

**Journées techniques**  
organisées avec l'appui du Sétra  
et sous l'égide de la CoTITA

---

# **PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE**

**Mardi 27 mars 2012**  
**Lundi 2 et mardi 3 avril 2012**

CETE Méditerranée, Aix-en-Provence



# Prise en compte du risque sismique

## Programme de la session :



Lundi 2 avril 2012 - Maîtres d'oeuvre - Concepteurs OA

- 9h30**      **Accueil des participants**
- 10h00**     **Généralités sur les phénomènes sismiques**  
Denis DAVI, Arnold BALLIERE, CETE Méditerranée
- 10h45**     **La conception parasismique des ponts (1/2)**  
Denis DAVI, CETE Méditerranée
- 12H30**     **Déjeuner (sur inscription)**
- 14h00**     **La conception parasismique des ponts (2/2)**  
Denis DAVI, CETE Méditerranée
- 15h00**     **Qualification et prise en compte du risque liquéfaction sur les OA**  
Jean-François SERRATRICE, CETE Méditerranée
- 15h45**     **Pause**
- 16h00**     **Calculs des fondations et murs de soutènements**  
David CRIADO, DREAL PACA
- 16h45**     **Synthèse des hypothèses à caler : exemple de fiche programme OA et clauses types de CCTP**  
Arnold BALLIERE, CETE Méditerranée
- 17h15**     **Fin de la journée**

# Prise en compte du risque sismique

## Programme de la session :

Mardi 3 avril 2012 - Maîtres d'oeuvre - Concepteurs OA

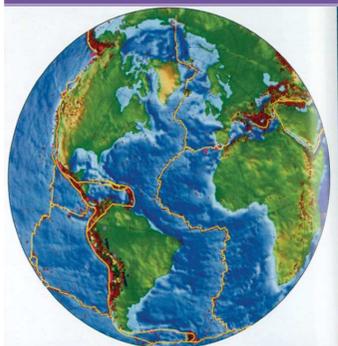
- 8h30**      **Accueil des participants**
- 9h00**      **Exemples de calculs sismiques (tutorats 1/3)**
- Exemple de mur de soutènement  
Dominique BATISTA, Thomas MARY, CETE Méditerranée
  - Cas d'un portique  
Arnold BALLIERE, CETE Méditerranée
- 10h20**      **Pause**
- 10h35**      **Exemples de calculs sismiques (tutorats 2/3)**
- Cas d'un OA courant de petites dimensions (analyses simplifiées pour des conceptions en ductilité limitée, ductile ou utilisant des appareils d'appui en élastomère fretté)
- Denis DAVI, CETE Méditerranée
- 12h15**      **Déjeuner (sur inscription)**
- 13h45**      **Exemples de calculs sismiques (tutorats 3/3)**
- Cas d'un OA courant de petites dimensions - suite (analyse simplifiée pour une conception intégrant des amortisseurs)  
Denis DAVI, CETE Méditerranée
  - Cas d'un ouvrage mixte  
Anthony HEKIMIAN, CETE Méditerranée
- 14h35**      **Pause**
- 14h50**      **Diagnostic et renforcement des ouvrages existants**  
(obligations réglementaires, démarche générale, outils disponibles et exemples d'applications)
- Jean-Christophe CARLES, Arnold BALLIERE, Denis DAVI, CETE Méditerranée  
David CRIADO, DREAL PACA
- 16h30**      **Fin de la journée**

Journées techniques  
organisées avec l'appui du Sétra  
et sous l'égide de la CoTITA

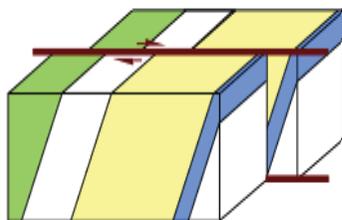
**PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE**

# Généralités sur les phénomènes sismiques

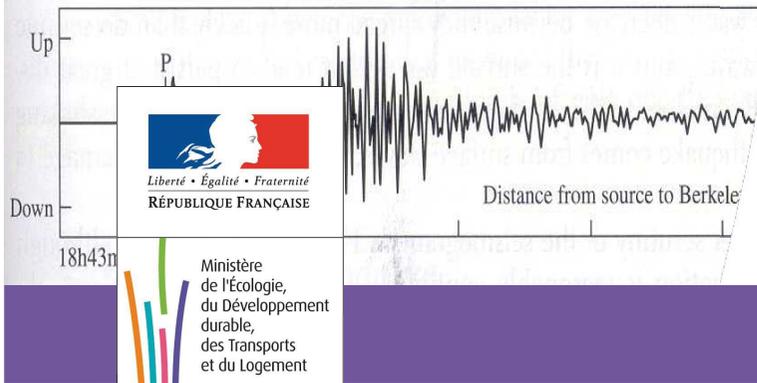
Denis DAVI, Arnold BALLIERE  
CETE Méditerranée



Déformation cassante - Régime coulissant



FAILLE DE DÉCROCHEMENT



# Généralités sur les phénomènes sismiques

---

## Plan de l'exposé

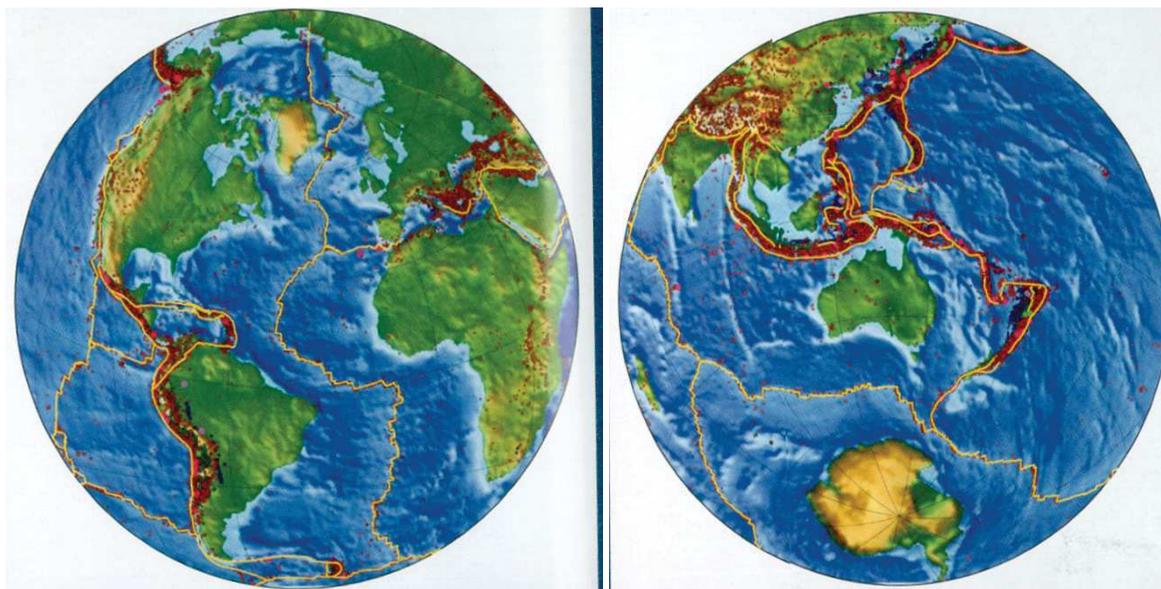
- Notions générales de sismologie
- Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation
- Représentation des actions sismiques sur les ponts
- Rappel de la législation en vigueur

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Notions générales de sismologie

- Caractérisation de l'aléa sismique

**A l'origine des séismes : la tectonique des plaques...**



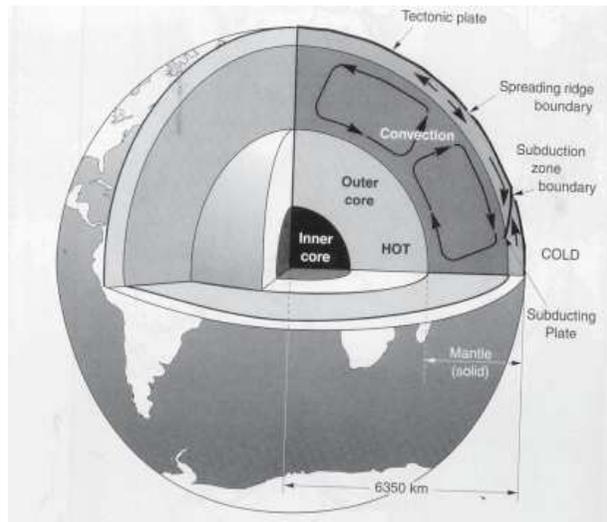
La localisation des séismes

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Notions générales de sismologie

- Caractérisation de l'aléa sismique

### A l'origine des séismes : la tectonique des plaques...



Les courants de convection

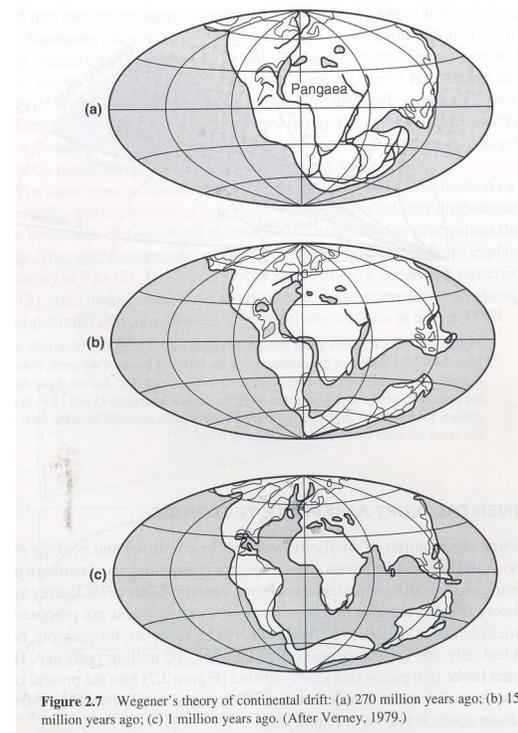


Figure 2.7 Wegener's theory of continental drift: (a) 270 million years ago; (b) 150 million years ago; (c) 1 million years ago. (After Verney, 1979.)

La dérive des continents

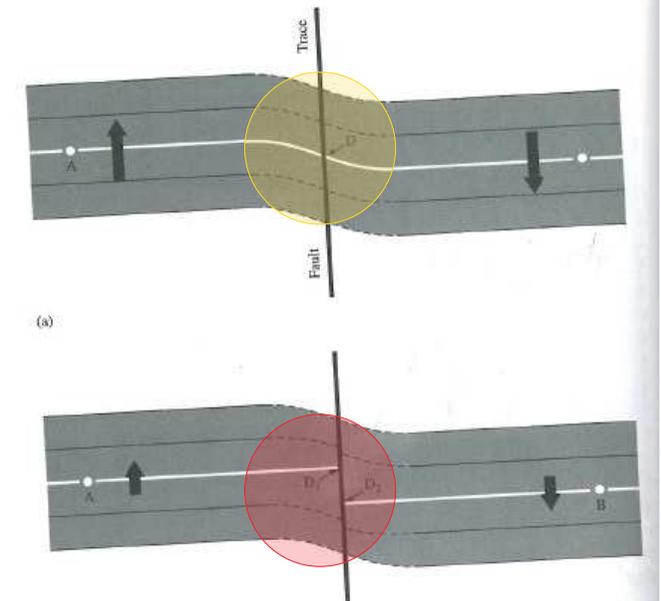
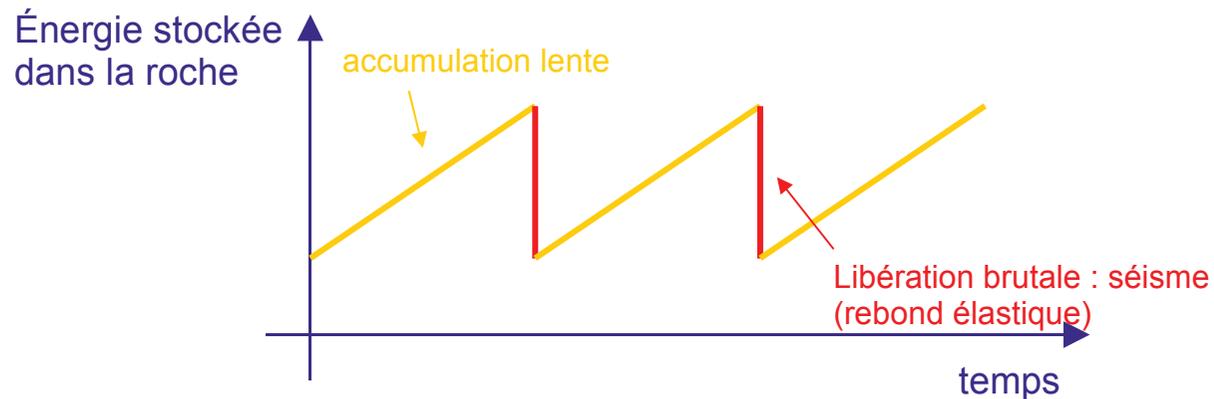
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Notions générales de sismologie

- Caractérisation de l'aléa sismique

### La prédiction des séismes

- Impossible dans l'état actuel des connaissances
- Cycles plus ou moins réguliers d'accumulation et de libération d'énergie :



- Partout où la Terre a tremblé, elle tremblera à nouveau
- Plus on s'éloigne dans le temps du dernier séisme, plus on se rapproche du suivant...

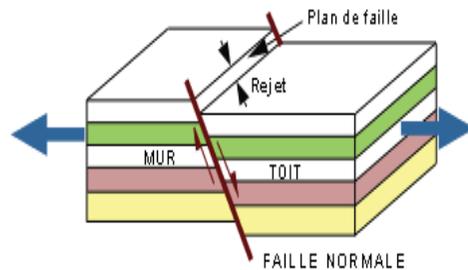
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Notions générales de sismologie

- Caractérisation de l'aléa sismique

### Les mécanismes de rupture

Déformation cassante - Régime extensif

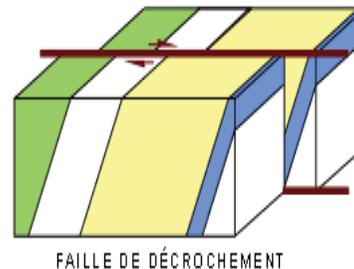


Petits séismes

$$M < 3$$

Ex : Rifts océaniques

Déformation cassante - Régime coulissant

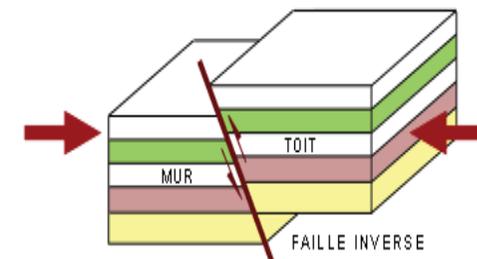


Séismes moyens à forts

$$3 < M < 7.5$$

Ex : Région PACA  
Californie (faille de San Andreas)

Déformation cassante - Régime compressif



Séismes très forts

$$M > 8$$

Ex : Caraïbes  
Chili, Alaska, Turquie, Japon

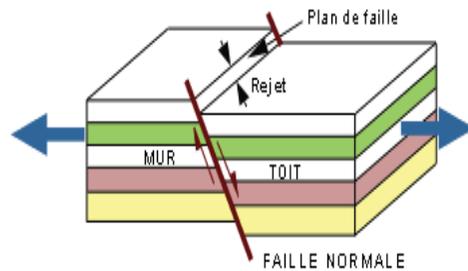
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Notions générales de sismologie

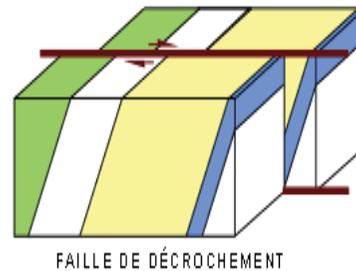
- Caractérisation de l'aléa sismique

### Les mécanismes de rupture

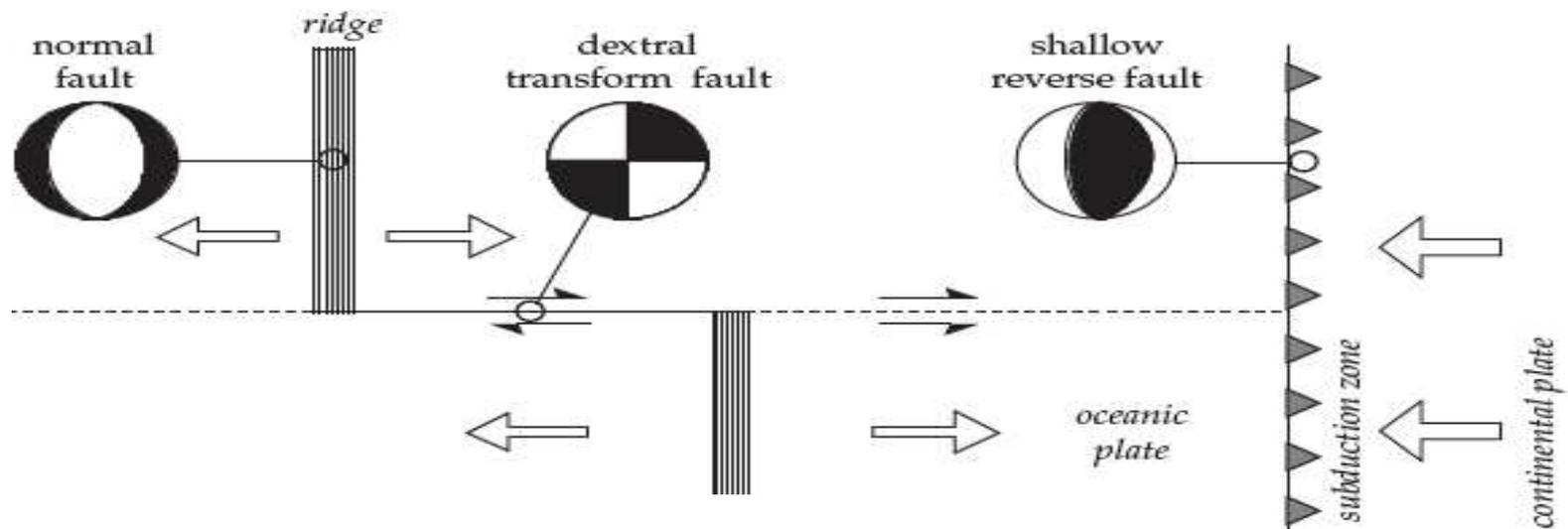
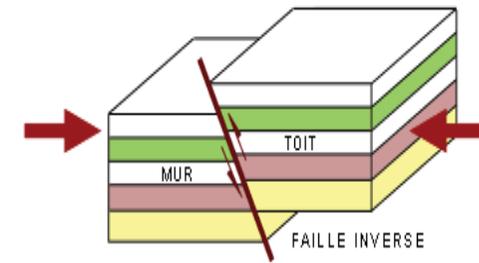
Déformation cassante - Régime extensif



Déformation cassante - Régime coulissant



Déformation cassante - Régime compressif

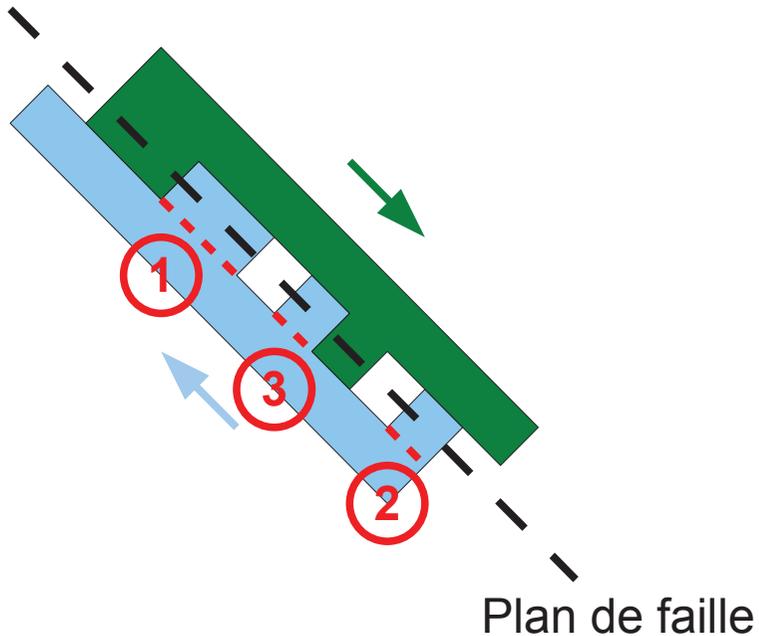


# Généralités sur les phénomènes sismiques

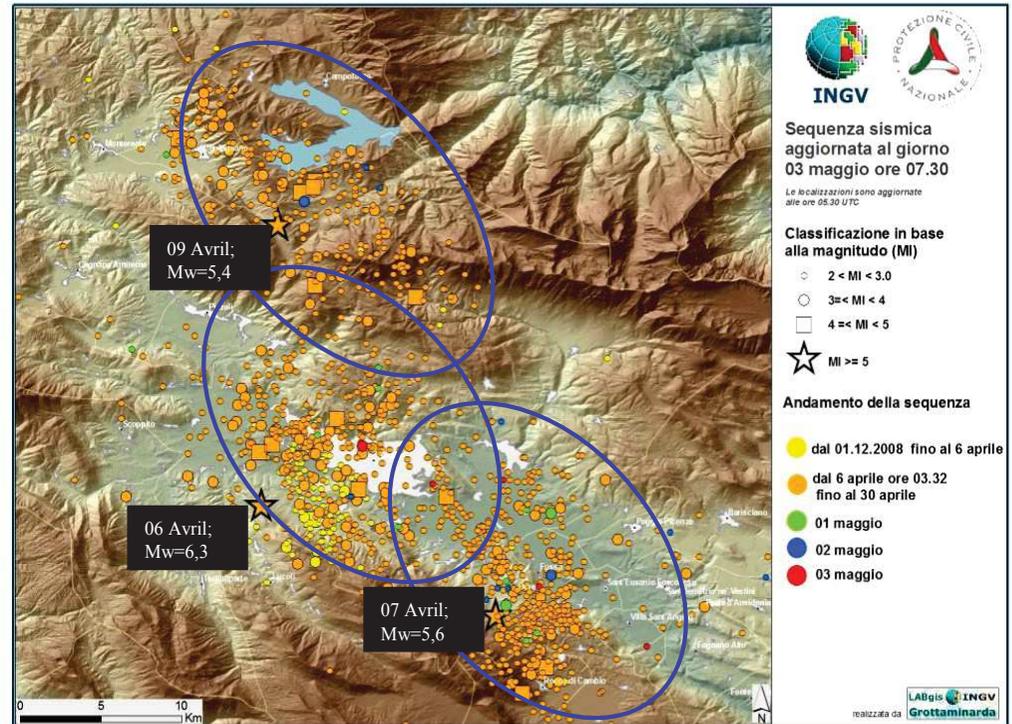
## Notions générales de sismologie

- Caractérisation de l'aléa sismique

### Les phénomènes de répliques



### Séisme de l'Aquila :



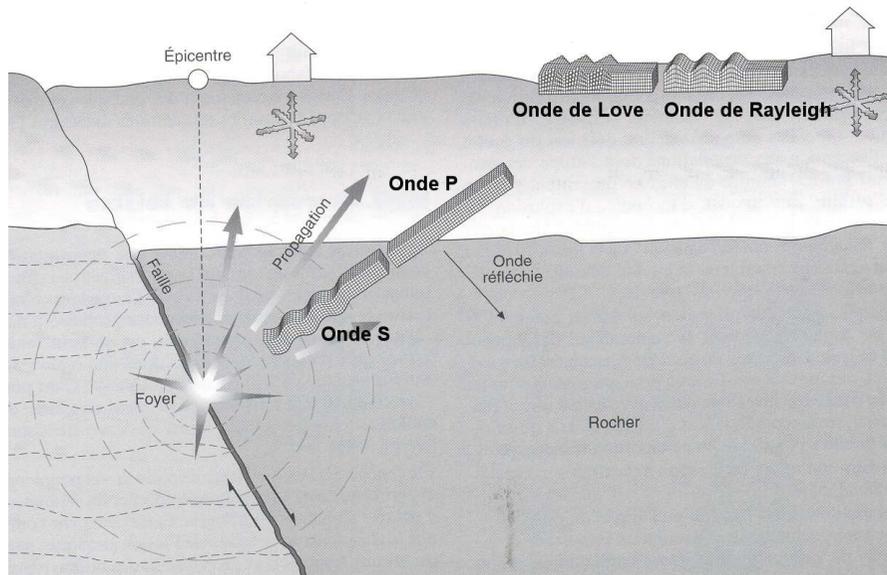
Plus de 10 000 répliques la 1<sup>ère</sup> semaine, dont 2 Mw > 5,4

# Généralités sur les phénomènes sismiques

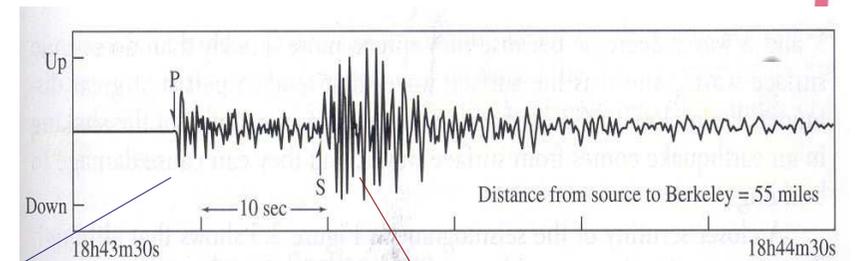
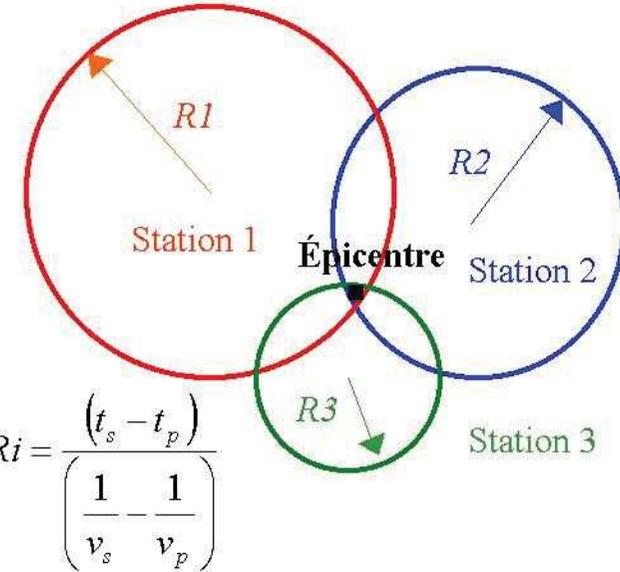
## Notions générales de sismologie

- Caractérisation de l'aléa sismique

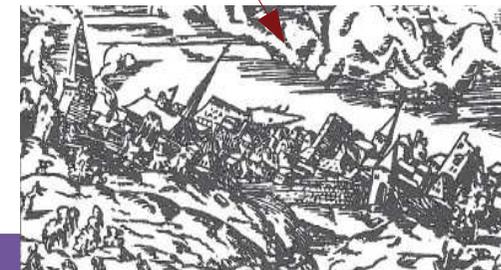
### La propagation des ondes



Les ondes sismiques



Exemple de sismogramme



# Généralités sur les phénomènes sismiques

---

## Notions générales de sismologie

- Caractérisation de l'aléa sismique

### Les grandeurs qui caractérisent les séismes

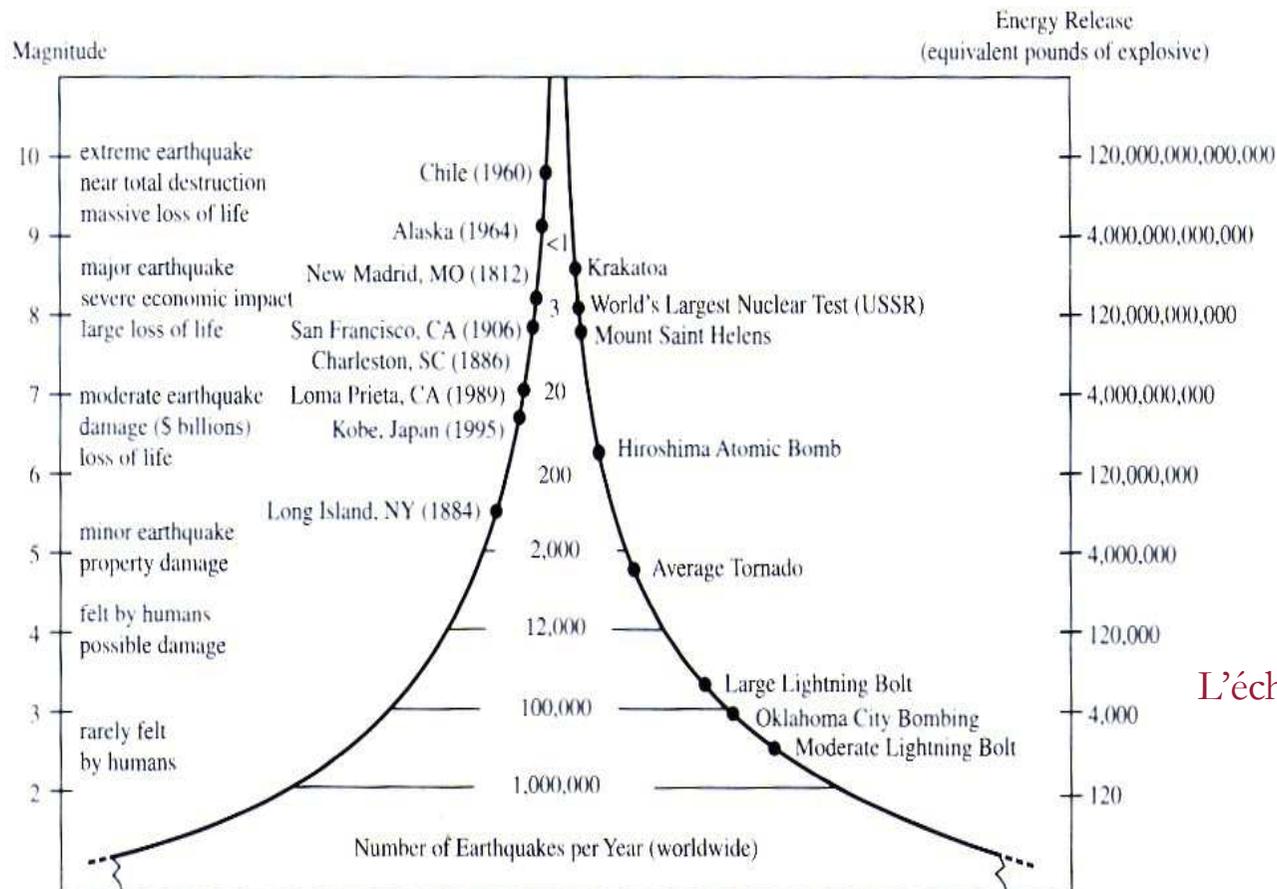
- L'échelle des intensités de Mercalli (1902) : de I à XII
- L'échelle des Magnitudes de Richter (1935) : de 1 à ...
  
- L'accélération maximale, le contenu fréquentiel, la durée...

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Notions générales de sismologie

- Caractérisation de l'aléa sismique

### Les grandeurs qui caractérisent les séismes



L'échelle des magnitudes de Richter

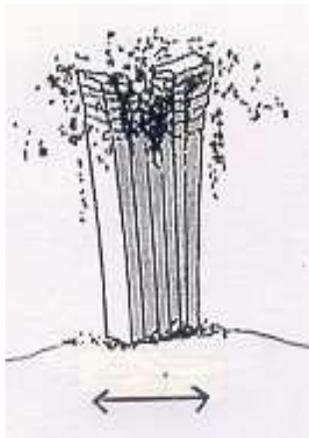
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Notions générales de sismologie

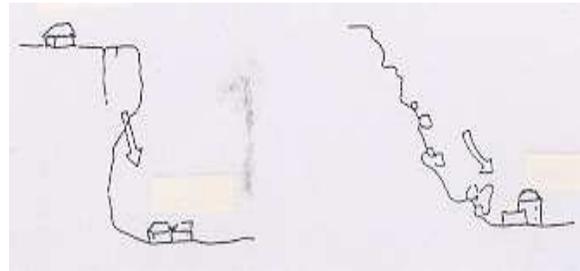
- Caractérisation de l'aléa sismique

### Les effets destructeurs des séismes

- Les effets directs (liés aux phénomènes naturels)



La vibration du sol



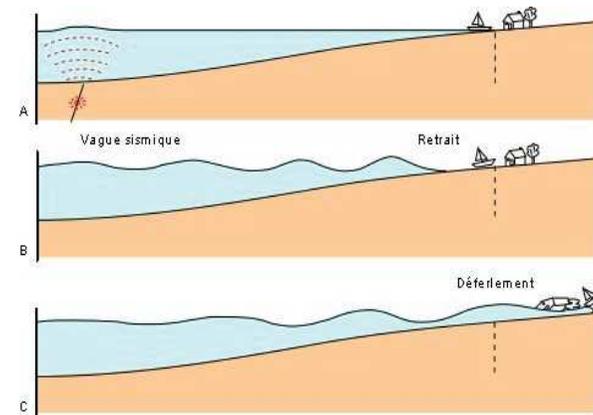
Les glissements de terrain et chutes de rochers



La liquéfaction du sol



Les ruptures superficielles de failles



Les tsunamis (ou raz-de-marée)

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Notions générales de sismologie

- Caractérisation de l'aléa sismique

### Les effets destructeurs des séismes

- Les effets indirects (liés à l'activité humaine)



Effondrement d'un centre commercial  
(Izmit, 1999)



Perte de portance des fondations sous l'effet  
de la liquéfaction (Niigata, 1964)



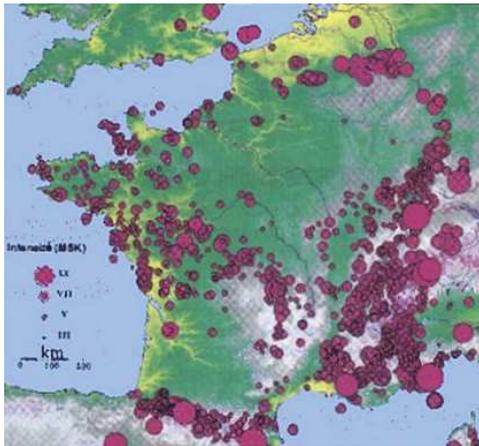
Incendies (Kobe, 1995)

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Notions générales de sismologie

- Caractérisation de l'aléa sismique

### La sismicité française



Les séismes passés

- environ 20 séismes  $M > 3,5$  par an
- 6000 communes concernées
- 50 morts à Lambesc en 1909
- 3000 morts à Pointe-à-Pitre en 1843
- $M=7,4$  en 2007 en Martinique



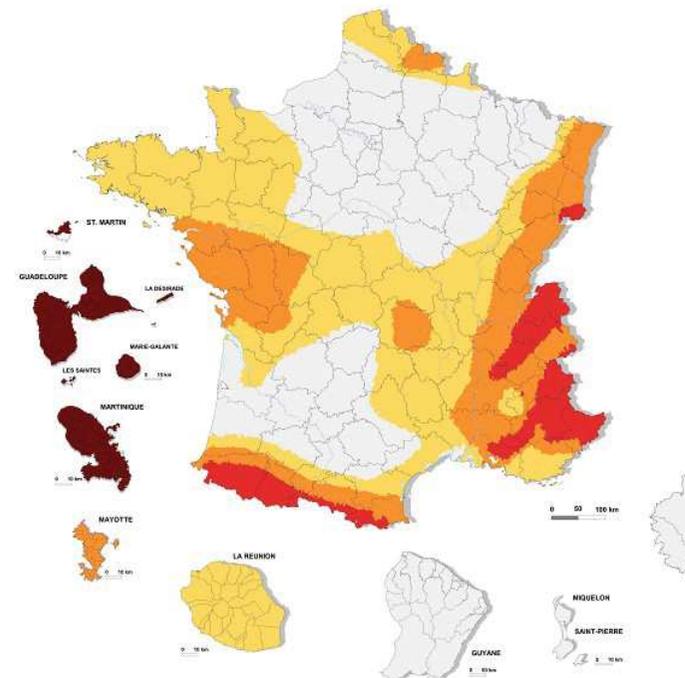
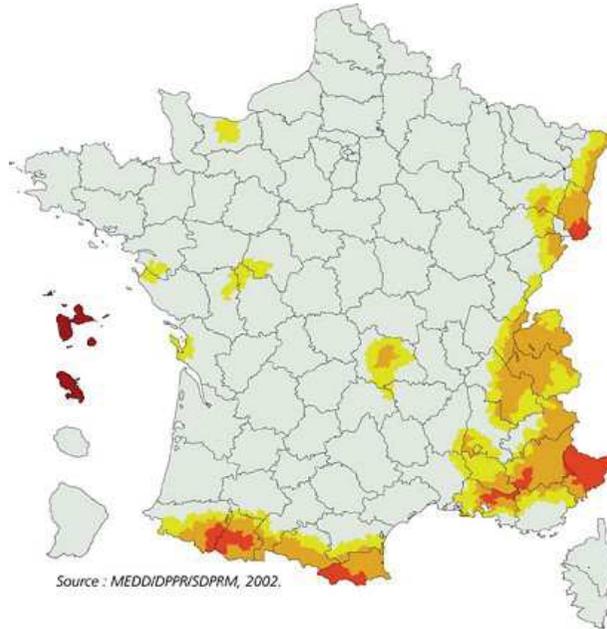
Lambesc, proximité de  
Salon-de-Provence, 1909

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Notions générales de sismologie

- Caractérisation de l'aléa sismique

### La sismicité française : les cartes de zonage réglementaire



#### Ancien zonage PS92 (zones sism. $\geq 1a$ ) :

- 5000 communes concernées
- 17% du territoire

#### Nouveau zonage (zones sism. $\geq 2$ ) :

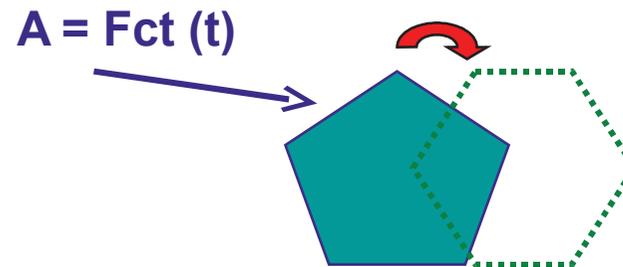
- > 21000 communes concernées
- 66% du territoire

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Définition

Les actions dynamiques se caractérisent par une variation de leur amplitude, de leur direction ou de leur point d'application en fonction du temps :



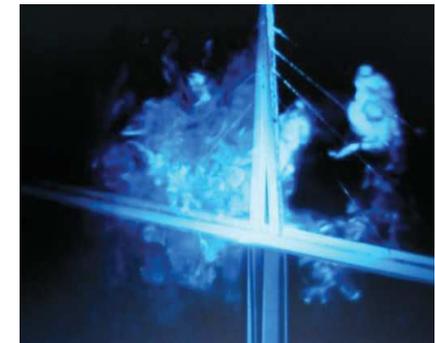
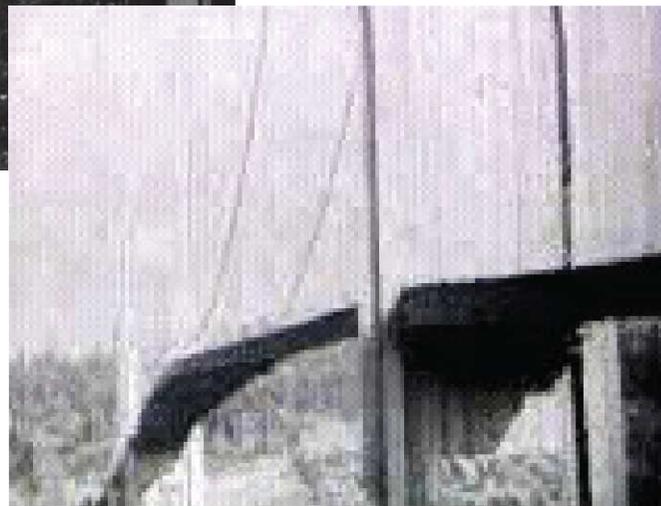
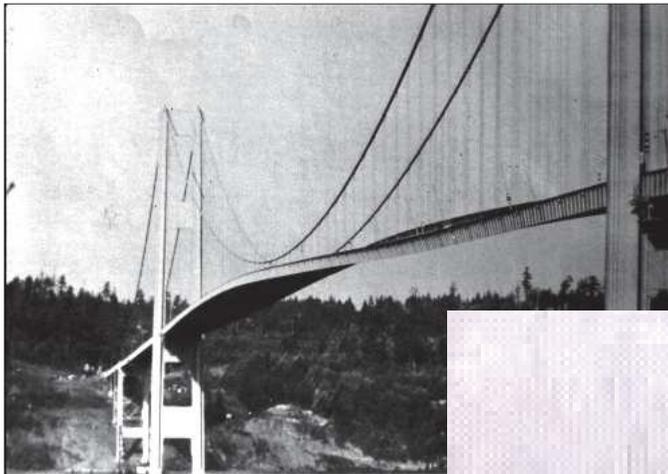
Elles se traduisent par une variation de la réponse de la structure au cours du temps (mouvement et/ou déformation) engendrant des effets inertiels ou forces d'inertie (= masse x accélération).

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Exemples d'actions dynamiques sur les OA :

### Le vent...



# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Exemples d'actions dynamiques sur les OA :

### Les chocs...

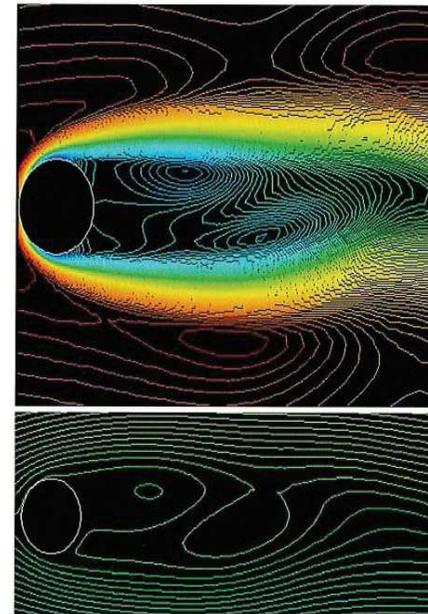


# Généralités sur les phénomènes sismiques

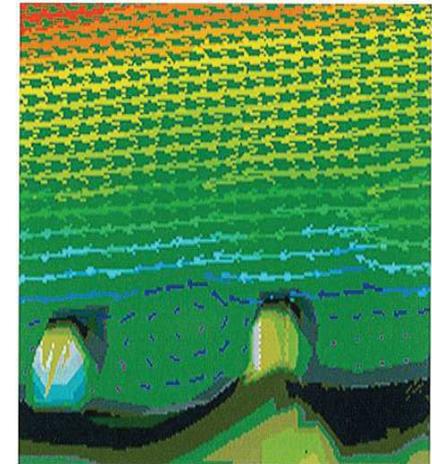
## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Exemples d'actions dynamiques sur les OA :

### Les actions hydrodynamiques...



Partie 2 - Figure 7 : lignes de courant et champs de pressions dans le sillage d'une pile ronde



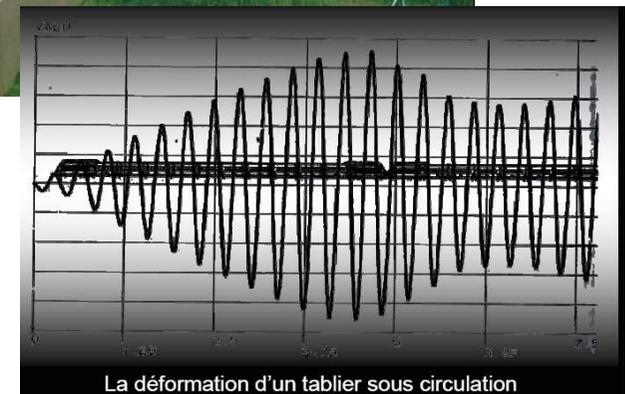
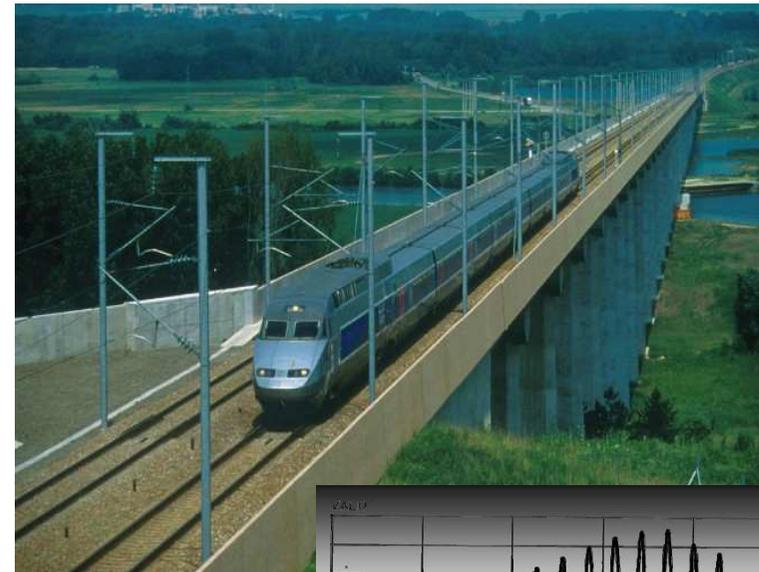
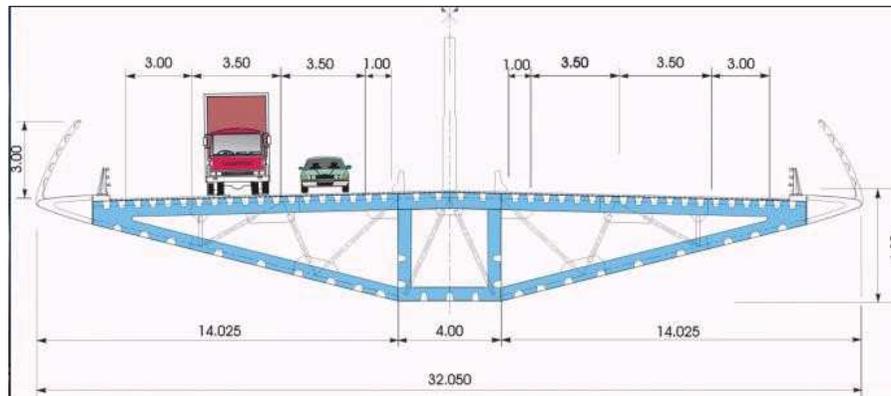
Partie 2 - Figure 9 : modélisation 2D d'un écoulement tourbillonnaire entre deux piles de pont – Source : D. Gouis (CETE Normandie-Centre - LRPC Blois)

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Exemples d'actions dynamiques sur les OA :

### Les charges de trafic...



La déformation d'un tablier sous circulation

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Exemples d'actions dynamiques sur les OA :

### Les charges piétonnes sur passerelles...

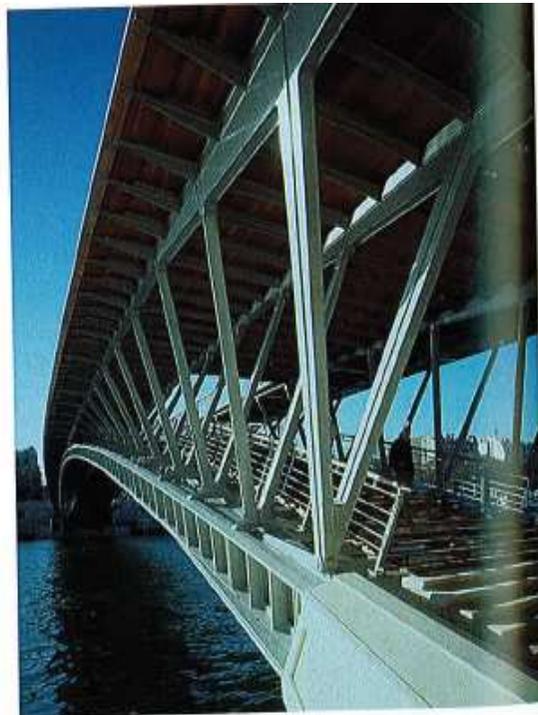


Photo A.4.6 : passerelle de Solferino – Source : architecte Marc Mimram

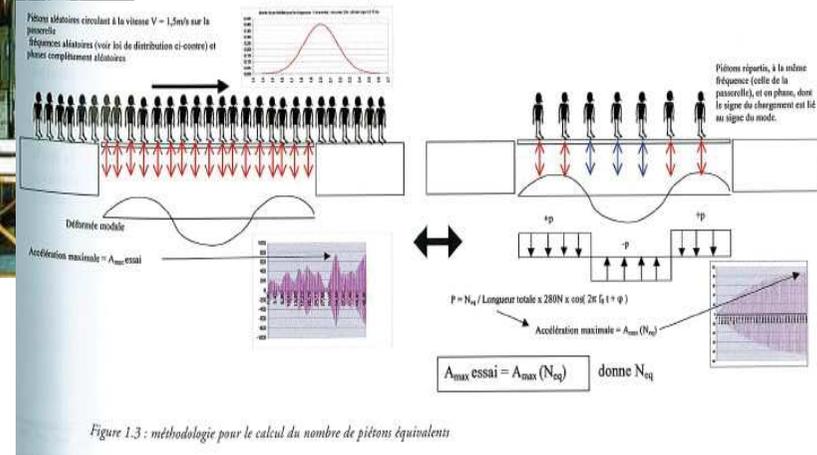


Figure 1.3 : méthodologie pour le calcul du nombre de piétons équivalents

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Exemples d'actions dynamiques sur les OA :

### Les séismes...



# Généralités sur les phénomènes sismiques

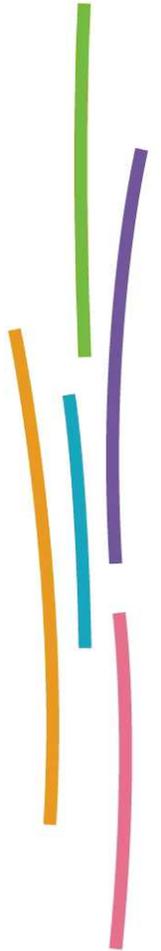
---

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Classification des actions dynamiques

### Actions aléatoires

- Ex :
- *Vibrations sur une piste de danse*
  - *Séisme futur*
  - *Trafic routier*
  - *Pression de vent sur un bâtiment*
  - ...



# Généralités sur les phénomènes sismiques

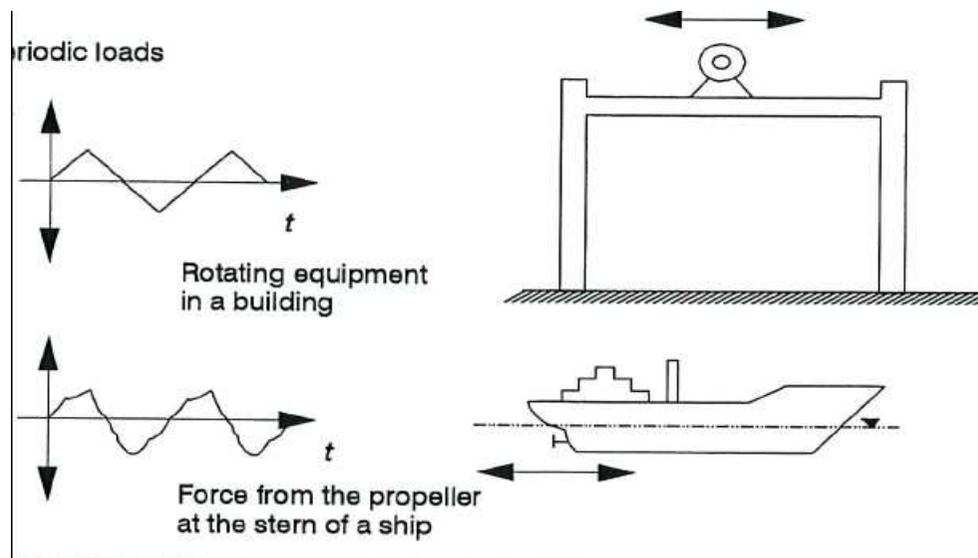
## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Classification des actions dynamiques

### Actions déterministes

(amplitude, direction et point d'application connus à chaque instant)

#### ■ Actions périodiques



Ex : - Trafic ferroviaire  
- Piétons sur passerelle  
- Houle marine  
- ...

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

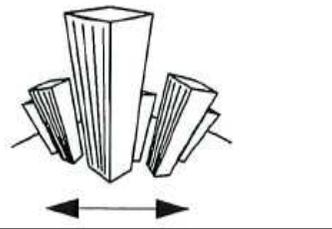
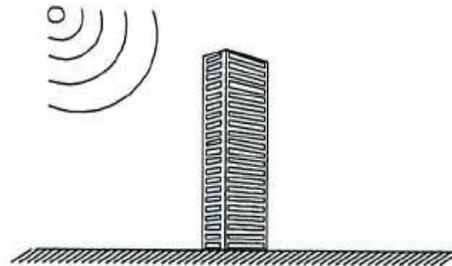
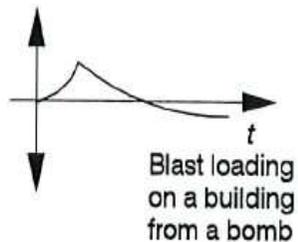
- Classification des actions dynamiques

### Actions déterministes

(amplitude, direction et point d'application connus à chaque instant)

#### ■ Actions non-périodiques

non periodic loads



- Ex :
- Chocs
  - Séismes passés
  - Vent
  - Poussée hydrodynamique
  - ...

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Classification des actions dynamiques
  - Actions dynamiques de natures très différentes
  - Quasiment toutes les actions applicables aux OA, sauf :
    - Poids propre
    - Effets thermiques
  - Prise en compte variable dans le calcul des structures
    - Approches forfaitaires (*statique équivalent*)
    - Analyses dynamiques mono ou multi-modales
    - Analyses dynamiques temporelles
  - En pratique, le recours aux analyses dynamiques est relativement rare...

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Classification des actions dynamiques



**La plupart des actions dynamiques sont prises en compte par le biais d'approches statiques équivalentes.**

### Exceptions :

- Charges ferroviaires
- Vent sur structures souples (ponts à haubans ou suspendus)
- Vibrations des passerelles piétonnes
- **Séisme**

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

### Systemes à 1 degré de liberté (1 DDL)

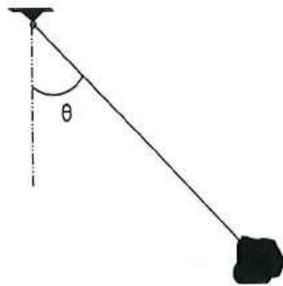


Figure 4.2 A dynamic system: the pendulum.

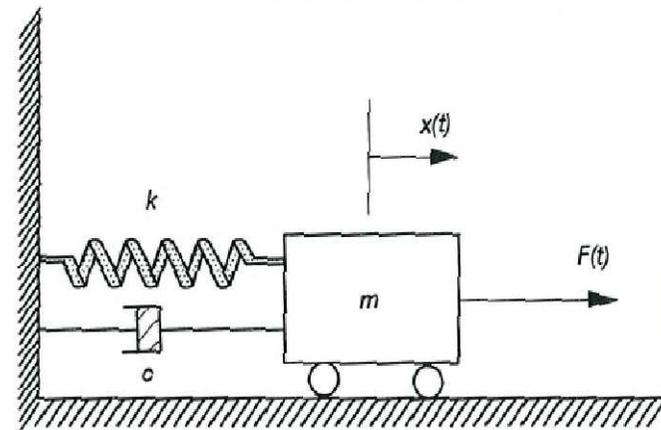
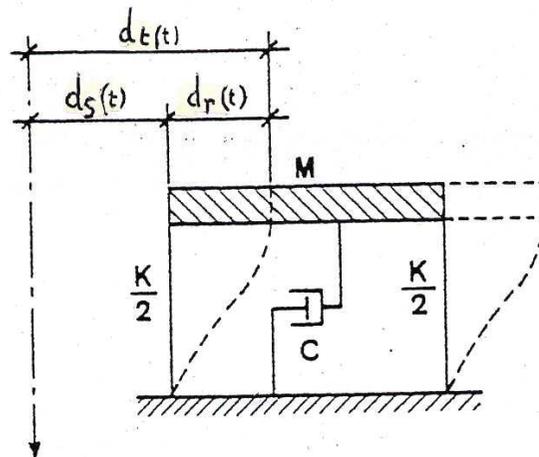


Figure 4.7 Mathematical model of a SDOF system.

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

### Systemes à 1 degré de liberté (1 DDL)

- Équation fondamentale de la dynamique :

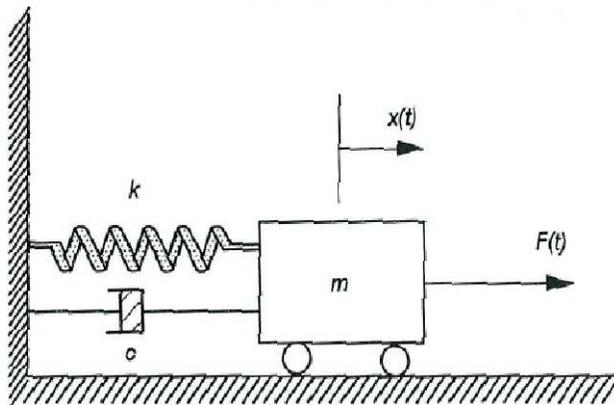


Figure 4.7 Mathematical model of a SDOF system.

$$\begin{aligned} m.a(t) &= \Sigma F_{\text{ext}}(t) \\ &= F(t) - k.x(t) - c.v(t) \end{aligned}$$

$$m.a(t) + c.v(t) + k.x(t) = F(t)$$

$$m.x''(t) + c.x'(t) + k.x(t) = F(t)$$

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

### Systemes à 1 degré de liberté (1 DDL)

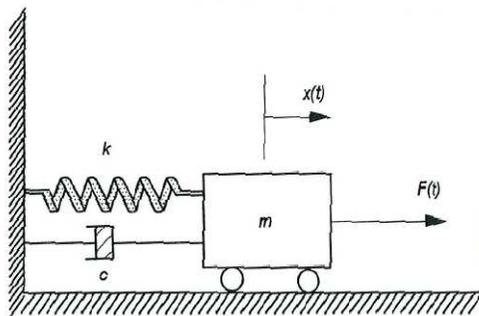


Figure 4.7 Mathematical model of a SDOF system.

$$m \cdot x''(t) + c \cdot x'(t) + k \cdot x(t) = F(t)$$

➤ Cas particuliers :

- *Oscillations libres non-amorties*

$$m \cdot x''(t) + k \cdot x(t) = 0$$

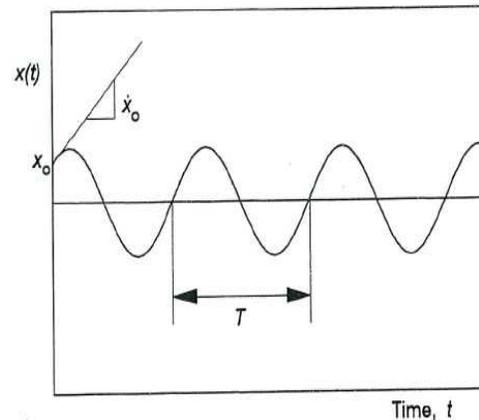
$$x''(t) + \omega^2 \cdot x(t) = 0$$

$$\rightarrow x(t) = \dot{x}_0 / \omega \sin \omega t + x_0 \cos \omega t$$

$$\omega^2 (\text{rad/s}) = k/m$$

$$T(\text{s}) = 2\pi/\omega$$

$$f (\text{Hz}) = 1/T$$



# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

### Systèmes à 1 degré de liberté (1 DDL)

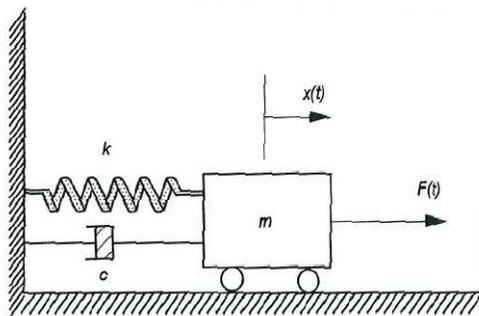


Figure 4.7 Mathematical model of a SDOF system.

$$m \cdot x''(t) + c \cdot x'(t) + k \cdot x(t) = F(t)$$

➤ Cas particuliers :

- *Oscillations libres amorties*

$$m \cdot x''(t) + c \cdot x'(t) + k \cdot x(t) = 0$$

$$x''(t) + 2\xi\omega \cdot x'(t) + \omega^2 \cdot x(t) = 0$$

$$\xi = c/2\omega m$$

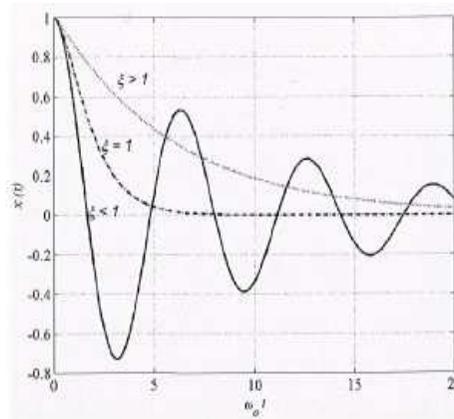


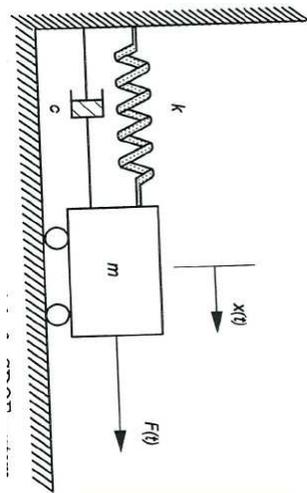
Figure A.1.2 : oscillations libres

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

### Systemes à 1 degré de liberté (1 DDL)



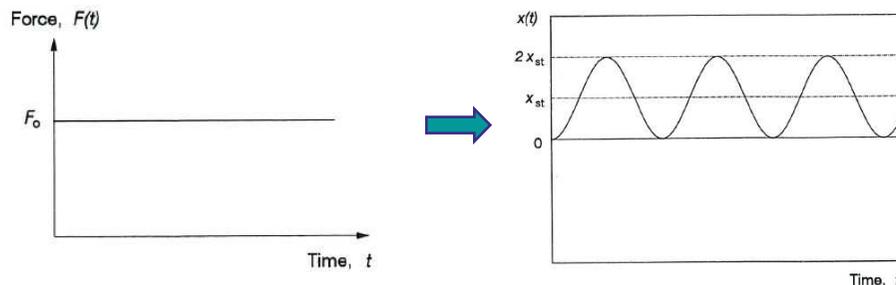
$$m \cdot x''(t) + c \cdot x'(t) + k \cdot x(t) = F(t)$$

➤ Cas particuliers :

- *Oscillateur non-amorti soumis à une force constante*

$$m \cdot x''(t) + k \cdot x(t) = F_0$$

$$\rightarrow x(t) = F_0/k (1 - \cos \omega t)$$



# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

### Systemes à 1 degré de liberté (1 DDL)

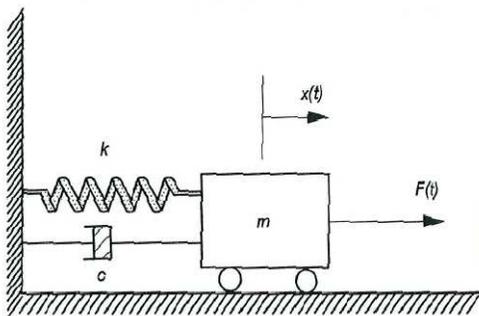


Figure 4.7 Mathematical model of a SDOF system.

$$m \cdot x''(t) + c \cdot x'(t) + k \cdot x(t) = F(t)$$

➤ Cas particuliers :

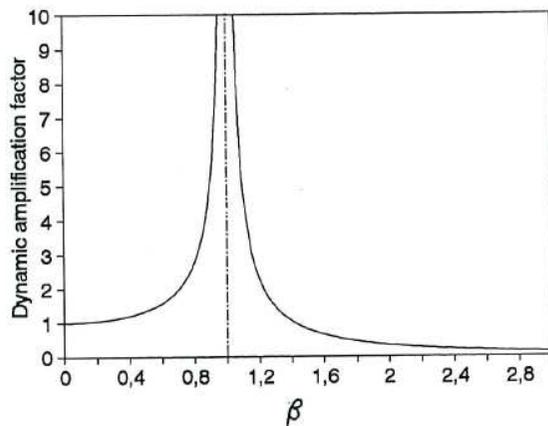
- *Oscillations forcées non-amorties*

$$m \cdot x''(t) + k \cdot x(t) = F_0 \sin \omega_{ext} t$$

$$\rightarrow x(t) = F_0/k \cdot 1/(1-\beta^2) \cdot (\sin \omega_{ext} t - \beta \sin \omega t)$$

$$\beta = \omega_{ext}/\omega$$

$$DAF = 1/(1-\beta^2) = \text{coef. ampl. dyn}$$



# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

### Systèmes à 1 degré de liberté (1 DDL)

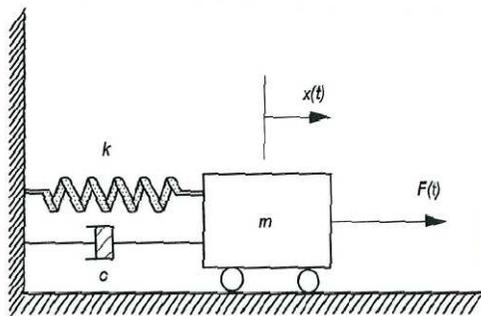


Figure 4.7 Mathematical model of a SDOF system.

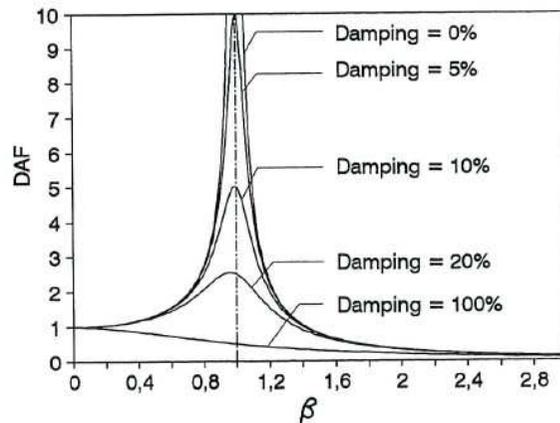
$$m \cdot x''(t) + c \cdot x'(t) + k \cdot x(t) = F(t)$$

➤ Cas particuliers :

- *Oscillations forcées amorties*

$$m \cdot x''(t) + c \cdot x'(t) + k \cdot x(t) = F_0 \sin \omega_{\text{ext}} t$$

$$\rightarrow x(t) = F_0/k \cdot \alpha^{1/2} \cdot (\sin \omega_{\text{ext}} t + \phi)$$



$$\beta = \omega_{\text{ext}} / \omega$$

$$DAF = \alpha^{1/2} = 1 / [(1 - \beta^2)^2 + (2\xi\beta)^2]^{1/2}$$

$$DAF_{\text{max}/\beta=1} = 1 / (2\xi)$$

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

### Systemes à 1 degré de liberté (1 DDL)

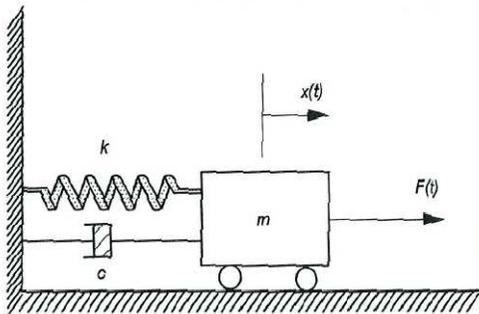


Figure 4.7 Mathematical model of a SDOF system.

$$m \cdot x''(t) + c \cdot x'(t) + k \cdot x(t) = F(t)$$

➤ Cas général :

$x(t)$  donnée par l'intégrale de Duhamel :

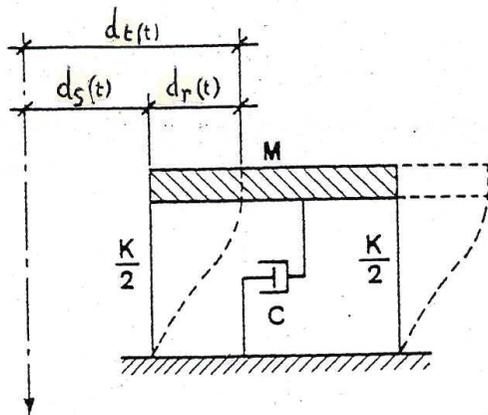
$$x(t) = - \frac{1}{\omega \sqrt{1 - \xi^2}} \int_0^t F(\tau) e^{-\xi \omega (t - \tau)} \cdot \sin \left[ \omega \sqrt{1 - \xi^2} (t - \tau) \right] d\tau$$

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

### Systemes à 1 degré de liberté (1 DDL)



➤ Application au séisme :

$$M \ddot{d}_t(t) = -K d_r(t) - C \dot{d}_r(t)$$

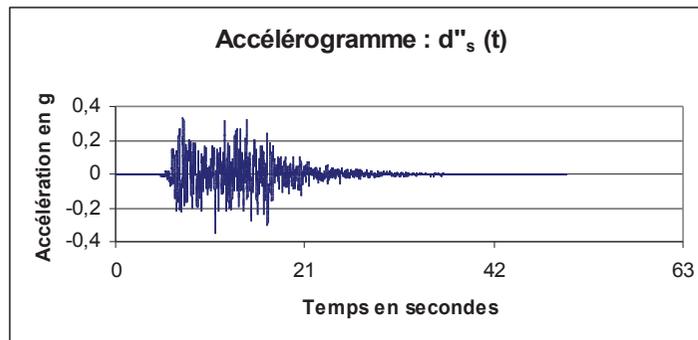
$$M (\ddot{d}_s(t) + \ddot{d}_r(t)) = -K d_r(t) - C \dot{d}_r(t)$$

$$M \ddot{d}_r(t) + C \dot{d}_r(t) + K d_r(t) = -M \ddot{d}_s(t)$$

$$\ddot{d}_r(t) + 2\xi \dot{d}_r(t) + \omega^2 d_r(t) = -\ddot{d}_s(t)$$

$$\text{avec } \omega = \sqrt{\frac{K}{M}} = \frac{2\pi}{T}$$

$$\xi = \frac{C}{2M\omega}$$

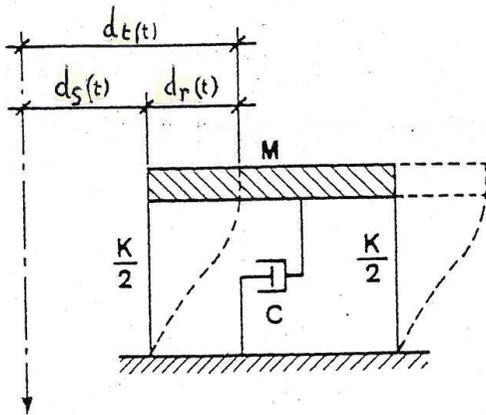


# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

### Systemes à 1 degré de liberté (1 DDL)



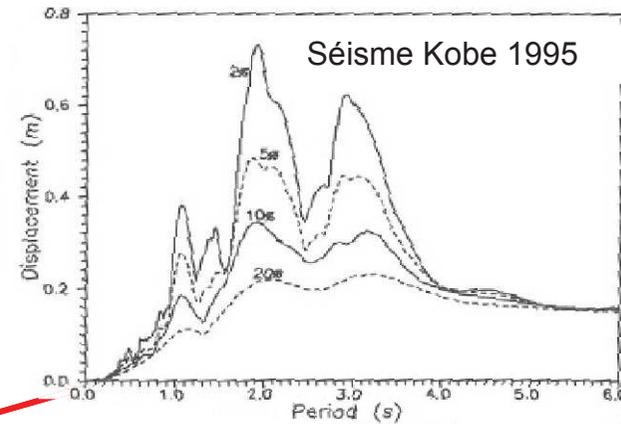
➤ Application au séisme :

*Intégrale de Duhamel :*

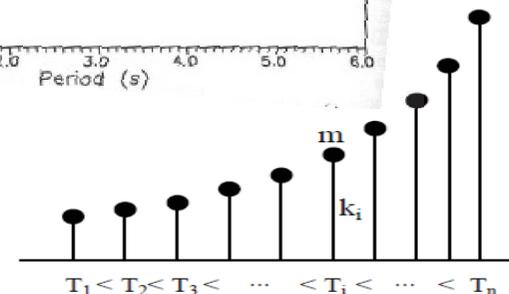
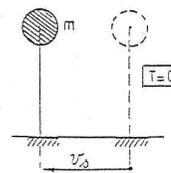
$$d_r(t) = - \frac{1}{\omega \sqrt{1-\xi^2}} \int_0^t \ddot{d}_s(\tau) e^{-\xi \omega (t-\tau)} \cdot \sin[\omega \sqrt{1-\xi^2} (t-\tau)] d\tau$$

*Pour 1 séisme donné :*

$$d_{r \max} = f(\omega_{struct}; \xi_{struct})$$



*Représente également la façon dont l'énergie sismique se répartit sur les différentes gammes de fréquence...*

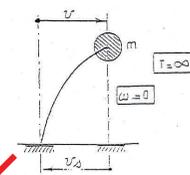
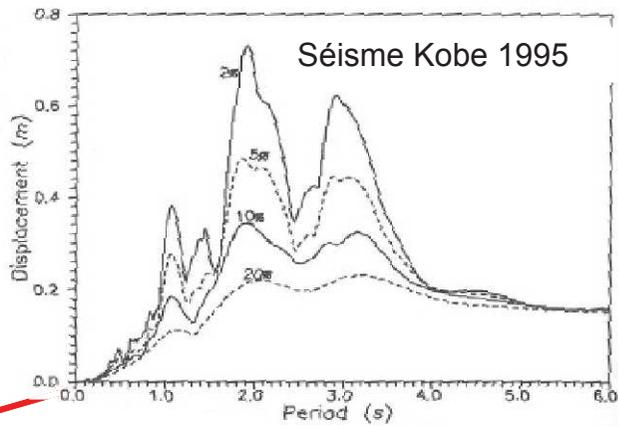


# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

### Systemes à 1 degré de liberté (1 DDL)



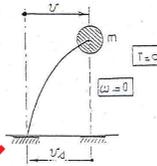
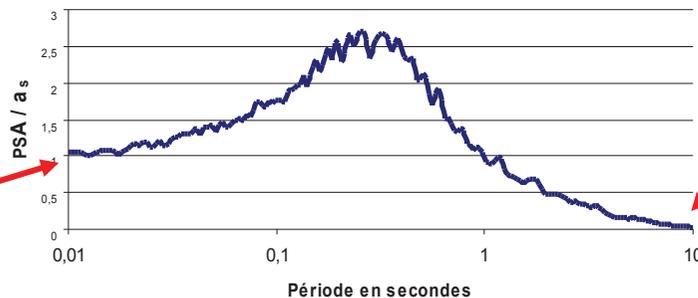
➤ Application au séisme :

Spectres en pseudo-accélération et pseudo-vitesse :

$$PSV = \omega \cdot d_{r \max}$$

$$PSA = \omega^2 \cdot d_{r \max}$$

Spectre de réponse élastique normalisé à 5 % d'amortissement



Équivalence statique :

$$F = K \cdot d_{r \max}$$

$$F = M \cdot PSA$$

$$F \cong M \cdot a_t$$

# Généralités sur les phénomènes sismiques

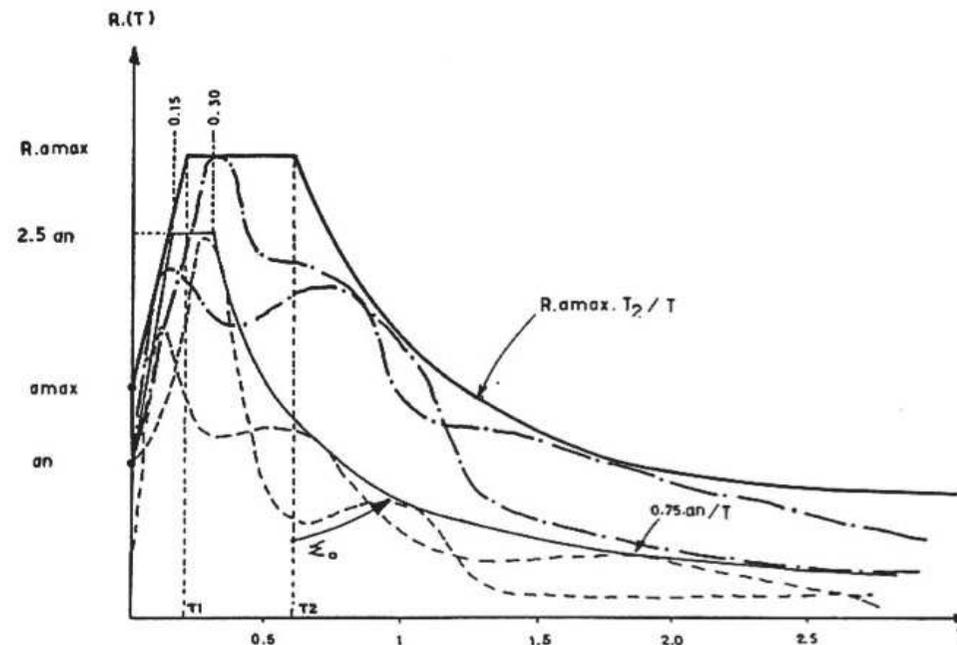
## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

### Systemes à 1 degré de liberté (1 DDL)

➤ Application au séisme :

Spectres réglementaires :  
Enveloppe « lissée » de spectres réels...



# Généralités sur les phénomènes sismiques

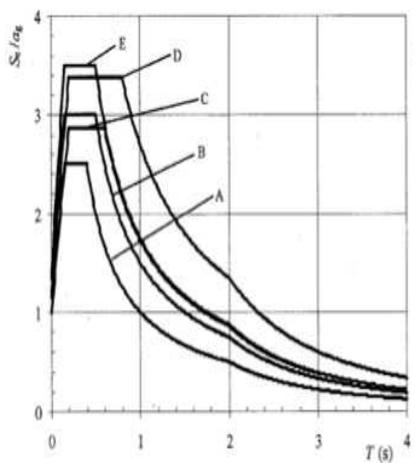
## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

### Systemes à 1 degré de liberté (1 DDL)

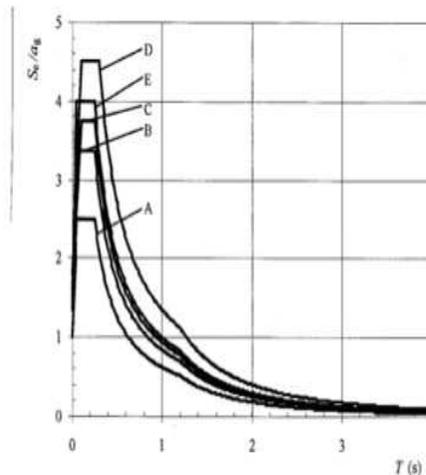
➤ Application au séisme :

### Spectres réglementaires EC8 :



Spectres de réponse élastique de type 1 recommandés pour les sols de classes A à E (à 5 % d'amortissement)

Antilles



Spectres de réponse élastique de type 2 recommandés pour les sols de classes A à E (à 5 % d'amortissement)

Métropole

$$0 \leq T \leq T_B : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[ 1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5$$

$$T_C \leq T \leq T_D : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[ \frac{T_C}{T} \right]$$

$$T_D \leq T \leq 4s : S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \left[ \frac{T_C T_D}{T^2} \right]$$

# Généralités sur les phénomènes sismiques

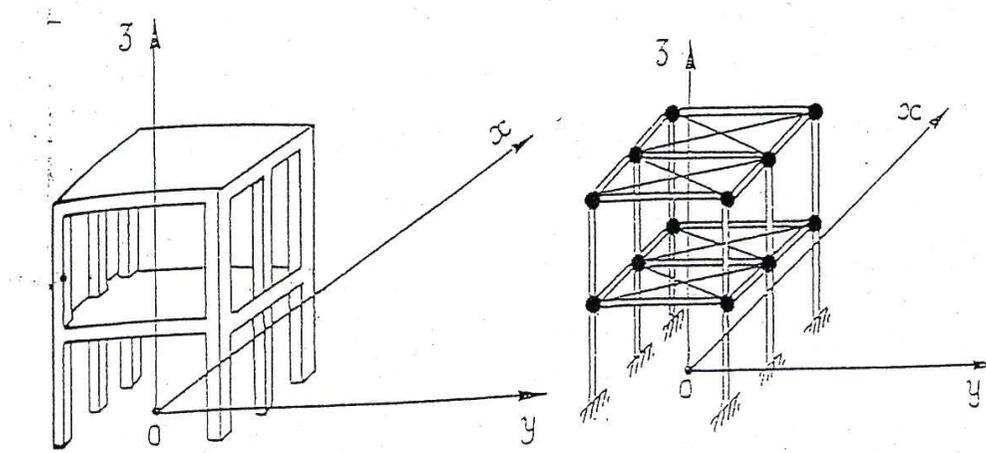
## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

### Systemes à plusieurs degré de liberté (n DDL)

#### ■ Modélisation basée sur :

- une discrétisation en masses ponctuelles
- des barres (ressorts) reliant ces masses
- un taux d'amortissement structural global ( $\xi_{\text{séisme}} = 5\%$  ;  $\xi_{\text{passerelles}} = 0,5\%$ )



# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

### Systemes à plusieurs degré de liberté (n DDL)

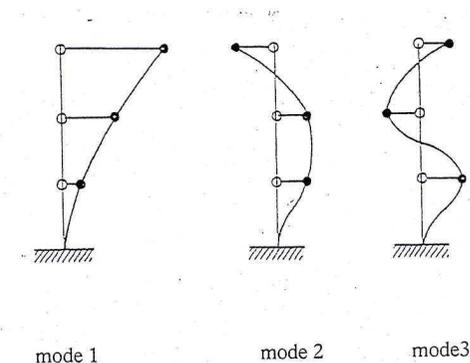
- Écriture matricielle de l'équation générale de la dynamique

$$[ M ] \{ \ddot{x}(t) \} = - [ K ] \{ x(t) \} - [ C ] \{ \dot{x}(t) \} + \{ F(t) \}$$

- Calcul des modes propres de vibration

- Combinaison quadratique des réponses modales :

$$S = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots}$$



Console verticale à 3 nœuds

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Principes de modélisation

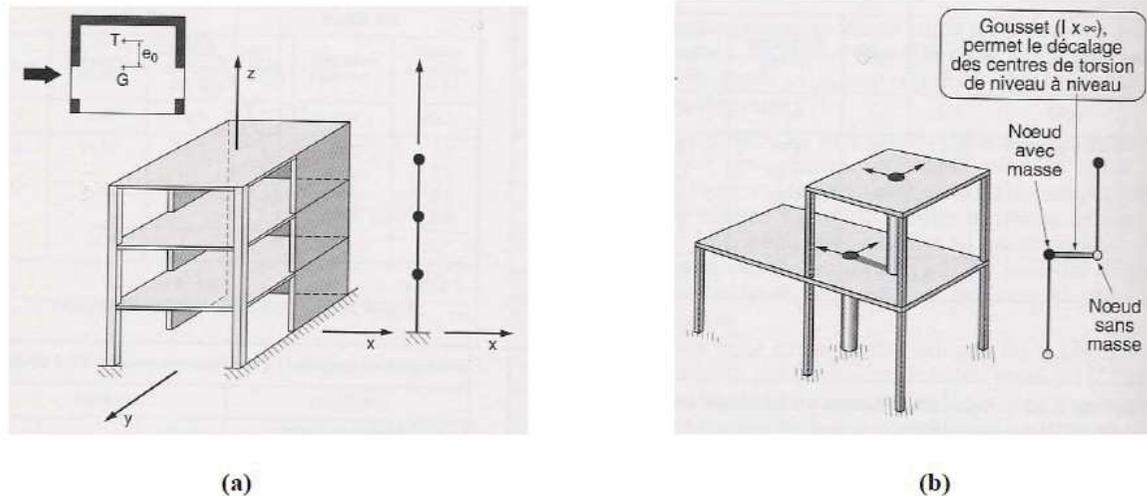


Figure 8 : Modélisations plane et spatiale de bâtiments simples (Davidovici [5])

- Modèle plan de type « brochette » pour les structures régulières en plan ( $e_0 \leq 0,30 r$ )
- Modèle spatial de type « manivelle » pour les structures irrégulières en plan (critère 1 non vérifié)

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Principes de modélisation

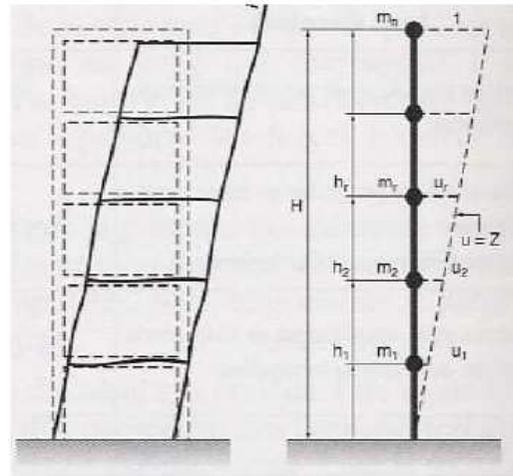


Figure 9 : Approximation du comportement sismique des bâtiments par la méthode du mode fondamental  
(Davidovici [5])

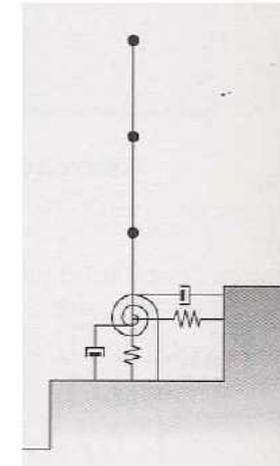
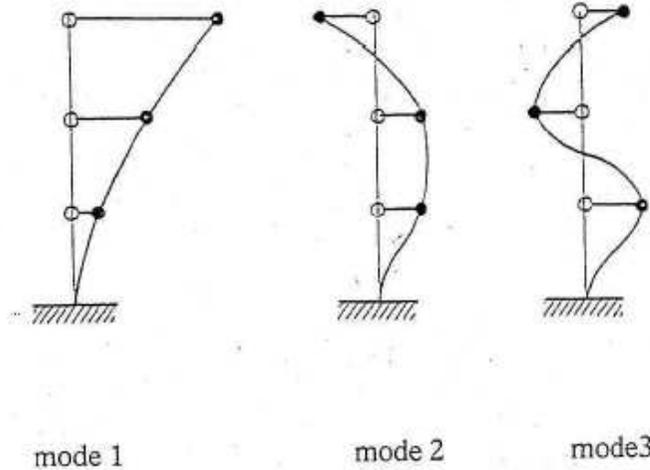


Figure 21 : Modélisation de la souplesse des fondations dans le cadre de la méthode de Rayleigh (Davidovici [5])

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Principes de modélisation



**Figure 10 : Modélisation de type « brochette » permettant de représenter le comportement sismique d'une structure à 3 étages, régulière en plan**

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Principes de modélisation

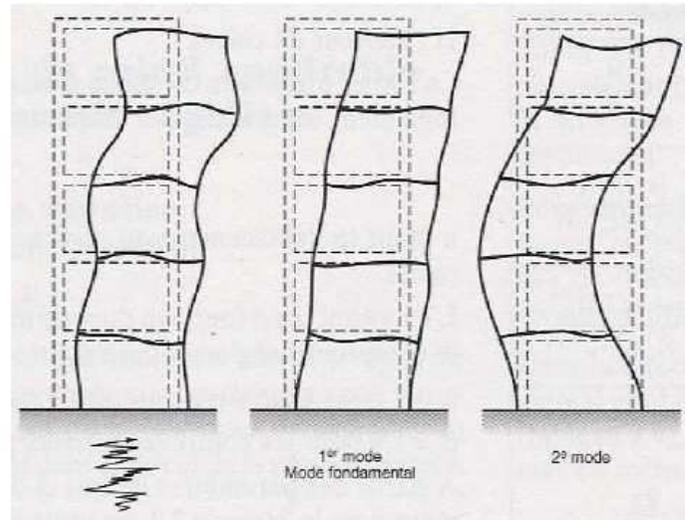
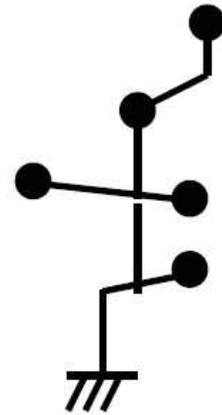


Figure 11 : Modélisation de type portique permettant de représenter la souplesse des éléments horizontaux (cas des structures ne vérifiant pas le critère 3 de régularité en plan) (Davidovici [5])

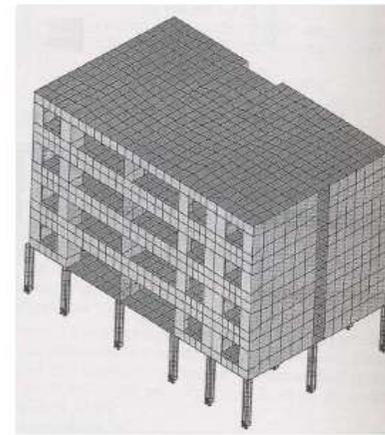
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Principes de modélisation



(a)



(b)

Figure 12 : Modélisations spatiales permettant de représenter les structures irrégulières en plan et en élévation

- Modèle simplifié de type « manivelle » (cas des structures ne respectant pas le critère 1 de régularité en plan ou 4 de régularité en élévation)
- Modélisation complète de la géométrie du bâtiment (cas des structures très complexe ou à fort enjeu socio-économique) (Davidovici [5])

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Principes de modélisation

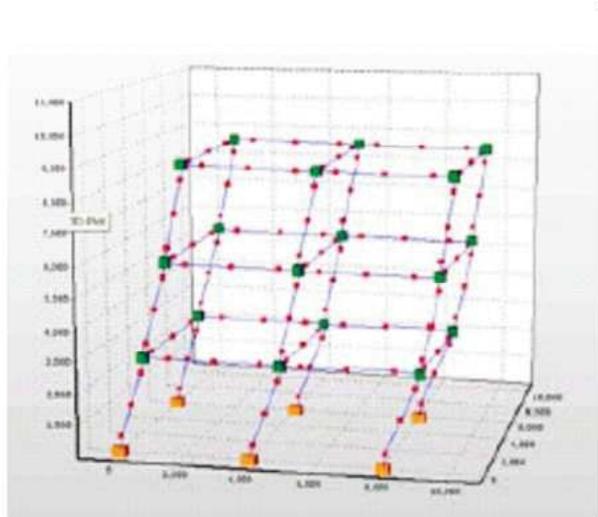


Figure 13 : Méthode d'analyse statique non-linéaire de type « push-over »

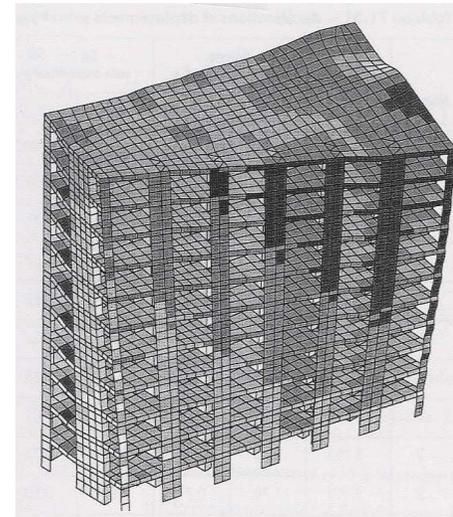
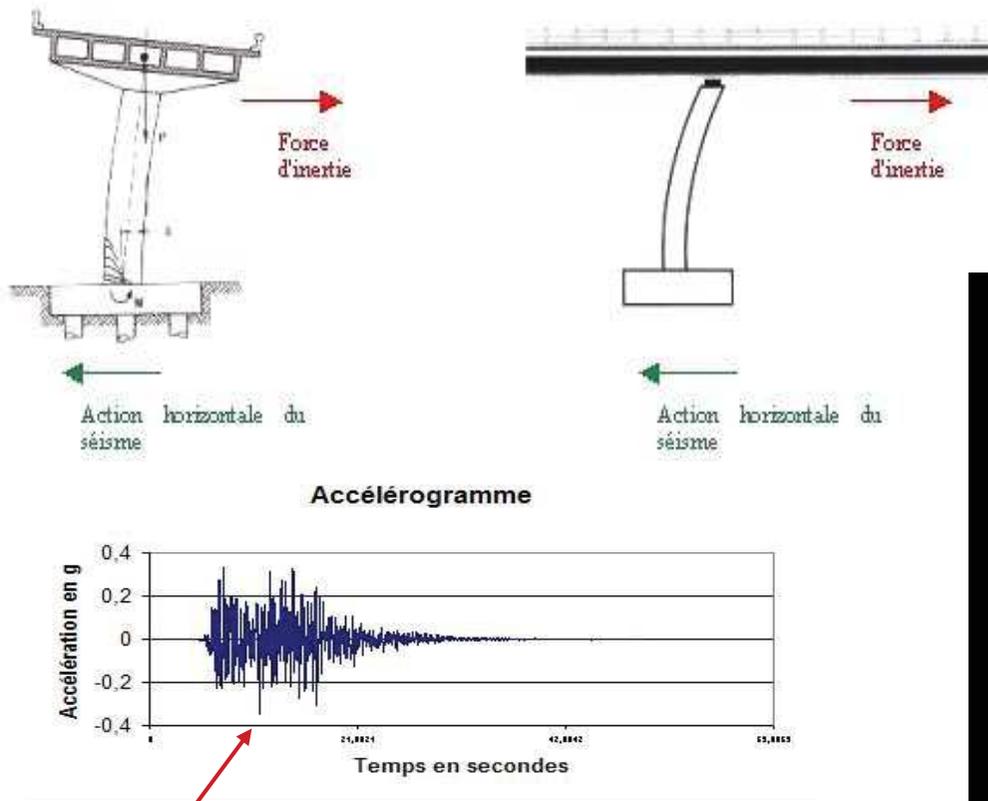


Figure 14 : Modèle de calcul temporel non-linéaire permettant de représenter en fonction du temps les niveaux de sollicitations dans la structure (Davidovici [5])

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

- Le phénomène vibratoire

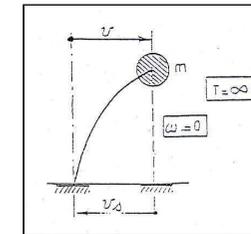
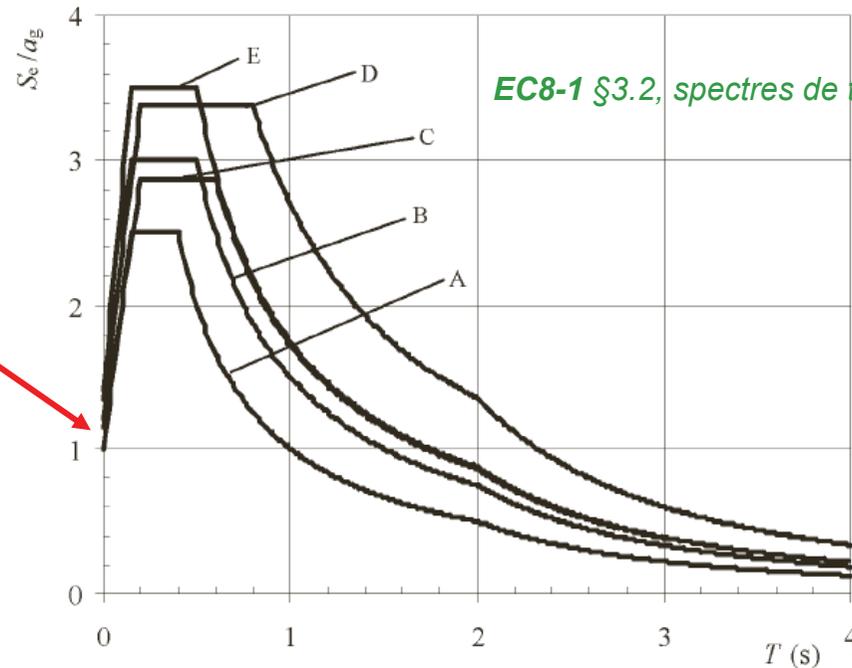
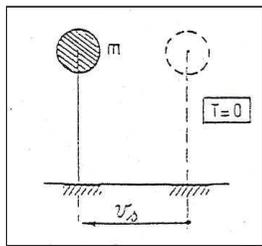


$a_{gr}$  : accélération maximale enregistrée au rocher

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

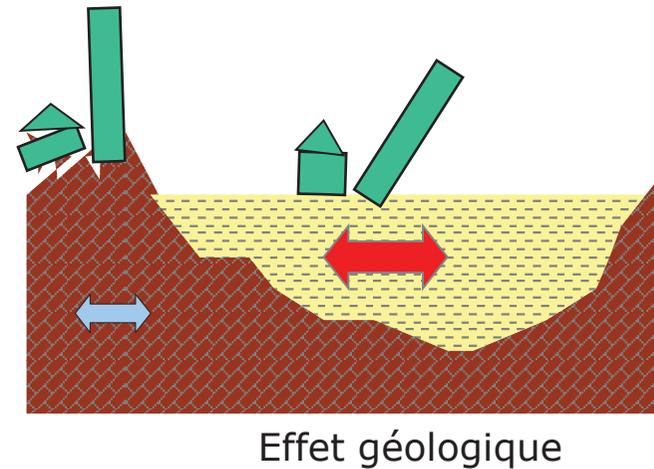
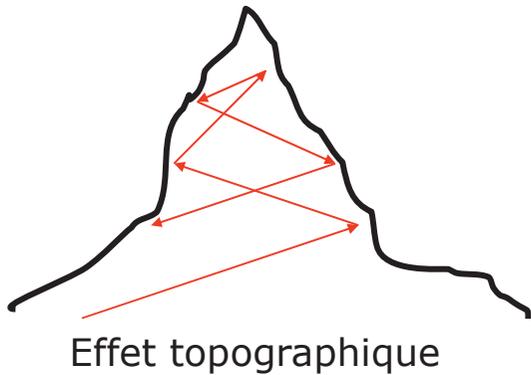
- Contenu fréquentiel du signal sismique et effets de site



# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

- Contenu fréquentiel du signal sismique et effets de site



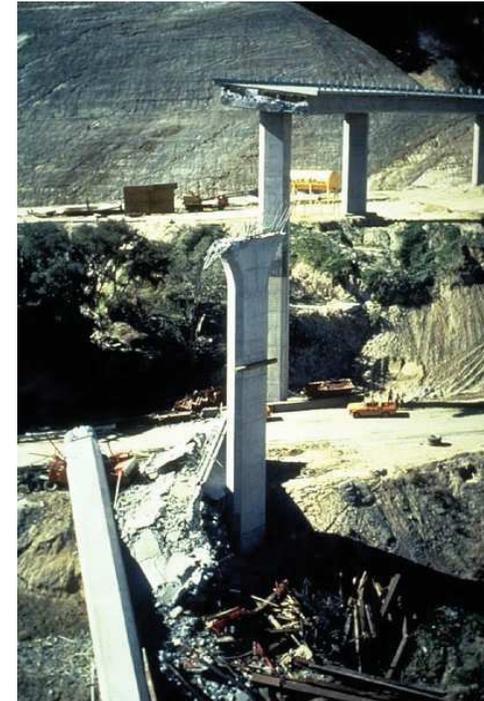
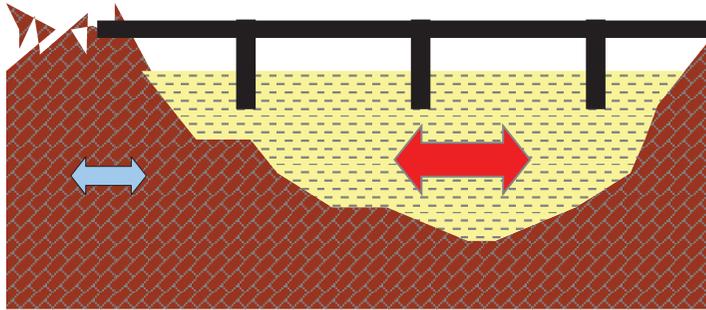
Privilégier

- les structures raides sur sols mou,
- les structures souples sur sol raides.

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

- Variabilité spatiale de l'action sismique



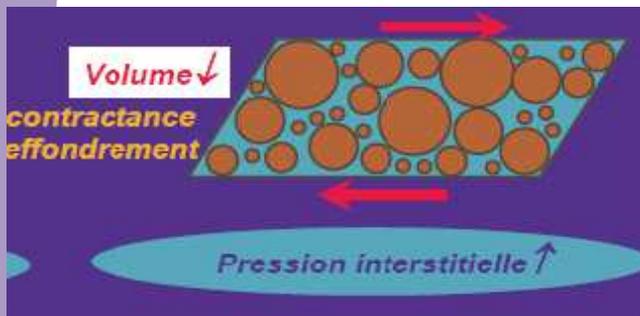
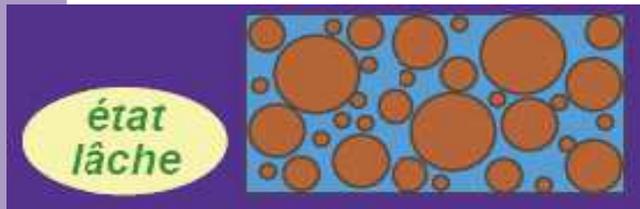
San Fernando (USA, 1971)

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

- Effets induits

### Liquéfaction du sol porteur

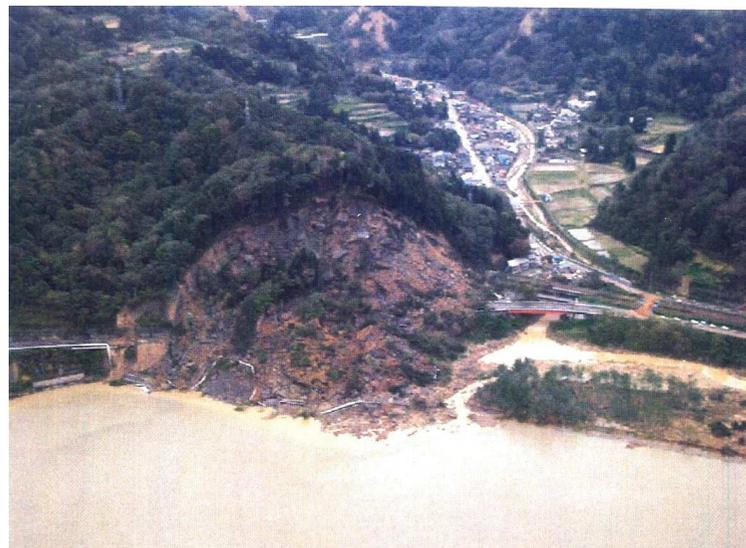


# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

- Effets induits

### Chutes de blocs et glissements de terrain



# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

- Effets induits

### Ruptures de failles en surface



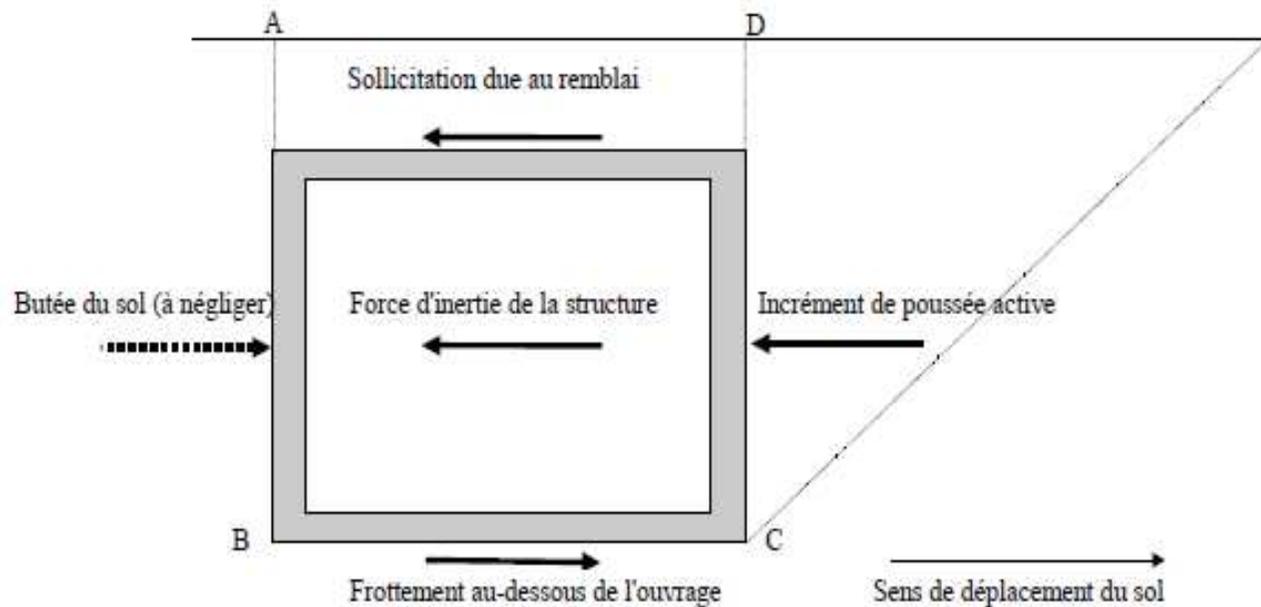
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

- Exemples de prise en compte

### Approches statiques forfaitaires

- Action du séisme sur les ponts-cadres et portiques**



# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

- Exemples de prise en compte

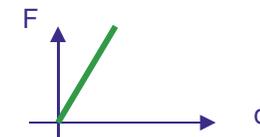
### Approches statiques forfaitaires

- Le dimensionnement des structures pare-blocs

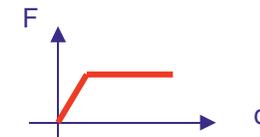


### Équivalence énergétique :

- Choc élastique :  $\frac{1}{2} m.v^2 = \frac{1}{2} k.x^2$



- Choc élasto-plastique :  $\frac{1}{2} m.v^2 = F.x$



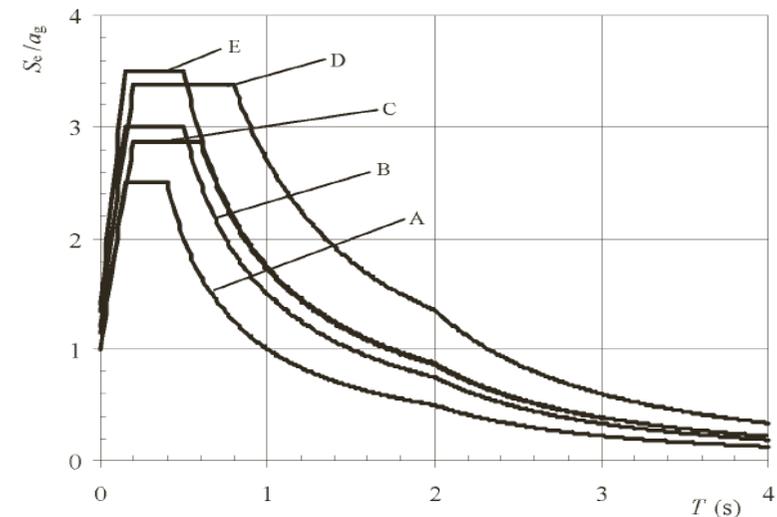
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

- Exemples de prise en compte

### Analyses modales (spectrales)

- Action du séisme sur les ouvrages « réguliers »



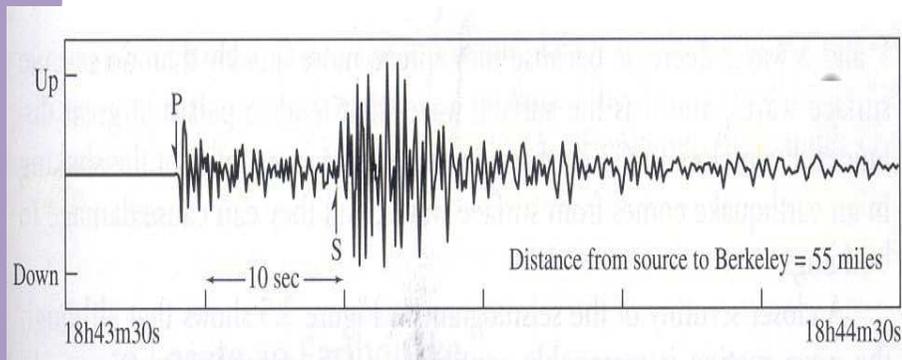
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

- Exemples de prise en compte

### Analyses dynamiques temporelles

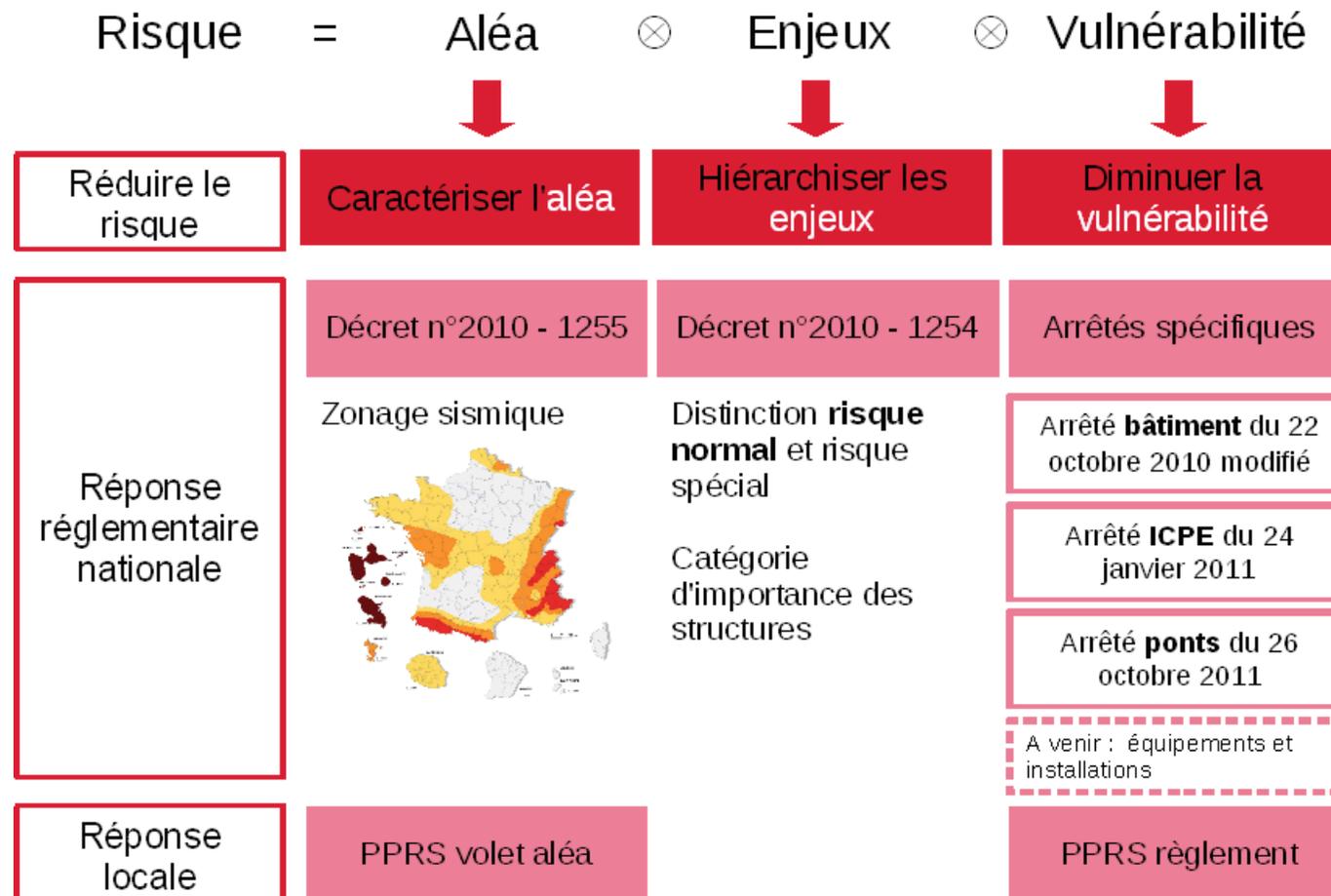
- Action du séisme sur les ouvrages « complexes »



# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Rappel de la législation en vigueur

- Vue d'ensemble



# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Rappel de la législation en vigueur

- Le nouvel arrêté « ponts »



**Arrêté ponts  
26 octobre 2011**

- Fixe les nouveaux paramètres de dimensionnement des ouvrages neufs :
  - Définition de l'aléa (accélérations et spectres de calcul)
  - Définition des catégories d'importance
- Impose l'application de l'**Eurocode 8** (NF EN 1998-2, NF EN 1998-1 et NF EN 1998-5 + AN)
- Domaine d'application : **OA neufs** (yc passerelles et murs solidaires), **zones  $\geq 2$**  et **cat.  $\geq II$** , vis-à-vis de la seule **exigence de non-effondrement** (Etat-Limite Ultime)
- Impose une analyse de l'aléa **liquéfaction** uniquement pour les **zones  $\geq 3$**

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Rappel de la législation en vigueur

- Référentiel normatif relatif aux ponts en zones sismiques

### Législation nationale

- Décret n°2010-1254 du 22 octobre 2010 relatif à la prévention du risque sismique
- Décret n°2010-1255 du 22 octobre 2010 portant délimitation des zones de sismicité du territoire français
- Arrêté du 26 octobre 2011 relatif à la classification et aux règles de construction parasismique applicables aux ponts de la catégorie dites "à risque normal"

### Normes de calcul européennes et leurs Annexes Nationales

- NF EN1998-1 et NF EN1998-1/NA - Eurocode 8 : Calcul des structure pour leur résistance aux séismes – Partie 1 : Règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments
- NF EN1998-2 et NF EN1998-2/NA - Eurocode 8 : Calcul des structure pour leur résistance aux séismes – Partie 2 : Ponts
- NF EN1998-5 et NF EN1998-5/NA - Eurocode 8 : Calcul des structure pour leur résistance aux séismes – Partie 5 : Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques

### Normes « produits » européennes

NF EN 15129 : Dispositifs antisismiques

Ne couvre pas la problématique des ponts existants !