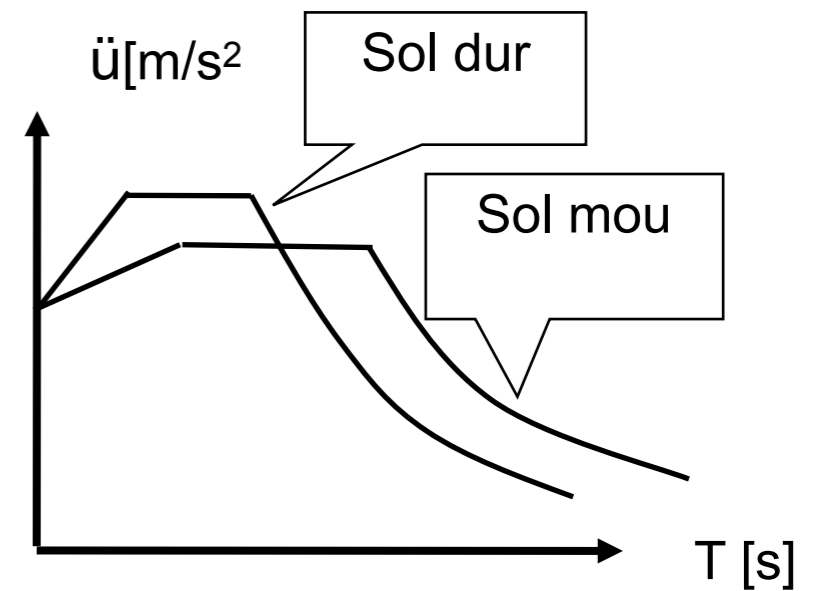
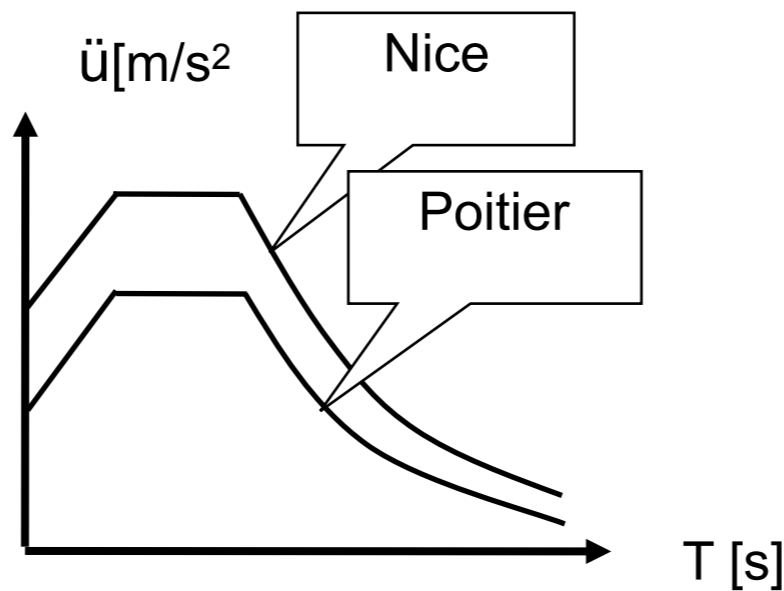
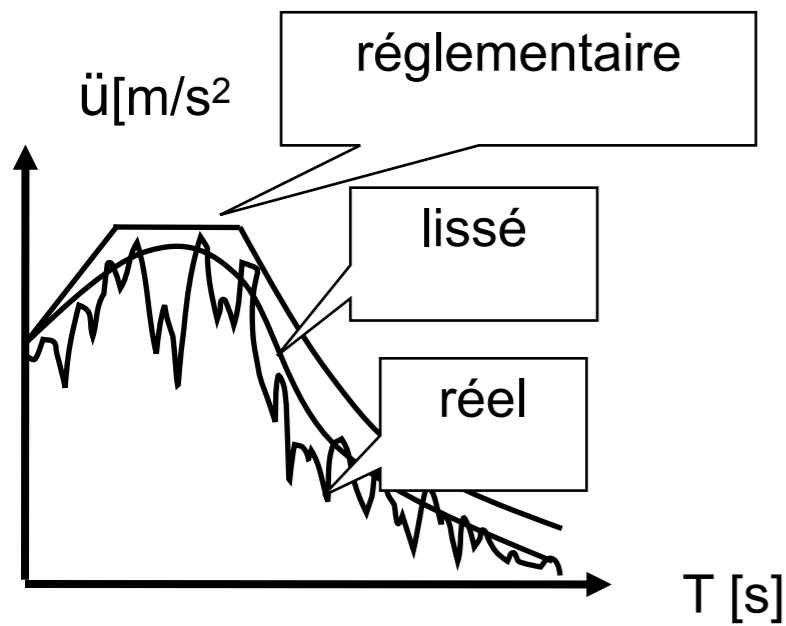
Spectre de réponse **observé**

Efforts dans la structure en fonction de **l'intensité du séisme** et de la **période** et **amortissement** de la structure



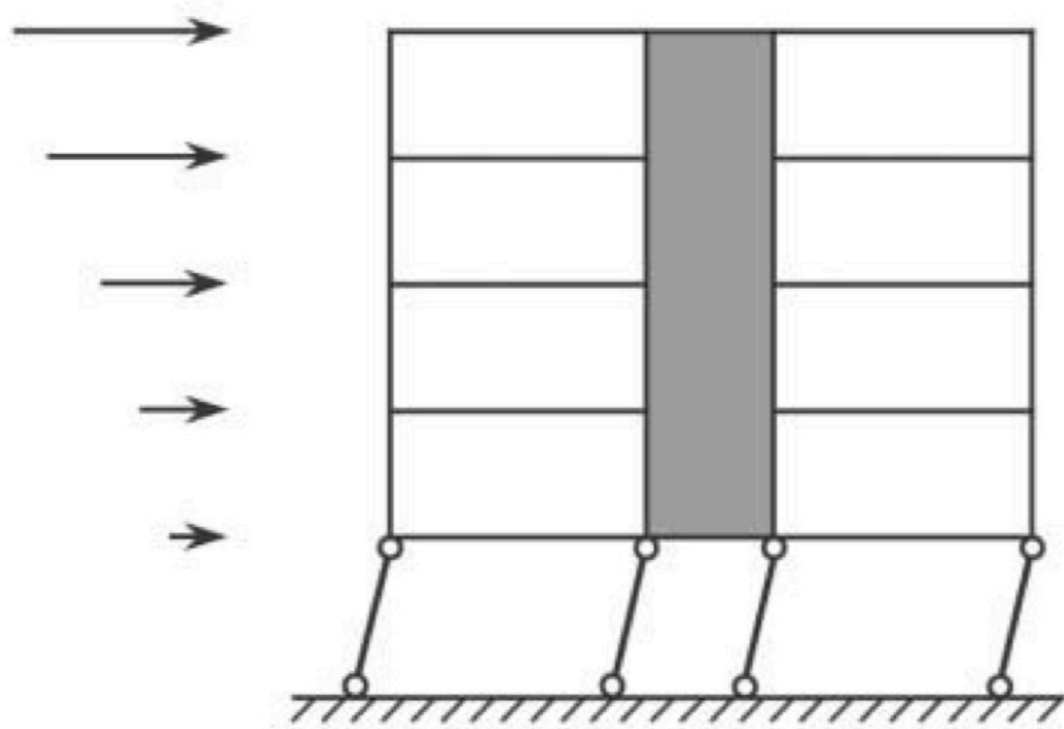
Quelles conséquences sont attendues ?

Spectre de réponse réglementaire



Quelques éléments parasismiques

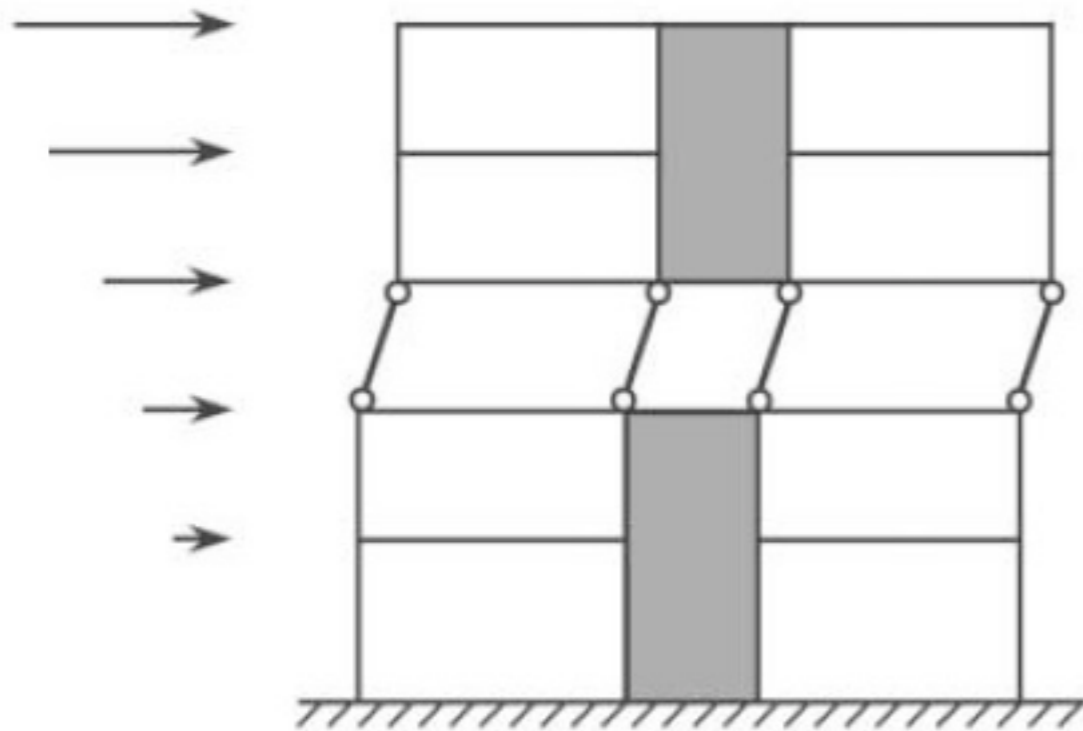
Des structures régulières en élévation pour garantir une déformation homogène (mur/poteau continu, plancher au même niveau, hauteur d'étage constant (poteau court), étage non-transparent - souple, réduction des surfaces de plancher...)



L'Aquila

Quelques éléments parasismiques

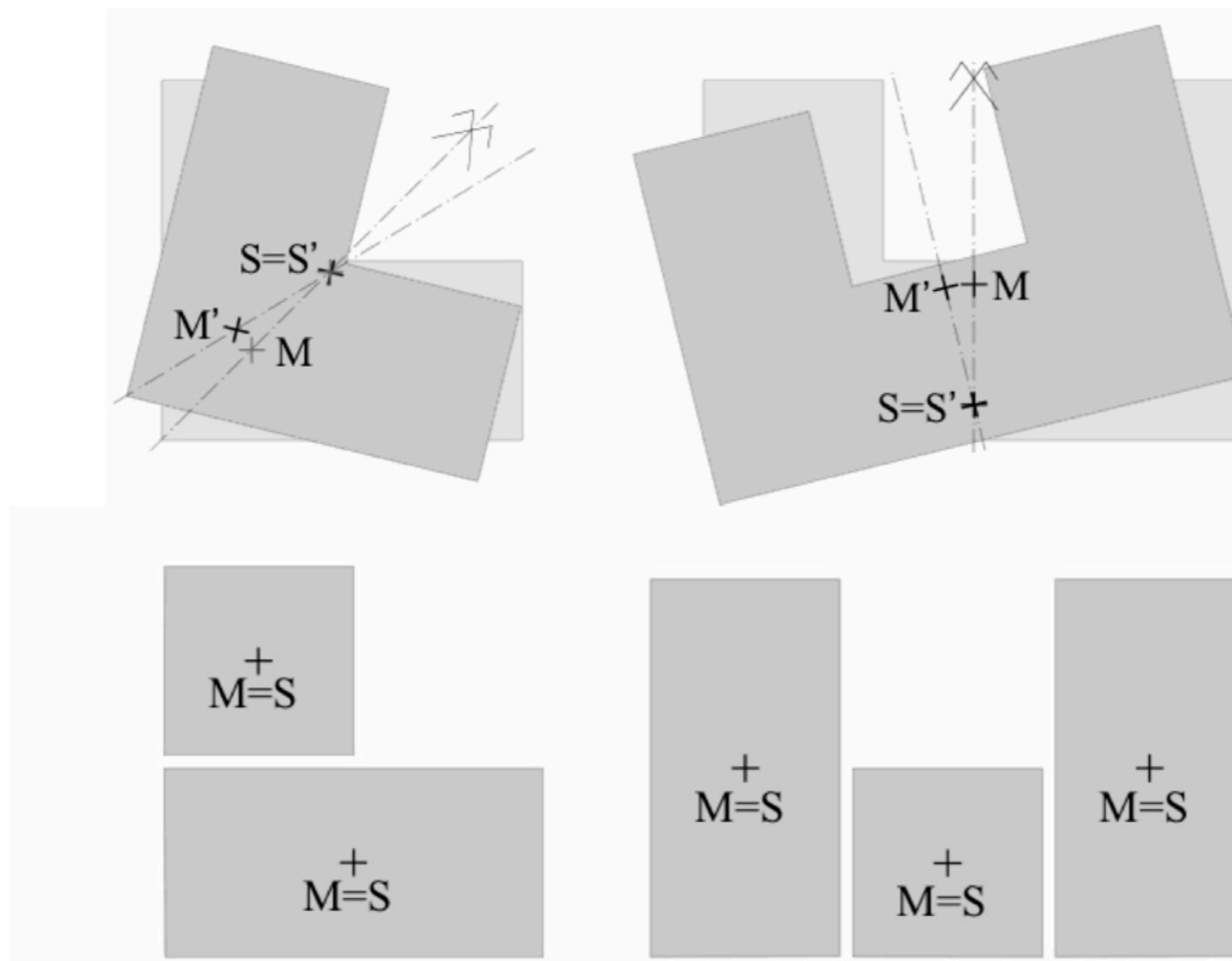
Des structures régulières en élévation pour garantir une déformation homogène (mur/poteau continu, plancher au même niveau, hauteur d'étage constant (poteau court), étage non-transparent - souple, réduction des surfaces de plancher...)



Kobe

Quelques éléments parasismiques

Des structures régulières en plan pour limiter les déformations différentielles (torsion, fondations variables, ...)



Quelques éléments parasismiques

Apporter des éléments qui empêchent les comportements hors-plan (éléments résistants dans les deux directions, tirants, planchers béton, chaînage, toiture légère, ...)



Lambesc



Emilia Romana



Lambesc

Quelques éléments parasismiques

Apporter des éléments qui empêchent les comportements hors-plan (éléments résistants dans les deux directions, tirants, planchers béton, chaînage, toiture légère, ...)



Quelques éléments parasismiques

Apporter des éléments qui empêchent les comportements hors-plan (éléments résistants dans les deux directions, tirants, planchers béton, chaînage, toiture légère, ...)



Quelques éléments parasismiques

Intégrer l'environnement et la position



Turquie, 1999

L'Aquila, 2009



Napa, 2014

Quelques éléments parasismiques

Éléments non-structuraux résistants (renforcés)



Des cheminées se sont écroulées comme autant de châteaux de cartes, écrasant les véhicules garés en contrebas.

Annecy



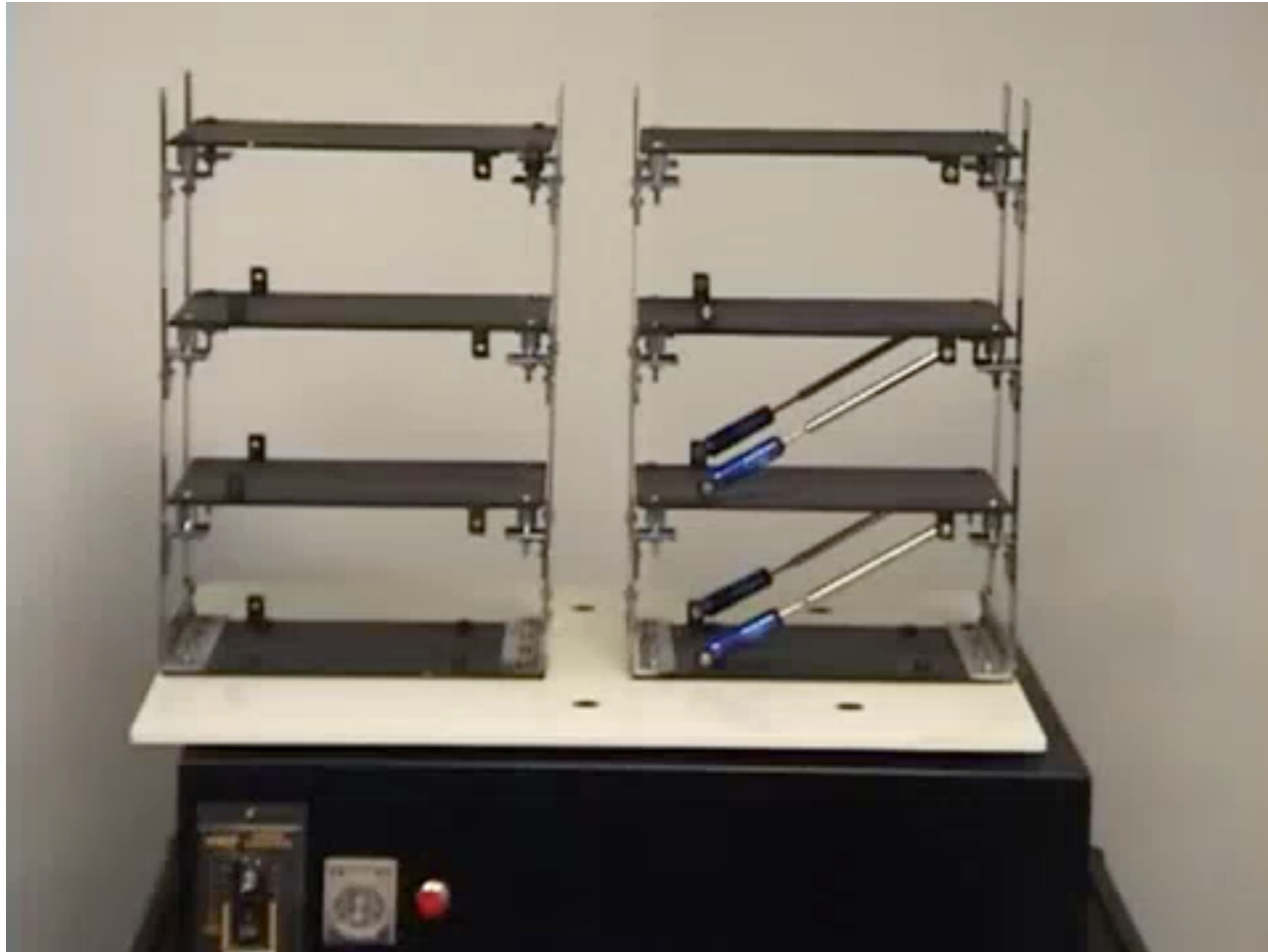
Christchurch



Emilia Romagna

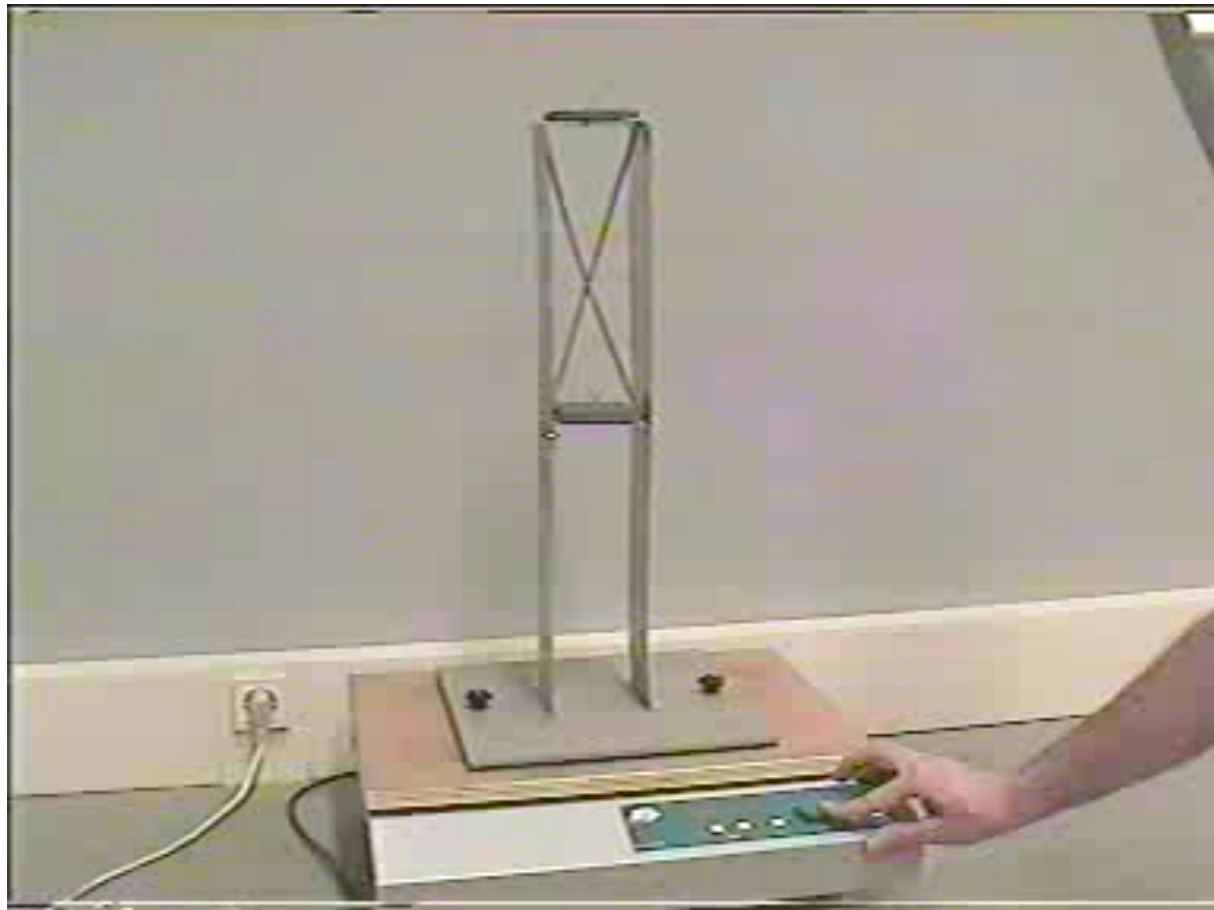
Quelques éléments parasismiques

Elements spéciaux



Quelques éléments parasismiques

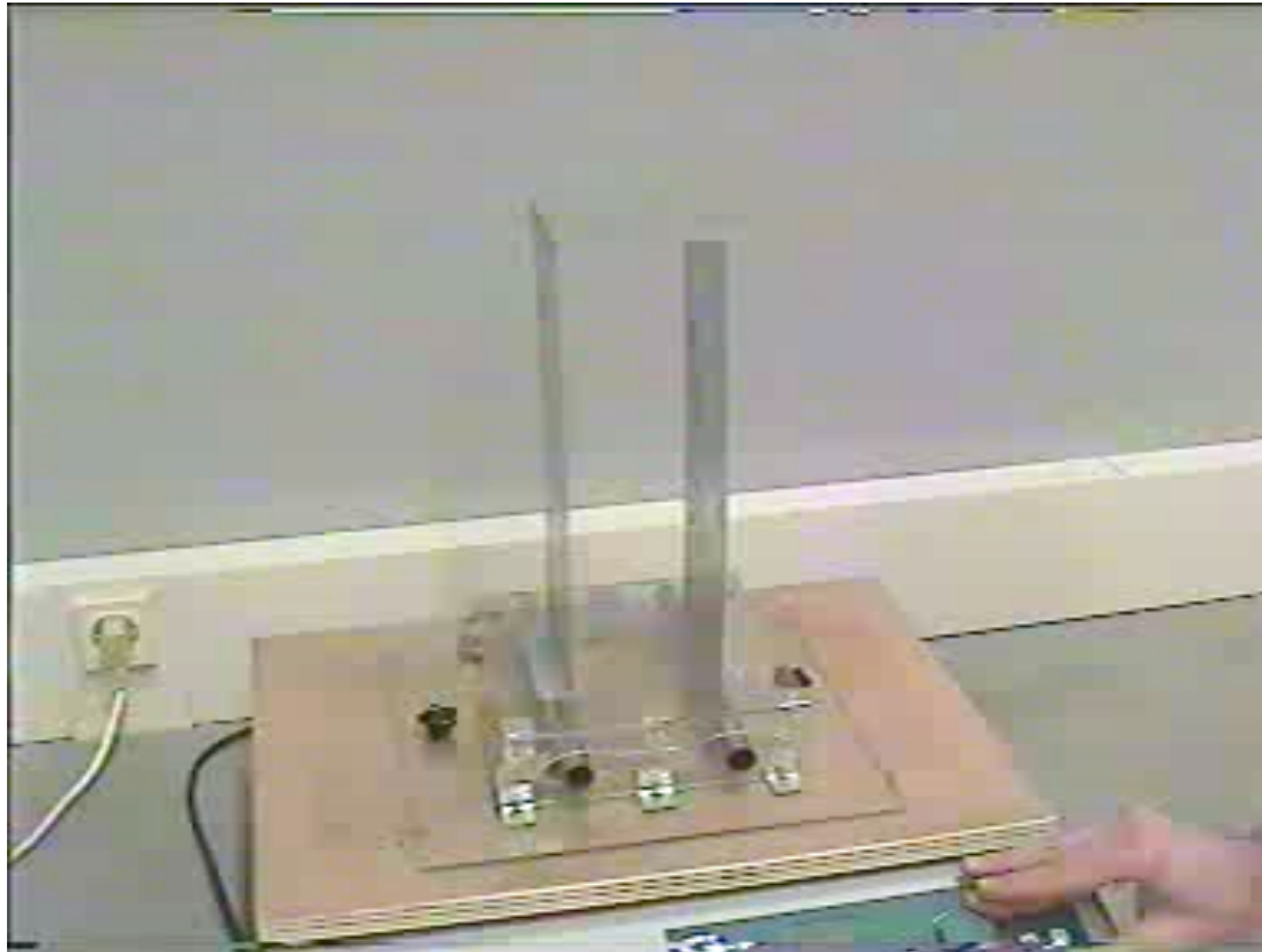
Elements spéciaux



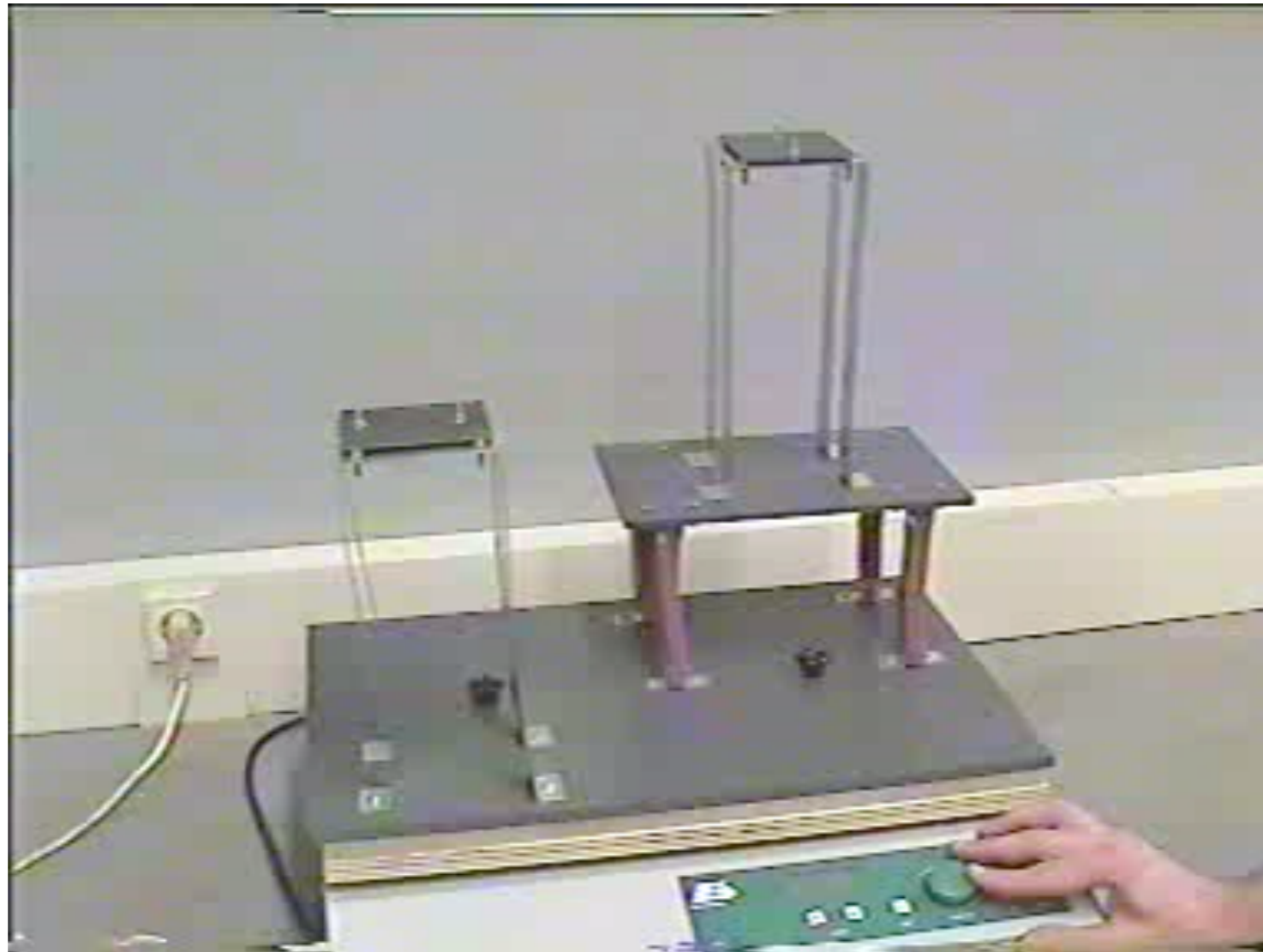
G. Hivin, IUT GC, Grenoble



Quelques éléments parasismiques



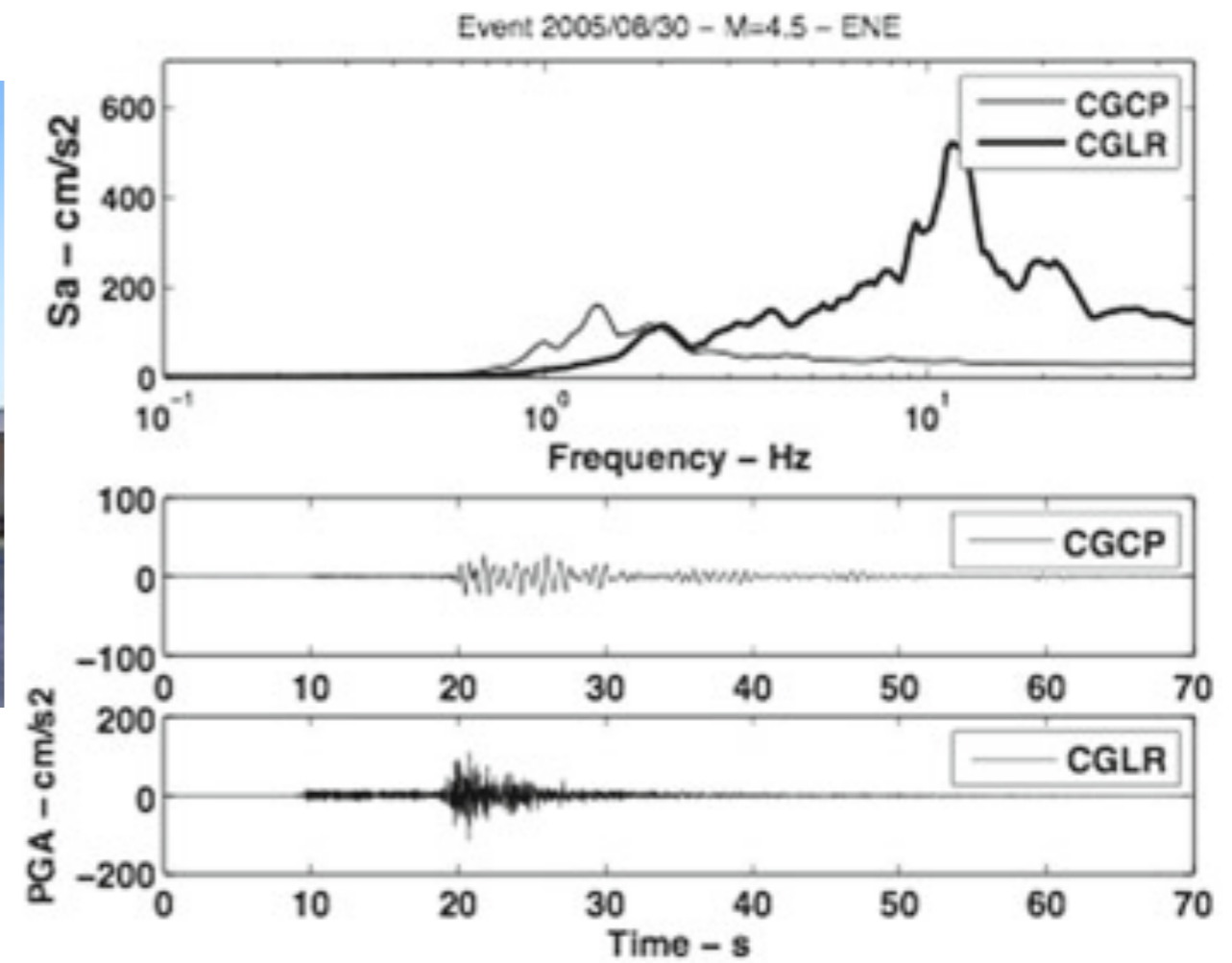
Quelques éléments parasismiques



Quelques éléments parasismiques



Quelques éléments parasismiques



Pas si évident....



Equateur



Nepal

