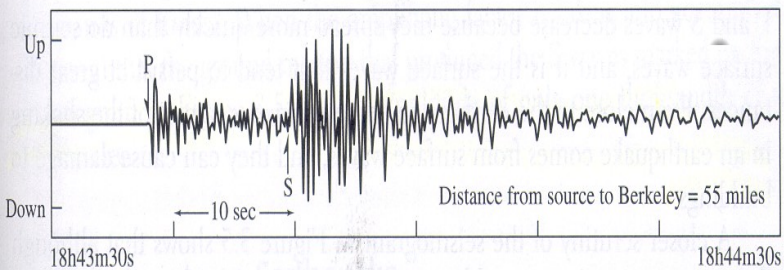


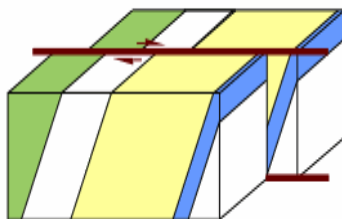
## Journée technique

### PRISE EN COMPTE DU RISQUE SISMIQUE

# Généralités sur les phénomènes sismiques



Déformation cassante - Régime coulissant



FAILLE DE DÉCROCHEMENT

Denis DAVI  
CETE Méditerranée



Ressources, territoires, habitats et logement  
Énergies et climat Développement durable  
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

Présent  
pour  
l'avenir

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Plan de l'exposé

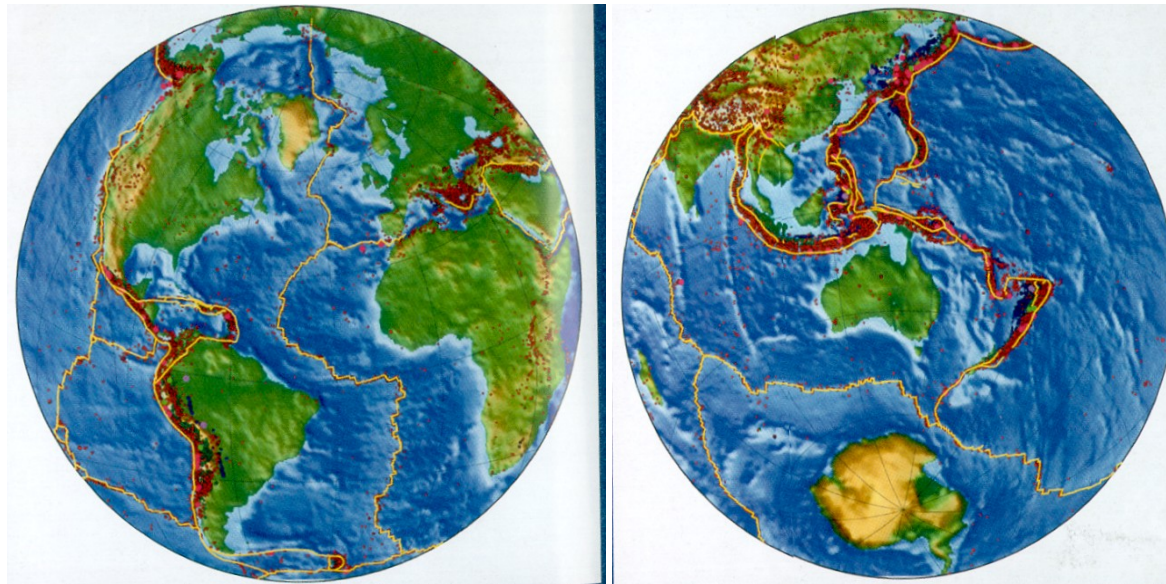
- Notions générales de sismologie
- Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation
- Représentation des actions sismiques sur les ponts

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Notions générales de sismologie

- Caractérisation de l'aléa sismique

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



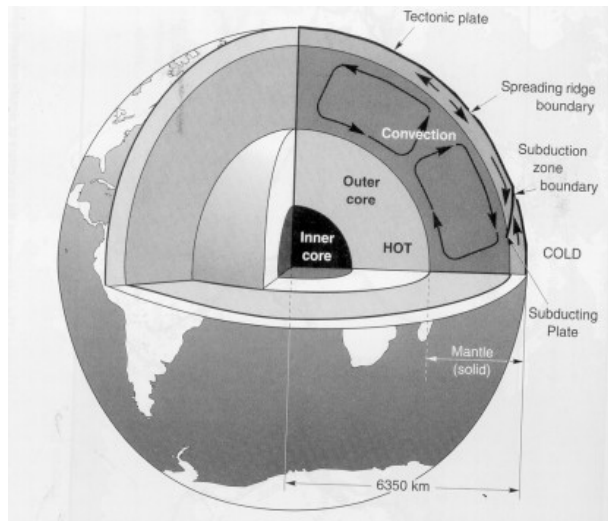
La localisation des séismes

# 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

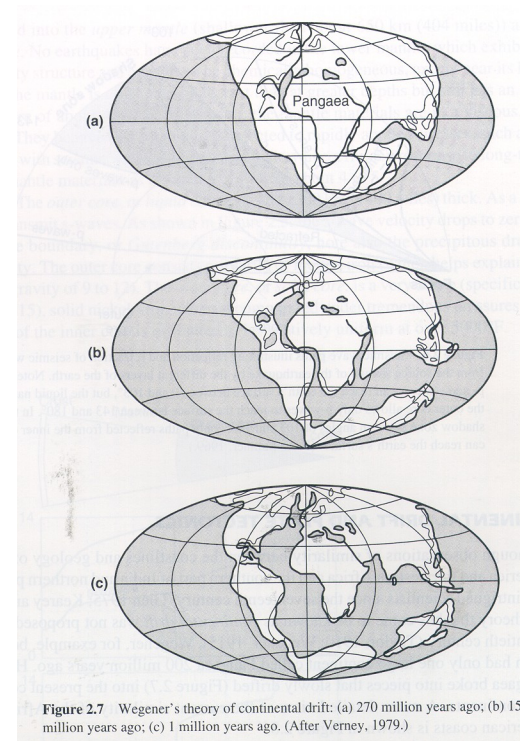


Figure 2.7 Wegener's theory of continental drift: (a) 270 million years ago; (b) 150 million years ago; (c) 1 million years ago. (After Verney, 1979.)

La dérive des continents

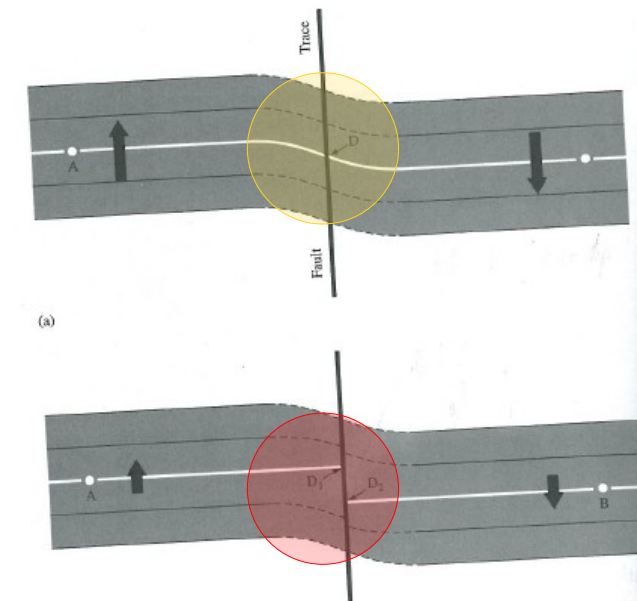
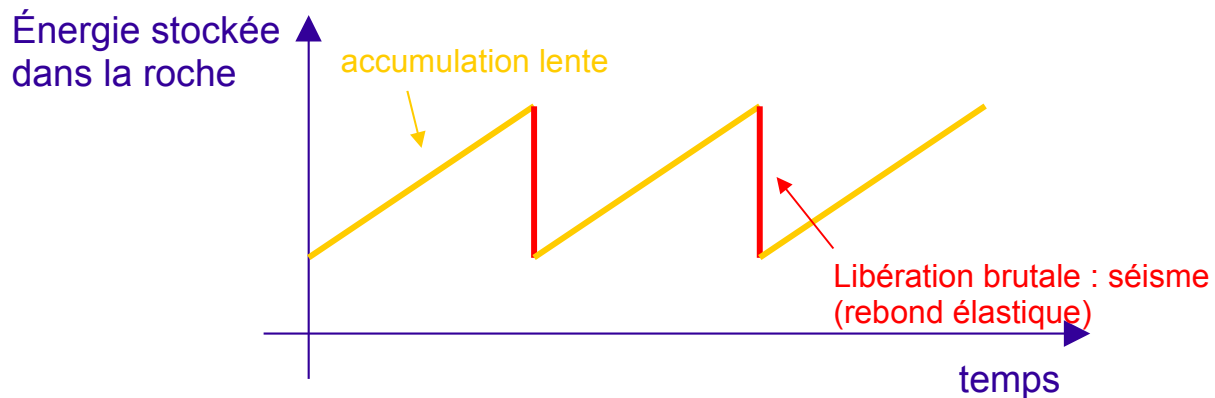
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## 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...

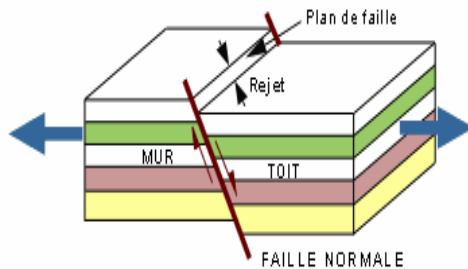
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Notions générales de sismologie

- Caractérisation de l'aléa sismique

### Les mécanismes de rupture

Déformation cassante - Régime extensif

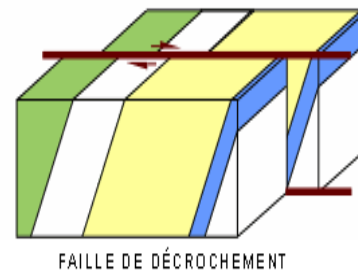


Petits séismes

$$M < 3$$

Ex : Rifts océaniques

Déformation cassante - Régime coulissant

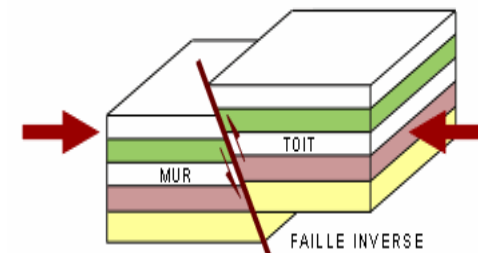


Séismes moyens à forts

$$3 < M < 7.5$$

Ex : Région PACA  
Californie (faille de San Andreas)

Déformation cassante - Régime compressif



Séismes très forts

$$M > 8$$

Ex : Caraïbes  
Chili, Alaska, Turquie, Japon

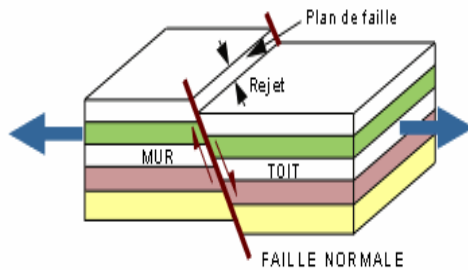
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Notions générales de sismologie

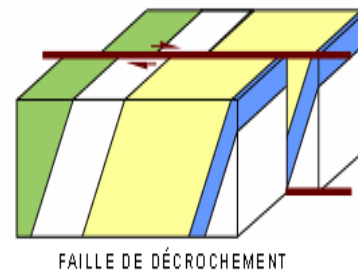
- Caractérisation de l'aléa sismique

### Les mécanismes de rupture

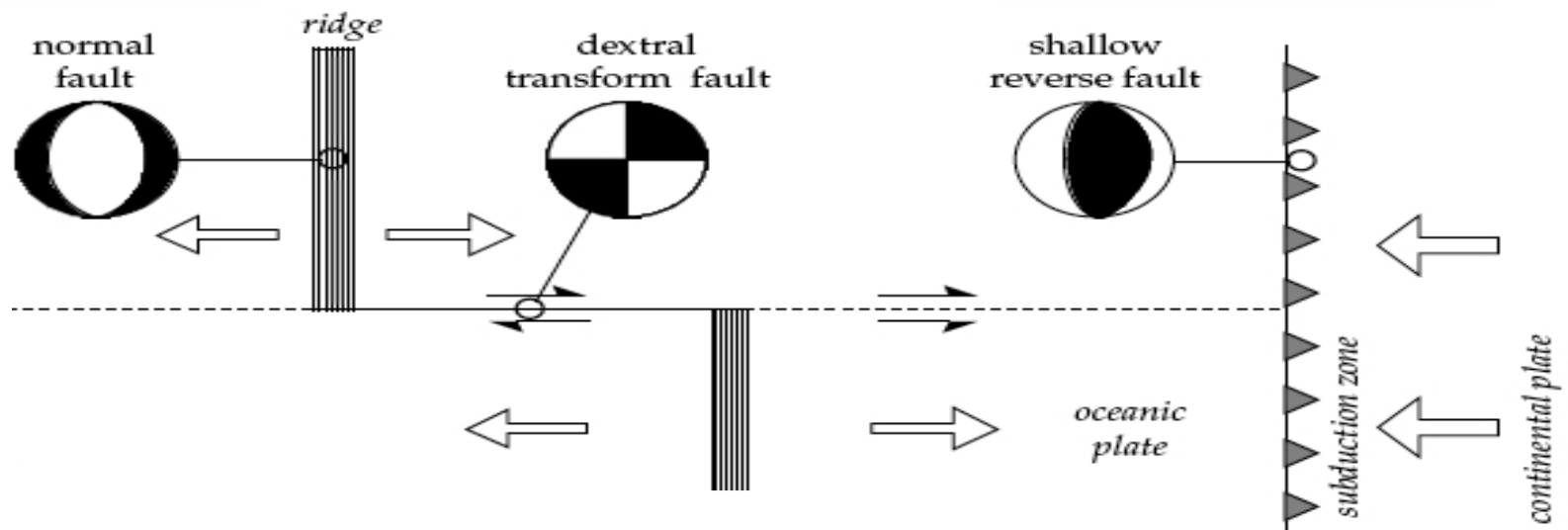
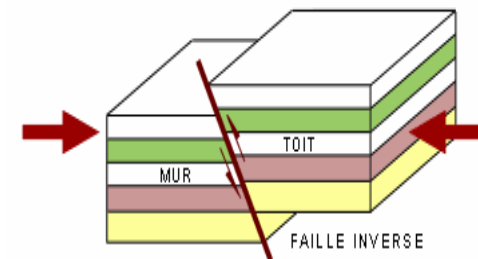
Déformation cassante - Régime extensif



Déformation cassante - Régime couissant



Déformation cassante - Régime compressif

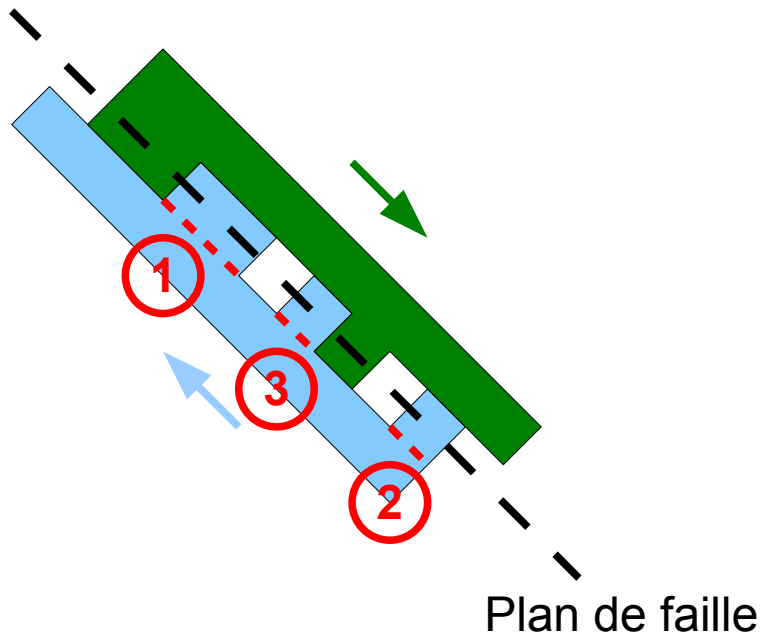


# Généralités sur les phénomènes sismiques

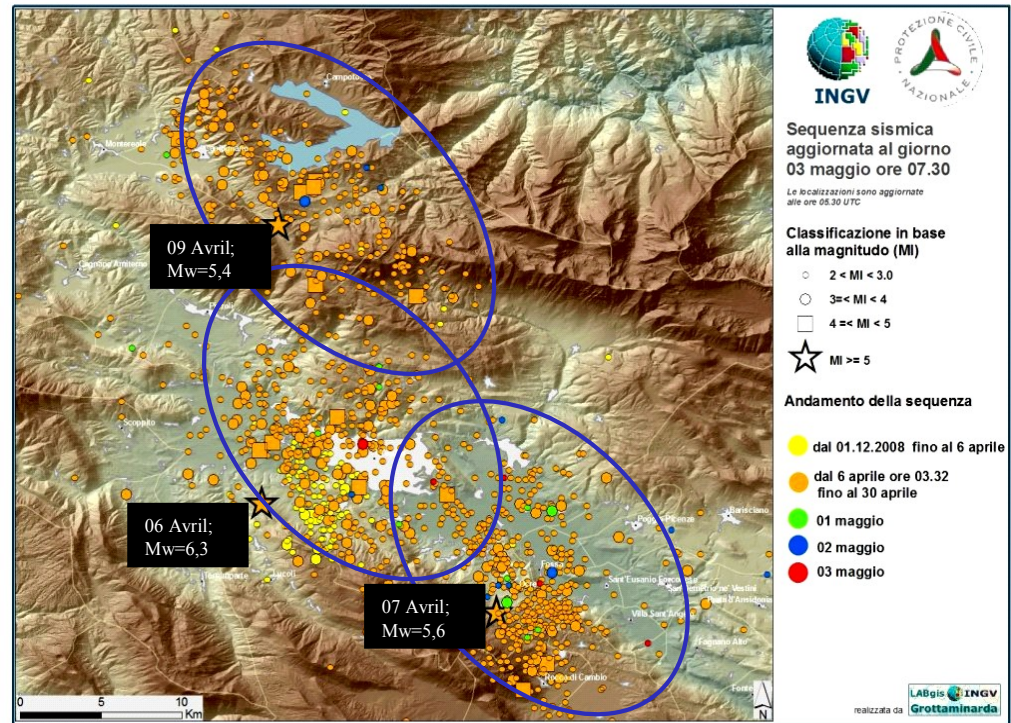
## Notions générales de sismologie

- 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

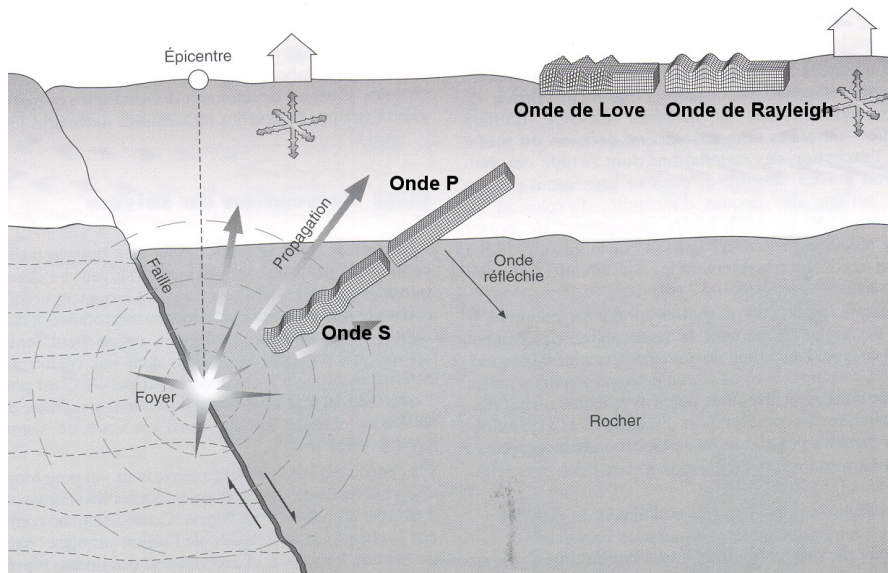


# Généralités sur les phénomènes sismiques

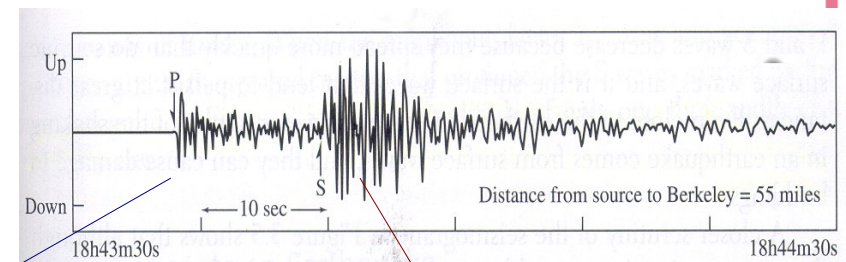
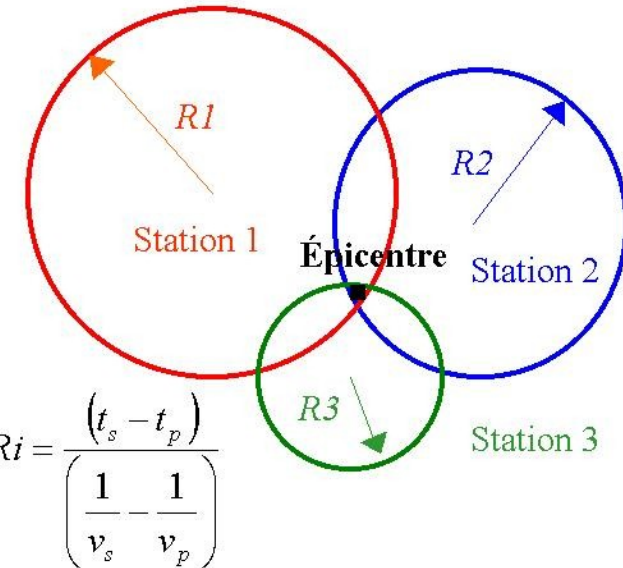
## Notions générales de sismologie

- 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 intensités de Mercalli (1902)

I	<b>Secousse non perceptible</b>
II	<b>Secousse à peine perceptible</b>
III	<b>Secousse ressentie de façon partielle</b>
IV	<b>Secousse largement ressentie</b>
V	<b>Réveil des dormeurs</b>
VI	<b>Frayeur</b>
VII	<b>Dommmages aux constructions</b>
VIII	<b>Destructions de bâtiments</b>
IX	<b>Dommmages généralisés aux constructions</b>
X	<b>Destruction générale des bâtiments</b>
XI	<b>Catastrophe</b>
XII	<b>Changement de paysage</b>



# 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 (1935)

Magnitude	Nbre de séismes par an	Energie libérée	Durée de la rupture	Glissement moyen	Longueur de glissement
9			250 s	8 m	800 km
8	1		85 s	5 m	250 km
7	18		15 s	1 m	50 km
6	125	E x 900	3 s	20 cm	10 km
5	1500	E x 30	1 s	5 cm	3 km
4	5000	E	0,3 s	2 cm	1 km
3		E / 30			
2		E / 900			
1					

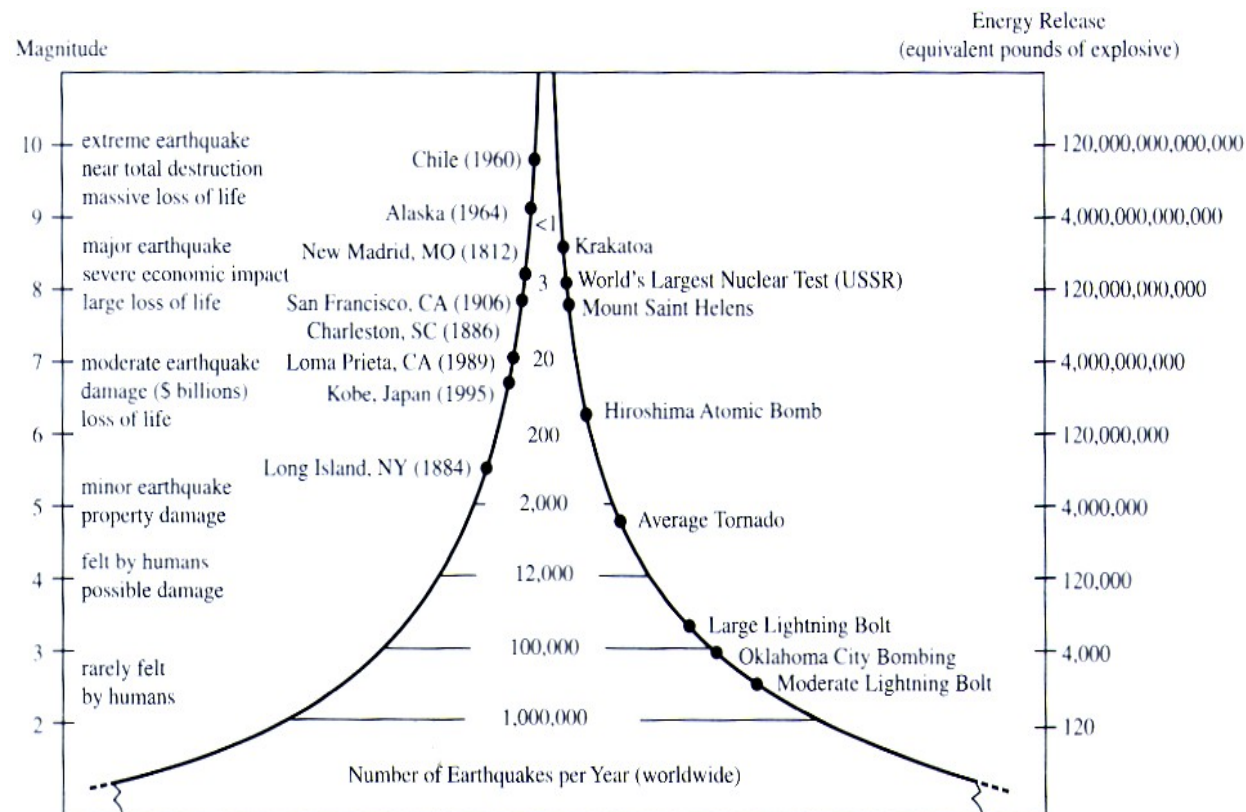
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Notions générales de sismologie

- Caractérisation de l'aléa sismique

### Les grandeurs qui caractérisent les séismes

#### L'échelle des Magnitudes de Richter (1935)



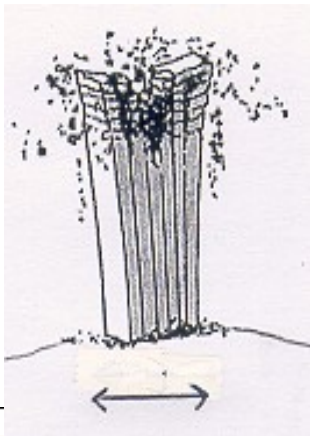
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## 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



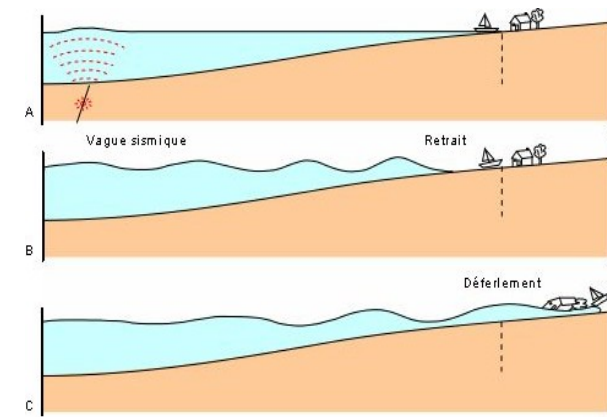
Les glissements de terrain et chutes de rochers



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)

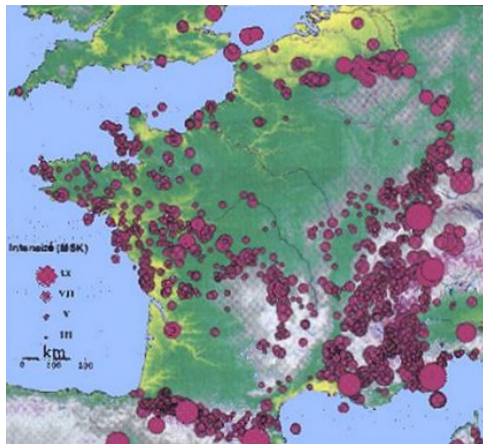


# Généralités sur les phénomènes sismiques

## 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



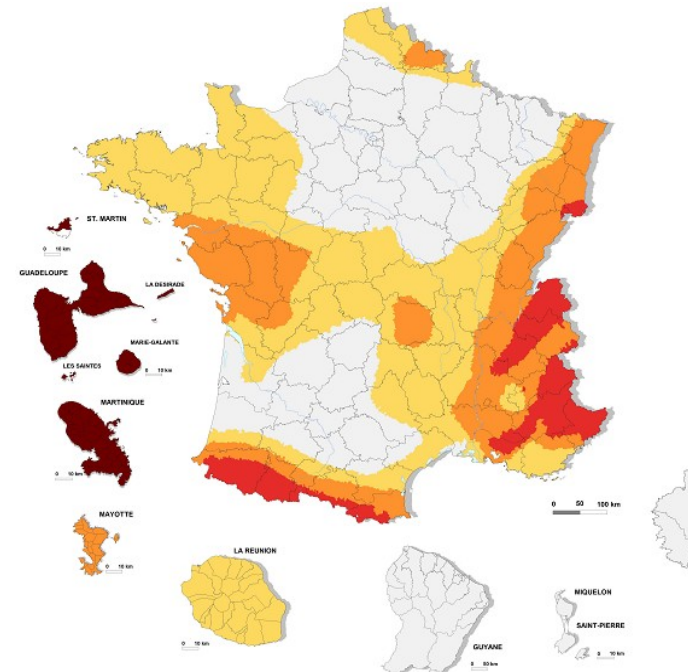
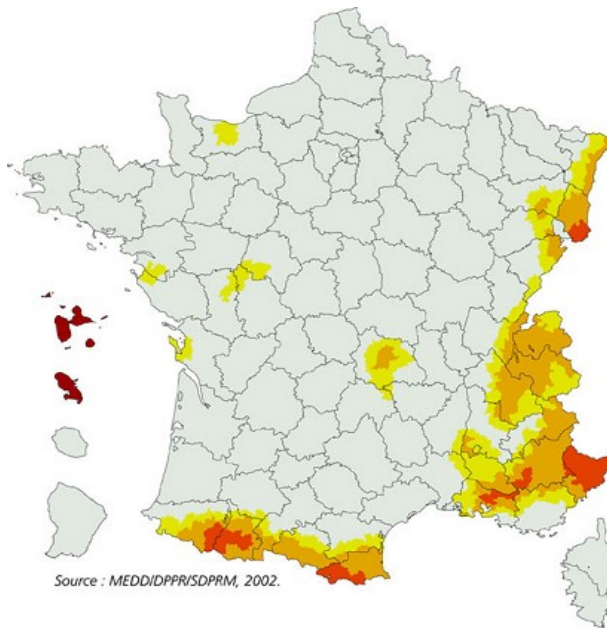
Lambesc, proximité de  
Salon-de-Provence, 1909

# 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. $\geq 2$ ) :

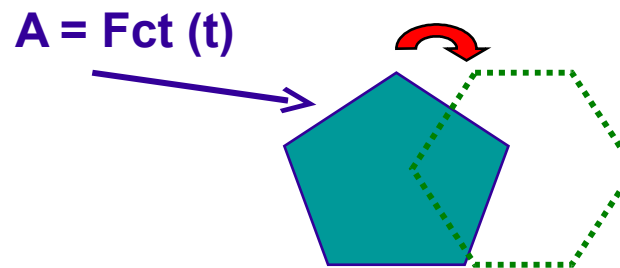
- > 21000 communes concernées
- 66% du territoire

# 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 :



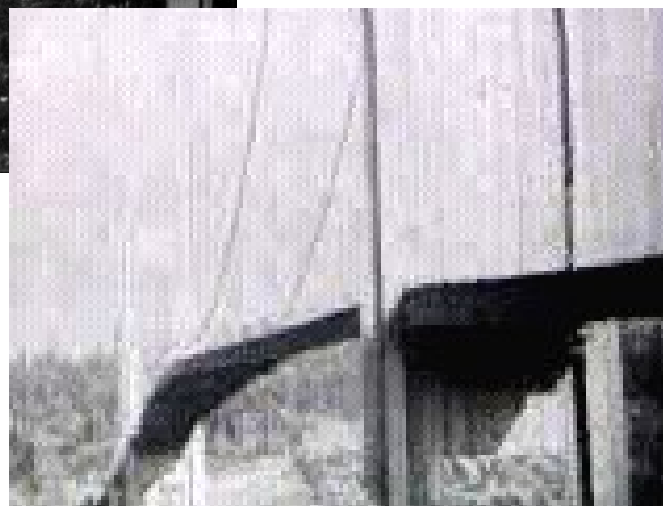
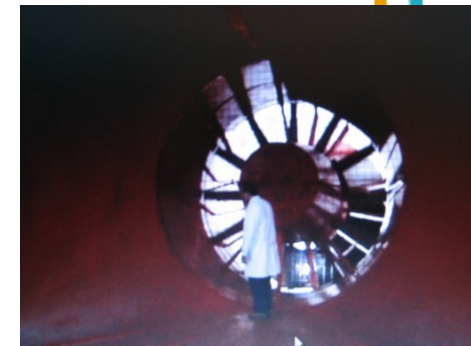
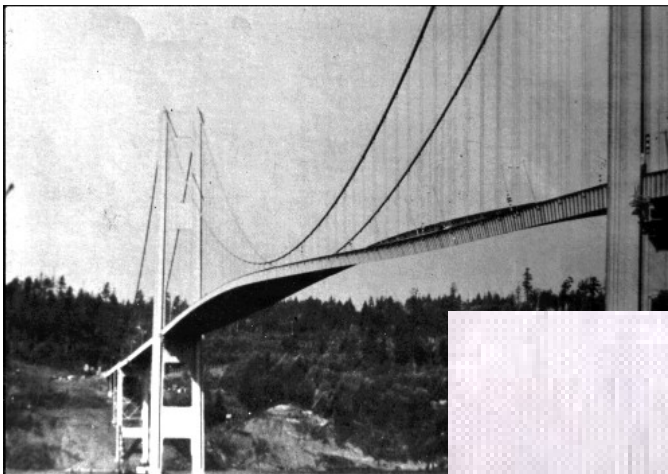
Elles se traduisent par une variation de la réponse de la structure au cours du temps (mouvement et/ou déformation) engendrant des effets inertiels ou forces d'inertie (= masse x accélération).

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Exemples d'actions dynamiques sur les OA :

### Le vent...

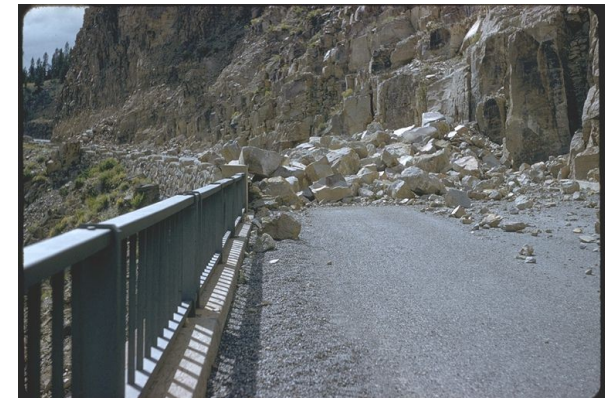


# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Exemples d'actions dynamiques sur les OA :

### Les chocs...

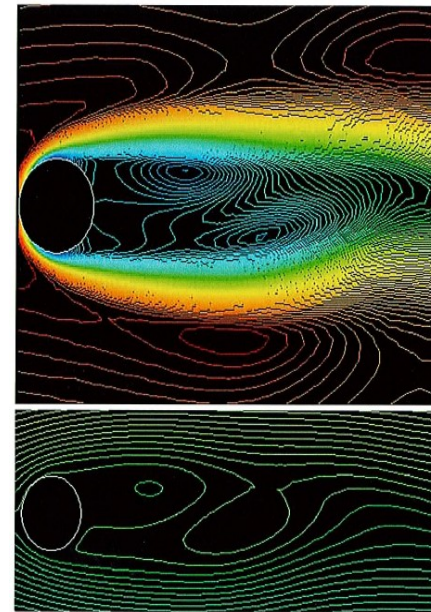
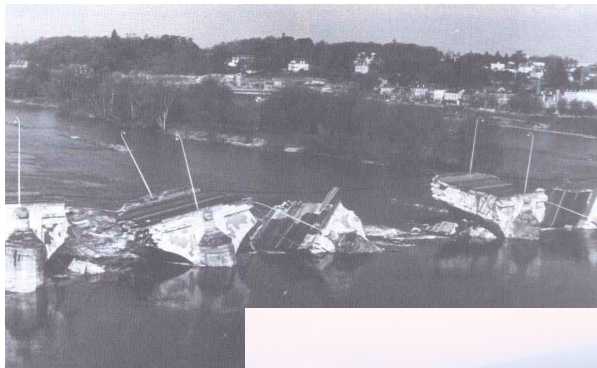


# Généralités sur les phénomènes sismiques

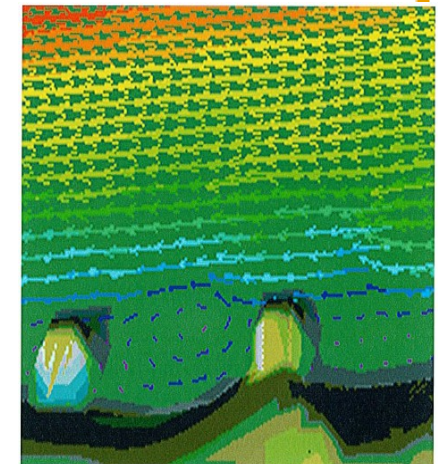
## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- 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



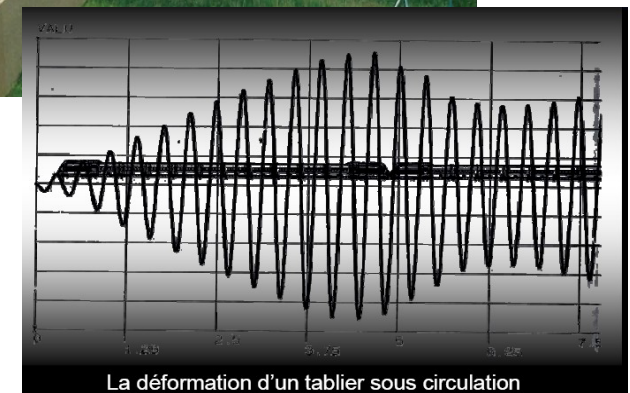
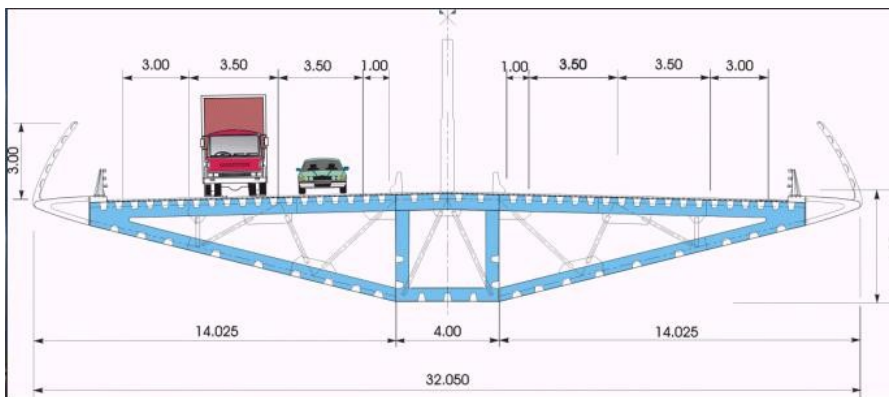
Partie 2 - Figure 9 : modélisation 2D d'un écoulement tourbillonnaire entre deux piles de pont - Source : D. GOUX (CETE Normandie-Centre - LRPC Blois)

# 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 Mimosa

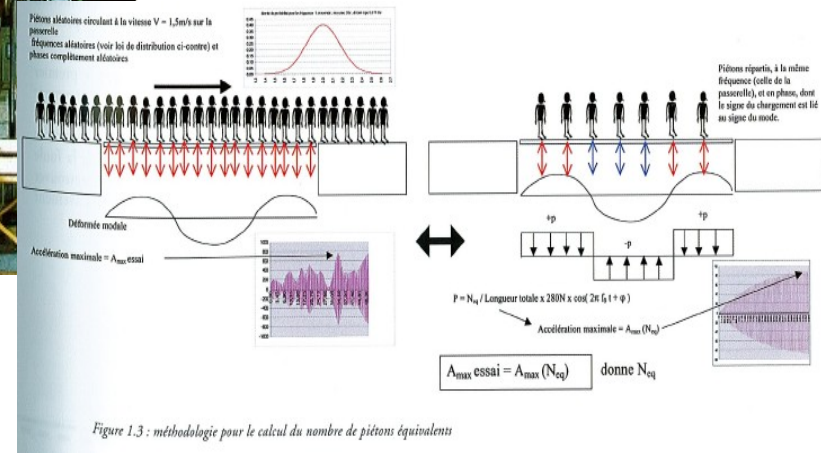


Figure 1.3 : méthodologie pour le calcul du nombre de piétons équivalents



# 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

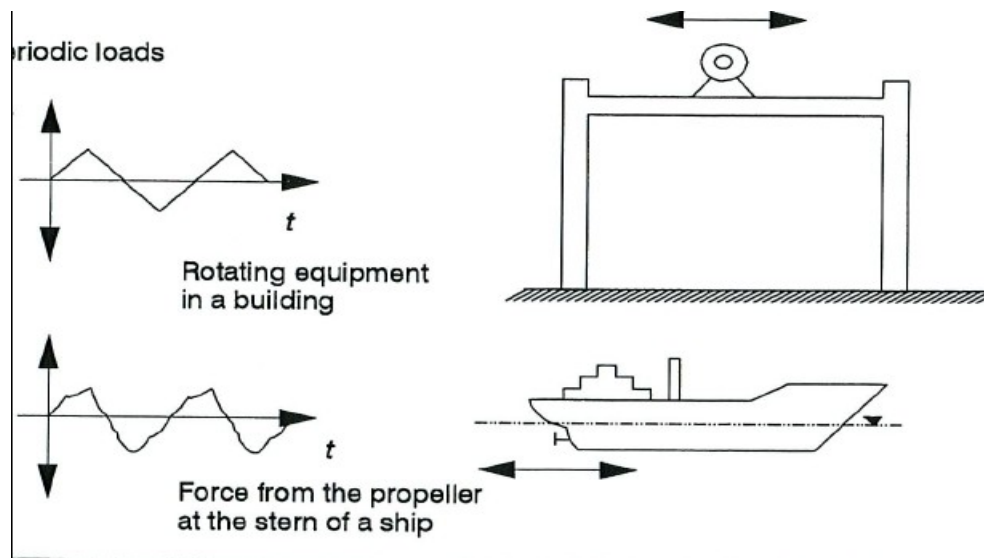
## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- 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

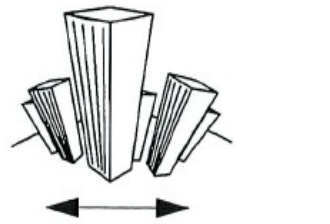
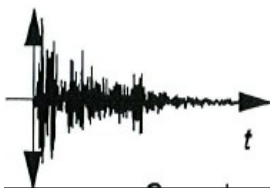
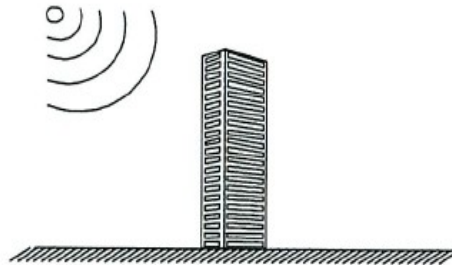
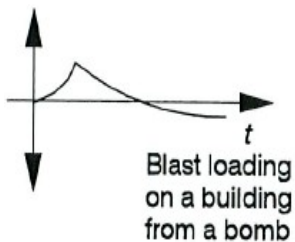
- Classification des actions dynamiques

### Actions déterministes

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

#### ■ Actions non-périodiques

1 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.

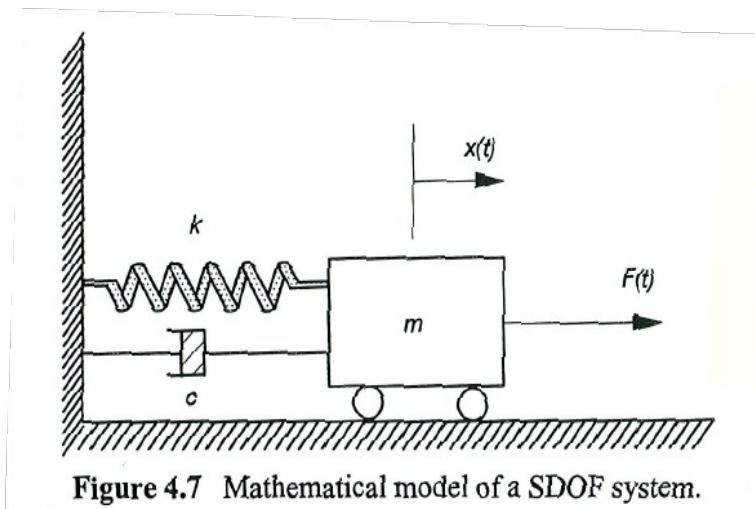
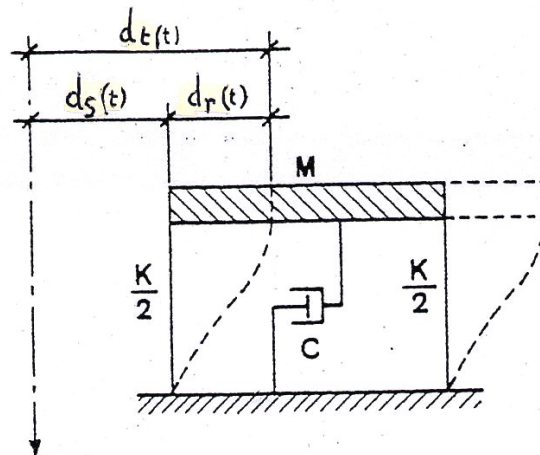


Figure 4.7 Mathematical model of a SDOF system.

# 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 :

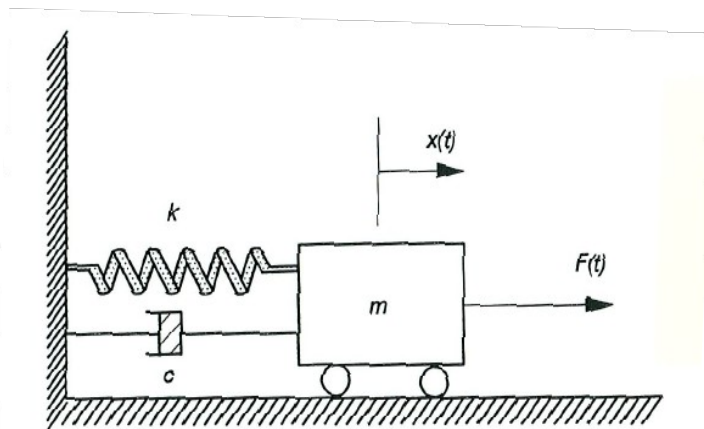


Figure 4.7 Mathematical model of a SDOF system.

$$m \cdot a(t) = \sum F_{ext}(t) = F(t) - k \cdot x(t) - c \cdot v(t)$$

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

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

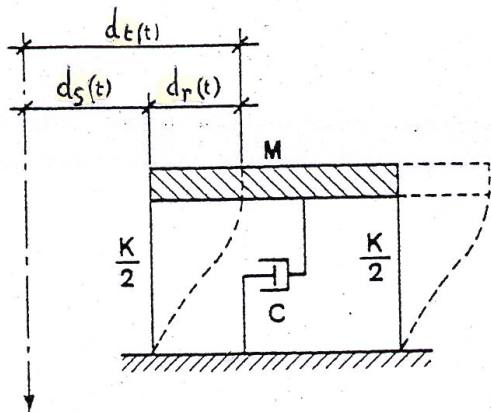


# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

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



➤ Application au séisme :

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

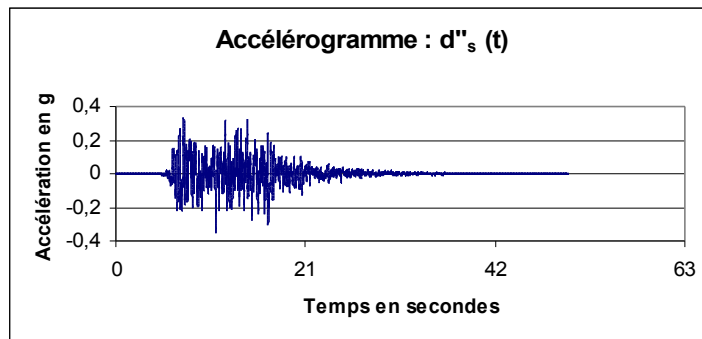
$$M (\ddot{d}_s(t) + \ddot{d}_r(t)) = -K d_r(t) - C \dot{d}_r(t)$$

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

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

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

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

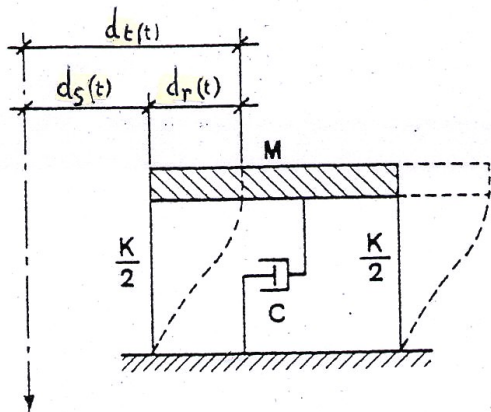


# Généralités sur les phénomènes sismiques

## 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 :

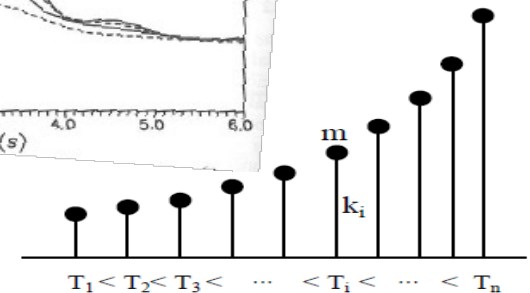
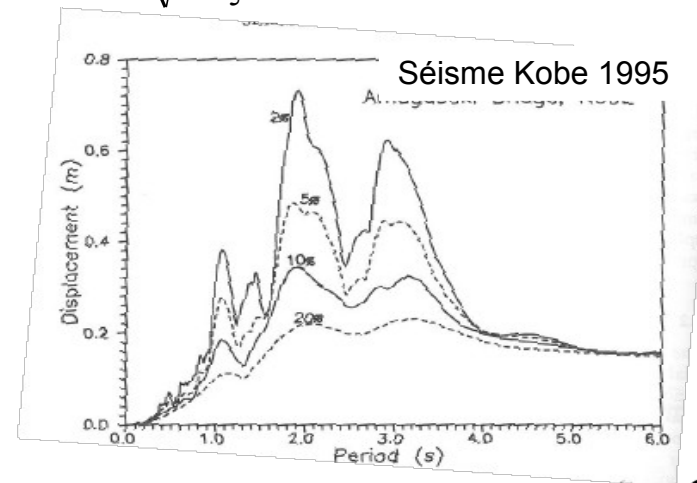
*Intégrale de Duhamel :*

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

*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...*

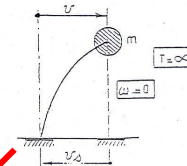
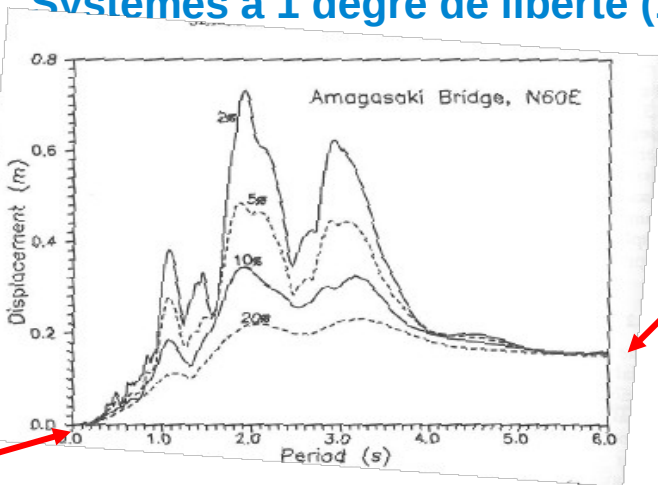


# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

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

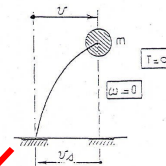
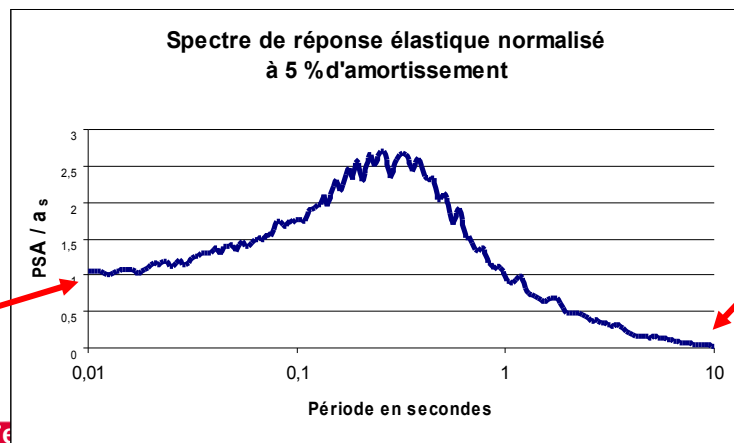


Spectres en pseudo-accélération et pseudo-vitesse :

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

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

Spectre de réponse élastique normalisé à 5 % d'amortissement

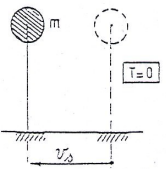
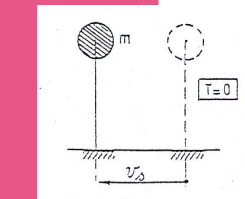


Équivalence statique :

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

$$F = M \cdot PSA$$

$$F \cong M \cdot a_t$$



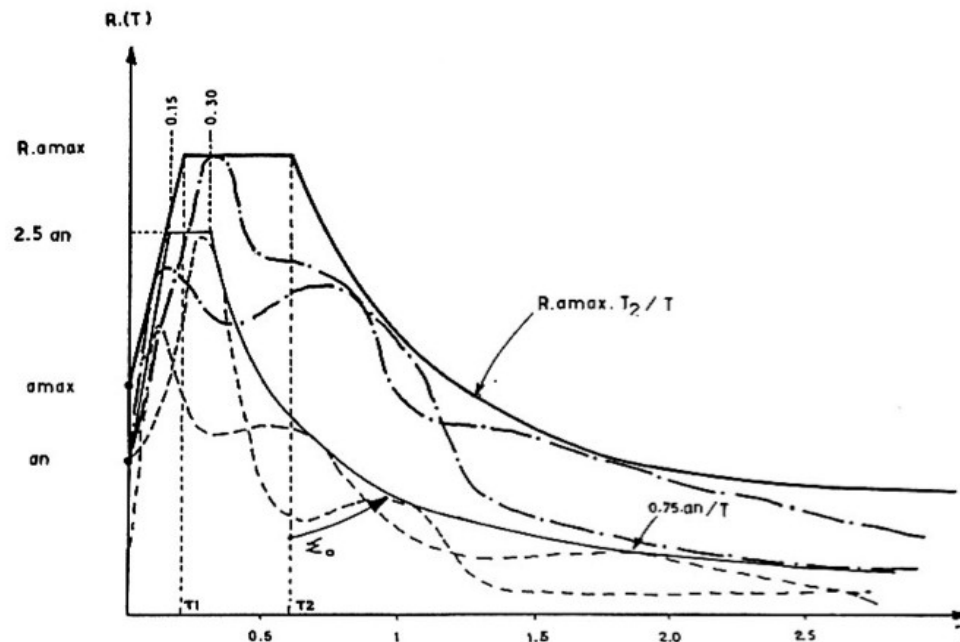
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

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

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



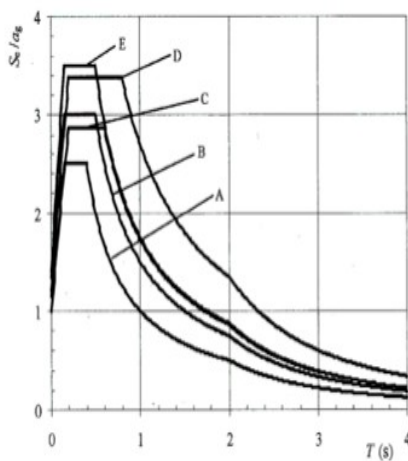
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Notions théoriques de dynamique des structures

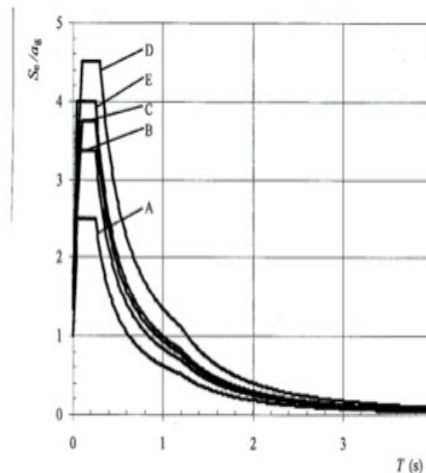
### Systemes à 1 degré de liberté (1 DDL)

#### 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

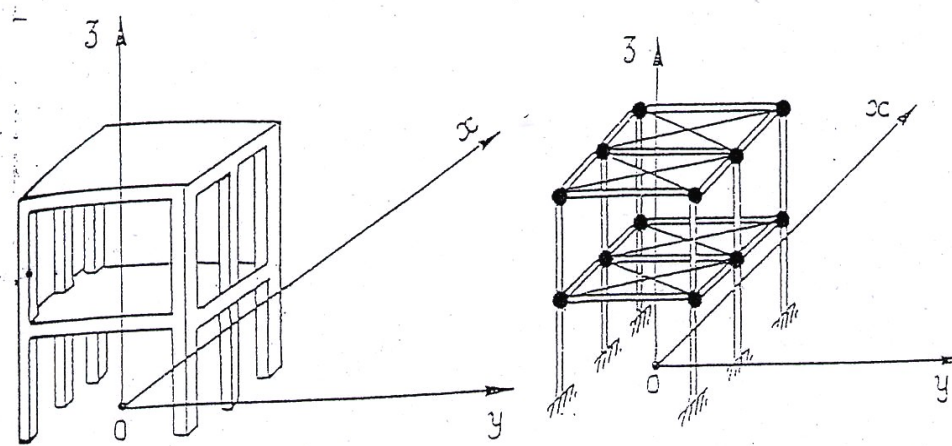
## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- 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 structurel 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)

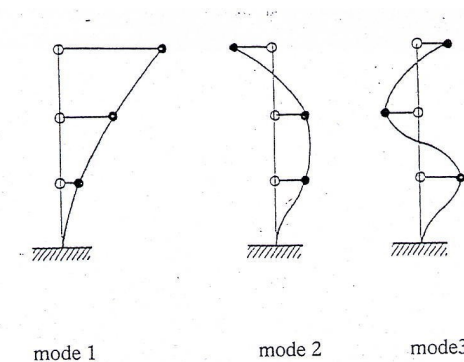
- Écriture matricielle de l'équation générale de la dynamique

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

- 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

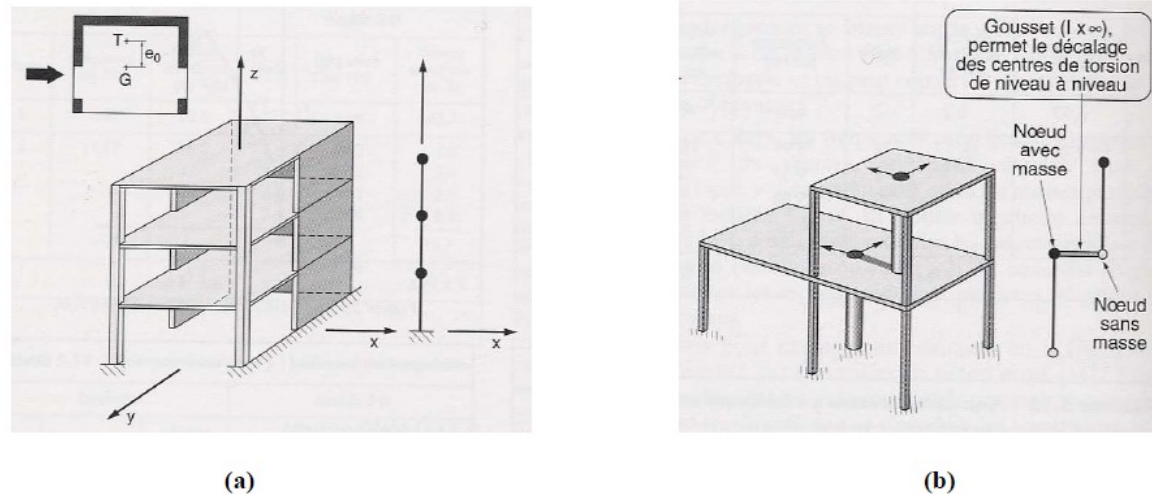


Figure 8 : Modélisations plane et spatiale de bâtiments simples (Davidovici [5])

- 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

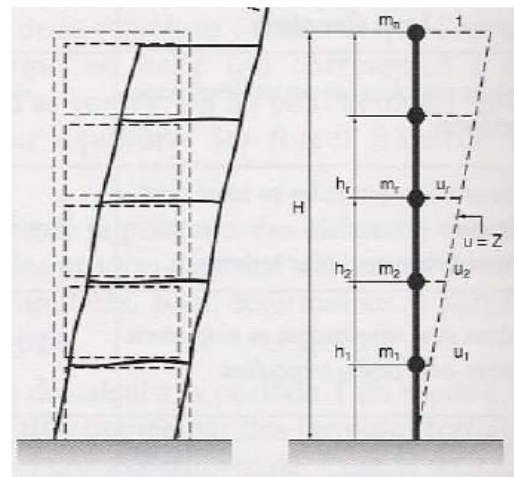


Figure 9 : Approximation du comportement sismique des bâtiments par la méthode du mode fondamental (Davidovici [5])

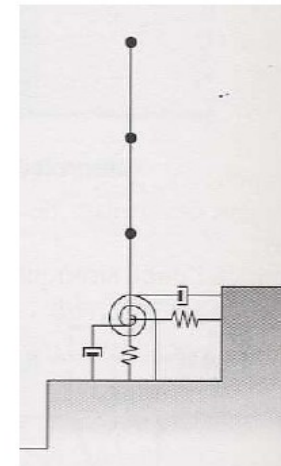


Figure 21 : Modélisation de la souplesse des fondations dans le cadre de la méthode de Rayleigh (Davidovici [5])

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Principes de modélisation

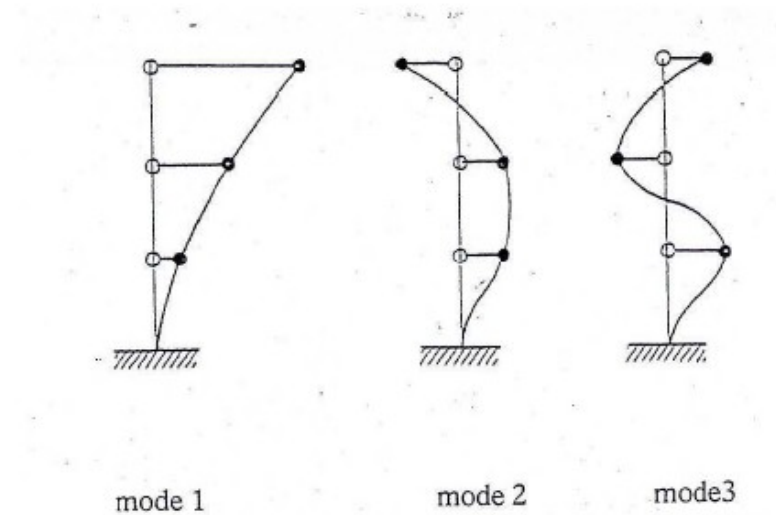


Figure 10 : Modélisation de type « brochette » permettant de représenter le comportement sismique d'une structure à 3 étages, régulière en plan

# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Éléments de dynamique des structures et principes de modélisation

- Principes de modélisation

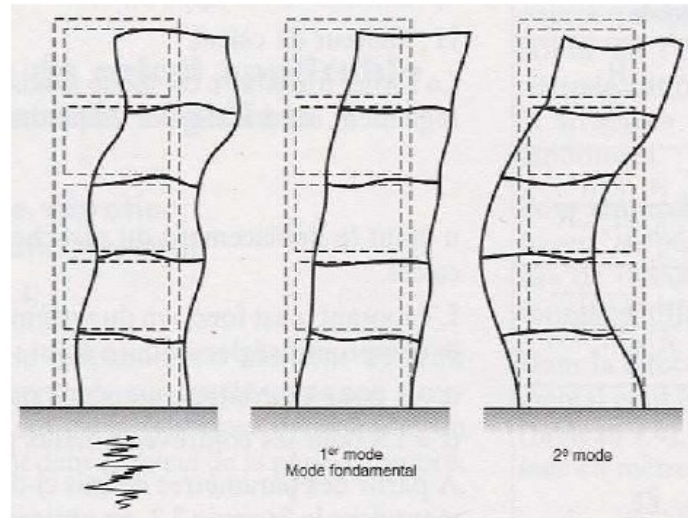
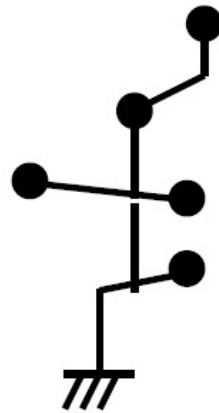


Figure 11 : Modélisation de type portique permettant de représenter la souplesse des éléments horizontaux (cas des structures ne vérifiant pas le critère 3 de régularité en plan) (Davidovici [5])

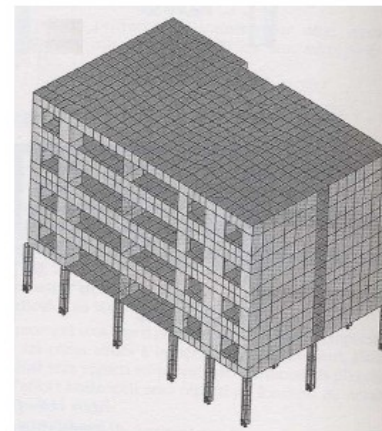
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## 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

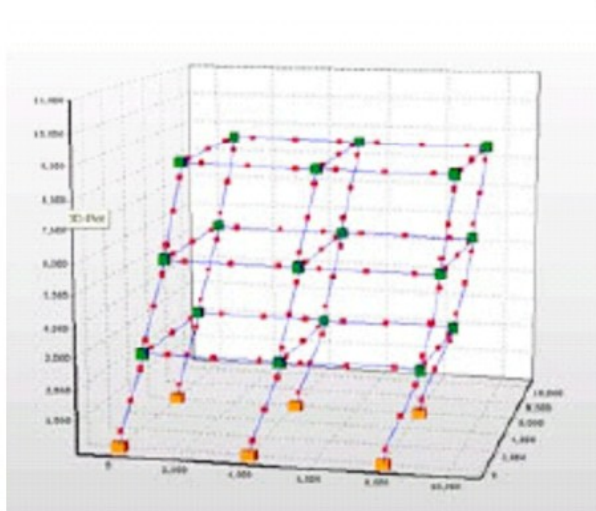


Figure 13 : Méthode d'analyse statique non-linéaire de type « push-over »

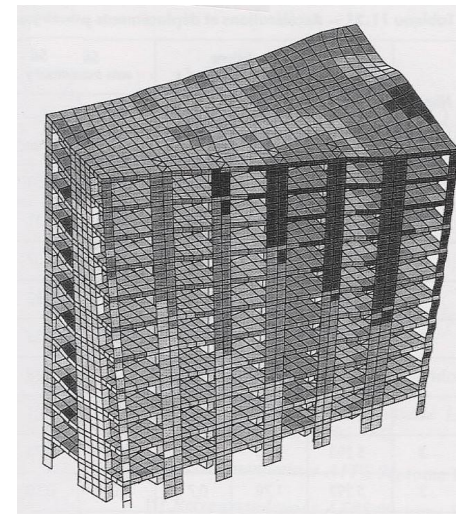
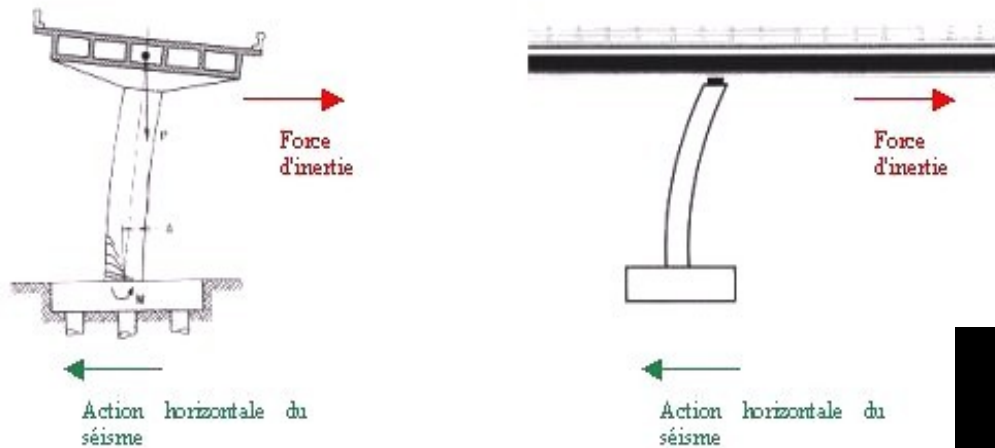


Figure 14 : Modèle de calcul temporel non-linéaire permettant de représenter en fonction du temps les niveaux de sollicitations dans la structure (Davidovici [5])

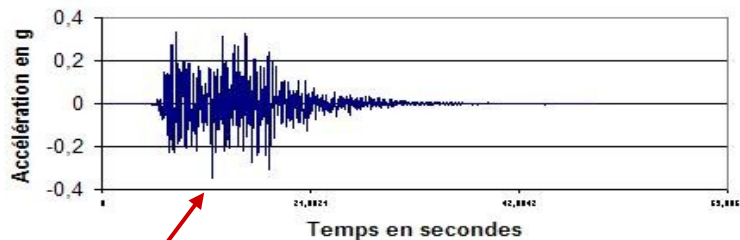
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

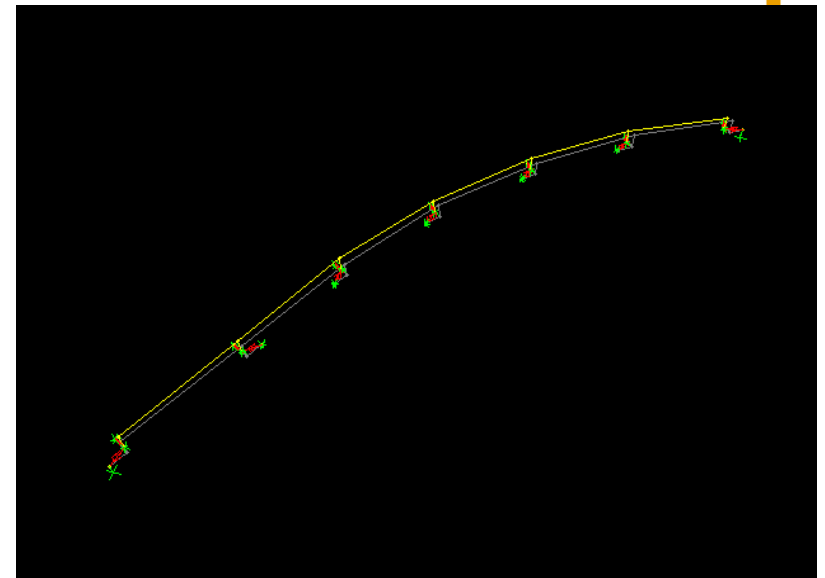
- Le phénomène vibratoire



Accélérogramme



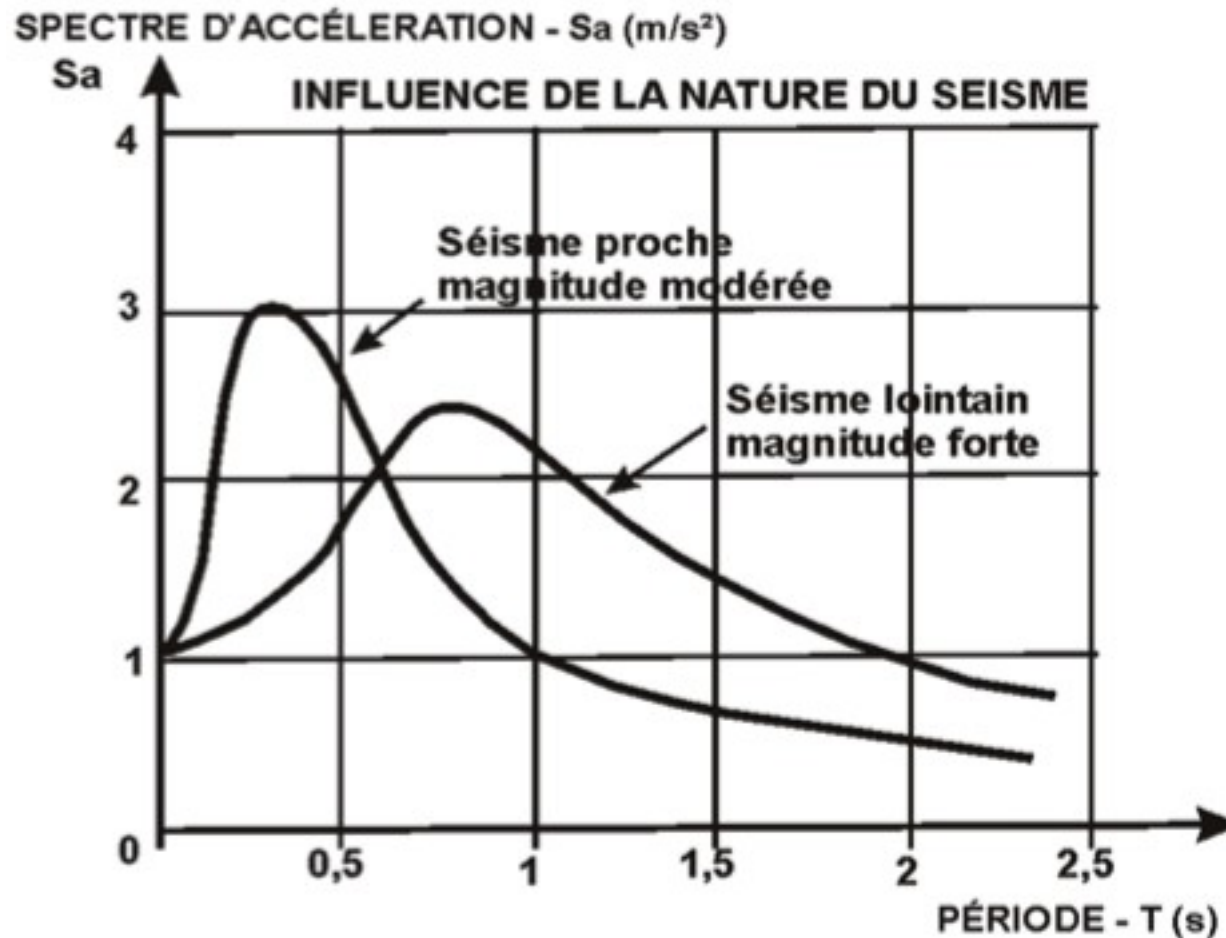
$a_{gr}$  : accélération maximale enregistrée au rocher



# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

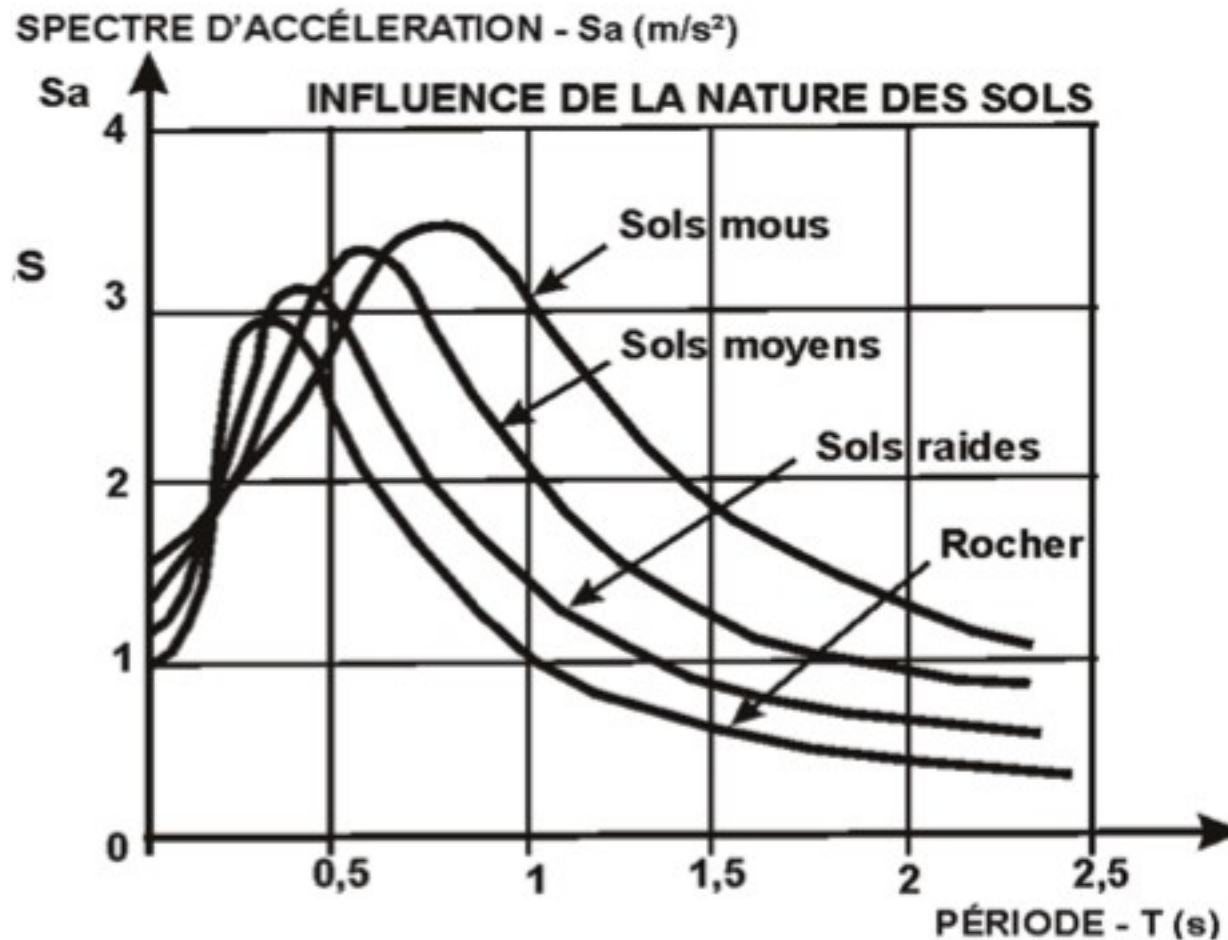
- Contenu fréquentiel du signal sismique et effets de site



# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

- Contenu fréquentiel du signal sismique et effets de site

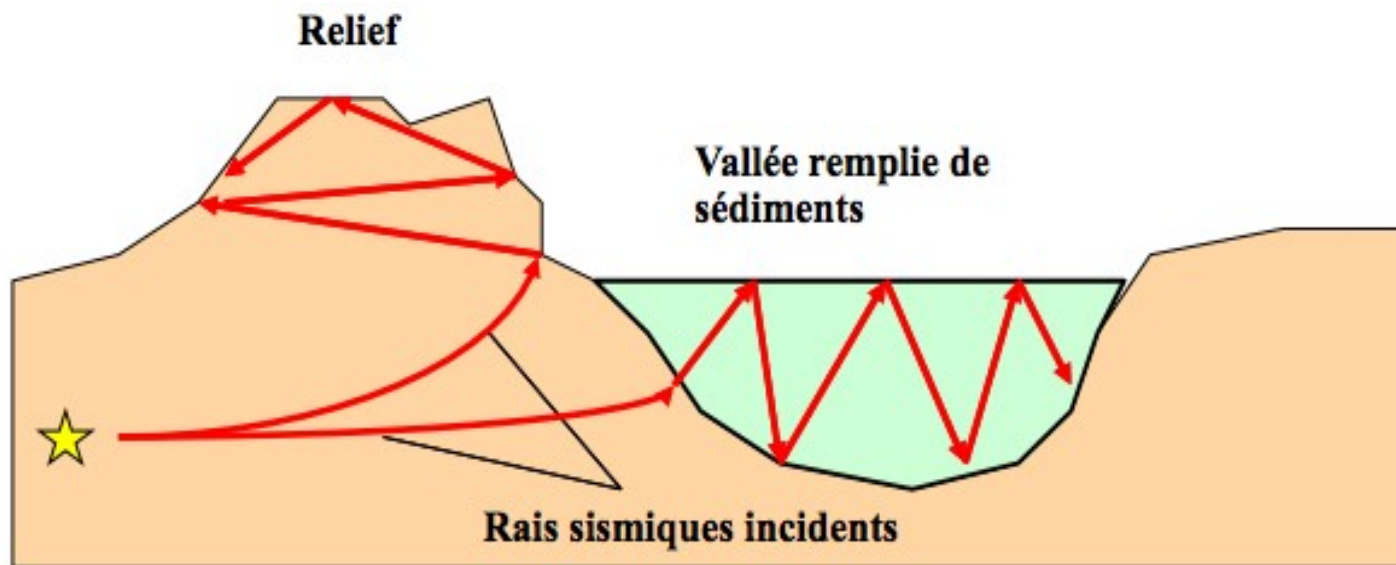




# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

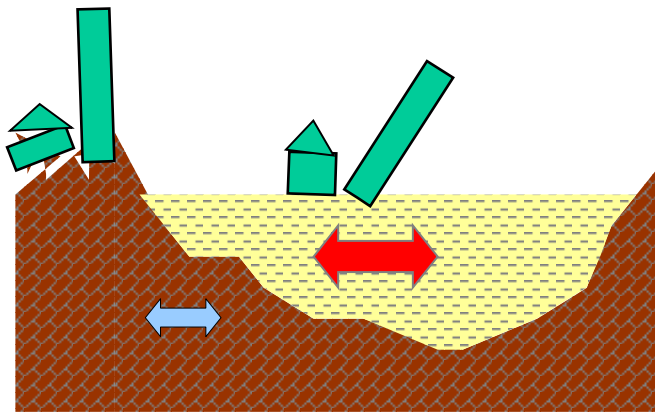
- Contenu fréquentiel du signal sismique et effets de site



# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

- Contenu fréquentiel du signal sismique et effets de site



Effet géologique

### MEXICO - M 8,1 - 1985

BÂTIMENTS  
DE STYLE  
COLONIAL  
PEU ÉLEVÉS  
PEU DE DÉGÂTS

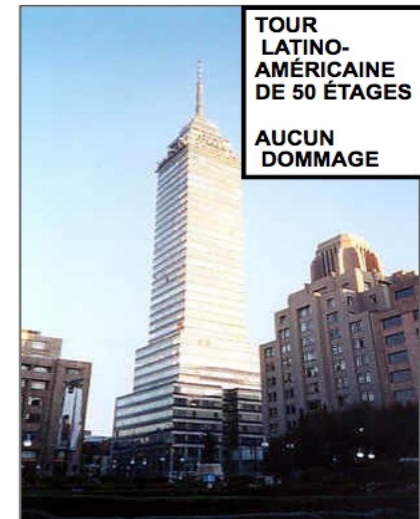


BÂTIMENTS DE 10 A 30 ÉTAGES  
BEAUCOUP DE DESTRUCTIONS



TYPES DE CONSTRUCTION VULNÉRABLES  
PRÉSENCE DE VASE SUR DES ÉPAISSEURS IMPORTANTES  
(autour de 50m)

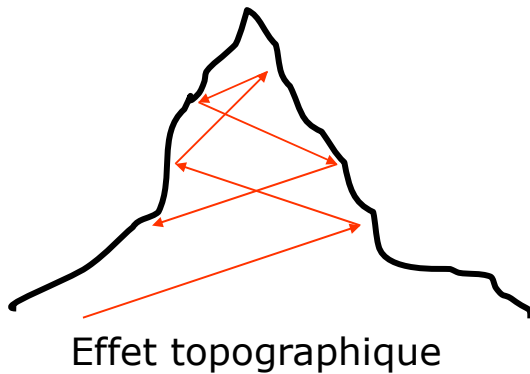
TOUR  
LATINO-AMÉRICAIN  
DE 50 ÉTAGES  
AUCUN  
DOMMAGE



# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

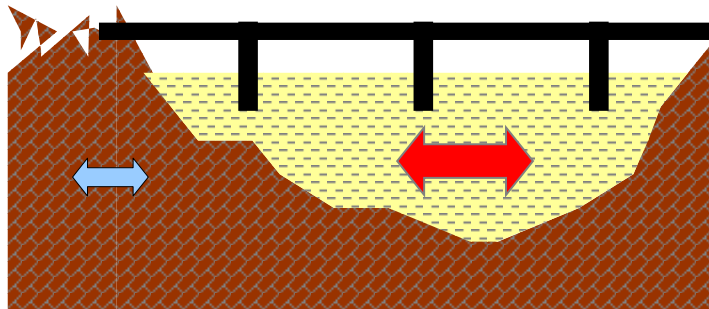
- Contenu fréquentiel du signal sismique et effets de site



# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

- Variabilité spatiale de l'action sismique



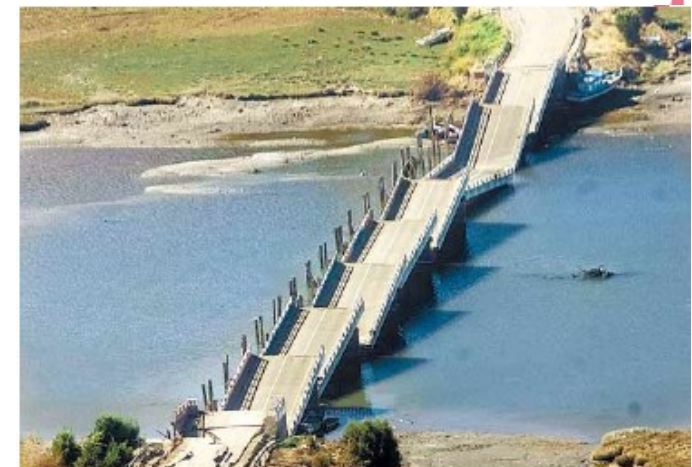
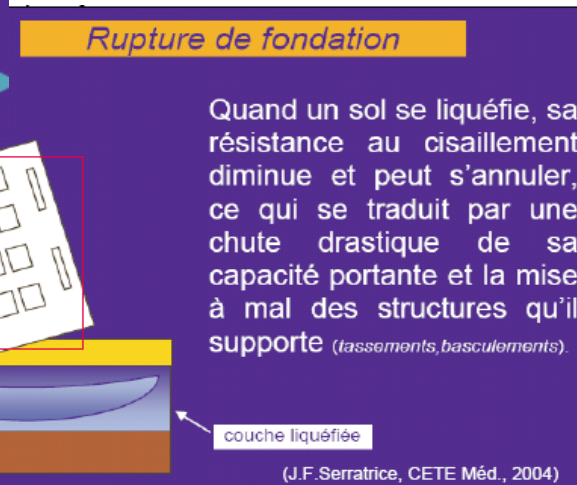
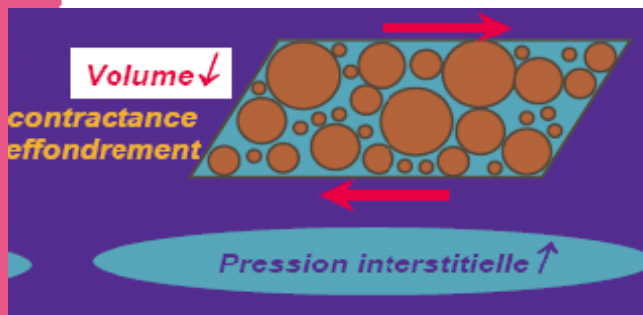
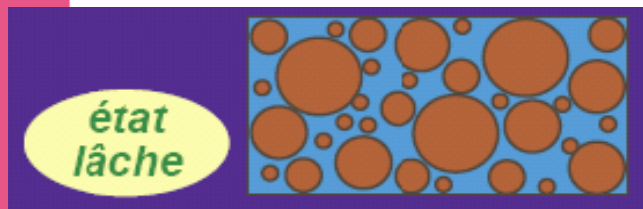
San Fernando (USA, 1971)

# 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



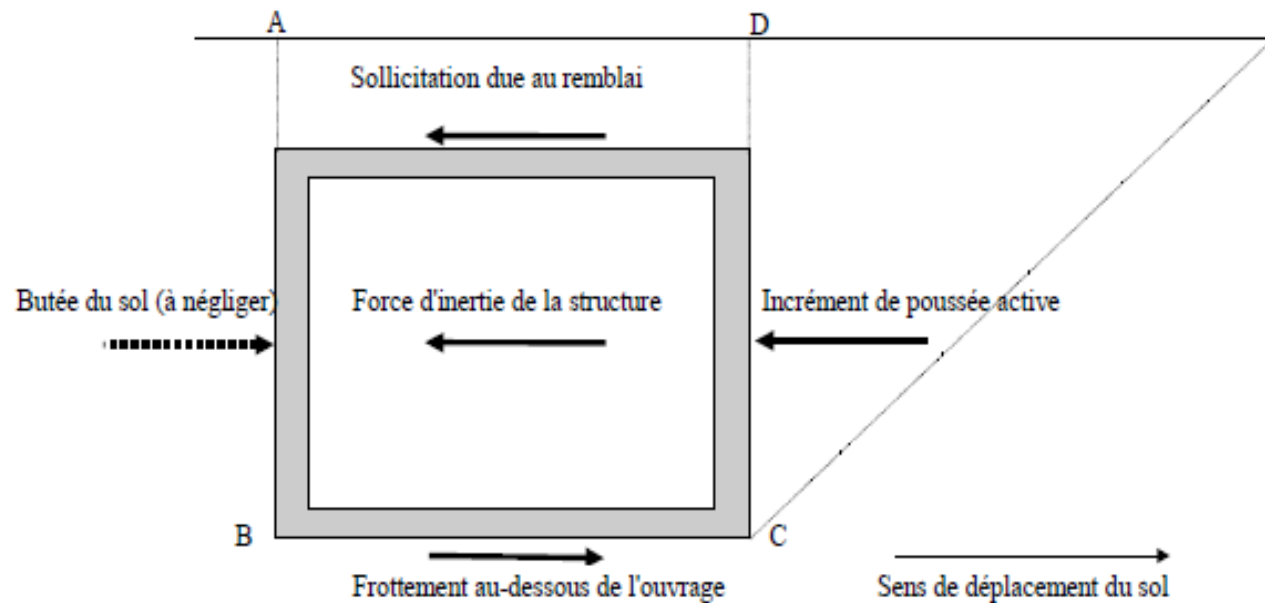
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

- Exemples de prise en compte

### Approches statiques forfaitaires

- Action du séisme sur les ponts-cadres et portiques





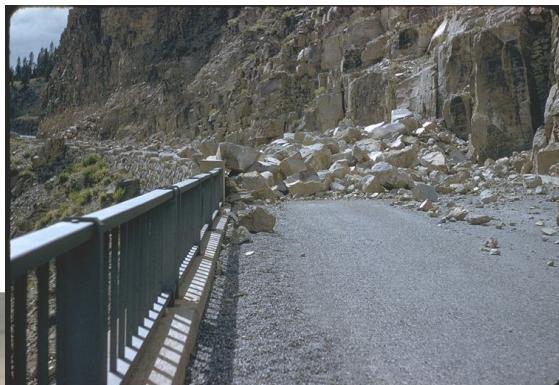
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## Représentation des actions sismiques sur les ponts

- Exemples de prise en compte

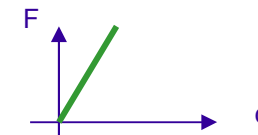
### Approches statiques forfaitaires

- Le dimensionnement des structures pare-blocs

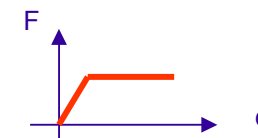


### Équivalence énergétique :

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



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



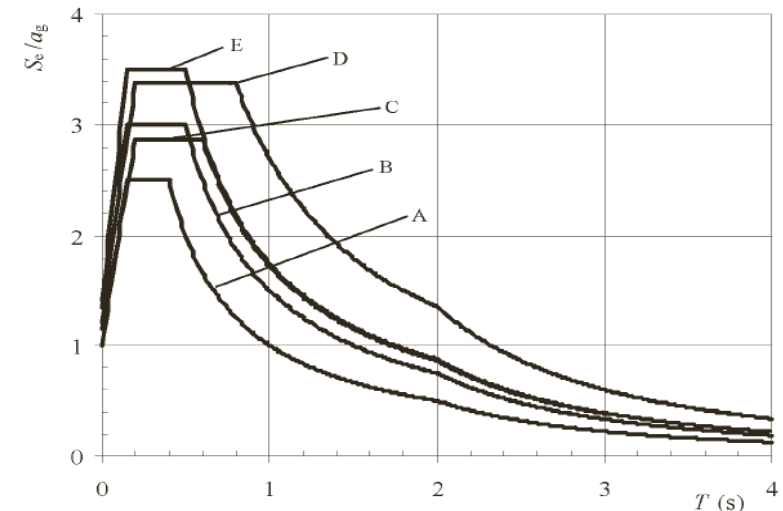
# Généralités sur les phénomènes sismiques

## 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 »**

