

SISMOGENESE

Les acquis: Une des manifestations brutales de la dissipation d'énergie interne correspond aux séismes ou tremblements de terre, La Terre se comporte comme un milieu élastique propageant suite à une secousse tellurique des ondes dans toutes les directions.

en première année, l'étude des séismes a permis de fournir des informations clés sur la structure du globe.
(illustrer diversité des ondes,

L'aléa sismique est la conséquence de la tectonique des plaques, la connaissance de l'aléa sismique qui nécessite une étude fine des tremblements de Terre est un enjeu majeur de nos sociétés.

Questions:

Quels outils sont à la disposition des géologues pour étudier et comprendre les mécanismes se déroulant lors d'un séisme? Comment en retour la connaissance de ces mécanismes éclaire sur la dynamique lithosphérique permettant aux géologues de prévenir de prédire le risque sismique?.

1. Quelques exemples de séismes:

a. Le séisme d'Izmit en Turquie (1999)

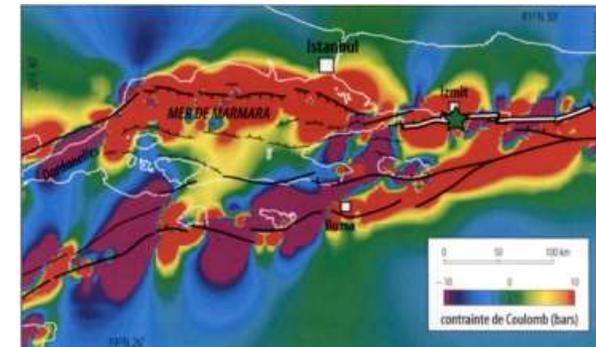
Les secousses ont endommagé et détruit des milliers d'habitations et d'infrastructures. Le bilan humain officiel est de 17 480 morts. Le séisme a frappé une région fortement urbanisée. Les habitations ont été fortement impactées car les immeubles n'étaient pas construits selon les normes, ex le béton utilisé pour la construction était conçu à partir de sable d'eau de mer non dessalé, ce qui l'a rendu très friable, certains d'ailleurs n'avaient pas eu de permis de construire. Les infrastructures industrielles ont un peu mieux résisté mais des incendies ont eu lieu notamment dans des complexes de pétrochimie. **L'incendie d'une raffinerie** a duré plusieurs jours avec libération de produits toxiques (voir image du séisme). Par ailleurs, un **mini tsunami** avec une vague de 2m a eu lieu en baie d'Izmit .

Dégâts du séisme d'Izmit, août 1999



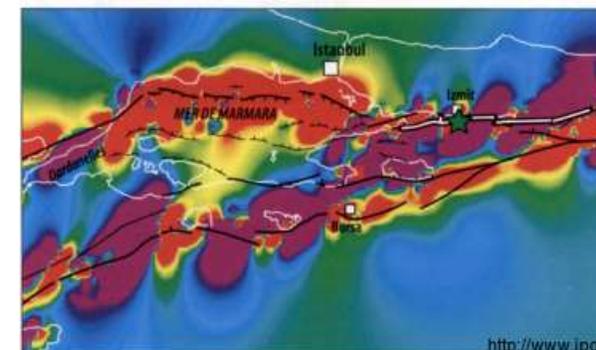
On voit très nettement la rupture (traits et pointillés blancs) qui a cisailé les immeubles. Son rejet (de l'ordre de 2 m ici) apparaît clairement par le décrochement du mur d'enceinte et son sens de déplacement (dextre) est compatible avec celui de la faille nord-anatolienne.

<http://www.ipgp.fr/~armijo/ArmijoPDF/ArmijoEncUniv00.pdf>



Charge tectonique et contrainte de Coulomb dans la région de la mer de Marmara.

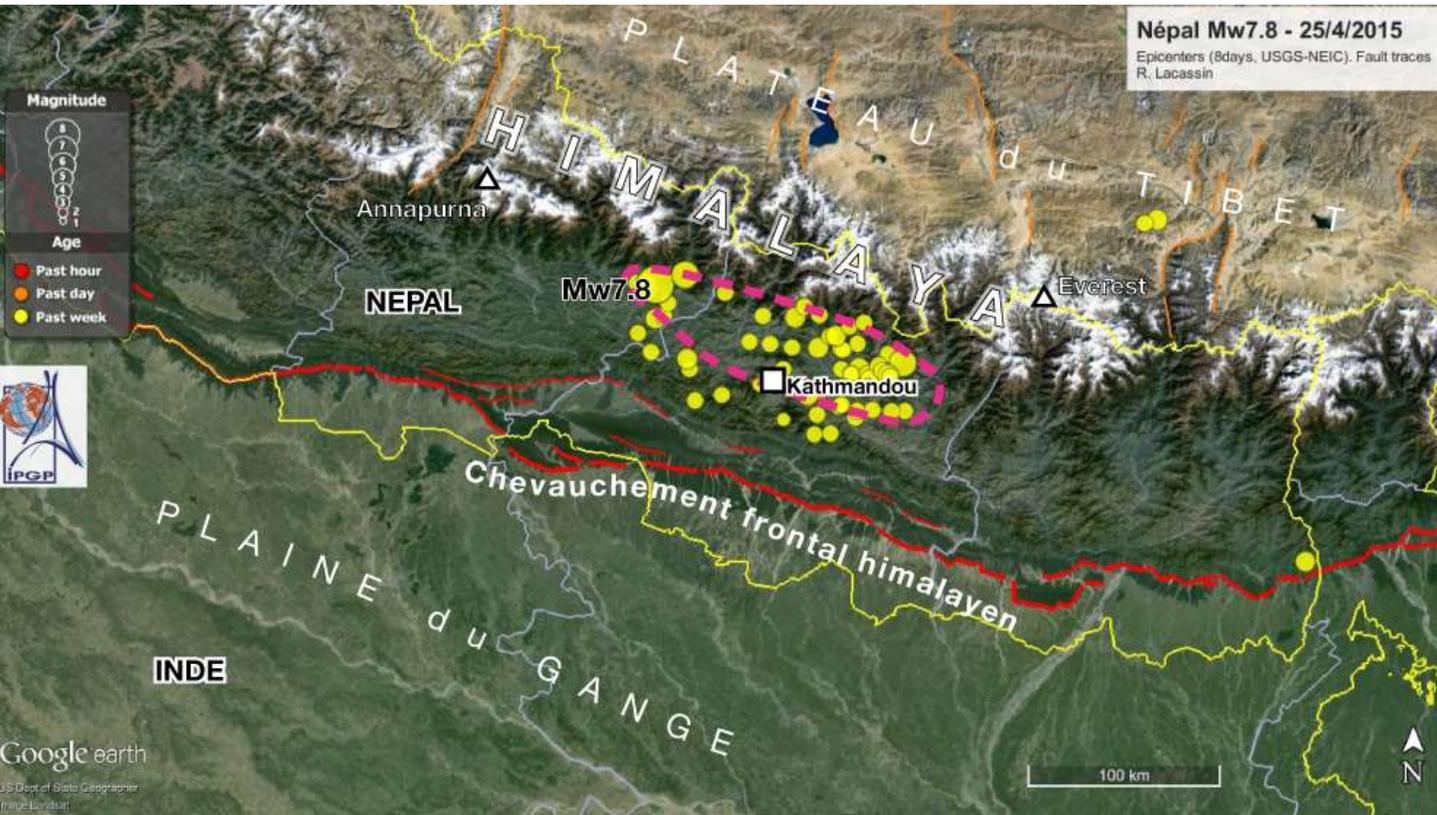
La figure du haut représente la situation juste avant les séismes de 1999. La rupture d'Izmit (trait blanc ; étoile verte pour l'épicentre) se produit dans l'une des zones où la contrainte est élevée (en rouge). La figure du bas incorpore l'effet du séisme d'août. La contrainte diminue près de la rupture (en mauve), mais augmente aux extrémités. Celle qui est située à l'Est a rompu le 12 novembre. La zone avec une charge importante au Sud d'Istanbul est identifiée comme dangereuse.



<http://www.ipgp.fr/~armijo/ArmijoPDF/ArmijoEncUniv00.pdf>

b. Séisme de Katmandou (Népal) 25 avril 2015

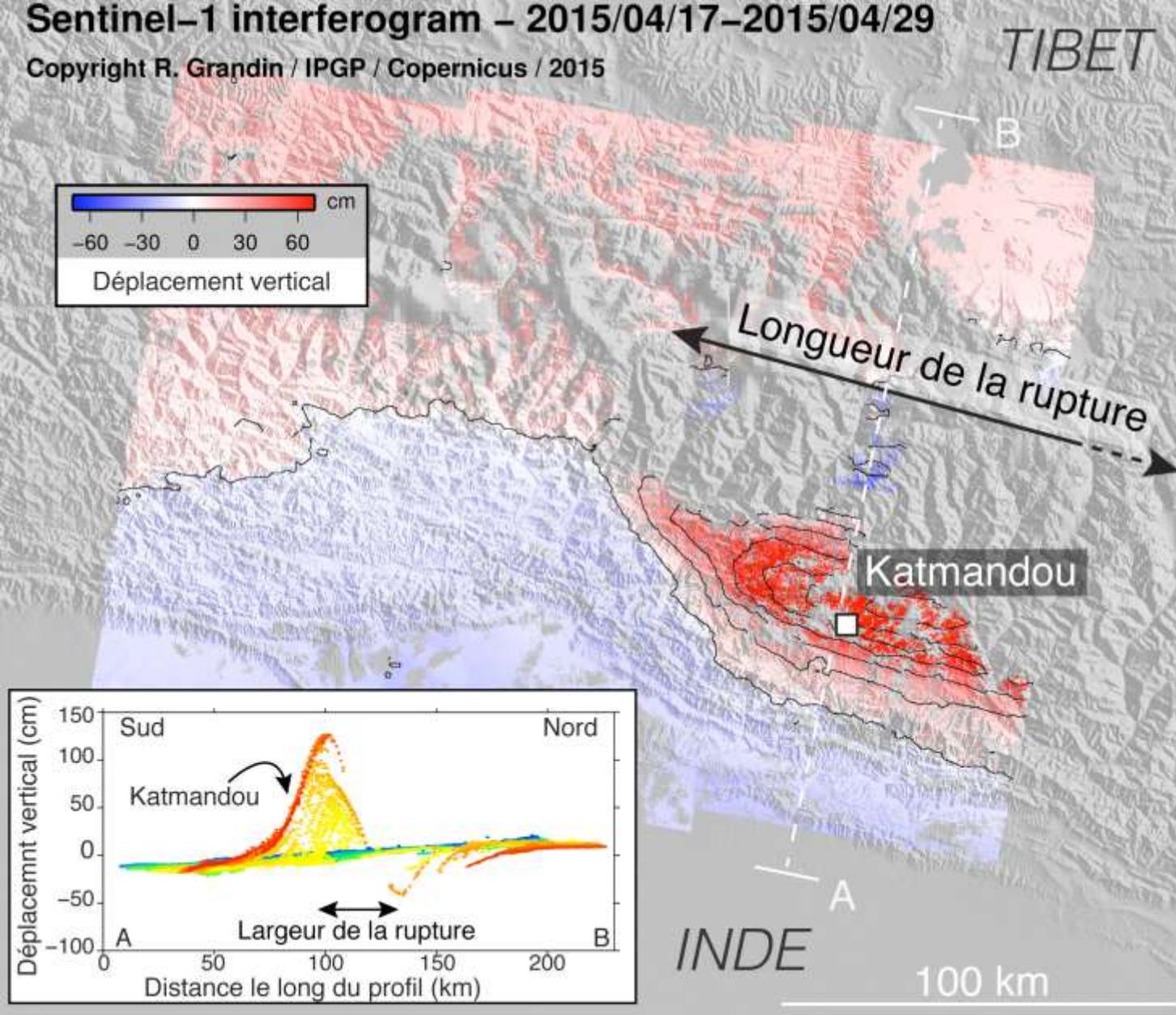
Le séisme a fait plus de 8 000 morts Les dégâts sur les habitations et les routes ont été nombreux, des immeubles se sont écroulés à Kathmandu.
Conséquence du séisme : de **nombreux glissements de terrain** et **avalanches rocheuses** se sont produits jusque dans la haute chaîne de l'Himalaya.
.De nombreuses **répliques** ont suivi la secousse principale.



Le contexte : La plaque indienne plonge sous le Tibet, et le contact entre les deux plaques émerge en surface au niveau de trace rouge délimitant la bordure nord de la Plaine du Gange. Les points jaunes correspondent aux répliques, la zone rose l'étendue des dégâts observés.

Sentinel-1 interferogram – 2015/04/17–2015/04/29

Copyright R. Grandin / IPGP / Copernicus / 2015



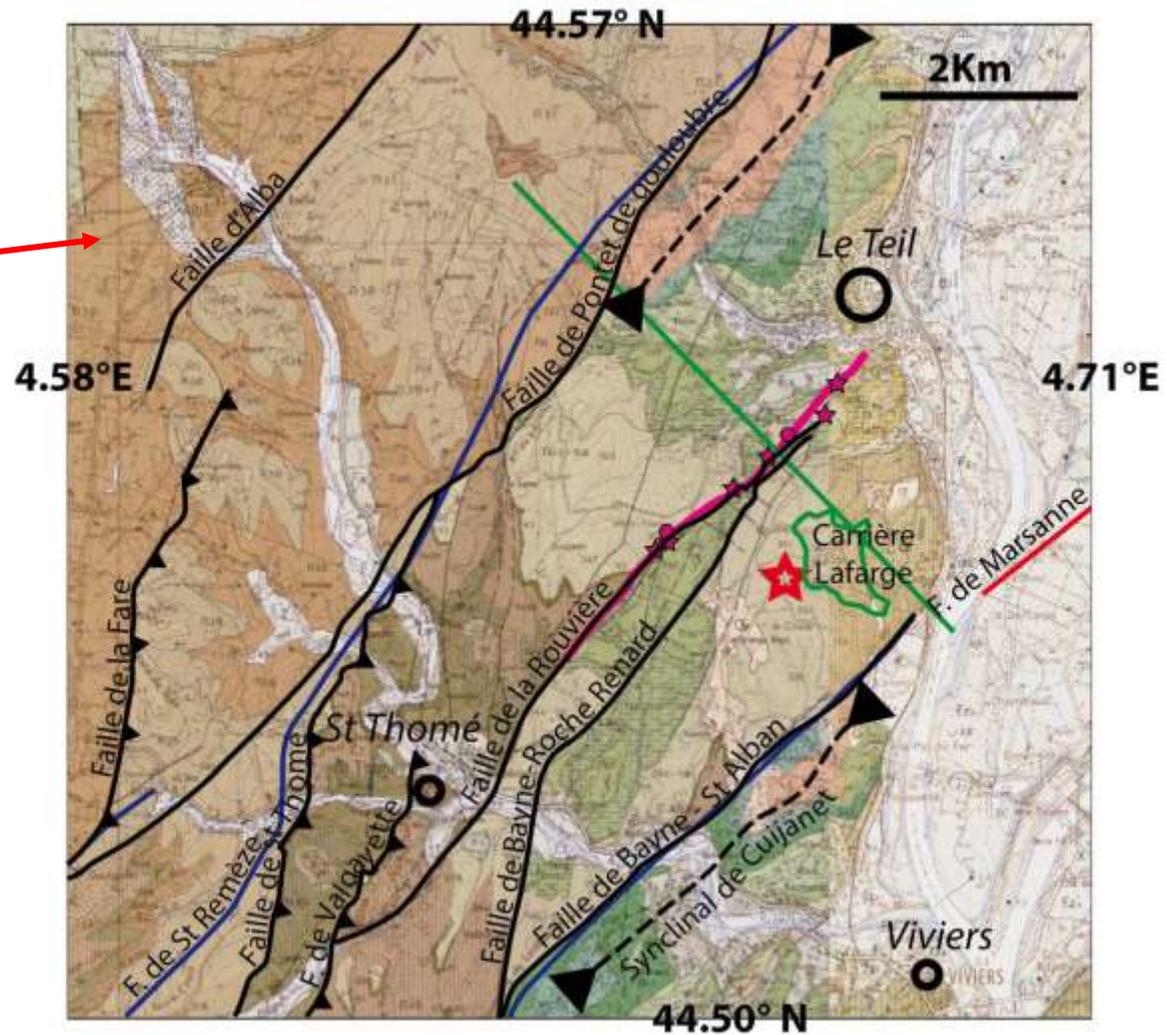
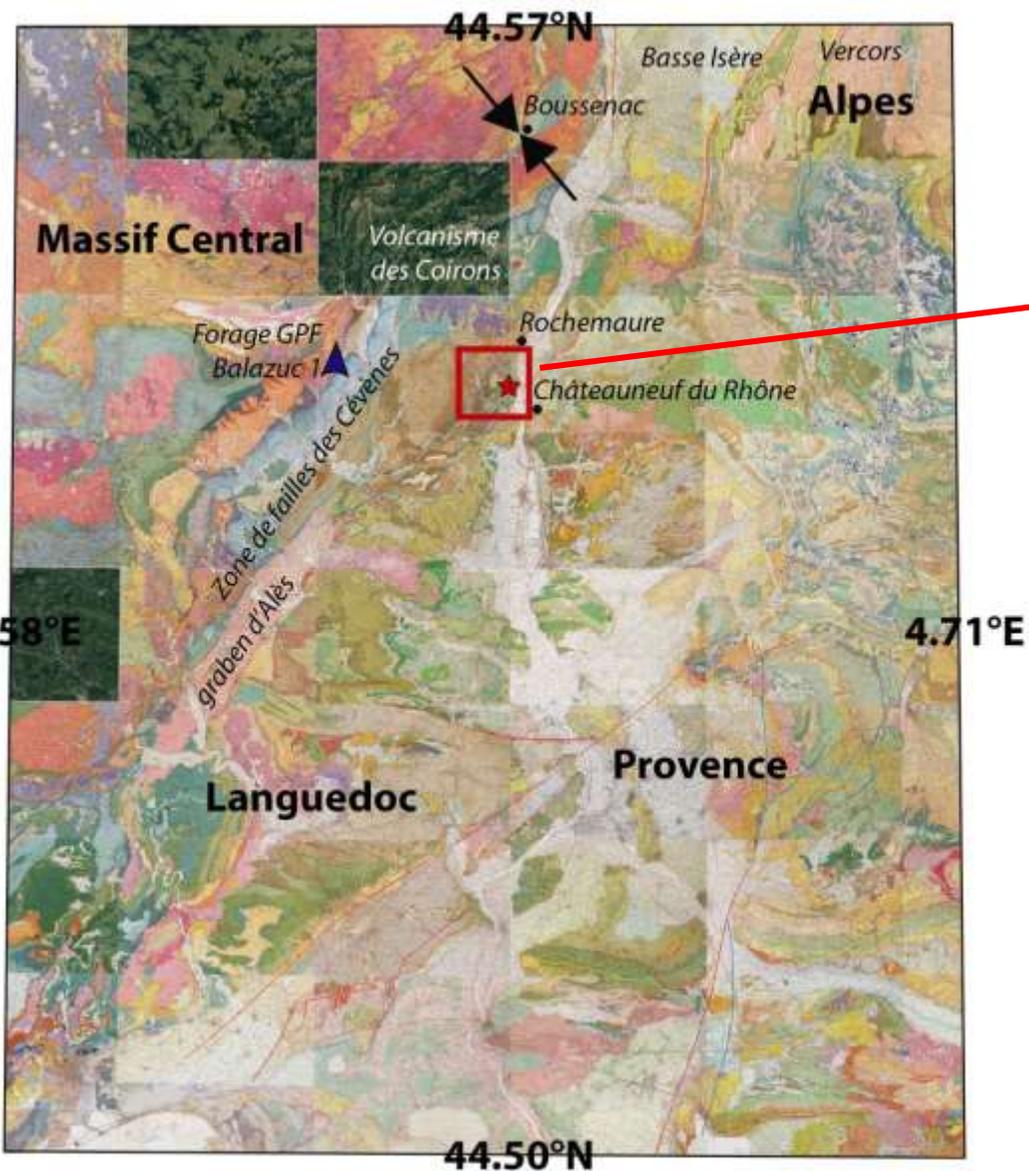
[Une vidéo du séisme dans un magasin](#)

L'**interférométrie radar** permet de quantifier de façon extrêmement précise l'étendue et l'amplitude de la déformation

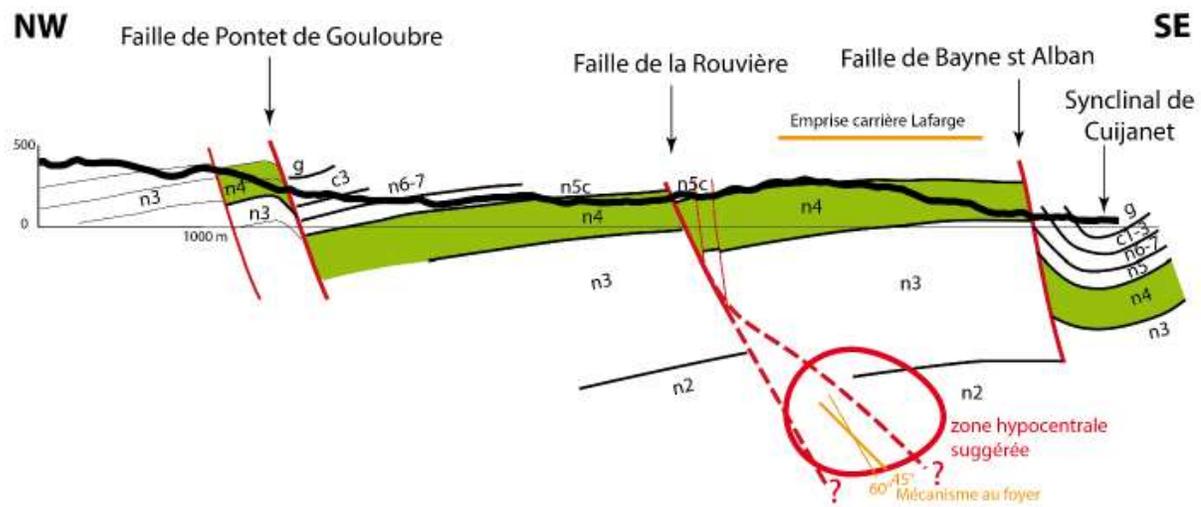
Dans l'image ci contre, le déplacement du sol entre deux dates d'acquisition encadrant le séisme (17 avril -29 avril) est figuré par des couleurs. La région colorée en rouge subit un soulèvement atteignant 1,25 mètre au maximum. Au nord de cette zone, une région colorée en bleu s'est affaissée d'environ 50 cm.

Raphaël Grandin, Yann Klinger, Robin Lacassin
Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP)

c. Plus près de nous dans l'espace et le temps: le séisme du Teil (11 novembre 2019)



Le contexte géologique régional et local



Coupe selon le trait vert de la diapo précédente

Le séisme, de magnitude 5, n'a pas fait de victimes mais des dégâts matériels importants notamment dans le centre historique du Teil, de vieilles habitations se sont en partie effondrées.

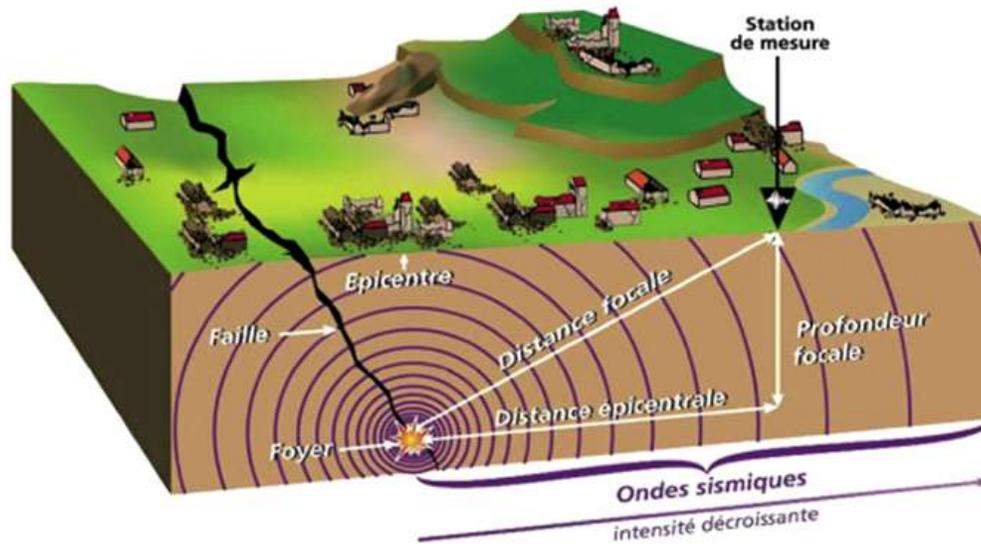
En surface les mesures réalisées montrent un soulèvement de 5 à 10 cm du sol du compartiment SE sur le compartiment NW



Bilan: Les séismes sont dus à des mouvements relatifs entre deux blocs

2. Caractériser les séismes à partir des données d'observation et de mesures

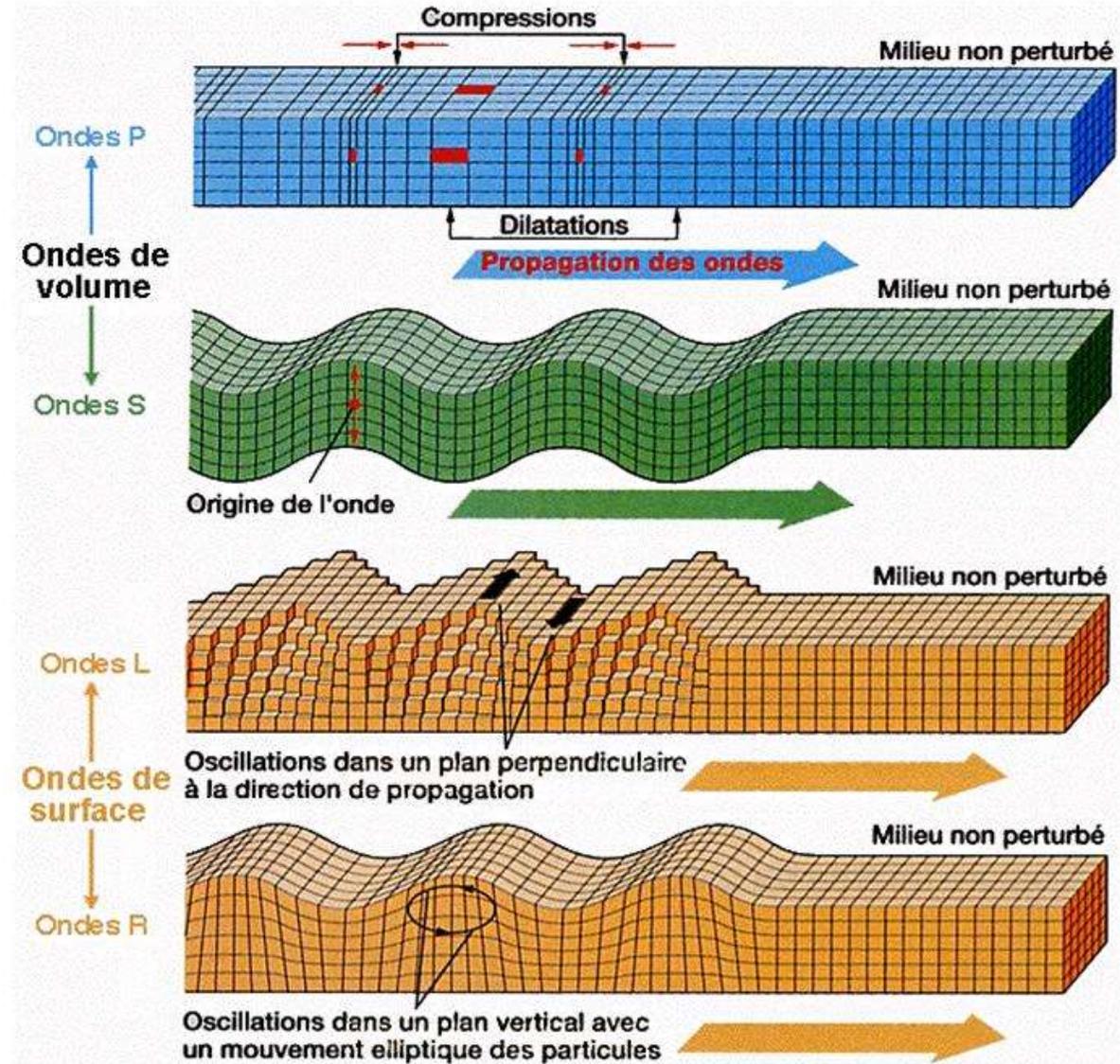
Les séismes



a. Les différentes ondes et leur expression sur un sismogramme

[Pour voir le mouvement](#)

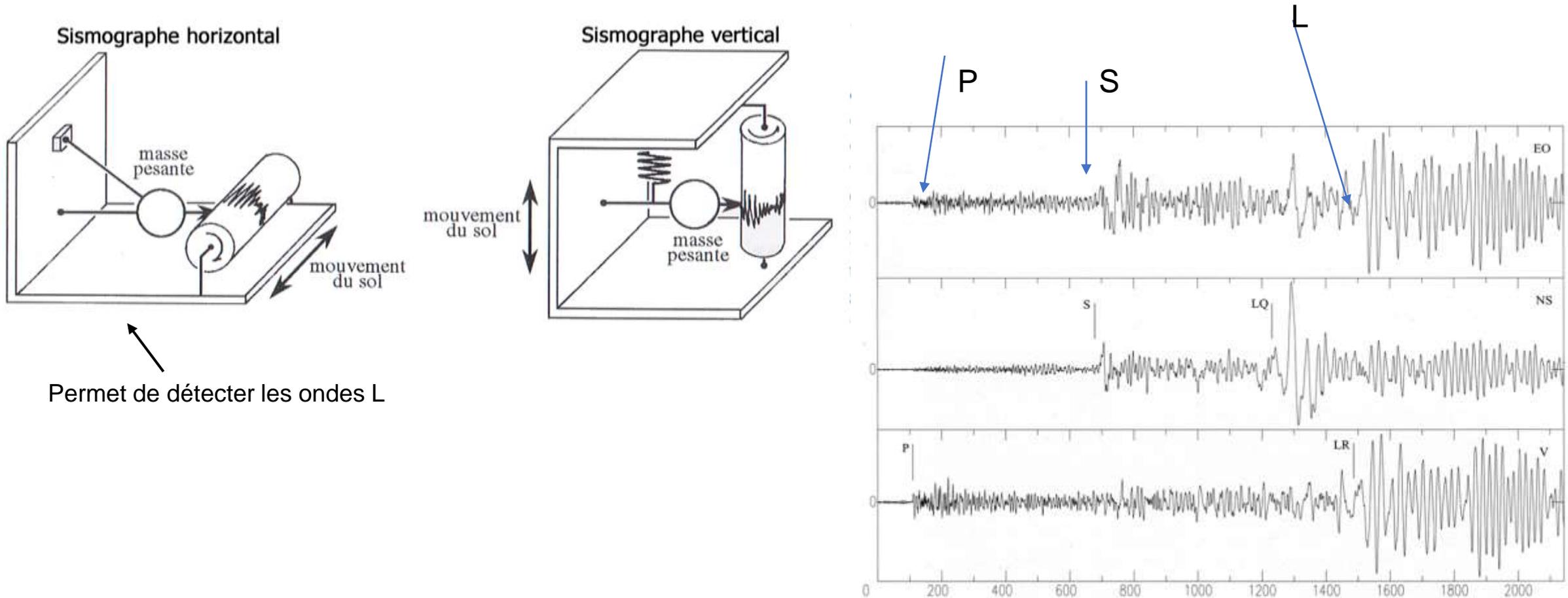
Les différents types d'ondes sismiques.



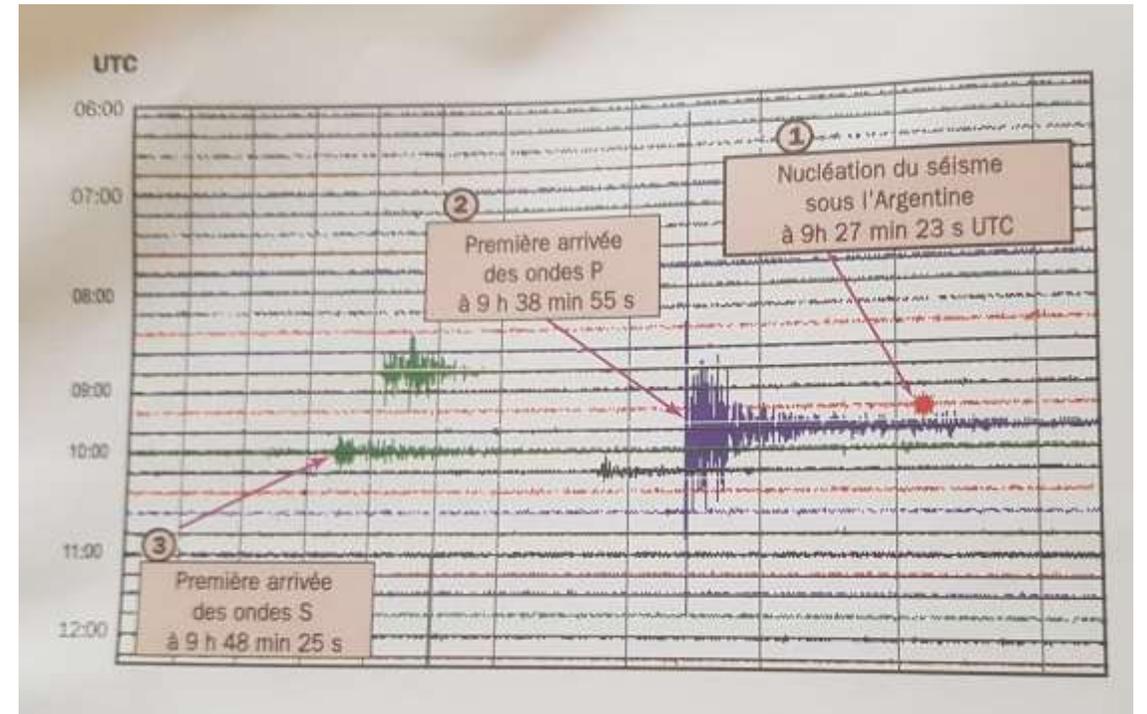
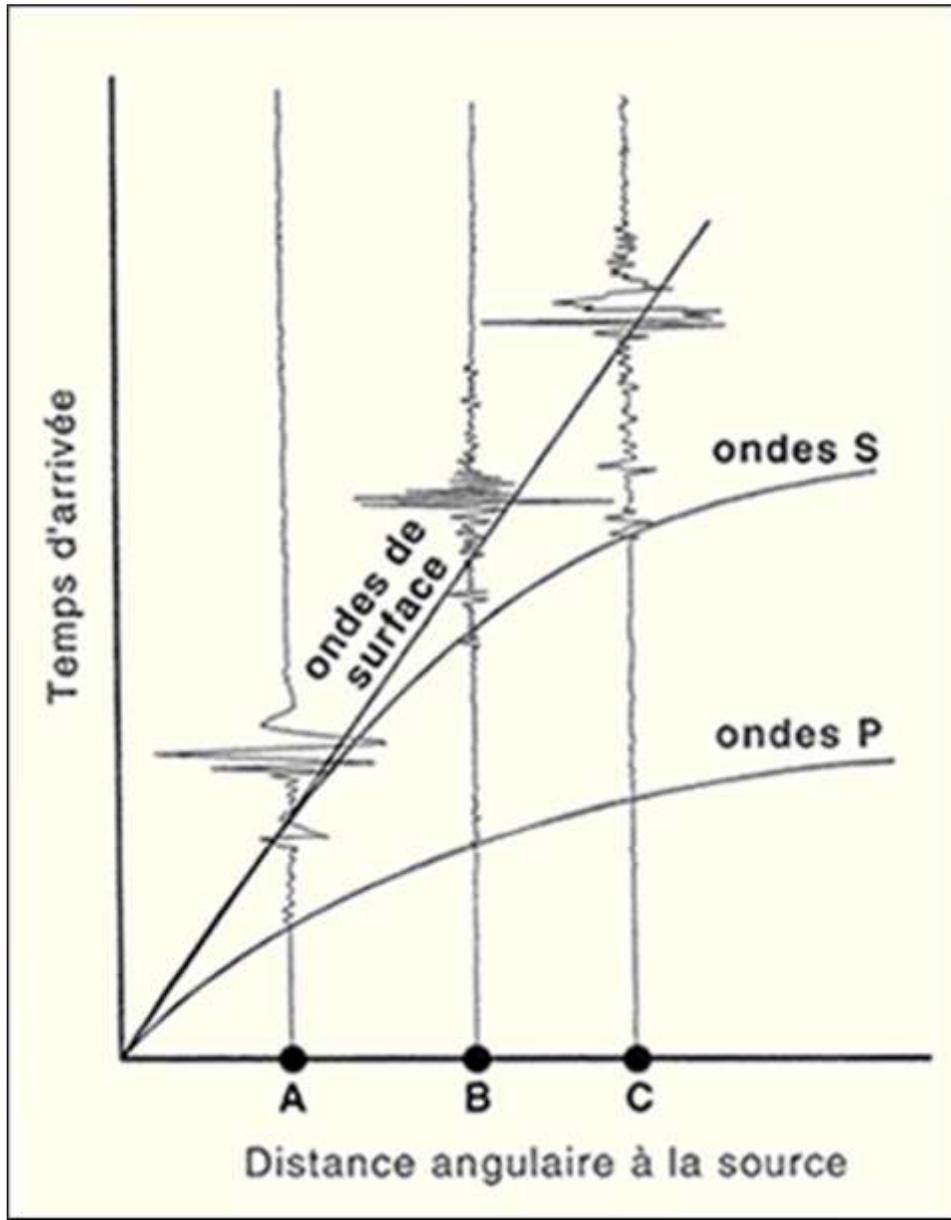
Plusieurs types d'ondes sont émises :

- Les ondes P (première) et S (seconde) sont des ondes de volume qui se propagent dans toutes les directions
- Les ondes L (love) et R (Rayleigh) appelées ondes de surface qui sont dues à des interactions des ondes P et S à la surface de la planète , ce sont ces ondes de surface qui provoquent les dégâts en surface.

Ces ondes peuvent être enregistrées par des sismomètres ou sismographes, l'enregistrement est un sismogramme



Les ondes de surface se déplacent à **vitesse constante** contrairement aux ondes P et S, la vitesse des ondes P et S augmente avec la distance à l'épicentre. Cette particularité sera utile pour déterminer la position de l'épicentre du séisme.



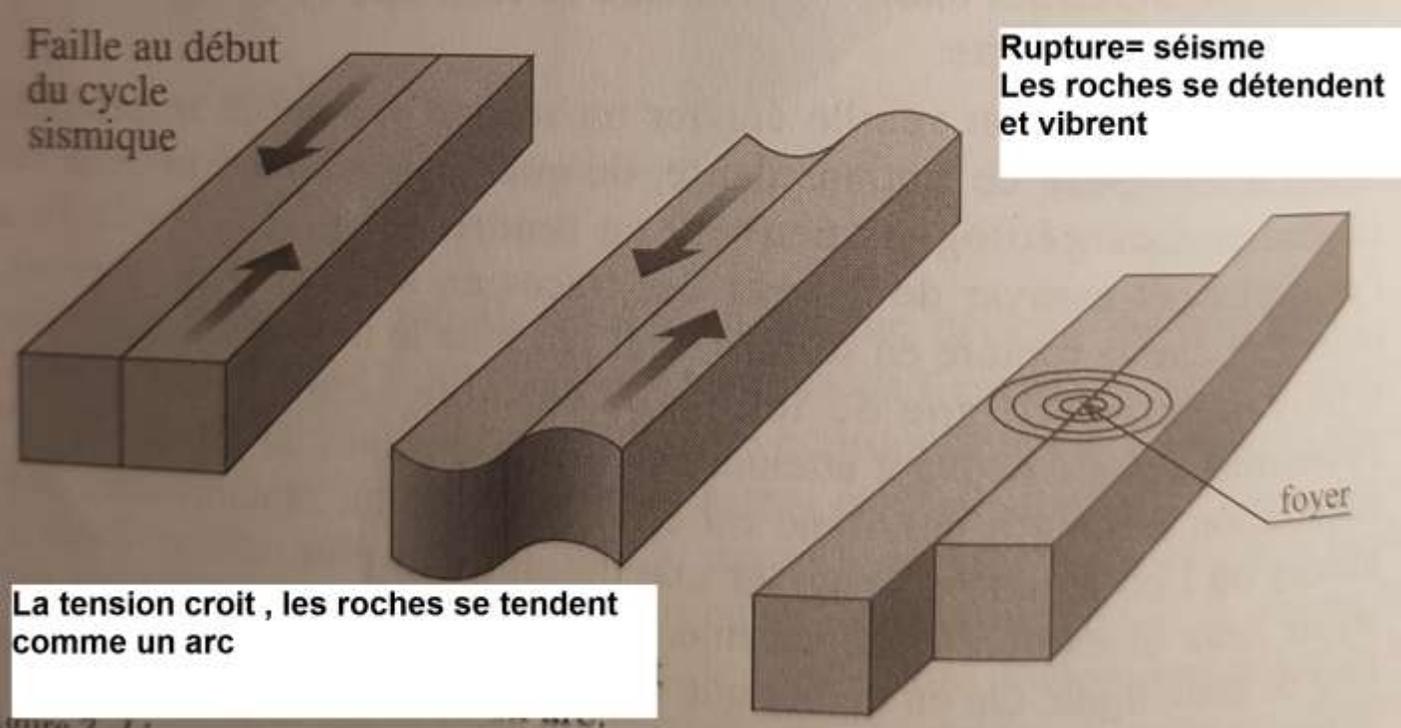
Enregistrement d'un séisme à Santiago de Estero (Argentine) par un sismographe localisé à Parkfield en Californie

b. Localiser le séisme

c. Caractériser l'importance d'un séisme

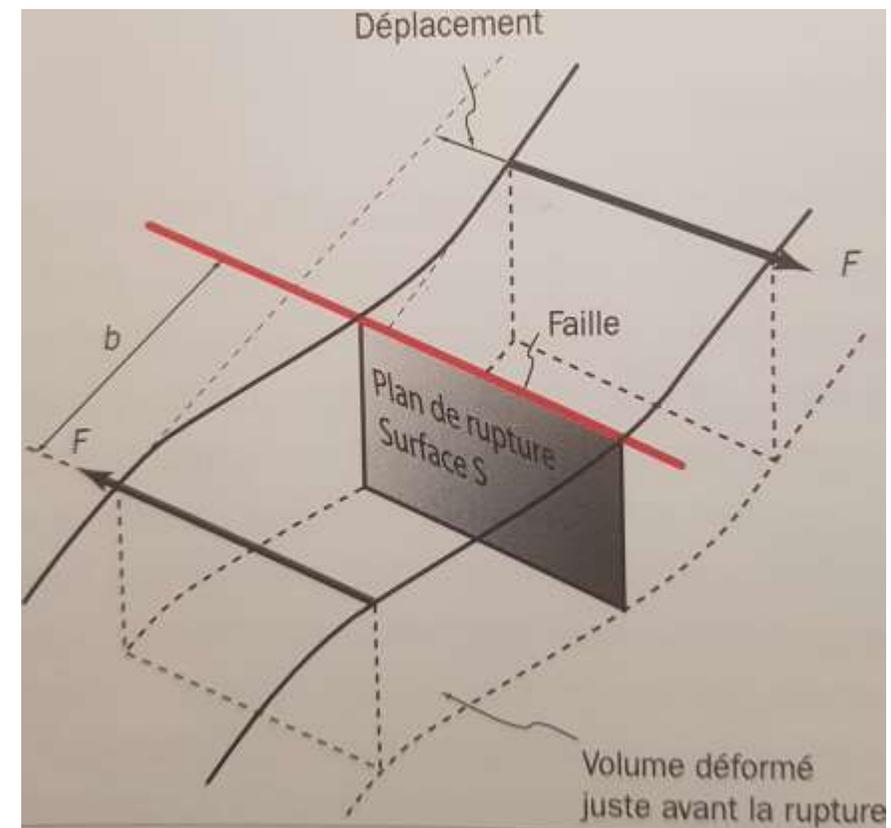
I	secousse non ressentie, mais enregistrée par les instruments
II	secousse partiellement ressentie, notamment par des personnes au repos et aux étages
III	secousse faiblement ressentie, balancement des objets suspendus
IV	secousse largement ressentie dans et hors les habitations, tremblement des objets
V	secousse forte, réveil des dormeurs, chute d'objets, parfois légères fissures dans les plâtres
VI	légers dommages, parfois fissures dans les murs, frayeur de nombreuses personnes
VII	dégâts, larges lézardes dans les murs de nombreuses habitations, chûtes de cheminées
VIII	dégâts massifs, les habitations les plus vulnérables sont détruites, presque toutes subissent des dégâts importants
IX	destructions de nombreuses constructions, quelquefois de bonne qualité, chute de monuments et de colonnes
X	destruction générale des constructions, même les moins vulnérables (non parasismiques)
XI	catastrophe, toutes les constructions sont détruites (ponts, barrages, canalisations enterrées...)
XII	changement de paysage, énormes crevasses dans le sol, vallées barrées, rivières déplacées...

Echelle MSK d'intensité des séismes

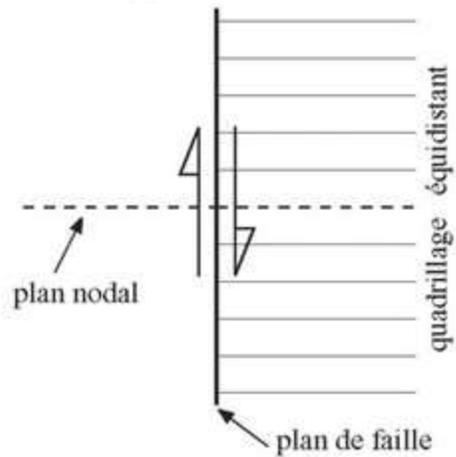


Le modèle du rebond élastique

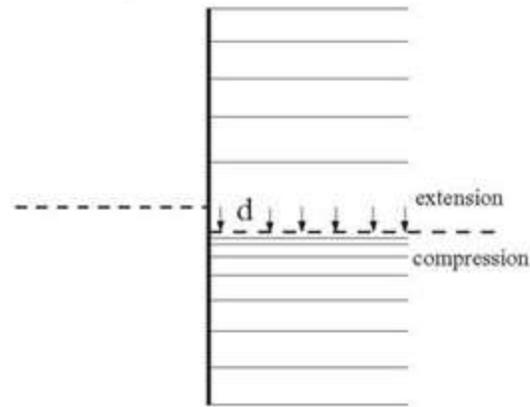
Le moment sismique



1) Avant le séisme



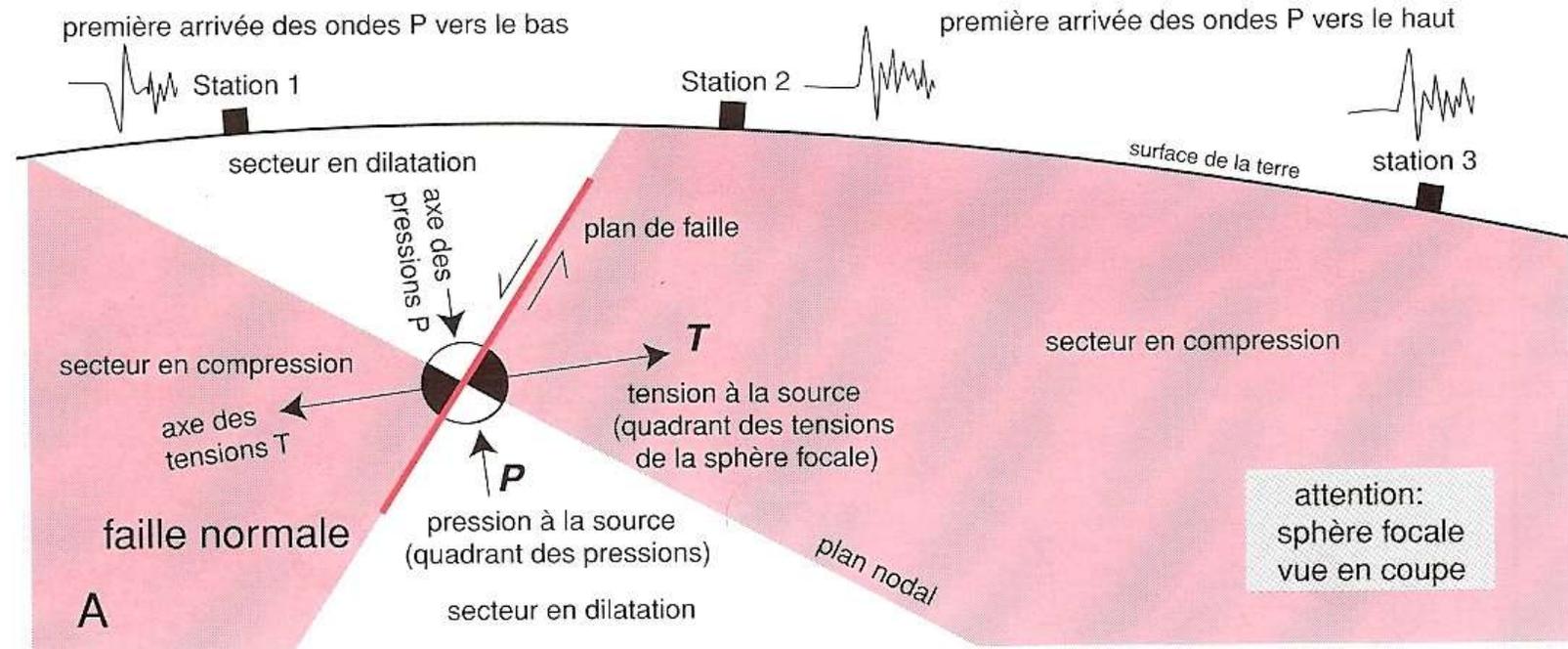
2) Pendant le séisme

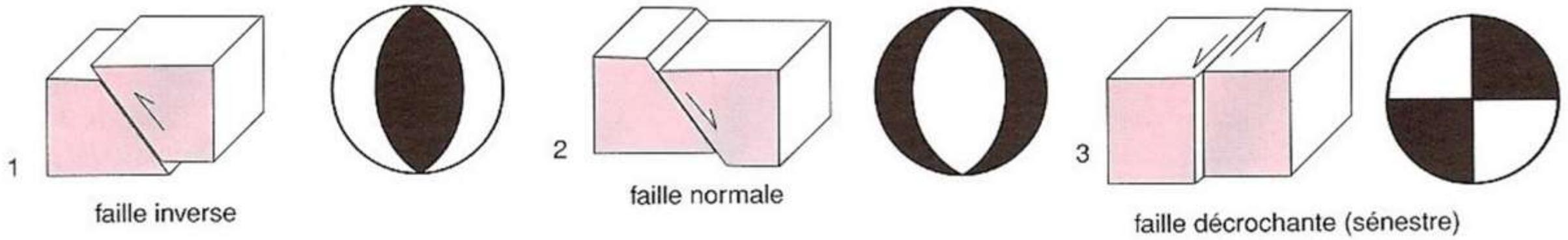


Le mouvement sur la faille d provoque une compression en avant du plan nodal et une extension en arrière.

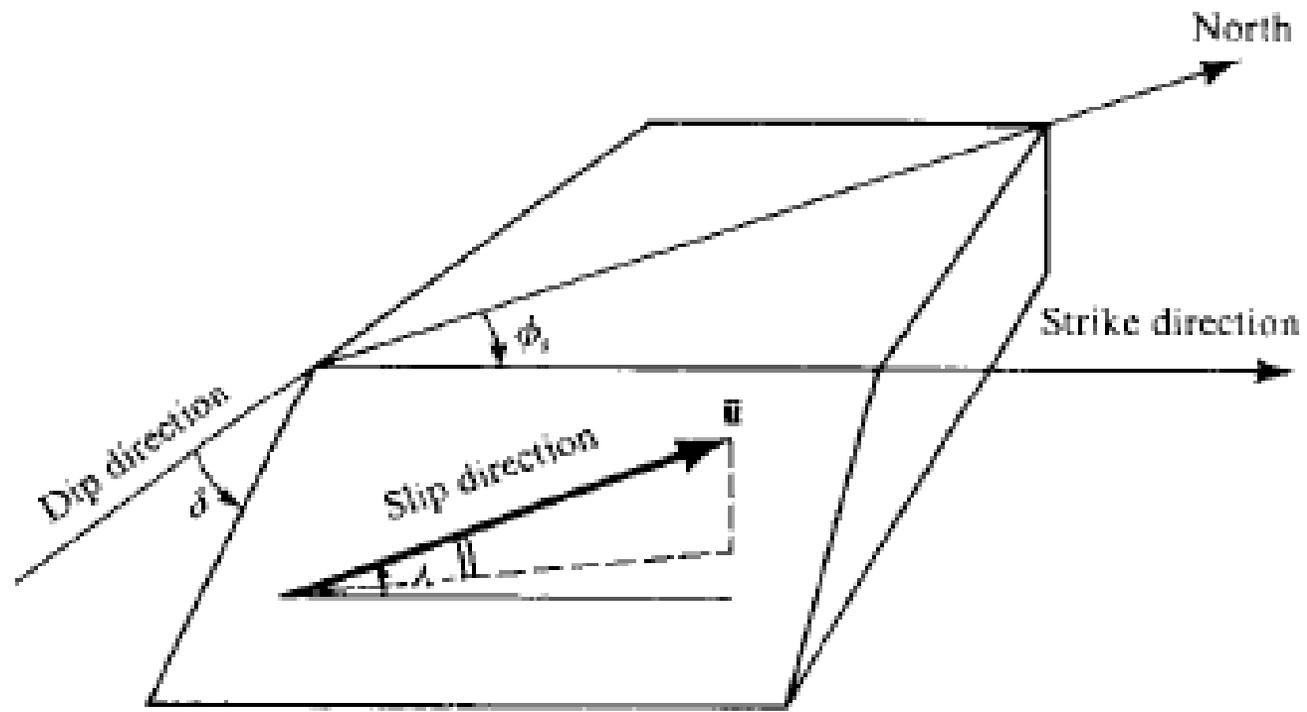
d. Identifier le mécanisme au foyer

D'après B.Delacou et JD.Champagnac





Les sphères focales pour les mécanismes au foyer des 3 types de failles

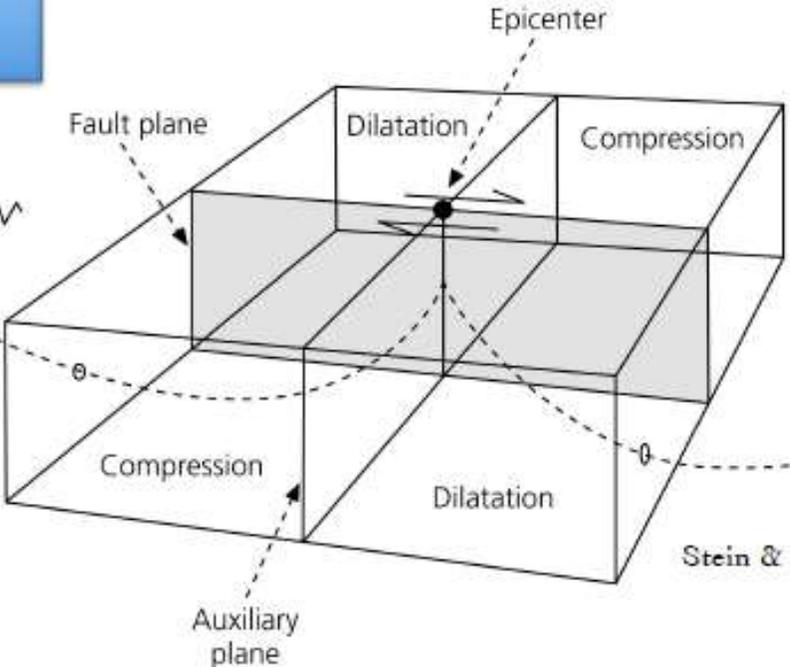


Les paramètres de la faille:

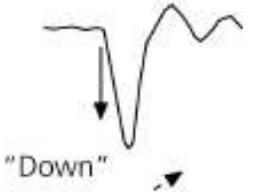
- L'azimut
- Le pendage (dip direction)
- La direction du glissement (slip direction)

Premiers mouvements des ondes P

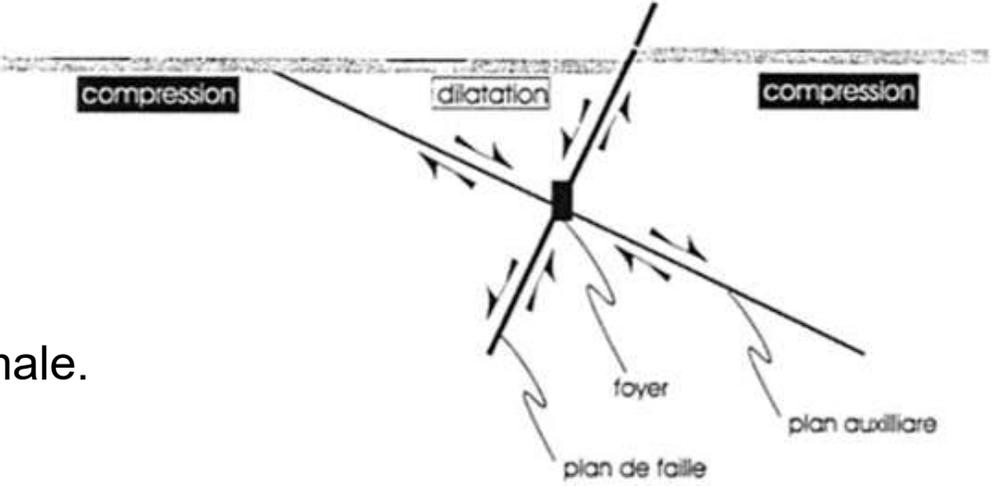
Le sismogramme détecte une compression
"Up"



Le sismogramme détecte une dilatation



Stein & Wysession, 2003



Sphères focales dans le cas d'un décrochement et d'une faille normale.

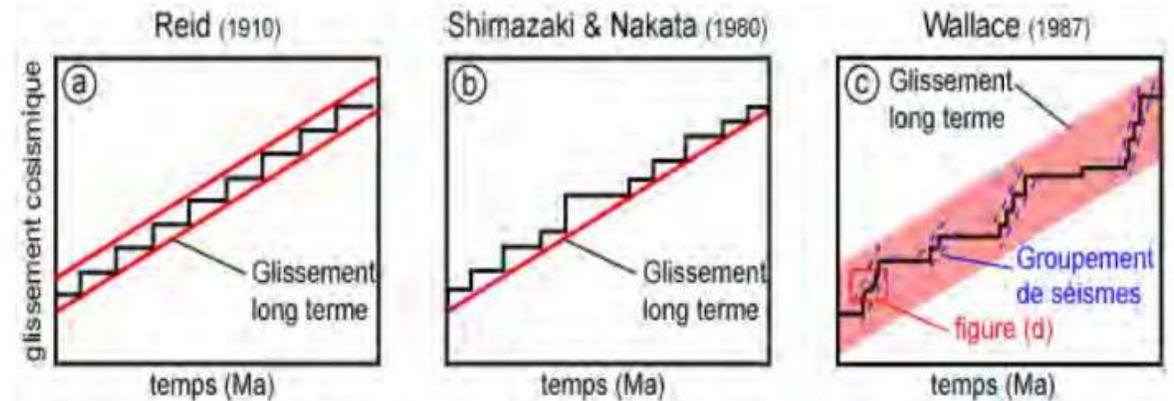
A placer!

e. Etudier la rupture pour prédire, prévenir, retour sur l'aléa sismique

Les données accumulées par les différents outils de mesure de l'activité sismique sont considérables. Même si les sismologues sont incapables de dire quand et où aura lieu le prochain tremblement de terre, ils ont accompli d'énormes progrès dans la compréhension des mécanismes de rupture.

La théorie du rebond élastique, accumulation de contraintes qui finissent par dépasser un seuil, le seuil de rupture de la roche, nécessite que l'on s'intéresse à la récurrence des séismes. Un cas d'école est celui de la FNA, l'activité sismique se déplace inexorablement vers l'ouest ou se trouve Istanbul

[voir aussi](#)



modèles d'accommodation de la déformation par récurrence de séismes : (a) le cycle sismique est complètement périodique, (b) le temps de récurrence est prévisible en fonction du glissement cosismique, (c) les « cluster de séismes » rendent l'estimation du glissement long terme extrêmement difficile.

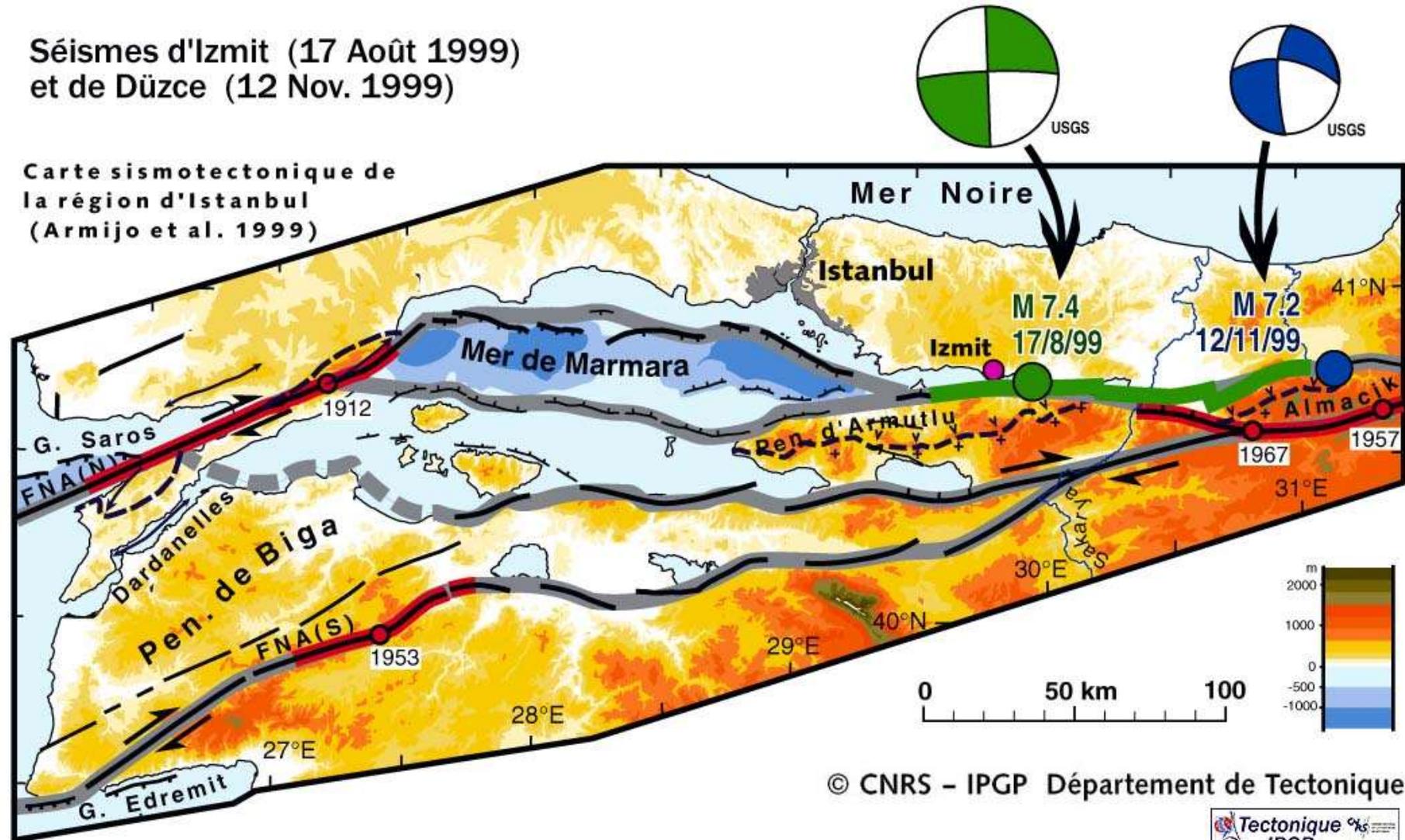
L'étude historique permet de faire des prévisions à long et moyen terme mais pas à court terme. Des observations préalables sont parfois détectables et annonciateurs de séismes : microsismicité, émission de gaz, comportement des animaux...

L'interférométrie et la géodésie spatiale permettent la surveillance des failles actives

Le séisme d'Izmit, 17 août 1999

Séismes d'Izmit (17 Août 1999)
et de Düzce (12 Nov. 1999)

Carte sismotectonique de
la région d'Istanbul
(Armijo et al. 1999)



© CNRS – IPGP Département de Tectonique



Déplacement associé aux différents grands séismes du XXe siècle, en fonction de leur position le long de la FNA

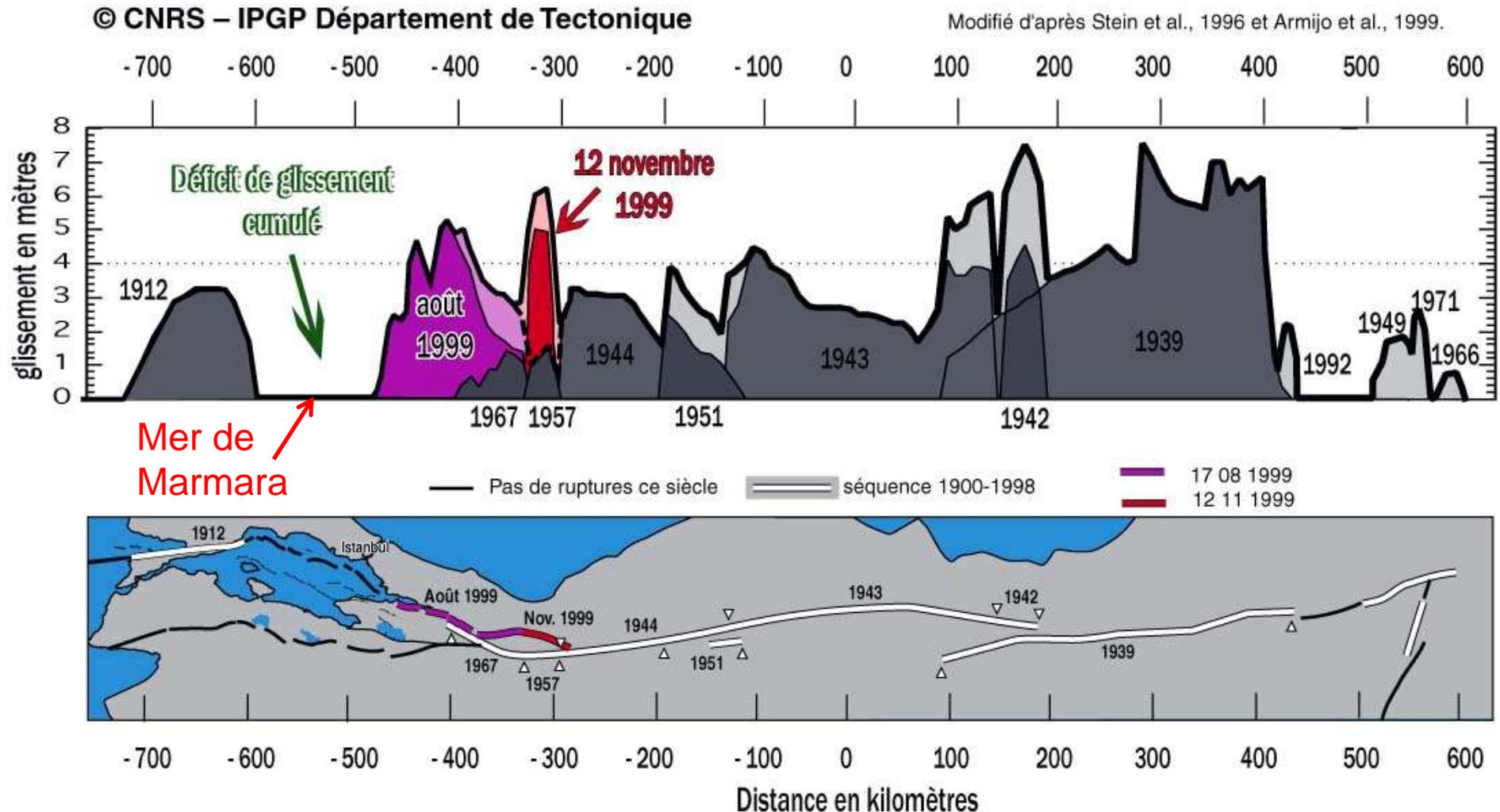
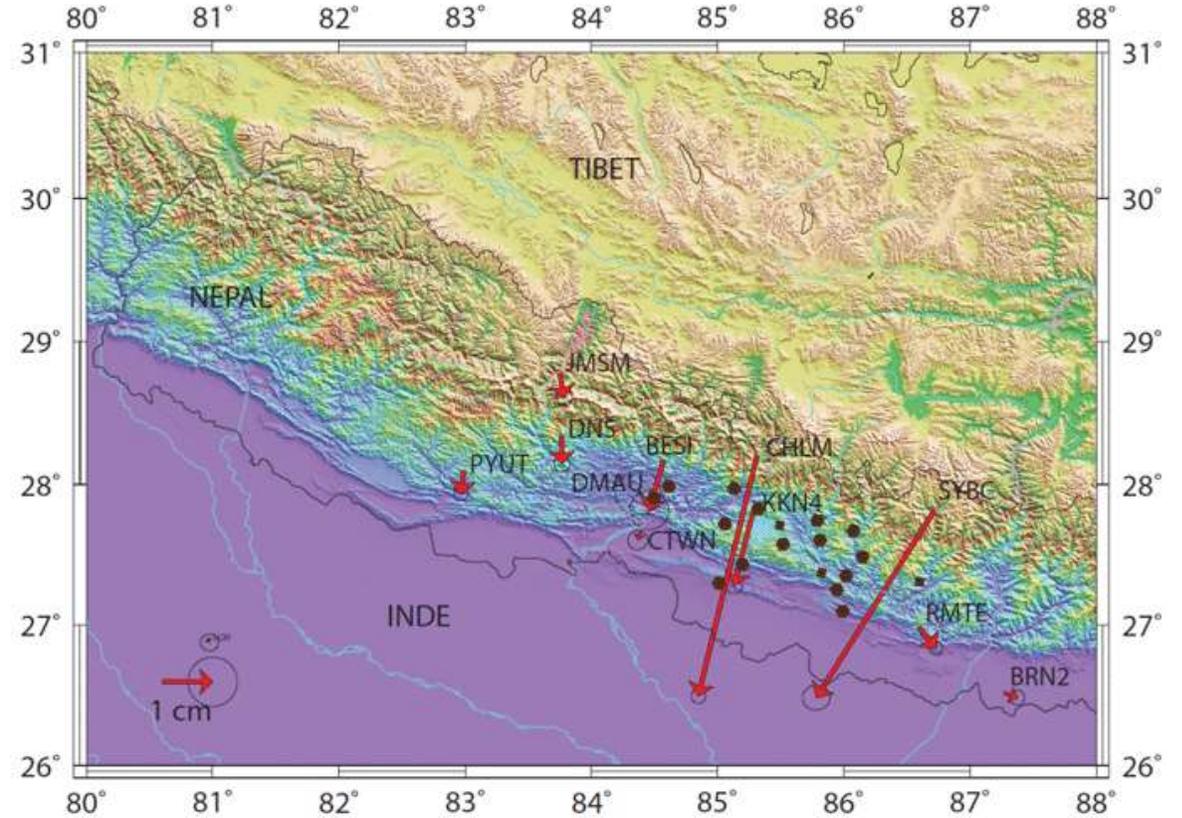
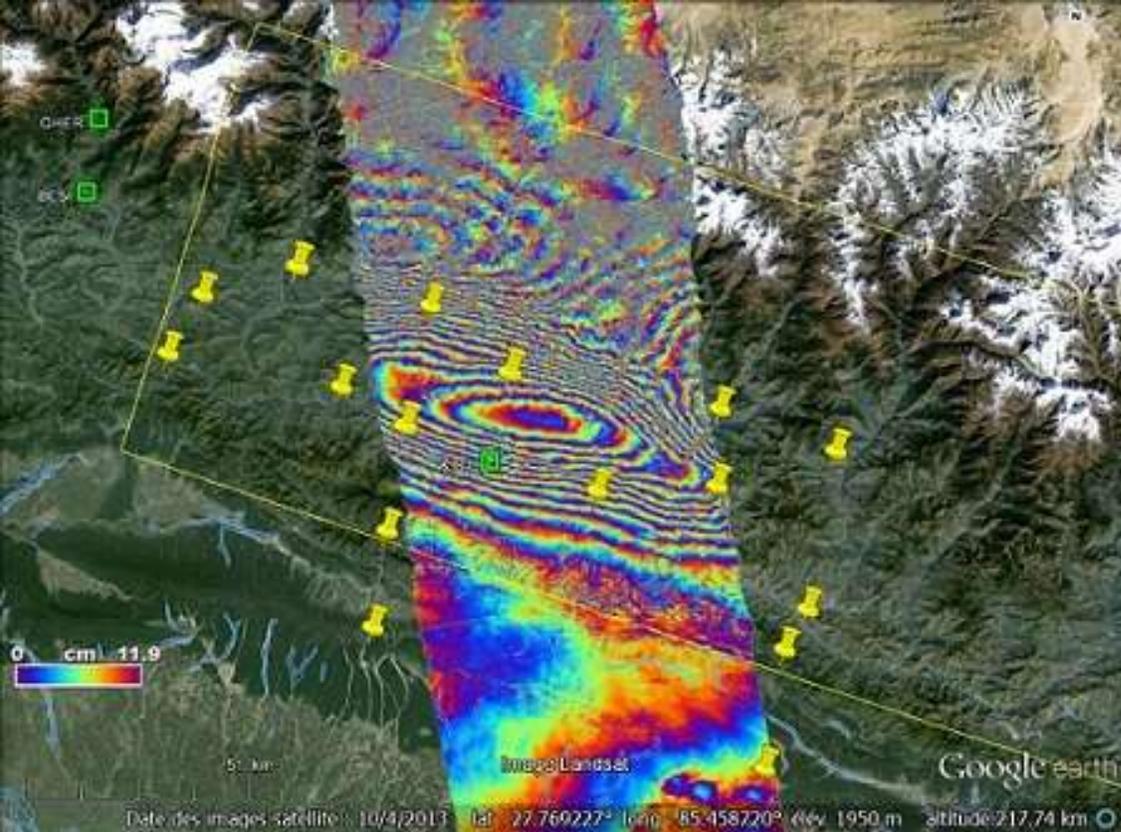
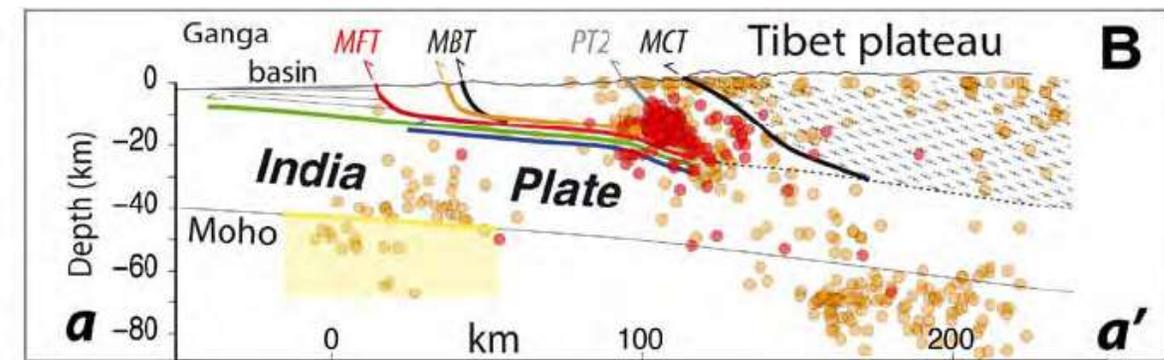


Image en interférométrie radar de la déformation cosismique région de Katmandou après le séisme de 2015

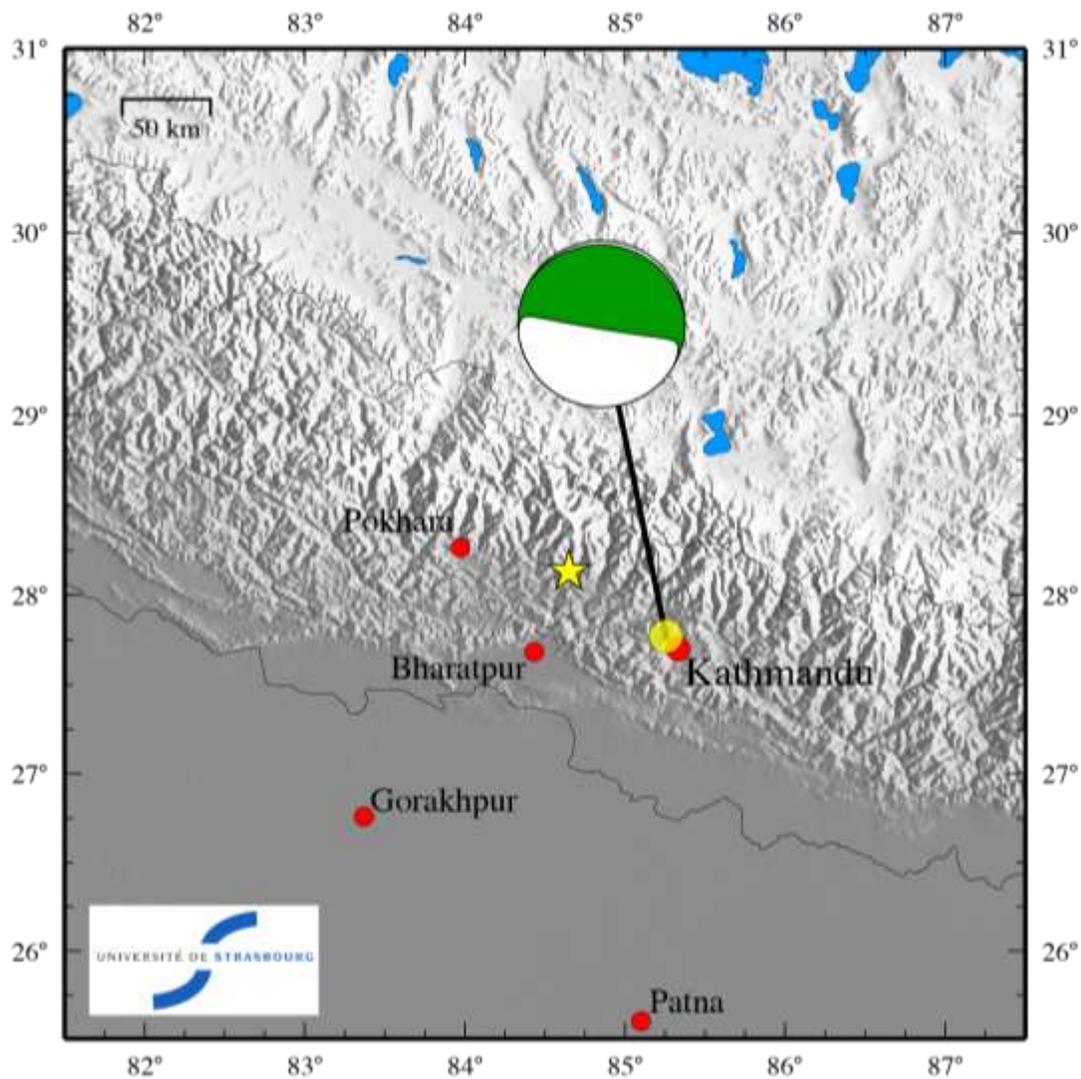
<https://www.isterre.fr/annuaire/pages-web-du-personnel/jean-louis-mugnier/le-grand-seisme-du-25-avril-2015-au-nepal/article/les-mesures-effectuees-apres-le-seisme.html>



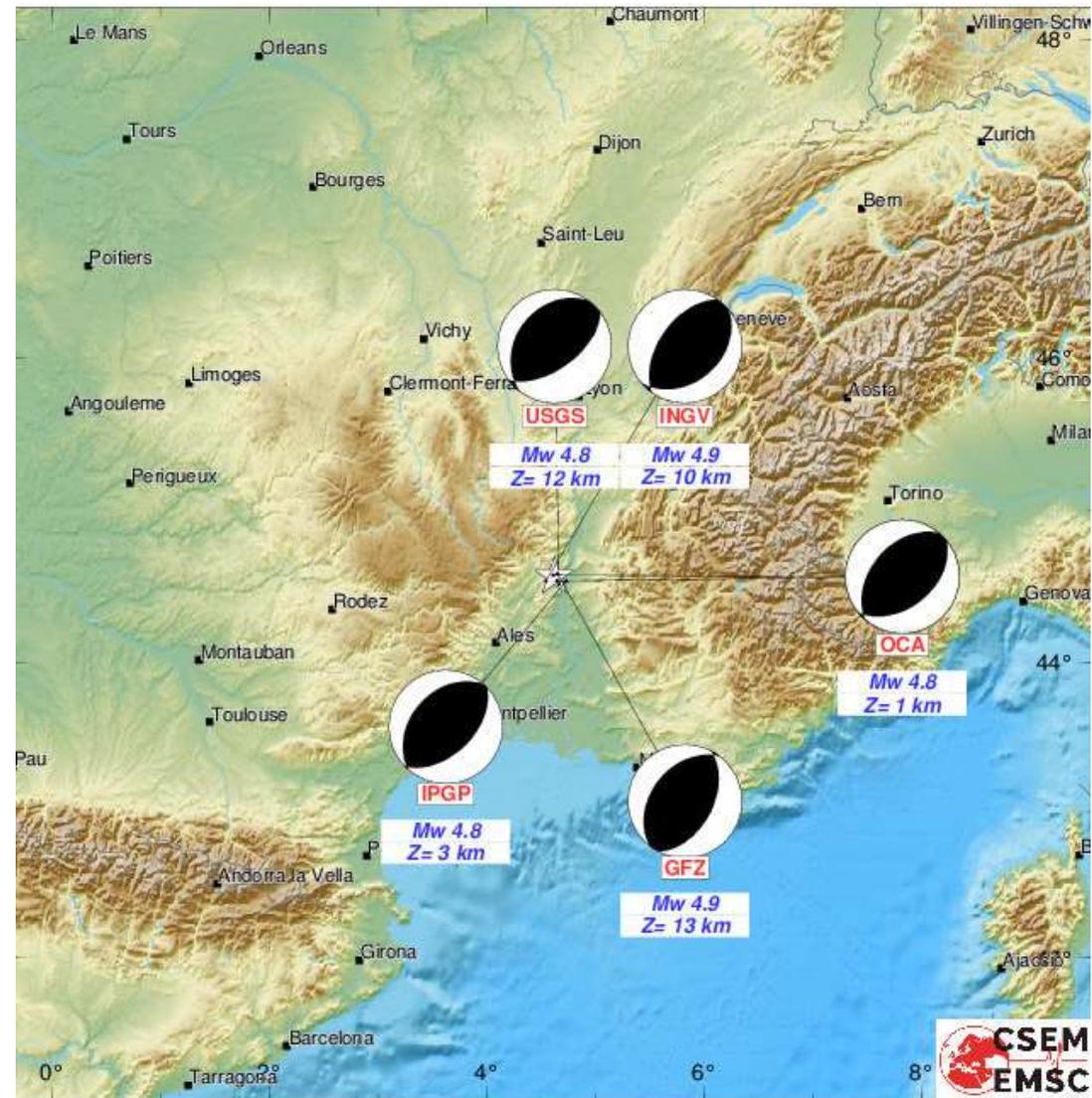
Mesures de vecteurs déplacements par GPS dans les 100 jours consécutifs au séisme



Coupe schématique du plan de rupture



Mécanisme au foyer du séisme de Katmandou
http://wphase.unistra.fr/events/nepal_2015/

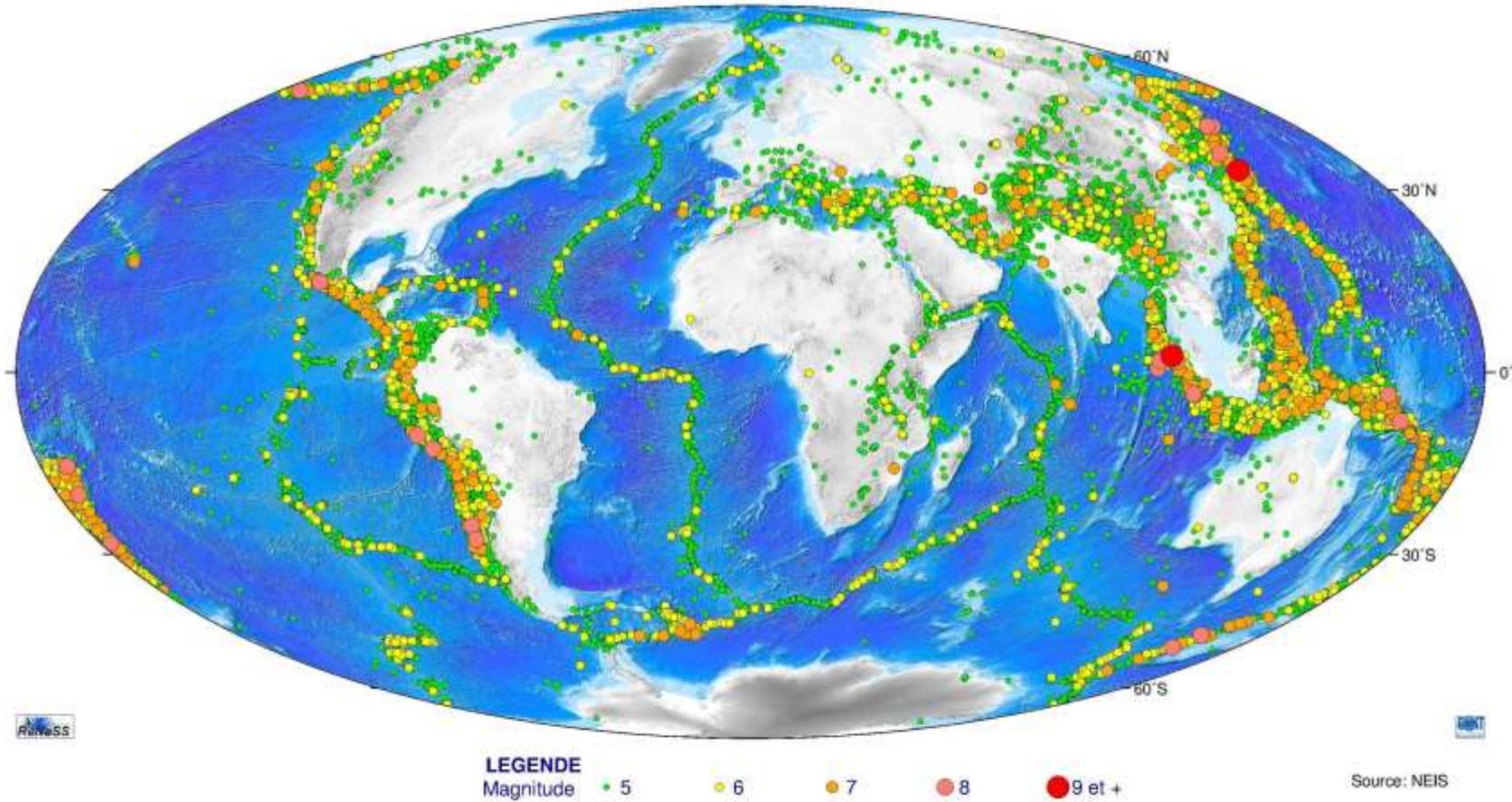


Mécanisme au foyer du séisme du Teil

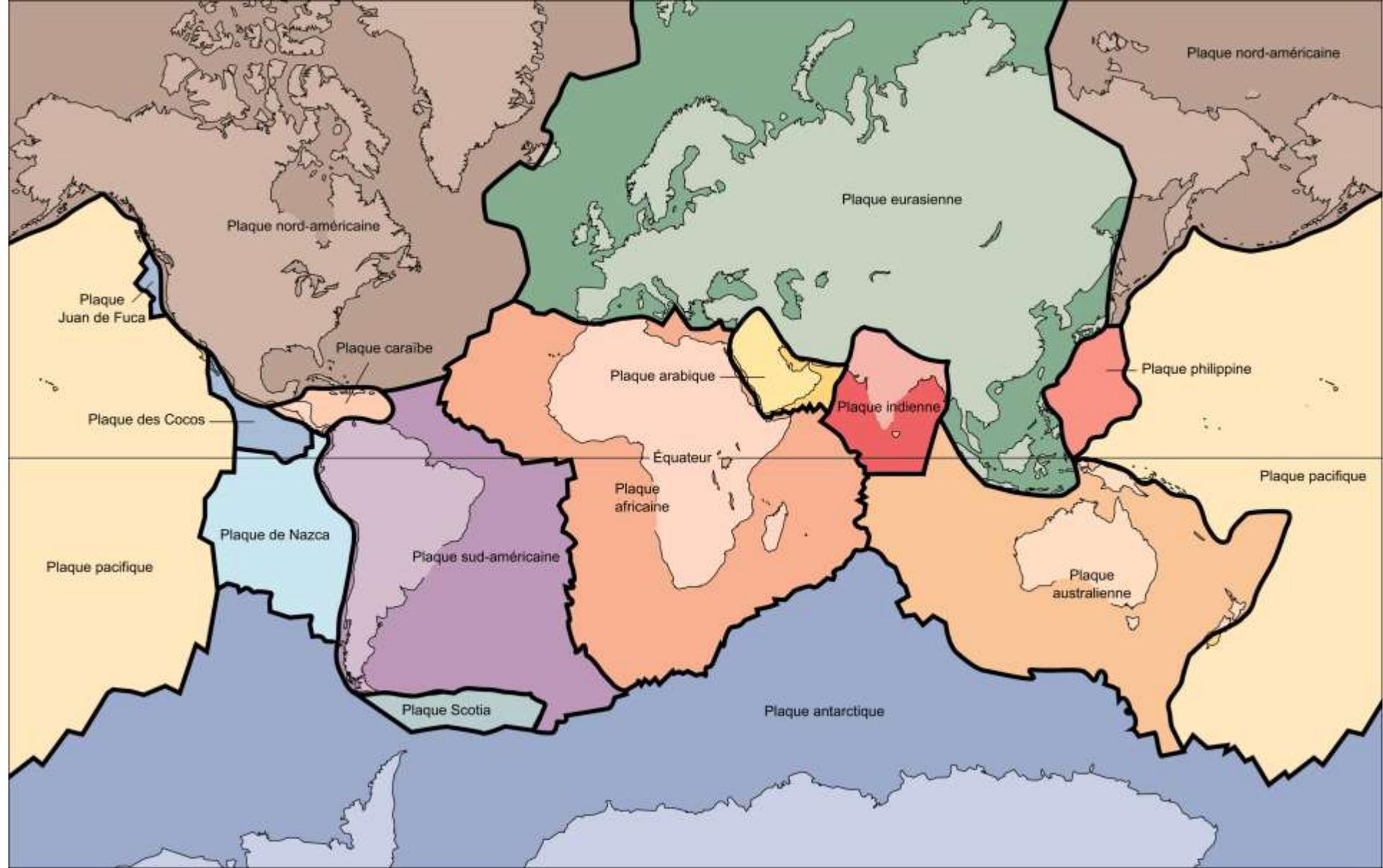
4. Apport des données de la sismicité naturelle à la connaissance de la géodynamique globale: lien entre sismicité et tectonique des plaques

On cherche ici à montrer comment les connaissances sur les séismes et notamment les mécanismes au foyer éclairent la compréhension de la tectonique des plaques

Sismicité du monde de 1973 à 2012

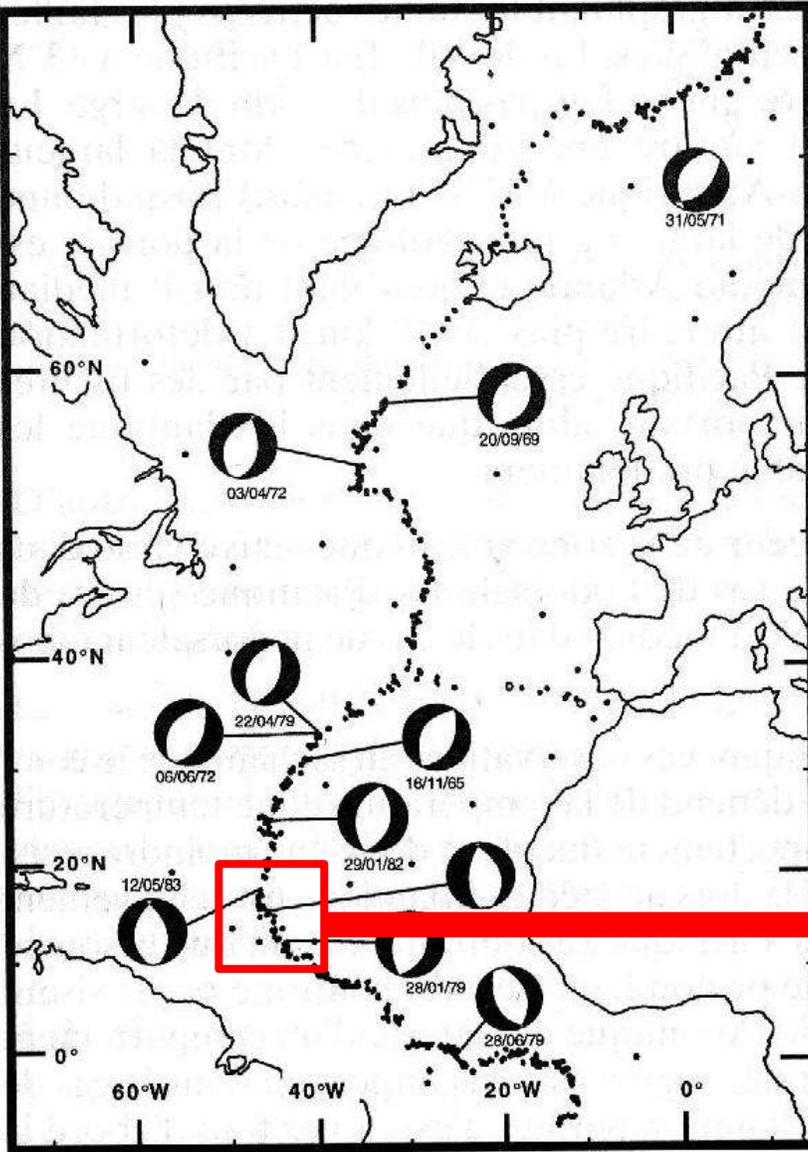


Répartition des séismes et des volcans en activité.



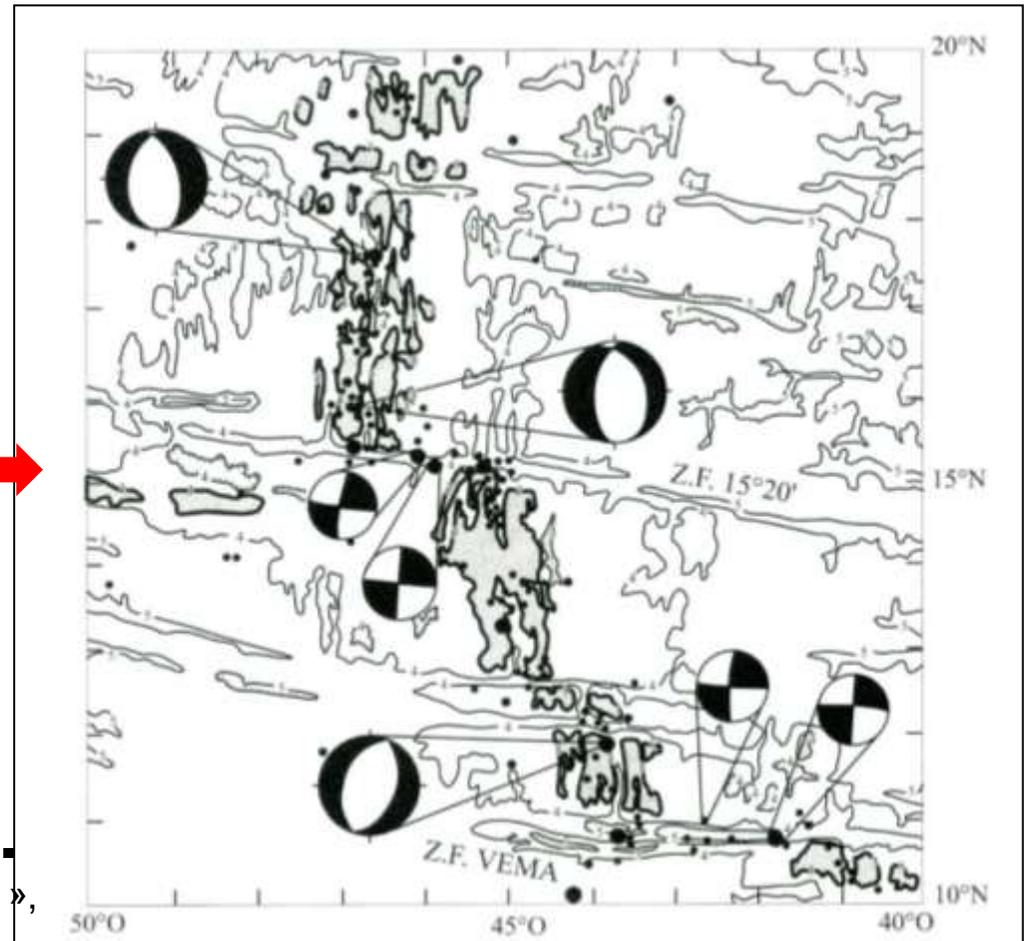
Les principales plaques lithosphériques

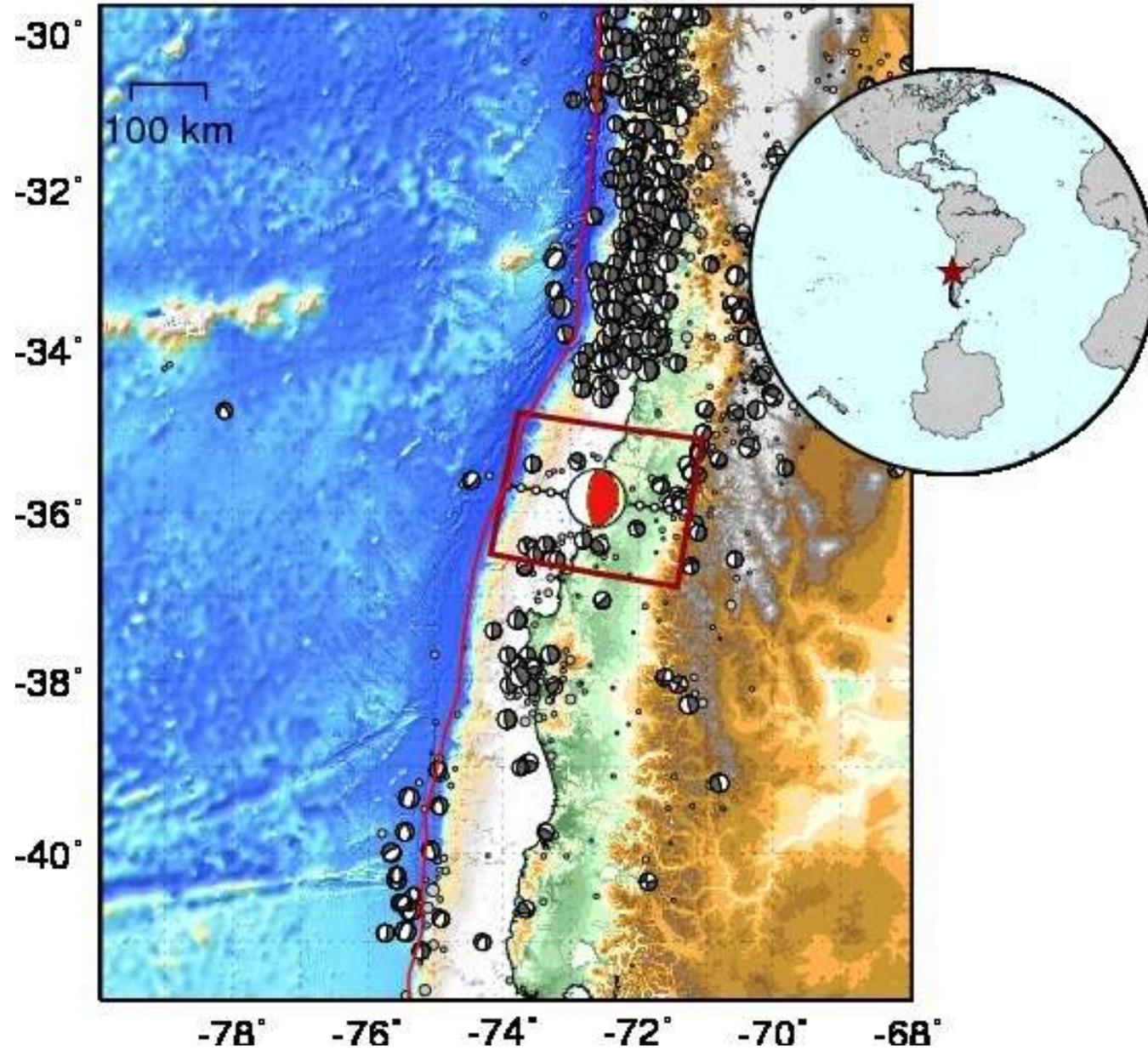
Mécanismes au foyer au niveau de la dorsale Atlantique



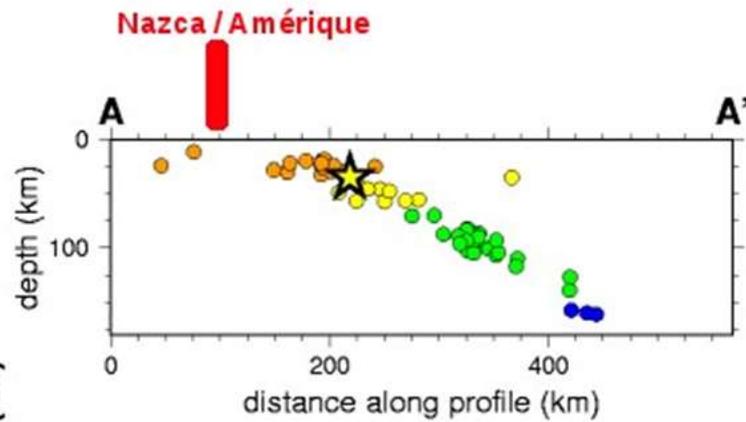
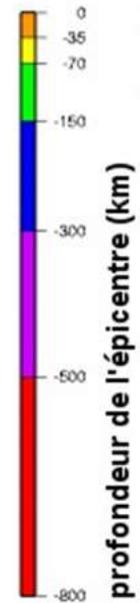
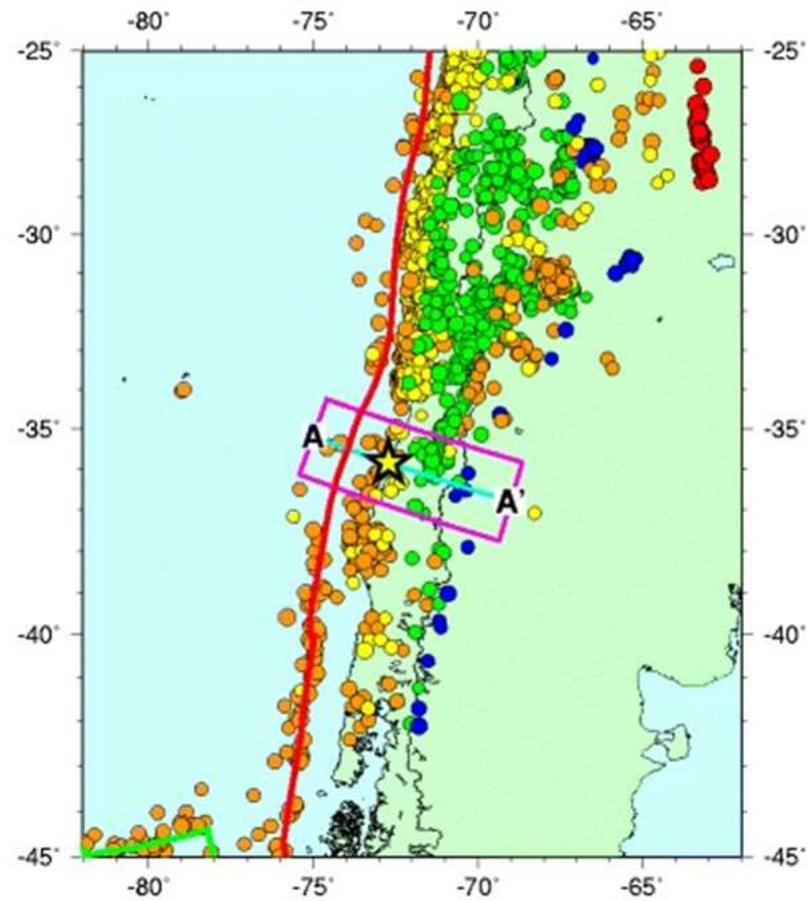
Sismicité de la dorsale atlantique entre 10°N et 20°N.

(Larroque C., Virieux J. « Physique de la Terre solide », G et B Ed.)

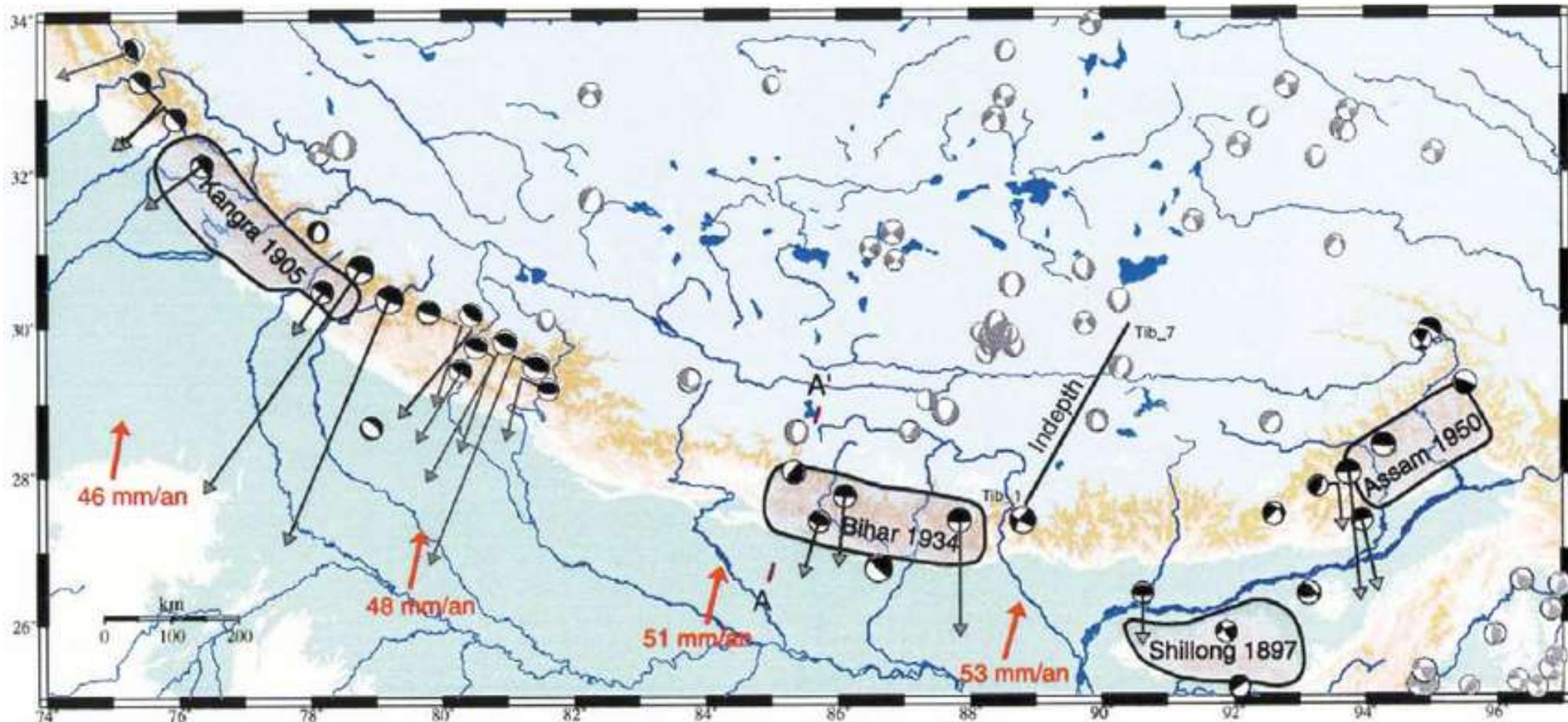




**Mécanismes au foyer
au niveau de la fosse Chili - Pérou**



L'étoile localise l'épicentre du séisme du 27 février 2010



Localisation des zones de rupture des séismes historiques le long de l'arc Himalayen depuis 1897 (modifié d'après [11, 37, 51]).

Mécanismes au foyer des séismes majeurs ($m_b > 5$) de 1963 à 1999, d'après le catalogue CMT d'Harvard et la compilation de Bollinger [6]. Les flèches grises représentent les vecteurs glissement des séismes chevauchants himalayens, résolus sur le plan à pendage vers le nord. Les flèches rouges indiquent le mouvement de l'Inde par rapport à l'Eurasie d'après le modèle de tectonique des plaques global Nuvel1-A [17].