

# Chapitre 24

## Les séismes : origine et conséquences

### Cours

#### PLAN DU CHAPITRE

- 1 La détermination de l'énergie dégagée par un séisme
- 2 La détermination des déplacements liés à un séisme
- 3 La détermination du jeu des failles actives : les mécanismes aux foyers
- 4 La détermination de l'aléa et du risque sismiques

#### ZOOM

- 1 Localiser l'épicentre d'un séisme
- 2 Comprendre les « beach balls »

#### INTRODUCTION

Un **séisme** est la vibration de la surface de la Terre, liée à l'arrivée d'ondes élastiques (P, S et ondes de surface). Ces ondes, engendrées par le jeu d'une **faille active**, sont ainsi une des manifestations de la dissipation de l'énergie interne du globe.

La probabilité qu'un séisme survienne dans une région donnée est l'**aléa sismique**, qui peut constituer une menace sur des **enjeux** économiques et humains. La confrontation de l'aléa sismique et des enjeux permet d'évaluer le **risque** sismique.

- ➔ Comment la sismogénèse (branche de la géophysique qui s'intéresse à l'origine des séismes) permet-elle de préciser les liens entre séismes et failles actives ?
- ➔ Comment éclaire-t-elle sur la prévision de l'aléa et la gestion du risque sismique ?

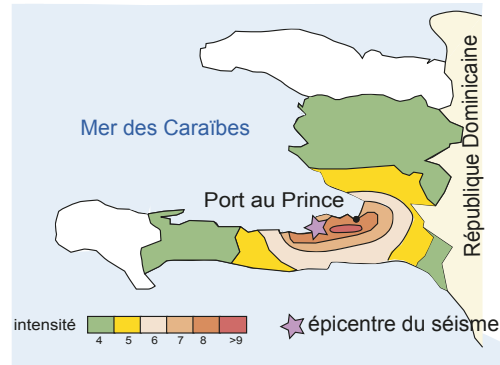
### 1 La détermination de l'énergie dégagée par un séisme

#### 1.1 L'intensité macrosismique d'un séisme

- Les effets reçus par les populations conduisent à la définition de l'**intensité** du **séisme**, estimée sur une échelle conventionnelle (échelle EMS98) et traduisant les manifestations ressenties ou les dégâts occasionnés. Des zones d'égale intensité correspondent à des **lignes isoséistes**, d'intensité croissante en direction de l'**épicentre** (figure 24.1).
- La localisation de l'épicentre par l'intensité des dégâts n'est que très approximative et est impossible sur des zones non habitées, où l'échelle EMS98 ne peut être utilisée.
- C'est l'exploitation des sismogrammes qui permet une localisation précise de l'épicentre.

#### ZOOM 1

Localiser l'épicentre d'un séisme



**Figure 24.1** Carte d'intensité macrosismique du séisme du 12 janvier 2010 à Haïti.

Le séisme a fait plus de 200 000 morts, 300 000 blessés et a obligé le déplacement de plus de 2 millions de personnes. Près de 90 % des habitations ont été détruites. L'intensité macrosismique était de 8 à 10 dans la zone la plus touchée, et de 7 à 8 dans une zone de près de 3 000 km<sup>2</sup>.

- L'estimation de l'intensité peut être fortement modifiée par le contexte géologique local, ce que l'on appelle un **effet de site** (nature du sous-sol, topographie...) ou les caractères anthropiques (qualité des constructions, nature des édifices, qualité des réseaux...). La prise en compte de l'ensemble des facteurs conduit à un **microzonage** qui affine la détermination de l'intensité macrosismique.

## 1.2 La magnitude d'un séisme

- **Pendant le séisme**, il y a un **relâchement rapide d'énergie élastique**, via un **glissement** le long d'une **faille active**. L'énergie dégagée lors du séisme se quantifie en faisant le produit du déplacement  $x$  au niveau de la faille, de la surface  $S$  de la faille, et du module de cisaillement  $\mu$ , qui a la dimension d'une pression, et qui quantifie la résistance du terrain à la déformation. Elle est notée  $M_0$  et dénommée **moment sismique** :

$$M_0 = x \cdot S \cdot \mu$$

- La **magnitude de moment  $M_w$**  se calcule à partir du logarithme du moment sismique  $M_0$ , et donc fournit aussi une estimation de l'énergie dégagée lors du séisme : un séisme de magnitude  $M$  est environ 30 fois plus puissant qu'un séisme de magnitude  $M-1$ . Le séisme haïtien avait une magnitude  $M_w$  égale à 7.0, modérée par rapport au séisme du 11 mars 2011 au Japon ( $M_w = 9.0$ , plus de 900 fois plus puissant).
- La **magnitude de Richter** est peu utilisée. Locale, cette magnitude est calculée à partir de sismogrammes obtenus proches de l'épicentre (centaines de km).

## 2

## La détermination des déplacements liés à un séisme

### 2.1 Apports de la géodésie spatiale : GPS et interférométrie radar

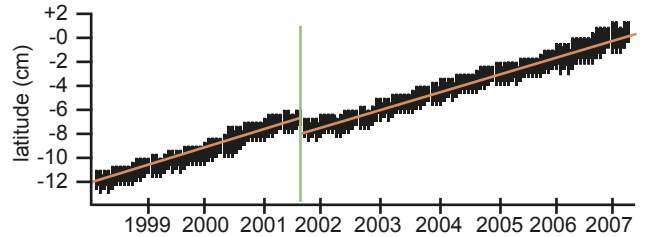
La **géodésie spatiale** est la mesure de la surface de la Terre par des observations satellitaires.

- Le **système GPS** (*Global Positioning Survey*) détermine la position de balises (en latitude, longitude et altitude) au mm près, et permet de quantifier des déplacements.
- La **figure 24.2** présente le relevé de la latitude d'une balise en Islande, sur 10 ans. On ne tient pas compte du « bruit » du signal en n'analysant que la droite moyenne (en rouge). La latitude est indiquée en cm.

On repère :

- des déplacements continus : la latitude augmente, donc la position s'éloigne de l'équateur (déplacement vers le Nord) à une vitesse d'environ  $15 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$  (pente de la droite moyenne) ;
- un déplacement discontinu, instantané, situé vers la fin 2001, d'environ 1 cm vers le Sud. Il correspond à un glissement le long d'une faille active, associé à un séisme. On parle de déplacement **cosismique**, le déplacement continu étant qualifié d'**intersismique**.

Figure 24.2 Relevé GPS de la latitude de la station islandaise Höfn entre 1998 et 2008.



- **L'interférométrie radar** mesure les déformations continues de la surface du sol. On compare deux images radar satellitaires d'une même région, prises selon le même angle de visée à deux moments différents. La superposition des images et leur traitement informatique font apparaître des franges colorées. Le nombre de franges et l'orientation de leurs couleurs permettent d'orienter et de quantifier les déplacements subis entre les deux moments (figure 24.3).

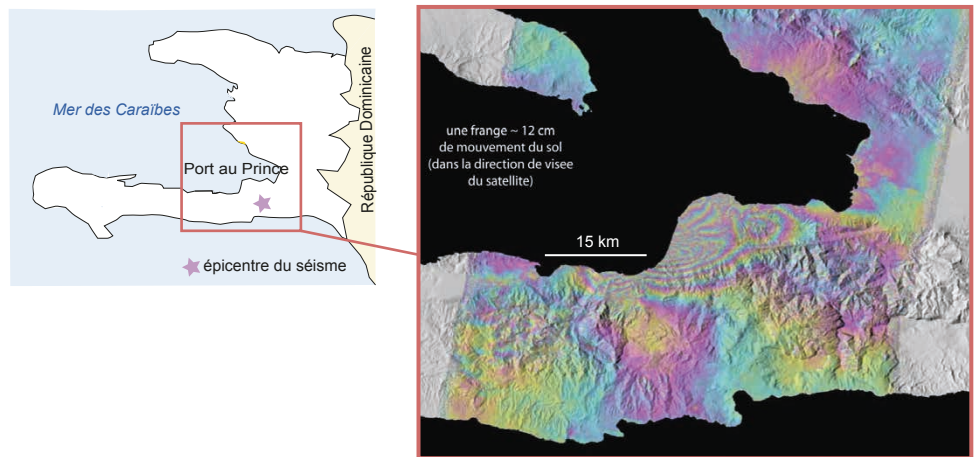


Figure 24.3 Carte radar des déplacements liés au séisme du 12 janvier 2010 à Haïti.

L'image est issue de la combinaison de deux prises de vue, avant et après le séisme de 2010 à Haïti. Chaque frange de couleur correspond ici à un soulèvement de la surface de 11,8 cm (soit un soulèvement total de près de 80 cm).

(ALOS imagery © JAXA/METI. The ALOS-PAL SAR data are copyright of the Japanese Space Agency (JAXA) and the Japanese Ministry of Economy, Trade and Industry (METI)).

### 1.3 Déplacements intersismiques et cosismiques : le cycle sismique

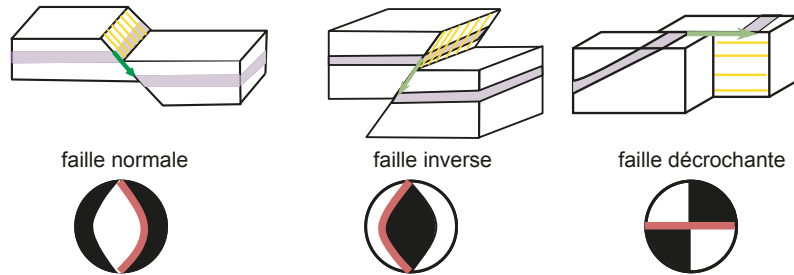
- **Pendant la période intersismique**, les déplacements sont continus. S'il y a un différentiel de vitesse entre deux secteurs, une déformation élastique s'accumule à leurs limites. La sismicité historique permet de l'estimer : si entre les deux derniers séismes il s'est écoulé  $x$  années, et que la vitesse de déplacement relatif des deux secteurs est égale à  $v \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ , la déformation élastique accumulée entre les deux séismes correspond à  $x \cdot v$  (en cm).
- **Pendant le séisme**, il y a un relâchement brusque de l'énergie élastique accumulée, par glissement **cosismique** le long d'une fracture. Ce glissement engendre les ondes P et S.

- La notion de **cycle sismique** découle de l'accumulation d'énergie élastique entre deux blocs se déplaçant à des vitesses distinctes, puis de sa libération lors du séisme principal, et lors de **répliques**. Ensuite, elle s'accumule à nouveau, jusqu'au séisme suivant. La réalité est souvent plus complexe et il n'y a pas de réelle périodicité.

### 3 La détermination du jeu des failles actives : les mécanismes au foyer

Le sens du glissement d'une faille active (**mécanisme au foyer**) ne peut souvent être déterminé qu'à partir de l'étude des sismogrammes, les failles actives atteignant rarement la surface. Le mécanisme au foyer est représenté par des **stéréogrammes** (« **beach-balls** » des auteurs anglo-saxons), propres à chaque type de faille associée au séisme.

Les mécanismes au foyer des trois types de failles (normale, inverse, décrochante) sont présentés dans la [figure 24.4](#).



**Figure 24.4** « Beach-balls » (projections stéréographiques des sphères focales) correspondant à une faille normale, une faille inverse et un décrochement dextre. Les plans de faille sont surlignés en rouge sur les « beach-balls ».

#### ZOOM 2

Comprendre les « beach balls »

À l'échelle globale, les épicentres sont surtout localisés aux **limites de plaques** (mais il existe aussi des séismes intraplaques) et tous les types de mécanismes au foyer peuvent se rencontrer dans les différents contextes ([figure de synthèse](#)).

- Au niveau des dorsales : prédominance des failles normales actives (extension).
- Au niveau des failles transformantes de dorsales : mécanismes en décrochement, liés au coulisage des deux lithosphères océaniques en expansion.
- Au niveau des zones de subduction : extension et compression suivant la profondeur des foyers ou le régime tectonique de la plaque chevauchante.

### 4 La détermination de l'aléa et du risque sismiques

#### 4.1 Quantifier l'aléa

À l'échelle régionale, l'analyse de la sismicité historique est une démarche féconde pour estimer un aléa, se fondant sur la **récurrence temporelle** des séismes (**cycle sismique**). S'y ajoutent des mesures de déplacements (GPS), qui permettent d'estimer la quantité de déplacement inter-sismique, de part et d'autre d'une faille. On dispose ainsi d'une estimation de l'énergie élastique accumulée et par suite de la magnitude d'un séisme attendu.

Après un séisme, des mesures (GPS, interférométrie radar) pratiquées sur une zone de faille permettent aussi d'identifier les zones où le glissement, donc l'énergie libérée, ont été faibles : l'aléa y est alors augmenté.

La synthèse des données historiques, sismologiques, géologiques constitue une **carte de l'aléa sismique** : on délimite des zones définies par une certaine valeur de l'accélération maximale prévisible du sol (**accélération cosismiques**, en % de g), qui est le véritable paramètre destructeur.

### 4.2 Prévoir l'aléa et prévenir le risque

La **prévision** de l'aléa repose sur une surveillance active et une démarche probabiliste. **Exemple de loi probabiliste** : après un séisme principal, des **répliques** surviennent autour de l'épicentre, dans un rayon n'excédant pas la longueur de la faille active, quelques heures à quelques semaines après le séisme principal. Un séisme de magnitude M engendrera statistiquement une réplique de magnitude M-1, une dizaine de répliques à M-2, une centaine à M-3, etc.

La confrontation des cartes de l'aléa aux **enjeux** présents dans le secteur (infrastructures, nature des habitations, densité de la population), fournit une quantification du **risque**. **Prévenir** le risque revient à diminuer la **vulnérabilité** des enjeux (éducation des populations sur le risque sismique, **normes de construction parasismiques**).

#### ZOOM 1

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

Lors d'un séisme, les ondes sismiques de volume P et S arrivent aux stations avec un temps qui dépend de la distance à l'épicentre.

À partir d'un sismogramme enregistré dans une station située à la distance épicentrale d, on ne peut pas connaître l'heure du séisme mais on peut facilement mesurer le retard des ondes S par rapport aux ondes P ( $t_{S-P}$ ), qui dépend de d et des vitesses  $V_P$  et  $V_S$ .

$$t_{S-P} = \frac{d}{V_S} - \frac{d}{V_P} = d \cdot \frac{V_P - V_S}{V_P \cdot V_S} \text{ donc } d = t_{S-P} \cdot \frac{V_P \cdot V_S}{V_P - V_S}$$

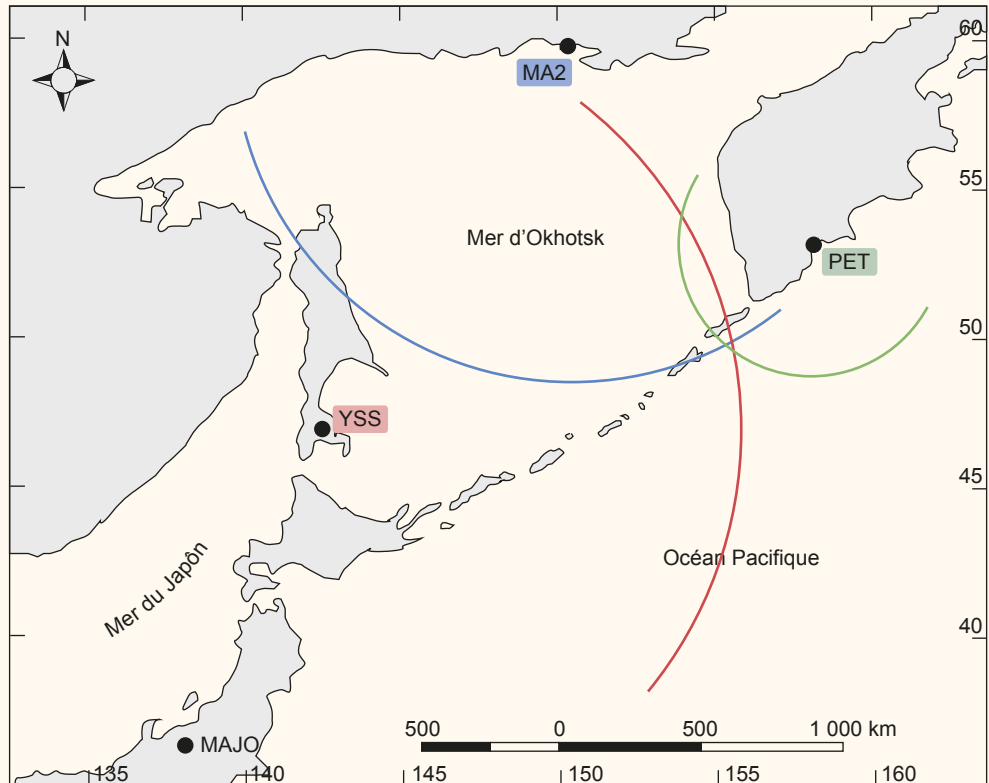
Si on dispose d'enregistrements issus d'au moins trois stations situées à des distances épicentrales différentes, on peut, moyennant une hypothèse sur les valeurs de  $V_P$  et  $V_S$ , déterminer les trois distances épicentrales. En traçant sur une carte, autour de chaque station, **un cercle de rayon égal à la distance de l'épicentre**, le point d'intersection des cercles est l'épicentre.

##### Application :

Un séisme, dont l'épicentre est au NW de l'océan Pacifique, a été enregistré sur 4 stations. On fournit les temps d'arrivée des ondes P et S aux 4 stations : pour chaque station, on calcule le retard des ondes S par rapport aux ondes P ( $t_{S-P}$ ) et, connaissant les vitesses des ondes P ( $V_P = 7.74 \text{ km.s}^{-1}$ ) et des ondes S ( $V_S = 4.32 \text{ km.s}^{-1}$ ), on calcule la distance épicentrale d.

station	Heure d'arrivée (heure : minute : seconde)			
	P	S	Retard $t_{S-P}$	Distance épicentrale d
PET	03 : 02 : 04	03 : 02 : 52	48 s	470 km
MA2	03 : 03 : 42	03 : 05 : 48	126 s	1 232 km
YSS	03 : 04 : 19	03 : 06 : 54	155 s	1 515 km
MAJO	03 : 06 : 25	03 : 10 : 40	255 s	2 494 km

En traçant des cercles de rayons correspondant aux distances épacentrales, on localise l'épicentre à l'intersection des quatre cercles (donc au niveau de l'arc insulaire qui sépare la mer d'Okhotsk de l'océan Pacifique).



### ! Attention !

Pour localiser un hypocentre (ou foyer), la même méthode est applicable mais il faut tracer au moins trois sphères et leur point d'intersection souterrain est l'hypocentre.

## ZOOM 2

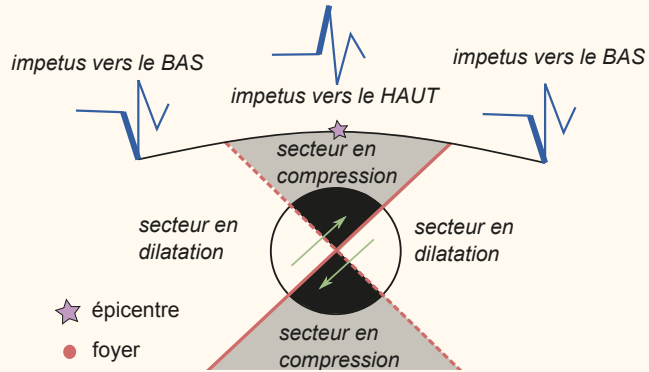
### Comprendre les « beach balls »

#### Comment se construit un mécanisme au foyer ?

On représente une sphère virtuelle centrée sur le foyer, la **sphère focale**. On la divise en **quatre quadrants** délimités par deux plans perpendiculaires qui se croisent au niveau du foyer. L'un de ces plans est le **plan de faille**, l'autre est un plan virtuel (le **plan auxiliaire** ou **plan nodal**).

Dans une station donnée qui enregistre un séisme, on s'intéresse au premier mouvement du sol tracé par un sismomètre vertical : ce premier mouvement (appelé « impetus des P ») est soit dirigé vers le haut (le sol a commencé par se soulever, donc à s'éloigner de l'hypocentre) : le secteur est dit **en compression**, soit dirigé vers le bas (le sol a alors commencé à s'affaisser, donc à se rapprocher du foyer). On dit alors que le secteur de la station est **en dilatation**.

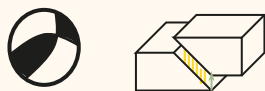
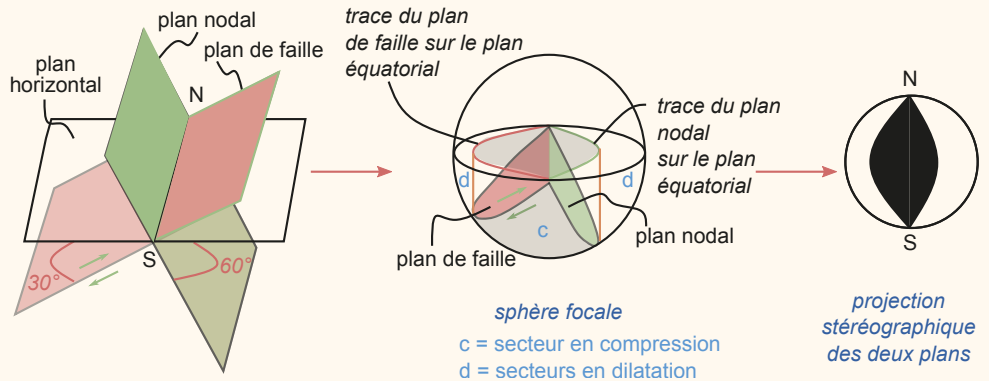
On recense pour toutes les stations qui ont enregistré le séisme, la nature du premier mouvement (compression ou dilatation). En utilisant les impetus relevés dans les différentes stations sismiques, on remplit en **noir** les quadrants de la sphère en **compression** et en **blanc** ceux qui sont en **dilatation**.



**Comment se lit une projection stéréographique ?**

Pour faciliter la représentation, on a coutume d'utiliser une projection en 2D de l'hémisphère inférieure de la sphère sur son plan équatorial : c'est une **projection stéréographique** (ou « beach-ball »). Les deux plans apparaissent sur la projection comme deux arcs de cercle si le pendage n'est ni horizontal ni vertical.

- La projection est orientée (N en haut, S en bas, W à gauche, E à droite).
- La convexité de chaque arc de cercle donne le sens du pendage du plan correspondant
- Plus l'arc de cercle est proche du bord du disque équatorial, plus le pendage est faible
- Plus la projection du plan est proche du diamètre du disque plus le pendage est fort.



Les mécanismes au foyer révèlent que les failles ont souvent un jeu composite : c'est le cas représenté ci-contre, où la faille représentée a un jeu inverse et décrochant sénestre.

# Réviser

## Résumé

- La déformation cassante, essentiellement localisée dans les portions fragiles de la lithosphère, engendre des ondes sismiques enregistrées sur des sismogrammes. Leur analyse permet de localiser l'épicentre et le foyer d'un séisme, de caractériser son mécanisme au foyer et de quantifier la magnitude de moment du séisme.
- La géodésie spatiale (GPS, interférométrie radar) permet de mesurer des déplacements continus (intersismiques), et les déplacements discontinus (cosismiques) liés au brusque relâchement de l'énergie élastique accumulée.
- Ces études débouchent sur la quantification de l'aléa sismique, qui, confrontée à la vulnérabilité des enjeux, définit le risque sismique.
- À l'échelle des plaques, l'activité sismique est essentiellement concentrée aux limites de plaques et microplaques bien qu'il existe des séismes intraplaques.

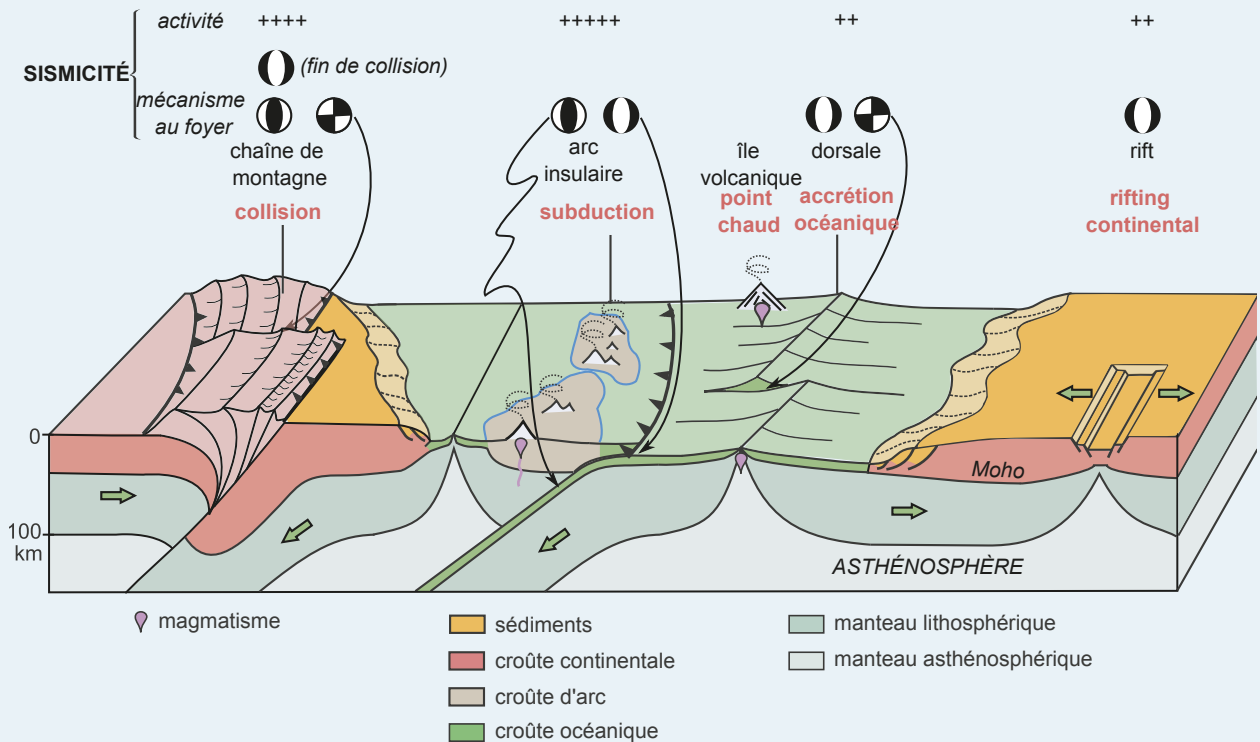


Figure de synthèse Aléa sismique et tectonique des plaques.

# S'entraîner

## QCM de connaissances

- À propos des régions sismiquement actives :
  - a. Les séismes liés à l'activité de failles inverses sont généralement plus puissants que les séismes liés à l'activité de failles normales.
  - b. Un séisme est dû à une brusque transition entre déformations ductile et fragile.
  - c. Les régions sismiquement actives sont toujours situées à des limites latérales de plaques ou de microplaques.
  - d. Une région ayant subi un séisme de magnitude  $M$  a pu avoir subi un séisme de magnitude  $M+1$  dans l'année qui précède.
- On représente [figure 24.5](#) cinq mécanismes au foyer. Pour chaque mécanisme, le plan de faille est représenté en rouge. Le Nord est systématiquement orienté comme l'indique la flèche dessinée à droite.

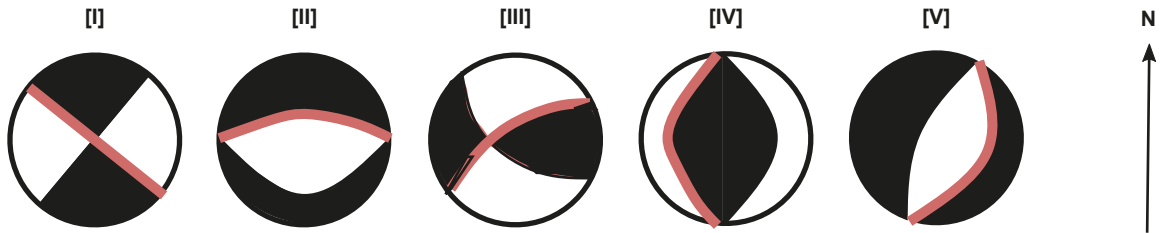


Figure 24.5

- a. [I] est une faille verticale de direction NW-SE et à jeu décrochant dextre.
  - b. [II] est une faille normale de direction W-E et de pendage assez fort vers le sud.
  - c. [III] est une faille à jeu décrochant et inverse.
  - d. [IV] est une faille normale de direction N-S et de pendage assez fort vers l'ouest.
  - e. [V] est une faille inverse à pendage très faible.
- Toujours à propos des mécanismes au foyer, les associations suivantes sont-elles exactes ?
    - a. [I], [III], [IV],  $\Leftrightarrow \sigma_1$  horizontale.
    - b. [I] et [IV]  $\Leftrightarrow$  zones de collision actives.
    - c. [I] et [IV]  $\Leftrightarrow$  zones de subduction actives.
    - d. [II]  $\Leftrightarrow$  axe d'une dorsale.

## QCM sur document

- Les données [figure 24.6](#) indiquent l'évolution de la position des stations GPS d'Istanbul (latitude 41.015 N, longitude 28.979 E) et d'Ankara (latitude 39.925 N, longitude 32.866 E). Dans ces positions, une latitude croissante indique un déplacement vers le nord, une longitude croissante indique un déplacement vers l'est.
  - a. La station Ankara se déplace vers le nord-est, la station Istanbul vers le sud-ouest.
  - b. La station Ankara se déplace à une vitesse d'environ  $1.5 \text{ cm.a}^{-1}$ .
  - c. Il y a une dorsale océanique entre Ankara et Istanbul.
  - d. Les tracés indiquent que ces deux secteurs sont le siège d'une activité sismique permanente enregistrée par les instruments.

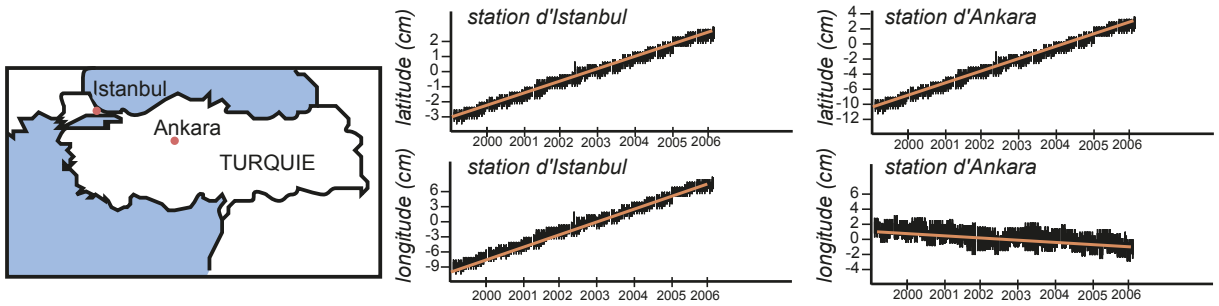


Figure 24.6

- 2 La zone en bleu sur la figure 24.7 est une mer intérieure dans un secteur continental du continent eurasiatique. Les failles actives et quelques mécanismes au foyer de séismes historiques sont indiqués.

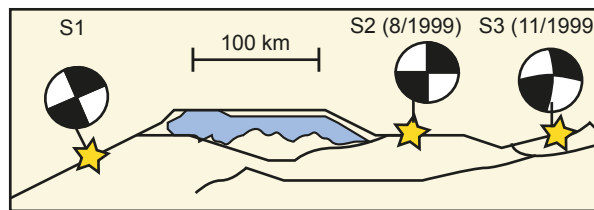


Figure 24.7

- a. Les failles actives sont des décrochements dextres.
- b. Le séisme S3 avait forcément une magnitude plus faible que celle de S2.
- c. La mer intérieure s'est formée en contexte extensif.
- d. Le mécanisme au foyer S3 indique que le jeu de la faille active a une composante inverse.

### Question de synthèse courte (oral du concours ENS)

Les enseignements apportés par l'étude des séismes.

### Sujet sur documents

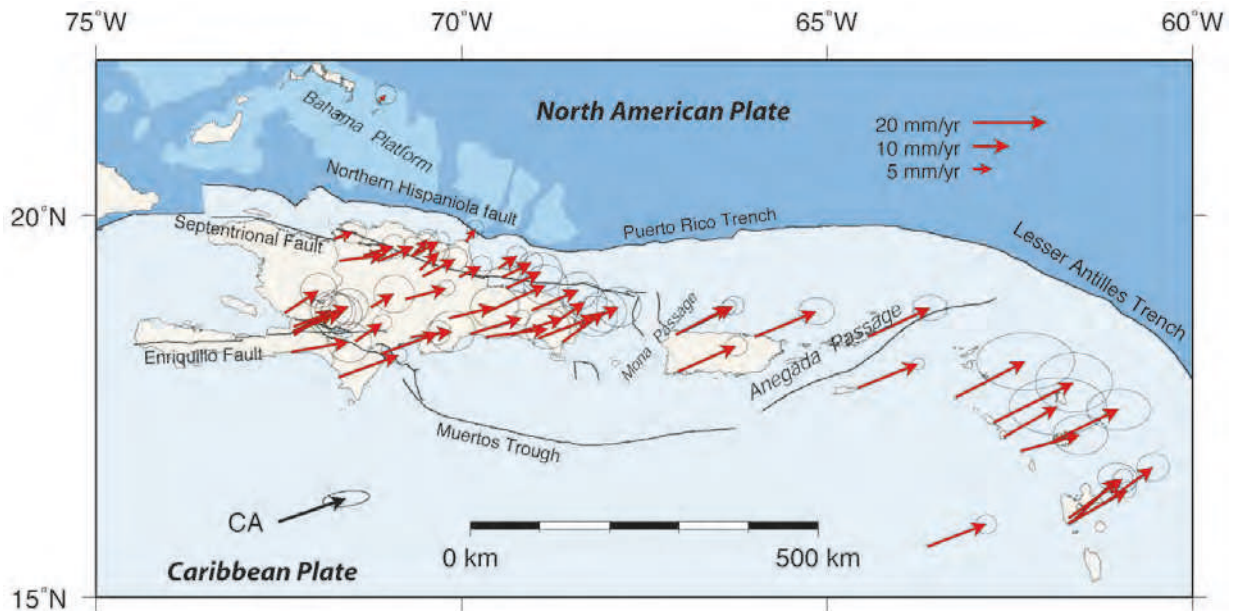
Un séisme de magnitude  $M_w$  de 7 à 7.3 s'est produit le 12 janvier 2010 à Haïti, sur l'île d'Hispaniola au nord des Caraïbes. Le séisme était lié à une faille active située 5 kilomètres au sud de la capitale de Port-au-Prince. La rupture fut d'environ 70 km de long avec un glissement cosismique de 1 à 2 m en moyenne.

**Un séisme de telle ampleur dans la région était-il prévisible ? Le contexte géodynamique d'Haïti explique-t-il sa sismicité ?**

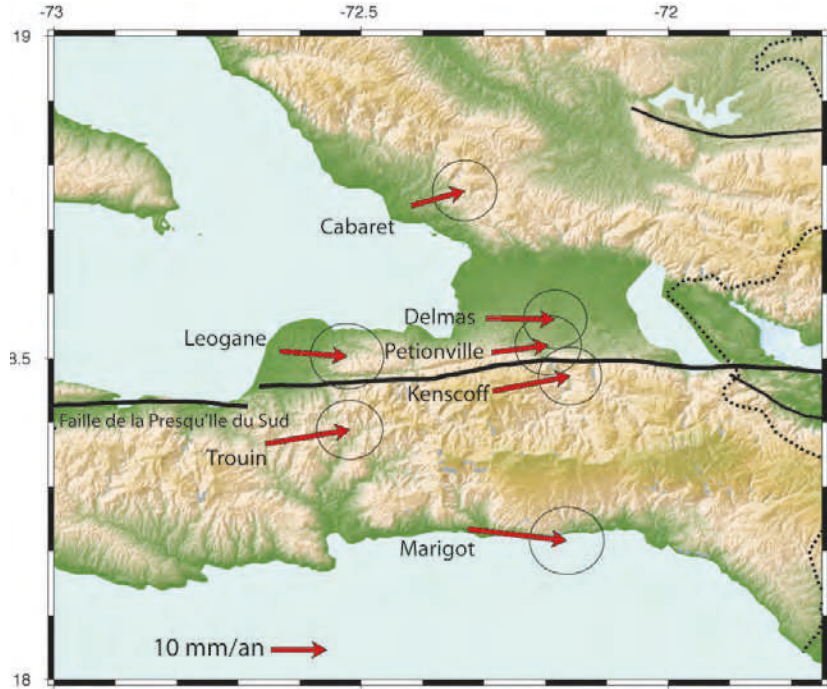
En 2003, un réseau de stations GPS a été installé afin d'étudier les déplacements régionaux. Le document 1 fournit la carte des vecteurs vitesse obtenus par GPS en Haïti et dans les îles voisines, toutes situées au nord de la Plaque Caraïbe (*Caribbean plate* du document). Les vitesses sont relatives par rapport à la plaque Amérique du Nord (*North American plate*).

Le document 2 fournit également des données GPS obtenues avant le séisme de 2010, mais à une échelle régionale, au voisinage de la faille d'Enriquillo dans un secteur proche de Port au Prince.

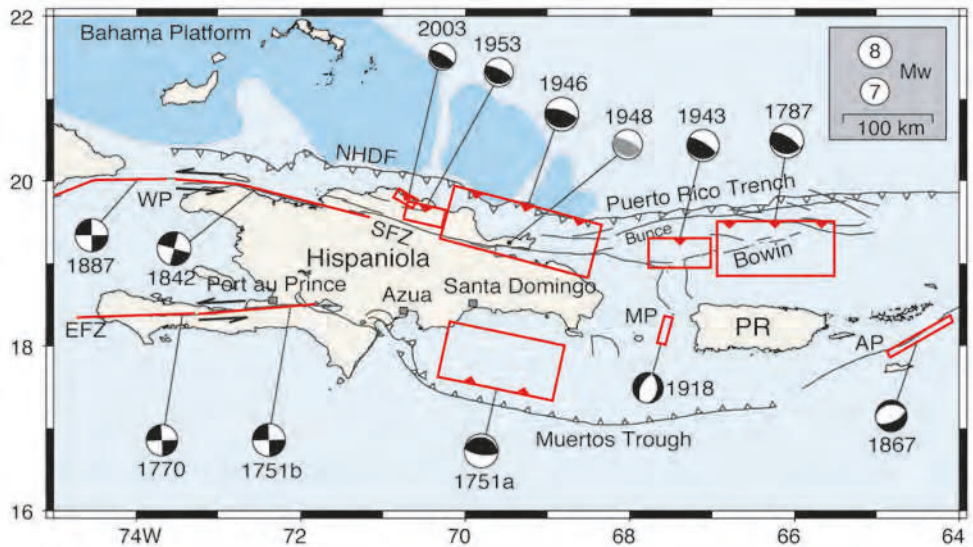
- 1 Quel mouvement relatif de la plaque Caraïbe par rapport à la plaque Amérique du Nord peut-on déduire du document 1 ?
- 2 À partir du document 2, comparez les vecteurs vitesse des stations Cabaret et Marigot. Interprétez les différences constatées.  
Le document 3 fournit la localisation des séismes historiques en Haïti et sur les mécanismes au foyer associés (carte établie avant 2010). La faille Enriquillo est notée EFZ sur cette carte.
- 3 À partir de ces données et de votre réponse à la question 2, calculez la déformation élastique qui s'était accumulée au niveau de la faille d'Enriquillo au moment du séisme de 2010 (vous calculerez un déplacement intersismique, et fournirez le résultat en mètres).
- 4 Comparez ce résultat au déplacement cosismique observé le long de la faille active d'Enriquillo le 12 janvier 2010. Interprétez.
- 5 Aurait-il été possible de prévoir l'ordre de grandeur de la magnitude du séisme du 12 janvier 2020 ? Justifiez votre réponse.
- 6 Aurait-il été possible de prévoir la date du 12 janvier 2010 pour la survenue du séisme ? Justifiez votre réponse.
- 7 D'après le document 3, précisez la nature du jeu de la faille d'Enriquillo. Vous schématiserez la faille en trois dimensions, en y indiquant les déplacements relatifs, l'ellipsoïde des déformations et de celui des contraintes.
- 8 À partir du document 3, interprétez la distribution et la diversité des mécanismes au foyer dans le secteur Nord Caraïbe.



Document 1 Vecteurs vitesse de déplacements de sites GPS au nord de la plaque caraïbe.



**Document 2** Vecteurs vitesse de déplacements de sites GPS de part et d'autre de la faille d'Enriquillo (Haïti).



**Document 3** Carte des séismes historiques dans le secteur Nord-Est des Caraïbes.

(Documents extraits de « Mesures GPS en Haiti - Application à l'Alea Sismique - Rapport d'Étape », E. Calais, Bureau des Mines et de l'Énergie - National Science Foundation-Programme des Nations Unies pour le Développement- Juin 2007)

# Structures, déformations, contraintes tectoniques : quelques objets naturels

## Activités pratiques

### INTRODUCTION

L'**analyse tectonique** d'un échantillon ayant subi des déformations comporte toujours les mêmes étapes :

- une **description** et une identification des **structures** observables.
- une identification du type de **déformation** subie (discontinue ? continue homogène ? continue hétérogène ?) et une quantification éventuelle de la déformation (quantification du changement de forme en % d'allongement ou raccourcissement, orientation de l'ellipsoïde des déformations d'axes **X-Y-Z**). À ce stade de l'analyse, on peut déterminer si l'échantillon avait au moment de sa déformation un comportement fragile ou ductile : cela revient à caractériser le **style de la déformation**.
- si possible, une caractérisation des **contraintes** anisotropes subies par l'échantillon (orientation de l'ellipsoïde des contraintes  $\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3$ ).

**Objets naturels déformés étudiés lors de ce TP** : il s'agit de procéder à l'**analyse tectonique** des différents échantillons présentés. Pour la figure TP19.2, il s'agit de déterminer le jeu de la faille du Levant et d'expliquer l'origine et l'orientation des structures voisines (chevauchements, plis, bassins sédimentaires de la mer Morte et du lac de Tibériade).

**Figure TP19.1** : toit d'une dalle calcaire (déformation discontinue – fentes de tension et joints stylolithiques).

**Figure TP19.2** : carte tectonique du secteur de la faille du Levant.

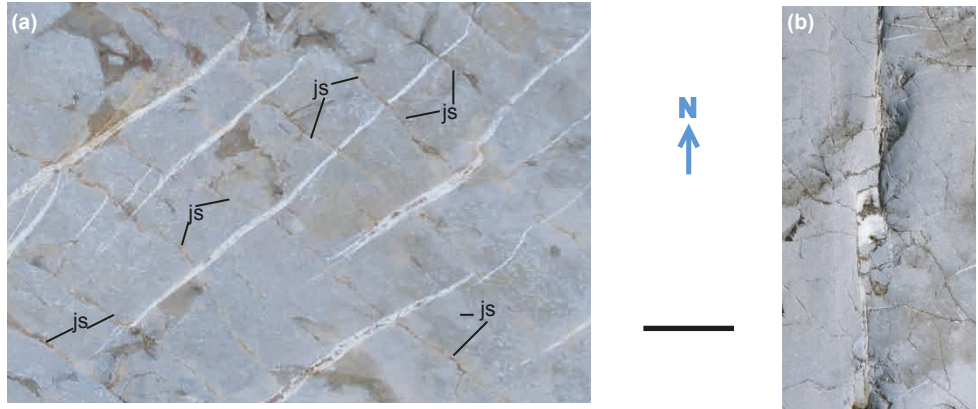
**Figure TP19.3** : échantillon de calcaire oolithique déformé (déformation continue homogène ; cisaillement pur).

**Figure TP19.4** : linéation minérale dans un plan de foliation de roche métamorphique.

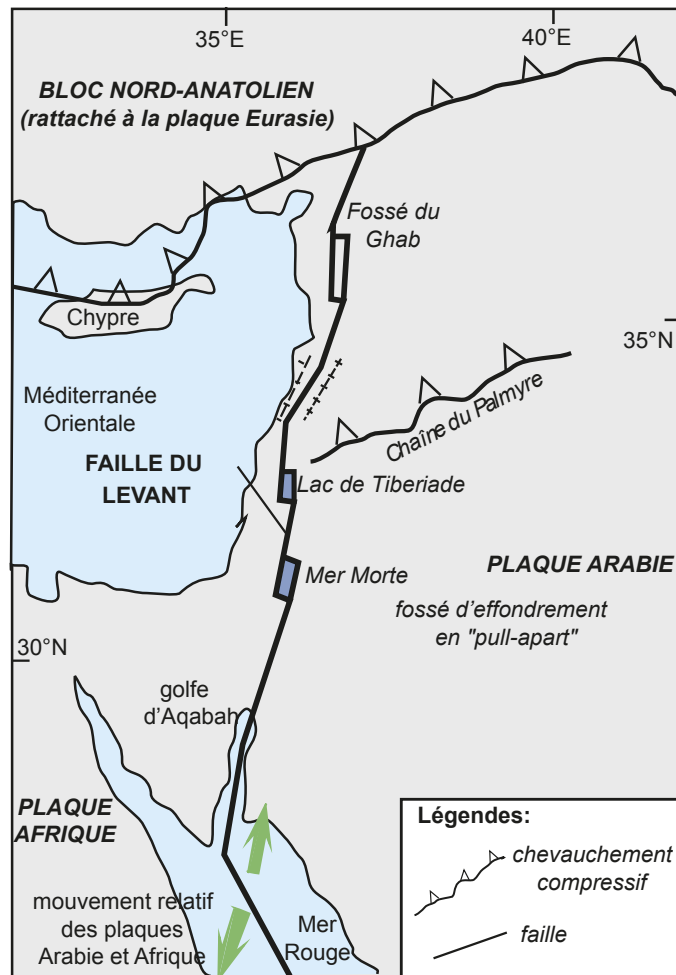
**Figure TP19.5** : échantillon de granite déformé dans des conditions ductiles (déformation continue par cisaillement simple, plans C/S).

**Figure TP19.6** : échantillons de gneiss avec ombres de pression symétriques ou asymétriques.

**Figure TP19.7** : échantillons de roches sédimentaires et métamorphiques plissées.



**Figure TP19.1 a et b** Microstructures visibles sur le toit d'une strate calcaire horizontale. Les zones blanches contiennent de la calcite. La barre d'échelle représente 10 cm. js : joints stylolithiques.



**Figure TP19.2** Carte tectonique du secteur de la faille du Levant.

Tableau TP19.1 Interprétation de la figure TP19.1.

Nature des microstructures visibles	Interprétation en termes de déplacements ou/et de déformation	Interprétation en termes de contraintes
<b>Joints stylolithiques</b> : marques de dissolution du carbonate de calcium, dont la plupart sont orientés SE-NW.	Le raccourcissement principal (Z) est perpendiculaire aux joints stylolithiques : donc Z est orienté SW-NE	$\sigma_1$ est parallèle à <b>Z</b> (pour une déformation supposée coaxiale, c'est-à-dire non rotationnelle), donc $\sigma_1$ est orientée SW-NE.
<b>Fentes de tension</b> : elles se développent quand le matériau ne parvient pas à se fracturer franchement et sont comblées par des carbonates de calcium qui y ont précipité.	Le raccourcissement principal (Z) est parallèle aux fentes de tension : donc Z est orienté SW-NE	
La zone de précipitation de calcite de forme rectangulaire visible figure 21.1b est associée à une microfaille bien marquée.	Le rectangle de calcite s'interprète alors comme un coude de la faille qui, du fait du décrochement, a créé un espace entre les deux bords quand ils se sont séparés. L'espace a été comblé par la cristallisation de la calcite. La microfaille a eu un jeu dextre.	

**BILAN** : les joints stylolithiques (sièges d'une dissolution du calcaire) et les fentes de tension (sièges de précipitation de calcite) sont apparus en même temps. Le calcaire a donc subi une déformation discontinue, matérialisée par des microstructures, toutes compatibles avec un raccourcissement SW-NE dans des conditions proches de la surface.

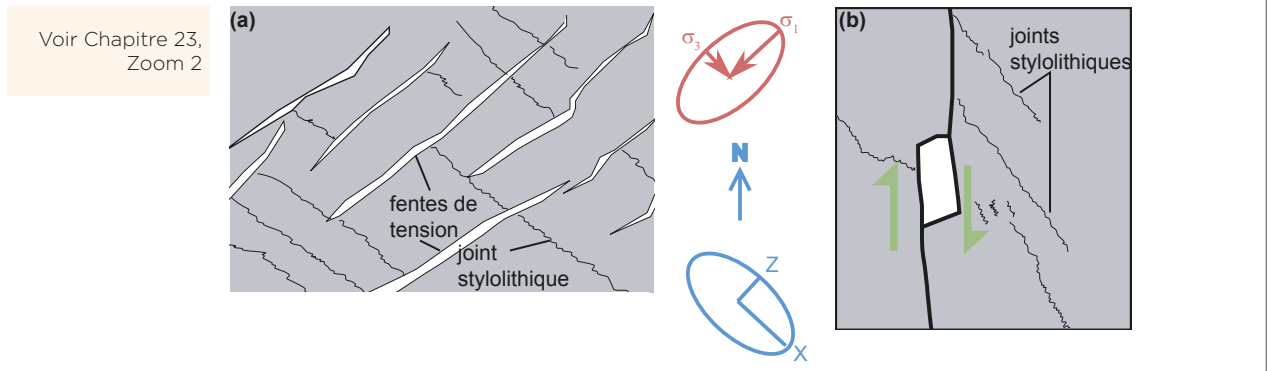


Tableau TP19.2 Interprétation de la figure TP19.2.

Nature des structures visibles	Interprétation en termes de déplacements ou/et de déformation	Interprétation en termes de contraintes
<b>Faille du Levant</b> : direction N-S	Jeu sénestre, dû au déplacement vers le nord de la plaque Arabie, relativement à la plaque Afrique	À l'échelle de la région, $\sigma_1$ est horizontale, NW-SE, due au déplacement vers le nord de la plaque Arabie (activité de la dorsale de la mer Rouge) : développement des chevauchements vers le nord et de la faille décrochante du Levant. Mais le champ de contraintes est diversifié à petite échelle (extensions locales, compressions locales), du fait d'irrégularités de parcours du décrochement.
<b>Plis</b> : plis localement présents au niveau d'un coude de la faille du Levant (plis des monts du Liban)	Le jeu sénestre de la faille induit des contraintes locales en compression au niveau des monts du Liban.	
Bassins sédimentaires du lac de Tibériade, de la mer Morte.	Le jeu sénestre de la faille induit des contraintes locales en extension là où la faille a un parcours sinueux : les bassins sont formés en transtension (extension + décrochement), ou « pull-apart ».	



plan de coupe vertical Est-Ouest

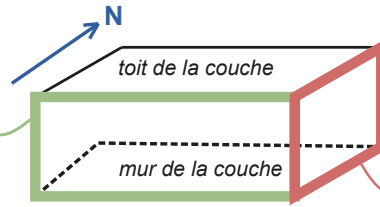
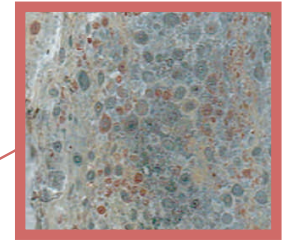


Figure TP19.3 Calcaire oolithique déformé (observation de deux plans de coupe).

La barre d'échelle représente 1 cm.



plan de coupe vertical Nord-Sud

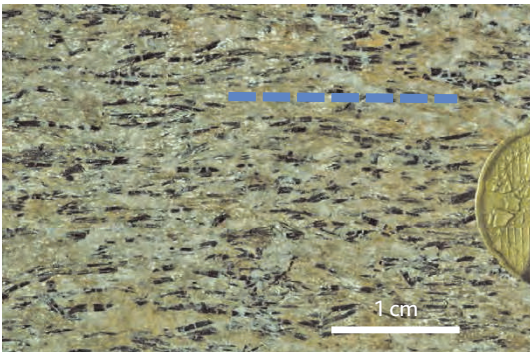


Figure TP19.4 Orientation de cristaux dans un plan de foliation d'une roche métamorphique.

Roche déformée dans les conditions de P et T assez élevées - croûte moyenne ou inférieure.

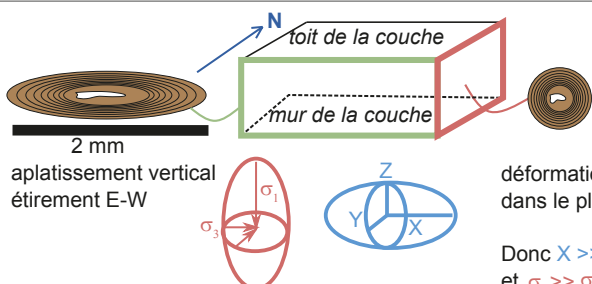


Figure TP19.5 Coupe effectuée perpendiculairement aux plans de foliation d'une roche métamorphique.

Les cristaux blancs sont des cristaux de feldspaths, les cristaux gris sont des quartz, les cristaux noirs sont des micas noirs.

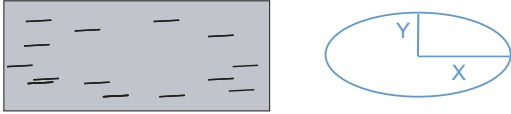
Voir chapitre 23, tableau 23.1 et § 4.1

Tableau TP19.3 Interprétation de la figure TP19.3.

Nature des microstructures visibles	Interprétation en termes de déplacements ou/et de déformation	Interprétation en termes de contraintes
<p>Les oolites constituent des marqueurs de la déformation : leur forme initiale est supposée sphérique, la forme actuelle est ellipsoïdale. Le calcaire a subi une déformation continue homogène.</p>	<p>Dans le plan vertical E-W, les grands axes des oolites déformées sont tous parallèles entre eux et au toit et au mur de la couche : le calcaire a subi un type <b>cisaillement pur (aplatissement/étirement)</b>. La déformation est coaxiale, on peut positionner l'ellipse des déformations : <b>X</b> et <b>Z</b> sont dans le plan vertical E-W, <b>Z</b> est vertical, <b>X</b> est horizontal (donc orienté E-W) : la couche sédimentaire a subi un aplatissement vertical et un étirement horizontal (Est-Ouest) Le calcaire s'est comporté de façon ductile, mais en restant dans les conditions de surface (hypothèse : vitesse faible de la déformation).</p>  <p>aplatissement vertical étirement E-W</p> <p>déformation isotrope dans le plan YZ</p> <p>Donc <math>X \gg Y = Z</math> et <math>\sigma_1 \gg \sigma_2 = \sigma_3</math></p>	<p>La déformation étant coaxiale, on peut positionner l'ellipsoïde des contraintes : <math>\sigma_1</math> est parallèle à <b>Z</b> (verticale), <math>\sigma_3</math> est parallèle à <b>X</b> (horizontale, Est-Ouest).</p>

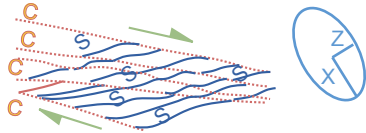
Voir chapitre 23, tableau 23.1 et § 4.1

Tableau TP19.4 Interprétation de la figure TP19.4

Nature des microstructures visibles	Interprétation en termes de déformation	Interprétation en termes de contraintes
Des marqueurs linéaires (ici des minéraux sombres allongés) sont orientés parallèlement et constituent une anisotropie linéaire appelée <b>linéation d'allongement</b> .	La photographie correspond au plan de foliation donc au plan XY de la déformation considérée comme homogène. Les linéations d'allongement fournissent l'orientation de l'axe <b>X</b> de l'ellipsoïde de déformation, l'alignement de cristaux sombres (des amphiboles) dans un plan de foliation de la roche (axe X).	La linéation minérale observée ici s'est formée en contexte métamorphique, avec P et T élevées : dans ces conditions, où le matériau rocheux est très ductile, il est impossible de placer les contraintes principales, même si la déformation semble homogène et coaxiale.
		

Voir chapitre 23, tableau 23.1 et § 4.1

Tableau TP19.5 Interprétation de la figure TP19.5.

Nature des microstructures visibles	Interprétation en termes de déplacements et/ou déformation	Interprétation en termes de contraintes
Cristaux déformés de façon <b>asymétrique</b> , encadrés par deux groupes de <b>structures planaires pénétratives</b> : une <b>foliation (S)</b> , serrée, et des <b>bandes de cisaillement (C)</b> obliques à la foliation (S),	Ces deux caractéristiques suggèrent une déformation non coaxiale, de type cisaillement simple (ici dextre). Le plan considéré contient X et Z, que l'on peut orienter (approximativement !)	La déformation n'étant pas coaxiale, il est impossible de positionner les contraintes principales.
		

**Figure TP19.6 Coupes effectuées perpendiculairement aux plans de foliation d'une roche métamorphique.**

Observations détaillées d'ombres de pression autour de cristaux affectés par la foliation mais ayant résisté à la déformation. La barre d'échelle représente 1 cm.

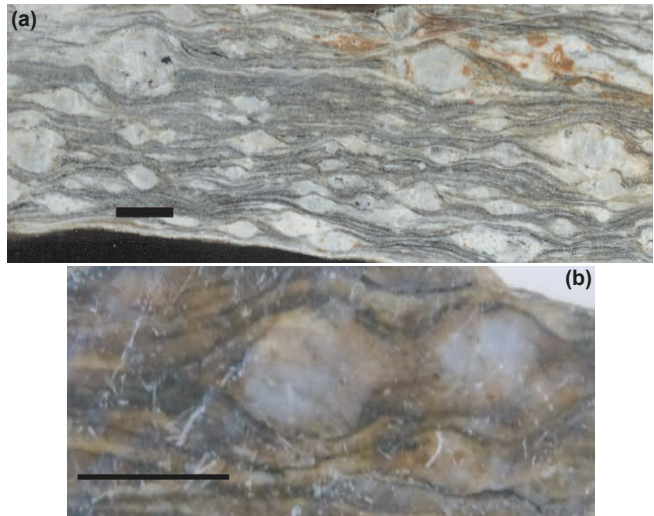
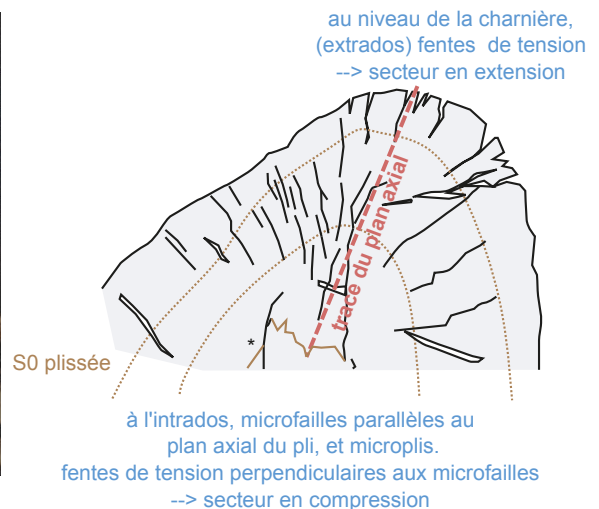
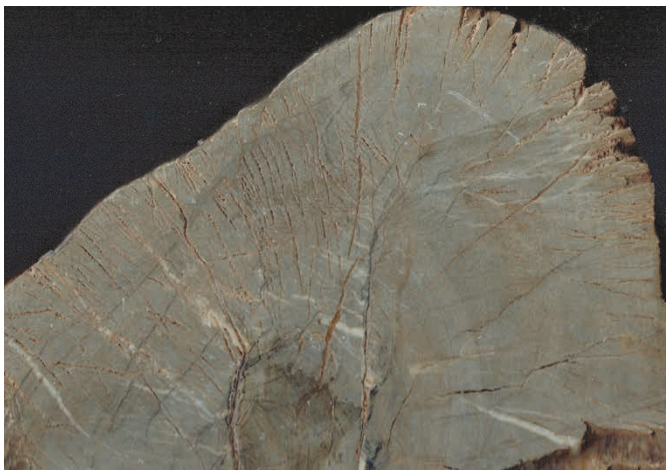
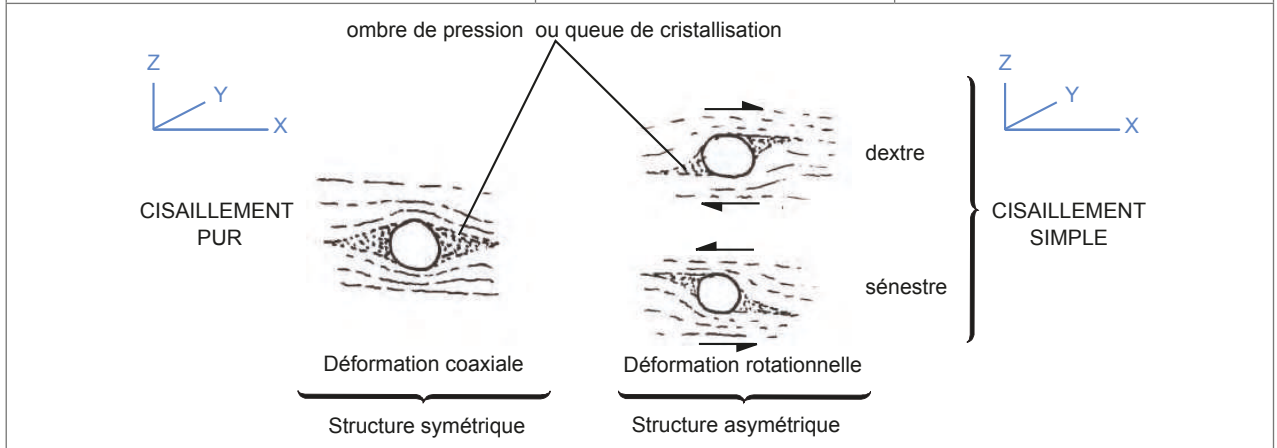


Tableau TP.19.6 Interprétation de la figure TP19.6.

Nature des microstructures visibles	Interprétation en termes de déplacements et/ou déformation	Interprétation en termes de contraintes
<p>Dans les deux cas, des cristaux visibles à l'œil nu, quartz et feldspaths (clairs), forment des « yeux » déformés, autour desquels se développe la foliation (plans S) marquée par l'alignement de minéraux sombres (probablement des gneiss, dont la déformation ductile s'est opérée dans des conditions de P et T relativement élevées.</p> <p>Autour des yeux quartzo-feldspathiques se sont développées des recrystallisations appelées <b>ombres de pression</b>.</p>	<p>Les gros cristaux ont ménagé, au cours de la déformation ductile, des zones de moindre pression selon l'axe <b>X</b>.</p> <p>Cas (a) les ombres de pression sont symétriques. La déformation est donc coaxiale, et correspond à un <b>cisaillement pur</b>.</p> <p>Cas (b) les ombres de pression sont asymétriques. La déformation correspond à un <b>cisaillement simple</b> (dextre ici).</p>	<p><b>(a)</b> : la déformation est coaxiale mais il serait très incertain d'orienter les contraintes (la déformation s'étant opérée en profondeur, les relations entre déformation et contraintes dépendent de multiples facteurs).</p> <p><b>(b)</b> : la déformation n'étant pas coaxiale, il est impossible de positionner les contraintes principales.</p>



Voir chapitre 23,  
§ 4.2

Figure TP19.7a Micropli dans un calcaire.  
Barre d'échelle = 2 cm.

Tableau TP19.7a Interprétation de la figure 19.7a.

Nature des microstructures visibles	Interprétation en termes de déformation et de contraintes
<p>Calcaire dont la stratification interne <math>S_0</math> est difficilement visible (légères différences de couleur). Les plans <math>S_0</math> sont affectés par un <b>pli isopaque</b>.</p> <p>L'extrados du pli est affecté de fentes de tension perpendiculaires à <math>S_0</math>. L'intrados est en revanche affecté de microplis et quelques microfailles ou joints stylolithiques parallèles au plan axial (* sur le schéma). On observe aussi des fentes de tension remplies de calcite, perpendiculaires au plan axial.</p>	<p><b>DÉFORMATIONS</b> : l'extrados du pli est donc soumis à une extension alors que l'intrados est soumis à une compression, toutes deux perpendiculaires au plan axial : le plissement résulte d'une <b>flexion</b> d'un matériau plutôt compétent, avec probablement une faible vitesse de déformation.</p> <p>La déformation est continue <b>hétérogène</b> (localement discontinue), dans les conditions proches de la surface. On pourrait représenter la déformation totale par un unique ellipsoïde de déformation. (avec <b>Z</b> horizontal, perpendiculaire au plan axial et <b>X</b> vertical) mais l'approximation serait grossière.</p> <p><b>CONTRAINTES</b> : la déformation est coaxiale mais il serait très incertain d'orienter les contraintes (la déformation s'étant opérée en profondeur, les relations entre déformation et contraintes dépendent de multiples facteurs).</p>

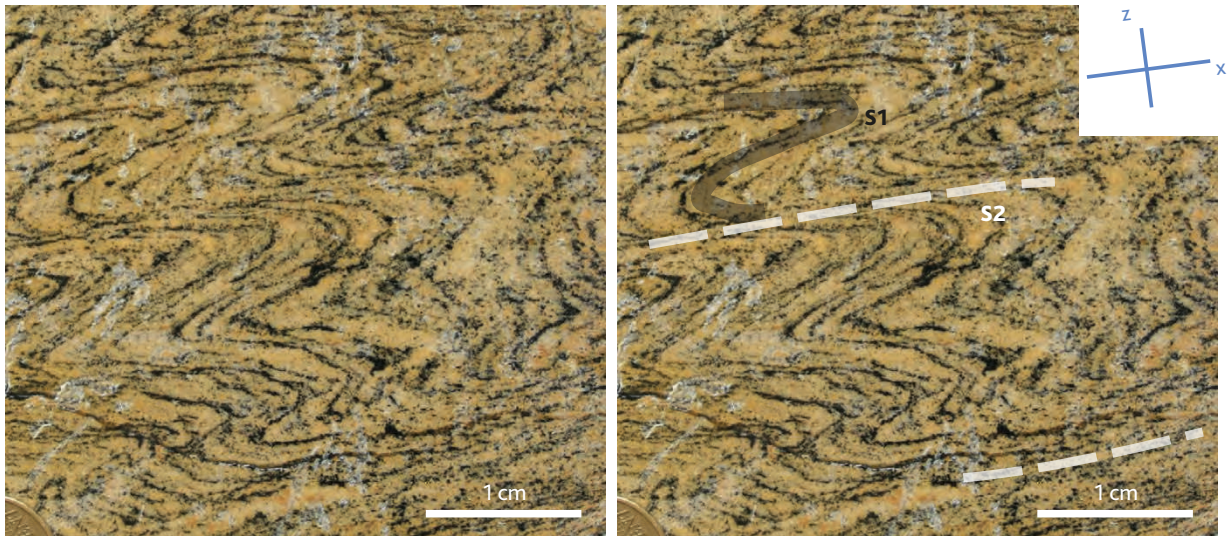


Figure TP19.7b Micropli dans un gneiss.

Tableau TP19.7b Interprétation de la figure 19.7b.

Nature des microstructures visibles	Interprétation en termes de déformation et de contraintes
<p>Roche présentant une alternance de lits de nature minéralogique différente (lits quartzo-feldspathiques et lits sombres à biotite) : la structure pénétrative est une foliation (S1). Les feldspaths étant visibles à l'œil nu, la roche est un gneiss.</p> <p>La foliation S1 est plissée et est recoupée par une deuxième schistosité/foliation (S2) assez espacée et discrète.</p>	<p><b>DÉFORMATIONS</b> : deux épisodes de déformation ductile se sont succédé (dans les conditions du métamorphisme, donc de P et T élevées). Si on considère la déformation homogène, on peut positionner l'axe Z (aplatissement principal ; en moyenne perpendiculaire à la schistosité) associé au deuxième épisode de déformation.</p> <p><b>CONTRAINTES</b> : la déformation est ductile, hétérogène à petite échelle et rien ne montre qu'elle est coaxiale. Il est impossible d'orienter les contraintes principales (pour aucun des deux épisodes tectoniques).</p>