

# Chapitre 2 – Les séismes, origine et conséquences

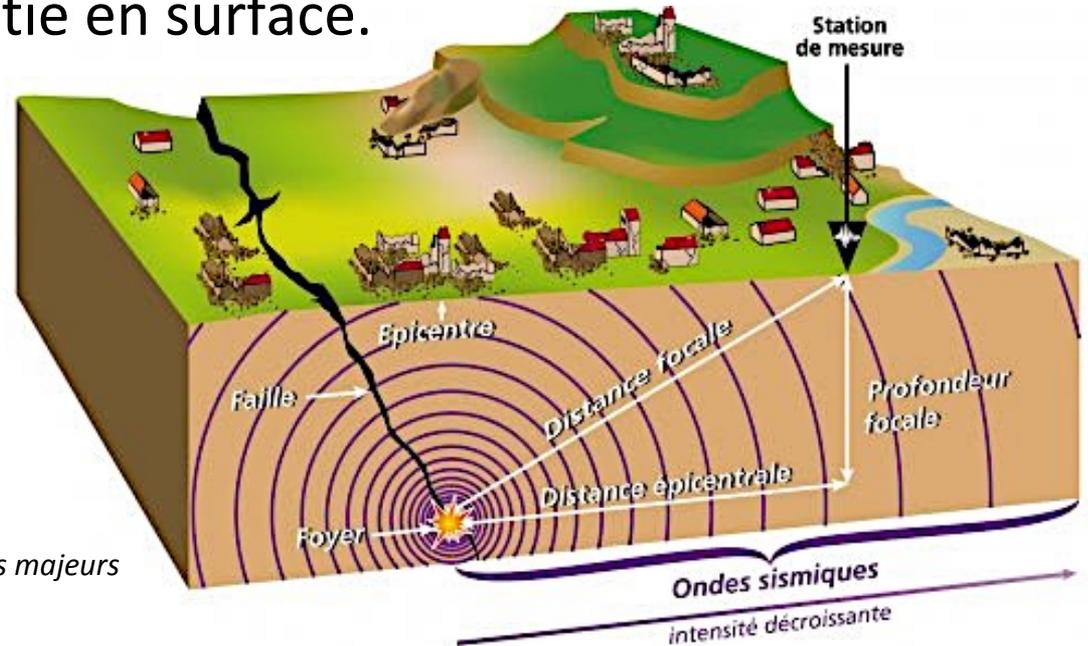


Séisme de Kobe (1995)

# Rappel sur les séismes

Foyer = lieu de rupture de la roche

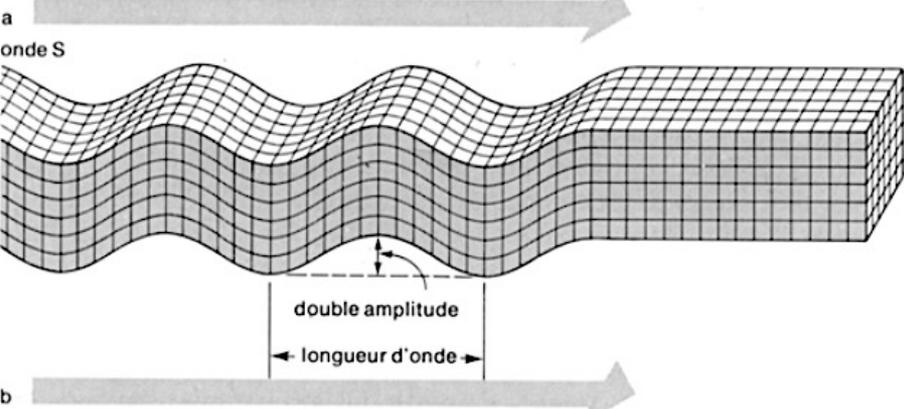
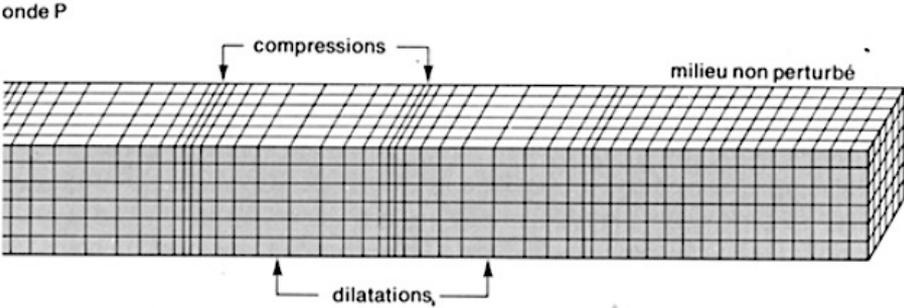
Épicentre = projection du foyer en surface. Il correspond à la zone de plus grande intensité ressentie en surface.



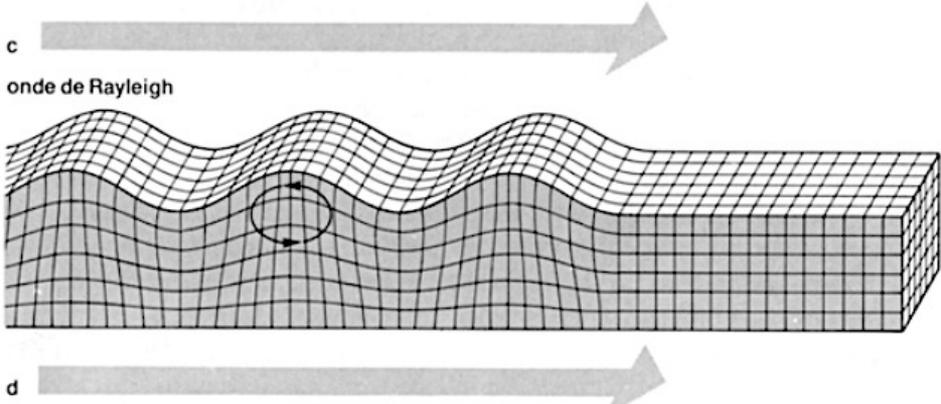
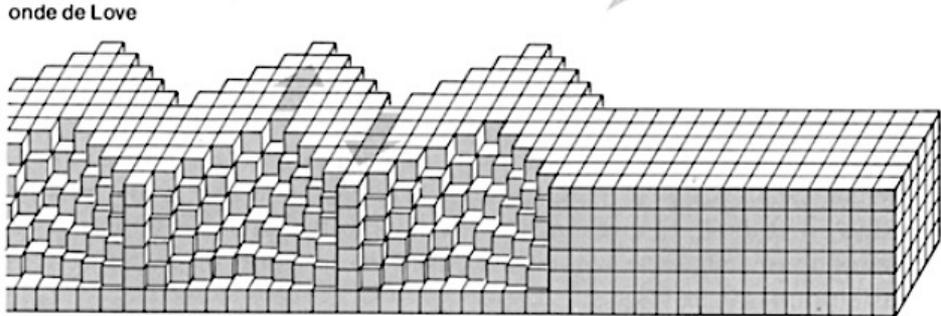
Source : Observatoire régional des risques majeurs

onde sismique = vibration propagée dans les 3 directions de l'espace

# Les ondes sismiques



Ondes de volume



Ondes L (de surface)

Source : Université d'Halifax, Canada

# 1. Localiser un séisme et évaluer l'énergie dégagée

## 1.1. Localiser l'épicentre d'un séisme

## Exercice

Station	$t_{s-p}$ en seconde
PET	48
MA2	126
YSS	155
MAJO	255

$$d = V_p \times t_p \quad \Rightarrow t_p = d / V_p$$

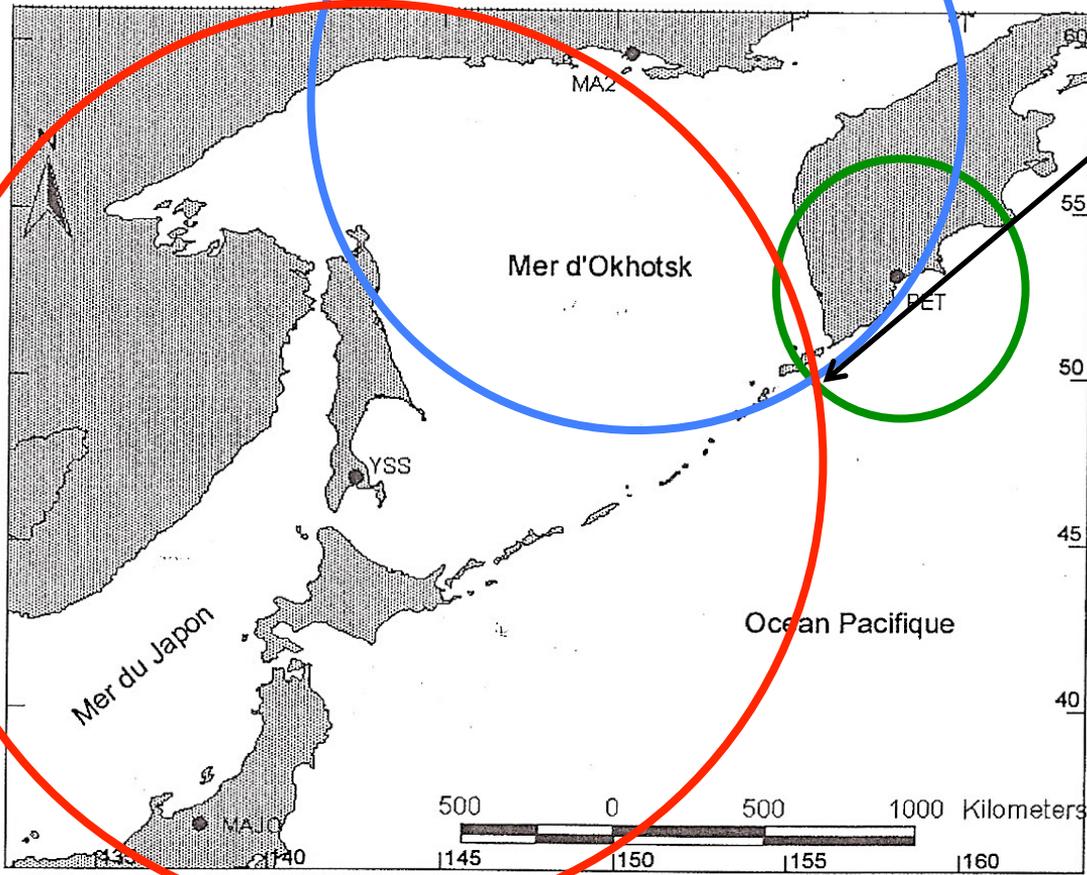
$$d = V_s \times t_s \quad \Rightarrow t_s = d / V_s$$

$$t_{s-p} = t_s - t_p = d / V_s - d / V_p = d \cdot (1/V_s - 1/V_p)$$

$$t_{s-p} = \frac{d \cdot (V_p - V_s)}{V_s \cdot V_p}$$

$$d = \frac{t_{s-p} \cdot V_s \cdot V_p}{(V_p - V_s)}$$

Station	d en km
PET	469,3
MA2	1231,9
YSS	1515,4
MAJO	2493,1



épicentre

### Heure du séisme

PET est à 469,3 km de l'épicentre : il a fallu  $469,3 / 7,74 = 60,63$  s soit environ 1 min et 1 s pour que les ondes P parcourent cette distance.

Donc l'heure est  
03 : 01 : 03

Document 1 : Carte de la région Nord-Ouest Pacifique, et localisation des stations sismiques PET, YSS, MA2 et MAJO où un séisme a été enregistré le 20 janvier 2003.

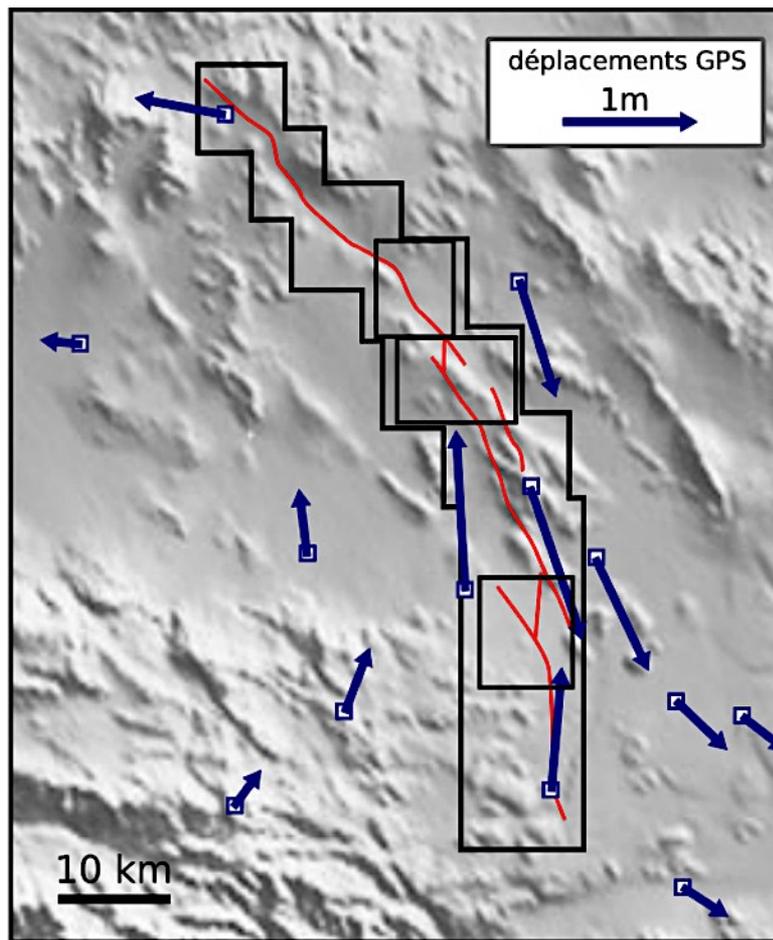
# **1. Localiser un séisme et évaluer l'énergie dégagée**

## **1.2. Mesurer le déplacement dû un séisme**

# Difficile de quantifier en surface



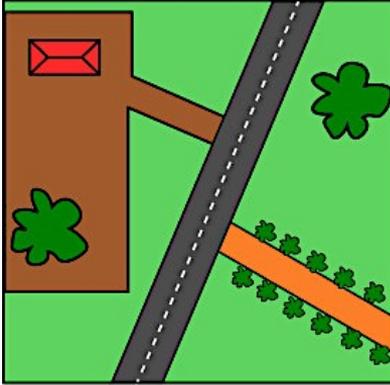
# GPS et séisme de Landers (28 juin 1992)



# Corrélation d'images : principe

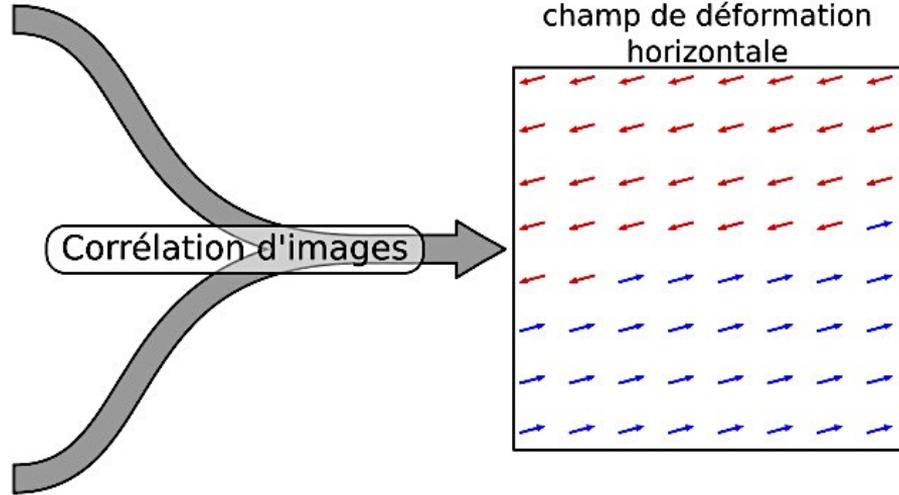
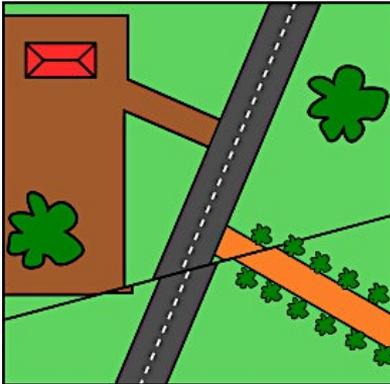
Avant le séisme

Image 1 (maitre)

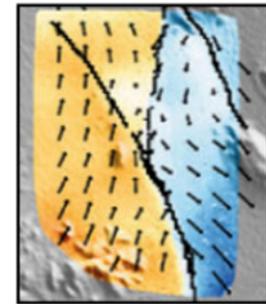
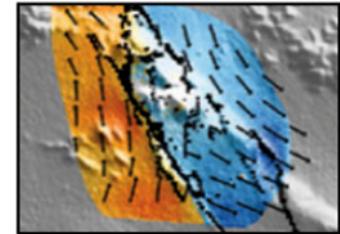
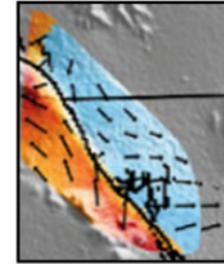
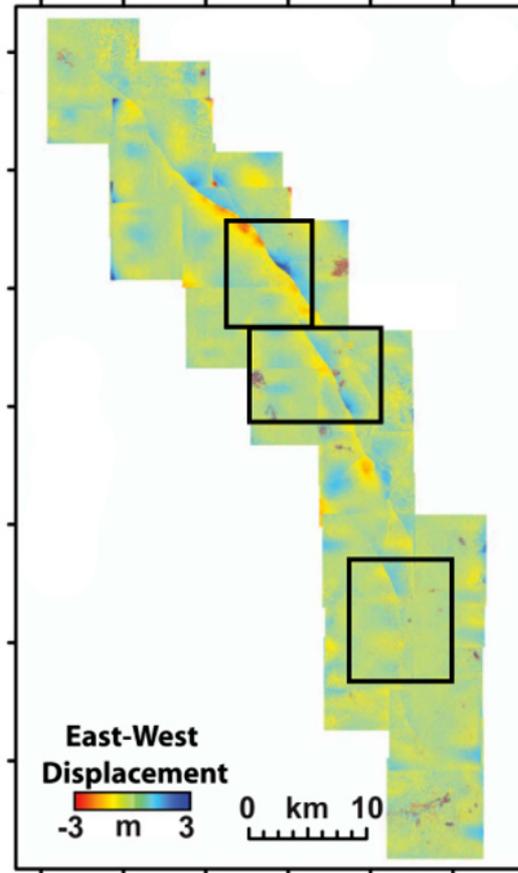
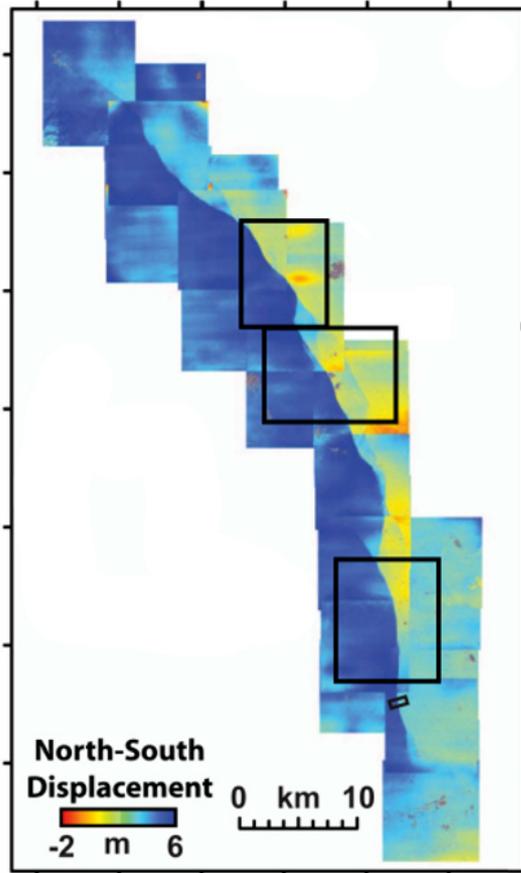


Après le séisme

Image 2 (esclave)



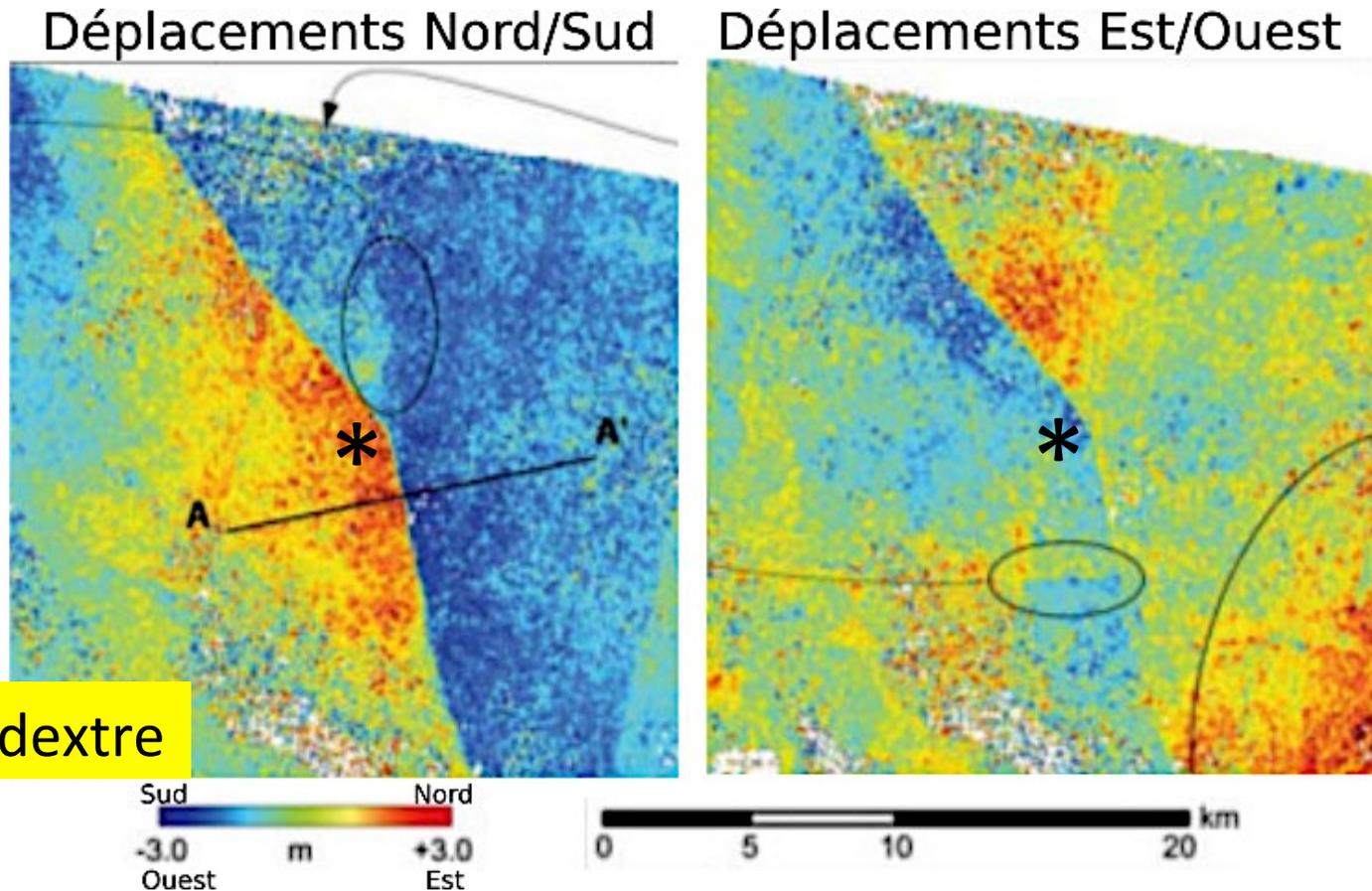
# Corrélation d'images du séisme de Landers



# Corrélation d'images pour le séisme d'Hector Mine

\* ce point s'est déplacé de 3 m vers le Nord et de 2 m vers le Sud. Globalement, le bloc ouest s'est déplacé vers le NW.

=> Décrochement dextre

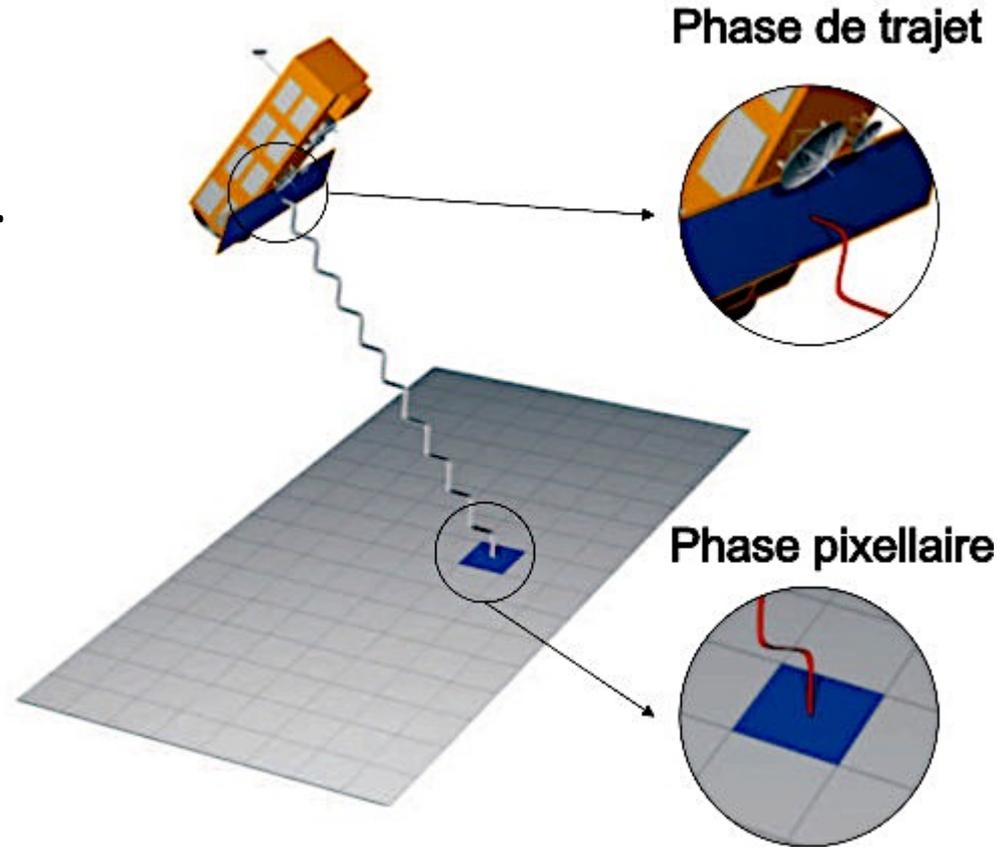


# Interférométrie radar

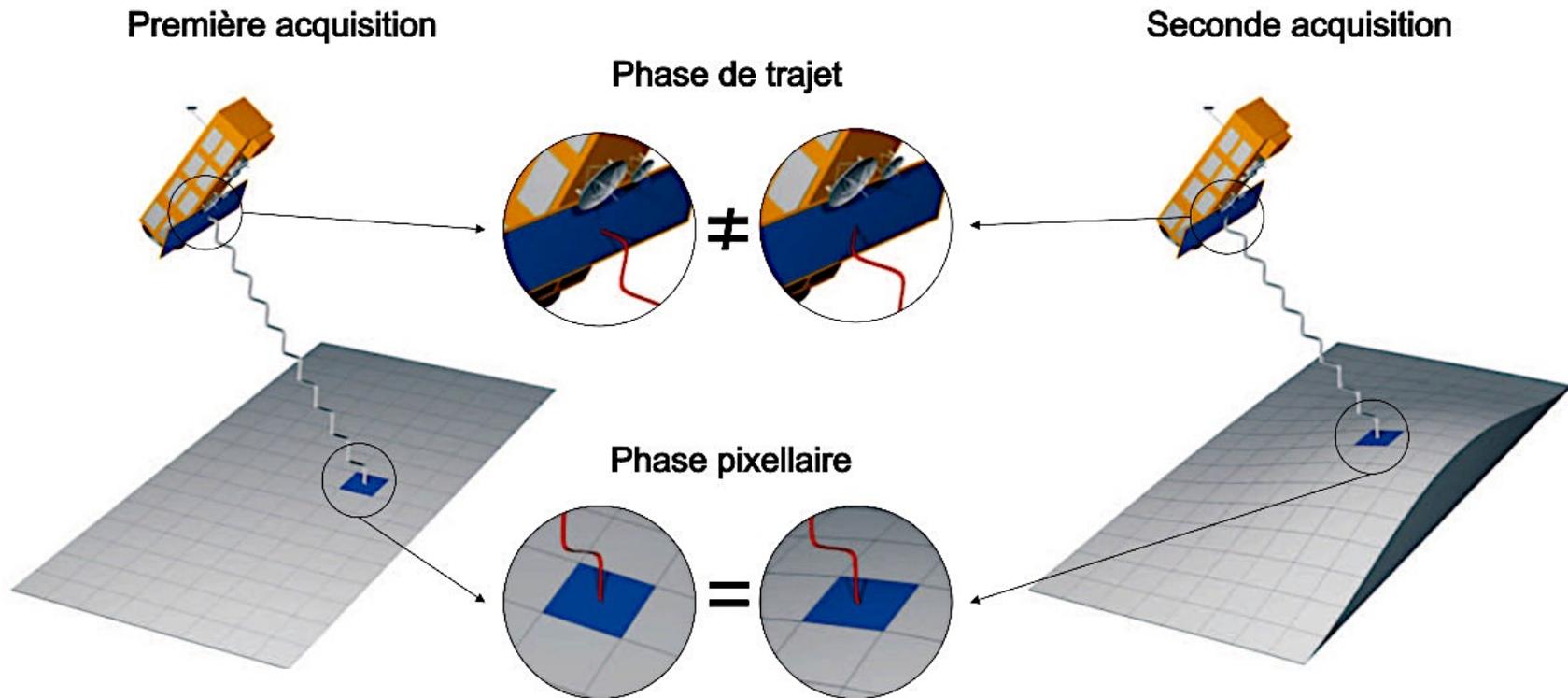
Un satellite envoie une onde de longueur d'onde  $\lambda$  et avec une certaine amplitude (non utile ici).

L'onde retour a la même  $\lambda$  mais avec un léger décalage (= phase entre 0 et  $2\pi$ ). On distingue :

- la **phase pixellaire** due aux propriétés du sol, à la végétation...
- la **phase de trajet** qui dépend de la distance sol-satellite.

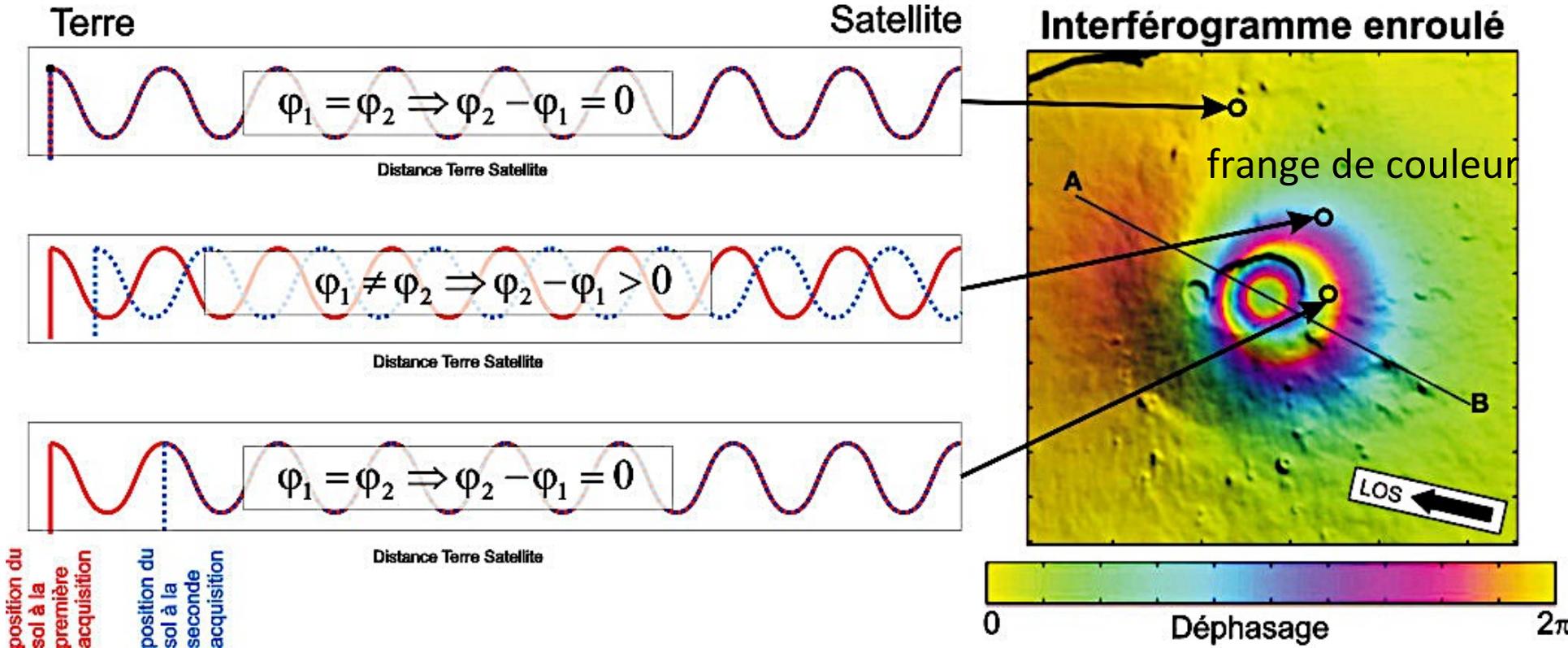


# Interférométrie radar : corrélation de deux images

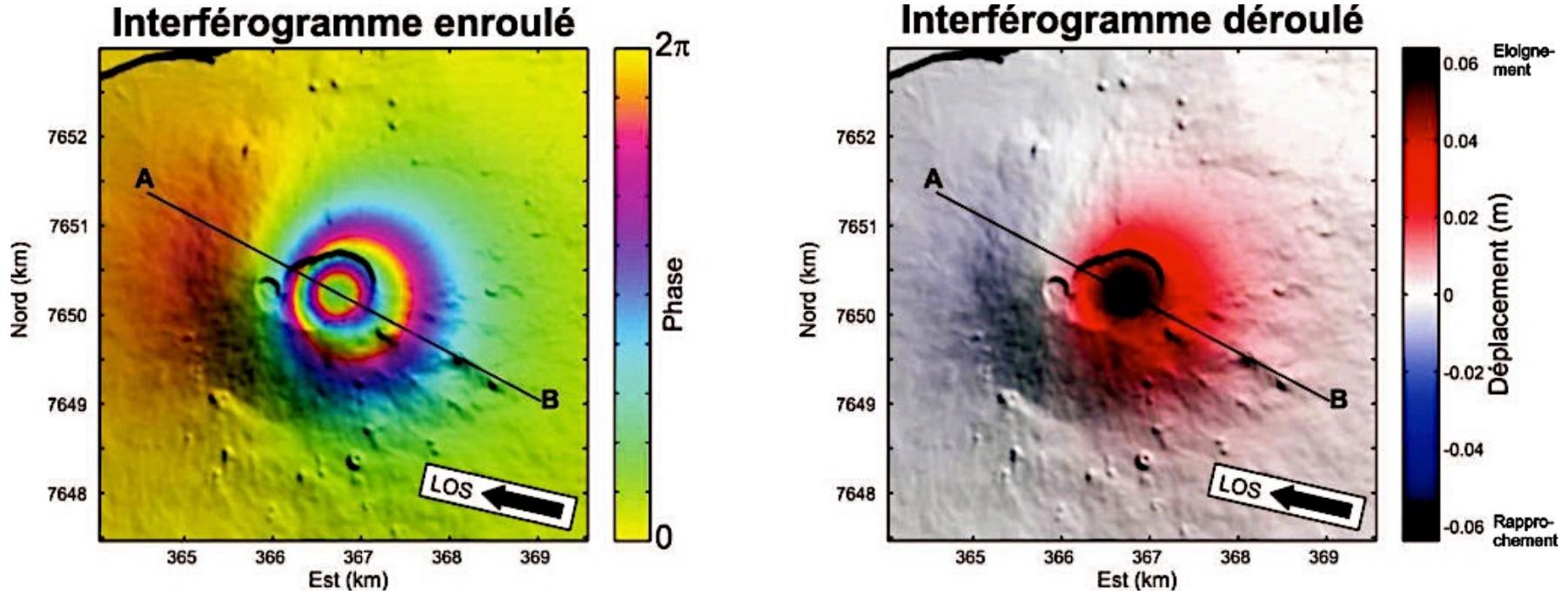


# Interférométrie radar

Le changement de phase de trajet indique un déplacement

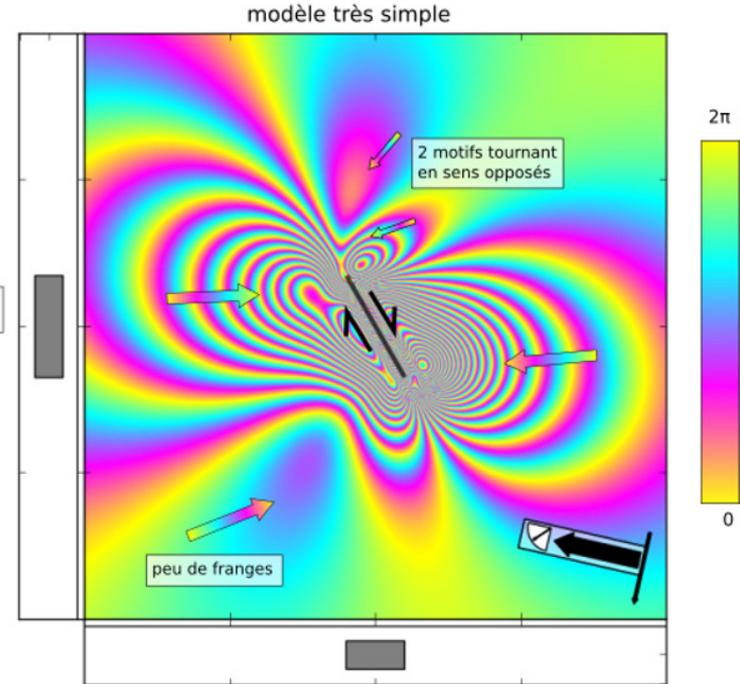
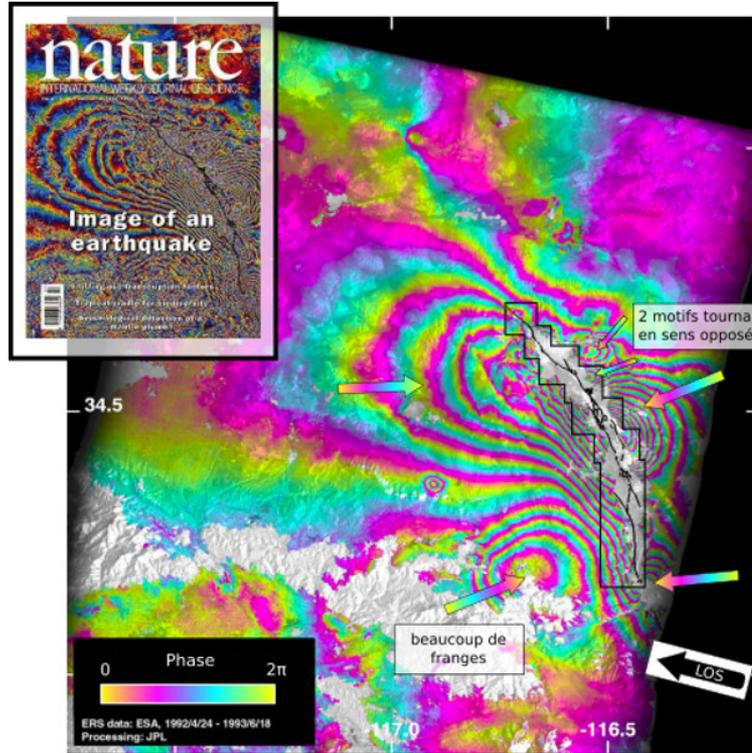


# Interférométrie radar : traitement de l'image



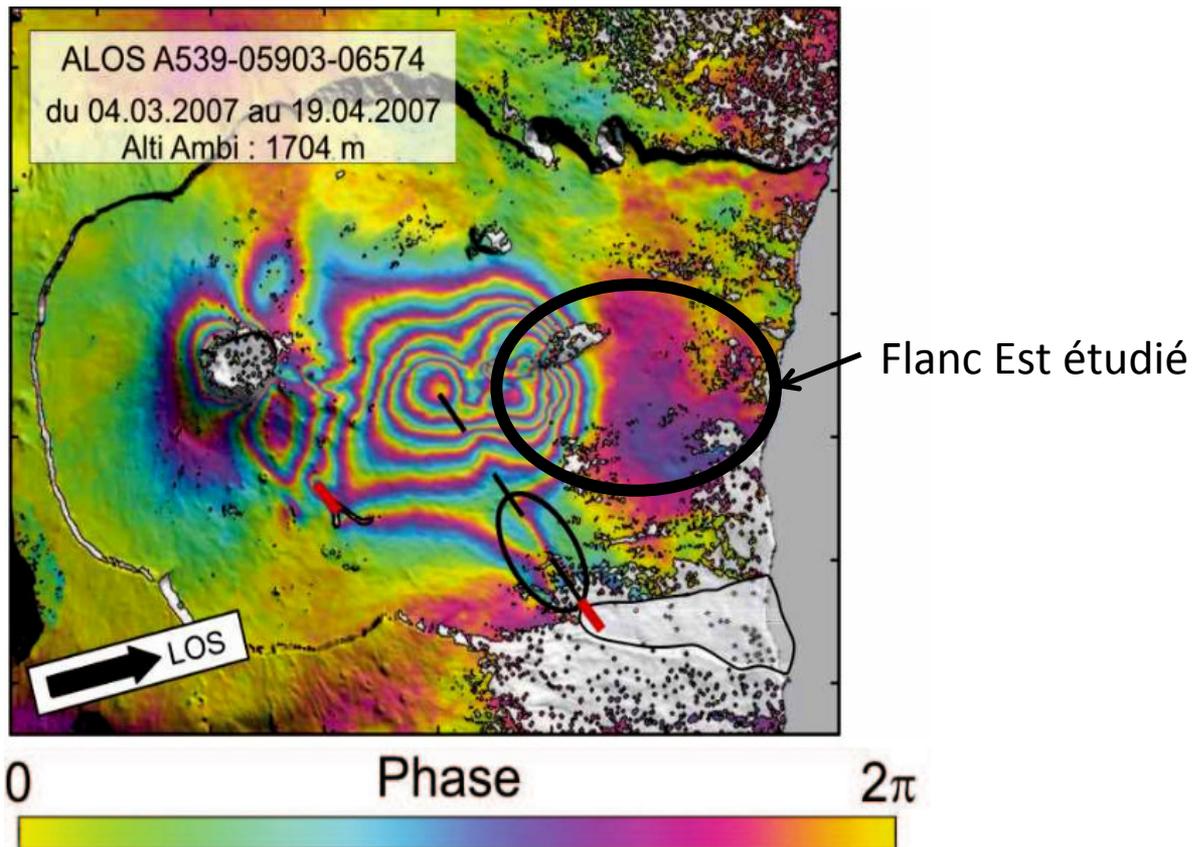
Conversion numérique de la phase en déplacement en mètre.

# Interférométrie radar : le séisme de Landers



Conversion numérique de la phase en déplacement en mètre.

# Fiche d'exercices : interférométrie radar



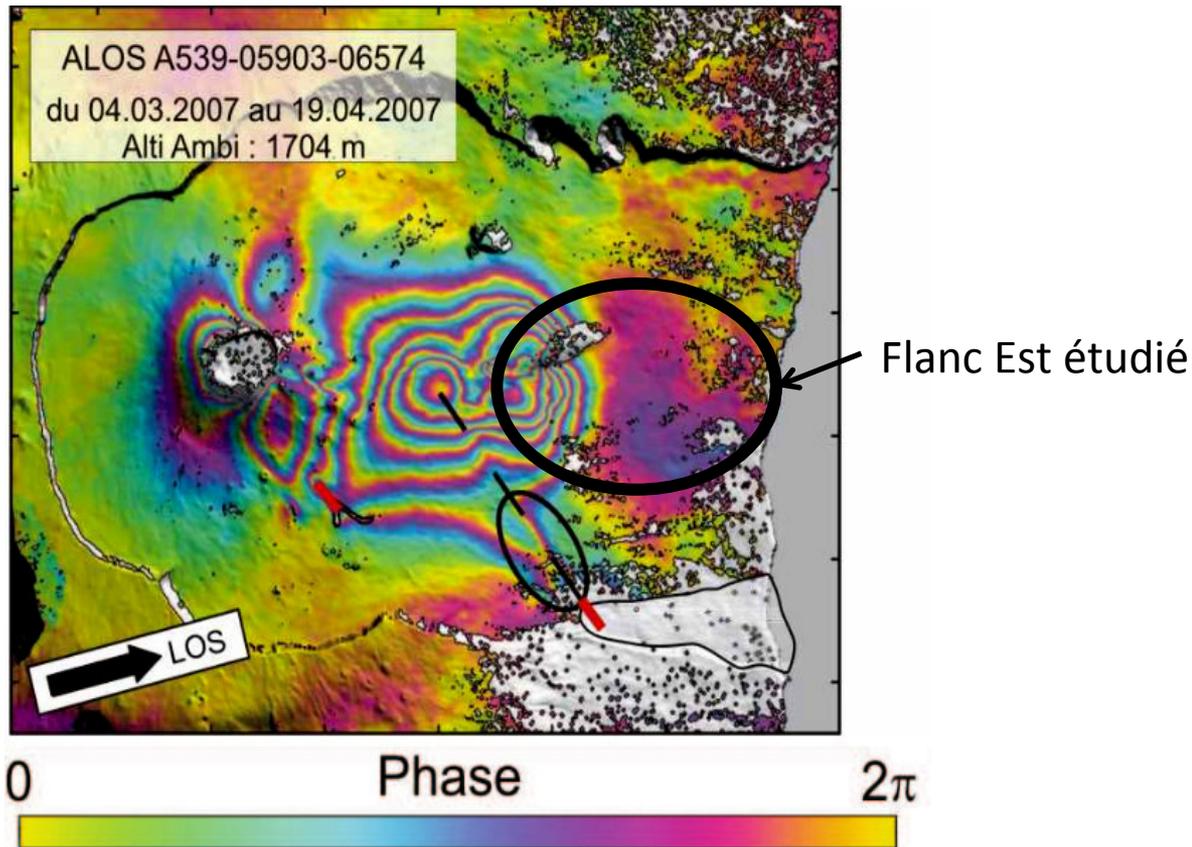
*LOS = Line of  
Sight = angle de  
vue du satellite*

*Interférogramme du suivi du Piton de la Fournaise en avril 2007 avec PALSAR.*

*Source : A. Augier, planet-terre.ens-lyon.fr*

# Fiche d'exercices : interférométrie radar

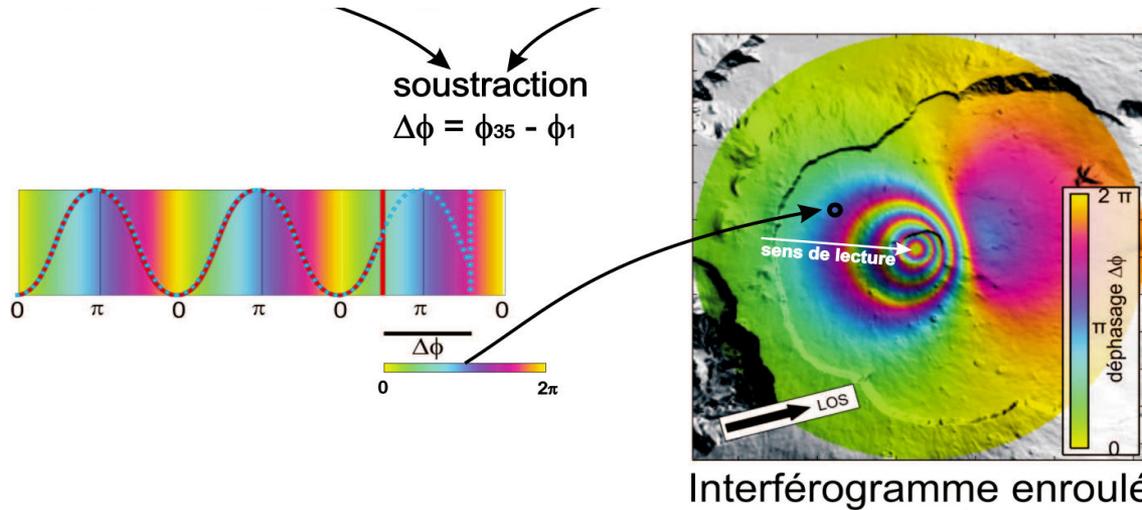
*PALSAR utilise une longueur d'onde de 23,6 cm donc une frange mesure 11,8 cm. On compte 6 franges donc le déplacement est de  $6 \times 11,8 = 71$  cm.*



*Interférogramme du suivi du Piton de la Fournaise en avril 2007 avec PALSAR.*

*Source : A. Augier, planet-terre.ens-lyon.fr*

# Fiche d'exercices : interférométrie radar

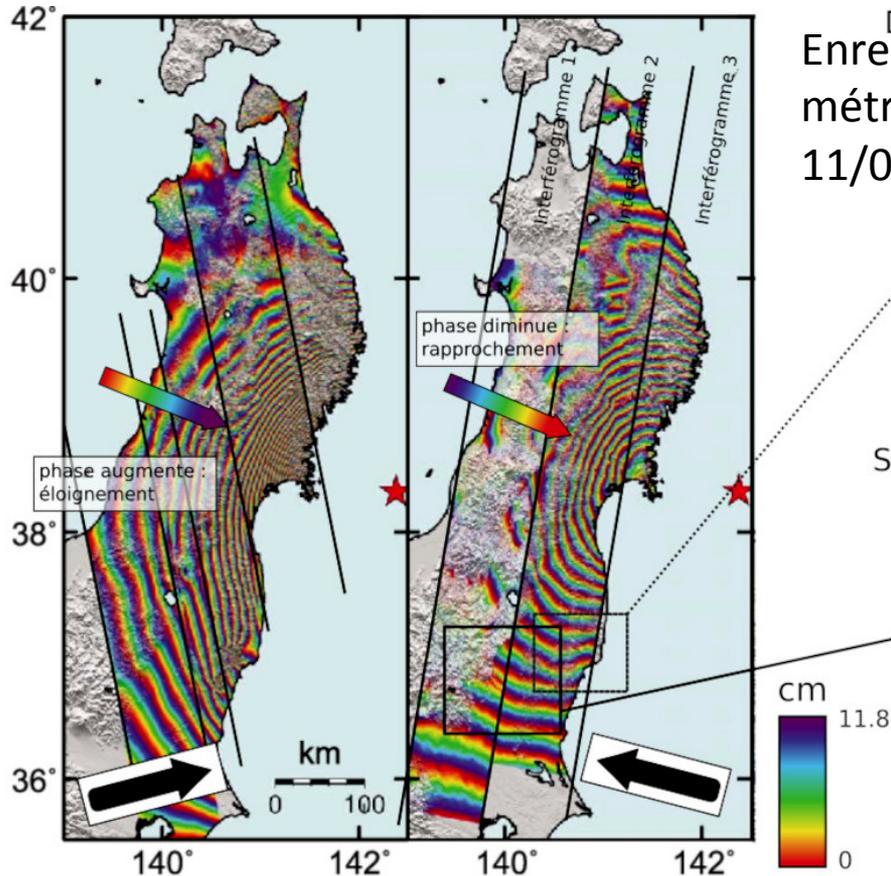


Ici, le satellite est à l'Est du Volcan. On lit les franges d'une zone non déformée vers le centre de la déformation :

ordre des couleurs = bleu – violet – rose – orange – jaune

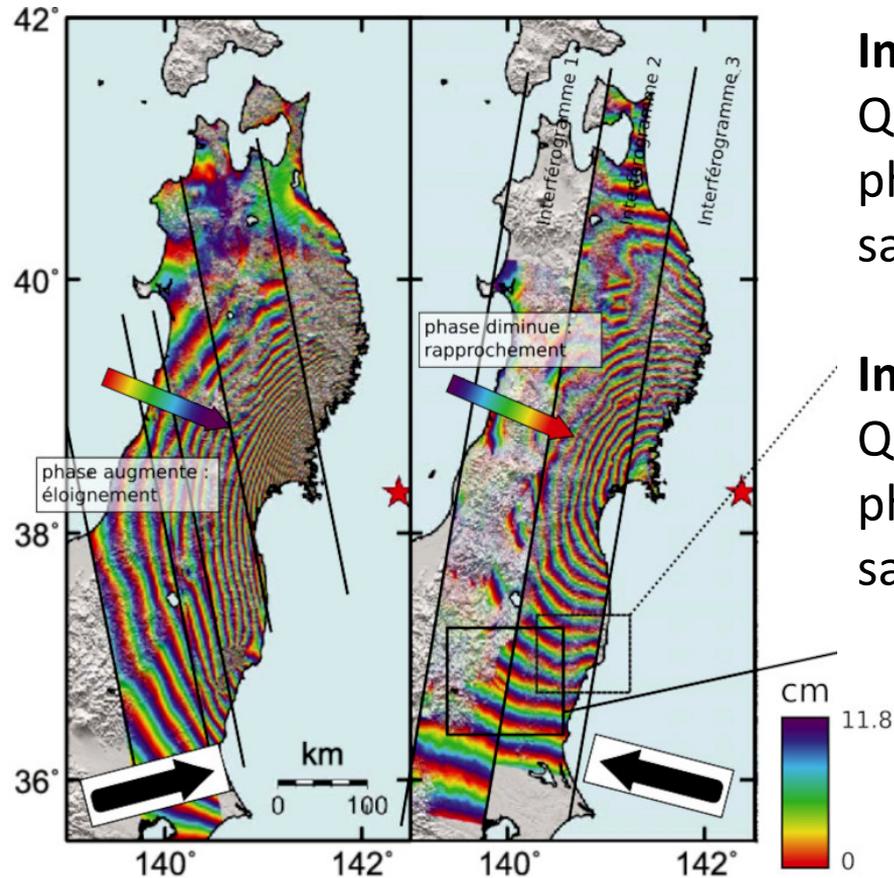
=> La phase augmente, ce qui veut dire que le volcan s'est éloigné du satellite : il a donc « dégonflé ».

# Exercice 1 : séisme de Tohoku Oki (11/03/2011)



Enregistrement de la déformation par interférométrie radar lors du séisme de Tohoku Oki le 11/03/2011

# Exercice 1 : séisme de Tohoku Oki (11/03/2011)



## Image de gauche

Quand le satellite est à l'Ouest du Japon, la phase augmente donc le Japon s'éloigne du satellite : l'île se déplace vers l'Est.

## Image de droite

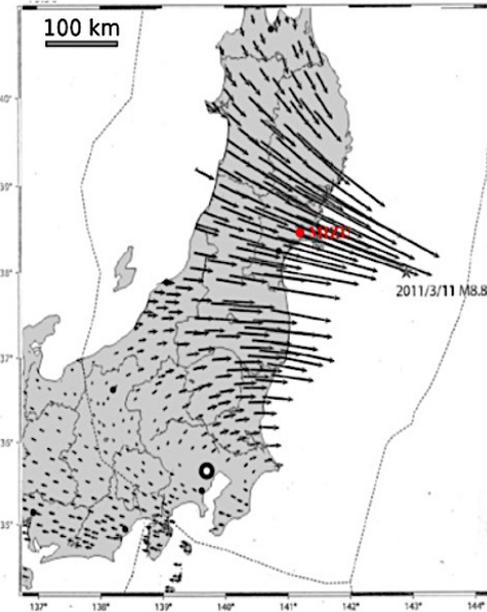
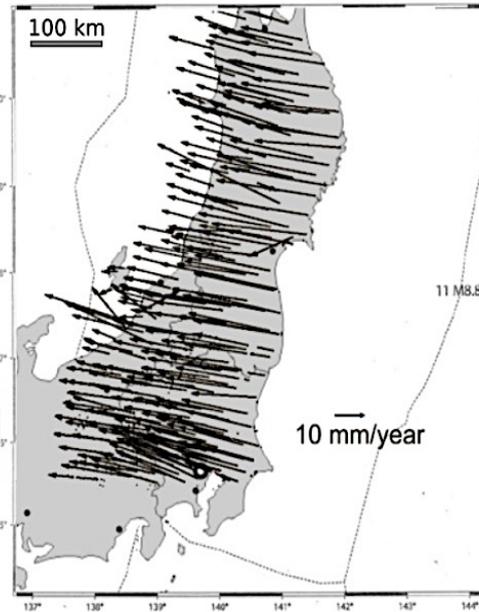
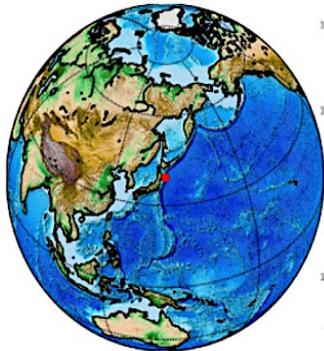
Quand le satellite est à l'Est du Japon, la phase diminue donc le Japon s'approche du satellite : l'île se déplace vers l'Est.

# Exercice 1 : séisme de Tohoku Oki (11/03/2011)

Confirmé par les enregistrements GPS

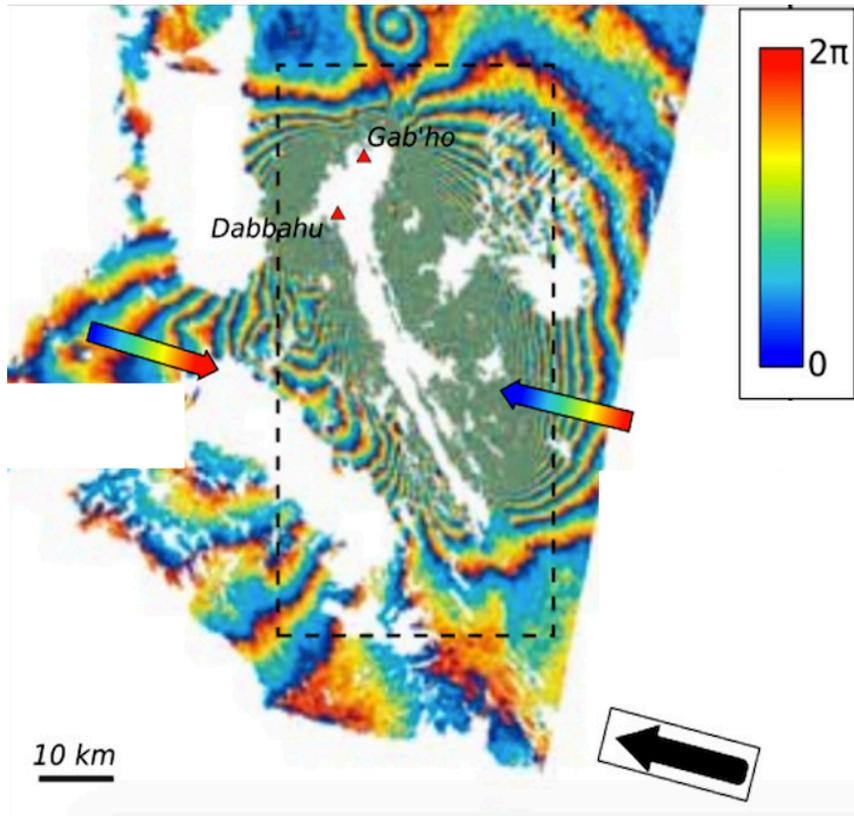
déplacements intersismiques

déplacements cosismiques



Cohérent avec le modèle de subduction

## Exercice 2 : région des Afars

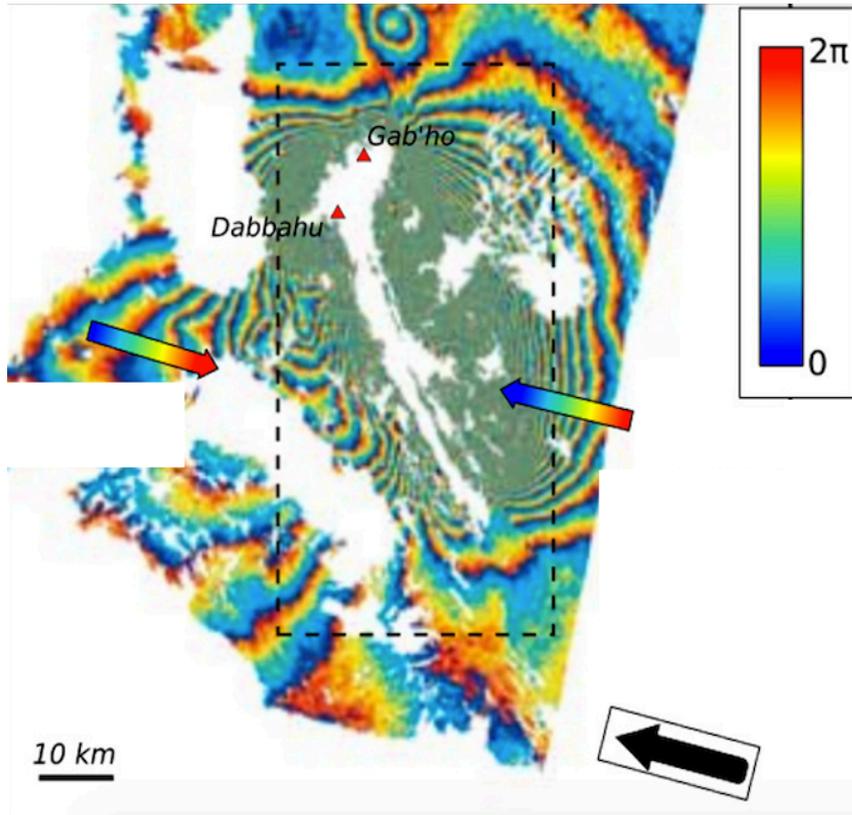


Identifier le mouvement en jeu ici

*Manda Hararo, dans la région des Afars en Afrique de l'Est (2005)*

Source : A. Augier, [planet-terre.ens-lyon.fr](http://planet-terre.ens-lyon.fr)

## Exercice 2 : région des Afars



Le satellite est à l'Est de la zone.

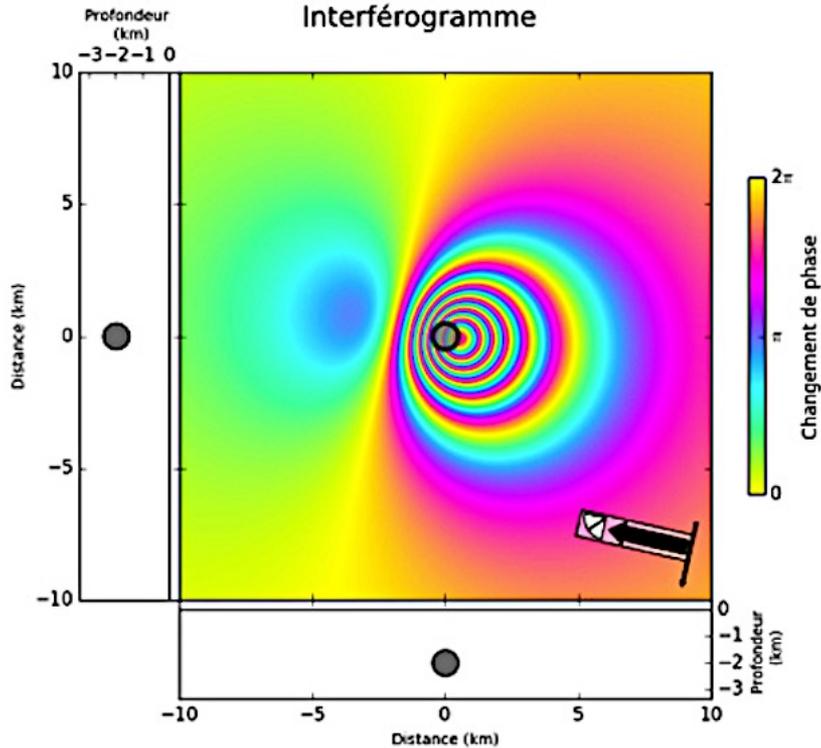
La flèche Est montre un rapprochement vers le satellite.

La flèche Ouest montre un éloignement par rapport au satellite.

Il s'agit donc d'un rift avec extension.

*Manda Hararo, dans la région des Afars en Afrique de l'Est (2005)*

# Exercice 3 : volcanisme de la Réunion



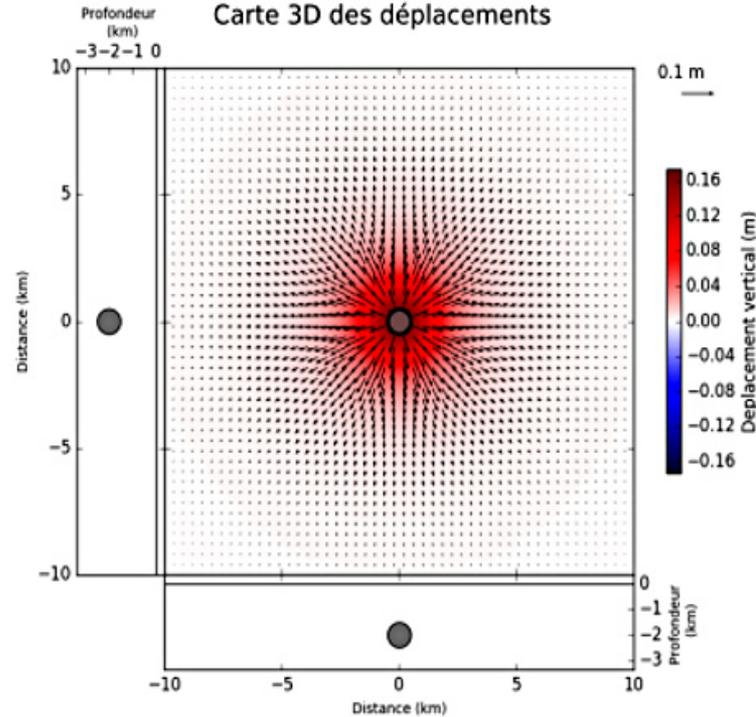
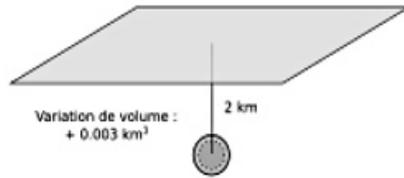
Le satellite est à l'Est de la zone. En se rapprochant de la zone centrale, sur le flanc Est, les couleurs montrent une diminution de la phase donc un rapprochement vers le satellite. Le volcan est donc en train de gonfler : l'éruption est proche.

*Modèle de volcanisme (île de la Réunion)*

# Exercice 3 : volcanisme de la Réunion

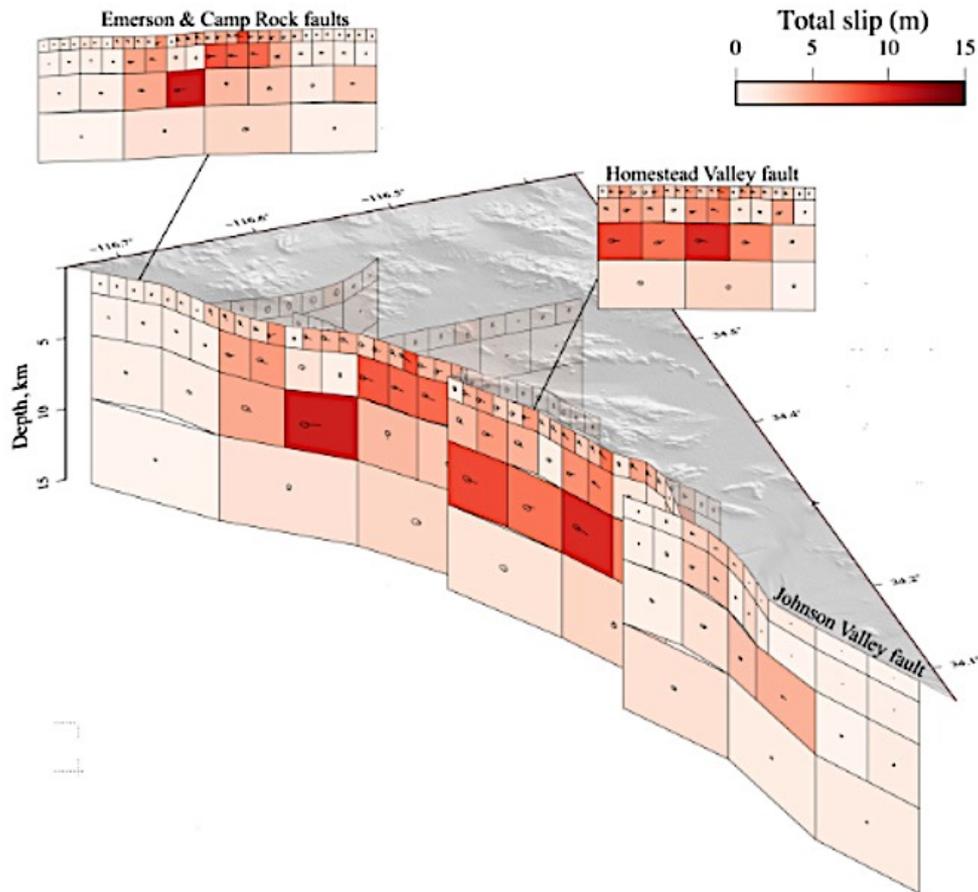
## Paramètres de la source

Source ponctuelle :  
remplissage d'un réservoir



Confirmé par des  
mesures.

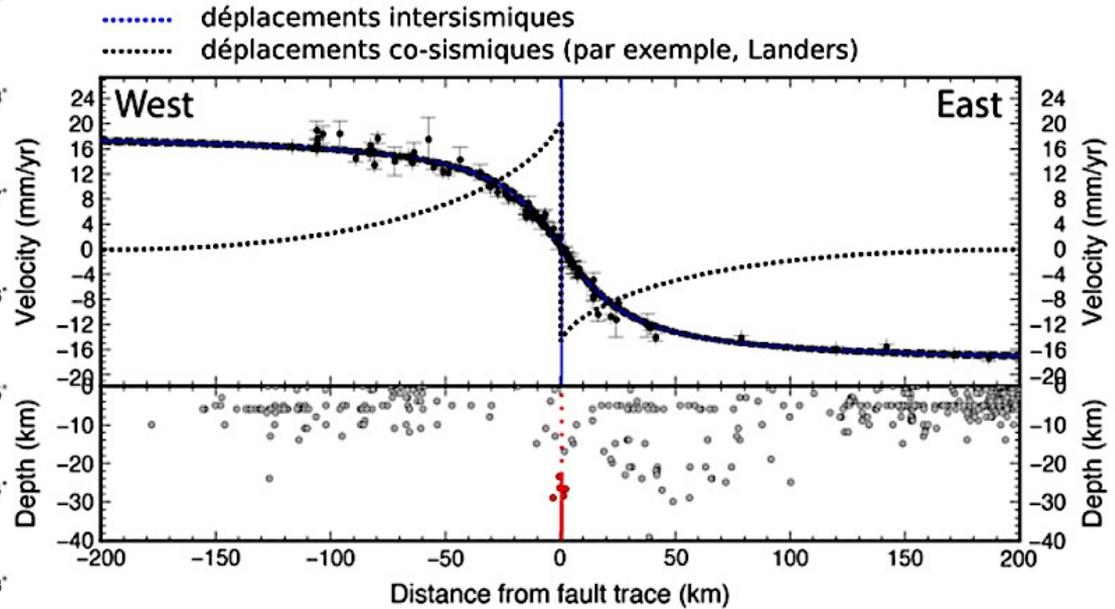
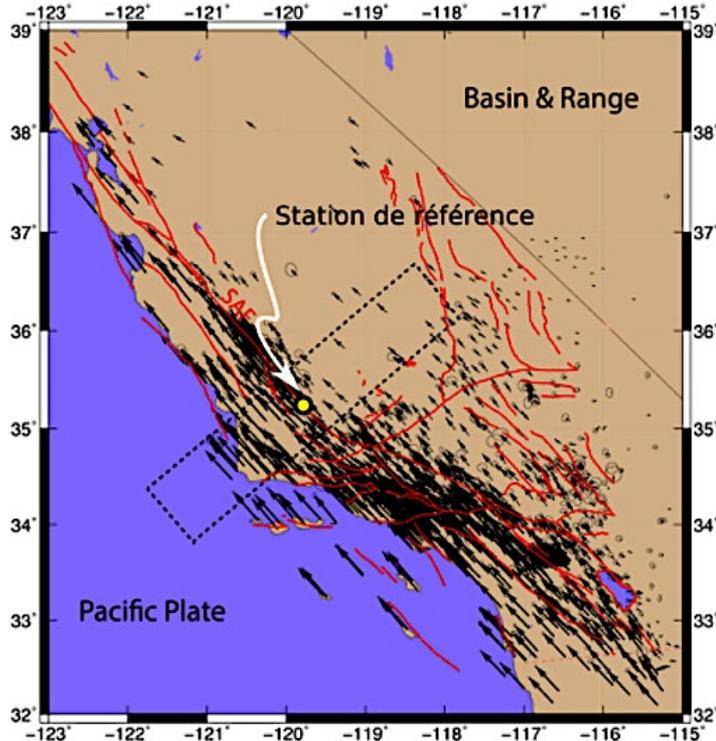
# Combinaison des 3 données



Modèle combiné : jeu de la faille de 15 m maximum lors du séisme.

# Des déplacements continus

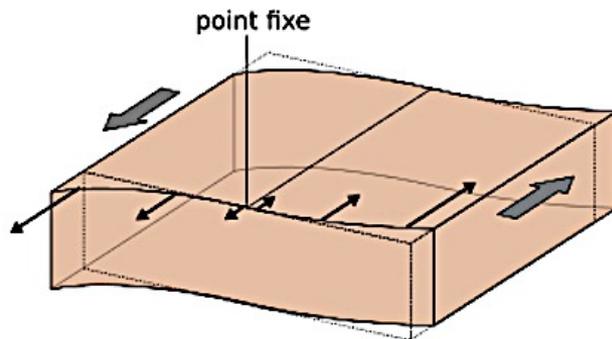
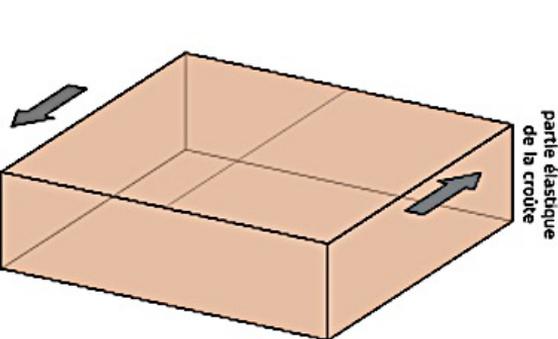
Seul le GPS permet de suivre les déplacements à long terme. On constate un déplacement intersismique continu et un glissement brusque au moment du séisme.



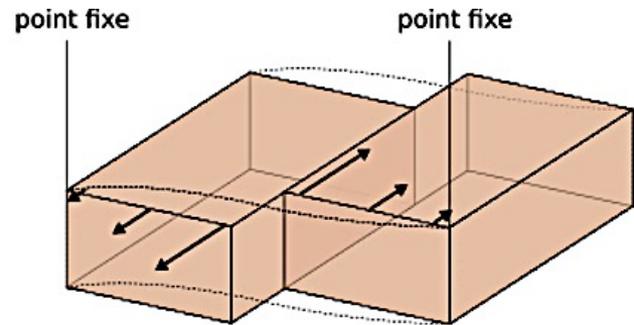
profil de déformation perpendiculaire à la faille

# Cycle sismique = période intersismique + séisme

Modèle pour un décrochement



Accumulation de déformation élastique



Rebond sismique

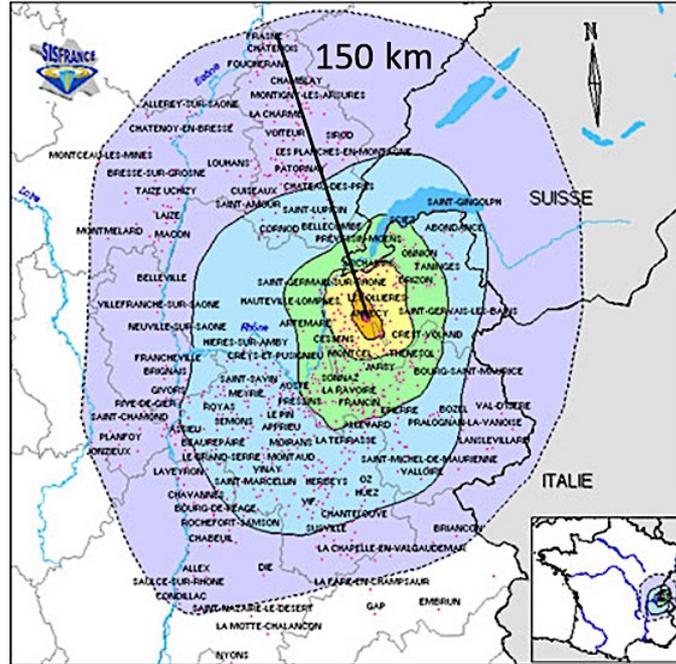
# **1. Localiser un séisme et évaluer l'énergie dégagée**

## **1.3. Déterminer l'énergie dissipée par un séisme**

# Échelle MSK (Medvedev Sponheuer Karnik)

Degré	Dégâts observés
I	Seuls les sismographes très sensibles enregistrent les vibrations.
II	Secousses à peine perceptibles; quelques personnes au repos ressentent le séisme.
III	Vibrations comparables à celles provoquées par le passage d'un petit camion.
IV	Vibrations comparables à celles provoquées par le passage d'un gros camion.
V	Séisme ressenti en plein air; les dormeurs se réveillent.
VI	Les meubles sont déplacés.
VII	Quelques lézardes apparaissent dans les édifices.
VIII	Les cheminées des maisons tombent.
IX	Les maisons s'écroulent. Les canalisations souterraines sont cassées.
X	Destruction des ponts et des digues. Les rails de chemin de fer sont tordus.
XI	Les constructions les plus solides sont détruites. Grands éboulements.
XII	Les villes sont rasées. bouleversements importants de la topographie. Fissures visibles à la surface.

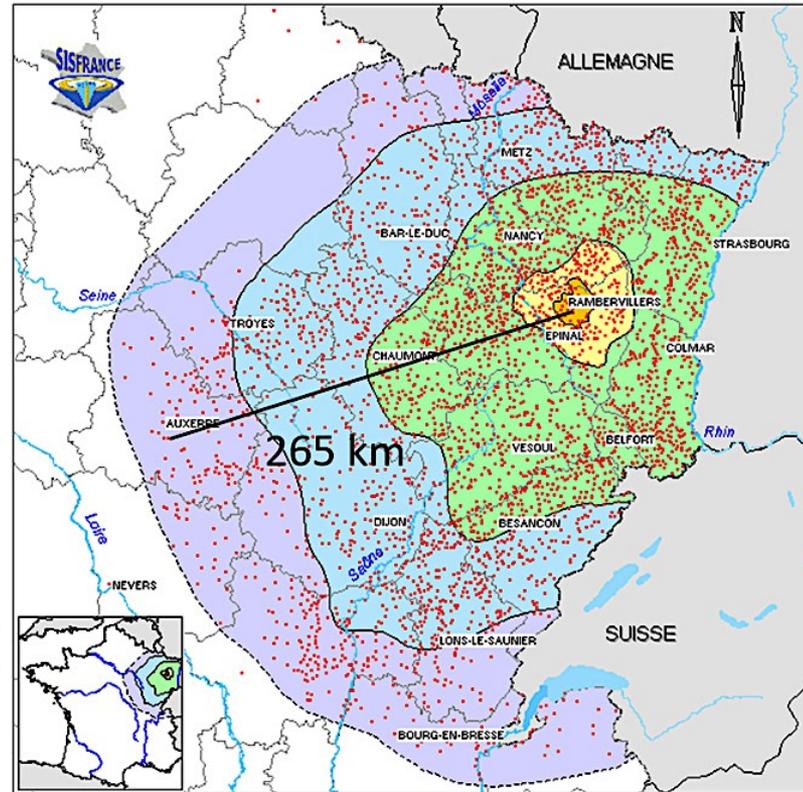
# Cartes d'intensité macrosismique



**séisme d'Ancey-Epagny (1996)**

Degré d'intensité (échelle macrosismique MSK)

- 2 et 2.5 : très faible (rares personnes)
- 3 et 3.5 : modérée (quelques personnes)
- 4 et 4.5 : assez forte (grand nombre)
- 5 et 5.5 : forte (majorité)
- 6 et 6.5 : dommages légers
- 7 et 7.5 : dommages prononcés
- 8 et 8.5 : dégâts massifs
- 9 et 9.5 : destructions nombreuses
- Localité associée au séisme



**Séisme de Rambervilliers (2003)**

Source : <https://www.irsn.fr>

# L'échelle EMS98

Type de structure	Classe de vulnérabilité					
	A	B	C	D	E	F
MAÇONNERIE	Moellon brut, pierre tout venant	○				
	Brique crue (adobe)	○—				
	Pierre brute	—○				
	Pierre massive	—○—				
	Non renforcée, avec des éléments préfabriqués	—○—				
	Non renforcée, avec des planchers en béton armé Renforcée ou chaînée		—○—			
BÉTON ARMÉ	Ossature sans conception parasismique (CPS)		—○—			
	Ossature avec un niveau moyen de CPS		—○—	○—		
	Ossature avec un bon niveau de CPS			—○—	○—	
	Murs sans CPS		—○—			
	Murs avec un niveau moyen de CPS Murs avec un bon niveau de CPS			—○—	○—	
ACIER	Structures en charpente métallique			—○—		
BOIS	Structures en bois de charpente		—○—			

○ Classe de vulnérabilité la plus probable; — Intervalle probable;  
 ..... Intervalle de probabilité plus faible, cas exceptionnels

Classification des dégâts aux bâtiments en maçonnerie	
	<b>Degré 1: Dégâts négligeables à légers</b> (aucun dégât structural, légers dégâts non structuraux) Fissures capillaires dans très peu de murs. Chute de petits débris de plâtre uniquement. Dans de rares cas, chute de pierres descellées provenant des parties supérieures des bâtiments.
	<b>Degré 2: Dégâts modérés</b> (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés) Fissures dans de nombreux murs. Chutes de grands morceaux de plâtre. Effondrement partiel des cheminées.
	<b>Degré 3: Dégâts sensibles à importants</b> (dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants) Fissures importantes dans la plupart des murs. Les tuiles des toits se détachent. Fractures des cheminées à la jonction avec le toit; défaillance d'éléments non structuraux séparés (cloisons, murs pignons).
	<b>Degré 4: Dégâts très importants</b> (dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants) Défaillance sérieuse des murs; défaillance structurale partielle des toits et des planchers.
	<b>Degré 5: Destruction</b> (dégâts structuraux très importants) Effondrement total ou presque total.

Source : [https://www.franceseisme.fr/EMS98\\_French.pdf](https://www.franceseisme.fr/EMS98_French.pdf)

# Exemples d'utilisation de l'EMS98

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie en briques crues	Est Kazakhstan 1990 / Saisan			●		



Commentaire:

Les fissures larges et étendues sur tous les murs suggèrent des dégâts de degré 3.

TYPE DE STRUCTURE	SEISME / SITE	DEGRÉ DES DÉGÂTS				
		1	2	3	4	5
Maçonnerie en moellons bruts (dans un mortier très faible)	Campanie-Basilicate, Italie 1980 / Balvano					●



# Calcul de magnitude

$$M_L = \log A - \log A_0$$

où A est le déplacement maximum du sol exprimé en mm.

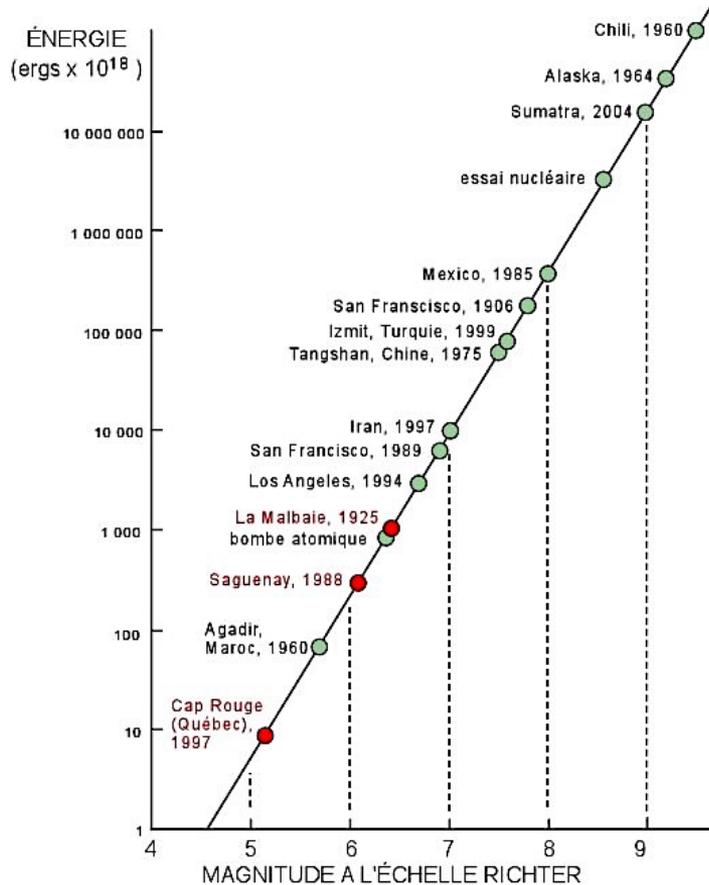
$A_0$  est obtenu par la loi empirique, fonction de la distance d à l'épicentre :  $A_0 = (13,435 / d)^{3,002}$ .

**Application à la station PET :**

$$A_0 = (13,435 / 469,3)^{3,002} = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$$

$$M_L = \log(3,67) - \log(2,3 \cdot 10^{-5}) = 5,2$$

# Corrélation magnitude et énergie libérée



1 Joule J = 10<sup>7</sup> erg

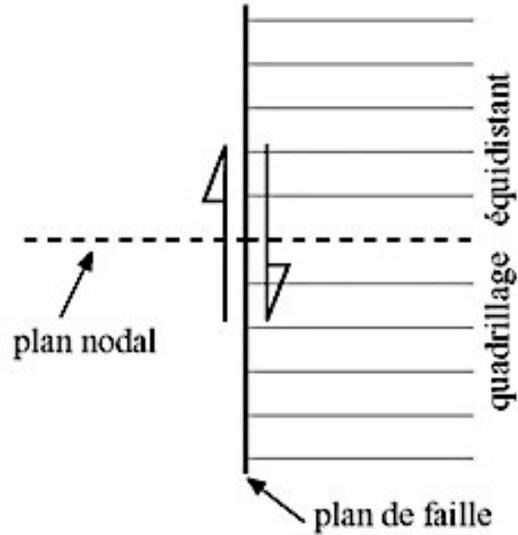
# Correspondance magnitude - MSK

Magnitude	Effets
Moins de 3,5	Enregistré par les sismographes locaux, mais généralement pas ressenti.
3,5 - 5,4	Souvent ressenti, mais cause rarement des dommages.
Sous 6,0	Peut causer tout au plus de légers dommages aux édifices bien construits. Peut également causer des dommages majeurs aux édifices de piètre condition sur de petites étendues.
6,1 - 6,9	Peut causer des dommages aux édifices de piètre condition et aux structures dans les secteurs allant jusqu'à environ 100 kilomètres des régions habitées.
7,0 - 7,9	Séisme « majeur ». Peut causer de sérieux dommages sur de plus vastes étendues.
8,0 - 8,9	Séisme « énorme ». Peut causer des dommages sérieux et la perte de vie dans les régions allant jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres.
9	Séisme énorme et rare. Peut causer des dommages sérieux sur une grande région allant jusqu'à 1000 km.

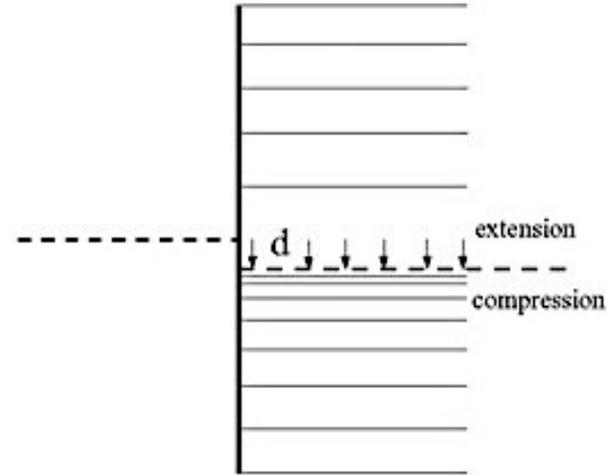
## **2. Déterminer le jeu d'une faille active**

# Les mécanismes au foyer

1) Avant le séisme



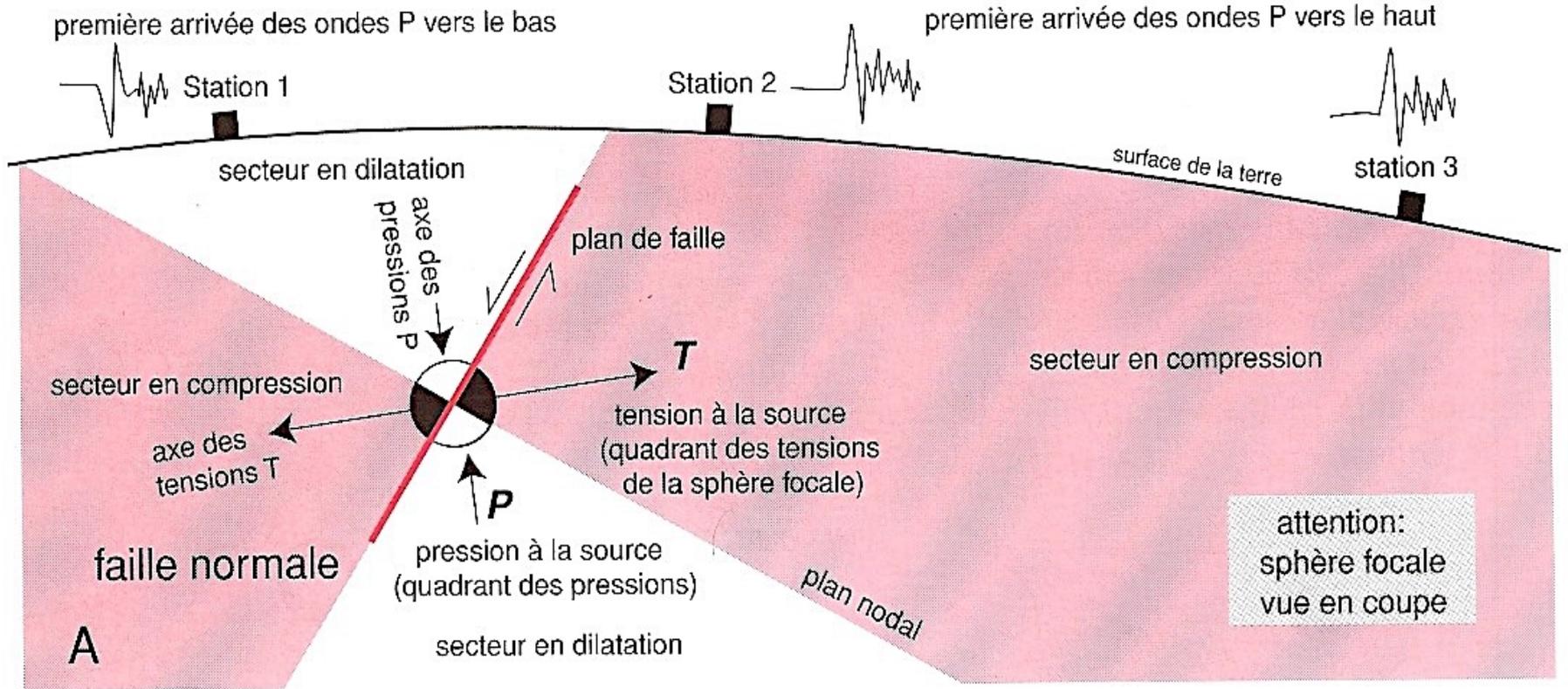
2) Pendant le séisme



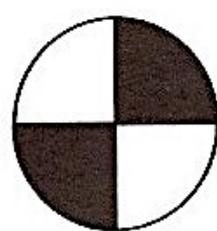
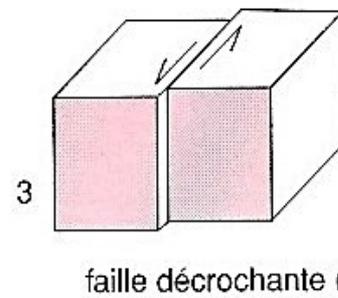
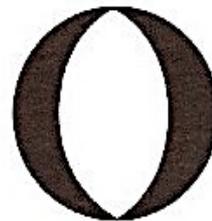
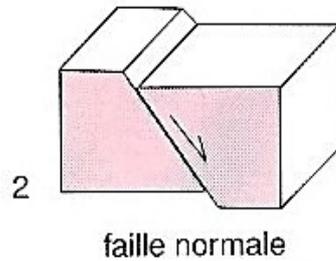
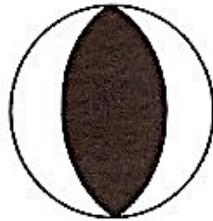
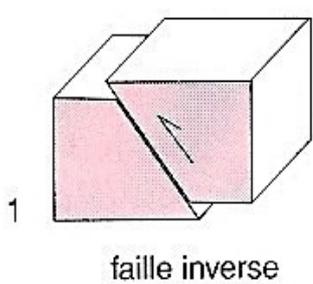
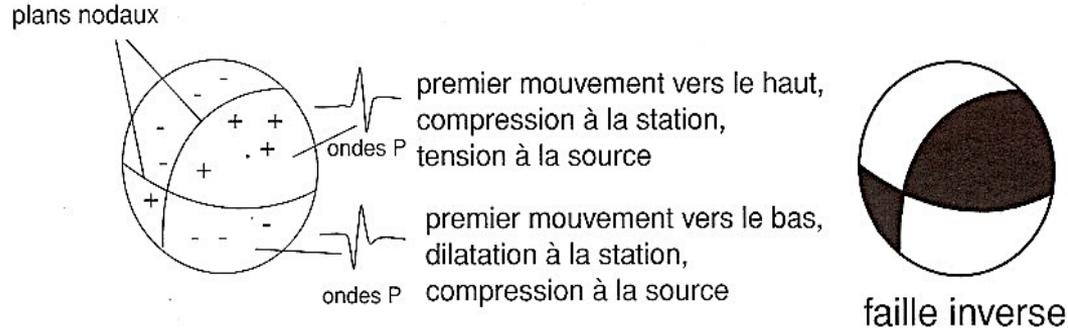
Le mouvement sur la faille  $d$  provoque une compression en avant du plan nodal et une extension en arrière.

D'après B.Delacou et JD.Champagnac

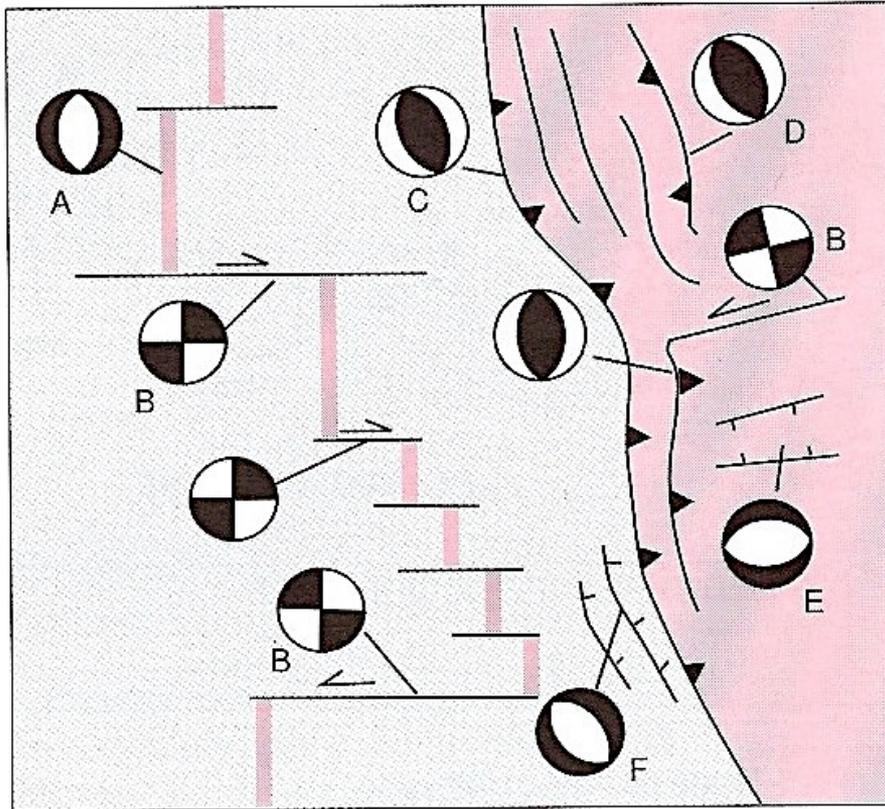
# Les mécanismes au foyer



# Les mécanismes au foyer



# Les mécanismes au foyer

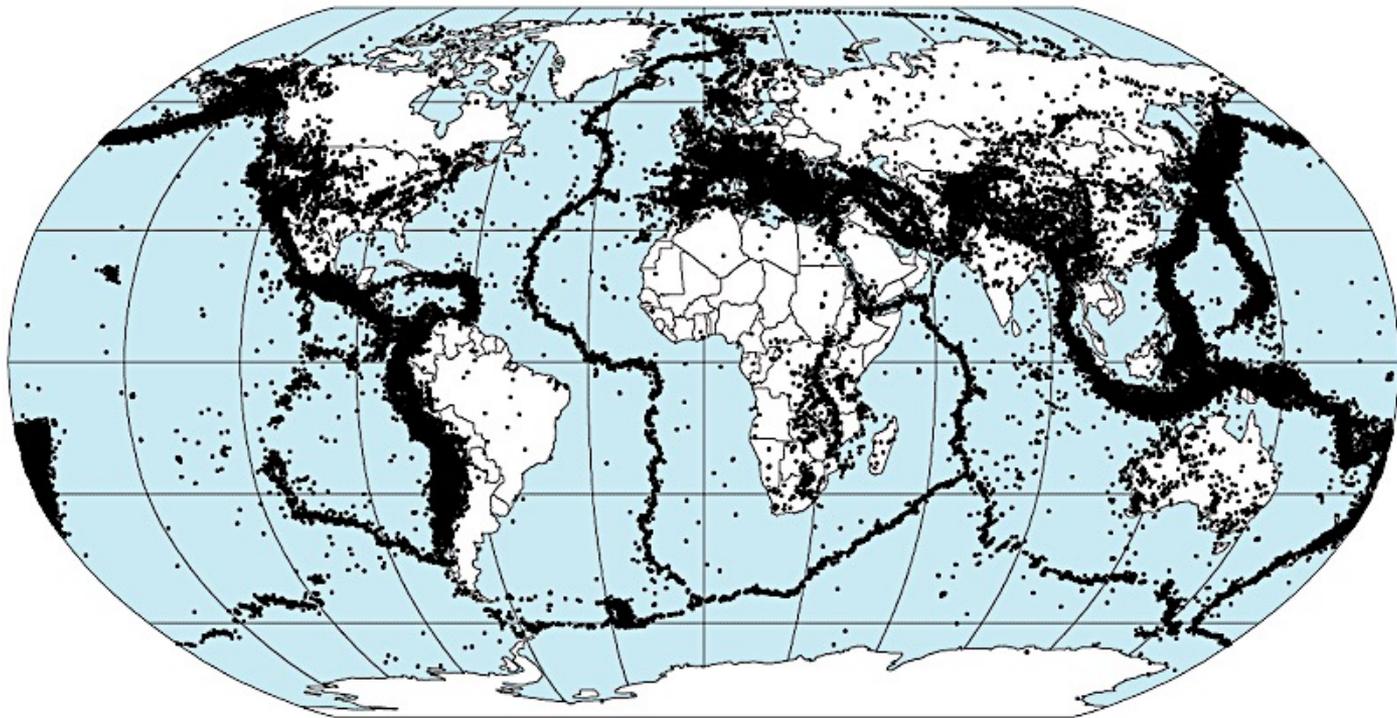


- A** : Extension (axe des dorsales)
- B** : Décrochement (faille transformante ou faille intracontinentale décrochante)
- C** : Compression (possible le long d'un plan de subduction)
- D** : Compression (chevauchement intracontinental)
- E** : Extension (rift intracontinental)
- F** : Extension (flexure avant-fosse)

# Carte mondiale des séismes

Preliminary Determination of Epicenters

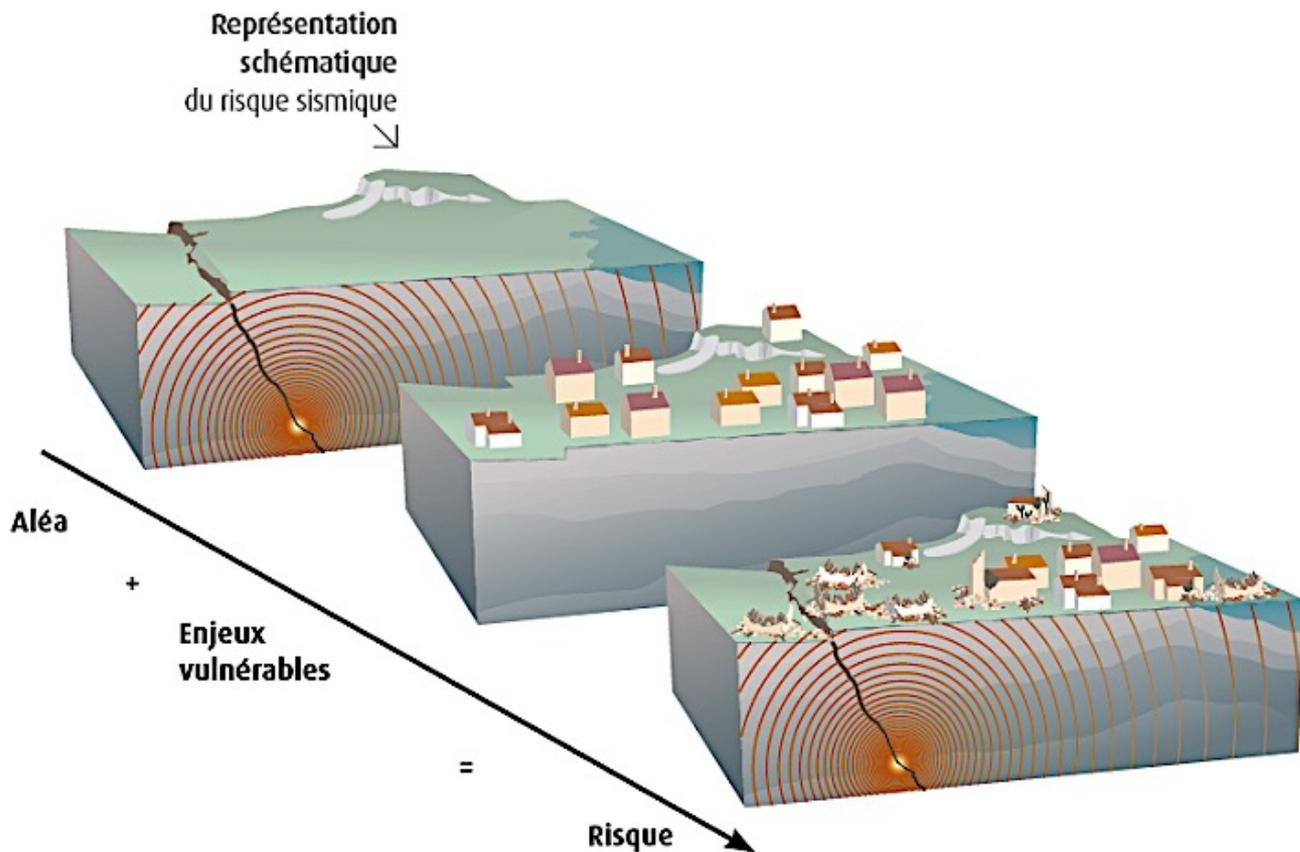
358,214 Events, 1963 - 1998



# **3. Aléa et risque sismique**

## **3.1. Définir le risque et l'aléa**

# Risque = aléa x enjeu +/- vulnérable



# La vulnérabilité varie

**Deux séismes de magnitude 7,8 en 2015 :**

- séisme du 26 avril 2015 au Népal : 8 000 morts et 18 000 victimes.
- séisme du 30 mai 2015 à Tokyo : aucune victime et aucun dégât.



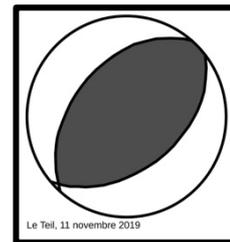
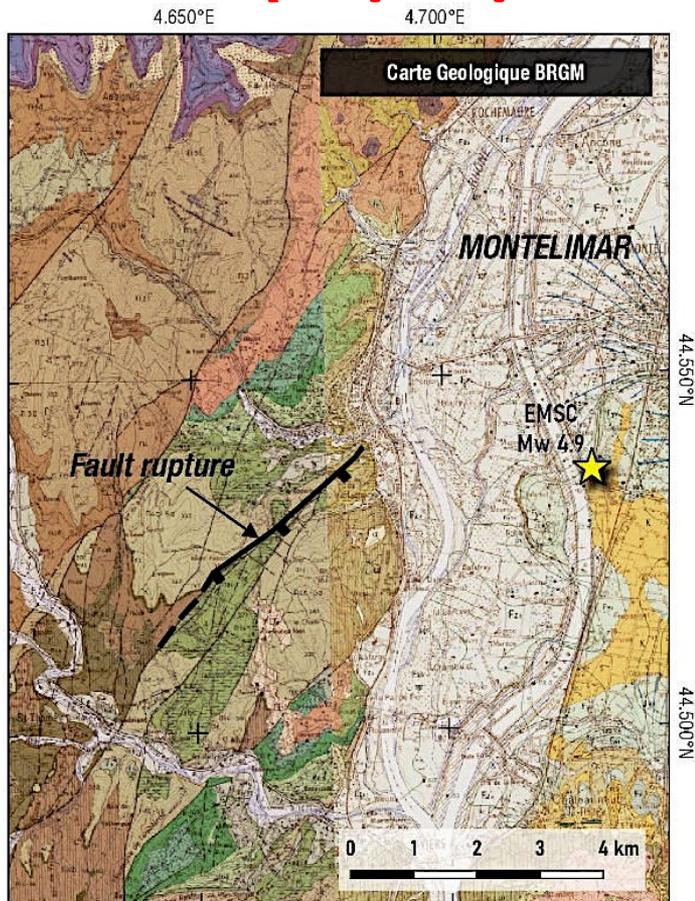
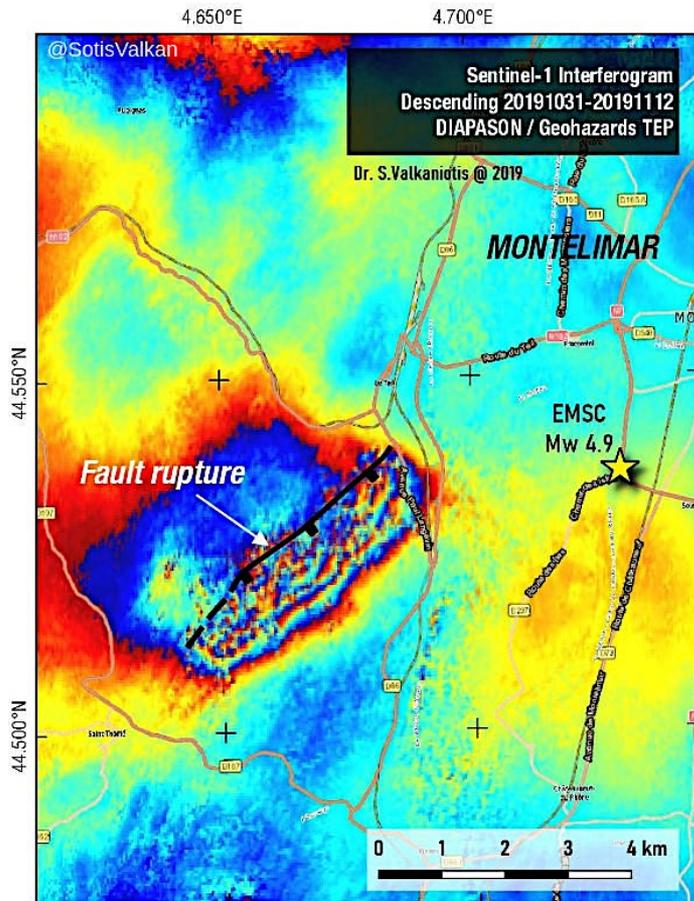
Katmandou



# **3. Aléa et risque sismique**

## **3.2. Évaluer l'aléa sismique**

# Séisme du Teil (11/11/2019)



Faïlle inverse  
Contexte de  
compression

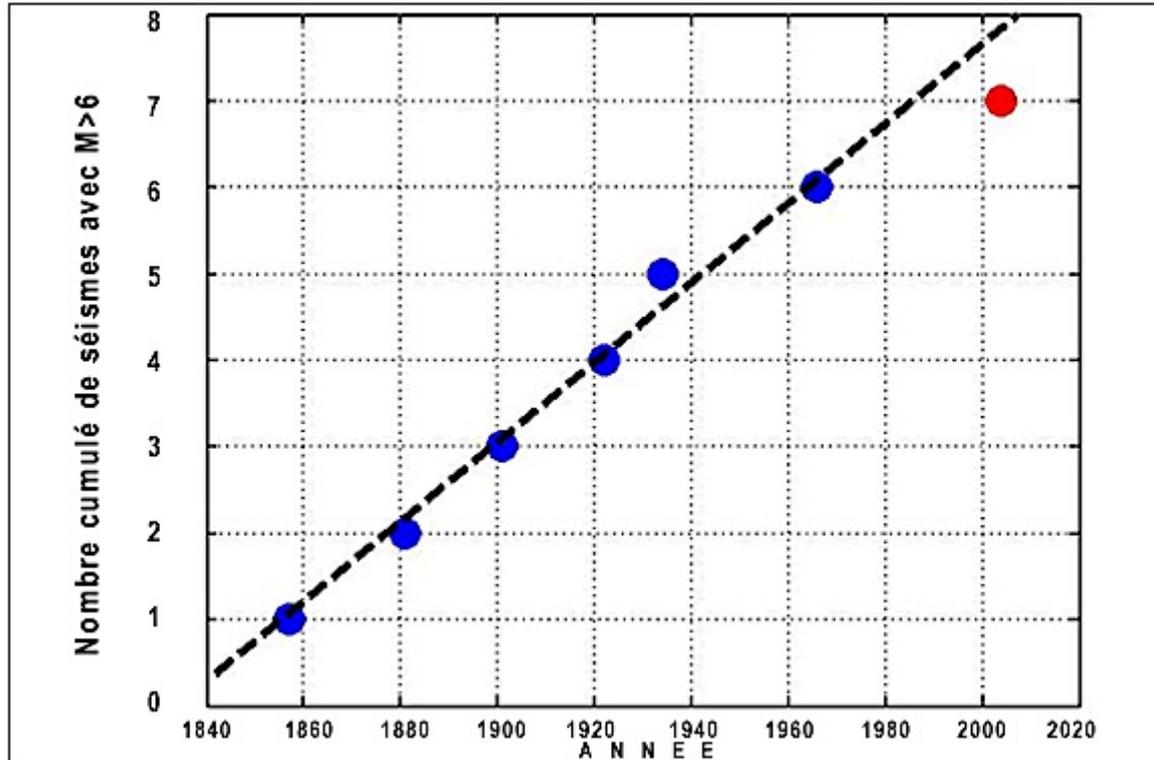


# **3. Aléa et risque sismique**

## **3.3. Prédire un aléa sismique et prévenir les risques**

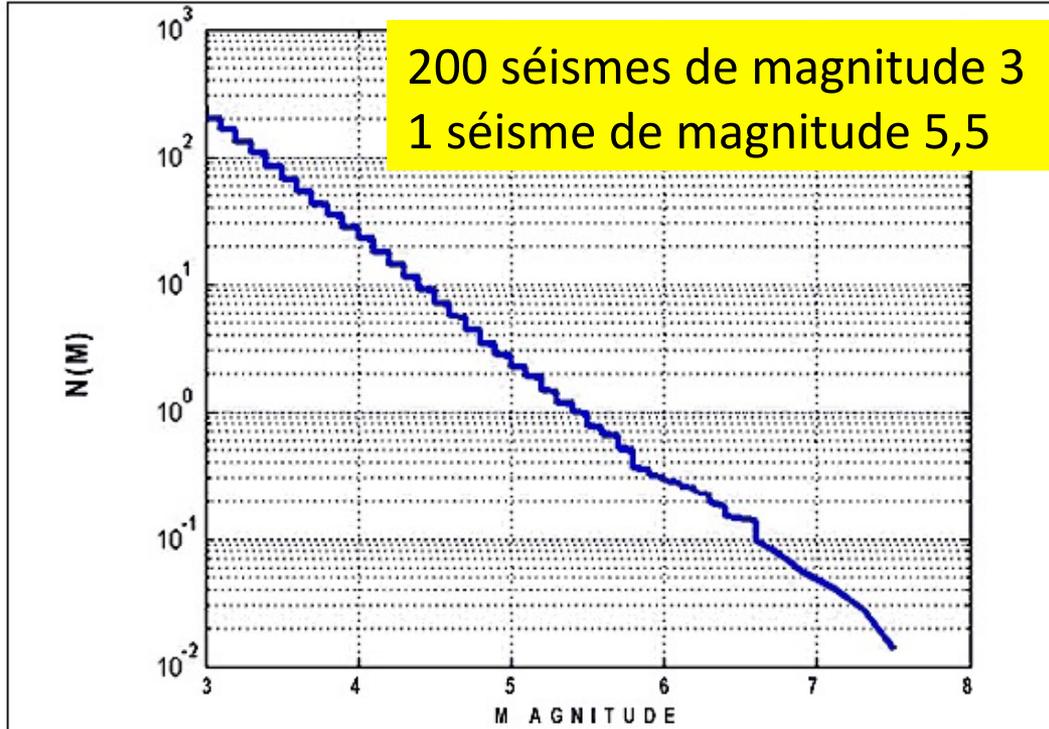
# La fréquence des séismes

Répartition temporelle des séismes de magnitude  $> 6$  dans la région de Parkfield



Source : <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/ued/risques-naturels/html>

# Loi de Gutenberg-Richter



Distribution normalisée temporellement pour la région Sud-Californienne.

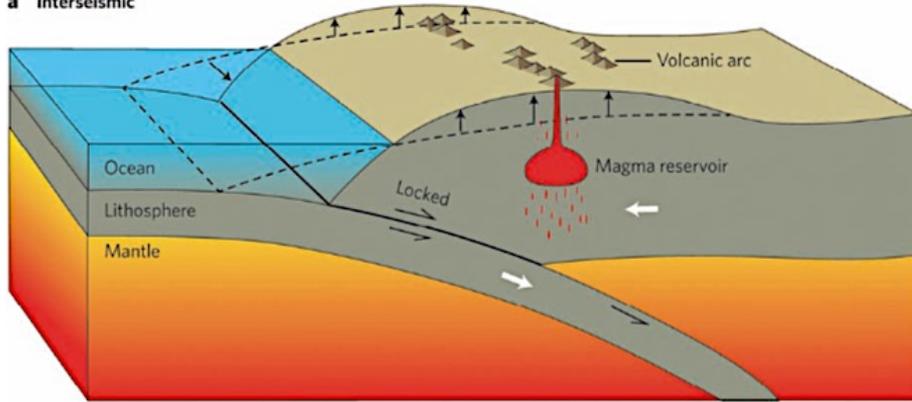
Le nombre annuel  $N_M$  de séismes de magnitude  $M$  suit la relation suivante :

$$\text{Log} (N_M) = a - b.M$$

$a$  reflète l'activité sismique totale intégrée sur toute la période d'observation  
 $b$  est proche de 1 (mais varie entre 0,5 et 1,5).

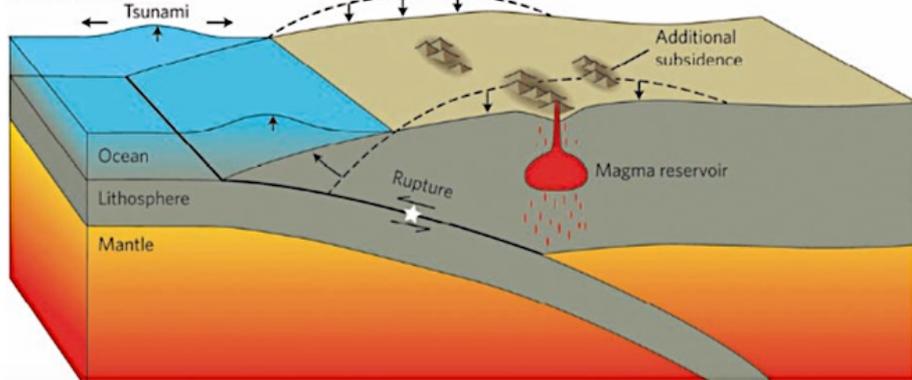
# Cycle sismique en zone de subduction

a Interseismic



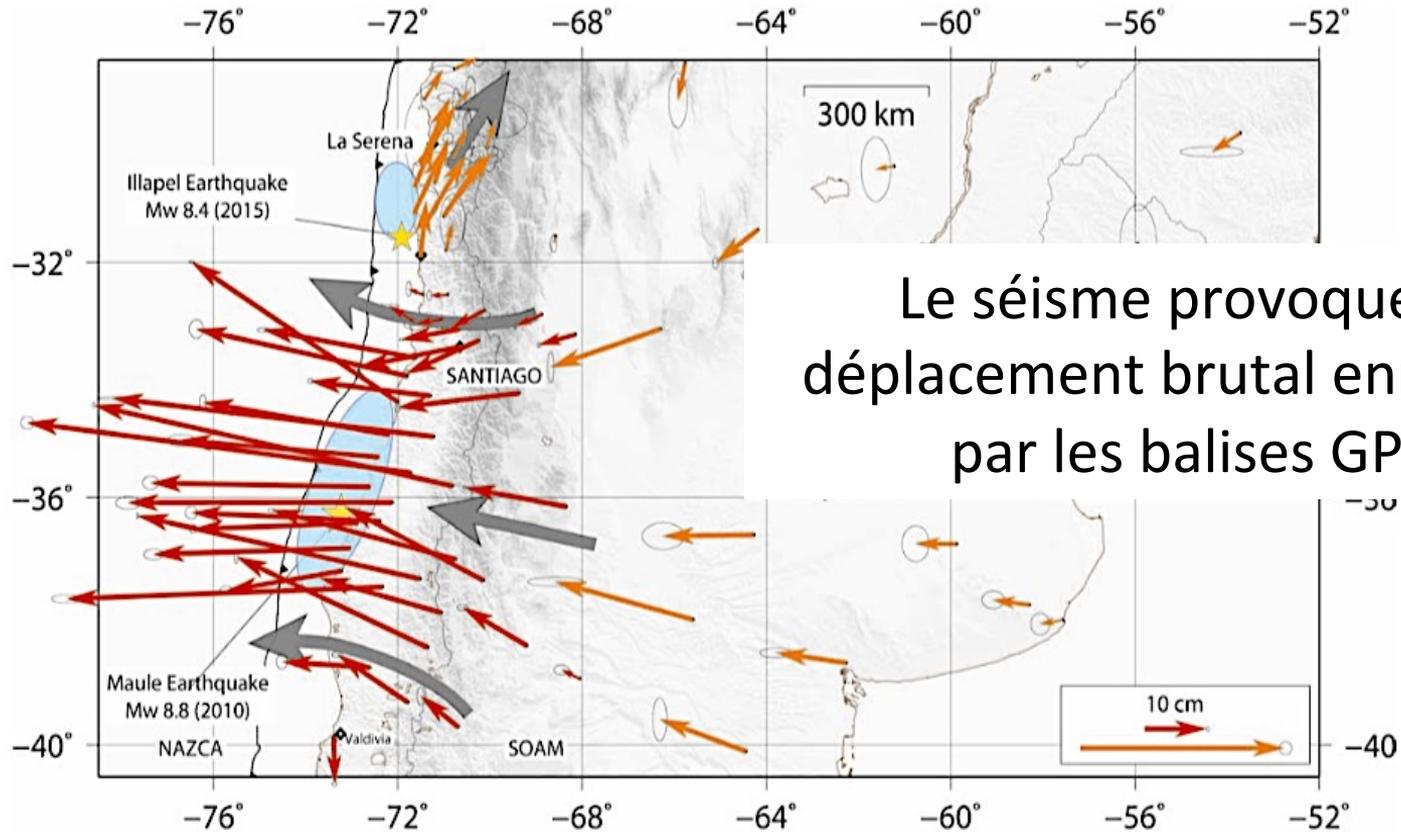
La plaque océanique s'enfonce en déformant de façon élastique la plaque chevauchante.

b Coseismic



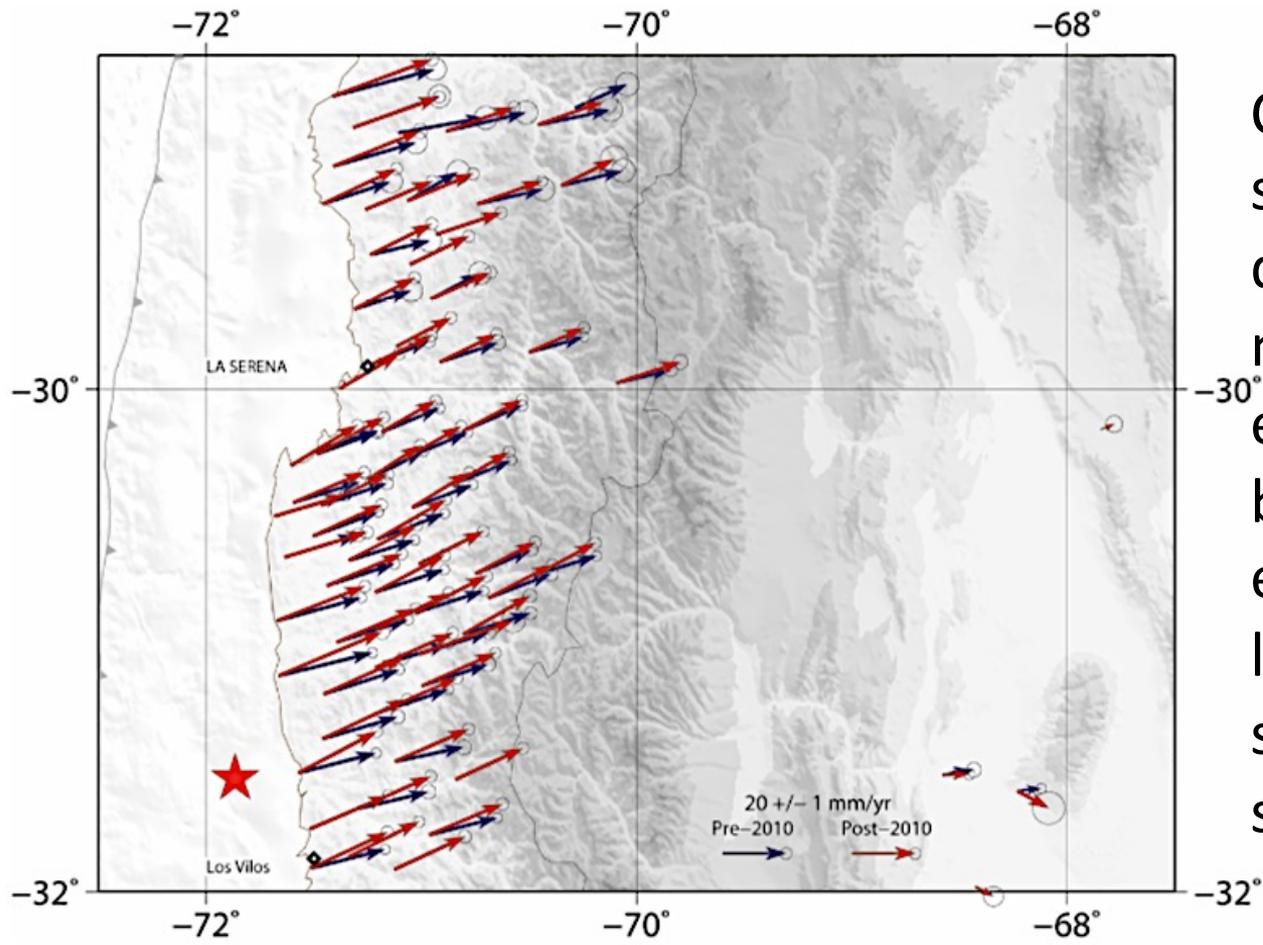
Le séisme induit un glissement brutal et libère l'énergie accumulée.

# Phase cosismique



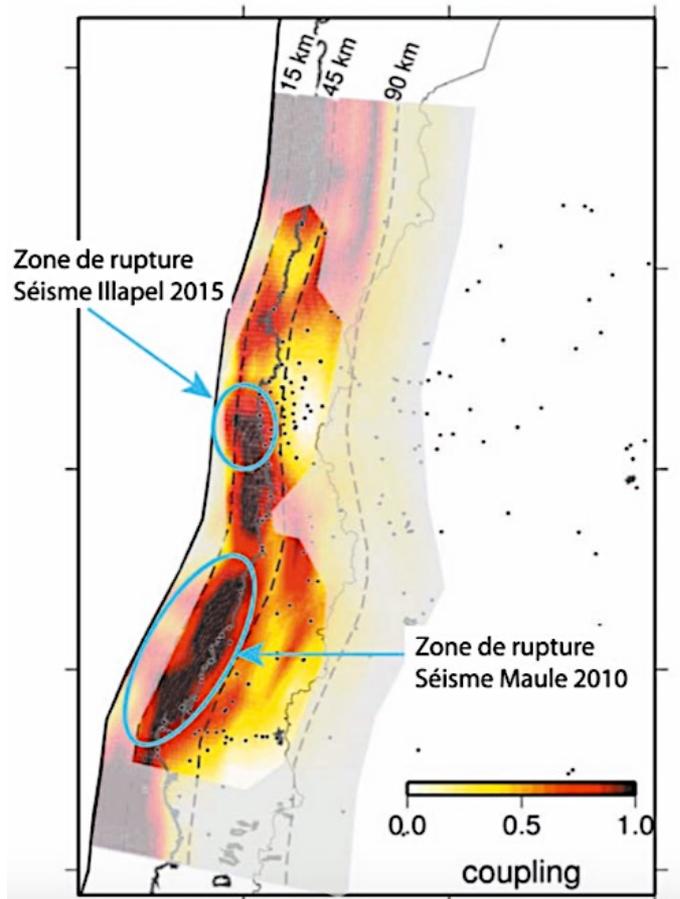
Le séisme provoque un déplacement brutal enregistré par les balises GPS.

# Phase intersismique



Champ de vitesse intersismique (mm.a<sup>-1</sup>) déterminé à partir des mesures de campagnes entre 2004 et 2010 en bleu, entre 2010 et 2015 en rouge. L'étoile rouge localise l'épicentre du séisme d'Illapel (16 septembre 2015).

# Modèle de blocage de la plaque plongeante



Les séismes se sont produits dans les zones de fort blocage : forte énergie accumulée.  
Connaître la déformation élastique accumulée permet d'évaluer l'ampleur de l'aléa sismique à venir.

# Conclusion

Les séismes provoquent des mouvements de grande ampleur (quelques mètres) en des temps très brefs (secondes) alors que le déplacement global des plaques est de l'ordre du  $\text{cm.a}^{-1}$ .

Il existe des glissements asismiques (trémors) qui dissipent une partie des déformations élastiques accumulées.

# Les trémors, de mini-séismes

variation quotidienne de l'emplacement de la station GPS de Victoria suivant une direction est-ouest.

la station GPS se déplace vers l'est plus rapidement que la moyenne à long terme.

Tendance à long terme : déplacement vers l'est de  $5 \text{ mm.a}^{-1}$

la station se déplace d'environ 4 mm vers l'ouest pendant 2 semaines = épisodes de trémors, glissements aismiques.

