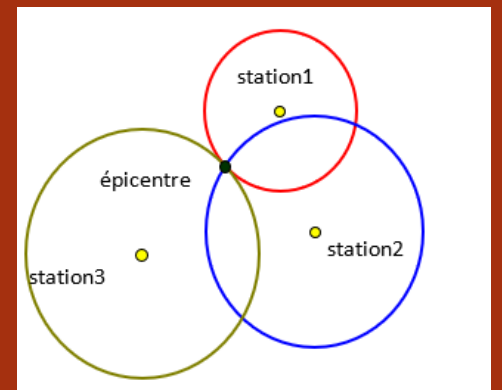
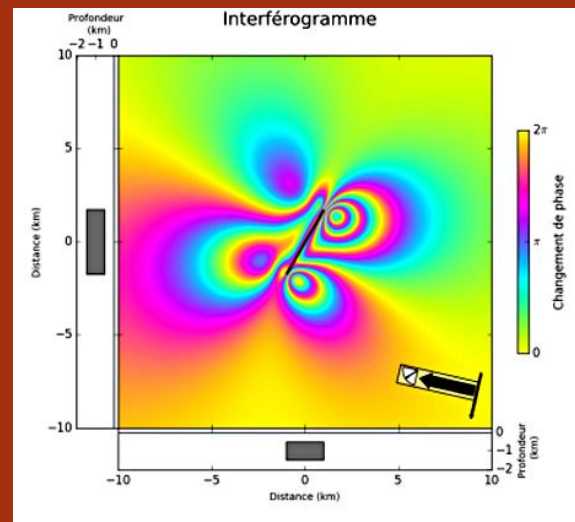


ST-D LES DÉFORMATIONS DE LA LITHOSPHERE

ST-D-2 LES SÉISMES



EXTRAIT DU B.O.

Savoirs visés

L'étude des séismes et l'évaluation des aléas sismiques passent par la description des événements et par des mesures et des calculs (magnitude, mécanismes au foyer, déplacement par GPS...).

La relaxation rapide d'énergie accumulée par les déformations élastiques, mesurables par géodésie spatiale, est responsable de la formation des séismes.

La notion (historique) de cycle sismique rassemble l'accumulation de déformation élastique et le rebond sismique.

Pour un séisme donné, le mécanisme au foyer permet l'analyse de la géométrie de la faille et de son mouvement. L'étude d'un ensemble de mécanismes au foyer dans une région donnée permet de caractériser et modéliser le contexte tectonique.

La distribution mondiale des séismes et la variabilité des mécanismes au foyer renseigne sur la géodynamique globale et sur les frontières de plaques.

Les mesures de géodésie spatiale par GPS permettent d'évaluer les déplacements instantanés, de les comparer à ceux déterminés à l'échelle des frontières de plaque (en termes de bilan de déformation) et de préciser la connaissance de l'aléa localement.

Capacités exigibles

- Expliquer la notion de magnitude et les ordres de grandeurs et comparer la magnitude de moment à une intensité type MSK.
- Relier les notions de magnitude et de temps de récurrence à l'évaluation de l'aléa sismique.
- Expliquer la notion de risque : distinguer les concepts d'aléa et de risque.
- Discuter la notion de cycle sismique en la confrontant avec des données géodésiques actuelles.
- Exploiter des données de mécanismes au foyer.
- Relier ces données aux contextes géodynamiques.
- Exploiter et relier des données de géodésie spatiale (GPS) permettant la surveillance des failles actives et la quantification de l'aléa par mesure de l'accumulation de déformation élastique autour de ces failles.
- Comparer en ordre de grandeur les déplacements (temps, distance, mouvement des plaques, mesures locales).



INTRODUCTION

- Définition: il s'agit d'un ébranlement brutal du sol provoqué par l'accumulation d'énergie potentielle par déformation élastique sous contrainte, en profondeur, à la suite d'une **rupture** et d'un **mouvement relatif brusque** de deux compartiments **lithosphériques**. Il en résulte une **libération instantanée d'énergie** qui s'était lentement accumulée.
- La plupart des séismes ont une origine tectonique (certains sont volcaniques).
- Tous sont dus à :
 - l'accumulation d'énergie par déformation élastique d'une roche,
 - sa libération brusque lors de la rupture, le plus souvent sur une faille préexistante (zone de fragilité où se relâchent préférentiellement les contraintes) sous forme de chaleur et d'ondes sismiques.

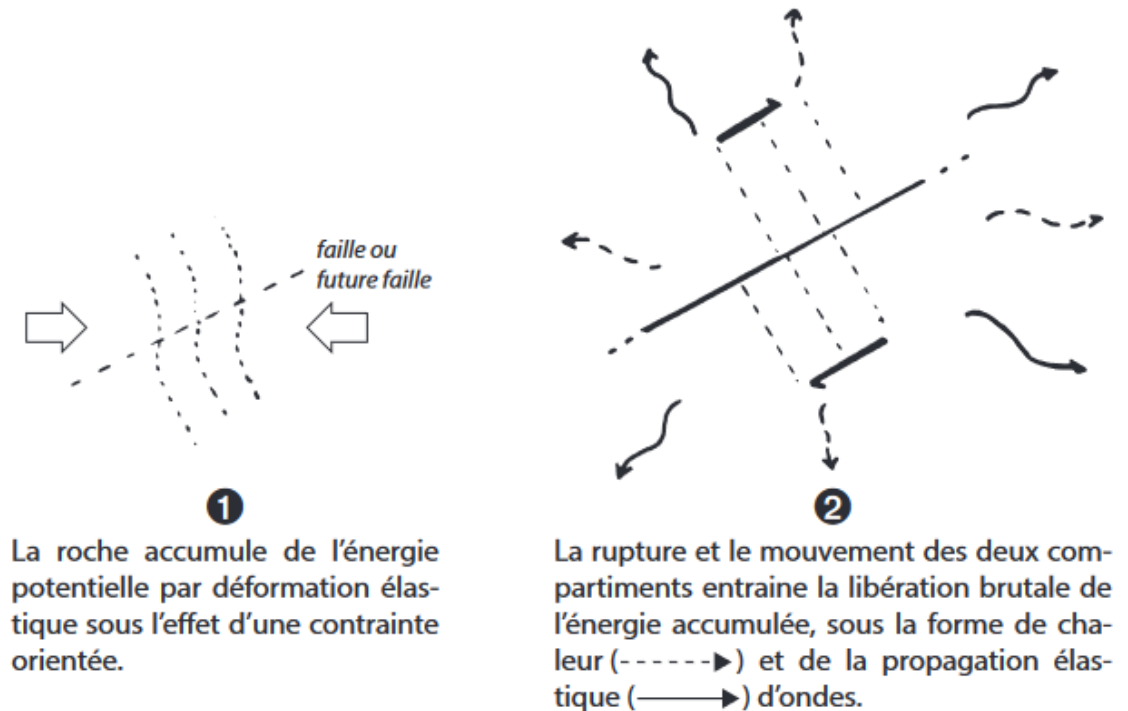


Figure 1: L'origine d'un séisme (source: A. Denis)

B. LES DONNÉES DE SISMOLOGIE METTENT EN ÉVIDENCE L'EXISTENCE D'ENVELOPPES CONCENTRIQUES

1. SÉISMES ET ONDES SISMQUES

Un séisme correspond à la libération brutale d'une grande quantité d'énergie emmagasinée lors des mouvements de la croûte terrestre. Le mouvement se traduit par la propagation d'ondes mécaniques à partir de la zone de rupture, appelée foyer, dont la projection orthogonale en surface est l'épicentre.

Onde: propagation d'une perturbation sans déplacement de matière dans un milieu matériel élastique

- De compression (P= premières)

⇒ plus grande vitesse

$$\Rightarrow Vp = \sqrt{(\kappa + (4/3)\mu)/\rho}$$

- De cisaillement (S =secondes)

$$\Rightarrow Vs = \sqrt{\mu/\rho}$$

Avec

κ module d'incompressibilité

μ Module de cisailment (=0 dans les fluides)

ρ Masse volumique

- Et de torsion (ondes de surface)

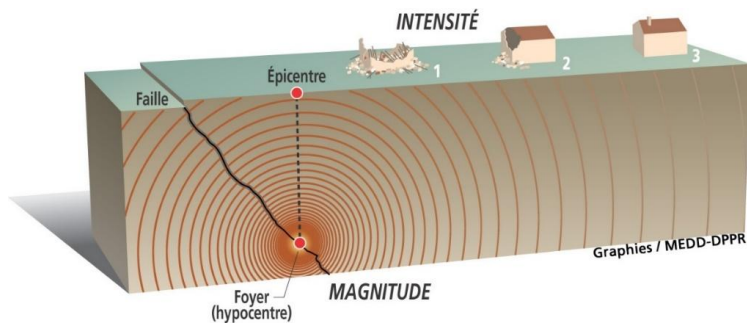


Schéma localisant le foyer, l'épicentre et les fronts d'onde d'un séisme

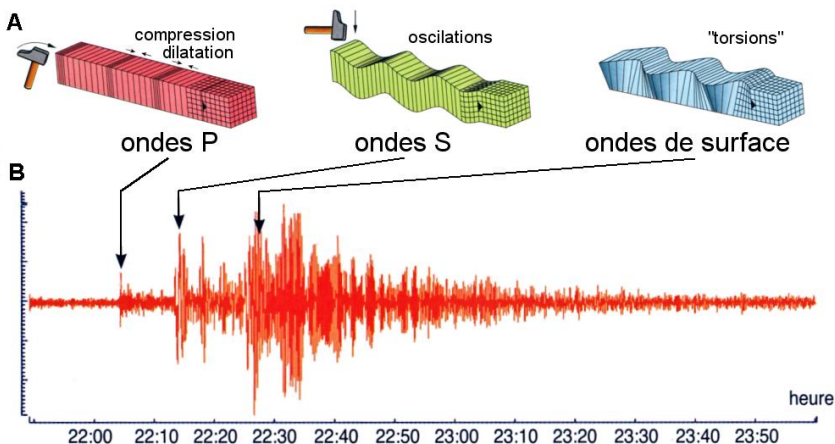
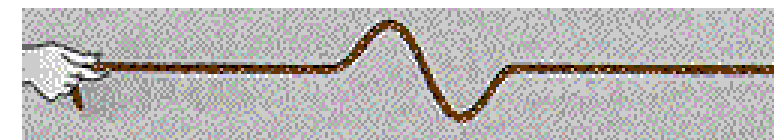
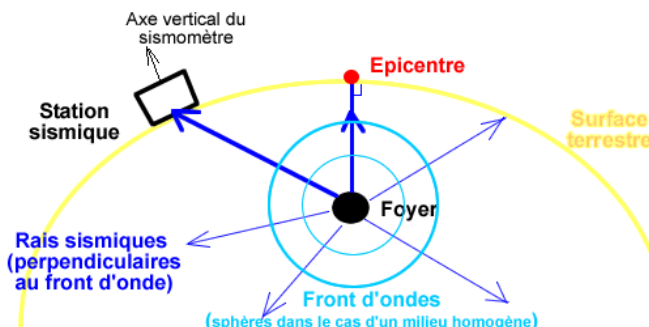
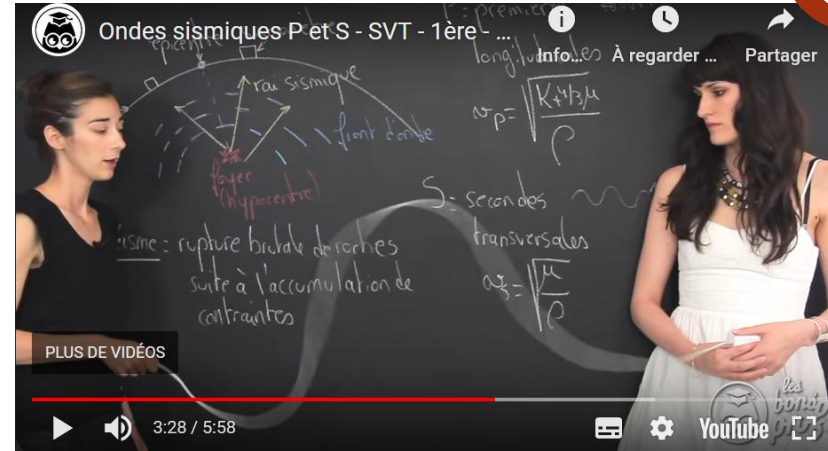
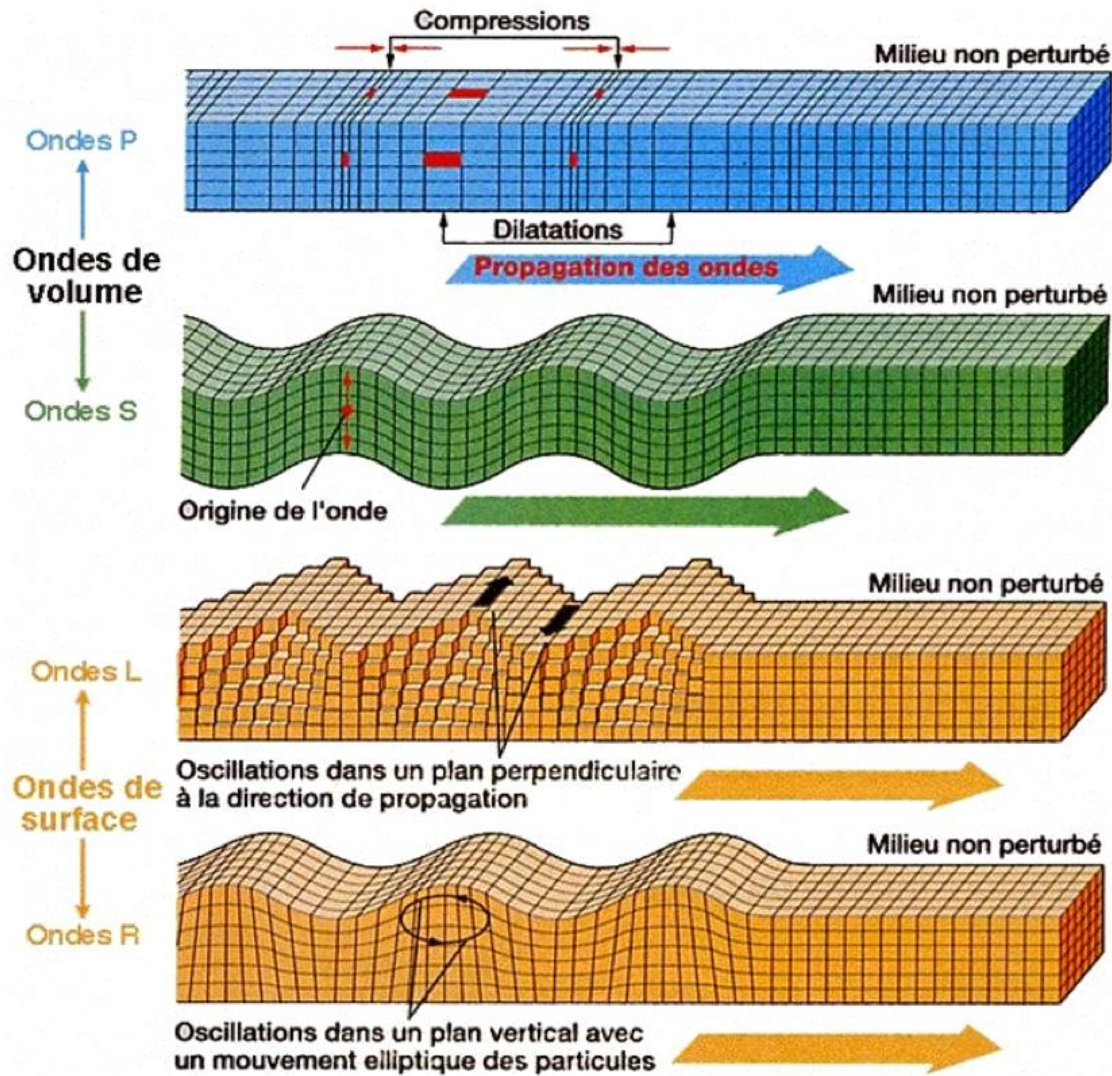


Figure 11 : sismogramme présentant les 3 ondes sismiques





$$V_p = \sqrt{\frac{K + 4/3\mu}{\rho}}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

INTRODUCTION

- Comprendre cette carte, c'est:
 - Localiser le foyer d'un séisme et en déduire l'origine des ondes
 - Identifier les contraintes à l'origine de l'accumulation d'énergie
 - Mesurer la quantité d'énergie libérée

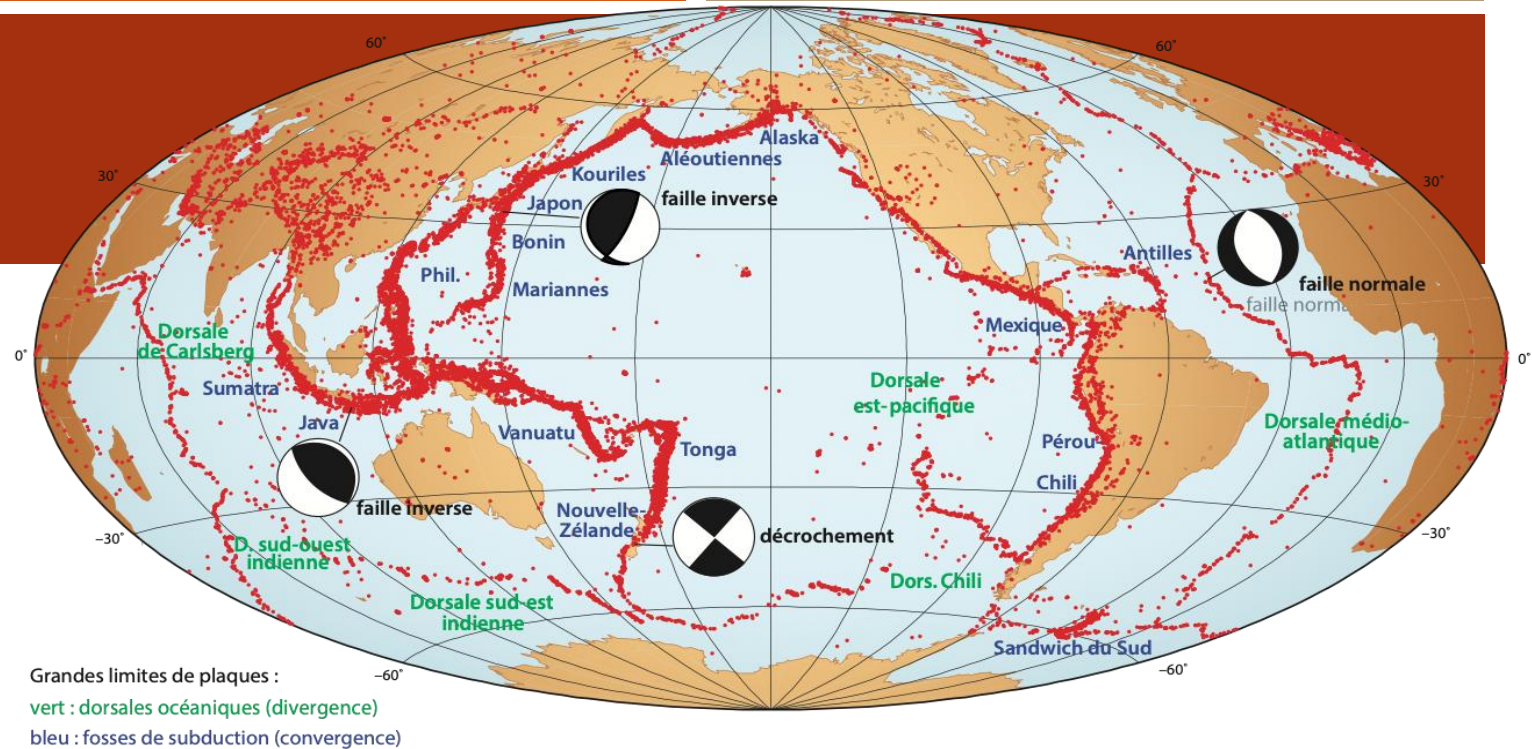


Figure 6.9 Carte de la sismicité mondiale (compilation logiciel GMT, UMR Dynamique de la Lithosphère, Université Montpellier/CNRS). La répartition des séismes souligne les zones de déformation active dans les océans ou sur les continents.

Figure 3 : carte de la sismicité mondiale (dans Renard et al., 2016)

Comment peut-on mesurer les ondes?

Qu'est-ce que cela nous apprend sur le fonctionnement des séismes?

Comment peut-on utiliser ces informations pour limiter le risque sismique?

PLAN

I. Méthodes d'observations

- A. Que peut-on déduire des sismogrammes?
- B. Que peut-on déduire des registres sismiques?
- C. Quelles sont les observations sur le plus long terme?

II. Mécanismes mis en jeu

- A. Notion de cycle sismique
- B. Limites de la notion de cycle sismique

III. Risques associés aux séismes

- A. Le risque dépend de l'aléa et de la vulnérabilité
- B. Définition de l'intensité d'un séisme
- C. Risques associés aux séismes

IV. Signification géodynamique des séismes

- A. La localisation des séismes est un marqueur des limites de plaques
- B. Les mécanismes au foyer permettent de déduire les états de contrainte

PLAN

I. Méthodes d'observations

- A. Que peut-on déduire des sismogrammes?
- B. Que peut-on déduire des registres sismiques?
- C. Quelles sont les observations sur le plus long terme?

II. Mécanismes mis en jeu

- A. Notion de cycle sismique
- B. Limites de la notion de cycle sismique

III. Risques associés aux séismes

- A. Le risque dépend de l'aléa et de la vulnérabilité
- B. Définition de l'intensité d'un séisme
- C. Risques associés aux séismes

IV. Signification géodynamique des séismes

- A. La localisation des séismes est un marqueur des limites de plaques
- B. Les mécanismes au foyer permettent de déduire les états de contrainte

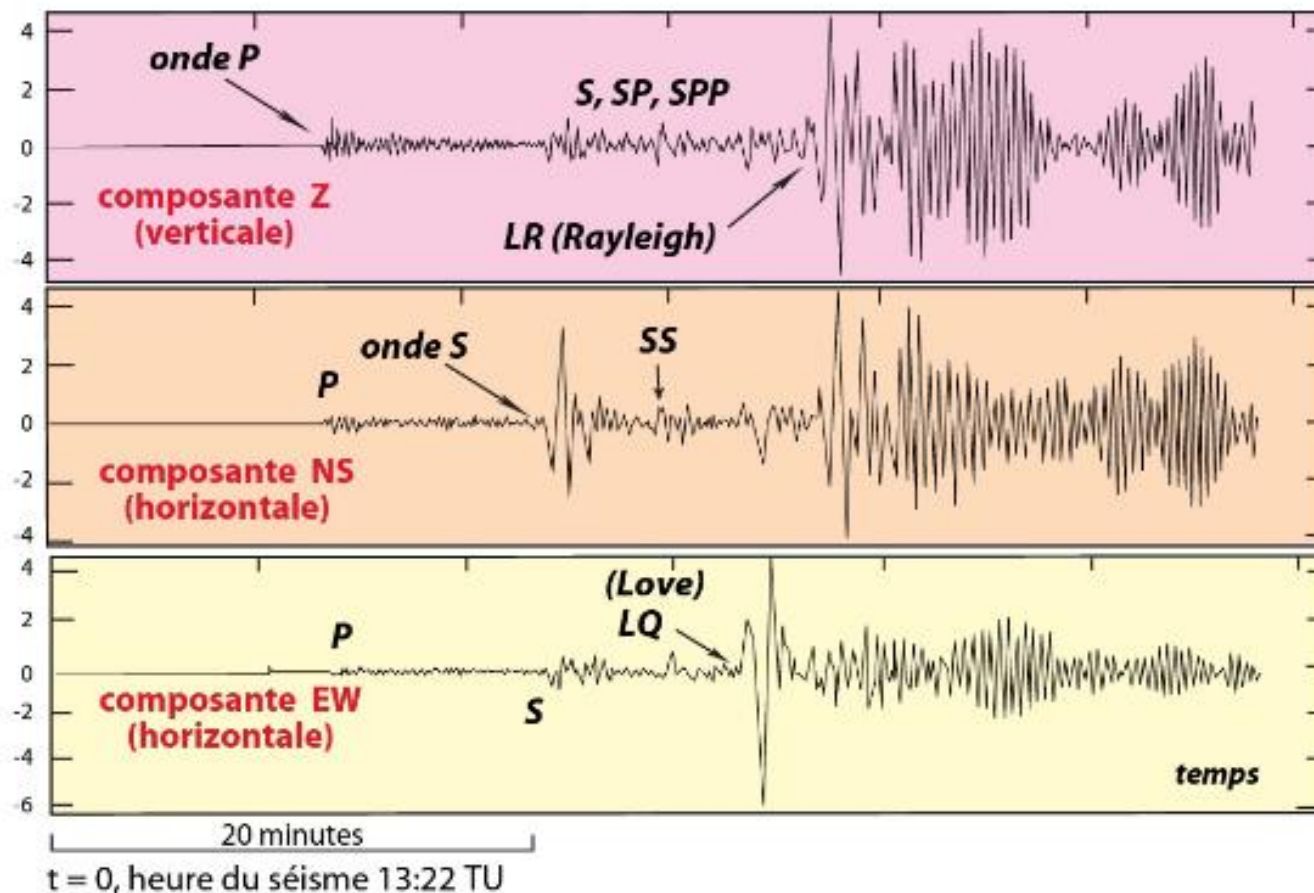
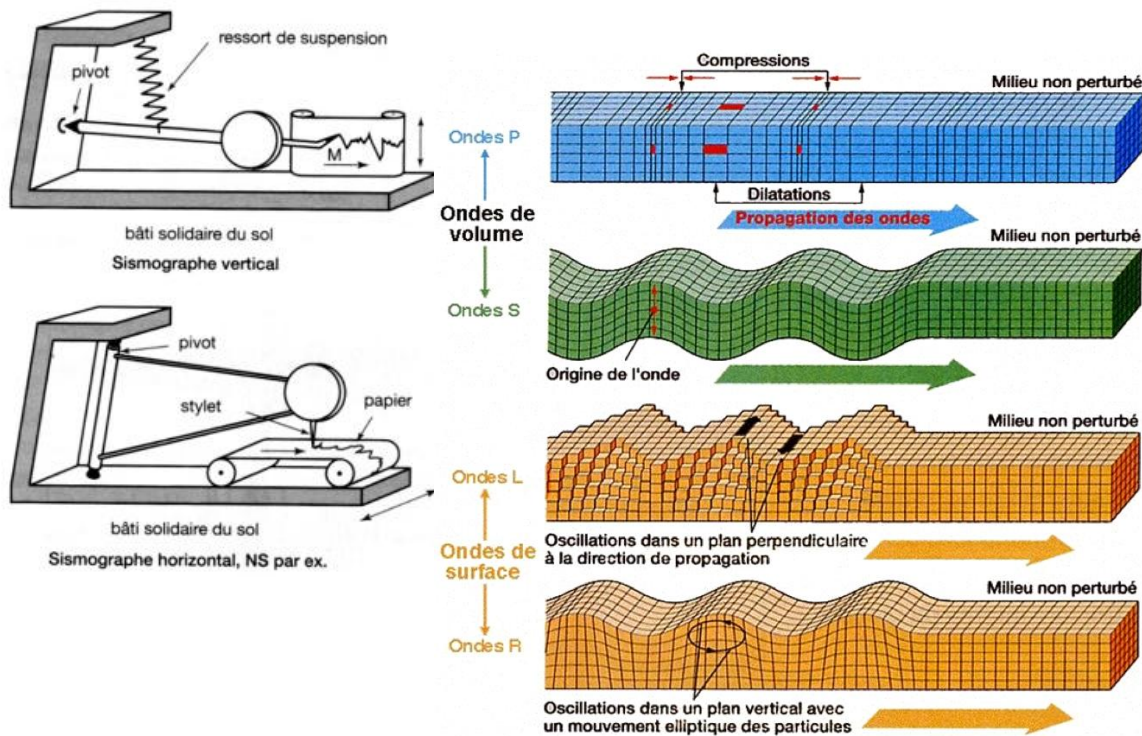
I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

A. QUE PEUT-ON DÉDUIRE DES SISMOGRAMMES?

I. Détermination de la localisation et de la profondeur du séisme



- Les ondes sismiques sont enregistrées par des **sismographes** (anciennement des ressorts à peson, désormais des accéléromètres) mesurant le déplacement du sol dans les **3 directions de l'espace** (NS, EW et z).



- Lorsque des ondes sismiques sont enregistrées par un sismographe, **on ne peut déduire la distance au foyer** de la vitesse des ondes car on ne sait depuis combien de temps elles se propagent.

- Mais on connaît v_p et v_s ainsi que durée entre t_p et t_s
- Nécessité d'avoir 3 sismographes
- Par **triangulation** identification de la position du foyer

$$t_p = t_0 + (D / v_p) \quad (1)$$

$$t_s = t_0 + (D / v_s) \quad (2)$$

D = distance épacentrale inconnue (km)

t_0 = temps d'origine inconnu (s)

v_p = vitesse de propagation des ondes P (km/s)

v_s = vitesse de propagation des ondes S (km/s)

de (1) et (2) il vient :

$$t_s - t_p = (D / v_s) - (D / v_p)$$

$$D = (t_s - t_p) / \left(\left(\frac{1}{v_s} \right) - \left(\frac{1}{v_p} \right) \right)$$

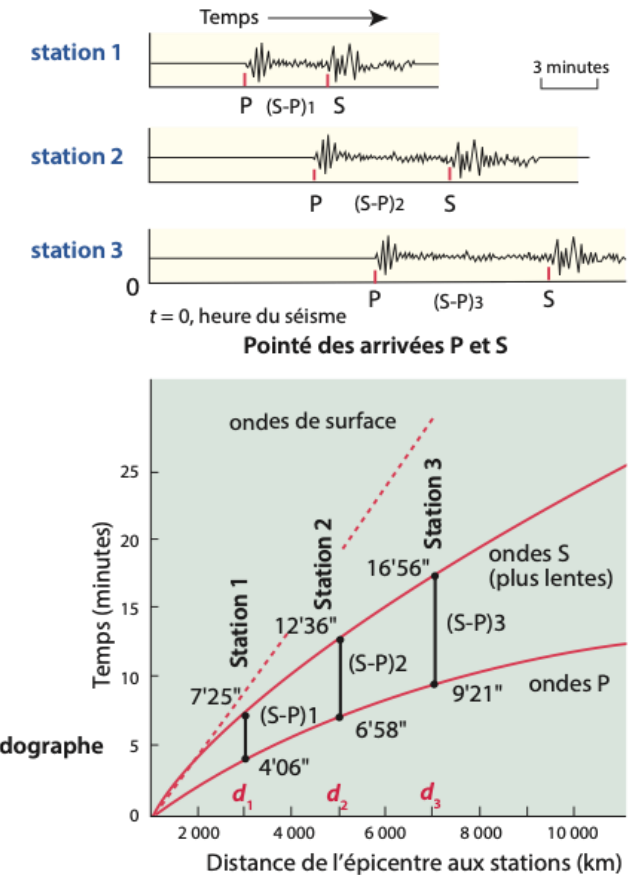
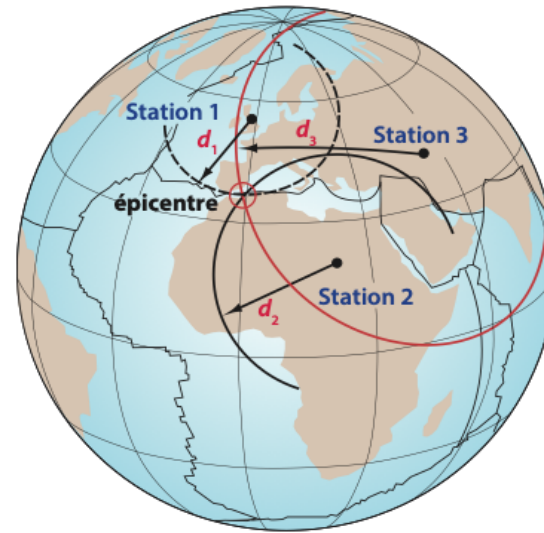
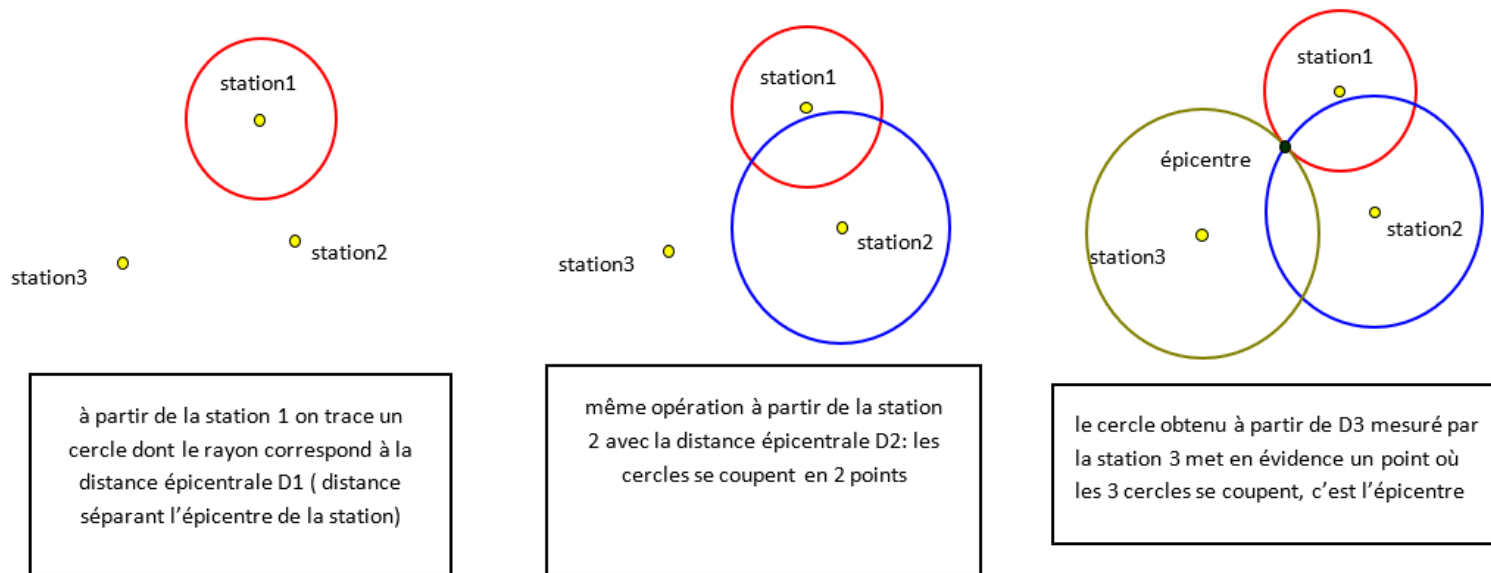


Figure 6.17 Principe de la détermination des épacentres (et hypocentres) par la méthode S-P.

Sismogrammes simplifiés enregistrés à trois stations (en haut) et hodographe (au-dessous) montrant la correspondance entre la différence des temps d'arrivée (S-P) et d , la distance station-source ou **distance épacentrale**. À gauche, la sphère terrestre montrant le principe de la triangulation pour déterminer l'épicentre à l'aide de trois stations. En fait, les réseaux mondiaux réalisent des positionnements très précis par triangulation à l'aide de très nombreuses stations. On accède ainsi par le calcul aux 4 inconnues du problème : t_0 (heure du séisme), X et Y (latitude, longitude de l'épicentre) et Z profondeur du foyer. Le calcul revient à minimiser la zone d'intersection des cercles s-p (minimiser le résidu).

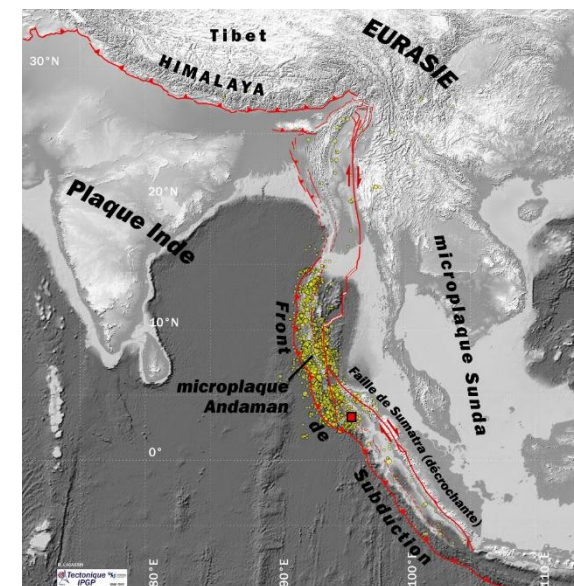
Figure 4 : principe de la détermination de la localisation des séismes (in Renart et al., 2016)



```
December 26, 2004, OFF W COAST OF NORTHERN SUMATRA,
Meredith Nettles
Goran Ekstrom

CENTROID, MOMENT TENSOR SOLUTION
HARVARD EVENT-FILE NAME M122604A
DATA USED: GSN
MANTLE WAVES: 73S,202C, T=300
CENTROID LOCATION:
ORIGIN TIME 01:01: 9.0 0.3
LAT 3.09N 0.04;LON 94.26E 0.03
DEP 28.6 1.3;HALF-DURATION 95.0
MOMENT TENSOR; SCALE 10**29 D-CM
MRR= 1.04 0.01; MTT=-0.43 0.01
MPP=-0.61 0.01; MRT= 2.98 0.16
MRP=-2.40 0.16; MTP= 0.43 0.00
PRINCIPAL AXES:
1. (T) VAL= 4.01;PLG=52;AZM= 36
2. (N) -0.12; 3; 130
3. (P) -3.89; 38; 222
BEST DOUBLE COUPLE:M0=4.0*10**29
NP1:STRIKE=329;DIP= 8;SLIP= 110
NP2:STRIKE=129;DIP=83;SLIP= 87
```

- Limites de l'identification du foyer par la méthode de triangulation: incertitudes
- Cf incertitudes associées (Sumatra, 26 décembre 2004)



I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

A. QUE PEUT-ON DÉDUIRE DES SISMOGRAMMES?

2. Détermination de la magnitude

Magnitude : mesure logarithmique de l'énergie dégagée par un séisme, prenant en compte la rigidité du milieu, la surface déplacée et la quantité de déplacement.

■ La magnitude:

- valeur **calculée**
- mesure l'**énergie libérée** au foyer d'un séisme
- Plus le séisme a libéré d'énergie, plus la magnitude est élevée, son échelle est **logarithmique**
 - ✓ *accroissement de magnitude de 1 ~ 30X l'énergie libérée*
 - ✓ *accroissement de magnitude de 1 ~ 10X l'amplitude du mouvement.*
 - ✓ *1 bombe atomique ~ 1 séisme de magnitude 6,5*

| Magnitude | Energie en Joules |
|-----------|----------------------|
| 3 | $1,99 \cdot 10^9$ |
| 4 | $6,31 \cdot 10^{11}$ |
| 5 | $1,99 \cdot 10^{12}$ |
| 6 | $6,31 \cdot 10^{13}$ |
| 7 | $1,99 \cdot 10^{15}$ |
| 8 | $6,31 \cdot 10^{16}$ |
| 9 | $1,99 \cdot 10^{18}$ |

La valeur de l'énergie est multipliée par 32 lorsque la magnitude augmente d'une unité

■ Méthode de calcul de magnitude = **Échelle de Richter** (1935) :

- **Indépendante** du lieu d'observation
- **M = log amplitude maximale d'oscillation d'un sismogramme** (en μm des ondes L) qui serait placé à 100 km de l'épicentre.
- Des abaques, obtenus par comparaison, permettent de ramener à la distance standard de 100 km l'amplitude des oscillations observées
- Cette échelle n'est appropriée **que pour des séismes proches et superficiels** (profondeur inférieure à 30 km)
- Cette magnitude se calculant à partir du logarithme, un séisme de magnitude 7 est dix fois plus « ample » qu'un séisme de magnitude 6, cent fois plus qu'un séisme de magnitude 5, etc...
- La magnitude est donc souvent évaluée « sur l'échelle de Richter ».



Figure 5 : l'échelle de magnitude de Richter

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

A. QUE PEUT-ON DÉDUIRE DES SISMOGRAMMES?

2. Détermination de la magnitude



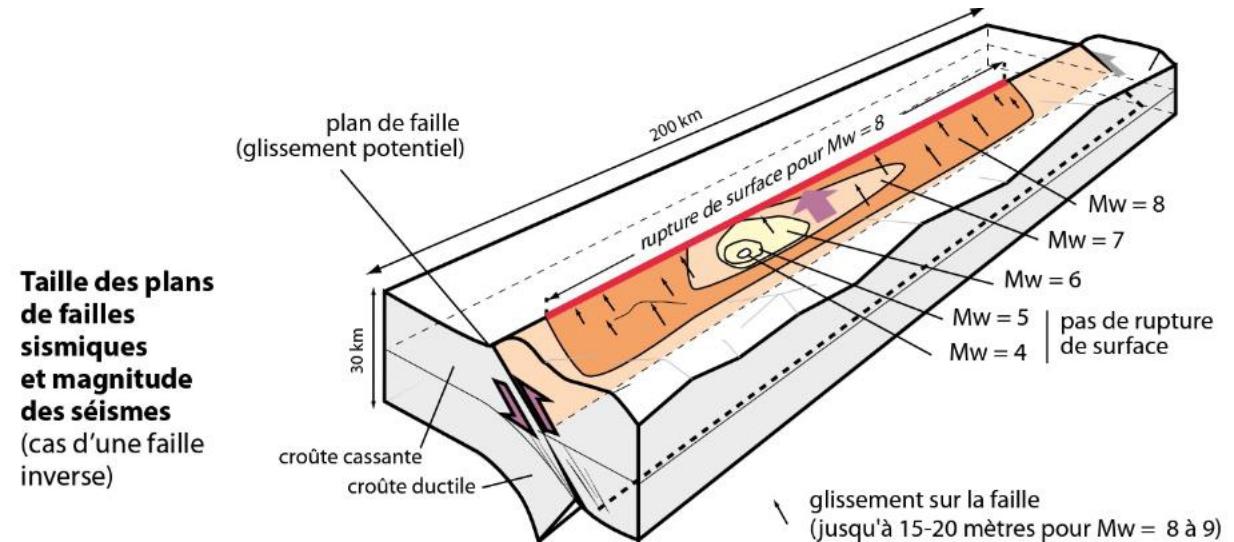
Magnitude : mesure logarithmique de l'énergie dégagée par un séisme, prenant en compte la rigidité du milieu, la surface déplacée et la quantité de déplacement.

- **Magnitude de moment M_w (Kanamori, 1977) :** calculée en utilisant l'ensemble des amplitudes du sismogramme

- ⇒ évaluation de l'énergie totale libérée sous forme d'ondes élastiques par le séisme = **moment**.
- ⇒ échelle la plus utilisée
- ⇒ Dépend de:
 - ✓ **Surface de la faille (S)**
 - ✓ **Déplacement sur le plan de faille (D)**
 - ✓ **Rigidité du milieu**

- **Magnitude max observée : 9,5 au Chili en 1960.**

- « c'est le moment »:



Taille des plans de failles sismiques et magnitude des séismes (cas d'une faille inverse)

La magnitude de moment d'un séisme, M_w , permet de caractériser l'énergie libérée par ce séisme. L'échelle est logarithmique.

$M_w = 2/3 (\log M_0) - 6$ où M_0 est le moment sismique.

M_0 dépend directement de la surface de la faille S , du déplacement D sur le plan de faille et de μ , la rigidité du milieu :

$$M_0 = \mu S D \text{ (en dyne-cm}^{-1}\text{)}$$

Les ruptures de surface ne seront possibles que pour des M_w supérieures ou égales à 6.

Figure 6 : plans de faille et moment d'un séisme

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

A. QUE PEUT-ON DÉDUIRE DES SISMOGRAMMES

2. Détermination de la magnitude

La magnitude de moment d'un séisme, M_w , permet de caractériser l'énergie libérée par ce séisme. L'échelle est logarithmique.

$$M_w = 2/3 (\log M_0) - 6 \text{ où } M_0 \text{ est le moment sismique.}$$

M_0 dépend directement de la surface de la faille S , du déplacement D sur le plan de faille et de u , la rigidité du milieu :

$$M_0 = uSD \text{ (en dyne-cm}^1\text{)}$$

Les ruptures de surface ne seront possibles que pour des M_w supérieures ou égales à 6.

- un séisme de magnitude M_w est environ 30 fois plus puissant qu'un séisme de magnitude M_w-1 .
 - ✓ Ex: séisme d'Ambrym (Vanuatu) en 1999, la magnitude M_w était de 7,5, on calcule un déplacement de 8 m sur une faille de 12×40 km environ.
 - ✓ pour une magnitude M_w de 9,0 à 9,3 (Sumatra, 2004), on évoque une faille de 600 à 1 000 \times 20 km environ et un glissement de 15 m
- le séisme de magnitude $M_w = 9,5$ (plus forte magnitude connue) au **Chili en 1960** a libéré une énergie cent fois supérieure à celle des plus grosses bombes atomiques expérimentées (Hiroshima).

- Kamtchatka (04/11/1952) : $M_s = 9,2$ et $M_w = 9,0$
- Chili (22/05/1960) : $M_s = 8,5$ et $M_w = 9,5$ (plus forte magnitude connue)
- Alaska (28/03/1964) : $M_s = 8,4$ et $M_w = 9,2$
- Mexico (19/09/1985) : $M_s = 8,1$ et $M_w = 8$
- Tonga (07/04/1995) : $M_s = 8,0$ et $M_w = 7,4$

Réévaluation de la magnitude de quelques grands séismes (in Renart et al., 2016)

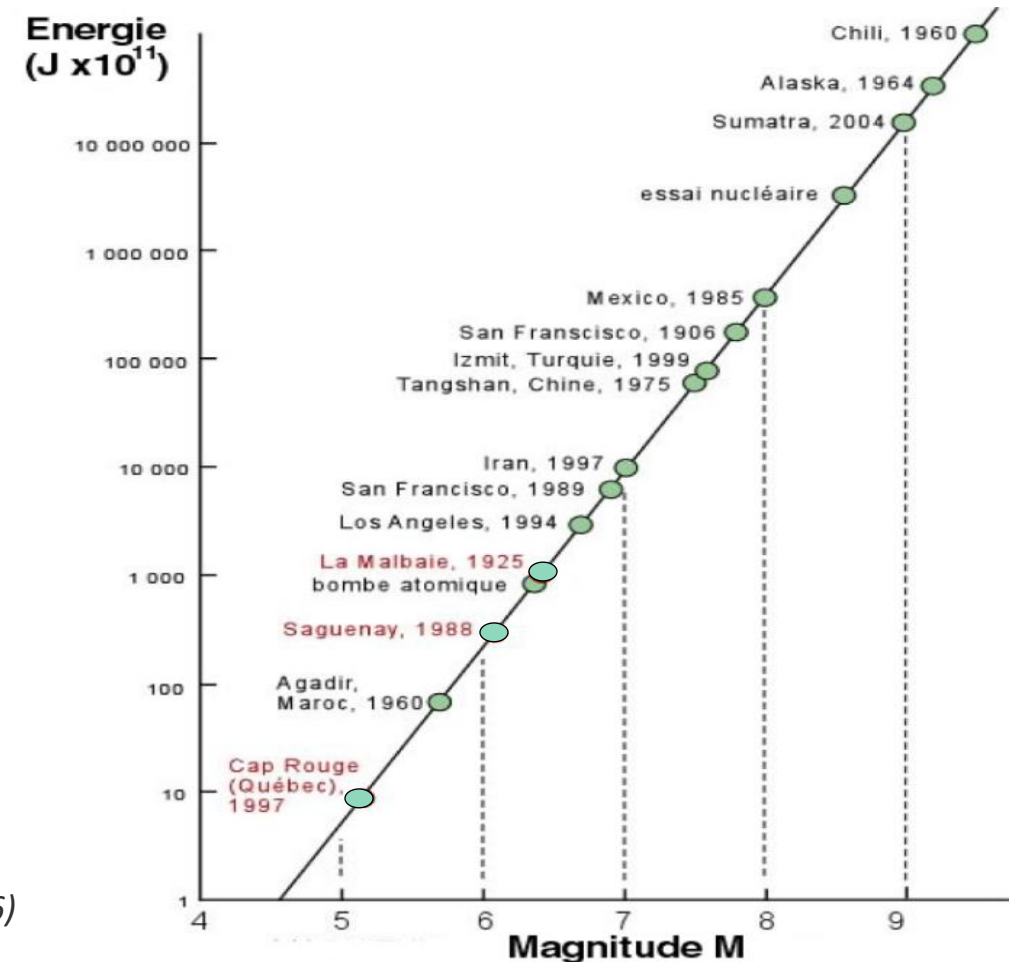


Figure 6 : énergie et magnitude d'un séisme

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

A. QUE PEUT-ON DÉDUIRE DES SISMOGRAMMES?

3. Détermination des mécanismes au foyer



- La plupart des **foyers** sismiques **en profondeur** (failles atteignent rarement surface)
 - ⇒ impossibilité d'accéder aux directions des mouvements responsables de cette déformation
 - ⇒ difficultés d'identifier le mouvement des plaques
- L'étude **sismogrammes** → **modélisation** de ce qui ne se voit pas = **mécanisme cinématique au foyer** de chaque séisme.
- Etude des mouvements du sol à l'arrivée des ondes P et tout particulièrement au **premier mouvement** :
 - Soit **sol se soulève** donc éloignement de la source sismique (la station est « poussée » vers l'extérieur par l'arrivée d'une première onde en compression d'où un tracé caractéristique du premier pic des ondes P sur le sismogramme)
 - ⇒ **secteur en compression**
 - Soit le **sol s'affaisse** (la station se rapproche de la source → la station reçoit en premier lieu une onde de dilatation)
 - ⇒ **secteur en dilatation**

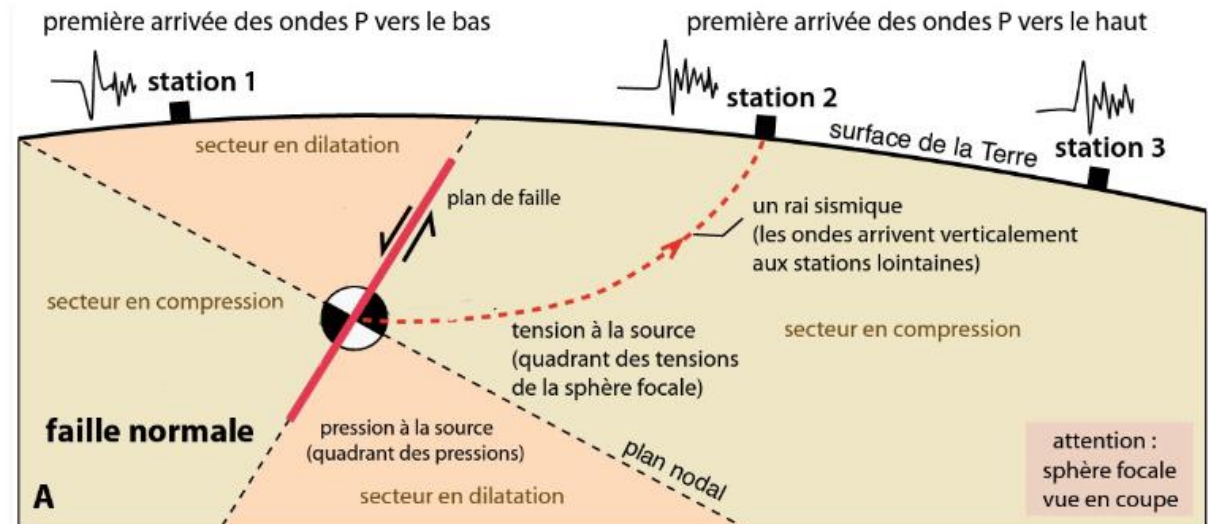


Figure 8 : modélisation du mécanisme au foyer d'un séisme

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

A. QUE PEUT-ON DÉDUIRE DES SISMOGRAMMES?

3. Détermination des mécanismes au foyer



- Utilisation d'une **sphère virtuelle** de petite dimension et **centrée sur le foyer sismique = sphère focale**
- Report sur cette **sphère** du **1^{er} mouvement observé** dans **différentes stations** du réseau mondial.
 - 4 secteurs : deux en compression (noir) et deux en dilatation (blanc).
 - En utilisant le sens de la première accélération des ondes P de la station (le mouvement peut être vers le haut = compression ou vers le bas = dilatation) on peut déterminer les mécanismes au foyer.
 - existence de deux plans nodaux : **plan de faille** et **plan auxiliaire (ou 2nd plan nodal)**
 - il y a une indétermination de 90° ! lequel est le plan de faille ?
 - indétermination levée par la prise en compte de données complémentaires : plan de Wadati-Benioff, analyse de répliques du séisme

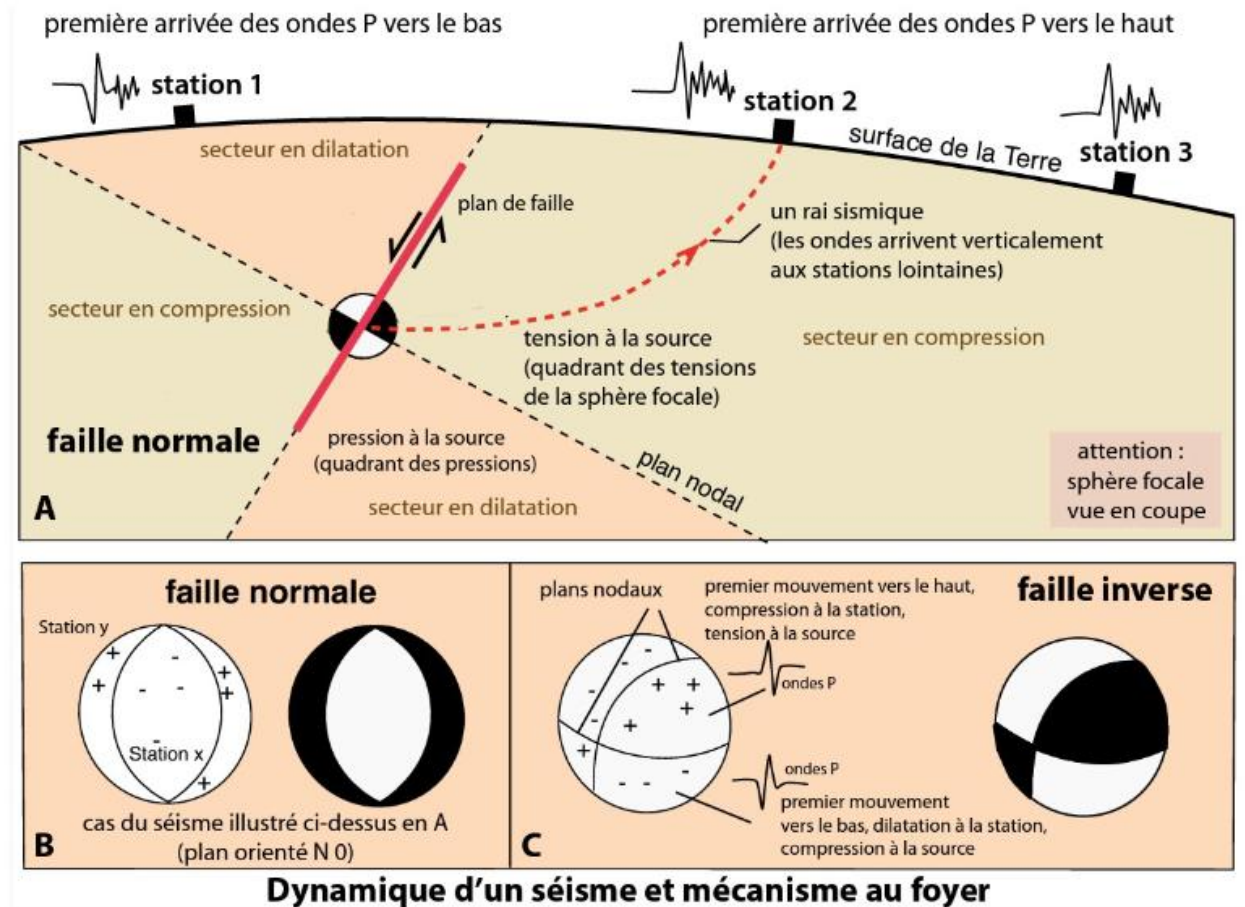


Figure 8 : modélisation du mécanisme au foyer d'un séisme

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

A. QUE PEUT-ON DÉDUIRE DES SISMOGRAMMES?

3. Détermination des mécanismes au foyer

- Rappels B.O.:
- **Exploiter des données de mécanismes au foyer.**
- *La zone en compression est représentée par convention en noir, celle en dilatation est conventionnellement représentée en blanc. (dans le modèle « le matériau se déplace du blanc vers le noir »)*
- *Sur la carte le tracé du plan de faille est souvent indiqué*
- ⇒ *Vous identifiez le plan de faille = 1^{er} plan nodal et donc le plan auxiliaire (2nd plan nodal)*



Sphère des mécanismes au foyer 1- principe d'utilisation

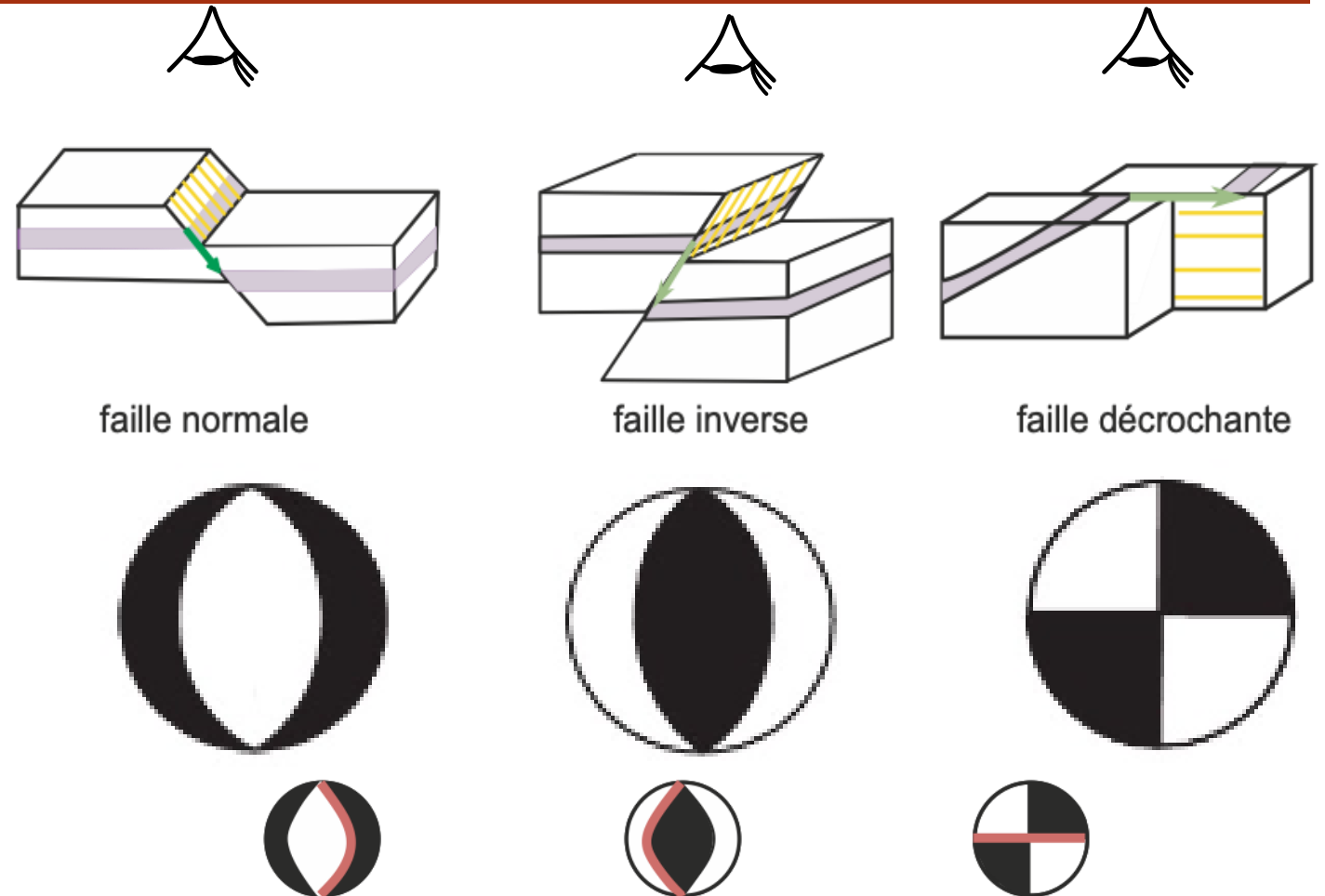
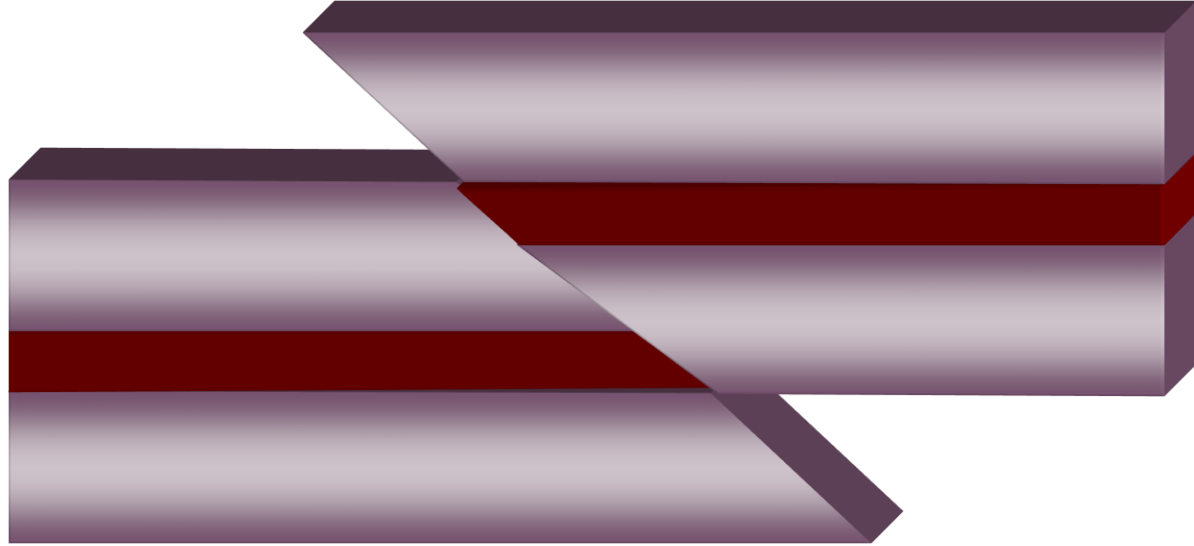
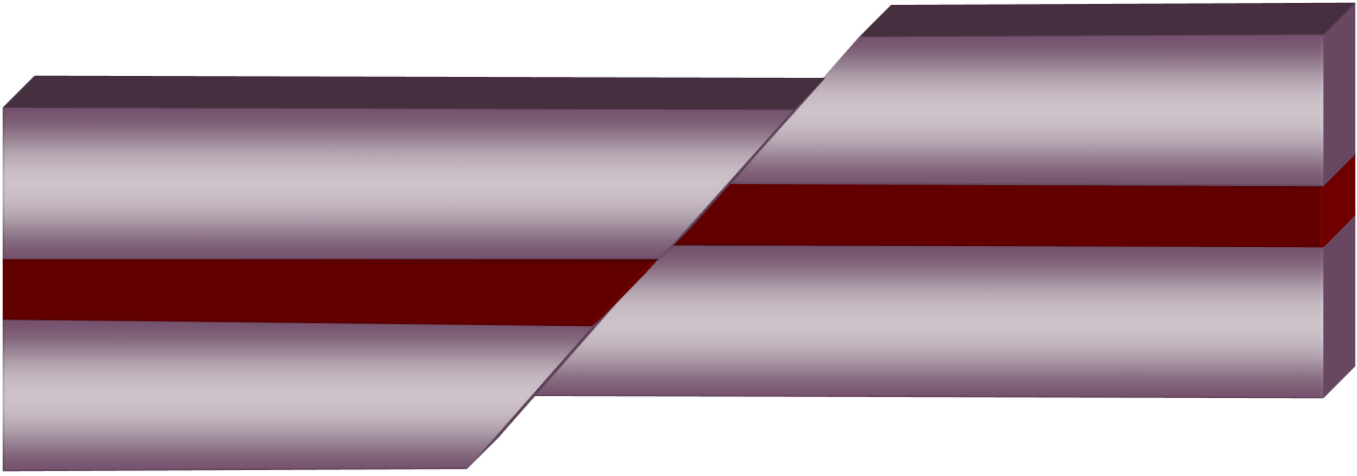
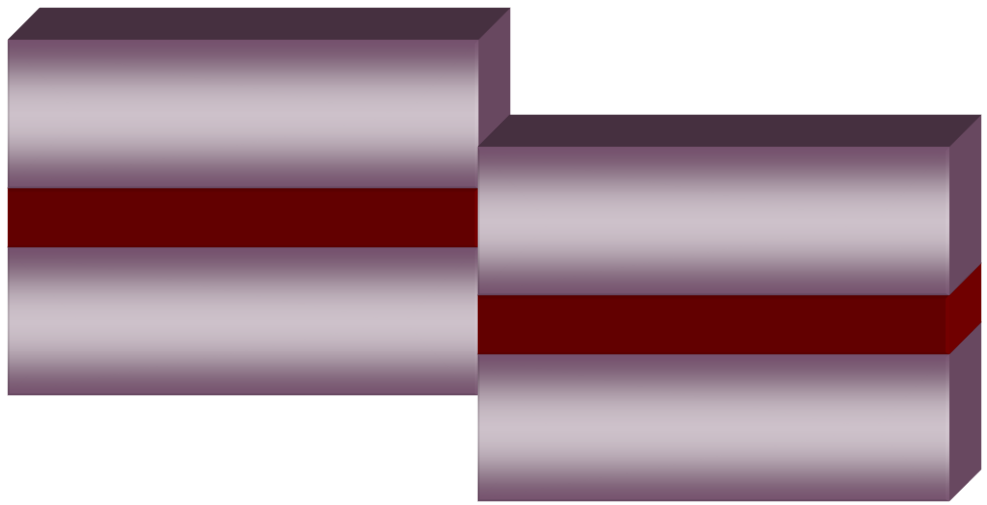


Figure 9 : principe de construction des mécanismes au foyer



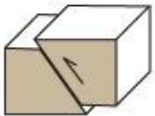

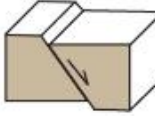





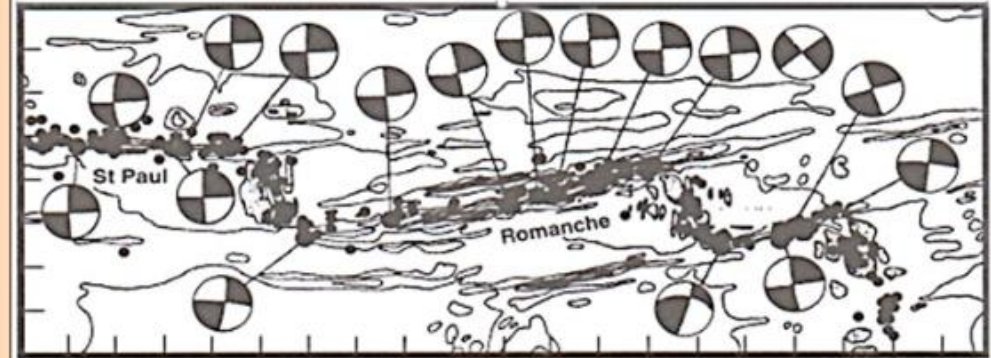
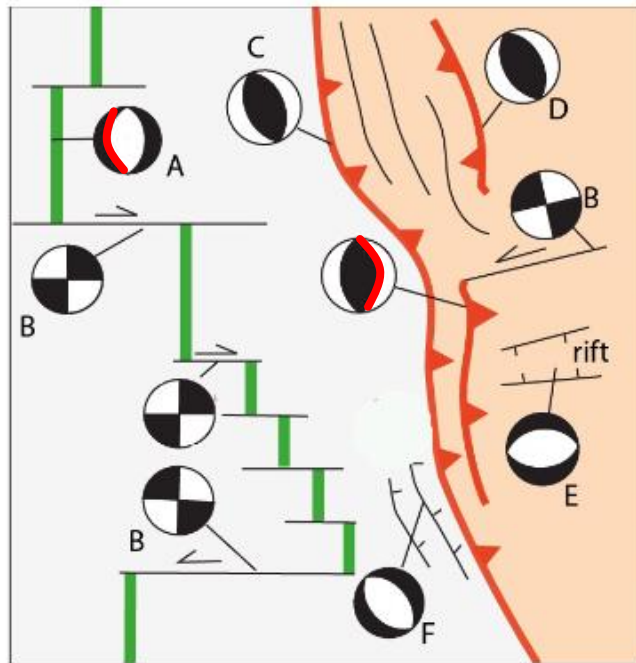


I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

A. QUE PEUT-ON DÉDUIRE DES SISMOGRAMMES?

3. Détermination des mécanismes au foyer

| type de faille | mécanisme au foyer | limite de plaque |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 1  faille inverse (compression) |  | convergente (fosse de subduction, chaîne de collision) |
| 2  faille normale (extension) |  | divergente (dorsale, rift) |
| 3  faille décrochante (ici sénestre) |  | coulissante (faille transformante) |



Sismicité et mécanismes au foyer le long de la faille transformante de la Romanche Atlantique

A : extension (axe des dorsales)
B : décrochement (f. transformante océanique ou continentale)

C : compression (subduction)
D : compression (chevauchement intracontinental)

E : extension (rift intracontinental)
F : extension (flexure avant-fosse, bombement ou *bulge*)

Faille en décrochement dextre

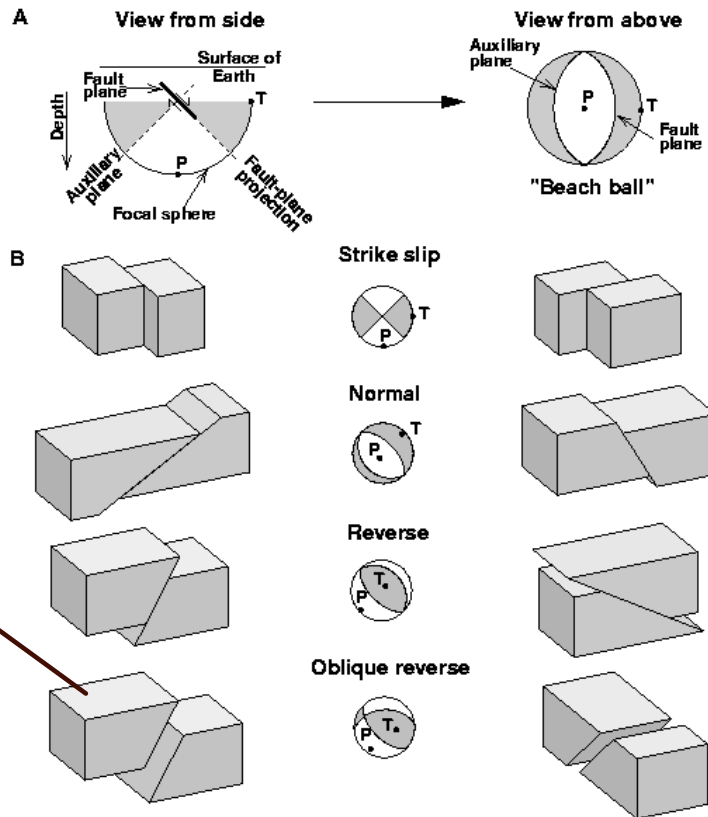
Figure 10 : principe de construction des mécanismes au foyer

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

A. QUE PEUT-ON DÉDUIRE DES SISMOGRAMMES?

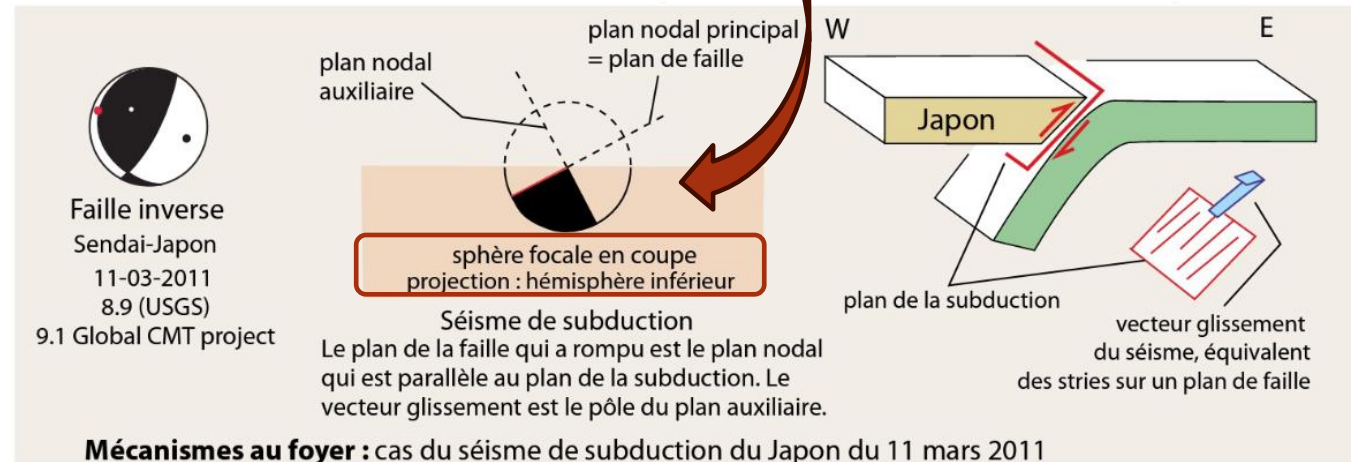
3. Détermination des mécanismes au foyer

Schematic diagram of a focal mechanism



Faille inverse à
composante
décrochante
dextre

USGS, 1996



Mécanismes au foyer : cas du séisme de subduction du Japon du 11 mars 2011

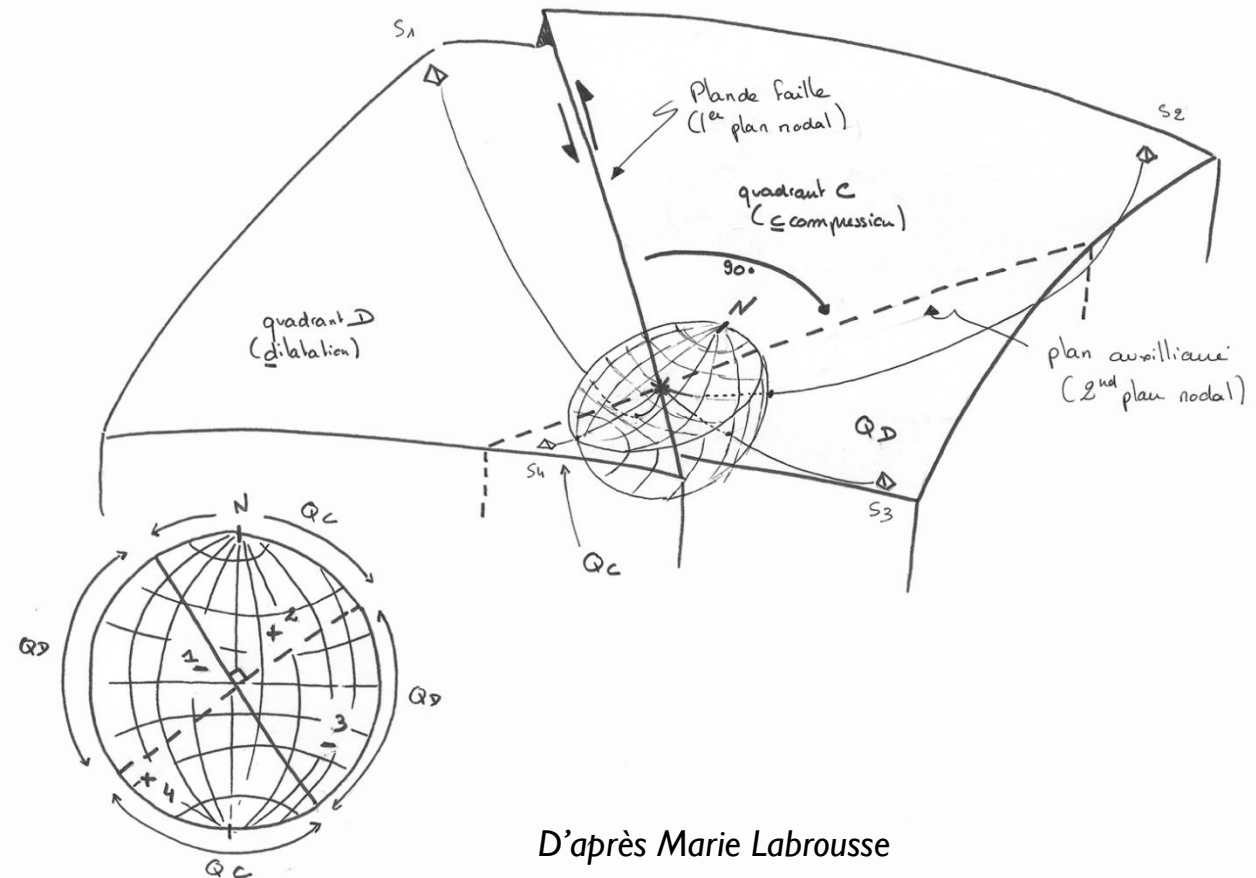
Figure 11 : principe de construction des mécanismes au foyer

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

A. QUE PEUT-ON DÉDUIRE DES SISMOGRAMMES?

3. Détermination des mécanismes au foyer

- Bilan: failles atteignent rarement surface
 - ⇒ Impossible de connaître la nature du mouvement
 - ⇒ étude **sismogrammes**
 - ⇒ **Sphère focale** avec **secteurs noirs en compression** et **secteurs blancs en dilatation**
 - ⇒ Identifier le plan de faille (1^{er} plan nodal)
 - ⇒ 3 types de sphères: failles inverse, normale, décrochante
 - ⇒ **Etablir le champ de contraintes**



PLAN

I. Méthodes d'observations

- A. Que peut-on déduire des sismogrammes?
- B. Que peut-on déduire des registres sismiques?
- C. Quelles sont les observations sur le plus long terme?

II. Mécanismes mis en jeu

- A. Notion de cycle sismique
- B. Limites de la notion de cycle sismique

III. Risques associés aux séismes

- A. Le risque dépend de l'aléa et de la vulnérabilité
- B. Définition de l'intensité d'un séisme
- C. Risques associés aux séismes

IV. Signification géodynamique des séismes

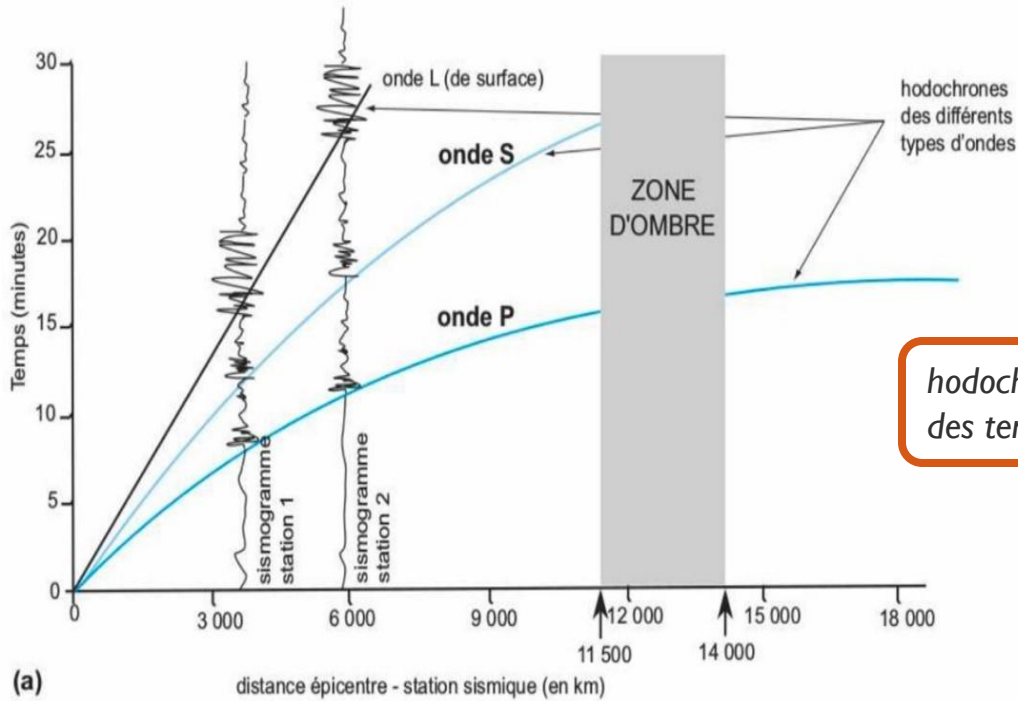
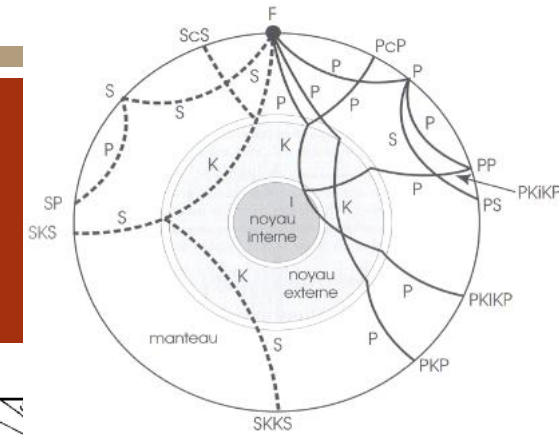
- A. La localisation des séismes est un marqueur des limites de plaques
- B. Les mécanismes au foyer permettent de déduire les états de contrainte

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

B. QUE PEUT-ON DÉDUIRE DES REGISTRES SISMIQUES?

I. Construction des hodochrones

Cf ST-B



hodochrones = compilation des temps de parcours

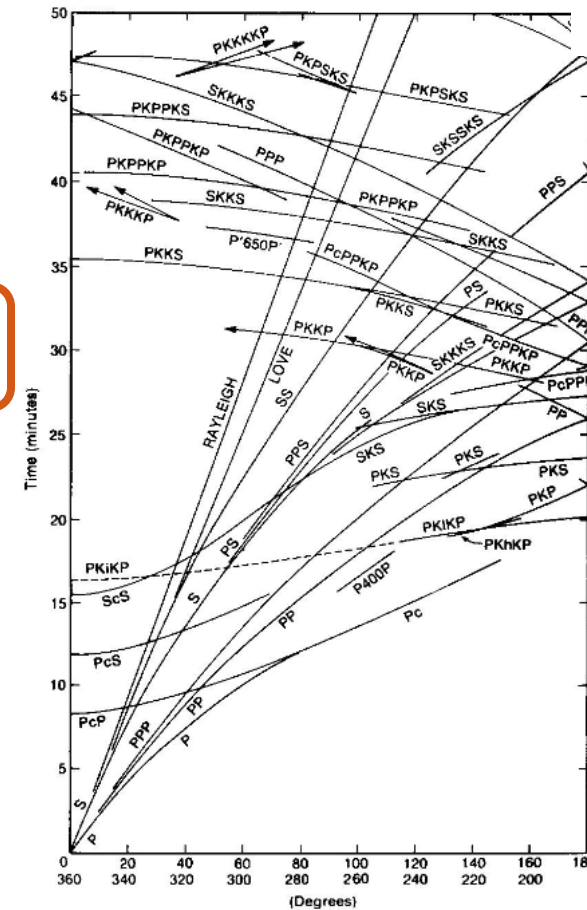


Figure 1.1.2a Travel-time curves for earthquake phases (Bolt, 1975).

- Ondes de Love et ondes de Rayleigh = ondes de surface : vitesse constante
- Vitesse des ondes P et S avec la profondeur: $v=f(\text{profondeur})$
 - ⇒ densité augmente avec profondeur
 - ⇒ Matériaux plus denses en profondeur

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

B. QUE PEUT-ON DÉDUIRE DES REGISTRES SISMIQUES?

2. Détermination de la récurrence des failles



- **Définition** : la récurrence sismique correspond à la **fréquence des séismes pour une faille donnée**.
- **Observations** : les séismes de petite magnitude sont fréquents alors que les séismes de grande magnitude sont beaucoup plus rares (loi de Gutenberg Richter).
 - séismes de grande amplitude libèrent plus d'énergie que ceux de petite amplitude
 - ⇒ délai important entre deux séismes = temps nécessaire à **l'accumulation d'énergie élastique** qui sera libérée au cours du séisme.
 - D'où la notion de **cycle sismique** (voir II sur les mécanismes mis en jeu).

Gutenberg et Richter ont montré que la fréquence des tremblements de terre décroît très vite en fonction de l'augmentation de la magnitude :

- Nombre annuel moyen de séismes de magnitude 4 : 15 000
- Nombre annuel moyen de séismes de magnitude 5 : 3 000
- Nombre annuel moyen de séismes de magnitude 6 : 100
- Nombre annuel moyen de séismes de magnitude 7 : 20
- Nombre annuel moyen de séismes de magnitude 8 : 2

Pour un domaine de magnitude compris entre 5 et 8, ils ont proposé la relation :

$$\log N = a - bM$$

M étant la magnitude (M_L , M_S , m_b ou M_w), N le nombre de séismes de magnitude supérieure à M et a et b sont des constantes.

Cette relation empirique dite loi de Gutenberg-Richter est très importante, elle permet pour une région donnée et dans la gamme de magnitude donnée ci-dessus de mieux caractériser **l'aléa sismique**.

Une région connaissant de nombreux séismes de magnitude 4 est en effet susceptible d'en connaître au moins un de plus forte magnitude dans un temps rapproché.

Figure 13 : loi de Gutenberg Richter (dans Renard et al., 2016)

Ainsi, à quelques décennies près, plusieurs grands séismes destructeurs, les « big ones », sont prédits en Californie, au Japon, au Chili, en Turquie ou encore en Grèce.

PLAN

I. Méthodes d'observations

- A. Que peut-on déduire des sismogrammes?
- B. Que peut-on déduire des registres sismiques?
- C. Quelles sont les observations sur le plus long terme?

II. Mécanismes mis en jeu

- A. Notion de cycle sismique
- B. Limites de la notion de cycle sismique

III. Risques associés aux séismes

- A. Le risque dépend de l'aléa et de la vulnérabilité
- B. Définition de l'intensité d'un séisme
- C. Risques associés aux séismes

IV. Signification géodynamique des séismes

- A. La localisation des séismes est un marqueur des limites de plaques
- B. Les mécanismes au foyer permettent de déduire les états de contrainte

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

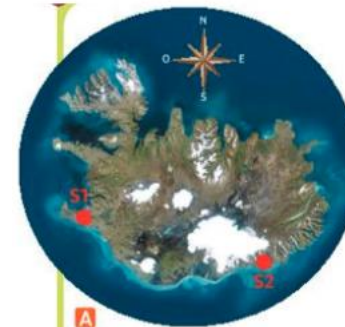
C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME?

I. Observation par GPS

- **Géodésie spatiale:** mesure de la surface de la Terre par des observations **satellitaires**:
 - **GPS (Global Positioning System):** détermine la position de **balises (en latitude, longitude et altitude)** au **mm près**, et permet de quantifier des déplacements.
 - Évaluation des déplacements **instantanés**
 - **Mouvement absolu de la balise**

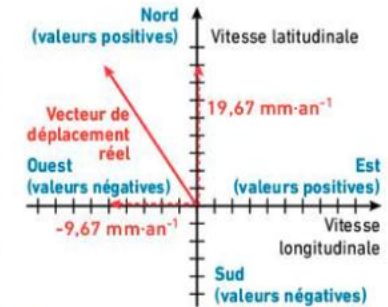


B Un récepteur GPS fixe, de haute précision.



A S1 : station Reykjavik S2 : station Höfn

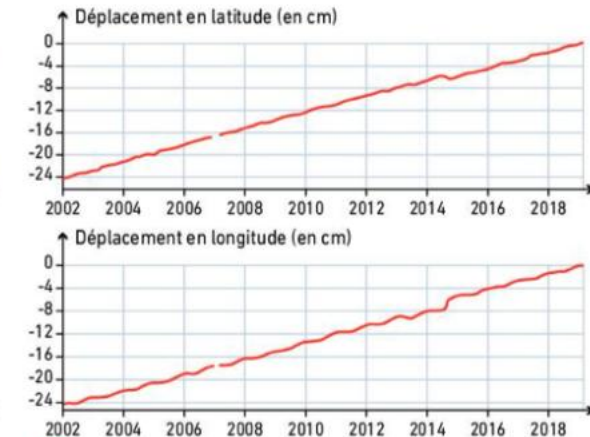
Les graphiques (C et D) représentent les longitudes et latitudes de deux stations GPS situées en Islande, Reykjavik et Höfn, mesurées depuis 2002. Par convention, la pente est positive pour des déplacements vers le nord ou vers l'est, négative pour des déplacements vers le sud ou vers l'ouest. La valeur de la pente indique la vitesse de déplacement de la station. La somme des vecteurs « vitesse latitudinale » et « vitesse longitudinale » (vecteurs en traits pointillés) permet donc de connaître le déplacement réel de la station (vecteur en trait plein) (E).



E Vitesse de déplacement de la station S1.



C Évolution de la latitude et de la longitude de Reykjavik entre 2002 et 2018.



D Évolution de la latitude et de la longitude de Höfn entre 2002 et 2018.

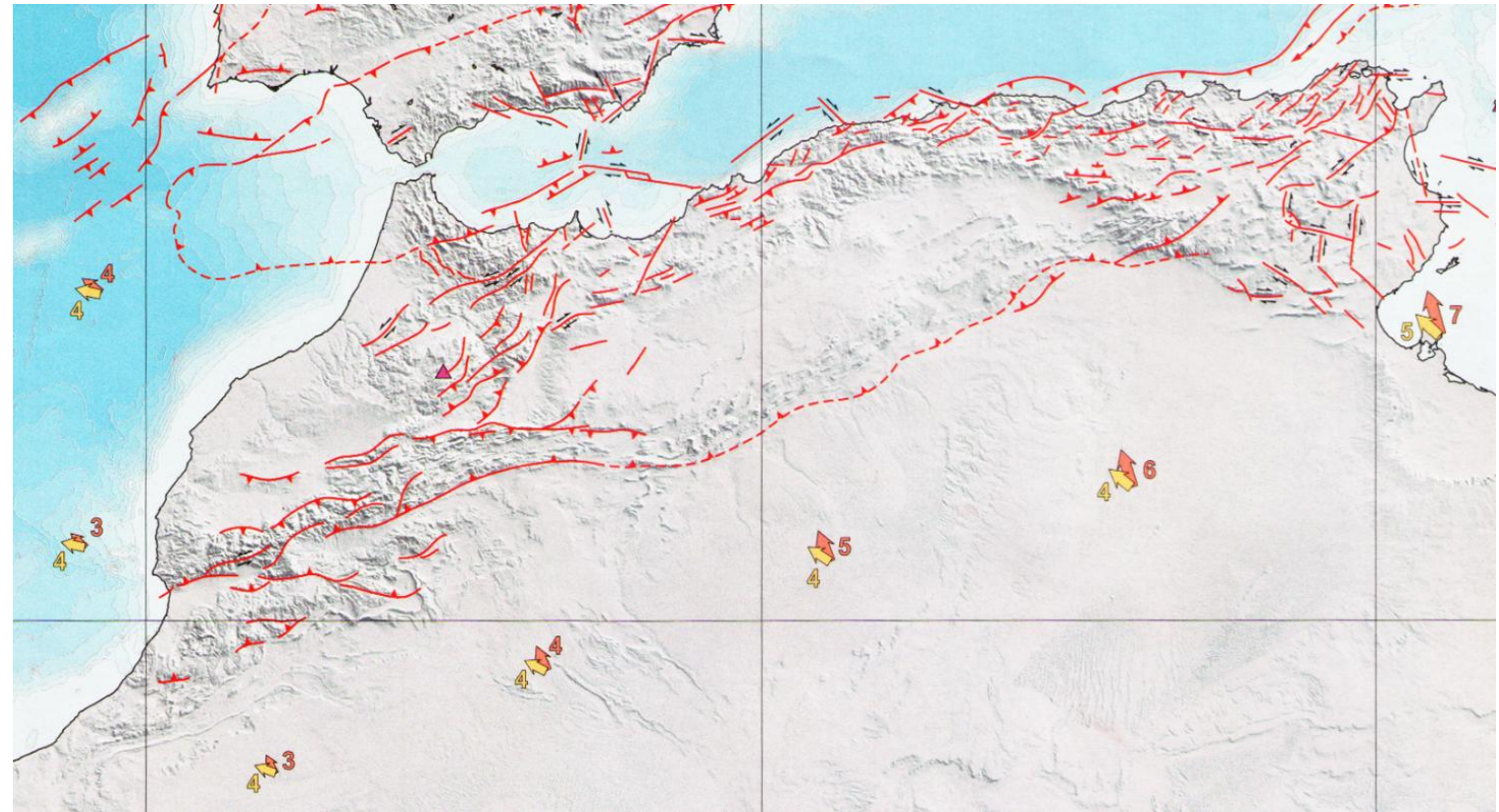
I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME?



I. Observation par GPS

- **GPS** (GSRM): **déplacements instantanés** pour des balises localisées au niveau des frontières de plaque
- **NUVEL-I**: déplacements **moyennés** sur des **Ma** (paléomagnétisme, points chauds : modèle **NUVEL-I**) montre :
- Comparaison GPS vs NUVEL-I:
 - **modifications de la direction des plaques** sur des échelles de temps plus courtes
 - ✓ *exemple de la plaque Afrique dont le pôle de rotation s'éloigne vers l'ouest*



GSRM - v1.2
Eurasia ref. frame



NUVEL - 1A
Nubia/Eurasia

Figure 14 : comparaison des données de cinématique instantanée (GPS) et finie (échelle du Ma) au niveau de la plaque Afrique

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME?



I. Observation par GPS

■ La comparaison modèle GPS vs NUVEL-1:

- existence d'un **cycle sismique**
 - ✓ on distingue 3 périodes identifiables sur les données GPS :
 - ❖ période **intersismique** : peu de déplacement
 - ❖ période **cosismique** : déplacement maximal
 - ❖ période **post-sismique** : retour à la « normale »

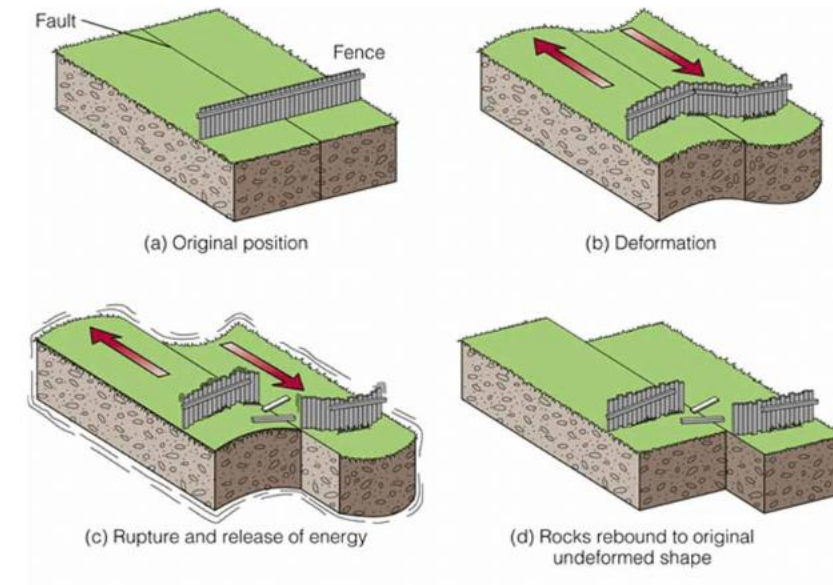
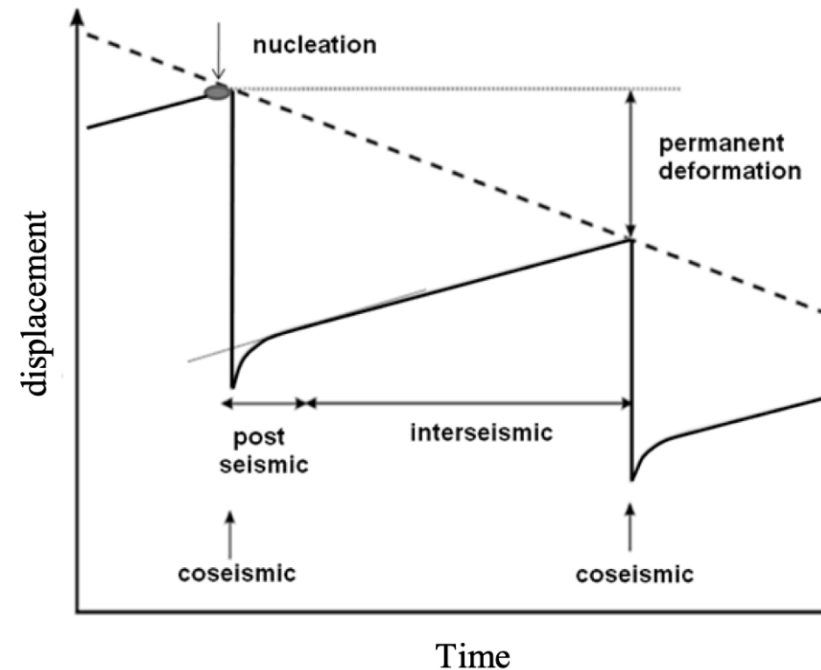


Figure 15 : notion de cycle sismique (d'après cours de M Deverchere, Brest)

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME?

I. Observation par GPS

- Exemple de la faille de San Andreas (E.U.)
 - En phase intersismique:
 - ✓ Déformation symétrique par rapport à la faille ductile
 - ✓ **Faille bloquée**
 - En phase cosismiques (pointillés)
 - ✓ Déplacement important au niveau de la faille
 - ✓ **rebond élastique** en contexte décrochant

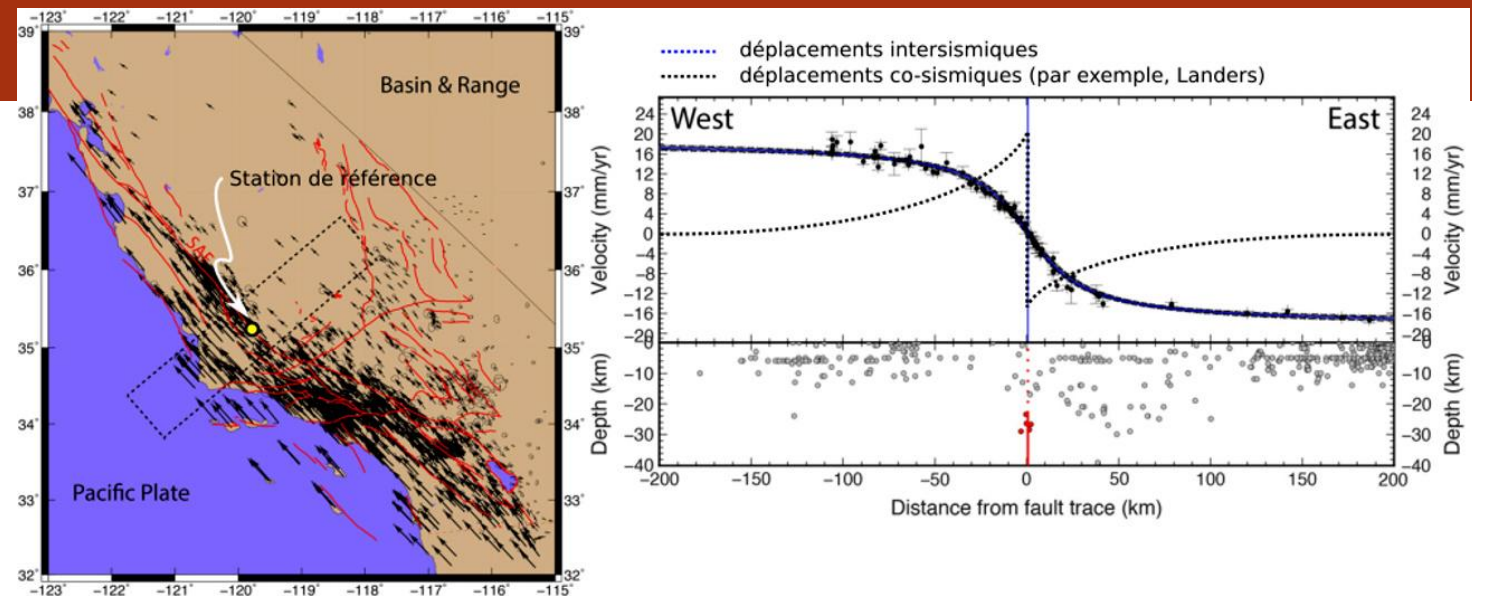


Figure 16. Mesure de la déformation intersismique par GPS au niveau de la Californie d'après Vernant 2015

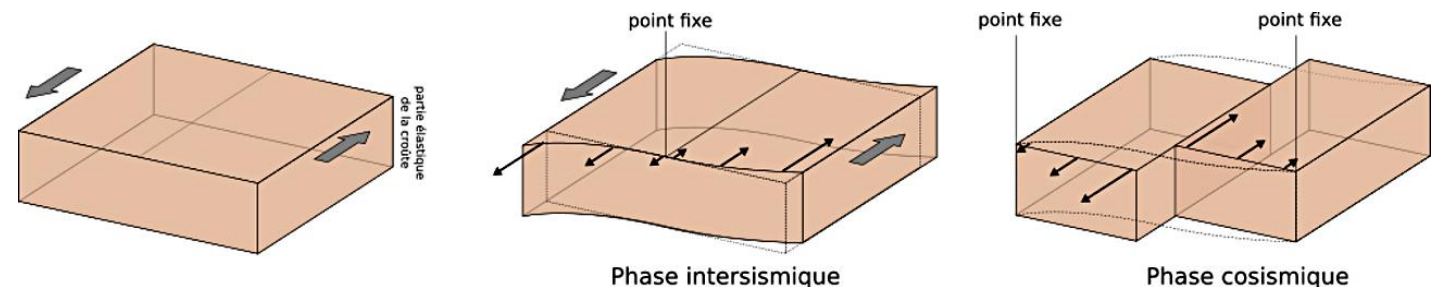


Figure 17. Un modèle conceptuel pour expliquer le rebond élastique au cours d'un séisme en décrochement (d'après A. Augier)

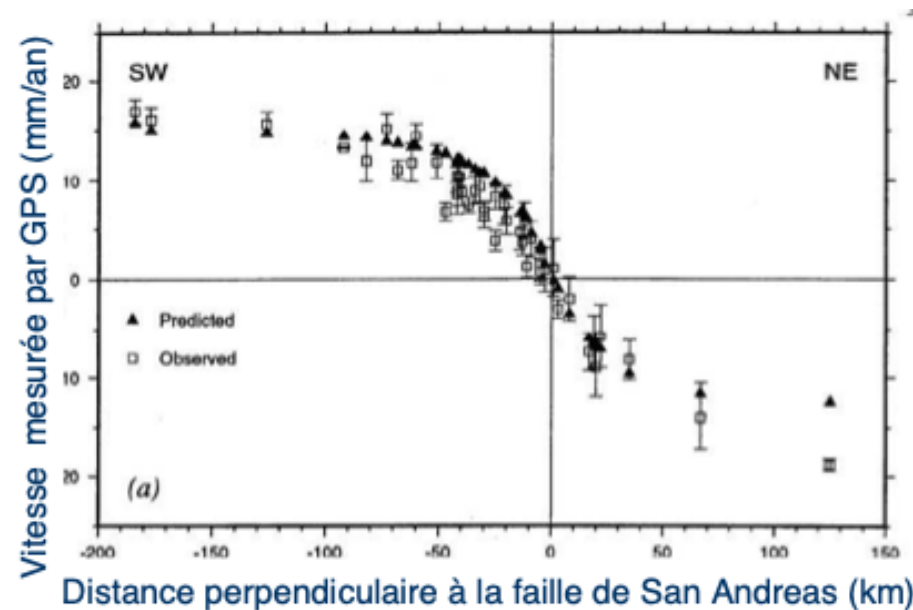
I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME

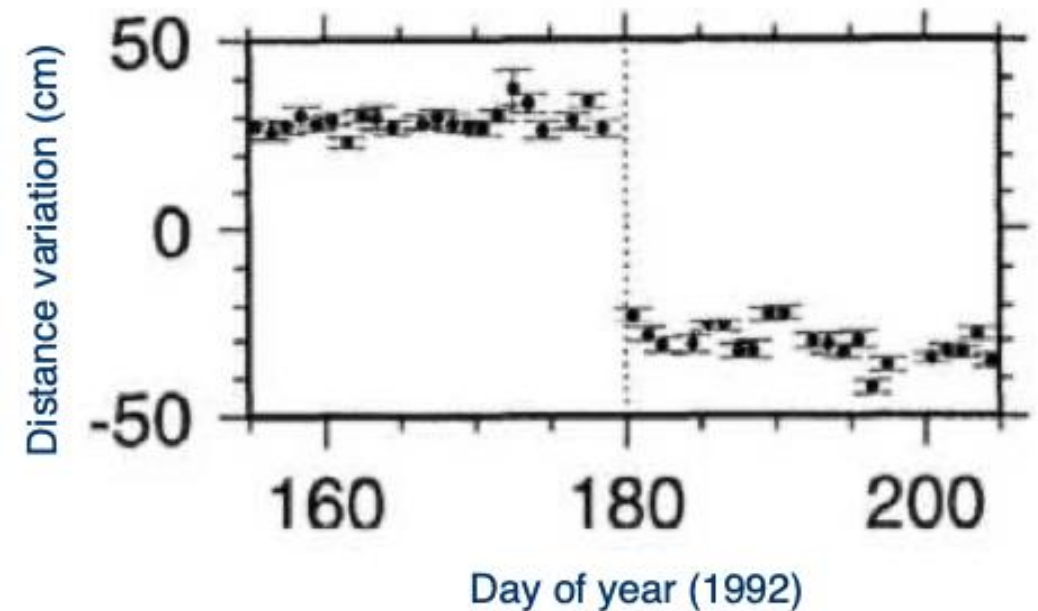
I. Observation par GPS



- Exemple de la faille de San Andreas (E.U.)



Mesures de déformation par GPS à travers la faille de San Andreas en Californie (période 1992-2000)



Variation de distance entre les sites GOLD et PIN1 mesurée par GPS

- La faille ne glisse pas = faille bloquée
- La zone autour de la faille se déforme: déformation ductile

Phase
intersismique

Phase cosismique

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME?

2. Utilisation de l'INSAR

- Insar : Interferometric Synthetic Aperture Radar = radar à ouverture synthétique (λ entre 1 à 20 cm).
- Radar: Radio detection and ranging = Appareil émetteur-récepteur d'ondes électromagnétiques, qui permet, par retour, de situer la position d'un corps lorsque celui-ci fait obstacle aux ondes (phénomène de l'écho)
- **Principe : comparer 2 images radars** obtenues par satellite sur une même région avec des **angles de visées très proches**.
 - Chaque image= milliers de pixels (1 pixel = 4m x20 m) = définie par son amplitude (fonction de la rugosité du sol) et par sa **phase** (fonction de la distance entre sol et satellite) (la longueur d'onde réfléchie ne varie pas)
 - **phase** de chaque pixel est fonction de la **distance entre le sol et le satellite** (modulo 2π)
 - **différence de phase entre les 2 images** permet de quantifier la variation du temps de propagation et après un traitement adéquat, le déplacement de la surface du sol entre les deux passages du satellite. La précision est centimétrique à millimétrique.

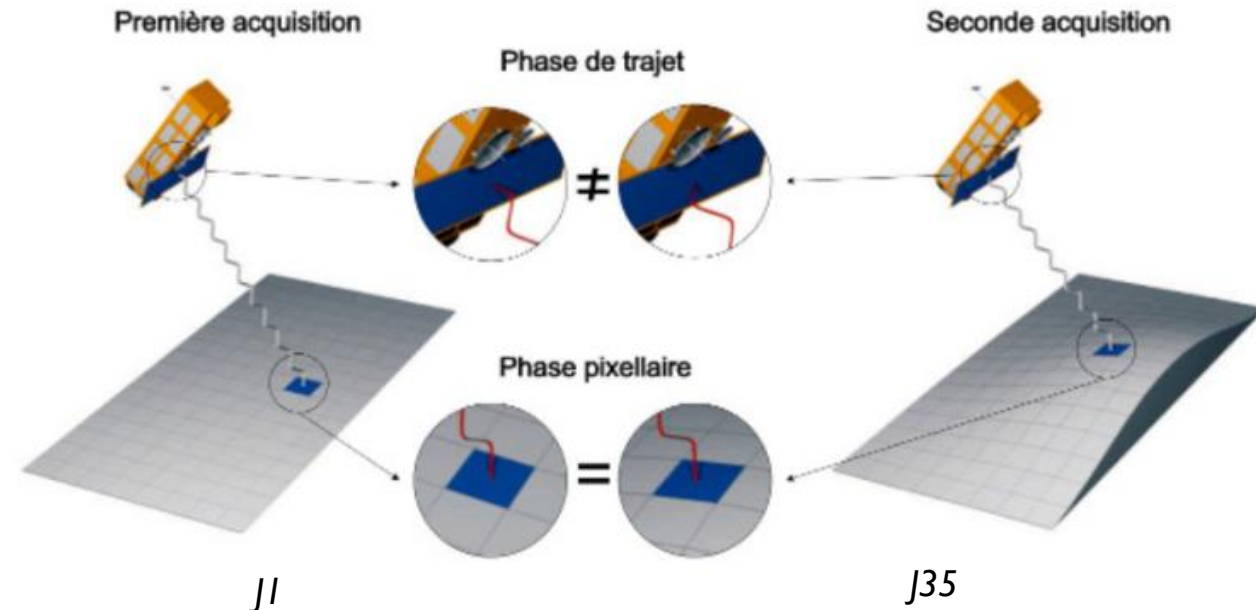


Figure 18 : Principes de l'InSAR Source - © 2019 A. Augier / CC BY-SA 4.0

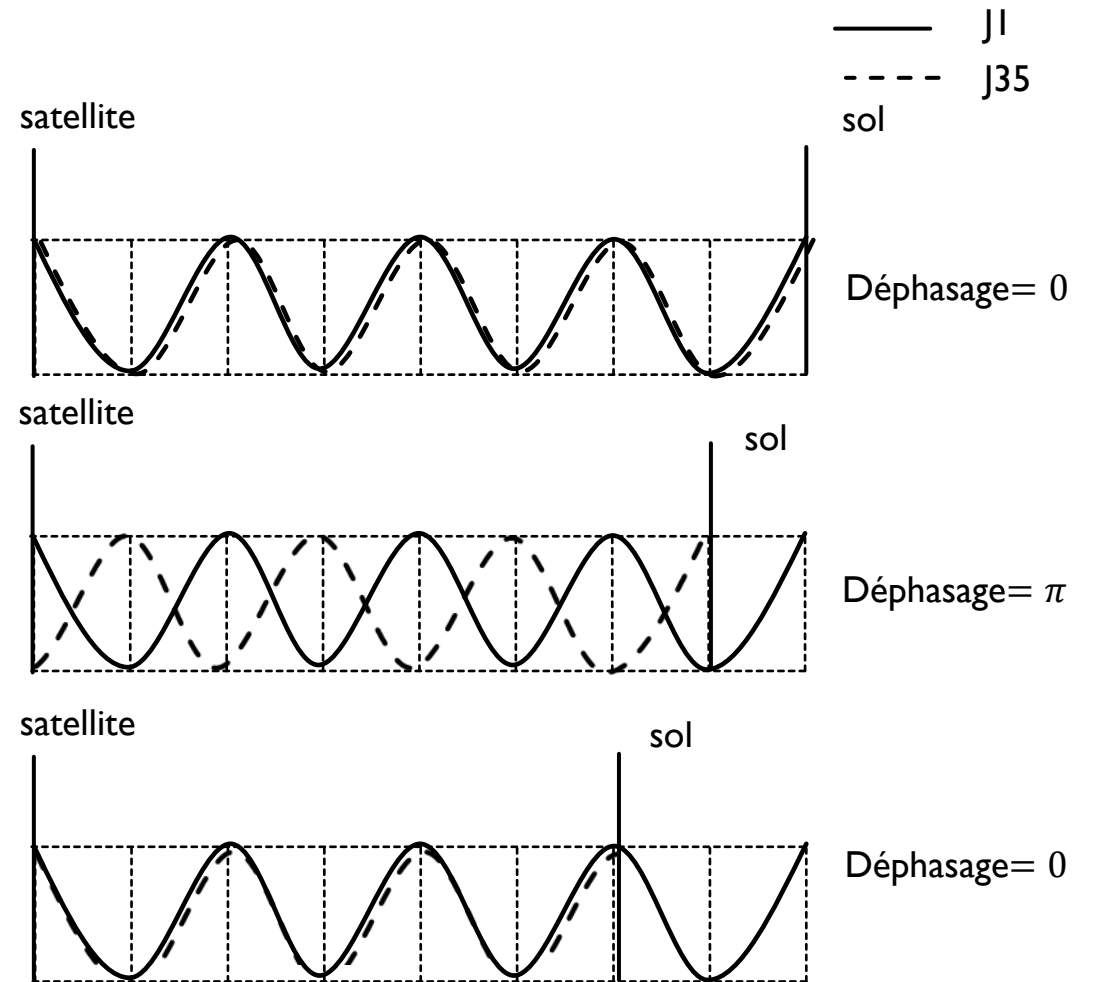
I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME

2. Utilisation de l'INSAR



- Un interférogramme : **différence de phase** entre les deux images de phase,
 - ⇒ carte de déplacements du sol dans la direction du satellite
- Si pas de variation d'altitude entre J1 et J35
 - ⇒ Déphasage entre J1 et J35 = 0
- Si rapprochement du satellite vers sol à J35, donc si **bombement du sol**
 - ⇒ **Diminution de phase** entre J1 et J35
- Si éloignement du satellite de surface du sol, donc affaissement (subsidence)
 - ⇒ **Augmentation de phase** entre J1 et J35



représentation du déphasage de longueurs ondes à J1 et à J35

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME?

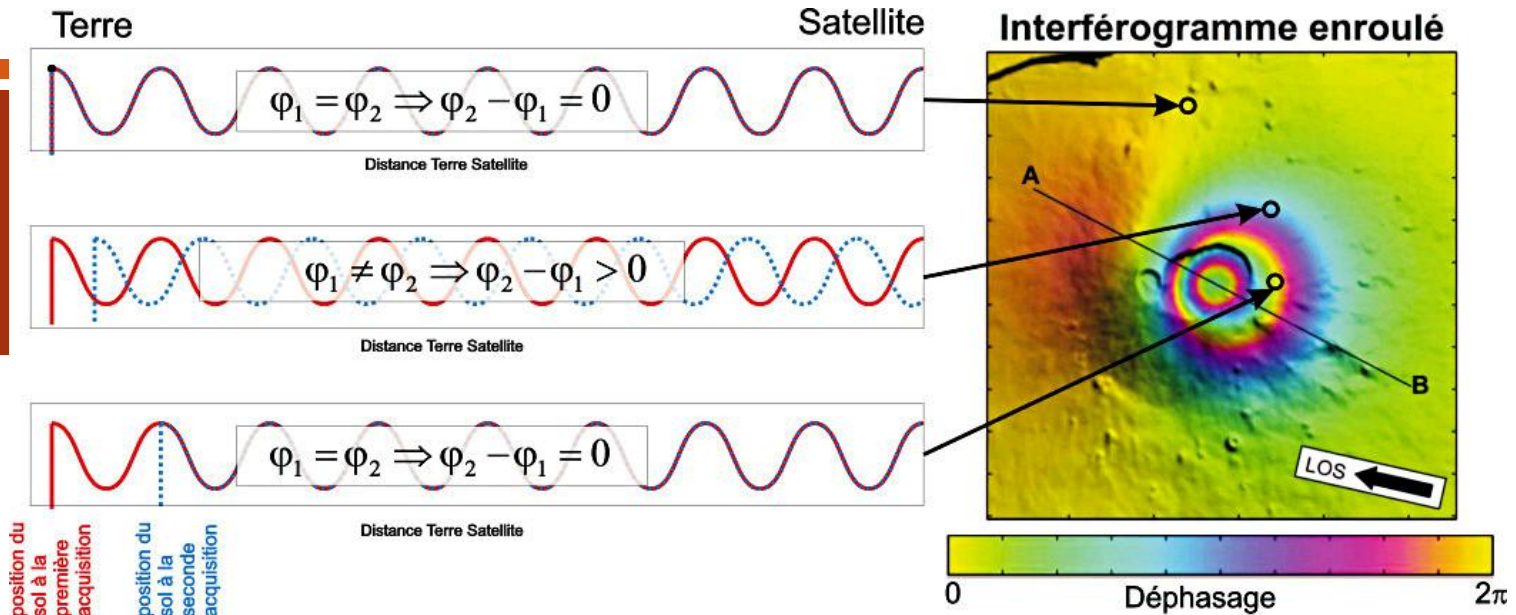
2. Utilisation de l'INSAR

- Le **déphasage de 0 à 2π** est cartographié à l'aide d'une échelle de couleur :

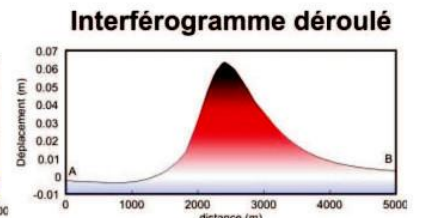
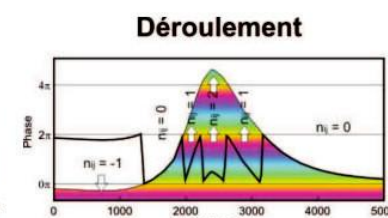
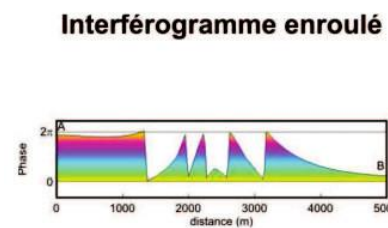
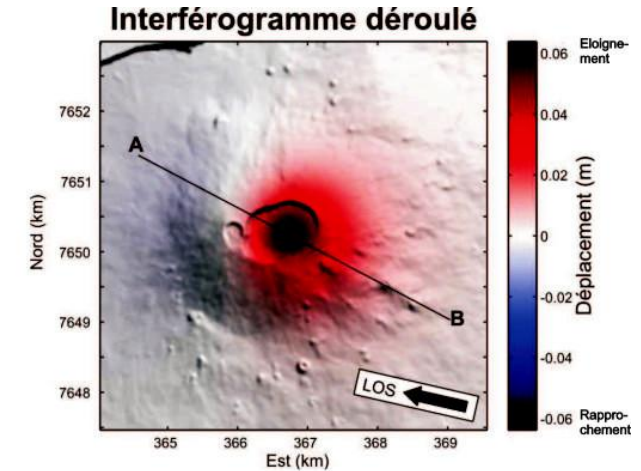
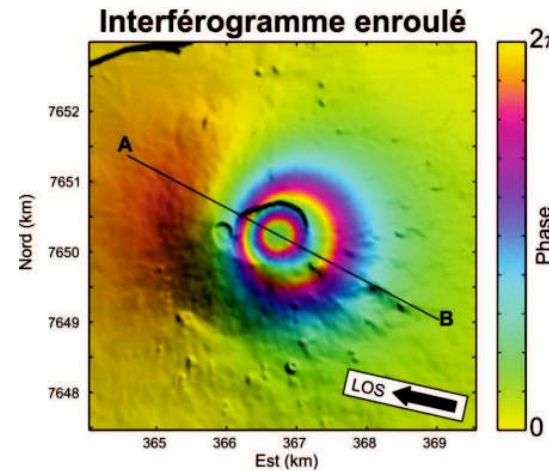


- **Bandes = franges colorées**
- interfrange (abusivement "frange") = distance entre deux bandes consécutives de même couleur correspondant à un déphasage allant de 0 à 2π (d'une bande jaune à la suivante).
- déroulement = compter le nombre de franges et les convertir en déplacements (en mètres) dans la ligne de visée du satellite.
- Une interfrange \sim une ligne de niveau de déplacement.
- déroulement = compter nombre de franges, et convertir les déplacements en phase en déplacements en mètres dans la ligne de visée du satellite.

Source - © 2019 A. Augier / CC BY-SA 4.0
Figure 20. Déroulement d'un interférogramme



position du sol à la première acquisition
position du sol à la seconde acquisition



I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME?

2. Utilisation de l'INSAR

- Lecture d'un interférogramme
- ✓ **Détermination du sens de déplacement :**
- Pour déterminer le sens des déplacements :
 - on part d'un endroit qui n'a pas bougé (pixel jaune loin de la faille) dans la direction de visée
 - puis on suit l'ordre des couleurs vers un endroit qui a beaucoup bougé
 - pour chaque frange passée, on ajoute un déplacement = 1/2 longueur d'onde. Il faut donc cumuler le déplacement en se dirigeant vers la faille:
- **Si augmentation de phase alors le sol s'est éloigné (du satellite) = subsidence**
- **Si diminution de phase , alors le sol s'est rapproché (du satellite)= bombement**



Ici en suivant la direction de visée: vert-bleu-rose-jaune = augmentation de phase
 ⇒ subsidence

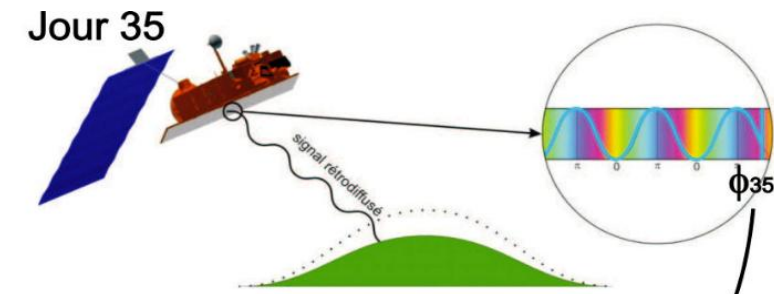
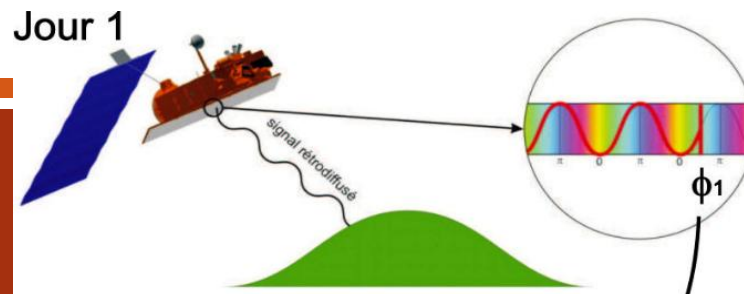


Image de phase 1

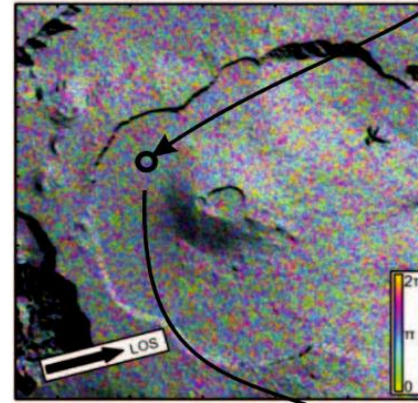
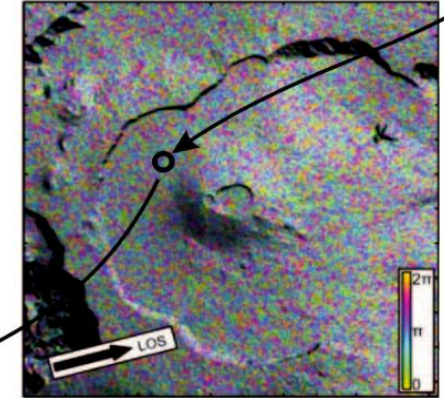
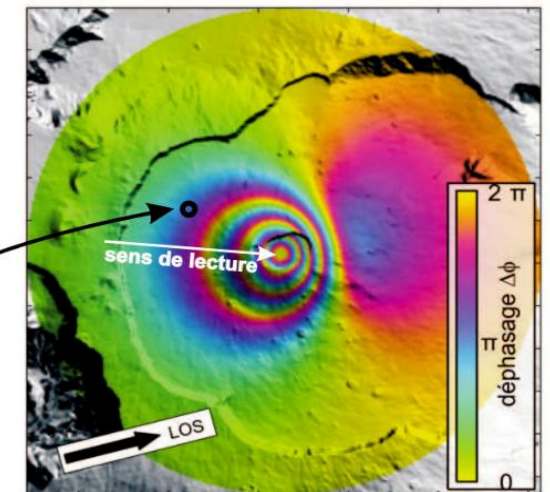
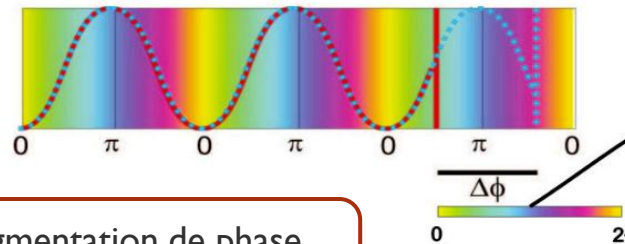


Image de phase 2



soustraction

$$\Delta\phi = \phi_{35} - \phi_1$$



Interférogramme enrôlé

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME?

2. Utilisation de l'INSAR

- **Lecture d'un interférogramme : Le séisme de Bam (Iran, 2003)**

- ✓ Attention à la ligne de visée du satellite

 - ⇒ Deux interférogrammes présentant la même région mais avec des lignes de visée différentes seront différents

- forme dissymétrique en « ailes de papillon » (cf sphère focale des mécanismes au foyer)

 - ⇒ **Séisme décrochant**

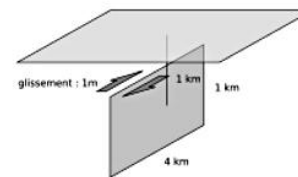
- jaune-rose-bleu => la phase diminue

 - ⇒ Rapprochement vers le los perpendiculaire à la faille

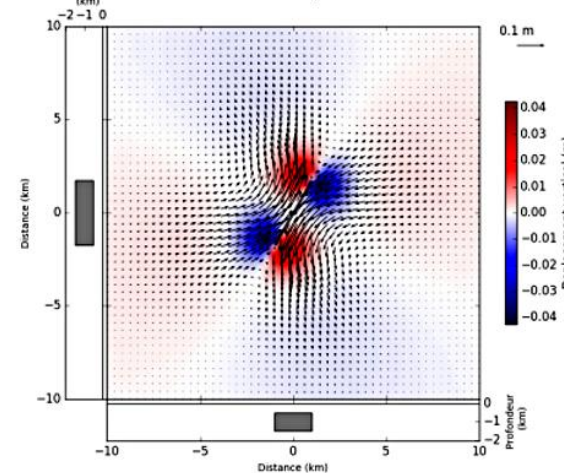
 - ⇒ Décrochement dextre

Paramètres de la source

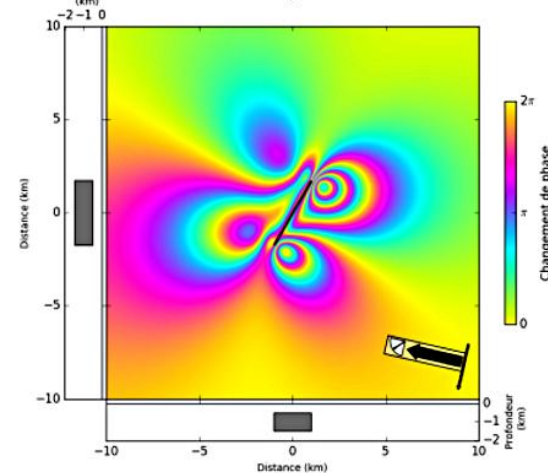
Faille décrochante



Carte 3D des déplacements



Interférogramme



Modèle numérique de déformation lié à une faille décrochante Source - © 2020 A.Augier

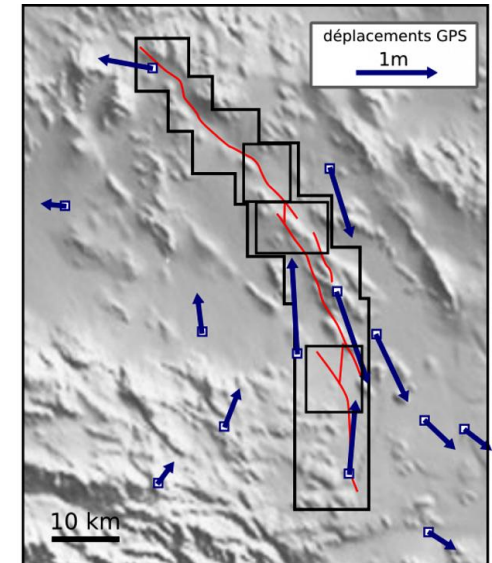


I. METHODES D'OBSERVATIONS

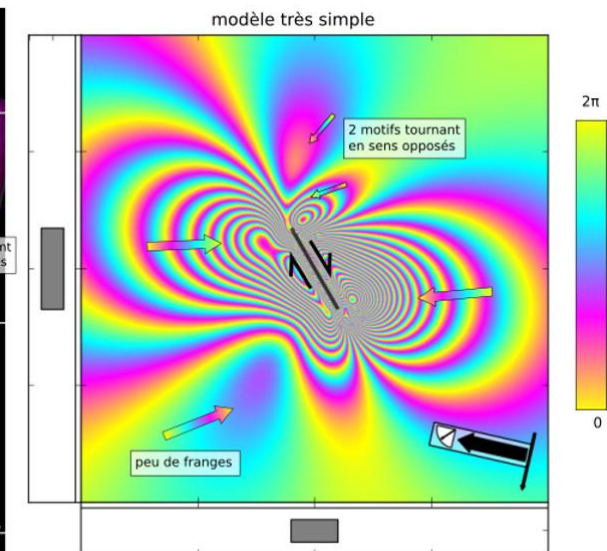
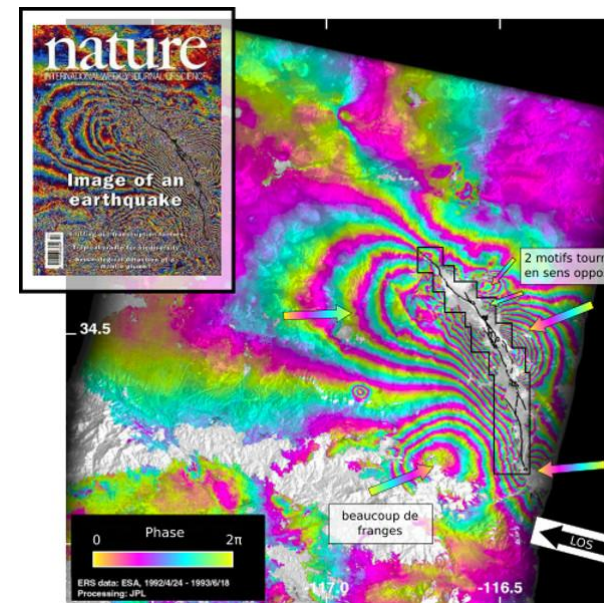
C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME?

2. Utilisation de l'INSAR

- Lecture d'un interférogramme : Le séisme de Landers (Californie, 1992)
- Données GPS
 - ⇒ Décrochement dextre
- Données InSAR :
 - Forme dissymétrique en aile de papillon
 - ⇒ Décrochement
 - côté ligne de visée (LOS perpendiculaire à la faille): vert-bleu-violet-rose-jaune
 - ⇒ phase diminue
 - ⇒ Rapprochement vers le LOS
 - ⇒ Décrochement dextre



Données GPS lors du séisme de Landers (Californie, 1992)



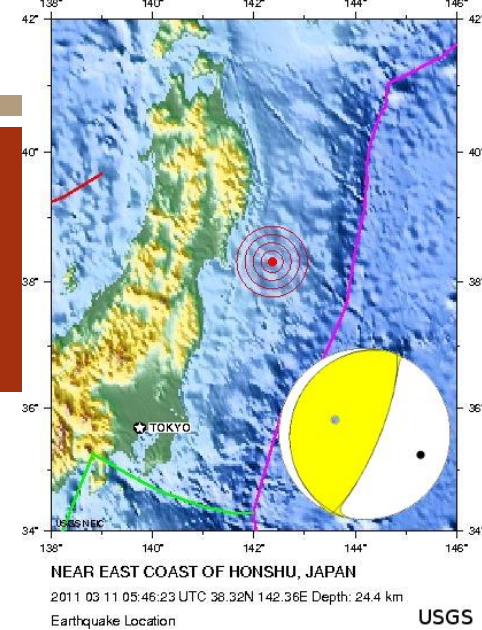
I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME?

2. Utilisation de l'INSAR

- **Lecture d'un interférogramme : Séismes en contexte compressif en subduction, exemple du séisme de Tohoku Oki (Japon, 2011)**

Localisation et mécanisme au foyer du séisme du 11 mars 2011 au large de Sendai (Japon) Source - © 2009 US Geological Survey



- Données sismiques: mécanismes au foyer

⇒ Faille inverse

- Données InSAR :

➤ Forme symétrique

⇒ Faille inverse ou normale

➤ côté ligne de visée (compartiment E): jaune-rose-bleu-vert

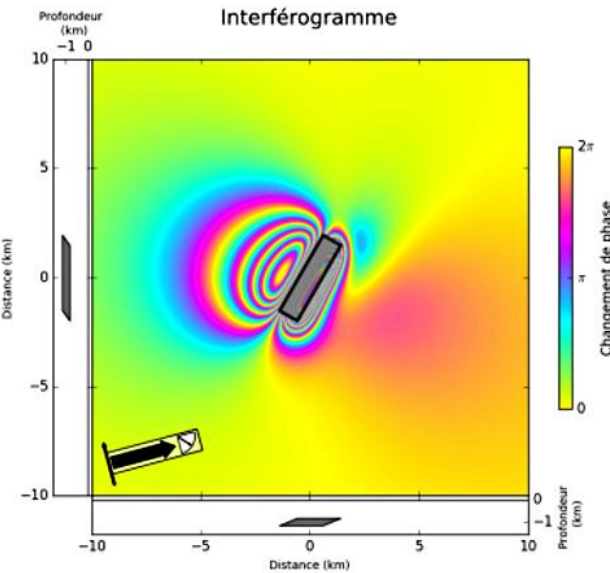
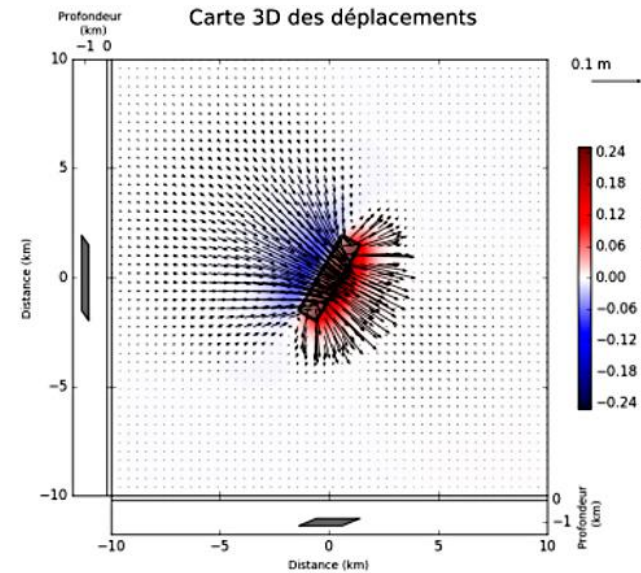
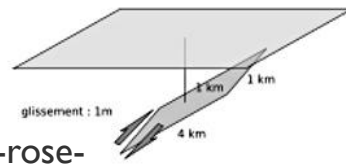
⇒ phase diminue

⇒ Rapprochement vers le los

⇒ Compartiment à l'Est de la faille s'enfonce

Paramètres de la source

Faille inverse



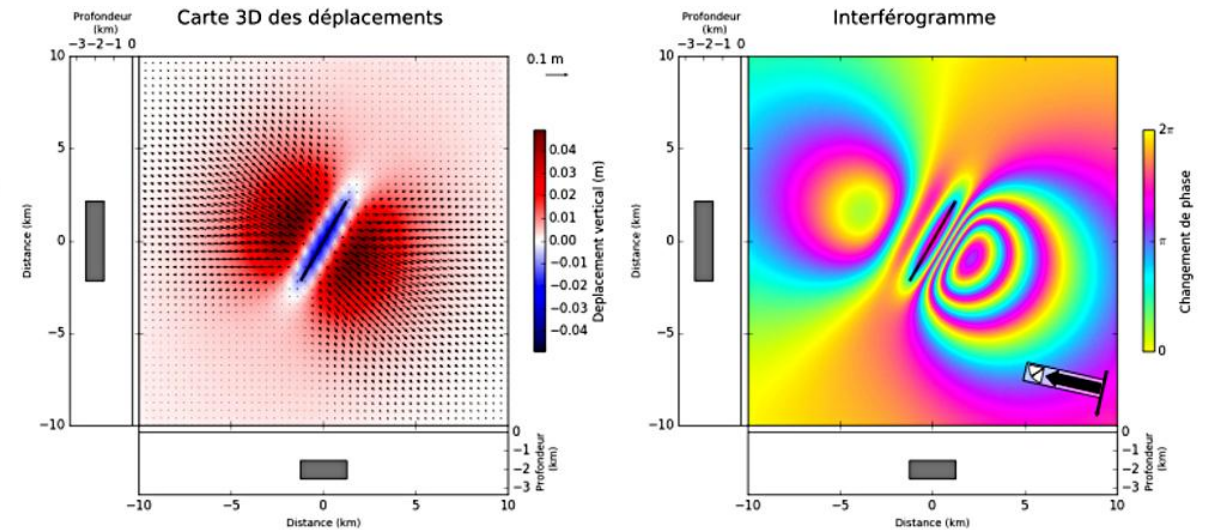
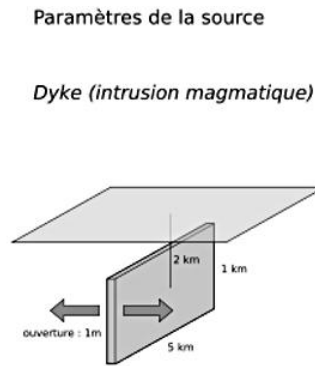
Modèle numérique de déformation lié à une faille inverse Source - © 2020 A. Augier

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME?

2. Utilisation de l'INSAR

- **Lecture d'un interférogramme :**
Contexte extensif de rifting : dykes et failles normales
- Données InSAR :
 - Forme symétrique
 - ⇒ Faille inverse ou normale
 - côté ligne de visée (LOS): rose-bleu-vert-jaune
 - ⇒ phase diminue
 - ⇒ Rapprochement du compartiment E du Los perpendiculaire à faille
 - ⇒ extension
 - Au centre de la faille: jaune vert rose
 - ⇒ Augmentation de phase
 - ⇒ subsidence



Modèle numérique de déformation lié à l'injection d'un dyke (d'après A.Augier)

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME?

2. Utilisation de l'INSAR

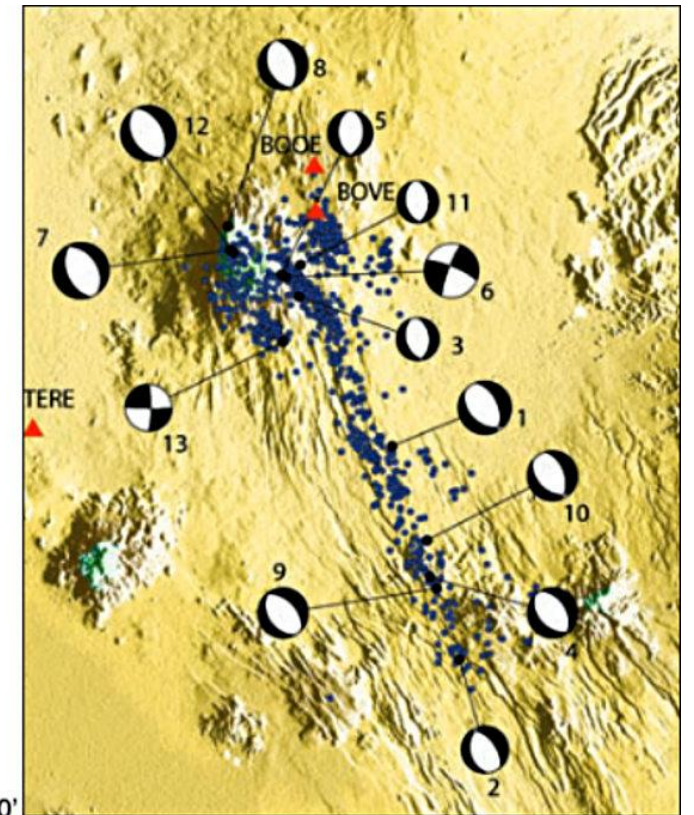
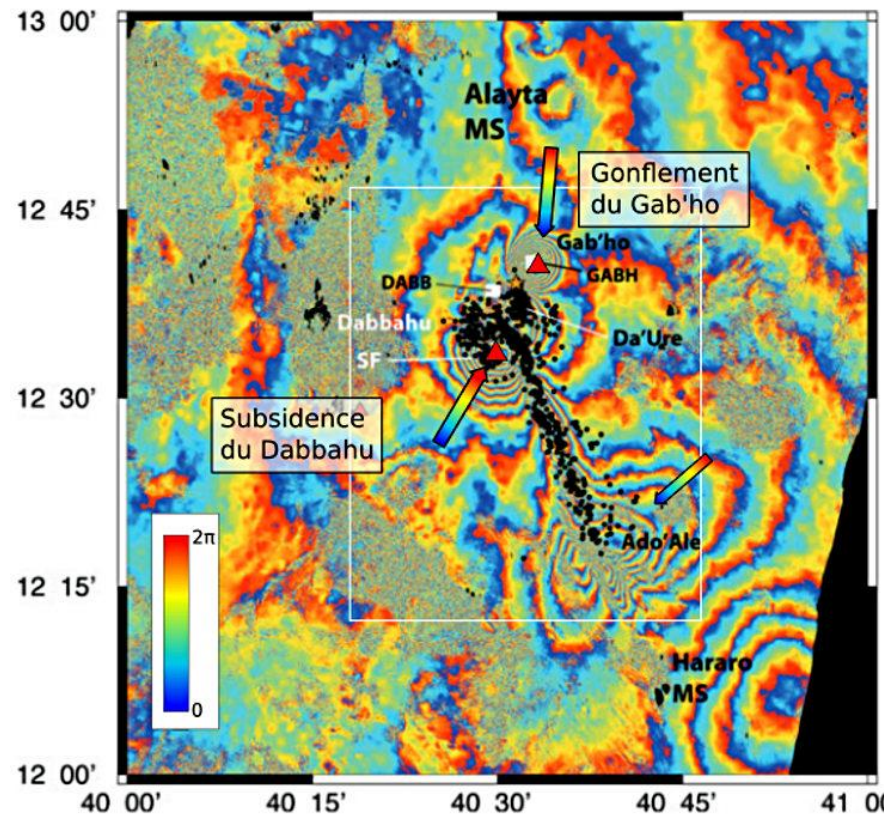


Dabbahu, volcan de la région Afar en Ethiopie

- Lecture d'un interférogramme : suivi d'un volcan, le Gab'ho

- Données InSAR :

- Forme symétrique
 - ⇒ Faille inverse ou normale
- côté ligne de visée SW: bleu-vert-jaune-rouge
 - ⇒ phase augmente
 - ⇒ Subsidence
- Au côté ligne de visée NE: rouge-jaune-vert-bleu
 - ⇒ Phase diminue
 - ⇒ soulèvement



2008 D'Ebinger et al. [3]. Interférogramme et sismicité couvrant la période du 28 octobre 2005 au 21 avril 2006

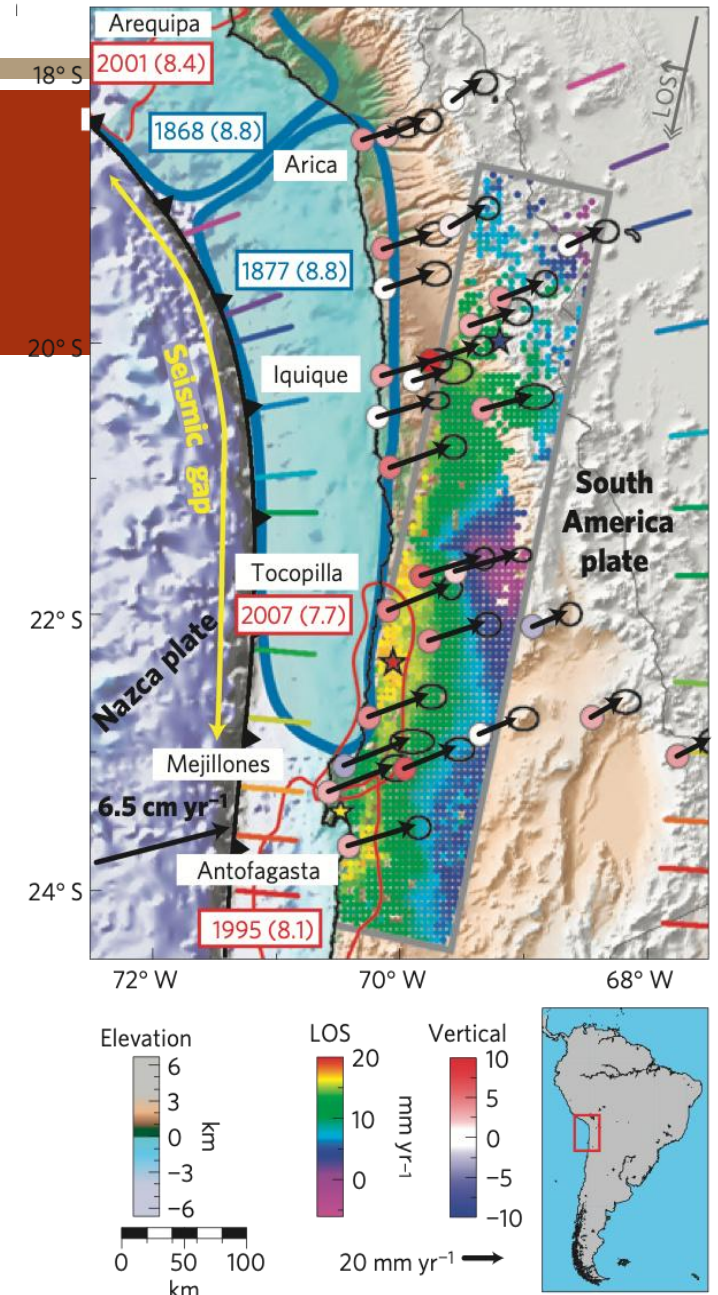
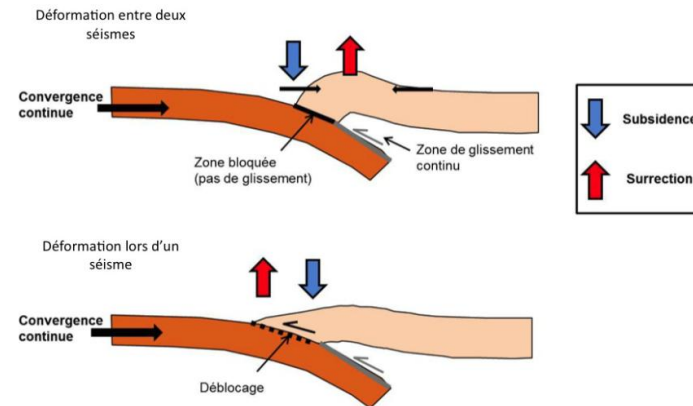
I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME?

2. Utilisation de l'INSAR

La carte présente :

- les déplacements GPS :
 - mouvements horizontaux = flèches noires
 - mouvements verticaux : couleur du cercle associée à la flèche (code à droite « vertical »)
- les déplacements InSAR : code couleur LOS
 - un déplacement vertical en période intersismique qui décroît depuis la côte vers l'intérieur de la plaque
 - = **déformation élastique** de la plaque en période inter-sismique = **accumulation d'énergie élastique**.
 - mouvement de la plaque inférieure est **accommodé** par la déformation dans la plaque supérieure



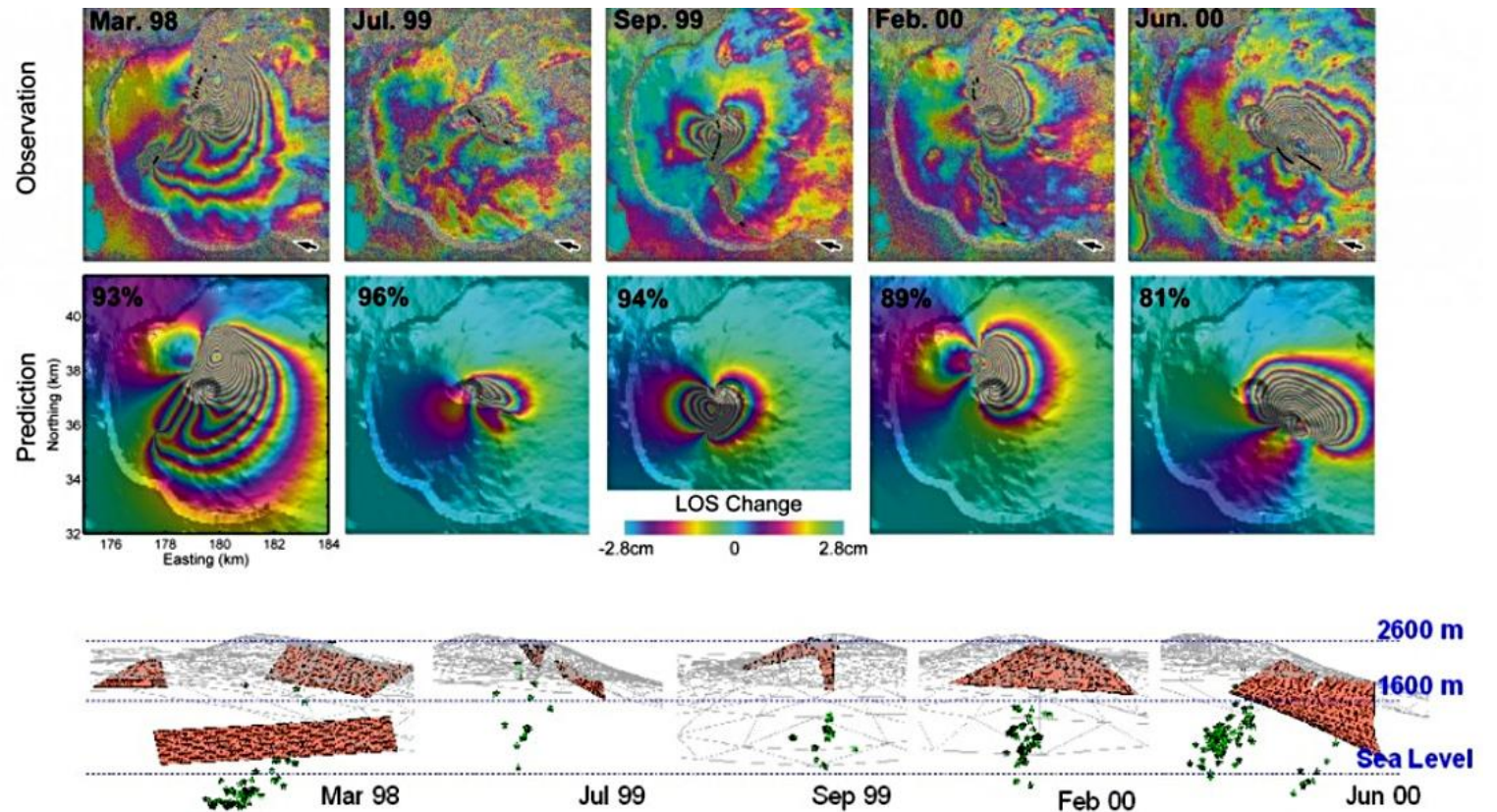
chargement de la plaque au niveau de la subduction des Andes en période inter-sismique (in Bejar et al., Nature Geosciences 2013)

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME?

2. Utilisation de l'INSAR

- Suivi des activités volcaniques (ex-Piton de la Fournaise):
 - les données GPS :
 - ✓ Déformations des volcans trop faibles pour être suivies par GPS
 - ✓ Faible extension spatiale du volcan: il faudrait plein de balises au sol
 - les déplacements InSAR : suivi de l'activité volcanique (2 à 3 éruptions par an)
 - ✓ Déformation la + importante avant et au début de l'éruption
 - ✓ Déformation de type surrection



★ Relocated micro-earthquakes (J. Battaglia)

Activité classique au Piton de la Fournaise Source - © 2010 D'après Fukushima et al. [7]

Déformations associées à différentes éruptions au Piton de la Fournaise, et modèles de dykes associés (colonne éruptive)

I. MÉTHODES D'OBSERVATIONS

C. QUELLES SONT LES OBSERVATIONS SUR LE PLUS LONG TERME?

2. Utilisation de l'INSAR

| | GPS | InSAR |
|----------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------|
| Résolution spatiale | 1 point par station | Environ 20 mètres |
| Précision de la mesure | Centimétrique | centimétrique |
| Résolution temporelle (maximale) | Seconde | Dizaine de jours |
| Géométrie de la mesure | 3 composantes (EO/NS/verticale) | 1 composante (ligne de visée du satellite) |
| Dépendance aux conditions météo | Non | Non |
| Dépendance à la végétation | Non | Oui (perte de cohérence) |
| Dépendance aux variations saisonnières | Non | Oui |
| Acquisition de nuit | Oui | Oui |
| Coût | élevé (maintenance et matériel) | ne couverture large |
| Séismes | Partout | Loin de la faille |
| Volcans | Oui | Oui |
| Glissements de terrain | Non (risque de perte du matériel) | Non (perte de cohérence) |
| Glaciers | Non (risque de perte du matériel) | Oui, si déplacements pas trop importants |
| Subsidence urbaine | Oui | Oui |
| | favorable | |
| | défavorable, mais non critique | |
| | critique | |

Figure 21 : Caractéristiques et domaines d'application des méthodes de mesure de la déformation du sol source ; 2020 ,A.Augier

PLAN

I. Méthodes d'observations

- A. Que peut-on déduire des sismogrammes?
- B. Que peut-on déduire des registres sismiques?
- C. Quelles sont les observations sur le plus long terme?

II. Mécanismes mis en jeu

- A. Notion de cycle sismique
- B. Limites de la notion de cycle sismique

III. Risques associés aux séismes

- A. Le risque dépend de l'aléa et de la vulnérabilité
- B. Définition de l'intensité d'un séisme
- C. Risques associés aux séismes

IV. Signification géodynamique des séismes

- A. La localisation des séismes est un marqueur des limites de plaques
- B. Les mécanismes au foyer permettent de déduire les états de contrainte

II. MÉCANISMES MIS EN JEU

A. NOTION DE CYCLE SISMIQUE



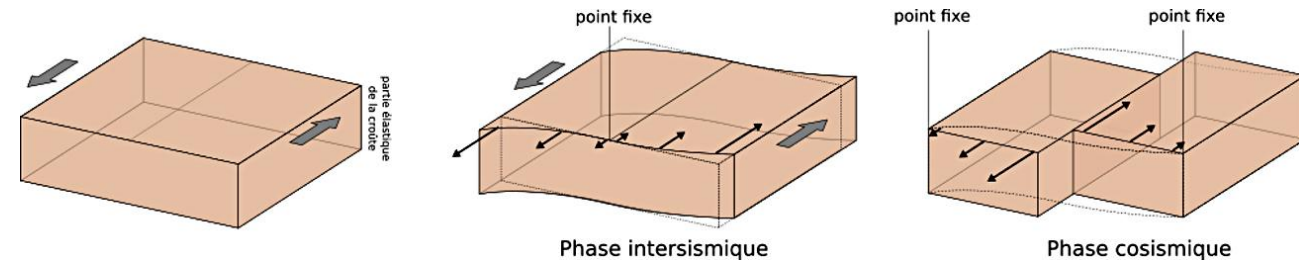
- **cycle sismique** = succession de **deux phases** :

- **phase inter-sismique** = **accumulation lente d'énergie** sous forme de déformations élastiques car les plaques ne peuvent glisser librement : on parle de déficit de glissement voire de blocage complet.
- **phase sismique (ou co-sismique)** intervenant lorsque le **seuil de résistance des matériaux est dépassé**. L'énergie accumulée est partiellement libérée et produit un déplacement brutal (souvent séisme majeur puis répliques).

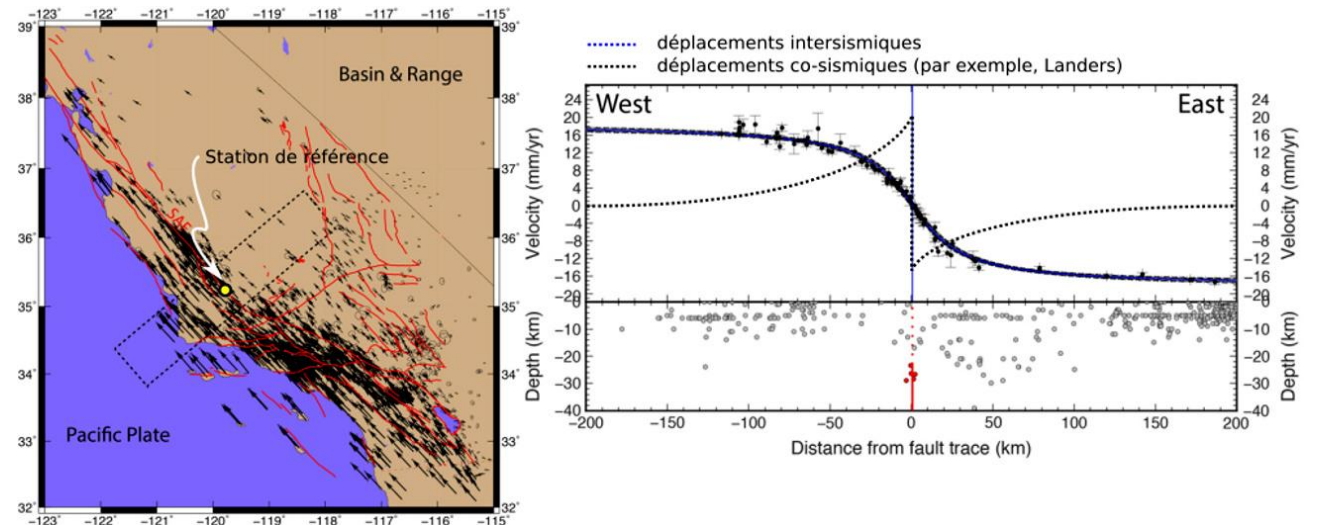
- la durée des cycles est **très variable**, le plus souvent, de quelques années à plusieurs siècles.

séismes = comportement fragile des roches ⇒ uniquement dans la lithosphère, mais ...

...pas n'importe où ni n'importe comment.



Source - © 2020 A. Augier Figure 17. Un modèle conceptuel pour expliquer le rebond élastique au cours d'un séisme en décrochement

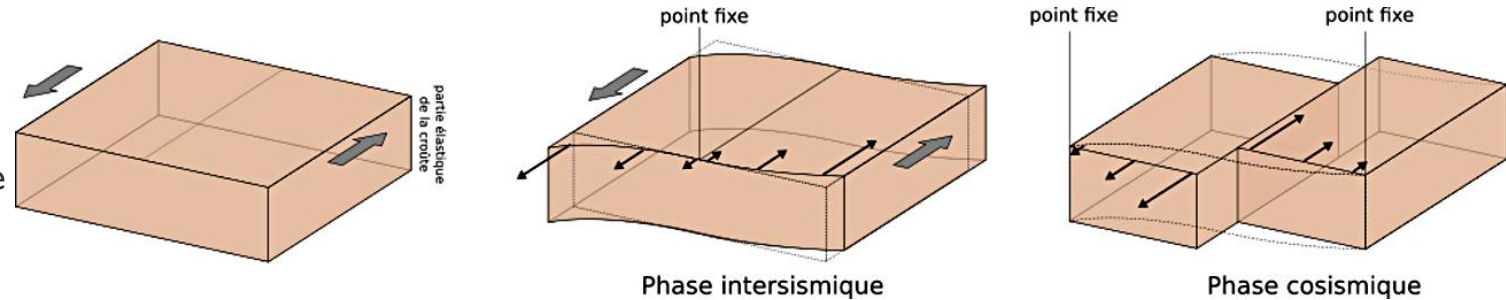


II. MÉCANISMES MIS EN JEU

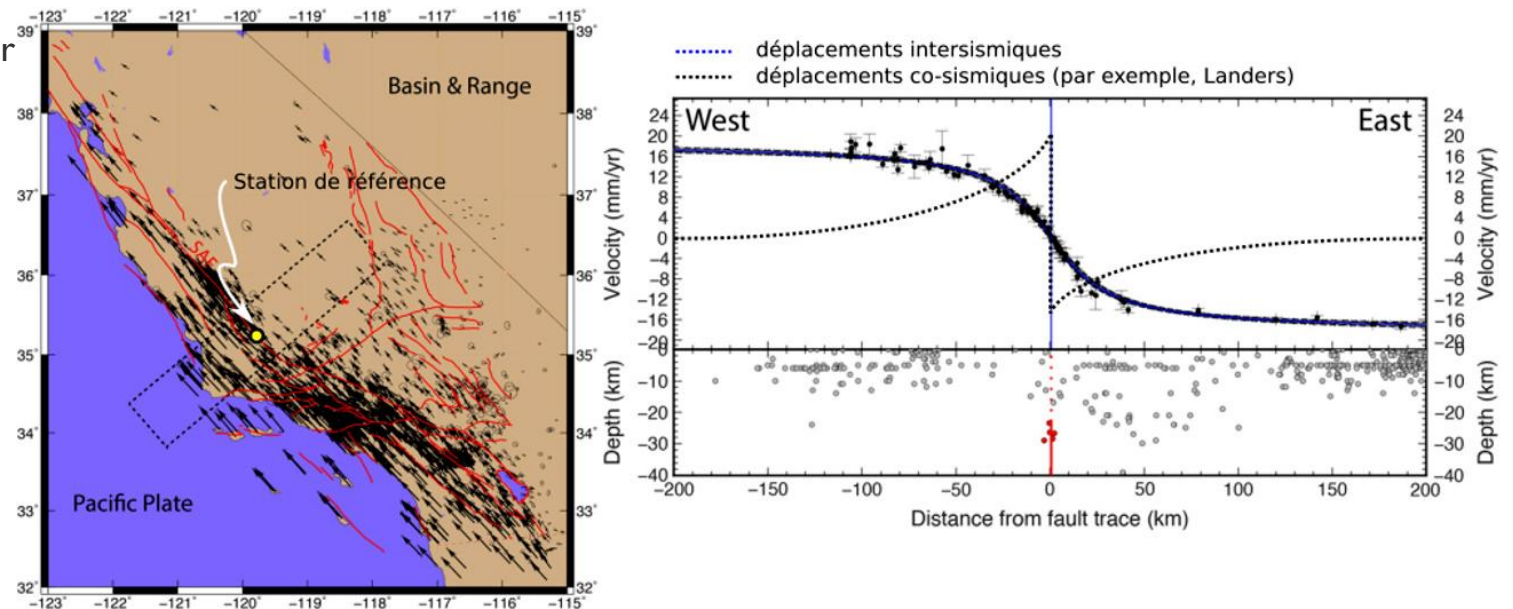
A. NOTION DE CYCLE SISMIQUE

I. Origine du mouvement au niveau de la faille

- **Séisme**= rupture de roches suite à l'accumulation de contraintes =phase cosismique
 - ⇒ **Déplacement libérant de l'énergie** pendant le séisme (cosismique)
 - ⇒ **Résistance au frottement de la faille < contraintes**
 - ⇒ **Mouvement au niveau de la faille pas suffisant pour compenser énergie élastique accumulée => libération de chaleur et ondes élastiques**
- **phase inter-sismique** : augmentation des contraintes
 - ⇒ **Accumulation d'énergie**
 - ⇒ **Déformation ductile (fluage)** car résistance au frottement > contraintes



Source - © 2020 A.Augier Figure 17. Un modèle conceptuel pour expliquer le rebond élastique au cours d'un séisme en décrochement



II. MÉCANISMES MIS EN JEU

A. NOTION DE CYCLE SISMIQUE

2. Notion de rebond élastique



- **Après un séisme, les deux lèvres de la faille reprennent leur forme initiale (déformation élastique) = rebond élastique.**

⇒ roches de part et d'autre de la faille se sont déformées dans le **domaine élastique**.

- **Modèle proposé pour expliquer le cycle sismique dans cette région.**

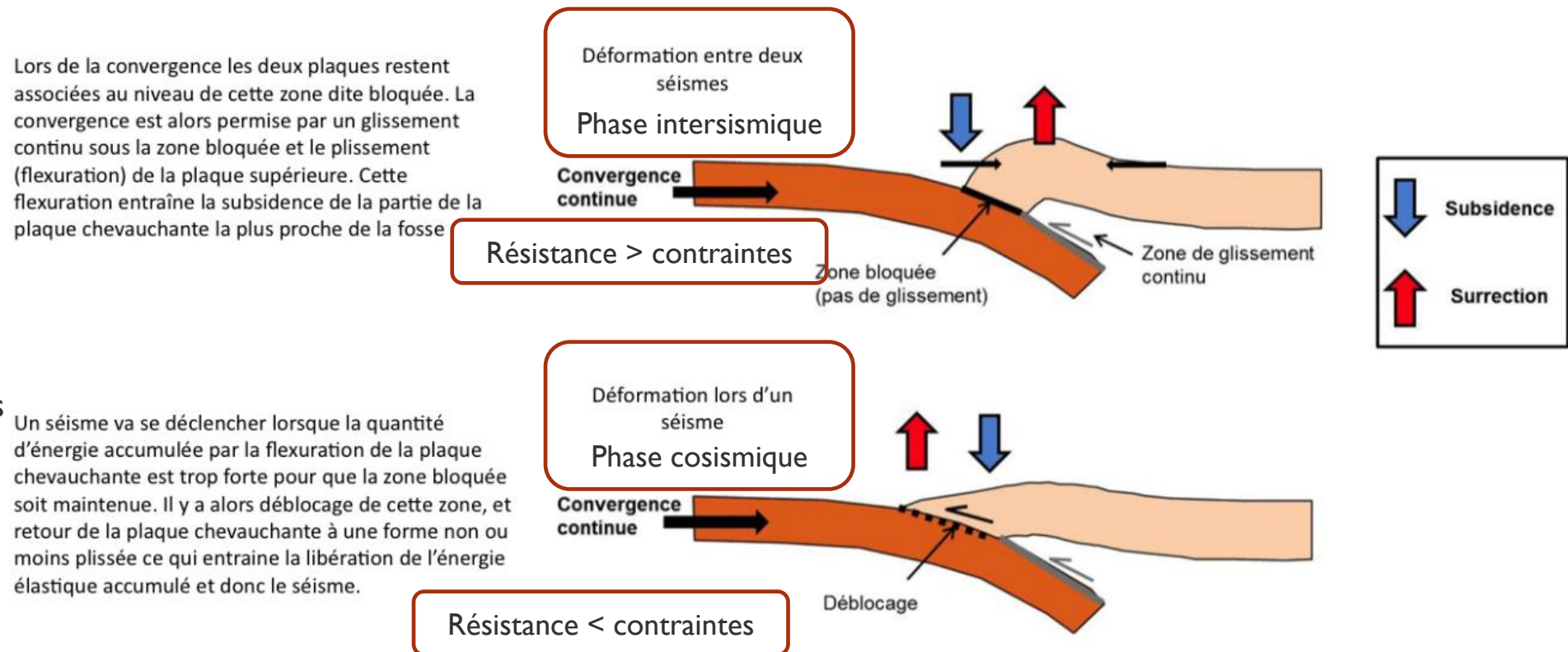


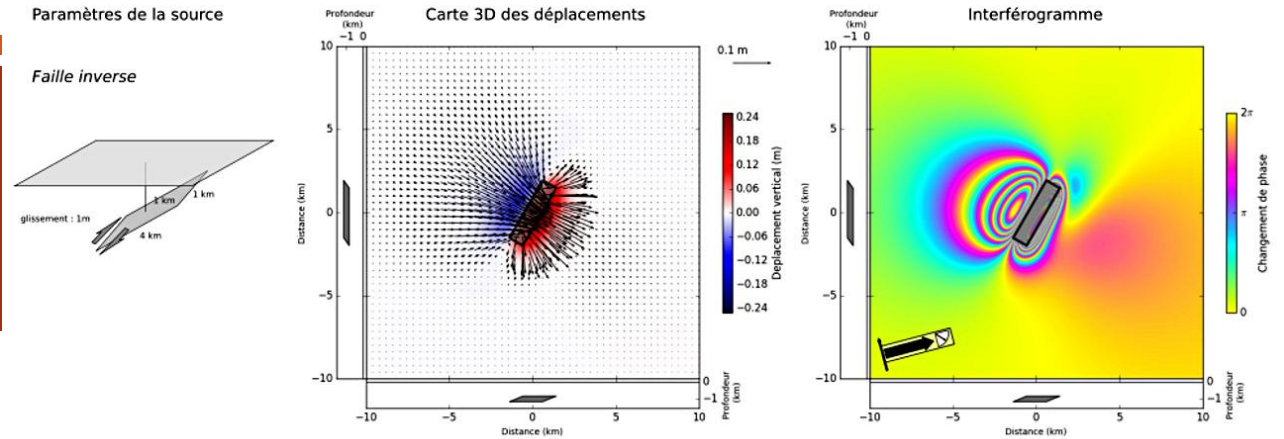
Figure 22 : Evolution du relief terrestre au niveau de deux îles proches de Sumatra dans l'océan Indien suite au séisme du 26 décembre 2004.

II. MÉCANISMES MIS EN JEU

A. NOTION DE CYCLE SISMIQUE

2. Notion de rebond élastique

- **Séismes en contexte compressif en subduction, exemple du séisme de Tohoku Oki (Japon, 2011), à l'origine de la catastrophe de Fukushima**
- **InSAR:** côté LOS jaune-rose-bleu-vert= diminution de phase
 - ⇒ Rapprochement vers LOS
 - ⇒ Enfoncement du bloc oriental: subduction avec plongement de la plaque orientale
- **Données GPS** (chaque flèche correspond à 1 balise GPS):
 - Période intersismique: déplacement vers l'W; accumulation d'énergie élastique, contrainte < résistance ⇒ déplacement vers l'W ⇒ plaque non rigide à sa bordure
 - **période cosismique** (pendant le séisme), déplacement vers l'E, suite à rupture due à résistance < contrainte: plaque chevauchante occidentale se déplace vers l'E ⇒ **rebond élastique**



Modèle numérique de déformation lié à une faille inverse Source - © 2020 A. Augier

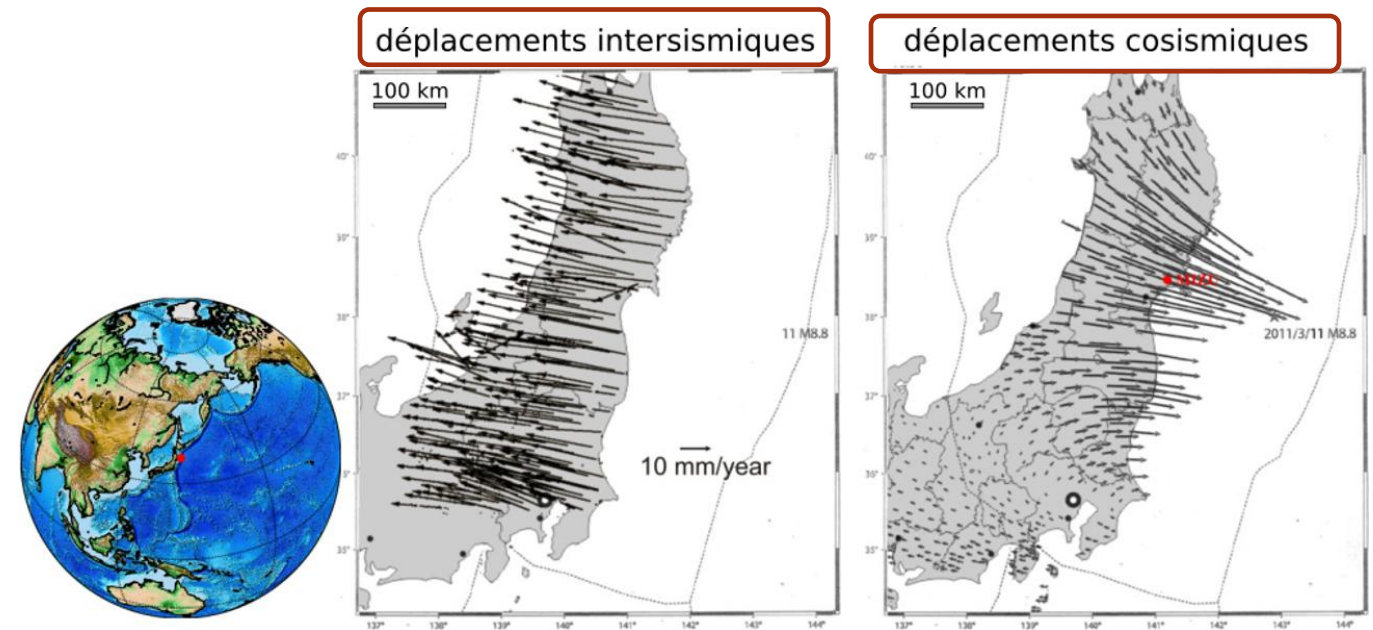


Figure 23 : Mesure de la déformation par GPS Source - © 2011 D'après Supersite (UNAVCO) [21]

Déplacement du Japon (plaque chevauchante) vers le SE= **rebond élastique**

II. MÉCANISMES MIS EN JEU

A. NOTION DE CYCLE SISMIQUE

2. Notion de rebond élastique

- **Séismes en contexte compressif en subduction, exemple du séisme de Tohoku Oki (Japon, 2011), à l'origine de la catastrophe de Fukushima**
- **déplacement (subduction) de la plaque Pacifique vers l'Ouest**
 - ⇒ compression de la bordure de la plaque Amérique du Nord (dont fait partie le Nord du Japon)
 - ⇒ **séismes superficiels** en jeu inverse dans la partie cassante de la croûte pendant phase intersismique mais accommodation insuffisante de la contrainte compressive
 - ⇒ Lorsque contraintes > résistance au frottement alors séisme avec déplacement vers l'Est de la plaque chevauchante
 - ⇒ **Retour à la position initiale** de la plaque chevauchante = **rebond isostatique**

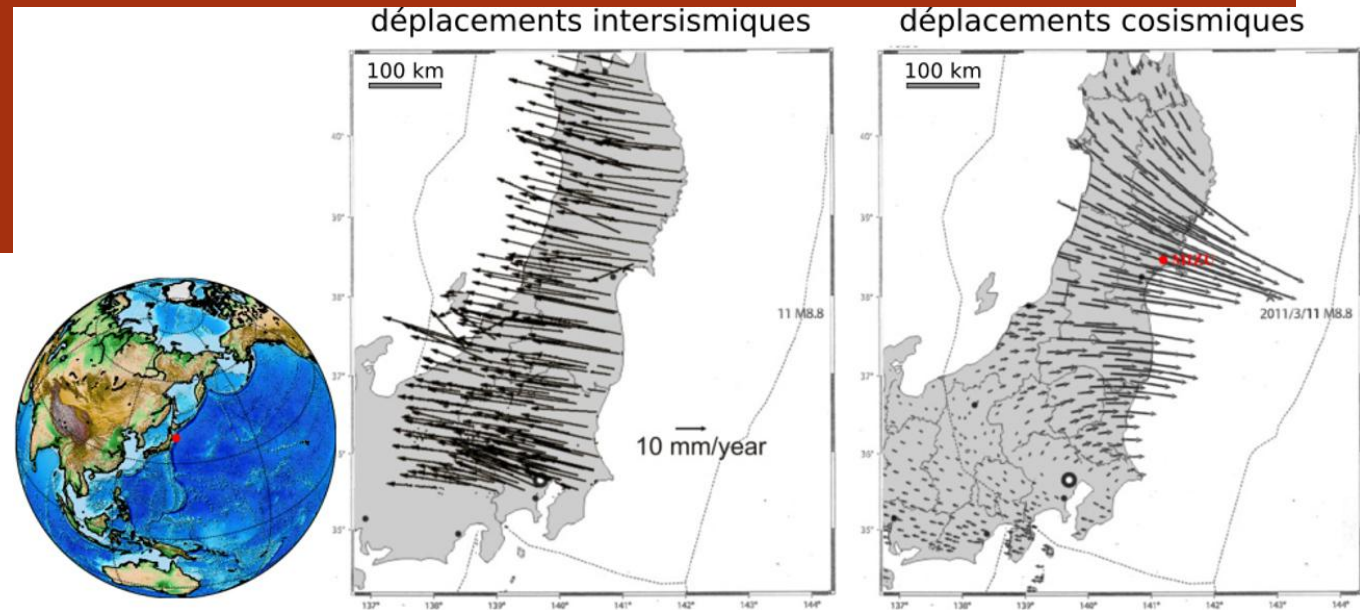


Figure 23 : Mesure de la déformation par GPS Source - © 2011 D'après Supersite (UNAVCO) [21]

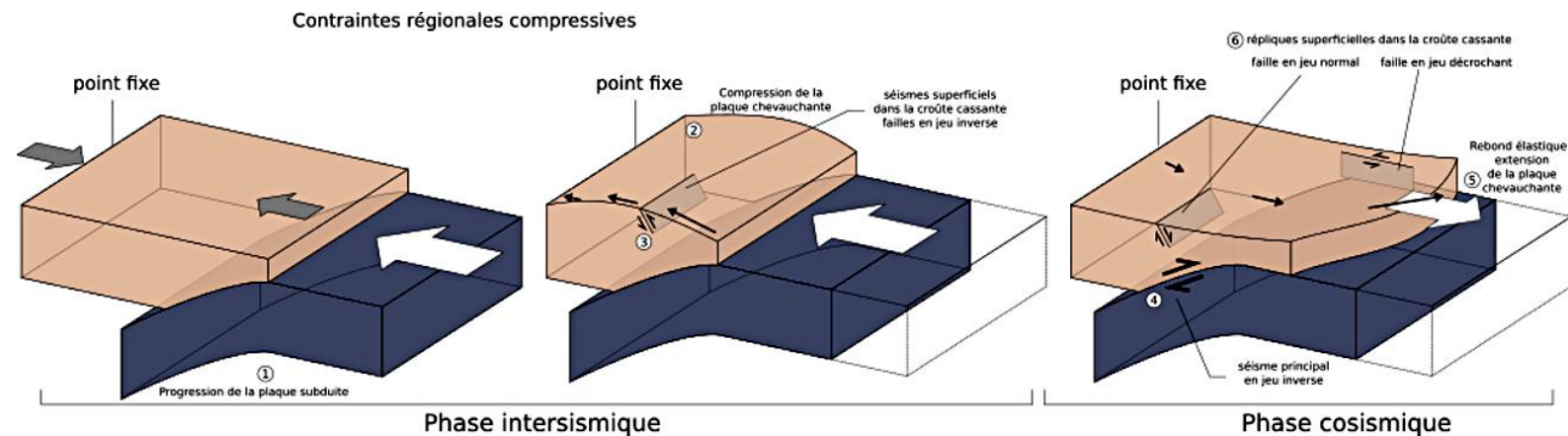


Figure 24 : Un modèle conceptuel pour expliquer le rebond élastique au cours du séisme de Tohoku Oki Source - © 2020 A.Augier

PLAN

I. Méthodes d'observations

- A. Que peut-on déduire des sismogrammes?
- B. Que peut-on déduire des registres sismiques?
- C. Quelles sont les observations sur le plus long terme?

II. Mécanismes mis en jeu

- A. Notion de cycle sismique
- B. Limites de la notion de cycle sismique

III. Risques associés aux séismes

- A. Le risque dépend de l'aléa et de la vulnérabilité
- B. Définition de l'intensité d'un séisme
- C. Risques associés aux séismes

IV. Signification géodynamique des séismes

- A. La localisation des séismes est un marqueur des limites de plaques
- B. Les mécanismes au foyer permettent de déduire les états de contrainte

II. MÉCANISMES MIS EN JEU

B. LIMITES DE LA NOTION DE CYCLE SISMIQUE

I. Observations

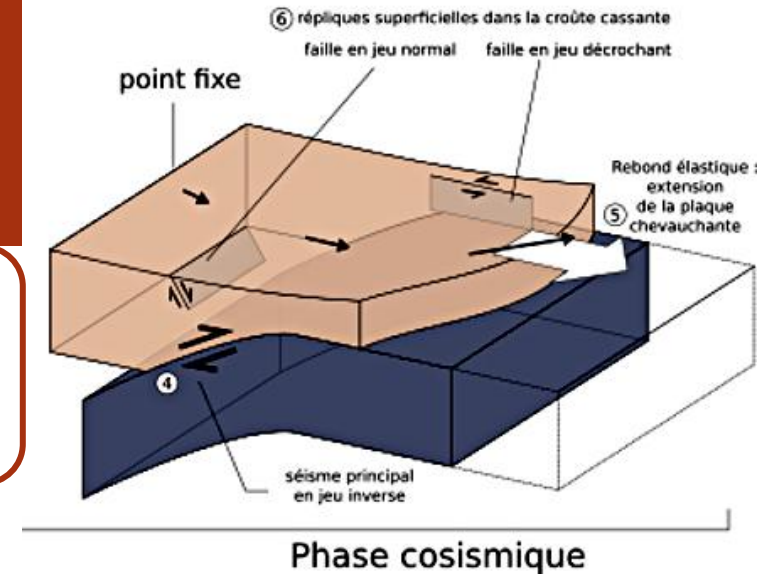
- Temps long = phase intersismique = accumulation d'énergie
- Temps court = phase cosismique = libération d'énergie = déformation

... mais

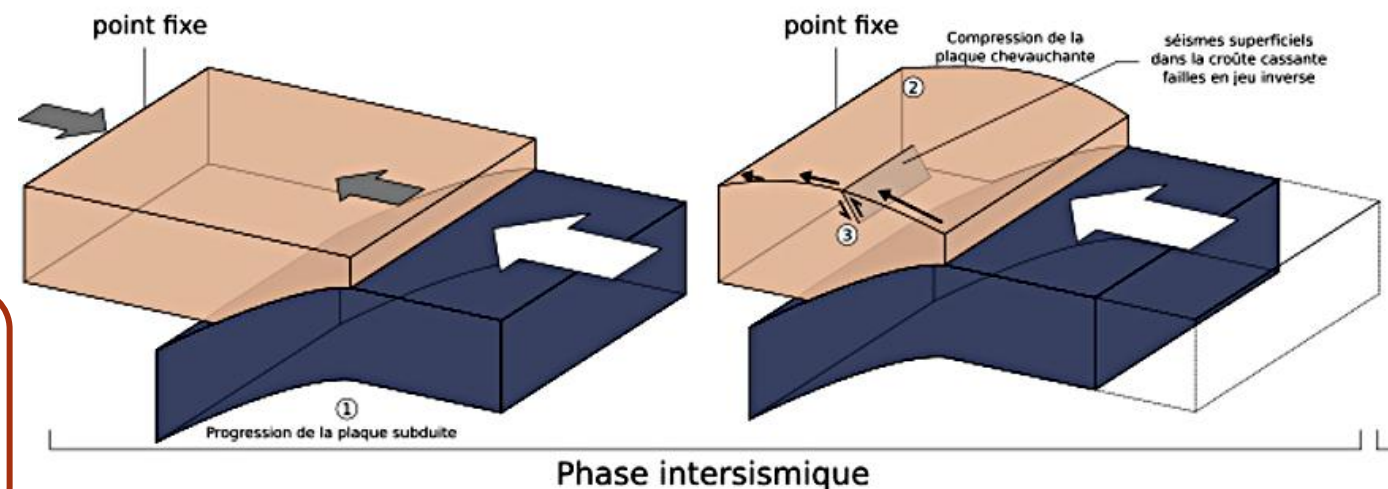
Pendant la phase intersismique: la **faille reste chargée** en énergie, tout l'énergie n'est pas libérée pendant la phase cosismique; MAIS IL EXISTE AUSSI UNE DÉFORMATION PENDANT LA PHASE INTERSISMIQUE.

Contrainte < résistance
accumulation d'énergie
Déformation ductile mais parfois cassante

Contrainte > résistance
Libération d'énergie
Déformation cassante



Contraintes régionales compressives



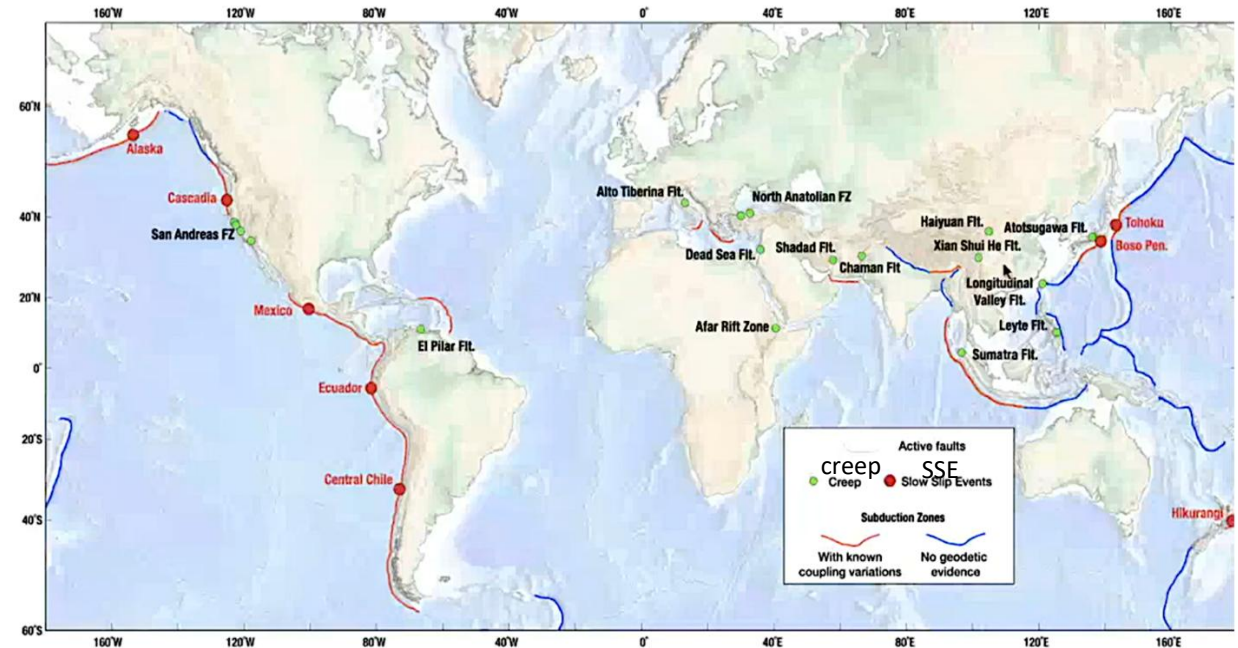
II. MÉCANISMES MIS EN JEU

B. LIMITES DE LA NOTION DE CYCLE SISMIQUE

2. D'autres mécanismes permettent la libération d'énergie



- Les séismes = pas les seuls mécanismes assurant la libération d'énergie sur une limite de plaque.
- Mis en évidence par mesures GPS et d'interférométrie
 - **glissements asismiques** : creep = sur les grandes failles actives de zone de subduction comme au Nord-Pérou.
 - **séismes lents** : **slow sleep events** = durée qqs semaines à qqs mois; possibilité d'atteindre magnitudes de 7,5 sur l'échelle de Richter.



Jolivet & Frank 2020

les séismes lents d'après <https://lejournal.cnrs.fr/articles/connaissiez-vous-les-seismes-lents>

PLAN

I. Méthodes d'observations

- A. Que peut-on déduire des sismogrammes?
- B. Que peut-on déduire des registres sismiques?
- C. Quelles sont les observations sur le plus long terme?

II. Mécanismes mis en jeu

- A. Notion de cycle sismique
- B. Limites de la notion de cycle sismique

III. Risques associés aux séismes

- A. Le risque dépend de l'aléa et de la vulnérabilité
 - B. Définition de l'intensité d'un séisme
 - C. Risques associés aux séismes
- ## IV. Signification géodynamique des séismes
- A. La localisation des séismes est un marqueur des limites de plaques
 - B. Les mécanismes au foyer permettent de déduire les états de contrainte

III. RISQUES ASSOCIES AUX SEISMES

A. LE RISQUE DEPEND DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE



I. Qu'est-ce qu'un risque?

- **risque = aléa x enjeux x vulnérabilité des enjeux**
- ⇒ s'exprime en termes de **gravité** (en pertes humaines et en dollars de dégâts) ou de **probabilité**.
- « risque naturel » = non sens car risque = f(activités humaines)

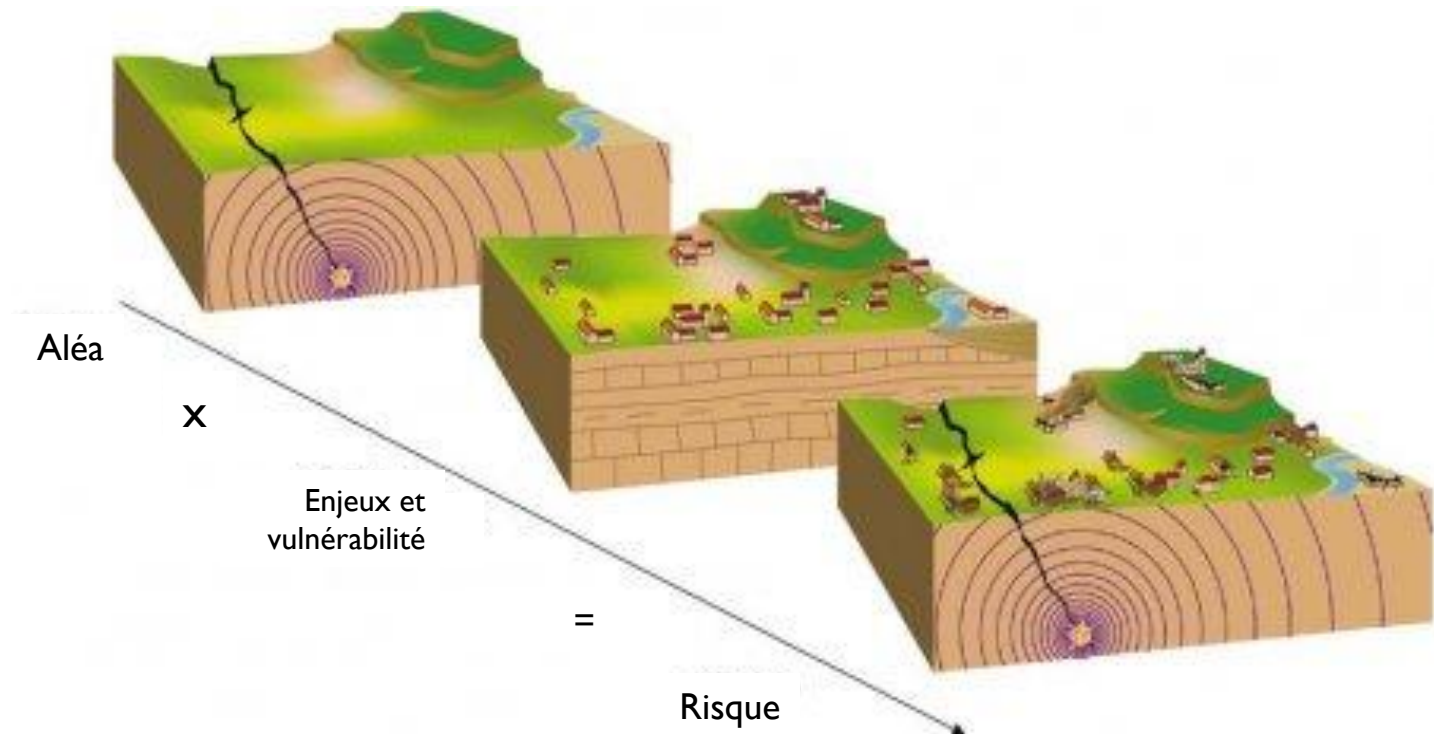


Figure 25 : le risque sismique prend en compte l'aléa et la vulnérabilité

III. RISQUES ASSOCIES AUX SEISMES

A. LE RISQUE DEPEND DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE

2. Notions d'aléa, enjeu et vulnérabilité



- **Aléa** : **probabilité** qu'un événement **aléatoire**, variable mais dommageable se produise à un endroit donné sur un laps de temps donné.
 - aléa = f(**facteurs naturels** : nature du terrain, présence de structures tectoniques avoisinantes - failles, zones de subduction, points chauds etc.-)
 - Aléa évalué par l'**intensité** de l'événement et sa **probabilité d'occurrence** dans l'espace et dans le temps, donc sa **fréquence**.
 - défini par 3 descripteurs :
 - ✓ **Magnitude** (énergie libérée au foyer) et **intensité** (dégâts en surface)
 - ✓ **Probabilité d'occurrence spatiale**
 - ✓ **Probabilité d'occurrence temporelle**
- **Enjeux** : **objets** ou **activités humaines** susceptibles d'être endommagés ou perturbés si l'aléa survient.
 - valeur humaine (enjeux humains), commerciale (économique) ou sociétale attribuée aux éléments exposés à un aléa.
 - enjeu = f(densité de population, nature des terrains, des infrastructures, valeur économique de la région)
- **Vulnérabilité** : **fragilité** ou **résistance** de la population et des infrastructures d'une région donnée face à un aléa donné.
 - vulnérabilité = f(préparation, information, éducation de la population, résistance des bâtiments et des infrastructures, prévention et protections locales contre l'aléa).



Séisme dans un désert californien

Enjeu faible,
vulnérabilité faible



Séisme à Sendai mars 2011

Enjeu élevé,
vulnérabilité faible



Séisme à Sumatra

Enjeu élevé,
vulnérabilité élevée

III. RISQUES ASSOCIES AUX SEISMES

Risque

A. LE RISQUE DEPEND DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE

3. Comment diminuer le risque sismique?

- Répétitivité des tremblements de terre: **récurrence**
- Récurrence permet d'évaluer l'**aléa sismique** d'une région
- Estimation du **temps de récurrence** d'un séisme
- **Plus silence sismique est long** \Rightarrow **plus accumulation de contraintes et d'énergie** \Rightarrow **plus l'énergie libérée lors du prochain séisme sera grande**
 - Étude de la faille de San Andreas
 - séisme type revient environ tous les 20 ans.
 - A partir de ces données un séisme a été prévu pour 1998. Il n'a pas encore eu lieu ce qui signifie que le prochain séisme aura une magnitude supérieure à celle du séisme type.

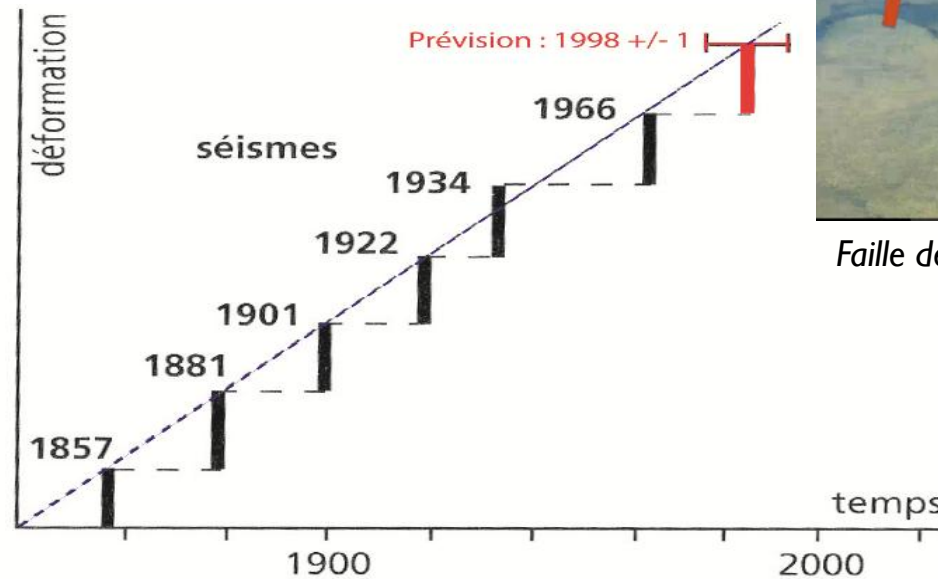
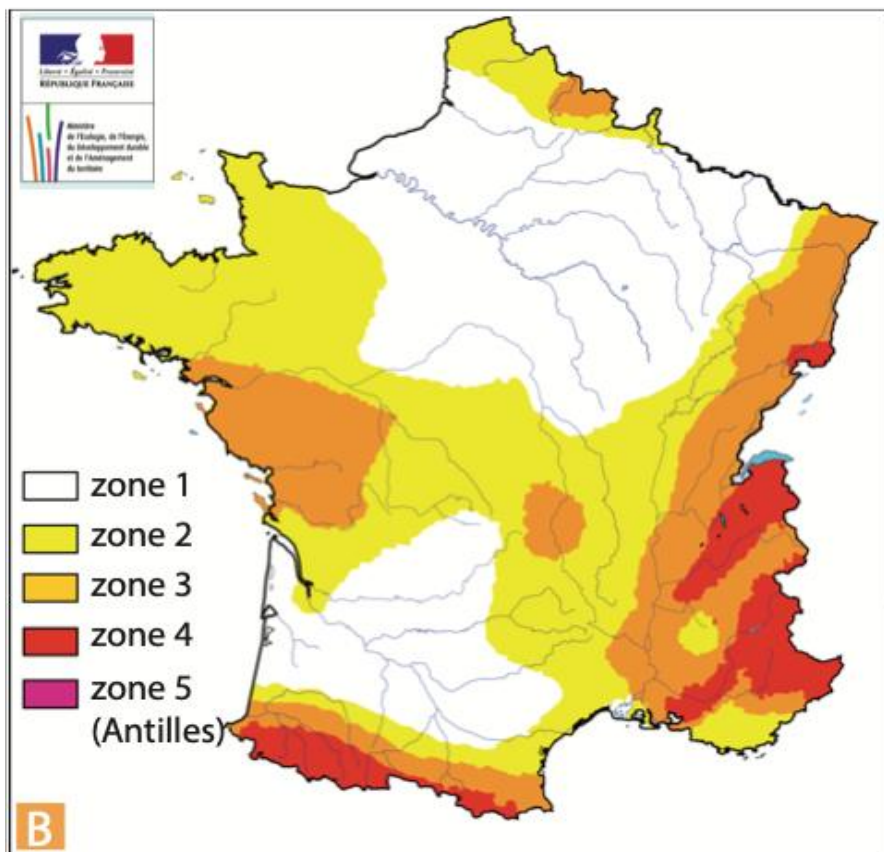


Figure 26 : **récurrence** et **prévision** d'un séisme sur la faille de San Andreas (Californie)

III. RISQUES ASSOCIES AUX SEISMES

A. LE RISQUE DEPEND DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE

3. Comment diminuer le risque sismique?



B. Aléa sismique de la France (document officiel du Gouvernement français). La carte représente le zonage sismique en vigueur en France depuis le 1^{er} mai 2011, à la suite du décret du 22 octobre 2010. Ce zonage sert exclusivement pour l'application des mesures de prévention du risque sismique aux bâtiments et équipements dits à risque normal. Il s'agit d'une représentation de la probabilité de 10 % d'occurrence d'un événement sismique d'ici 50 ans avec un temps de retour de 475 ans. L'événement sismique de référence est traduit en termes d'accélération du sol, variant de 0,4 m/s² à 1,6 m/s² en métropole, et atteignant 3 m/s² aux Antilles.

Zone 1 Sismicité très faible : accélération = 0,4 m/s²

Zone 2 Sismicité faible : accélération = 0,7 m/s²

Zone 3 Sismicité modérée : accélération = 1,1 m/s²

Zone 4 Sismicité moyenne : accélération = 1,6 m/s²

Zone 5 Sismicité forte : accélération = 3 m/s²

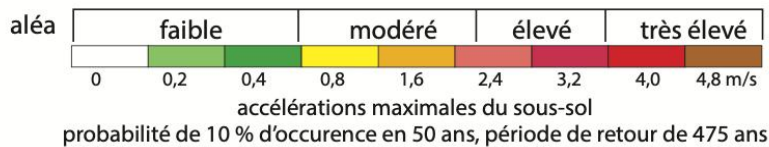
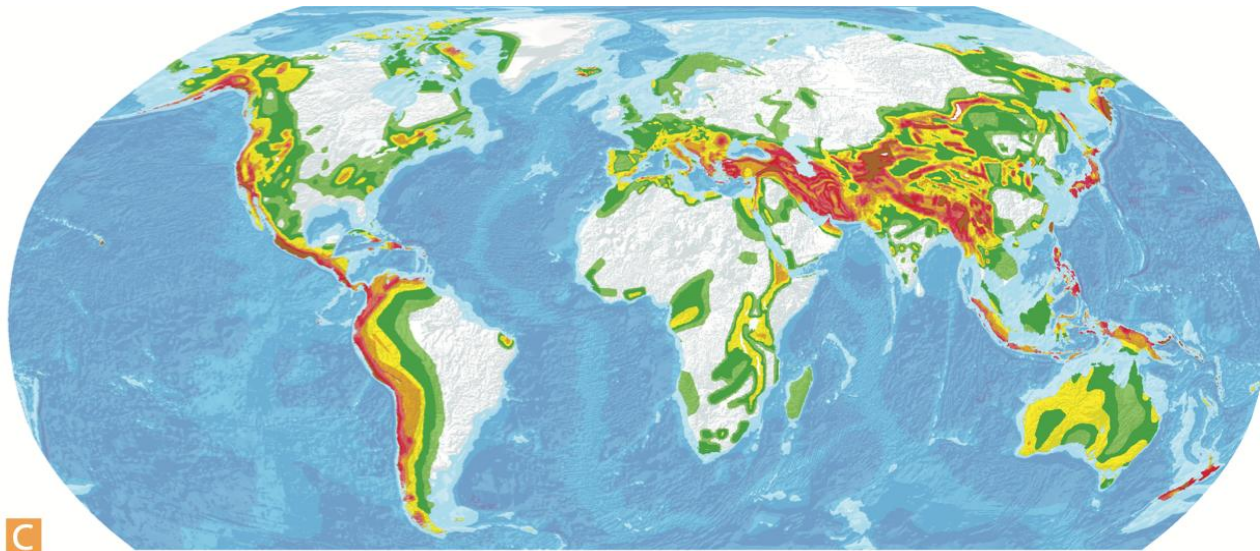
Carte de l'aléa sismique en France (dans Renard et al., 2016)

III. RISQUES ASSOCIES AUX SEISMES

A. LE RISQUE DEPEND DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE

3. Comment diminuer le risque sismique?

Risque



Carte de l'aléa sismique dans le monde (dans Renard et al., 2016)

- **Modèles probabilistes** de prévision sismique:
 - Pour chaque source sismique: estimation du **taux de récurrence** en fonction de la **magnitude** et la **profondeur**.
 - taux annuel des séismes \searrow exponentiellement avec la magnitude.
 - Modèles actuels: prévision du lieu et de la magnitude d'un séisme mais **impossible de prévoir QUAND**
 - Espoir: « trémor tectonique » (crissement de partie profonde des failles)

C. Carte de l'aléa sismique mondial établie par le projet international *Global Seismic Hazard Assessment Program* (GSHAP) lancé en 1992 par l'*International Lithosphere Program* (ILP) avec le soutien de l'*International Council of Scientific Unions* (ICSU), dans le cadre des Nations unies. Comme pour la carte B, on représente la prédiction des pics d'accélération pouvant être atteints ou dépassés avec une probabilité de 10 % pendant une période de 50 ans. Cette carte se calque évidemment sur les grandes ceintures tectoniques actives du globe (subduction péripacifique et collision alpine s.l.). Mais des zones de rift, de marges passives et les régions volcaniques sont également concernées par l'aléa sismique. Le cœur des grandes plaques est toujours à l'abri d'un aléa sismique élevé, sauf en bordure des anciennes calottes glaciaires où existe l'aléa sismique lié au rebond postglaciaire.

III. RISQUES ASSOCIES AUX SEISMES

A. LE RISQUE DEPEND DE L'ALEA ET DE LA VULNERABILITE

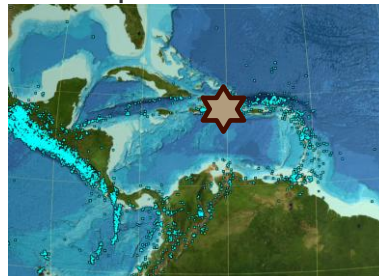
3. Comment diminuer le risque sismique?

Intensité: mesure des dégâts de surface apportés aux infrastructures par le séisme

- Estimation de l'aléa sismique:

- ⇒ EN ETUDIANT LES **BILANS ENERGETIQUES** SUR CHAQUE SEGMENT DE FAILLE

- Connaître les **déplacements en continu** permet de faire des **bilans énergétiques** précis pour chaque portion de faille et ainsi de mieux évaluer l'aléa sismique.
- Faire de la géodésie spatiale par **GPS et interférométrie radar (InSAR)**
- Portions de faille avec lacunes sismiques (faille active bloquée) ⇒ accumulation d'énergie élastique ⇒ modélisation de magnitude du prochain séisme
- ✓ Ex: séisme du 12/01/10 à Haïti: données GPS avaient révélé que faille active bloquée avec déformation ductile de 7 mm/an; or dernier séisme majeur en 1751 ⇒ accumulation d'un déficit de mouvement de 1,8 m (7mm/an depuis 250 ans) ⇒ lorsque contrainte > déformation alors magnitude 7,2, ce qui s'est effectivement produit



- EN LIMITANT LA **VULNERABILITE** DES POPULATIONS

- L'étude de la récurrence d'une faille ne permet pas de prévoir un séisme : la diminution du risque nécessite donc de **diminuer la vulnérabilité** :

- ⇒ **éducation** de la population : sensibilisation, entraînement, éducation permettent de limiter les accidents.
- ⇒ **constructions** adaptées dans le cas d'une zone à fort aléa sismique : les constructions parasismiques permettent de limiter la transmission des oscillations du sol au bâtiment. En fonction de la nature du sol, des bâtiments plus ou moins hauts sont construits. Les matériaux utilisés (béton armé, acier) réduisent au maximum les oscillations.



Séisme du 12/01/2010 à Haïti: aléa et vulnérabilité élevés

PLAN

I. Méthodes d'observations

- A. Que peut-on déduire des sismogrammes?
- B. Que peut-on déduire des registres sismiques?
- C. Quelles sont les observations sur le plus long terme?

II. Mécanismes mis en jeu

- A. Notion de cycle sismique
- B. Limites de la notion de cycle sismique

III. Risques associés aux séismes

- A. Le risque dépend de l'aléa et de la vulnérabilité
 - B. Définition de l'intensité d'un séisme
 - C. Risques associés aux séismes
- ## IV. Signification géodynamique des séismes
- A. La localisation des séismes est un marqueur des limites de plaques
 - B. Les mécanismes au foyer permettent de déduire les états de contrainte

III. RISQUES ASSOCIES AUX SEISMES

B. DÉFINITION DE L'INTENSITÉ D'UN SÉISME

Intensité: mesure des dégâts de surface apportés aux infrastructures par le séisme

- L'intensité est une **échelle de dégâts de SURFACE** : échelle de Mercalli (1902 modifiée en 1956, graduée de I à XII) puis échelle de MSK (Medvedev, Sponheuer, Kernik, 1964, graduée de I à XII).
- **Évaluation qualitative**
- **Établissement d'échelles d'intensités et de cartes isoséiste**

- 1^{er} degré. Seulement enregistré par les instruments sensibles.
- 2^e degré. *Très faible*. Peu d'observateurs, au repos, le remarquent.
- 3^e degré. *Faible*. Ressenti par un petit nombre d'habitants.
- 4^e degré. *Médiocre*. Ressenti en général à l'intérieur des maisons, mais par un petit nombre de personnes en plein air. Légères oscillations d'objets ; quelques dormeurs réveillés.
- 5^e degré. *Assez fort*. Il est parfaitement ressenti en plein air. Oscillation comme à bord d'un bateau. Les objets suspendus entrent en oscillation. Quelques balanciers de pendules (suivant la direction des ébranlements) s'arrêtent. Réveil général des dormeurs.
- 6^e degré. *Fort*. Provoque la panique. Objets et meubles lourds sont déplacés ; le blanc des plafonds et quelques plâtres tombent. Chute de quelques cheminées en mauvais état.
- 7^e degré. *Très fort*. De sérieux dégâts peuvent se produire ; les eaux sont troublées, il se produit des lézardes, des chutes de cheminées. Dans les puits, le niveau de l'eau change.
- 8^e degré. *Ruineux*. Des objets sont transportés à une distance importante ou sont renversés, les monuments funéraires, les statues, sont renversés. Écroulements partiels de cheminées d'usines ou de cloches.
- 9^e degré. *Désastreux*. Des maisons peuvent s'écrouler. Destructons partielle ou totale d'édifices bien construits.
- 10^e degré. *Très désastreux*. Des digues s'écroulent, les tuyaux d'alimentation (eau-gaz) sont coupés. Les rails de chemin de fer sont tordus. Des mamelons se produisent sur les routes ainsi que des fissures dans les terrains meubles.
- 11^e degré. *Catastrophique*. Même les ponts les plus solides détruits, les rails complètement tordus. De grands éboulements se produisent.
- 12^e degré. *Cataclysmique*. Rien ne subsiste des œuvres humaines. La géographie est modifiée. Ce degré n'a pas été observé.

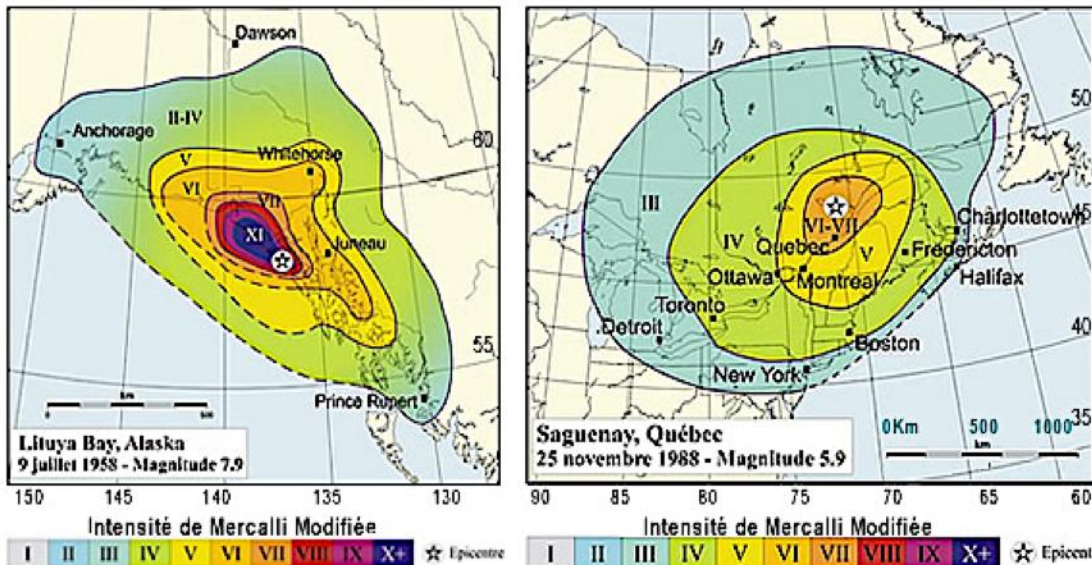


Figure 28 : Carte d'intensité macrosismique déduites des observations locales pour deux séismes en Alaska et au Québec (d'après Ressources naturelles Canada)

Figure 27 : intensité des séismes (échelle MSK)

III. RISQUES ASSOCIES AUX SEISMES

B. DÉFINITION DE L'INTENSITÉ D'UN SÉISME

Intensité: mesure des dégâts de surface apportés aux infrastructures par le séisme

- L'intensité d'un séisme dépend de 3 phénomènes :
 - la **génération** du signal par la rupture dynamique d'une faille ;
 - la **propagation** et l'atténuation des ondes dans le manteau et la croûte ;
 - la **modification locale des ondes due à des phénomènes de réfraction/diffraction lors de leur passage au travers des couches géologiques.**
 - ✓ « **d'effets de site** » (intensité sismique peut être très fortement amplifiée localement par la géologie de surface)
 - ✓ Types d'habitation
 - limites: seuls séismes impactant zones habitées sont pris en compte; intensité dépend du type d'habitation et des facteurs géologiques locaux

- **Attention!!! ne pas confondre magnitude et intensité :**
 - ✓ La magnitude se calcule \neq l'intensité d'un séisme s'estime
 - ✓ La magnitude est une valeur associée au séisme \neq l'intensité est associée au lieu d'observation.
 - ✓ Aucune relation entre magnitude et intensité
 - ⇒ deux séismes de même magnitude peuvent donner en surface des intensités différentes.
 - ⇒ Inversement deux séismes de même intensité en un lieu peuvent avoir des magnitudes différentes.



*Illustration de l'effet de site:
Glissement de terrain au Japon suite à un séisme : lien entre géodynamiques externe et interne (septembre 2018)*

PLAN

I. Méthodes d'observations

- A. Que peut-on déduire des sismogrammes?
- B. Que peut-on déduire des registres sismiques?
- C. Quelles sont les observations sur le plus long terme?

II. Mécanismes mis en jeu

- A. Notion de cycle sismique
- B. Limites de la notion de cycle sismique

III. Risques associés aux séismes

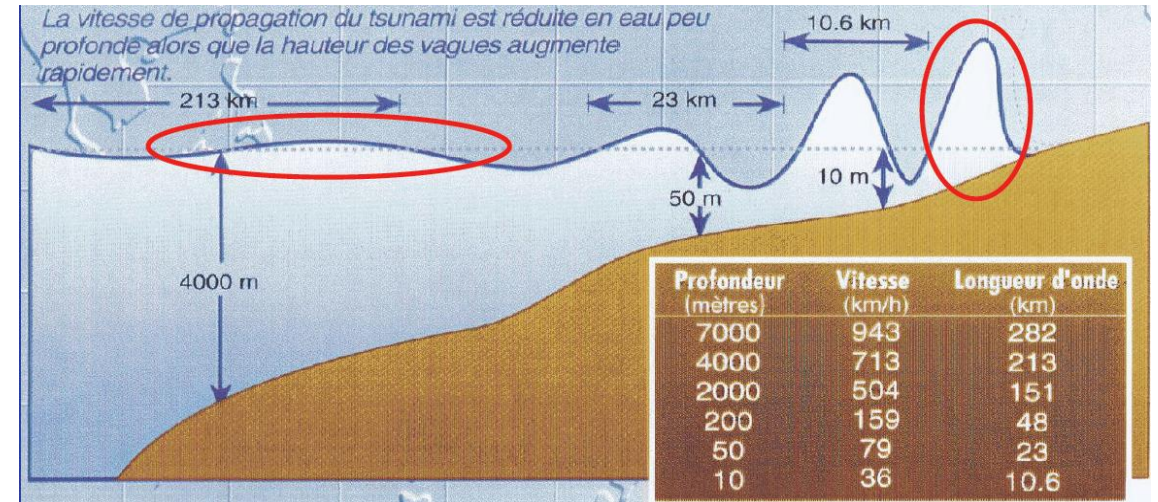
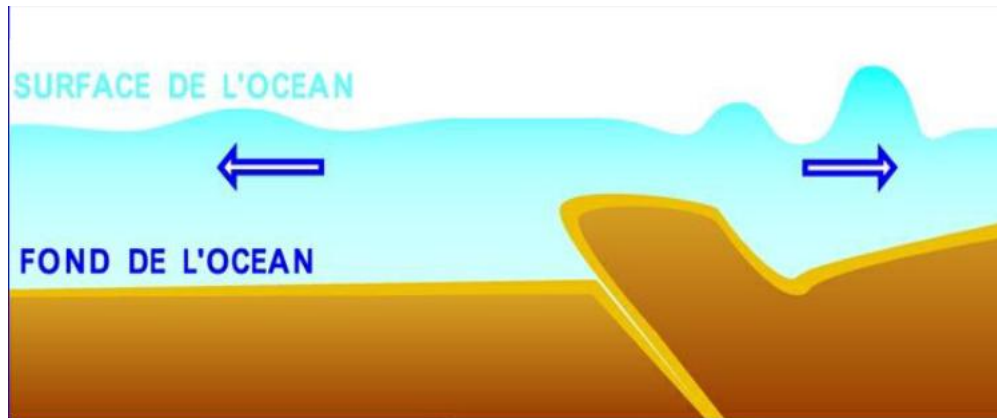
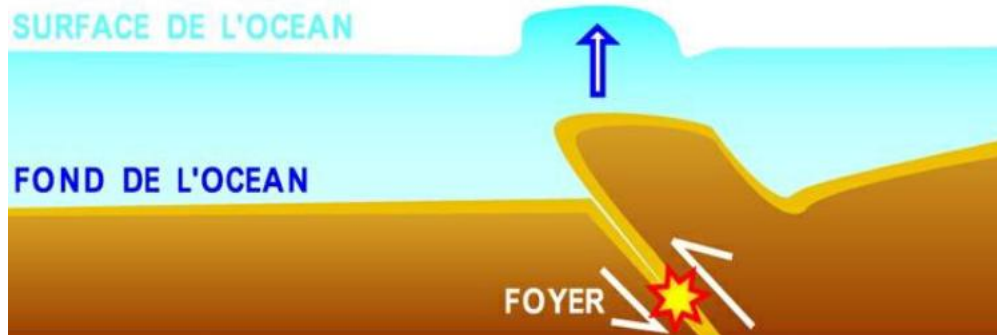
- A. Le risque dépend de l'aléa et de la vulnérabilité
 - B. Définition de l'intensité d'un séisme
 - C. Risques associés aux séismes
- ## IV. Signification géodynamique des séismes
- A. La localisation des séismes est un marqueur des limites de plaques
 - B. Les mécanismes au foyer permettent de déduire les états de contrainte

III. RISQUES ASSOCIES AUX SEISMES

C. PHÉNOMÈNES ASSOCIÉS AUX SÉISMES

I. Les tsunamis

Propagation et amplification source:ENS-Lyon



origine des tsunamis

(planet-terre.ens-lyon.fr)



Le tsunami à Miyako, dans le nord-est du Japon, le 11 mars 2011. © AFP - STR / JJI PRESS

III. RISQUES ASSOCIES AUX SEISMES

C. PHÉNOMÈNES ASSOCIÉS AUX SÉISMES

2. Les glissements de terrain et éboulements et effet de site

- Effet de site, exemple du séisme de Mexico (in thèse Valette 2018)

Rappel des faits : en 1985 Mexico est touchée par un séisme très violent (2répliques de magnitude 8.1 et 7.8 sur l'échelle de Richter. L'épicentre est localisé en mer à environ **400 km à l'ouest-sud-ouest de la ville de Mexico**. L'ampleur des dégâts et la violence du séisme dans la capitale surprennent par rapport à l'éloignement de l'épicentre. Ceci résulte de la géologie de la région : la **vallée de Mexico** se comporte comme une « **caisse de résonance** » sismique. En effet, La vallée de Mexico est constituée **d'argiles molles** issues de l'assèchement d'un ancien lac. Sous l'effet des ondes sismiques, une perte de cohérence des sédiments participe à l'amplification et à la propagation des ondes, rendant ainsi les zones urbanisées anciennement occupées par le lac particulièrement vulnérables. Cet effet de site est responsable d'une durée plus importante des séismes engendrant une fréquence de résonance de certaines ondes sismiques plus forte, variable selon la période des ondes et selon la hauteur des constructions



Tremblement de terre de Mexico 1985

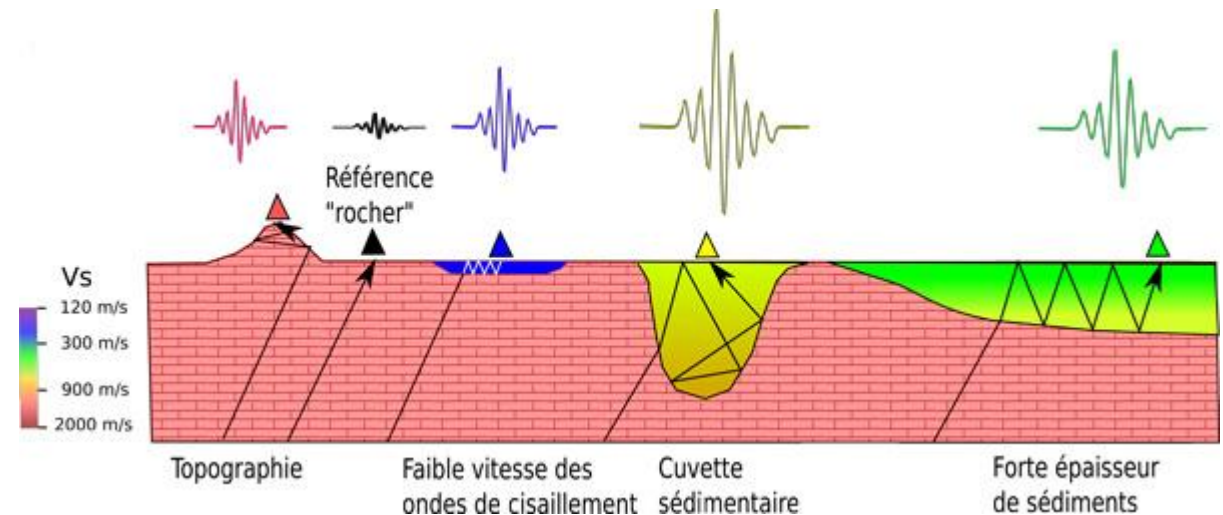


Schéma illustrant différentes configurations géologiques locales susceptibles de modifier la propagation des ondes sismiques qui les traversent.

<https://www.irsn.fr/savoir-comprendre/surete/quest-ce-quun-effet-site>

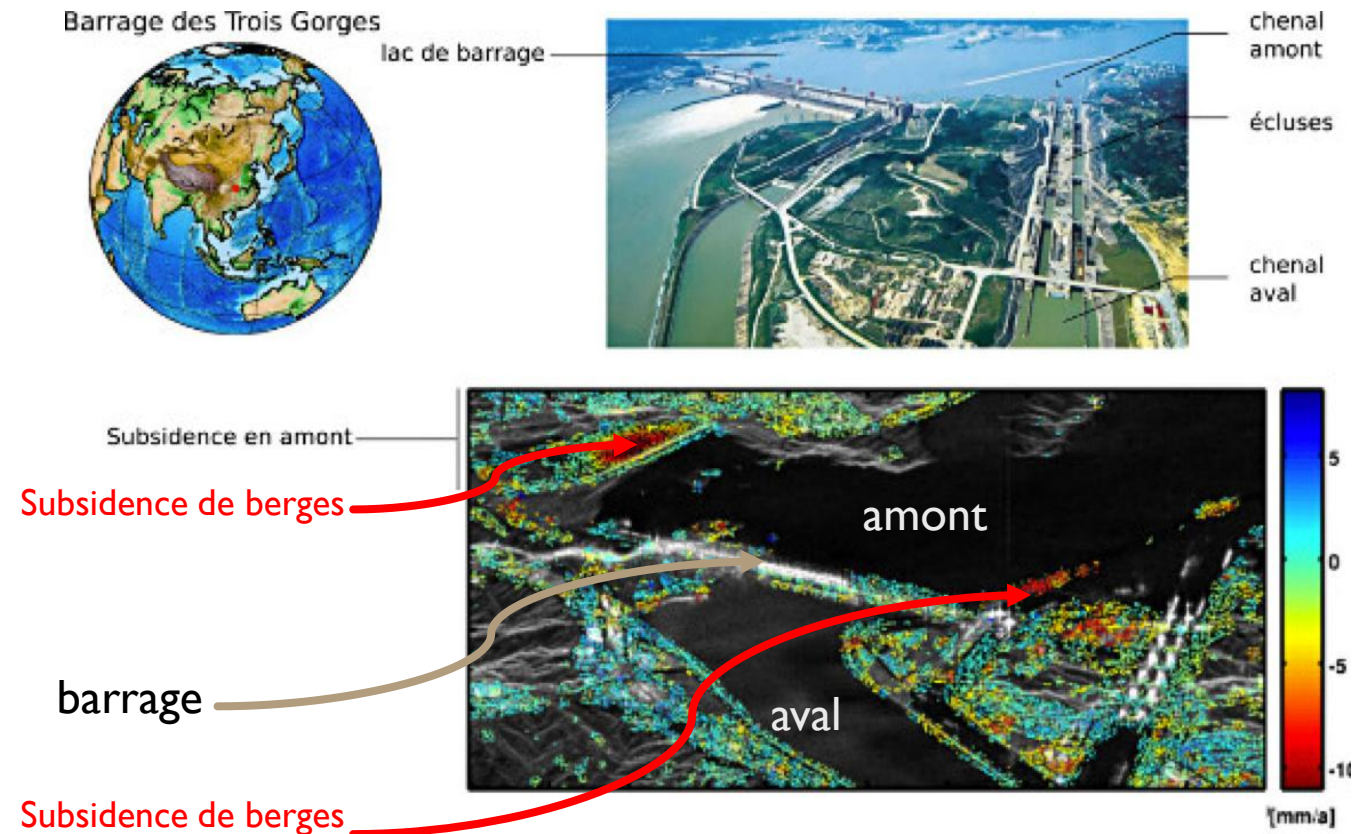
*Vallée de Mexico: ancien lac rempli d'argiles molles
⇒ Caisse de résonance*

III. RISQUES ASSOCIÉS AUX SÉISMES

C. PHÉNOMÈNES ASSOCIÉS AUX SÉISMES

3. Les risques industriels

- La construction de certains ouvrages d'art monumentaux s'accompagne de mouvements du sol. La mise en eau du barrage des Trois Gorges sur le fleuve Yangtze en Chine a été surveillée par **interférométrie**. L'ouvrage est tellement imposant qu'il est aussi possible de surveiller sa propre déformation. La mise en eau du barrage a été suivie d'une **subsidence en amont du barrage**, mais cette subsidence n'est pas homogène et certaines berges ont fortement subsidé. Beaucoup plus en amont (le lac de barrage fait environ 1000 km), la montée des eaux a été responsable de l'amorce de glissements de terrain qui peuvent être suivis par télédétection
- Les points colorés correspondent à certains pixels surveillés par une méthode d'interférométrie similaire à l'InSAR (la PSI, *Persistent Scatter Interferometry*). L'arrière-plan est une image radar d'amplitude.



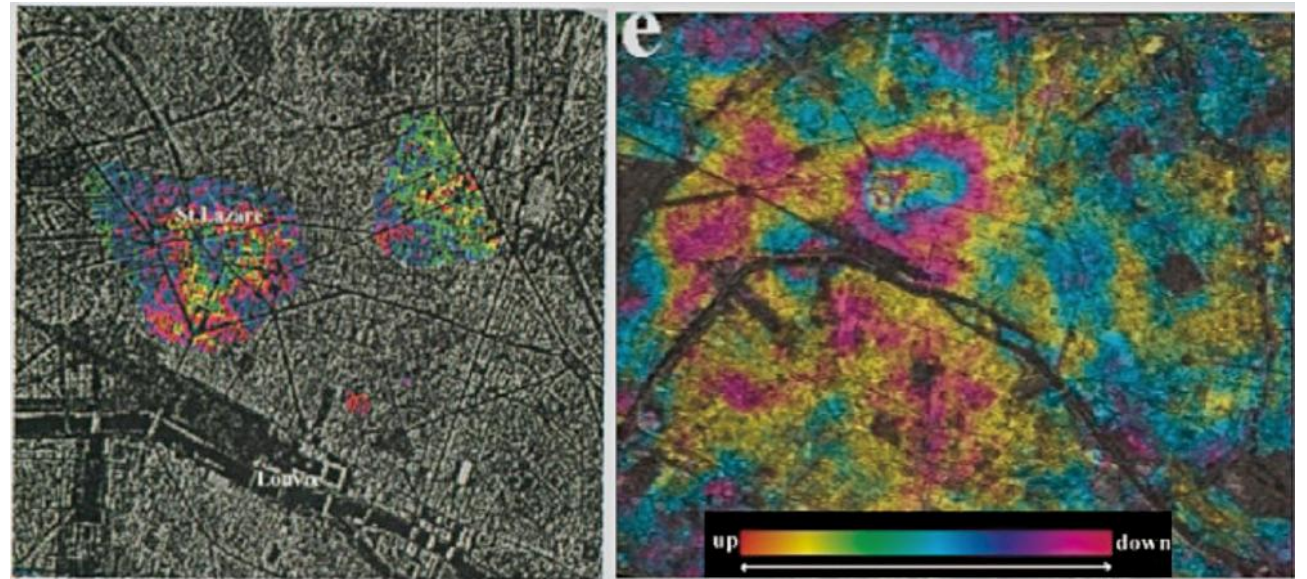
Impact de la construction du barrage des Trois Gorges (fleuve Yangtze, Chine)

III. RISQUES ASSOCIÉS AUX SEISMES

C. PHÉNOMÈNES ASSOCIÉS AUX SÉISMES

3. Les séismes induits

- Une **subsidence** importante a été observée à Paris lors des travaux de la station de métro Condorcet (ligne Éole de la RATP), suivie d'un soulèvement à la fin des travaux. La subsidence est interprétée comme la **conséquence du pompage d'eau** lors des travaux et non comme un affaissement dû au creusement de la station.
- Le **soulèvement observé après les travaux** est interprété comme la conséquence de l'arrêt du pompage à la fin des travaux. Cette déformation est à l'origine de fissures observées dans les bâtiments autour de la zone.



Déformation observée suite aux travaux souterrains pour la station de métro Condorcet (Paris). (planet-terre.ens-lyon.fr Source - © 2000 – 2002
D'après Fruneau et Sarti [6] – Le Mouélic et al. [17])

À gauche : subsidence pendant les travaux. À droite : soulèvement à la fin des travaux. Noter l'enroulement inverse des franges entre les deux interférogrammes, inversion qui témoigne du sens opposé de la déformation.

PLAN

I. Méthodes d'observations

- A. Que peut-on déduire des sismogrammes?
- B. Que peut-on déduire des registres sismiques?
- C. Quelles sont les observations sur le plus long terme?

II. Mécanismes mis en jeu

- A. Notion de cycle sismique
- B. Limites de la notion de cycle sismique

III. Risques associés aux séismes

- A. Le risque dépend de l'aléa et de la vulnérabilité
- B. Définition de l'intensité d'un séisme
- C. Risques associés aux séismes

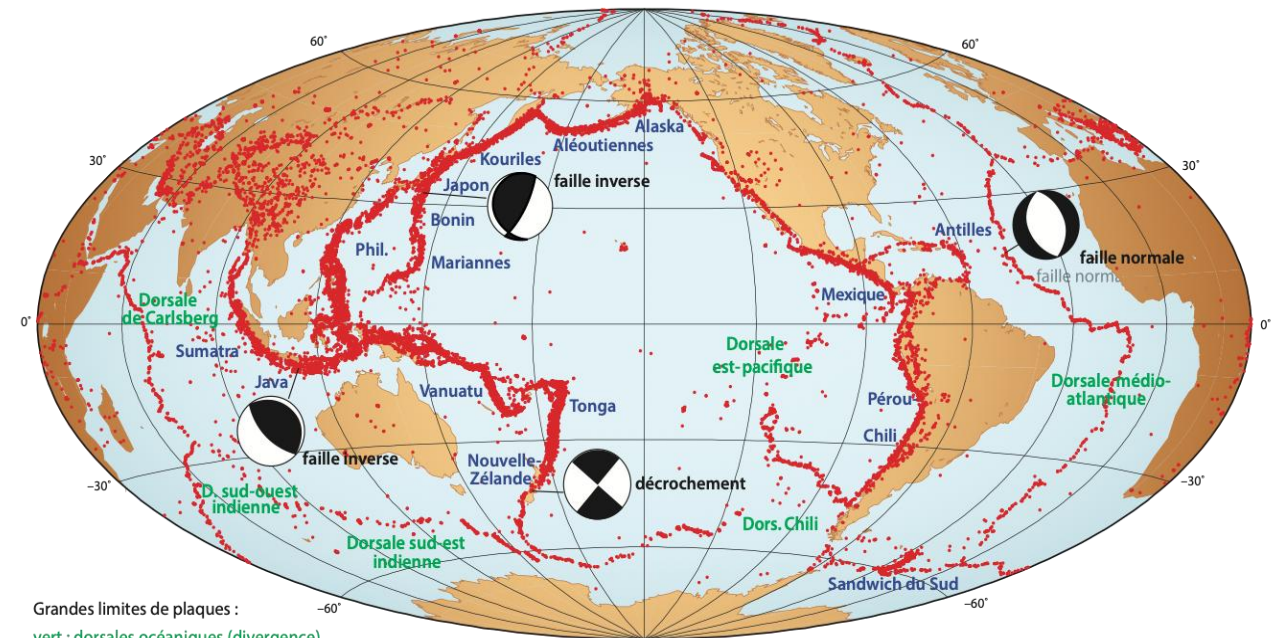
IV. Signification géodynamique des séismes

- A. La localisation des séismes est un marqueur des limites de plaques
- B. Les mécanismes au foyer permettent de déduire les états de contrainte

IV. SIGNIFICATION GEODYNAMIQUE DES SEISMES

B. LES MECANISMES AU FOYER PERMETTENT DE DEDUIRE LES ETATS DE CONTRAINTE

- Mécanismes au foyer des séismes ⇒ **trois types de frontières de plaques**
 - en **convergence**
 - en **divergence**
 - en **coulissage**
 - L'analyse d'un ensemble de mécanismes aux foyers majoritaires dans une région ⇒ caractériser un **contexte tectonique**
 - **rift**
 - zone de **subduction**
 - **faille décrochante**
- ⇒ **géodynamique** globale. ⇒ construction des modèles tels que NUVEL-1.



Grandes limites de plaques :
vert : dorsales océaniques (divergence)
bleu : fosses de subduction (convergence)

Figure 6.9 Carte de la sismicité mondiale (compilation logiciel GMT, UMR Dynamique de la Lithosphère, Université Montpellier/CNRS).
La répartition des séismes souligne les zones de déformation active dans les océans ou sur les continents.

Figure 3 : carte de la sismicité mondiale (dans Renard et al., 2016)

IV. SIGNIFICATION GEODYNAMIQUE DES SEISMES

B. LES MECANISMES AU FOYER PERMETTENT DE DEDUIRE LES ETATS DE CONTRAINTE

- Remarque : un contexte géodynamique ne se caractérise pas par un seul type de mécanisme au foyer :
 - dans une zone de subduction, on peut trouver des mécanismes au foyer témoignant de contraintes **extensives** (**bassin d'arrière-arc** par exemple)
 - dans une **chaîne de montagne de collision**, il y a des **séismes en distension et coulissage**. Une faille normale peut jouer en faille inverse, et réciproquement.

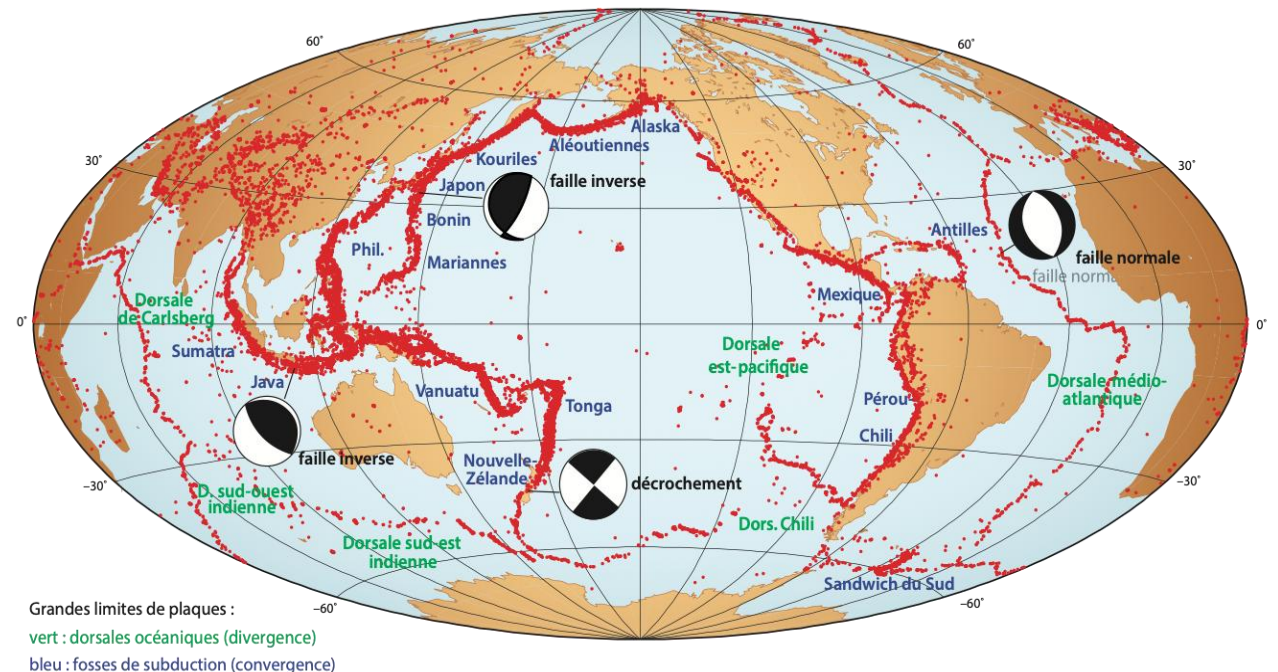


Figure 3 : carte de la sismicité mondiale (dans Renard et al., 2016)