



HLST201 – Expérimentation et Dynamique Terrestre

Sismologie & Aléa sismique

Stéphane Mazzotti



- Sismologie = Etude
 - des ondes sismiques
 - de leurs sources
 - de leurs effets

1) Quelques rappels de bases de sismologie

2) Application spécifique

- => Mise en résonance
- => Effets de sites
- => Impact sur l'aléa sismique

● Sismologie historique

Science ancienne

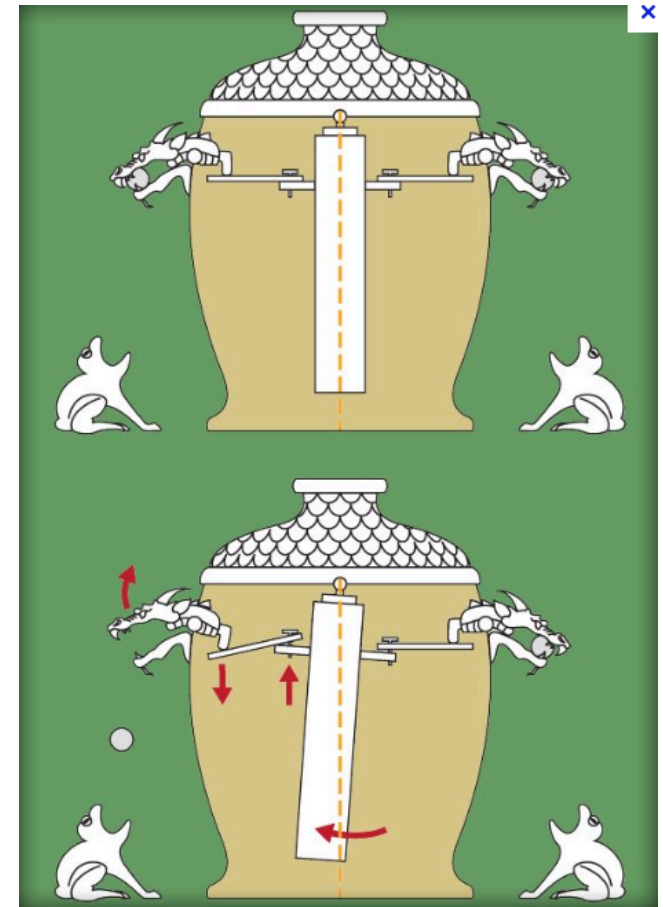
Mythologie



Sismologie historique

Science ancienne

132 AD – sismomètre chinois



Sismologie historique

Science ancienne

1356 – séisme de Bâle



Montpellier

Der grosse Erbidem an sant Lucas tage do Basel fiel.

Do men zalte M. ccc. lvi. jor an sant Lucas tage umb verpfer jir. do sam ett grosser erbidem in Zürsichen landen. noch do vor nacht kam erwie menig erbidem die müre waren. umbte die birte wachglocke do kam gar ein ungesüger erbidem der warf vil kettin und wupfele abe den hüsern und giborien [b] und knopphe abe dem Münster. und in derselben nacht koment wolzehen erbidem. dise erbideme wurfent oberwendig Basel uf se. burge der-nieder. und Basel die stat fiel auch miteinander dernieder. kirchen. hüsere- ringmuren. und die türne zu Basel. daz zu so gieng ein für an mit dem verfallende und brante etwie manigen tage das neman in der grossen stat mochte bliben. und die lüte muustent zu selbe in den garten ligen und lirtent die wile grossen gebresten an hungere. wan ire spise und jr gur verfallen was. do ver- dorp auch vil lütes und viches von dem brande und von dem verfallende. dise erbidunge werre vil by ein jor das men sin jedermilen gewar wart doch bescheidenlicher denne vormols.

Die von Strosburg fluhent vs der stat.

Donoch in dem meyen an sane Sophien ebent do men zalte M. ccc. lvij. jor. do sam ein erbidem umb müntercomplete jir. der was grösser denne ketare vormols gewesen was. und der auch meren schaden an gloghüsern. und an femmten. des erschrag sich das volk zu Strosburg also sere das men- gelich wolte sin zu velde usgezogen und under gezeten und hütten sin gele- gen. wan si forchtent verfallen in der stat also von Basel. des gingen die burgere

[a] Cap. I s. 32. Das ist / als sie in Ohnmacht sturten.

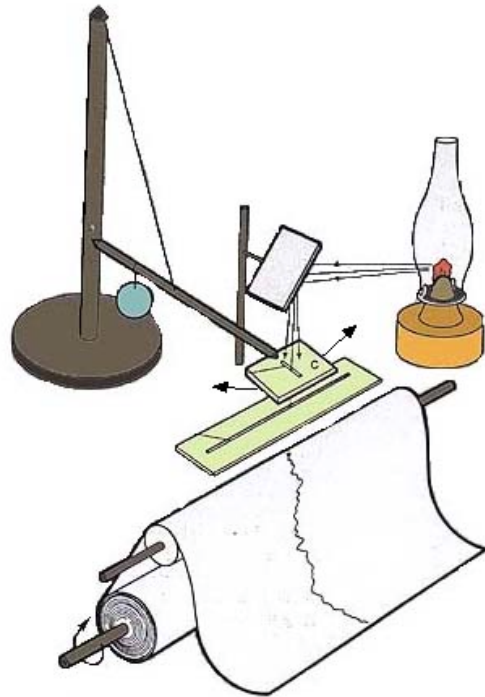
[b] Cibora sind gewisse Bedeckungen der Müre und dergleichen. Davon besetzt Glossar. du Fictac 106. Cibora.



Sismologie historique

Science moderne

1860 – 1900, John Milne

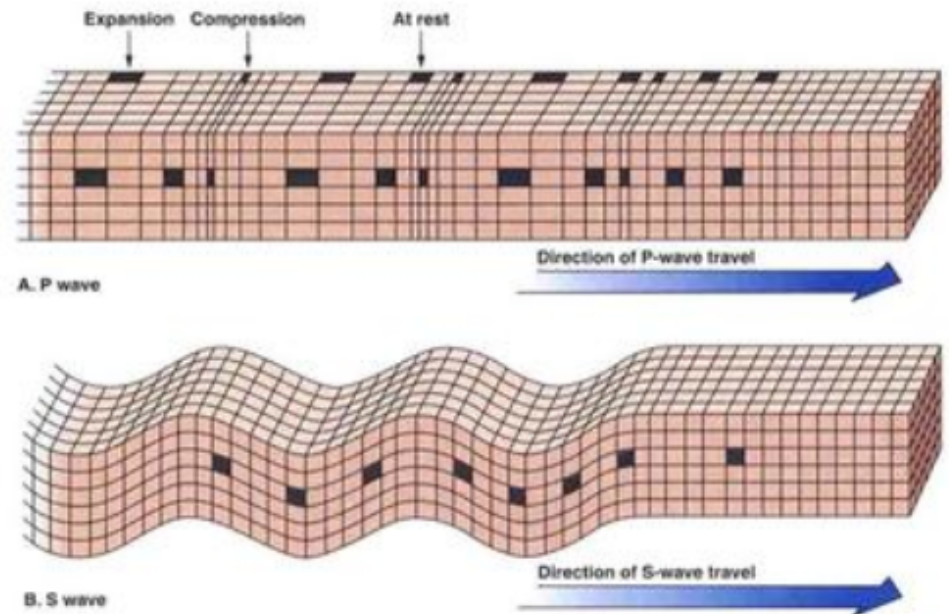




Etude des ondes sismiques

Vibration (déformation) d'un milieu à caractère ondulatoire
=> déformation élastique = retour à l'état initial
=> description mathématique
=> plusieurs types d'ondes

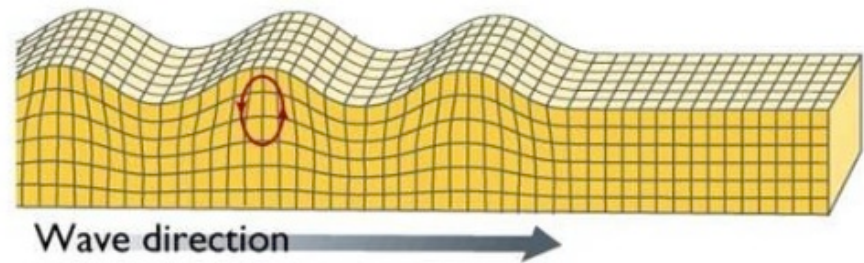
* Ondes de volume (P et S)



Etude des ondes sismiques

- Vibration (déformation) d'un milieu à caractère ondulatoire
- => déformation élastique = retour à l'état initial
- => description mathématique
- => plusieurs types d'ondes

* Ondes de surface
(Love, Rayleigh, ...)



(a)

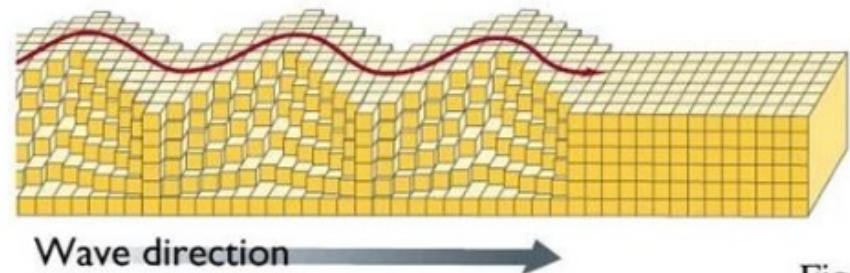
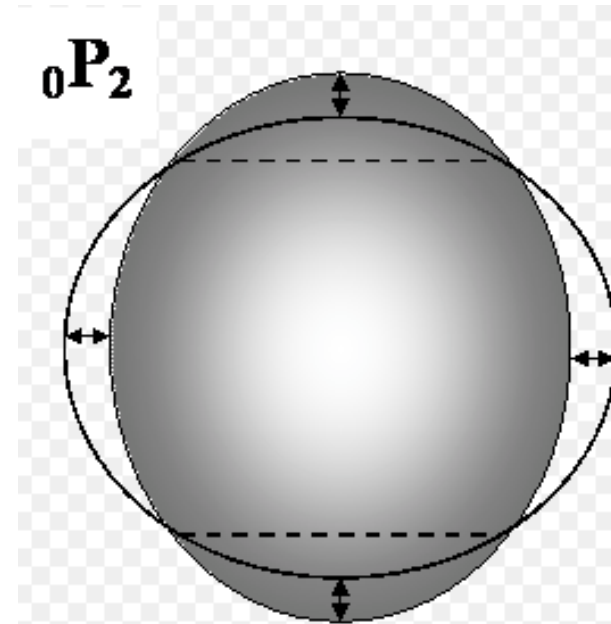


Fig. 1

Etude des ondes sismiques

Vibration (déformation) d'un milieu à caractère ondulatoire
 => déformation élastique = retour à l'état initial
 => description mathématique
 => plusieurs types d'ondes

* Oscillation des modes propres de la Terre



Etude des sources sismiques

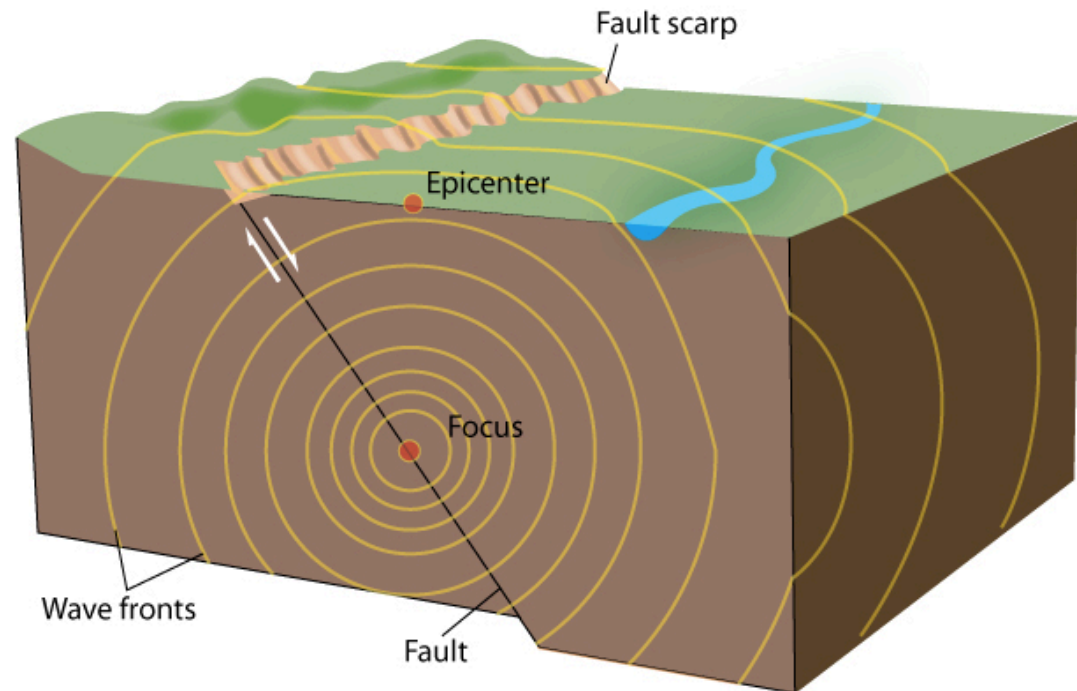
Quels processus vont engendrer des ondes (vibrations) sismiques ?



Etude des sources sismiques

Quels processus vont engendrer des ondes (vibrations) sismiques ?

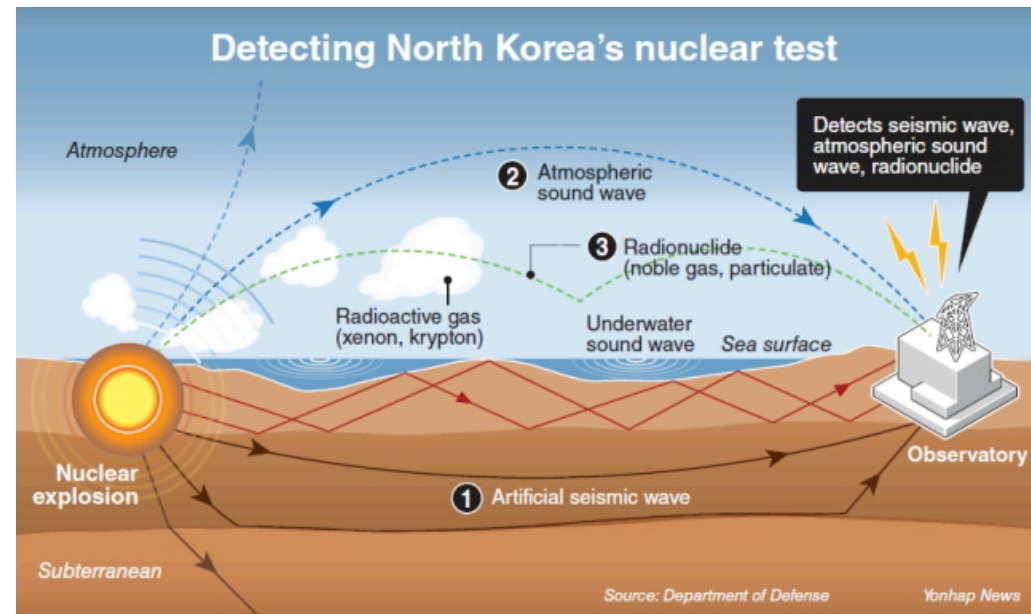
- Séismes : Rupture ou déplacement impulsif sur une faille dans la croûte
 - * 1 – 100 secondes
 - * 1 cm – 100 km
 - * 3 – 4 km/s



Etude des sources sismiques

Quels processus vont engendrer des ondes (vibrations) sismiques ?

- Explosions : « séisme anthropique »
caractéristiques
différentes des
séismes naturels



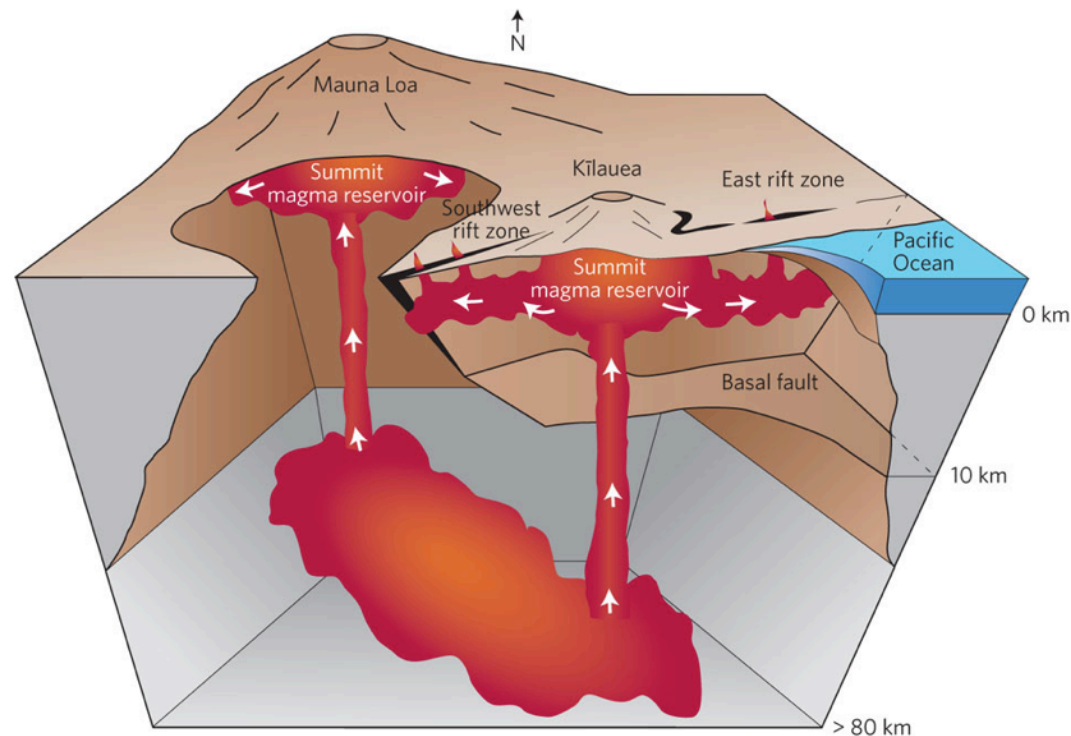
Etude des sources sismiques

Quels processus vont engendrer des ondes (vibrations) sismiques ?

- Injections et transports de fluides

Activité volcanique :

- Fracturation
- Mise en résonance de conduits



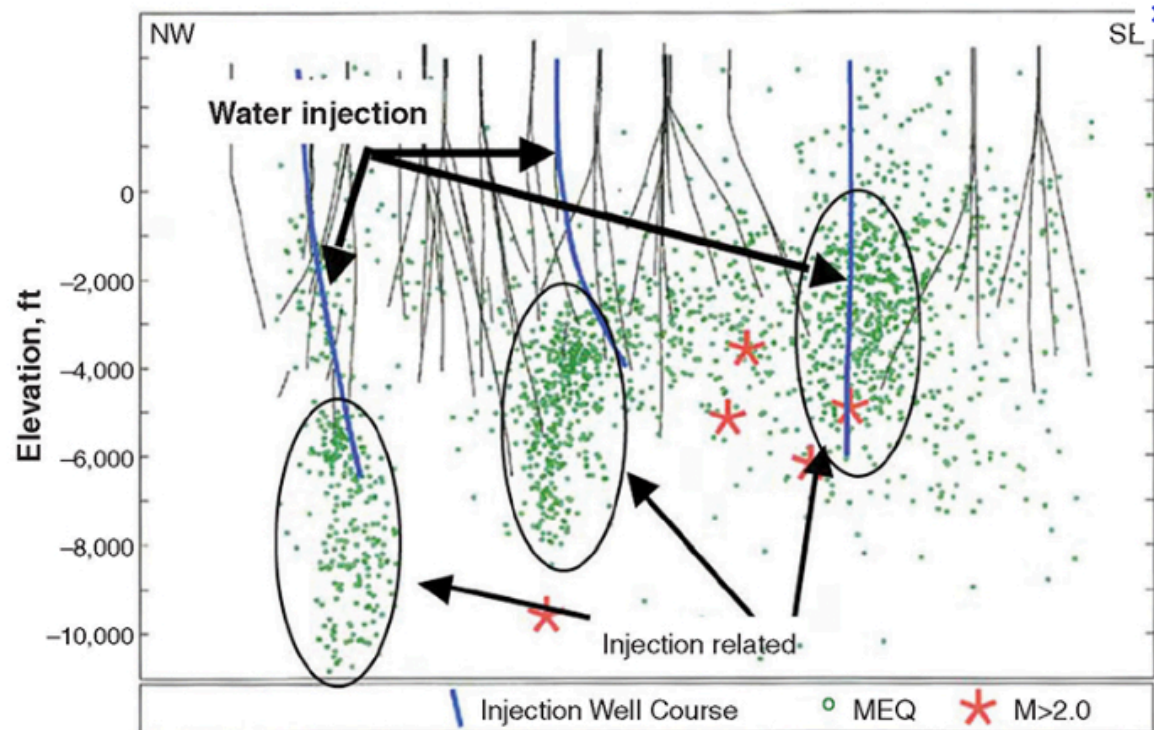
Etude des sources sismiques

Quels processus vont engendrer des ondes (vibrations) sismiques ?

- Injections et transports de fluides

Activité anthropique :

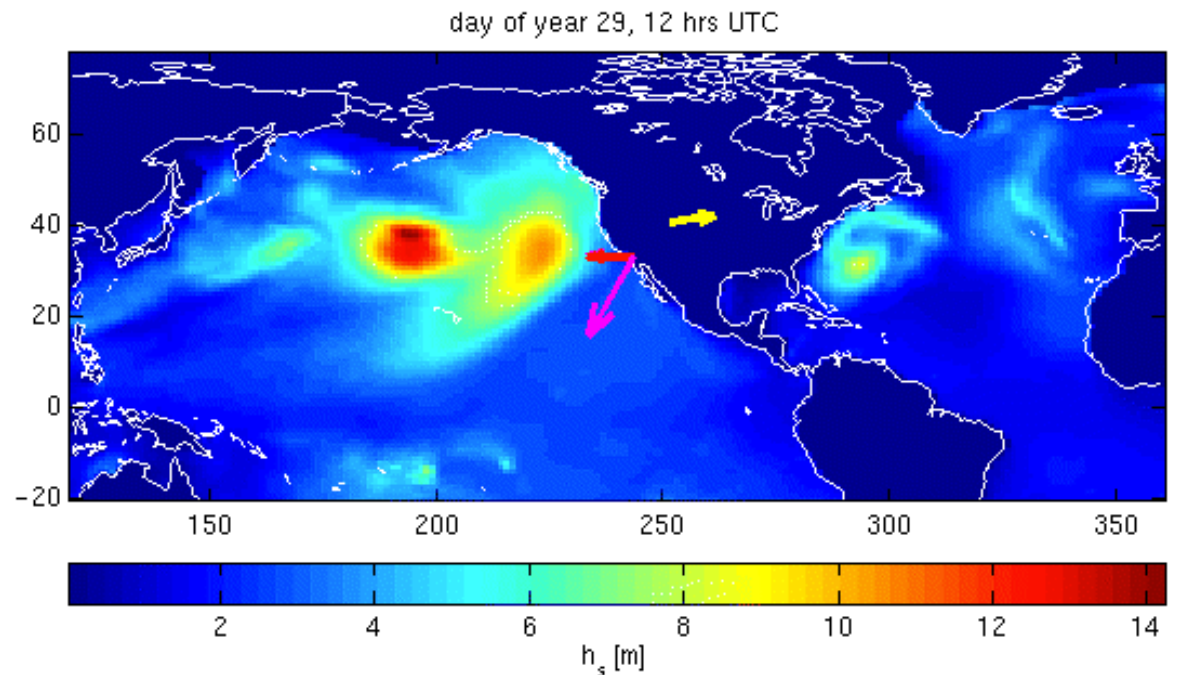
- Exploitation de réservoirs
- Géothermie



Etude des sources sismiques

Quels processus vont engendrer des ondes (vibrations) sismiques ?

- Vibrations externes couplées à la surface terrestre (vent, vagues, trains, ...)



Etude des effets

Limite sismologie / ingénierie du BTP / gestion des risques

Couplage entre ondes sismiques et structures impactées ?

- => Nature et caractéristiques des ondes
- => Nature et caractéristiques du sous-sol proche
- => Résistance des structures

Etude des effets

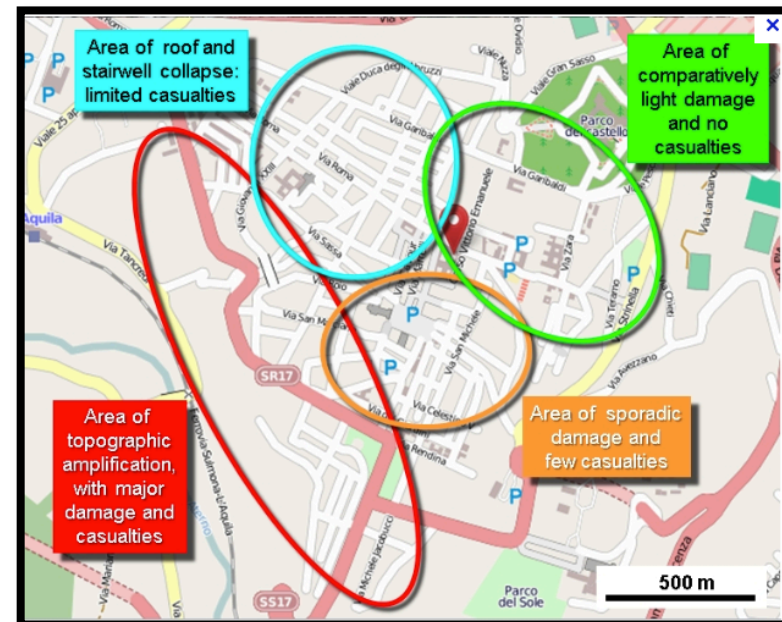
Couplage entre ondes sismiques et structures impactées ?

=> Nature et caractéristiques du sous-sol proche

= Effet de sites



Montpellier



Effets de site

Quelles sont caractéristiques des ondes sismiques qui impactent le plus les structures affectées ?

Effets de site

Quelles sont caractéristiques des ondes sismiques qui impactent le plus les structures affectées ?

Building Strength

video lecture

Dr. Robert Butler
Geophysicist

Effets de site

Quelles sont caractéristiques des ondes sismiques qui impactent le plus les structures affectées ?

⇒ Ondes de cisaillement (typiquement ondes S et de surface)

⇒ Amplitude du cisaillement: mouvement maximum, accélération (force) maximum subis

⇒ ?

Effets de site

Quelles sont caractéristiques des ondes sismiques qui impactent le plus les structures affectées ?



Effets de site

Quelles sont caractéristiques des ondes sismiques qui impactent le plus les structures affectées ?

⇒ Ondes de cisaillement (typiquement ondes S et de surface)

⇒ Amplitude du cisaillement: mouvement maximum, accélération (force) maximum subis

⇒ **Fréquence de vibration, fréquence propre, mise en résonance**

Effets de site

Quelles sont caractéristiques des ondes sismiques qui impactent le plus les structures affectées ?

- ⇒ Ondes de cisaillement
- ⇒ Amplitude max.
- ⇒ **Fréquence et résonnance**

Principe de la balançoire
= Poussée régulière (fréquence)
= Poussée synchronisée avec le balancement (résonnance)



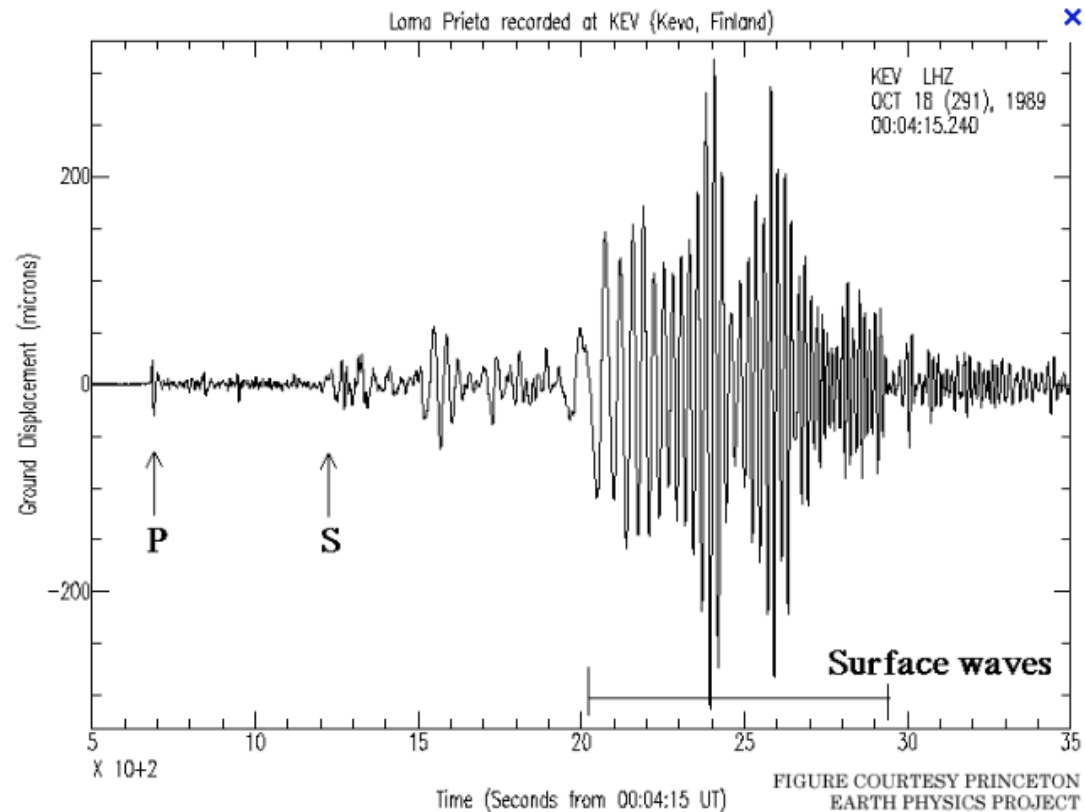
Effets de site

Notion de contenu fréquentiel (contenu spectral)

Sismogramme
(enregistrement du mouvement du sol)

NB1: amplitude des différentes ondes

NB2: « signature » des différentes ondes



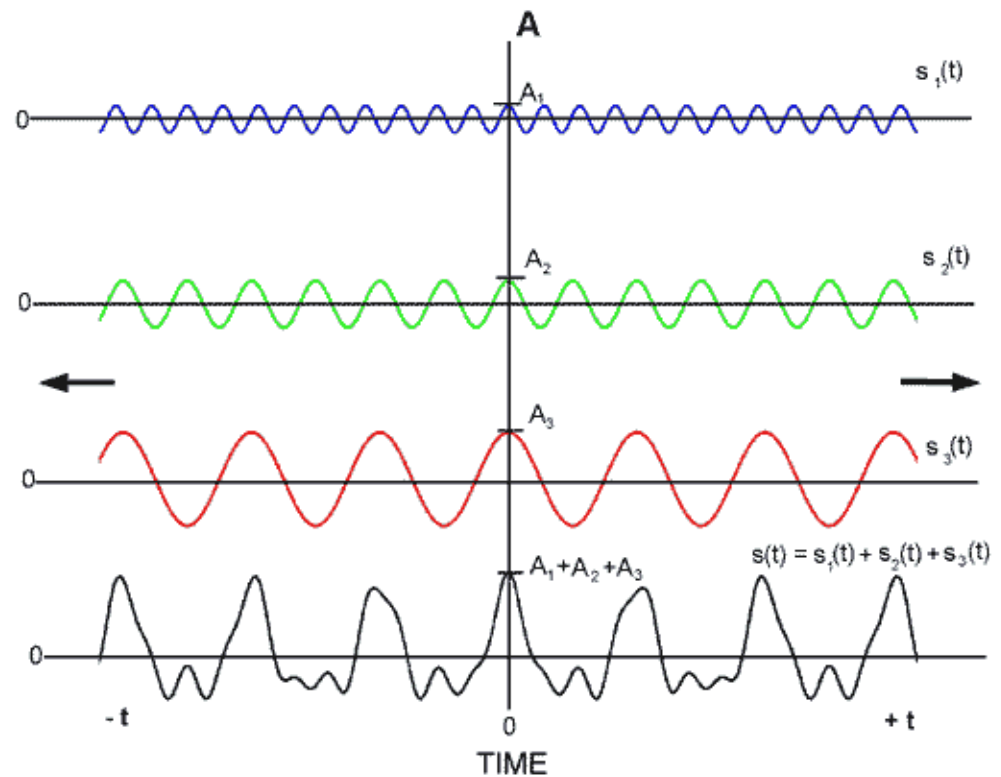
Effets de site

Notion de contenu fréquentiel (contenu spectral)

Sismogramme

=

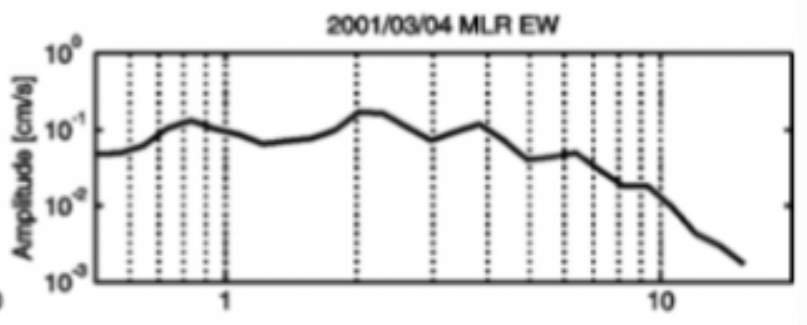
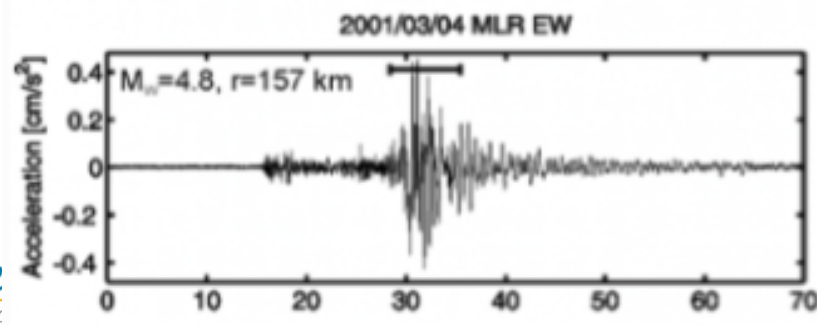
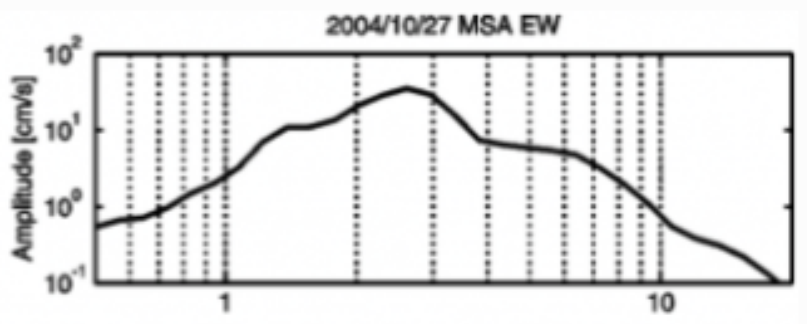
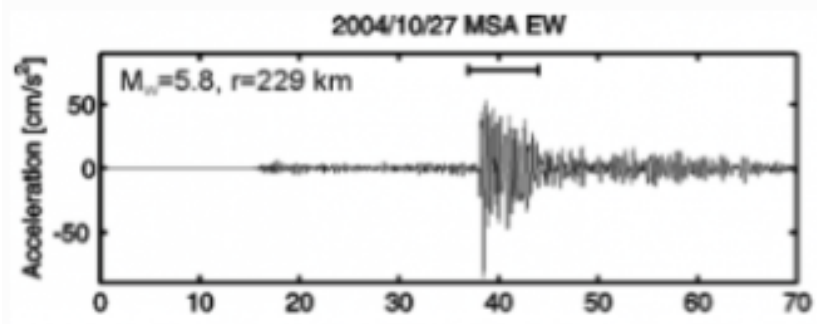
Somme de sinusôides
de fréquence (périodes)
différentes



● Effets de site

Notion de contenu fréquentiel (contenu spectral)

Ondes sismiques caractérisées par des contenu fréquentiels variables => spectrogramme



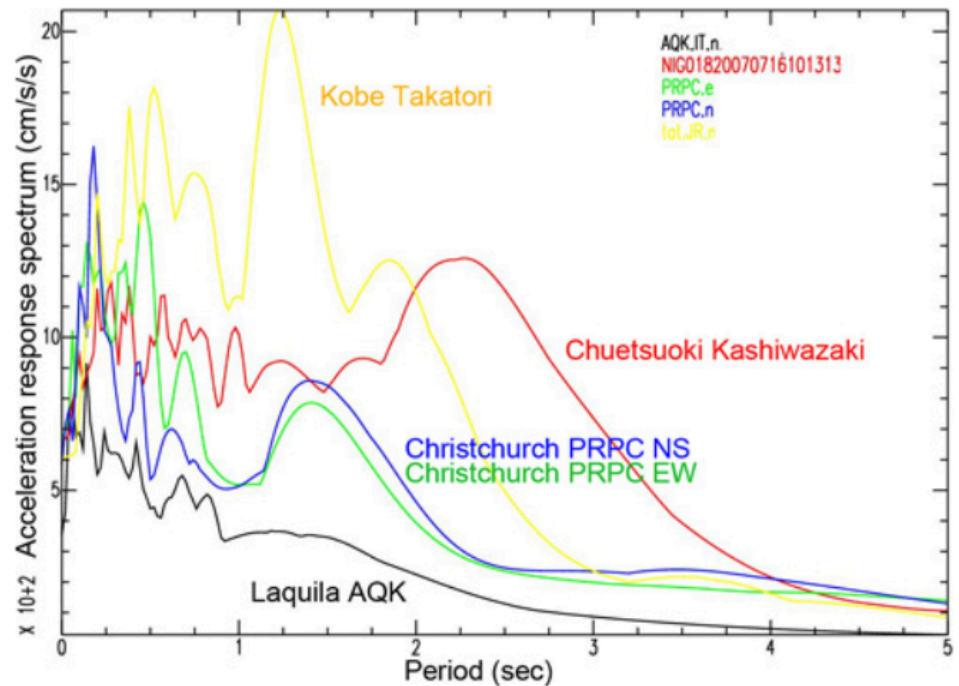
Effets de site

Contenu fréquentiel fonction :

- de la source

-

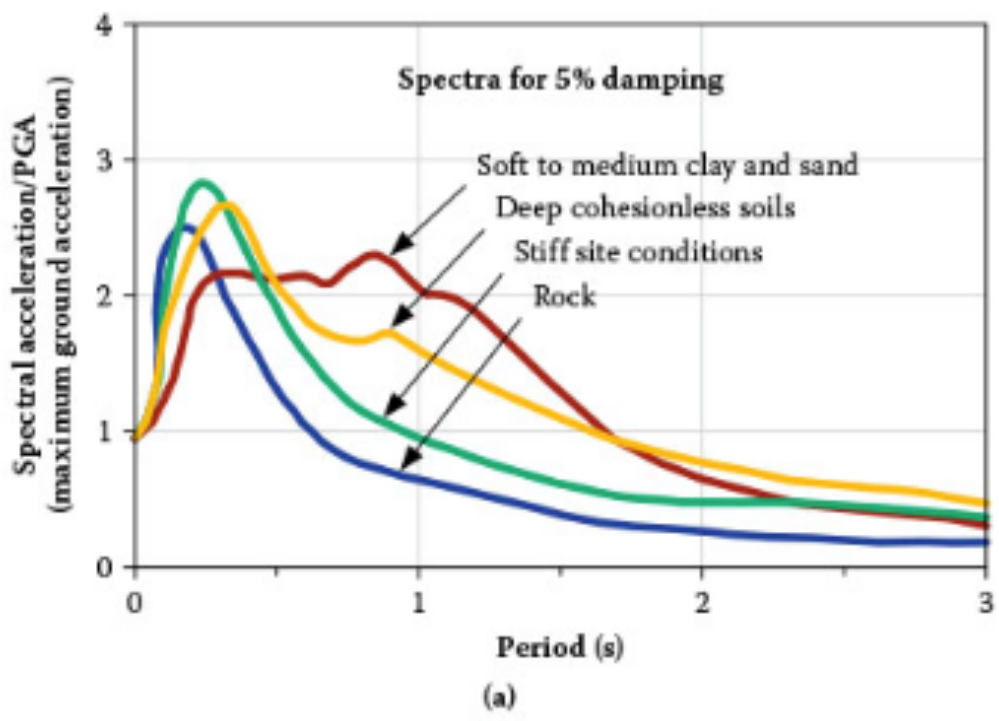
-



● Effets de site

Contenu fréquentiel fonction :

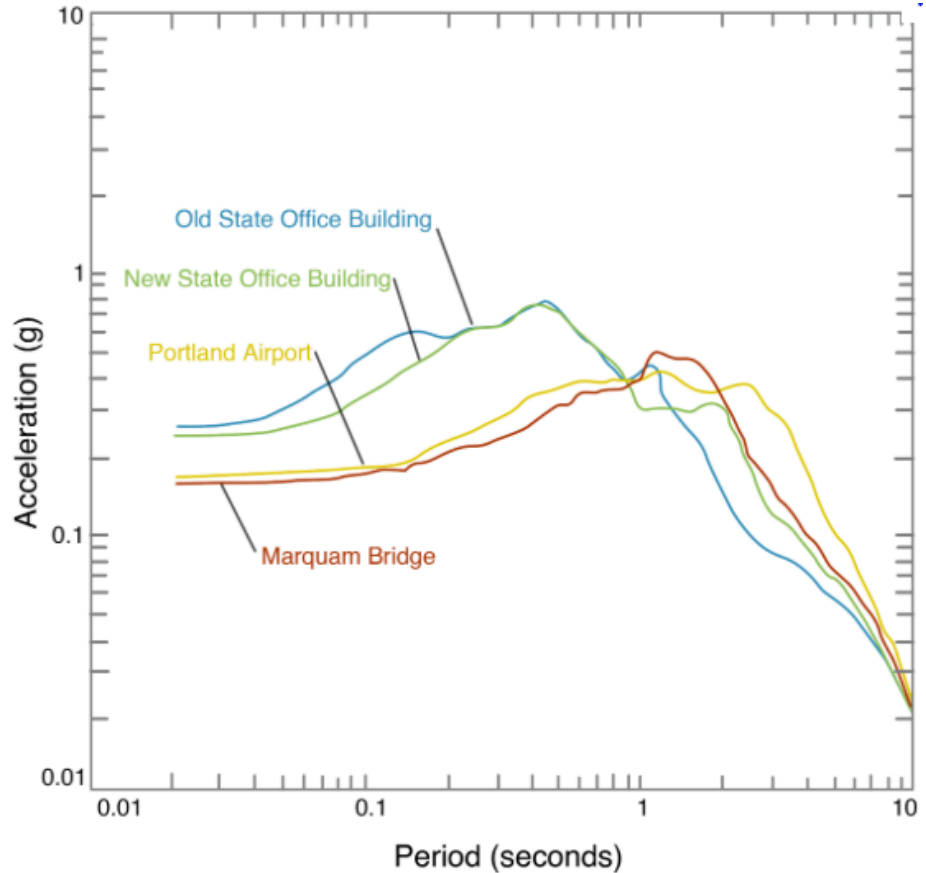
- de la source
- du site
-



● Effets de site

Contenu fréquentiel fonction :

- de la source
- du site
- de la structure affectée
- ➔ de l'interaction entre ces différents éléments



Effets de site & Aléa sismique

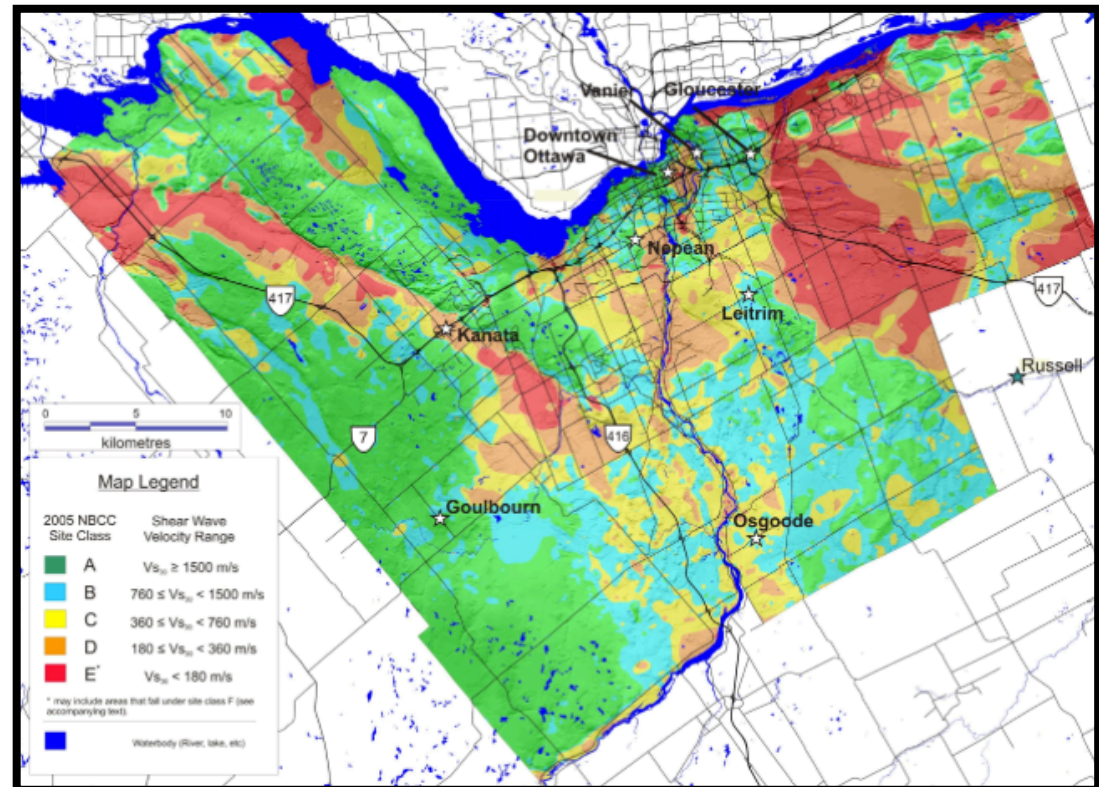
Pour les études d'aléa sismique, il est important (1) de caractériser les sources et les effets de site, et (2) d'adapter aux objectifs (structures) choisis

Effets de site & Aléa sismique

Pour les études d'aléa sismique, il est important (1) de caractériser les sources et les effets de site, et (2) d'adapter aux objectifs (structures) choisis

Exemple :

Caractérisation des effets de site
= Cartes de micro-zonation

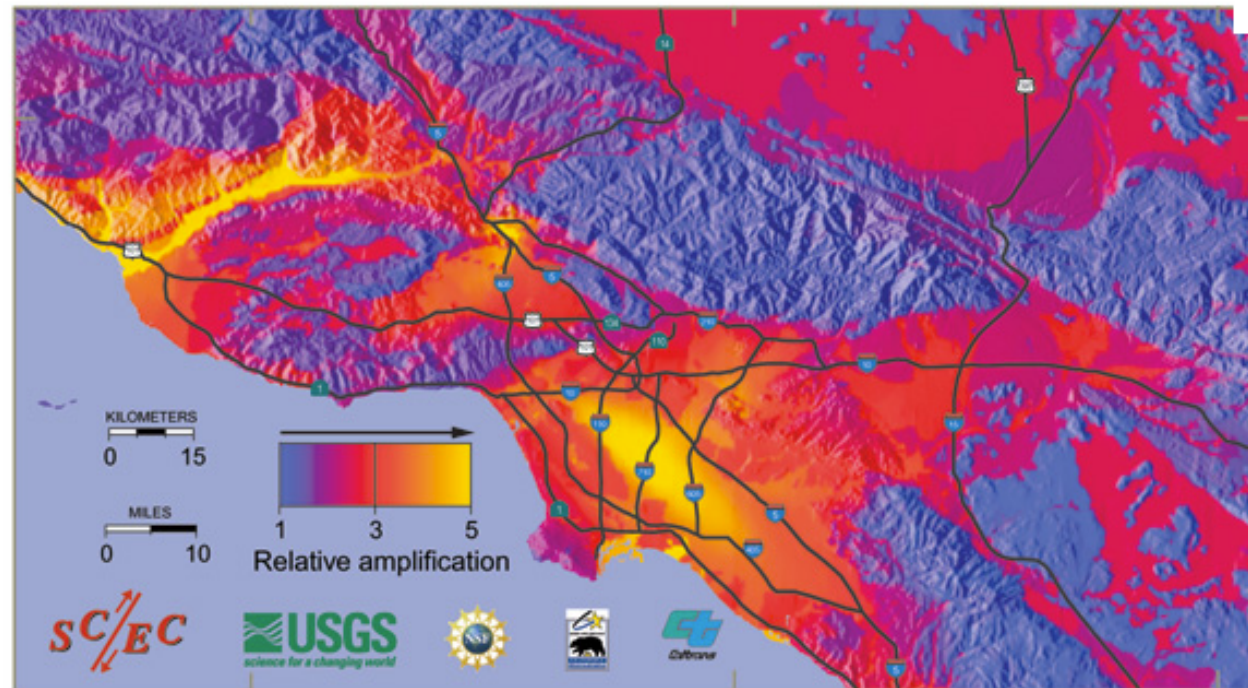


Effets de site & Aléa sismique

Pour les études d'aléa sismique, il est important (1) de caractériser les sources et les effets de site, et (2) d'adapter aux objectifs (structures) choisis

Exemple :

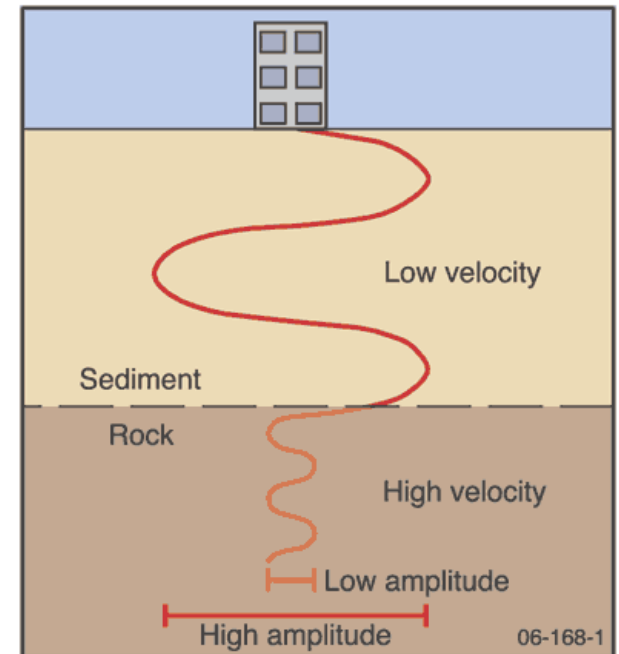
Caractérisation des effets de site
= Cartes de micro-zonation



Effets de site & Aléa sismique

Origine et méthodes pour évaluer les effets de site = Quantifier l'amplification ou l'atténuation des ondes sismiques pour une gamme de fréquences données

1^{er} effet : Amplification (ou atténuation) de l'onde par conservation d'énergie au passage d'un contraste de vitesse (rocher => sédiment)



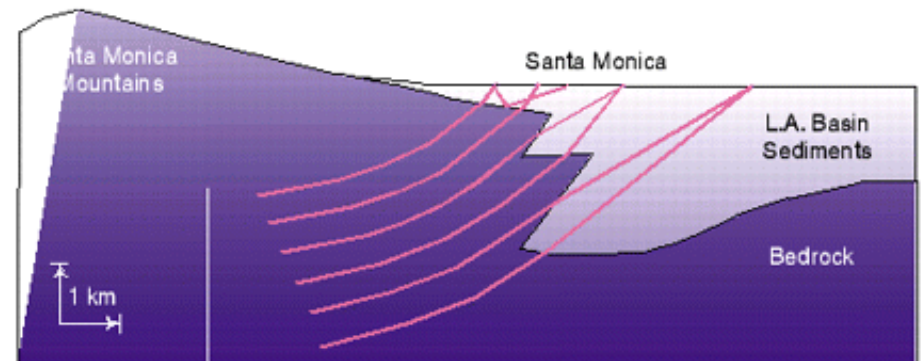
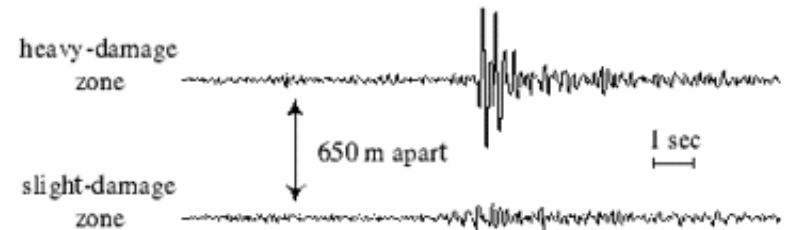


Effets de site & Aléa sismique

Origine et méthodes pour évaluer les effets de site = Quantifier l'amplification ou l'atténuation des ondes sismiques pour une gamme de fréquences données

Effets plus complexes :

- Réflexion et focalisation par Géométrie (bassin, ...)
- Conversion et piégeage d'ondes de surface



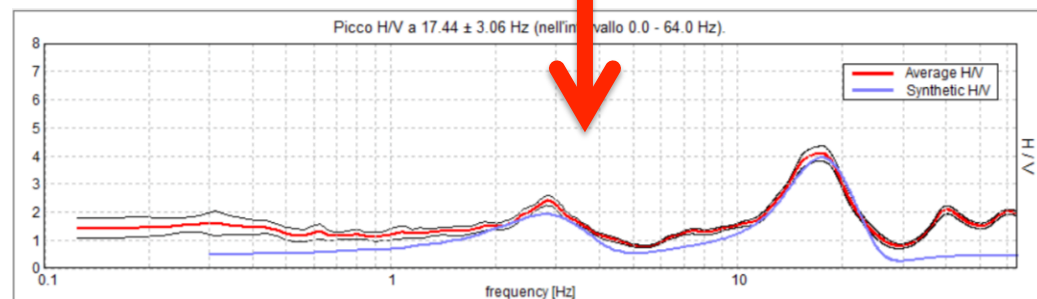
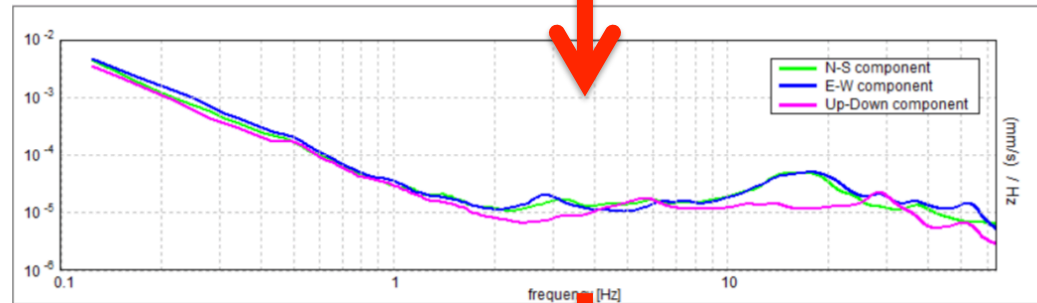
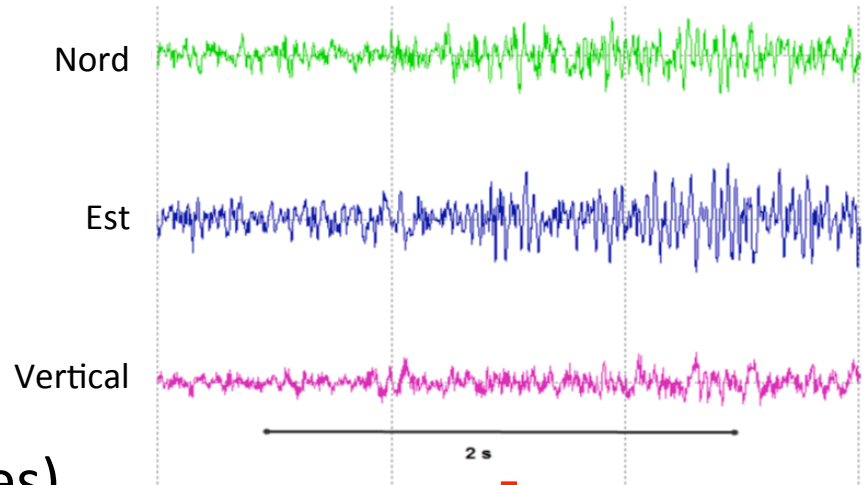
Effets de site & Aléa sismique

Méthode de mesure H/V

1 - Sismogrammes
(accéléromètres 3 composantes)

2 - Spectres d'amplitudes
sur les 3 composantes

3 - Ratio des spectres V_t /
Hz (N + E)



Effets de site & Aléa sismique

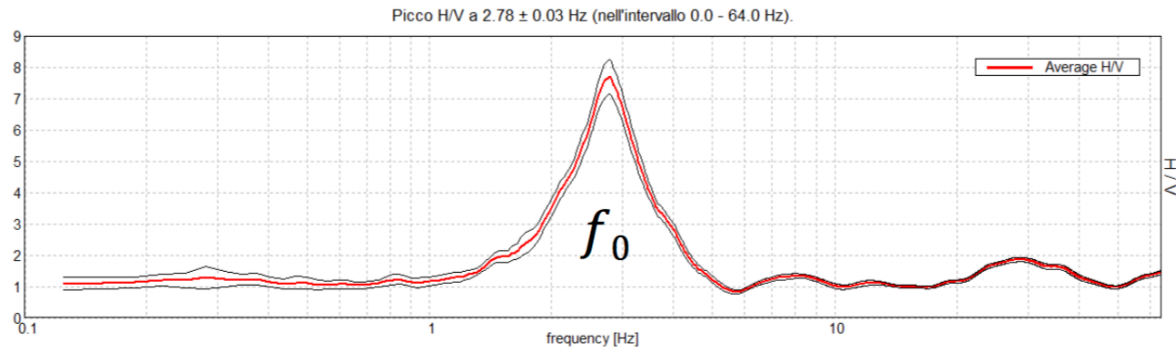
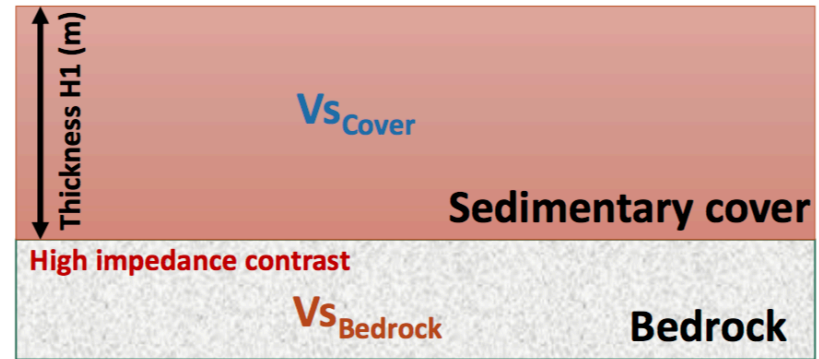
Pour une couche : Relation de 1^{er} ordre entre fréquence d'amplification (f_0), épaisseur (H) et vitesse (V_s) de la couche amplificatrice

$$f_0 = V_s / (4H)$$

$$f_0 = 1.8 \text{ Hz}$$

$$\rightarrow H = 28 \text{ m (200 m/s)}$$

$$\rightarrow H = 18 \text{ m (130 m/s)}$$

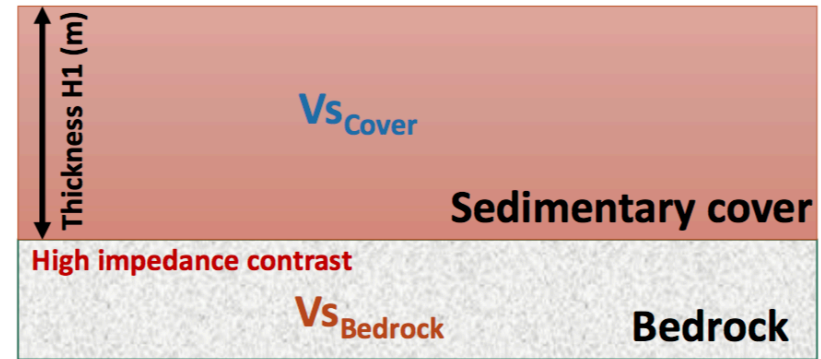


Effets de site & Aléa sismique

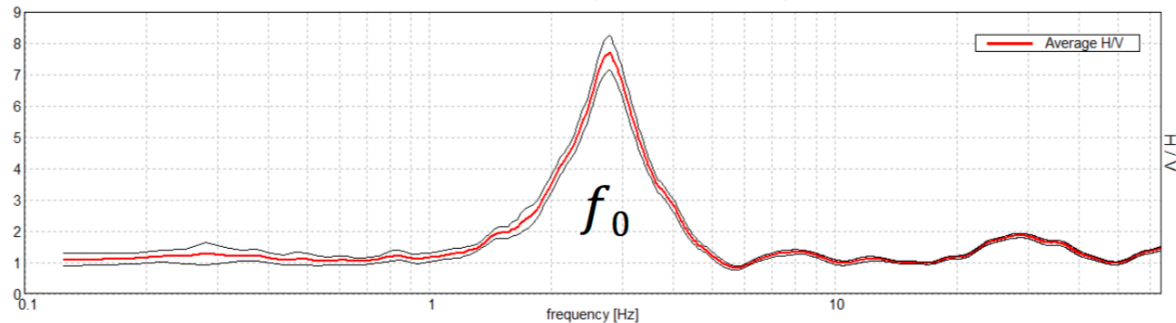
Pour une couche : Relation de 1^{er} ordre entre fréquence d'amplification (f_0), épaisseur (H) et vitesse (V_s) de la couche amplificatrice

$$f_0 = V_s / (4H)$$

Amplification A_0 = fonction du contraste d'impédance (vitesse x densité)

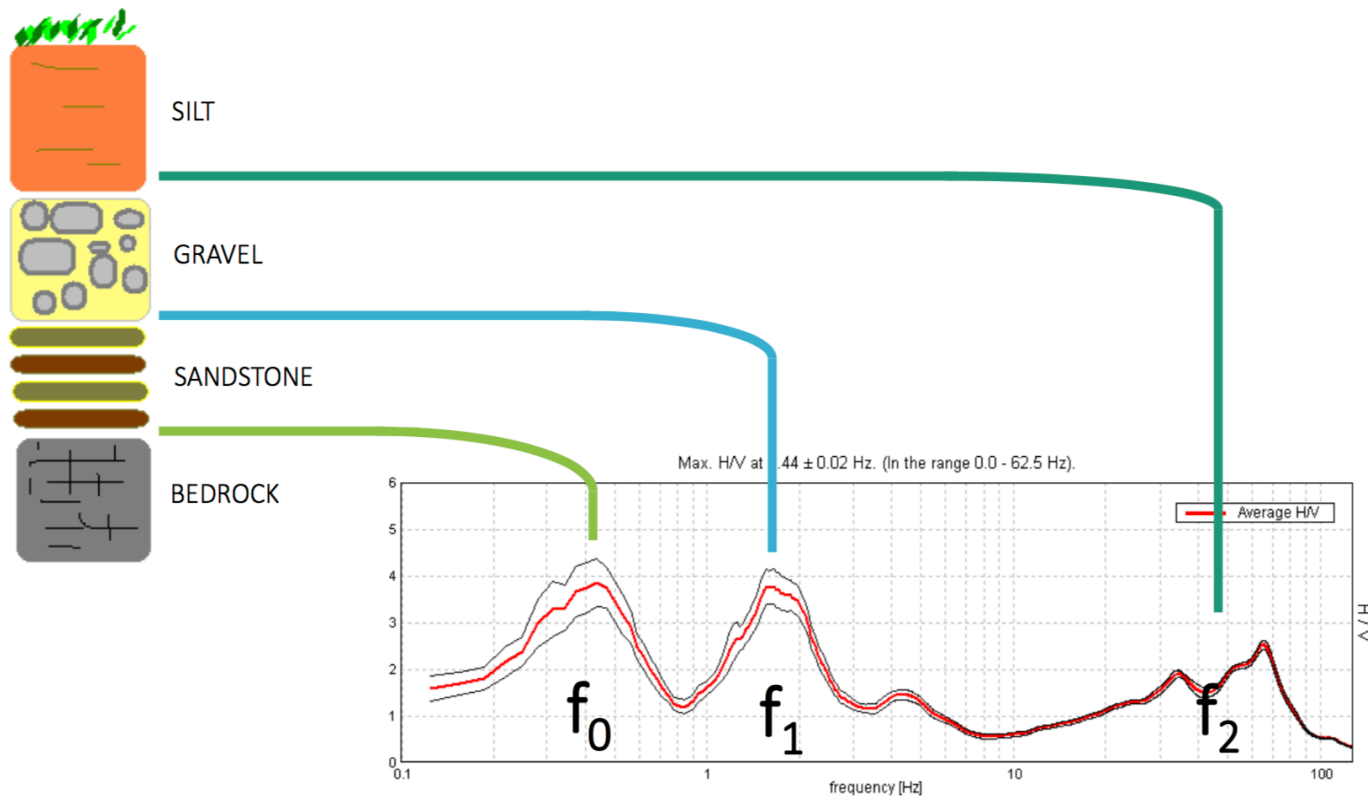


Picco H/V a 2.78 ± 0.03 Hz (nell'intervallo 0.0 - 64.0 Hz).



Effets de site & Aléa sismique

Pour un multicouches : Fréquences d'amplification sont fonctions de la structure de subsurface



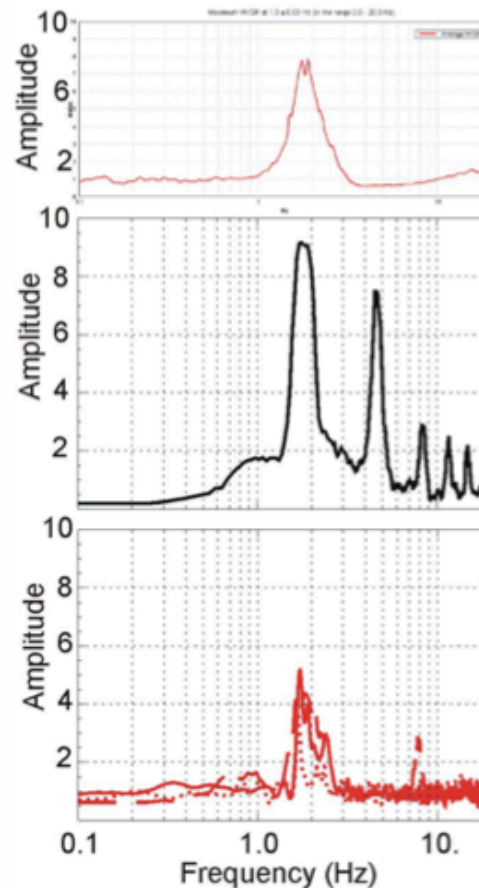
Effets de site & Aléa sismique

Caractérisation des effets de site :

Géologie (forage, etc.)

Mesures pendant les séismes

Mesures de bruit sismique



Microtremor h/v ratio peak frequency **1.9 Hz** (0.53 s)

Shake modelled spectrum peaks at **1.71 Hz** (0.58 s) and **4.54 Hz** (0.22 s)

Input Soil Profile:

- 2.5 m Sand (U. B.) at 130 m/s
- 3.0 m Clay (PI = 5-10%) at 85 m/s
- 12. m Clay (PI = 20-40%) at 132 m/s

Average earthquake h/v ratio peak frequency **1.75 Hz** (0.57 s)

- 2006_01_15 M_w 4.0 ---
- 2004_07_19 M_w 6.4 ———
- 2004_07_15 M_w 5.8 ·····



Effets de site & Aléa sismique

Caractérisation des effets de site :

A vendredi !

