

# *Dynamique des structures*

**Abdellatif MEGNOUNIF**

e-mail: [abdellatif\\_megnounif@yahoo.fr](mailto:abdellatif_megnounif@yahoo.fr)

**Partie 3 : Conception parasismique**  
**Sous Partie 3A : Méthode Statique Linéaire Equivalente**

**Chap. 13**

**Notions de Sismologie**

# STRUCTURE DU COURS

## Troisième Partie: Conception parasismique. Méthode statique linéaire équivalente

### 13. Notions de sismologie

- Introduction.
- La terre.
- Les séismes.
- Location d'un séisme.
- Propagation et ondes sismiques.
- Mesures des séismes.
- Séismes et comportement du sol.

### 14. Méthodes de calcul sismique.

- Introduction.
- Méthodes dynamiques.
- Méthodes statiques équivalentes.



## **15. Analyse dynamique non linéaire. Notion de facteur de comportement**

- Introduction.
- Equation du mouvement. Méthodes de résolution.
- Concept d'absorption d'énergie par déformation plastique
- Calcul élastique équivalent au calcul non linéaire. Facteur de comportement
- Non linéarité géométrique

## **16. Éléments de conception en zone sismique.**

- Introduction.
- Risque sismique et séisme de calcul.
- Comportement des sols et choix des fondations.
- Choix des matériaux.
- Choix des structures.



## **17. Règles parasismiques Algériennes (RPA99-2003).**

- Introduction.
- Domaines d'application et conditions d'application.
- Règles générales de conception.
- Critères de classification.
- Règles de calcul.
- Justification de la sécurité.

## **18. Prescriptions de dimensionnement et dispositions constructives selon les RPA (99-2003).**

- Introduction.
- Prescriptions complémentaires et éléments non structuraux.
- Structures en béton armé.
- Charpentes en acier.
- Maçonnerie porteuse chaînée.
- Fondations et murs de soutènement

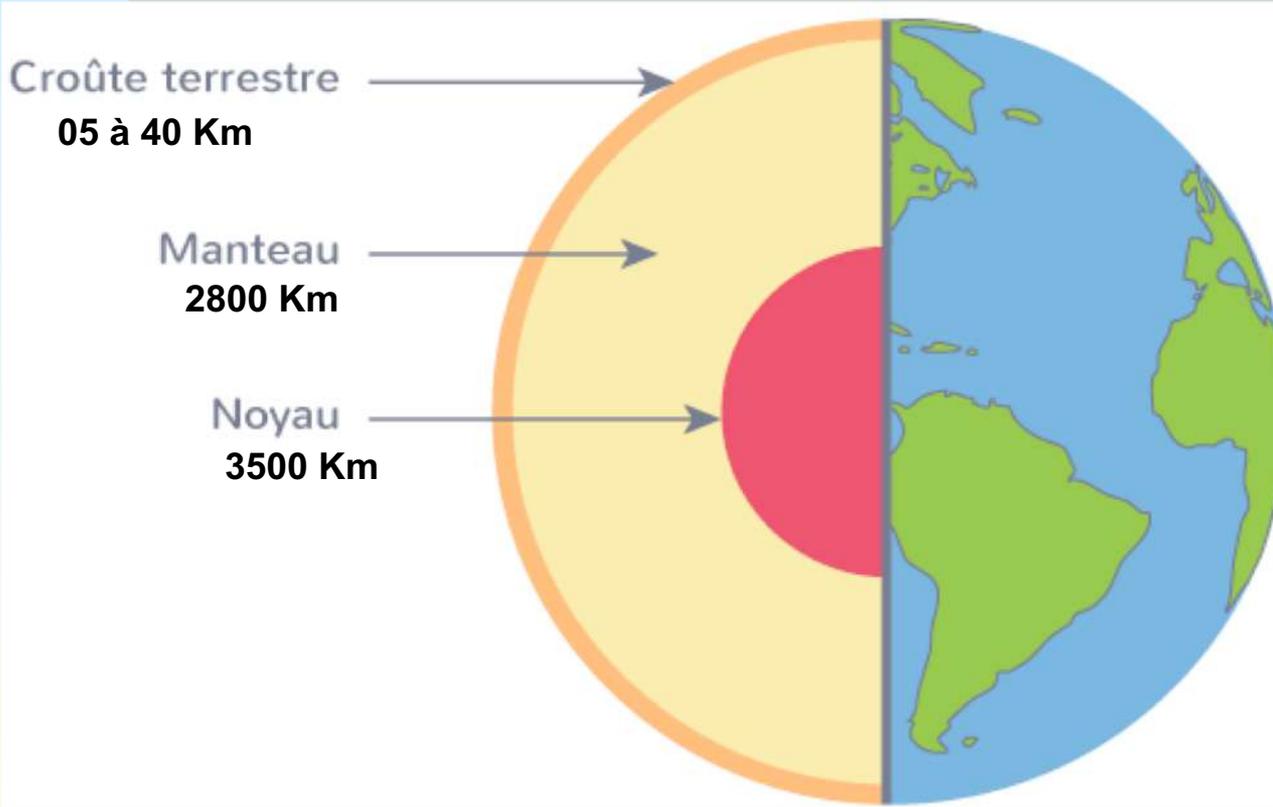


# 1. Introduction

- **La sismologie, science qui étudie**
  - 1. les séismes : causes, répartitions, mécanismes, prévention et prévision**
  - 2. et la propagation des ondes sismiques à travers le globe. Ce sont des signaux dont la déformation au cours de la propagation donne une idée sur la structure interne du globe.**
- **Sismologie est une branche de la géophysique**
- **C'est une science qui s'est imposée vue l'importance des dégâts causés par les séismes.**

# 2. La terre

## i. Composition



Le **noyau**, 3500 Km d'épaisseur.

- ✓ **Noyau externe** : Liquide. Constitué essentiellement de fer (80 à 85%) et de 10 à 12% d'élément non déterminé entre soufre, oxygène, silicium et carbone) et 5% de Nickel. Très visqueux (1 à 100 que l'eau). **4000°C**
- ✓ **Noyau interne** : Au centre. 80% d'alliages de fer et 20% de Nickel. Une pression de 3.5 millions de bars au centre de la terre. **6000°C**

02 types de **Croûte terrestre** :

- ✓ La croûte **continentale**, très hétérogène (composée de granite et de roches sédimentaires (30 à 100 Km)
- ✓ La croûte **océanique**, plutôt homogène (composée de roches basaltiques) (< 5 Km)

Le **manteau**, 2800 Km d'épaisseur. On différencie

- ✓ Le manteau **supérieur** (plus ductile se déforme plastiquement sans se rompre) et moins visqueux.
- ✓ Le manteau **inférieur**. Plus solide. Témoin de la **convection** mantellique (matière tj en mvt, responsable du transfert d'énergie calorifique provenant du noyau)

## ii. Organisation de la terre

La terre est organisée en plaques qui bougent. C'est la **Tectonique des plaques**.

02 zones à l'origine du mouvement de ces plaques:

- ✓ **La lithosphère:** correspondant à la couche rigide située à la surface de la terre. Elle contient la croûte terrestre et une partie du manteau supérieur. Sa limite inférieure de 100 à 200 Km de profondeur
- ✓ **L'asthénosphère :** située sous la lithosphère et contient une partie du manteau supérieur. Elle est moins rigide. Zone où on constate une diminution de la vitesse, due à la fusion partielle des péridotites.

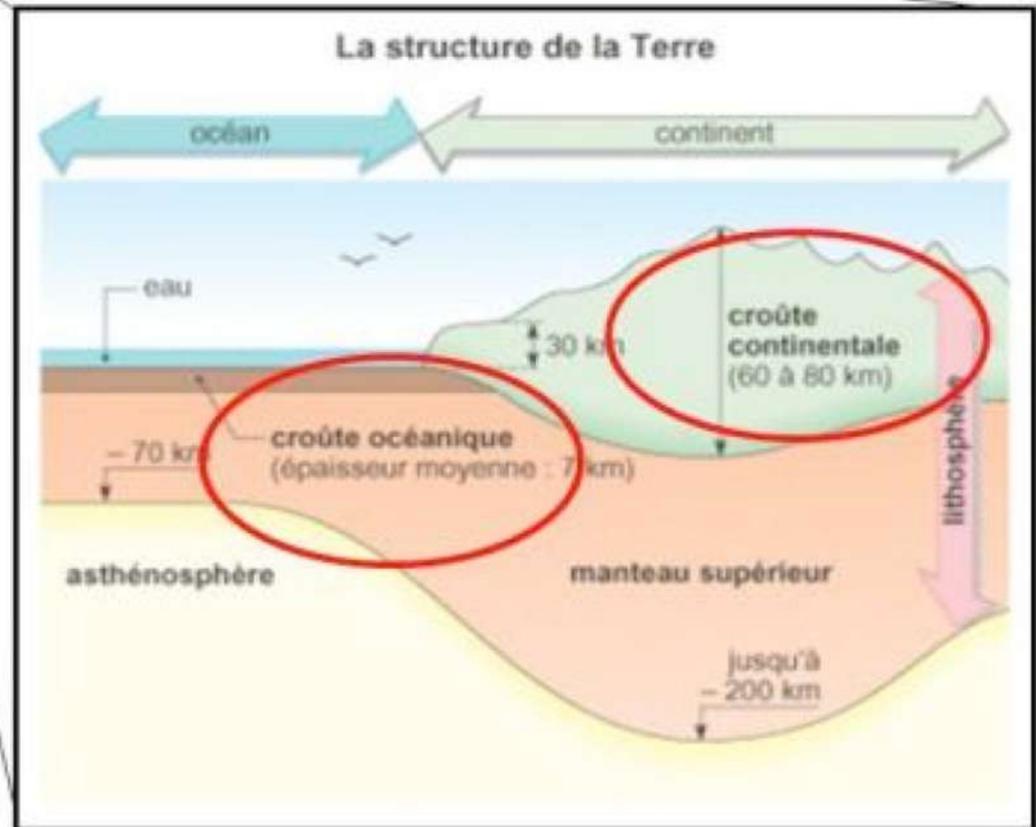
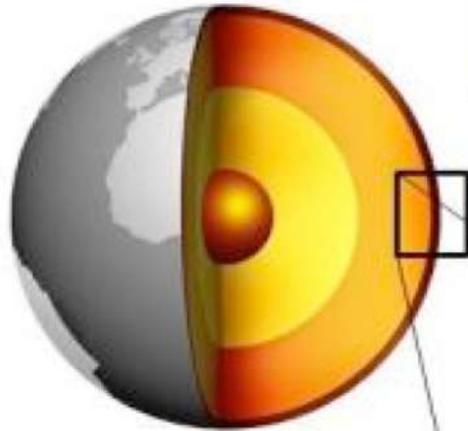
Entre la lithosphère et l'asthénosphère, existe une zone de déplacement des plaques lithosphériques.

**Zone de Subduction:** Endroit où une plaque s'enfonce dans le manteau sur plusieurs centaines de Km. La grande partie d'activité sismiques et volcaniques se produisent dans cette zone.

**Points chauds:** se situent à la jonction du manteau inférieur et du noyau. Partie d'activités volcaniques les plus profondes.



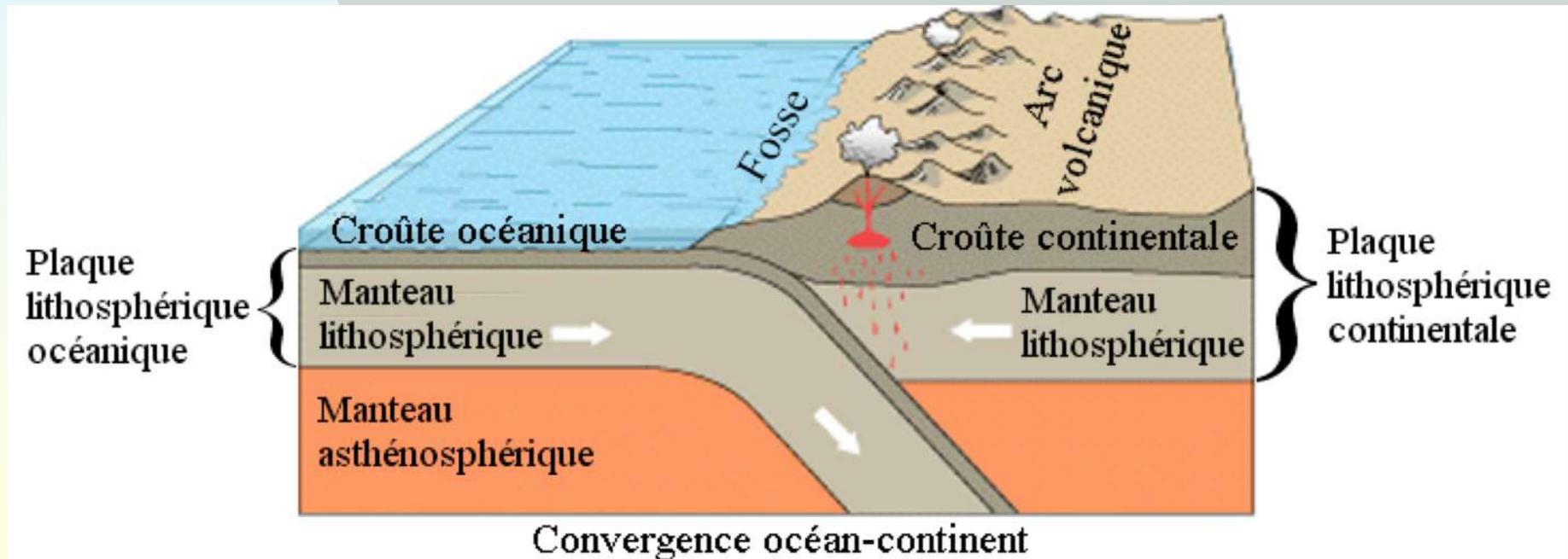
# 3. Croûte terrestre



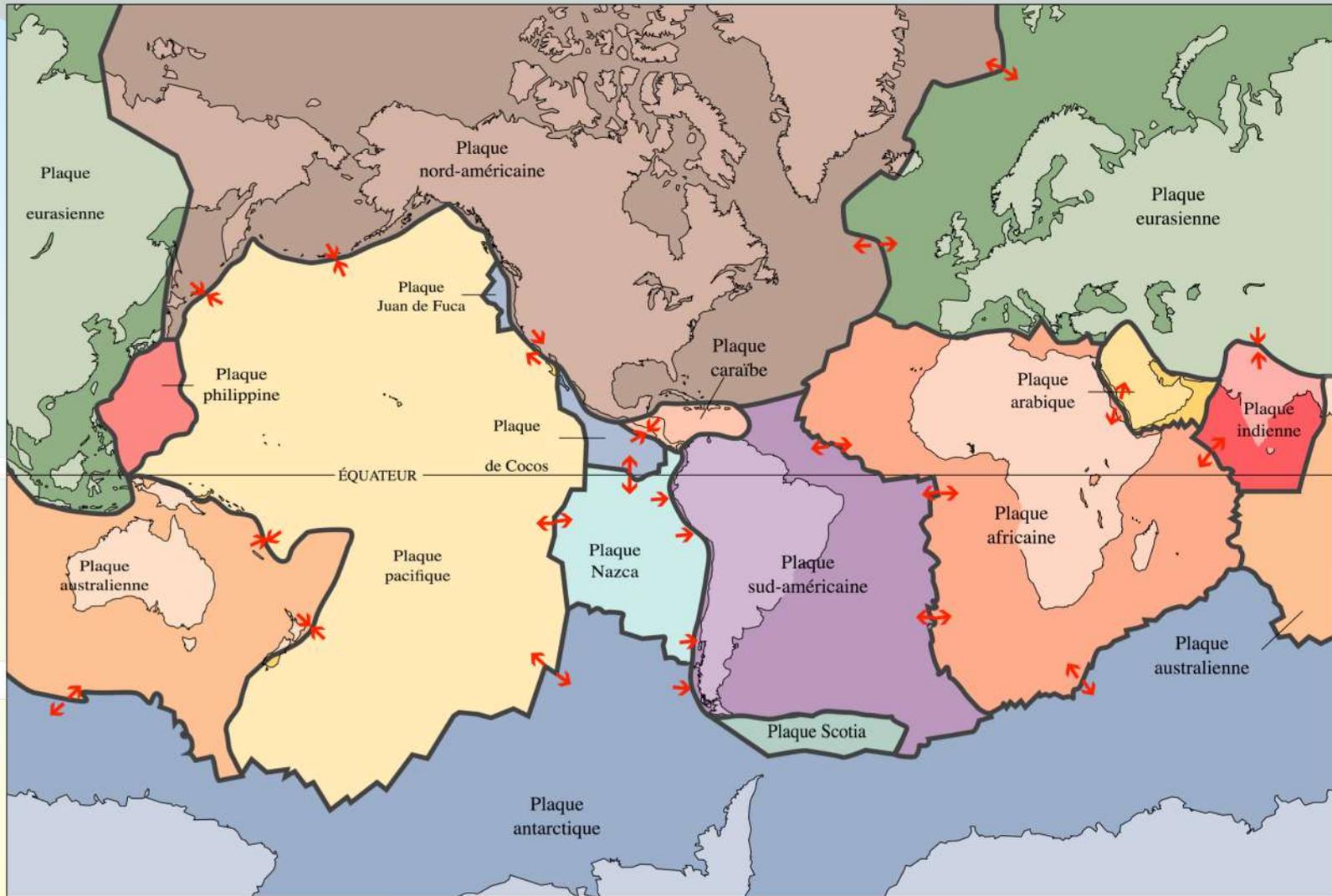
Plaque **lithosphérique** (continentale et océanique) : Zone de la surface terrestre délimitée par une forte activité sismique et volcanique.

Ces plaques se déplacent de quelques cm par an. 02 types de mouvement:

- ✓ Rapprochement de 02 plaques; Zone de convergence
- ✓ Ecartement de 02 plaques; zone de divergence



## Mouvement de plaques lithosphériques



→ ← Zone de convergence  
← → Zone de divergence

# 3. Les séismes

## i. Définition

Ce sont des tremblements de terre qui caractérisent l'activité interne du globe. Le séisme se caractérise par des secousses brèves et brutales qui peuvent provoquer des dégâts importants.

02 théories connues:

### 1. Théorie de la source dilatationnelle:

Séisme est une explosion dans le magma ou bien une force d'entrée du magma dans la croûte. Généralement associée aux séismes profonds.

### 2. Théorie du rebond élastique : la plus acceptée par les scientifiques. Les plaques tectoniques sont véhiculées par **convection**, un processus dynamique qui décharge la chaleur de l'intérieur de la planète.

Ce mvt est responsable;

- ✓ D'une part des tremblements de terre et volcans
- ✓ D'autre part formation d'océans, de continents et des dépôts minéraux.

Ainsi, qd 02 plaques se déplacent cote à cote en direction opposée (horizontalement ou verticalement), elles se frictionnent et se gênent. Une pression s'exerce alors jusqu'à ce que les plaques se libèrent. Ceci s'accompagne d'une énergie qui est dégagée sous forme de tremblement de terre.

### ii. Types de failles tectoniques

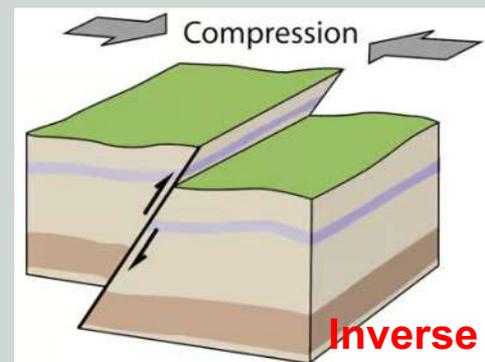
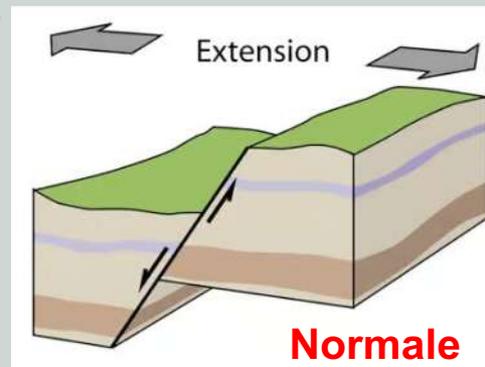
Les failles sont des cassures de la lithosphère se trouvant généralement aux frontières des plaques lithosphériques.

Il existe plusieurs types de failles, en fonction de la contrainte tectonique (compressive ou extensive) et du mouvement des blocs.

On distingue les failles verticales (rares), obliques ou cisailantes (décrochantes)

#### Failles **Obliques** :

- ✓ **Normales** : dues aux contraintes extensives. C'est un allongement de la structure avec un affaissement d'un bloc par rapport à un autre
- ✓ **Inverses** : contraintes compressives. Raccourcissement de la structure, l'un des plans est légèrement poussé au dessus de l'autre

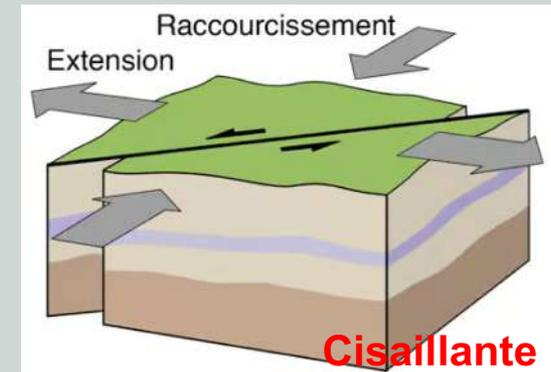


#### Failles **Verticales** :

- ✓ Rares

#### Failles **Cisailantes** (décrochantes) :

- ✓ Le mouvement des blocs se fait dans le plan horizontal. Un des blocs se déplace vers la gauche (ou la droite) par rapport à l'autre



On peut aussi les combiner

Qlqs exemples de failles



Séparation des plaques tectoniques en Islande (02 cm / an)



Séismes en Turquie et Syrie 06 Février 2023

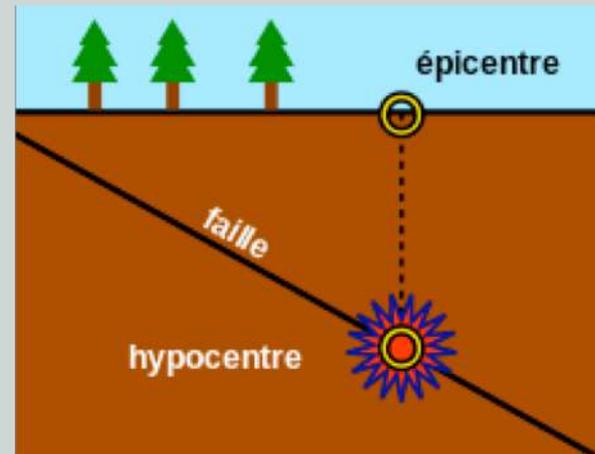
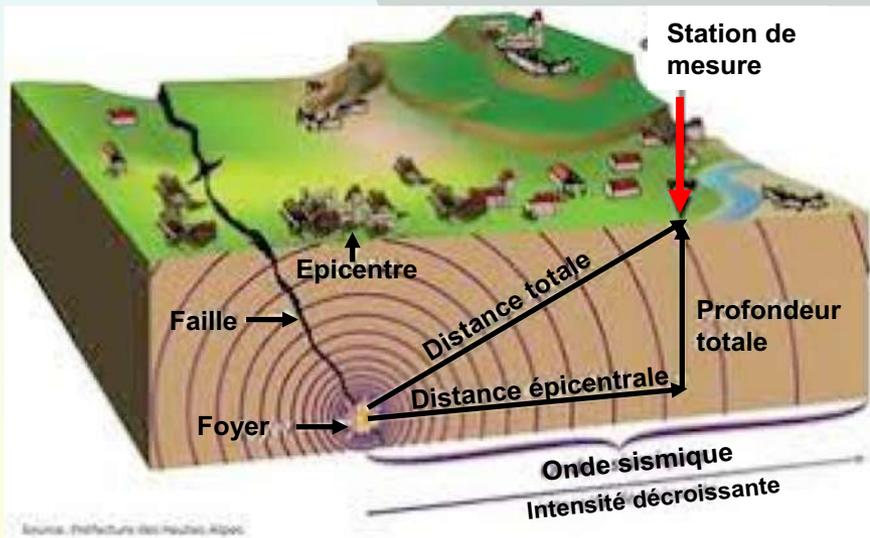


Faïlle de San Andreas (1200 Km)  
Cause de plusieurs tremblements de terre

# 4. Location d'un séisme

**Hypocentre (ou foyer) :** L'endroit où se produit le séisme. C'est le point intérieur d'où provient la première onde sismique. Pouvant se trouver entre la surface et 700 Km

**Epicentre :** le point à la surface du sol directement au dessus de l'hypocentre. C'est ce qu'on cherche en générale, c'est la localisation.

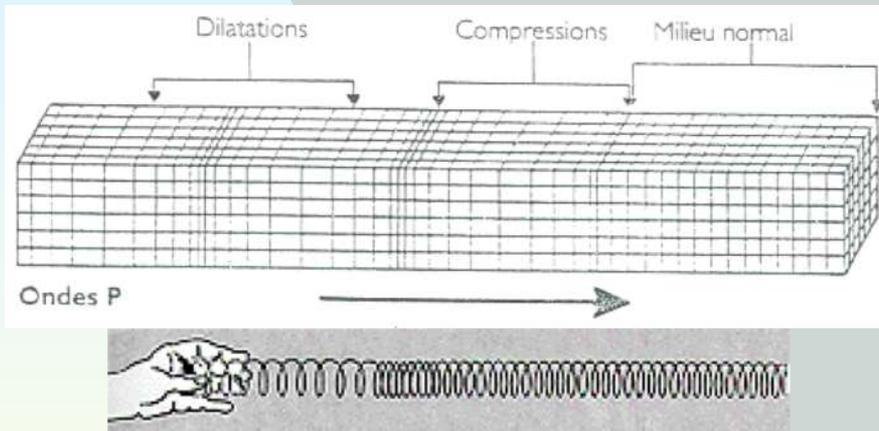


# 5. Propagation et Ondes sismiques

Les ondes caractérisent la propagation de la secousse sismique qui prend naissance au foyer.

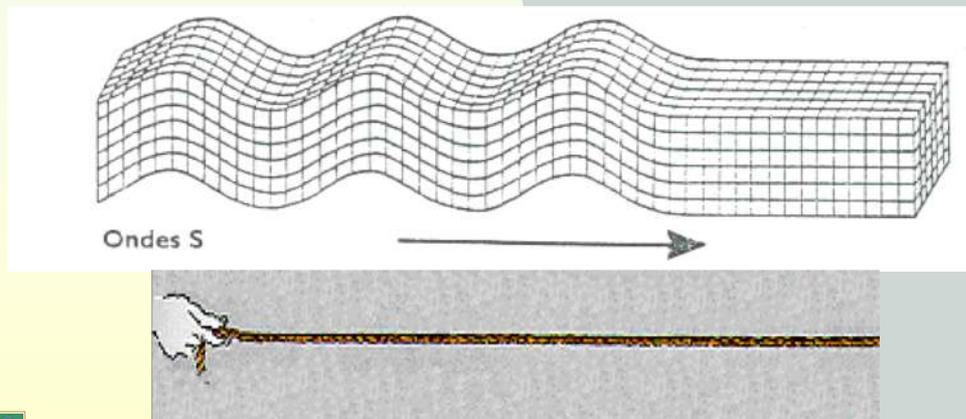
Ces ondes parcourent un sol très hétérogène engendrant des mouvements très complexes, difficilement prédictibles.

Les ondes se divisent en : (ondes de volume et ondes de surface)

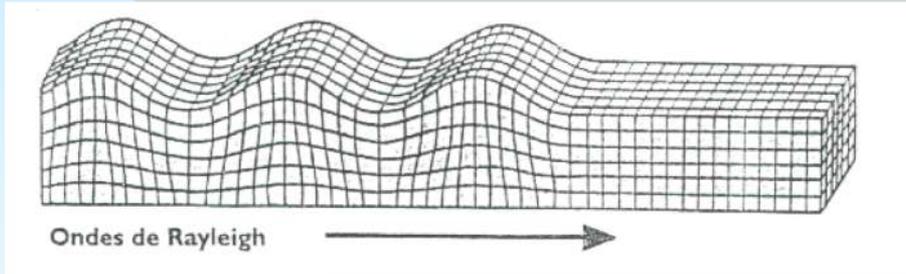


1. **Ondes de volume** : Se propagent à l'intérieur de la terre. 02 types:

✓ **Ondes P** (primaires) ou longitudinales : Se propagent en 7 à 8 Km/s et s'accompagnent d'un changement de volume (**compression et dilatation alternée**)

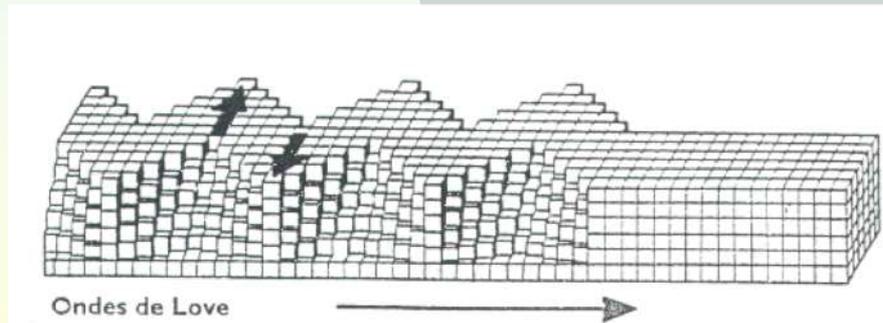


✓ **Ondes S** (secondaires) ou transversales : 4 à 5 Km/s et s'accompagnent d'une distorsion dans le plan perpendiculaire à la direction de la propagation, provoquant un cisaillement sans changement de volume.



2. **Ondes de Surface** : (1.5 à 5 Km/s dans les terrains compacts ou rocheux et 0.5 à 1.5 Km/s dans les terrains meubles). en arrivant à la surface, les ondes de volume produisent des ondes de surface sur une profondeur très faible.

✓ **Ondes R** ou ondes de Rayleigh : Les points de sol décrivent des ellipses dans le plan vertical de propagation, entraînant des compressions (ou tractions) ainsi que des cisaillements dans le sol.



✓ **Ondes Q** ou ondes de Love : points de sol se déplacent dans un plan tangent à la surface perpendiculairement à la direction de propagation, engendrant des contraintes de cisaillement.

## Vitesses de propagation

**Hyp:** Sol élastique et homogène avec  $E$ ,  $\nu$  et  $\rho$  (masse volumique)

Vitesse des ondes P

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}$$

$\lambda$  et  $G$  : Ctes de Lamé

Vitesse des ondes S

$$v_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)} \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Rapport des 02 vitesses sera:

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{\frac{2(1 - \nu)}{(1 - 2\nu)}}$$

Ne dépend que de «  $\nu$  »:

$$\nu = 0 \quad \frac{v_p}{v_s} = 1.41$$

$$\nu = 0.15 \quad \frac{v_p}{v_s} = 1.56$$

$$\nu = 0.25 \quad \frac{v_p}{v_s} = 1.71$$

Ainsi, l'onde « P » se propage 1.5 fois plus vite que « S ». Ce sont les premières ondes qui sont enregistrées

Connaissant les vitesses, ainsi que les écarts entre les temps d'arrivée de « P » et « S » on peut estimer la distance entre le foyer et le point d'enregistrement

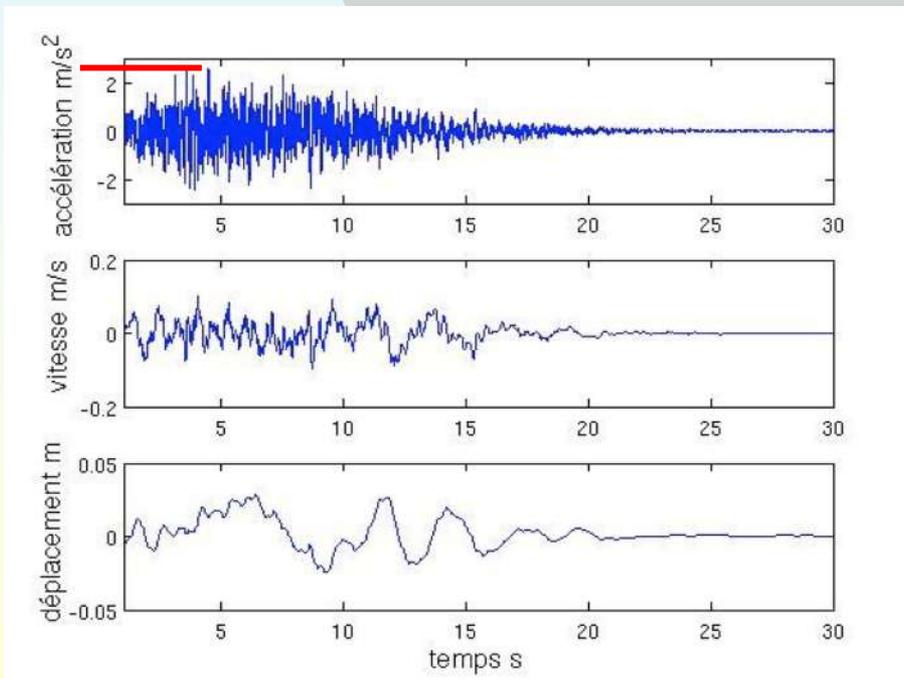
# 6. Mesures des séismes

## i. Introduction

Les séismes sont mesurés à l'aide d'appareils appelés « Séismographe » (Vibromètre ou accéléromètre) (Voir Chapitre 4 paragraphe 4).

Les accéléromètres ou accélérographes sont conçus pour des séismes importants qui ne se déclenchent que si le tremblement de terre est perceptible.

Les accélérographes produisent un enregistrement, **accélérogramme**, proche de l'épicentre, représentant la variation de l'accélération dans une direction donnée en fonction du temps (On peut aussi enregistrer la vitesse et le déplacement).



On lit directement sur le graphe, l'accélération maximale du sol, paramètre important pour la définition du risque sismique.

Faire attention à la direction du séisme. Pas de direction privilégiée. Prendre les 03 cas possibles (02 horizontales et 01 verticale)

Donc au moins 03 appareils de mesure (01 insuffisante)

En calcul génie parasismique, on considère les 03 directions.

L'amplitude du mvt vertical est généralement nettement inférieure à celle horizontale. (2/3)

**Pour un site donné, généralement, peu de données d'accélérogrammes. On extrapole vers d'autres accélérogrammes similaires (très connus dans le monde) pour construire des accélérogrammes artificielles, tenant compte des paramètres locaux du site à étudier. (Voir chapitre 7 : Notion de spectre de réponse)**

**C'est une méthode de grande approximation pour estimer les forces induites lors de passage d'un tremblement de terre.**

**02 systèmes de mesure de tremblement de terre (aucune n'est suffisante en construction parasismique.)**

**L'intensité du séisme**

**La magnitude du séisme**

### ii. Intensité

Mesure l'importance d'un séisme en un lieu en fonction des réactions de la population et des dégâts provoqués.

L'intensité dépend de la distance à l'épicentre. En s'éloignant cette intensité diminue.

Plusieurs échelles d'intensité ont été définis.

#### L'échelle Mercalli (Proposé en Europe en 1906)

Degré I	Secousse imperceptible à l'homme
Degrés II-III	Secousse ressentie par un faible nombre de personnes
Degrés IV-V	Séisme ressenti par de nombreuses personnes
Degré VI	Séisme ressenti par la plupart des personnes, cloches mises en branle.
Degré VII	Dommages légers aux constructions
Degrés VIII-IX	Dommages importants aux constructions, apparition de fissures dans le sol
Degré X	Destruction générale des bâtiments
Degrés XI-XII	Catastrophes

## L'échelle Mercalli Modifié (Wood et Newman 1932)

Reste plutôt utile dans les régions dépourvues d'instruments

Degré I	Les habitants ne sentent rien, le séisme n'est détecté que par les instruments les plus sensibles
Degré II	Seules quelques personnes éveillées ressentent de faibles vibrations
Degré III	Senti à l'intérieur, spécialement les étages supérieurs, les lustres se balancent
Degré IV	Toutes les personnes éveillées ressentent fortement les secousses. Ustensiles, fenêtres et portes vibrent. Les voitures stationnées commencent à bouger
Degré V	Senti par presque tous (y compris les dormeurs). Objets instables se renversent, les arbres vibrent.
Degré VI	Senti par tous. Les meubles lourds se déplacent. Quelques cheminées cassent. Quelques tuiles tombent des toitures. Les gens sortent dehors de peur.
Degré VII	Domage négligeable dans les constructions bien conçus. Quelques lézards dans les autres.
Degré VIII	Domage considérable dans les constructions ordinaires. Des cheminées, les murs tombent
Degré IX	Domage considérable dans les constructions spécialement conçues. Fissures au sol. Canalisations souterraines cassées
Degré X	Ponts et digues s'écroulent. Rails de chemin de fer tordus. Sol très fissuré
Degré XI	Très peu de construction subsistent. Panique générale. Fissure très large au sol.
Degré XII	Villes rasées. Ruine totale. Ondes vues à la surface du sol.

### iii. Magnitude

Définie en 1935 par Richter. **Bien que dépassée actuellement**, elle reste très utilisée. Elle est semi-empirique et dépend des instruments de mesure et n'est applicable que localement.

Est fonction de l'amplitude maximale enregistrée par un séismographe à 100 Km de l'épicentre.

Mesure l'énergie sismique radiée (des ondes sismiques) lors d'un séisme. A ne pas confondre avec Intensité qui évalue les effets destructeurs en un lieu particulier

Elle peut être donnée par la formule suivante :

$$M_l = \log \left( \frac{A}{A_0} \right)$$

Améliorée par la suite:  $M_l = \log \left( \frac{A}{A_0} \right) + c \log(\Delta)$  (Empirique)

$M_l$  : Magnitude locale

$A$ : L'amplitude maximale relevée par le sismographe.

$A_0$ : Amplitude référence (dépendant de la rigidité du sol, de la longueur de la faille et de la surface.

$\Delta$  : distance épicentrale (Km)

$c$  : constante de calibration

**En passant d'une magnitude 4 à 5, on multiplie l'ampleur des secousses par 10.**

### iii. Magnitude (Locale)

Pour des distances  $>$  à 100 Km de l'épicentre, on peut faire des corrections

Par des graphes de correction établis

Ou bien par la formule de correction :

$$M = M_{\delta} + 1.73 \log_{10} \left( \frac{100}{\delta} \right)$$

$\delta$  : Distance de l'épicentre

$M_{\delta}$  : magnitude basée sur l'amplitude à la distance «  $\delta$  »

La plus forte magnitude qu'on a pu estimer (non mesurée) est celle de Lisbonne en 1755 (**9.25**)

La plus forte enregistrée n'a pas dépassée (**9.50**) à Valdivia (Chili) en 1960.

Attention !!! Pb distance du foyer ?

- ✓ Un séisme de magnitude **M=8** ne donne naissance qu'à des intensités faibles et **n'a pas d'effet destructeur** si son foyer dépasse les **100 Km** (profond)
- ✓ Un séisme peu profond (Agadir, foyer **3 Km**) avec **M=5.75** a donné naissance à des intensités **de XI** près de l'épicentre.

## L'échelle Richter (Magnitude)

Magnitude	Description	Effets	Fréquence
< 1.9	Micro	Micro tremblement de terre, non ressenti	8 000 / j
2.0 à 2.9	Très mineur	Non ressenti mai détecté et enregistré	1 000 / j
3.0 à 3.9	Mineur	Souvent ressenti mais causant rarement de dommages	49 000 / j
4.0 à 4.9	Léger	Objets à l'intérieur des maisons bougent, bruits d'entrechoquement. Dommages importants peu communs.	6 200 / j
5.0 à 5.9	Modéré	Peut causer des dommages majeurs pour constructions mal conçues. Dommages légers pour bonnes constructions	800 / an
6.0 à 6.9	Fort	Destructeur pour des zones allant jusqu'à 180 Km si elles sont peuplées	120 / an
7.0 à 7.9	Majeur	Dommages modérés à sévères dans des zones plus vastes	18 / an
8.0 à 8.9	Important	Dégâts majeurs à l'épicentre et sur des zones à des centaines KM.	1 / an
9.0 et plus	Exceptionnel	Destructeur total à l'épicentre et possible sur des zones à des milliers de KM.	1 tous les 20 ans

## Quelques principaux séismes en Algérie

Date	Lieux	Intensité	Magnitude	Observations
03/02/1716	Alger	X		Nombreux dégâts
09/10/1760	Oran	X		3000 Morts
10/03/1819	Mascara	X		Nombreuses victimes
04/08/1908	Constantine	VIII	6.4	
24/06/1910	Mascara	X	5.1	
06/08/1912	Oued Marsa	VI	5.3	
12/02/1946	Monts du Hodna	IX	5.6	246 morts
09/09/1954	El Asnam	X	6.7	1243 morts et 20000 maisons détruites
11/03/1973	Tenes	VIII	5.7	
10/10/1980	Beni Rached (Chlef)	X-XI	7.5	5000 morts
29/10/1989	Tipaza	VIII	5.9 et 5.6	30 morts
29/10/1999	Ain Temouchent		5.8	28 morts
21/05/2003	Boumerdes	X	6.8	2266 morts et 10261 blessés
18/03/2021	Bejaia		6.0	

## Quelques principaux séismes au monde

Date	Lieux	Intensité	Magnitude	Observations
11/10/1138	Alep (Syrie)		Inconnue	230 000 morts
25/11/1833	Sumatra (Indonésie)		8.8-9.2 (estim.)	
31/01/1906	Equateur (Colombie)		8.8	3000 Morts
18/04/1906	San Francisco (USA)		7.9	3000 morts
19/05/1940	El Centro (USA)	X	6.9	9 morts et 20 blessés
<b>22/05/1960</b>	<b>Valdivia (Chili)</b>		<b>9.50</b>	<b>3000 à 6000 morts</b>
17/10/1989	Loma Prieta (USA)		6.9	63 morts et 3700 blessés
17/01/1994	Northridge (USA)		6.7	72 morts et 9000 blessés
17/01/1995	Kobé (Japon)		7.3	6500 morts et plus de 40000 blessés
03/03/2002	Hindou Kouch (Afghanistan)		7.4	220 morts
26/12/2003	Bam (Iran)		6.6	Entre 26271 et 34000 morts
26/12/2004	Sumatra (Indonésie)		9.3	Séisme et Tsunami (plus de 250 000 disparus)
06/02/2023	Turquie et Syrie		7.8	59259 morts et 121704 blessés
08/09/2023	Marrakech (Maroc)		6.8	2960 morts et 5674 blessés

## Passer de la magnitude locale à la **magnitude de moment**

Introduite par T.C Hanks et H. Kanamori (en 1977 et 1979)

La disparité des mesures, actuellement, due au type d'onde, au type du capteur, à sa fréquence propre, à la distance et au type de magnitude utilisé explique la grande variabilité de la mesure de la magnitude.

Actuellement la tendance est vers la magnitude de moment «  $M_w$  ». On passe par une **technique d'inversion** (déterminer les causes d'un phénomène à partir des observations expérimentales de ses effets) pour les sismographes pour retrouver conjointement la localisation du séisme, son mécanisme au foyer et son moment sismique d'où déduit la magnitude de moment.

Globalement la **magnitude de moment** est reliée aux dimensions physiques de la faille, à la **résistance** des roches et à la moyenne du **déplacement** sur la faille pendant le séisme.

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10}(M_0) - 6.07$$

$M_0$ : moment sismique (N.m)

Les ctes de la formule sont choisies pour coïncider avec l'échelle locale de magnitude (échelle Richter) pour les petits et moyens séismes

**Lien entre magnitude de moment et rupture de la faille**

$$M_w = \frac{2}{3} \log_{10}(\mu \cdot L \cdot l \cdot D) - 6.07$$

$\mu$  : module de rigidité du milieu (résistance de la croûte terrestre dans la zone de foyer (N/m<sup>2</sup>)  
 L et l : longueur et largeur de la zone de rupture (partie de la faille déplacée lors du séisme (Km)  
 D : déplacement moyen de 02 blocs le long de la faille (m).

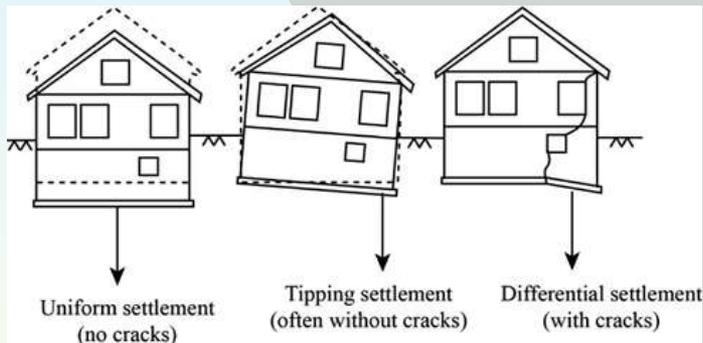
**Quelques exemples**

$M_w$	Longueur de la rupture (Km)	Déplacement sur la faille (m)	Durée de la rupture (s)	Fréquences
9	800	8	250	1 / 10 ans
8	250	5	295	1 / an
7	50	1	15	10 / an
6	10	0.2	3	100 / an
5	3	0.05	1	1000 / an
4	1	0.02	0.3	10 000 / an

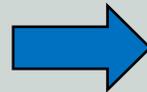
# 7. Séisme et comportement du sol

Grande **instabilité** de la surface lors d'un séisme. Résultat **déplacements** importants de la surface engendrant des **dégâts** considérables dans les structures.

Sol **granulaire de faible compacité** (remblai récent) : risque de **tassements** importants (Consolidation due aux vibrations)



Sols **saturés d'eau granulaire** de faible compacité : **Pressions interstitielles** supplémentaires dues aux vibrations. Phénomène de **liquéfaction** provoquant parfois un renversement des bâtiments



Terrain en **pente** : **Glissement**



## LA DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE :

La liquéfaction est un phénomène dans lequel la résistance et la rigidité d'un sol sont réduites par les secousses sismiques ou d'autres chargements rapides. La liquéfaction et les phénomènes connexes ont été responsables d'énormes dégâts lors de tremblements de terre historiques dans le monde entier.

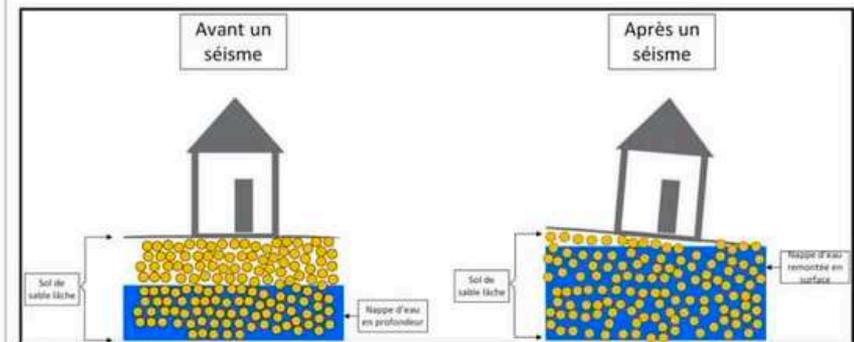


schéma de la liquéfaction d'un sol

**Merci. Fin du chapitre 13**

# *Dynamique des structures*

**Abdellatif MEGNOUNIF**

**Prochain Cours**

**Chap. 14**

**Méthodes de calcul sismique**