



Seul sur Mars, à la recherche d'une zone sismique !

Introduction :

Après une année d'analyse des données de SEIS, les équipes scientifiques de la mission InSight ont détecté de nombreux séismes. Les événements les plus forts ont été localisés dans une région particulière de Mars. Ainsi, pour la première fois dans l'histoire de la sismologie moderne, une zone sismique active a clairement été mise en évidence sur une autre planète.

Objectifs :

Cet atelier propose de retrouver la localisation de l'épicentre d'un « marsquake » détecté par SEIS au cours du 26 juillet 2019, soit au 235ème sol de la mission.

Le déroulé de cet atelier permet de se plonger dans la routine de travail des chercheurs lors de la réception de nouvelles données :

- Filtrage de données
- Calcul du spectrogramme
- Identification d'ondes sismiques (P et S)
- Estimation d'une distance épicentrale
- Localisation du foyer sismique

Matériel, logiciels et données :

- Sismogrammes au format sac du marsquake survenu au sol 235 ⁽¹⁾ ;
- le logiciel © SeisGram2K80_ECOLE et son tutoriel (SG2K80);
- un accéléromètre de la Maison des Enseignants de Provence (MEP);
- le logiciel © RISSC (Record Interface for Sensors at School);
- des annexes pour approfondir certaines notions

⁽¹⁾ *InSight Mars SEIS Data Service. (2019). SEIS raw data, Insight Mission. IPGP, JPL, CNES, ETHZ, ICL, MPS, ISAE-Supaero, LPG, MFSC; https://doi.org/10.18715/SEIS.INSIGHT.XB_2016*



Déroulement :

Etape 1 – Identification d'une onde P et d'une onde S, et estimation de la distance épacentrale

- **Données réelles** : sismogrammes du marsquake du sol 235
- **Travail** : - identifier ses ondes et noter leur temps d'arrivée respectif ;
- déterminer la distance épacentrale.

Etape 2 – Observer la variation en amplitude des ondes enregistrées par un capteur en fonction de son orientation.

- **Expérience** : enregistrer des passages d'ondes générées en différents endroits autour d'un accéléromètre
- **Travail** : analyser chaque enregistrement pour mettre en évidence le lien entre amplitude des enregistrement, direction de propagation des ondes, et position du capteur.

Etape 3 – Localisation de l'épicentre à partir de l'analyse de l'onde P sur les trois composantes de SEIS

- **Travail** : analyser la polarité de l'onde P sur les trois composantes pour déterminer la position de l'épicentre.



Etape 1 – Identification d'une onde P et d'une onde S, et estimation de la distance épacentrale

- Ouvrir le logiciel SG2K80, et sélectionner les sismogrammes du répertoire « sol235 ».

[Fichier > Sélectionner Fichier > sélectionner les 3 sismogrammes disponibles]

L'annexe A propose une description du principe de filtrage et de calcul du spectrogramme.

Votre premier objectif est d'identifier des ondes sismiques dans ces 3 sismogrammes. Quelle procédure préférez-vous utiliser :

- Filtrer le signal ? Rendez-vous à la rubrique « Filtrage » ci-après ;
- Traduire le signal en spectrogramme ? Rendez-vous alors à la rubrique « Calcul du spectrogramme ».

Filtrage

- A l'aide de l'outil [*Filtrer*] de SG2K80, tester différentes combinaisons de filtrage passe bande afin de mettre en évidence un évènement ressemblant à un passage d'ondes sismiques.

ATTENTION : à chaque application d'un filtrage, il faut travailler sur le signal complet non filtré. Il faut impérativement restaurer le contenu du sismogramme entre chaque filtrage
[Fichier > Restaurer Actif].

- Proposer un intervalle de valeurs de fréquences pour faciliter la visualisation d'un passage d'ondes sismiques :

Fréquence minimum (Hz) : Fréquence maximale (Hz) :



Calcul du spectrogramme

- A l'aide de l'outil [*Spectrogram*] de SG2K80, afficher le spectrogramme de la composante Z.
- Identifier les arrivées des ondes P et des ondes S.
- Déterminer les valeurs d'un filtrage bande passante permettant de faciliter la lecture des ondes sismiques dans sismogramme :

Fréquence minimum (Hz) : Fréquence maximale (Hz) :

➤ Discussion autour de ces deux procédures

Votre deuxième objectif est maintenant d'estimer la distance à l'épicentre à partir des temps d'arrivée.

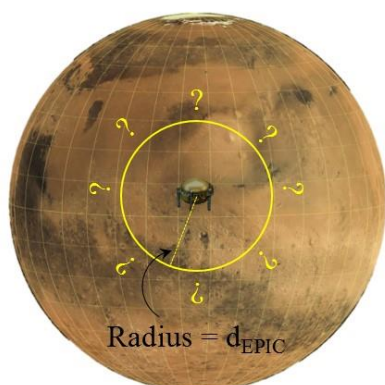
- A partir de l'outil [*Pointer...*] de SG2K80, pointer les temps d'arrivée de la première onde P et de la première onde S.
- Calculer le délai entre les deux temps d'arrivée :

$$T_S - T_P = \text{..... secondes}$$

- A l'aide de l'outil [*Afficher sismogramme actif dans un hodochrone modèle global*], déterminer la distance théorique à l'épicentre correspondante à ce délai.

Distance épacentrale = degrés

ATTENTION : pour ce séisme martien, il faut absolument utiliser le modèle de planète pour Mars [*Utilitaires > Planète ... > cocher la case Mars*]



L'épicentre se trouve sur un cercle centré sur SEIS, et de rayon égal à la distance calculée (schéma ci-contre)

➤ Il faut maintenant définir sa position exacte !



Etape 2 – Observer la relation entre la valeur d’amplitude des ondes détectées par un accéléromètre fixe, et leur direction de propagation.

Quittons un temps Mars pour revenir en salle de cours. Nous allons réaliser une petite expérience pour mettre en évidence une relation entre :

- l’orientation d’un accéléromètre à trois composantes sur une table,
- la direction de la propagation des ondes,
- l’amplitude mesurée de ces ondes.

Les signaux détectés seront visualisés grâce à l’interface pédagogique RISSC, développée par David Ambrois (Ingénieur d’Etudes CNRS). Cette étape va se faire en deux temps, selon les protocoles suivants.

➤ Protocole expérimental n°1

- Positionner l’accéléromètre sur le support fourni. Veiller à ce que le support adhère bien à la table, et que le capteur adhère bien au support (patafix).
- brancher la fiche USB du capteur à l’ordinateur
- lancer l’interface RISSC, et ouvrir l’onglet « Accéléromètre »
- démarrer l’enregistrement [*Start*]
- appliquer successivement un choc sur chacune des faces latérales du support
- arrêter l’enregistrement [*Stop*]
- center les signaux sur la ligne de base des graphes [*cocher la case Demean*]
- mettre les enregistrements à la même échelle verticale [*cocher la case Same Scale*]

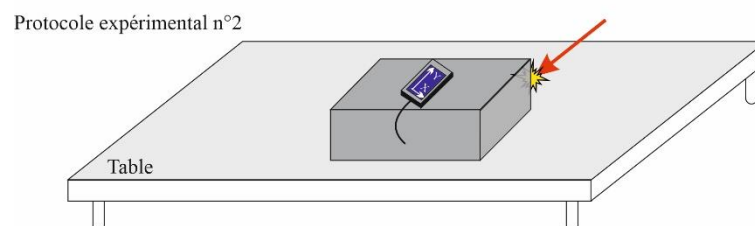
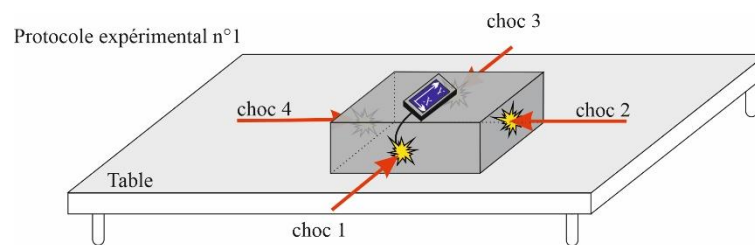
- **Repérer le passage des ondes de chaque choc.**
- **Quelle relation peut-on mettre en évidence entre la direction du choc appliqué, et l’amplitude des ondes sur les composantes Y et X ?**



➤ Protocole expérimental n°2

- Réaliser un nouvel enregistrement, en n'appliquant qu'un seul choc sur une des arrêtes latérales du support.
- A partir de la relation déduite précédemment, essayez de positionner le capteur sur le support de façon à maximiser l'amplitude des ondes sur la composante X, et à la minimiser sur la composante Y.
- Quel paramètre est-il possible de mettre en évidence en analysant l'amplitude des ondes sur chaque composante horizontale d'un capteur à trois composantes ?

Schémas des deux protocoles expérimentaux.



L'annexe B propose une description plus détaillée du premier mouvement du sol lors de l'arrivée d'une onde sismique (P). Il est maintenant temps de repartir sur Mars.



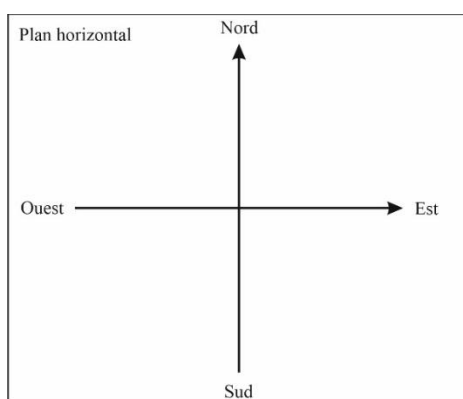
Étape 3 – Détermination de la position de l'épicentre à partir de l'analyse de l'onde P sur les trois composantes du sismomètre

L'annexe C propose une description de la détermination du premier mouvement du sol lors d'un séisme, à partir de la lecture de la première onde P.

Les données martiennes restent assez difficiles à analyser. Pour simplifier la lecture des signaux, nous allons travailler sur un zoom autour de l'arrivée de l'onde P sur chaque composante. Ce zoom est ensuite filtré pour ne garder que des ondes dont les fréquences sont comprises entre 0.1 Hz et 4.0 Hz.

Nous allons analyser la composante horizontale du premier mouvement dans un premier temps, puis sa composante verticale dans un second temps.

- restaurer les signaux [*Fichier > Restaurer Actif*]
- faire un zoom sur les signaux, entre 12h08 et 12h38
- appliquer un filtrage passe bande compris entre 0.1 Hz et 4.0 Hz.
- Repérer l'arrivée de la première onde P sur la composante Z.
- Observer la première arche de l'onde P sur les deux composantes horizontales.
- **Quelle remarque immédiate peut-on faire ?**
- Activer l'outil de rotation des composantes horizontales [*Outils > Tourner*].
- **Qu'observe-t-on lorsque l'on réalise une rotation de +90° ?**
- **Sur le schéma suivant, dessiner une flèche décrivant la composante horizontale du vecteur du premier mouvement associé à l'arrivée de l'onde P :**





Nous connaissons à présent la composante horizontale du premier mouvement. Travaillons maintenant dans un plan vertical, perpendiculaire au plan horizontal et passant par la direction du vecteur déterminé précédemment (Fig. 1).

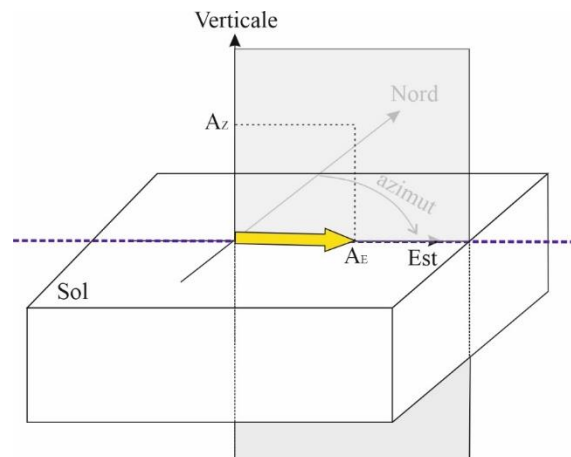


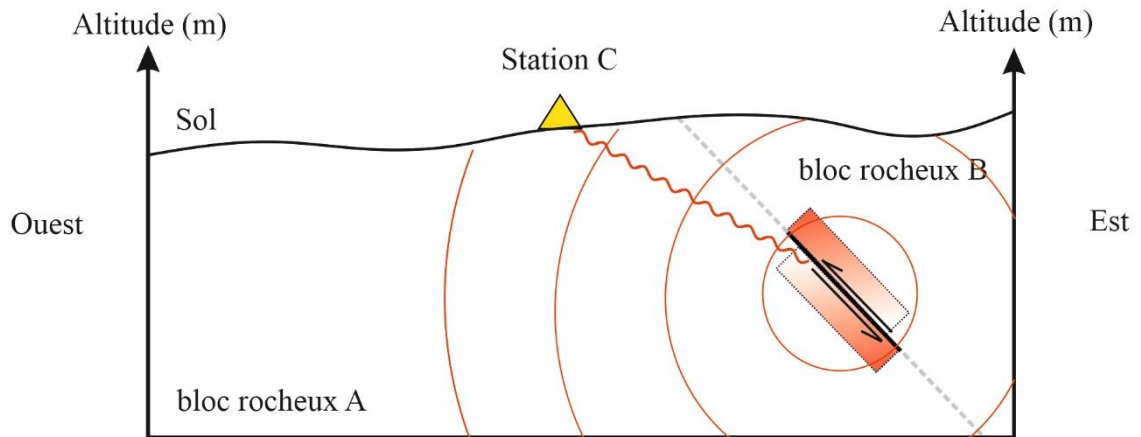
Figure 1. Plan vertical passant par la direction déterminée à partir de la polarité de l'onde P sur les composantes horizontales. Le vecteur jaune caractérise la composante horizontale du premier mouvement du marsquake du sol 235. Ligne bleue en pointillés : direction de la composante horizontale du premier mouvement.

La Figure 2 propose deux exemples de ruptures dont les ondes générées sont enregistrées par une même station. L'Annexe C propose des exemples pour bien comprendre le cadre de cet exercice.

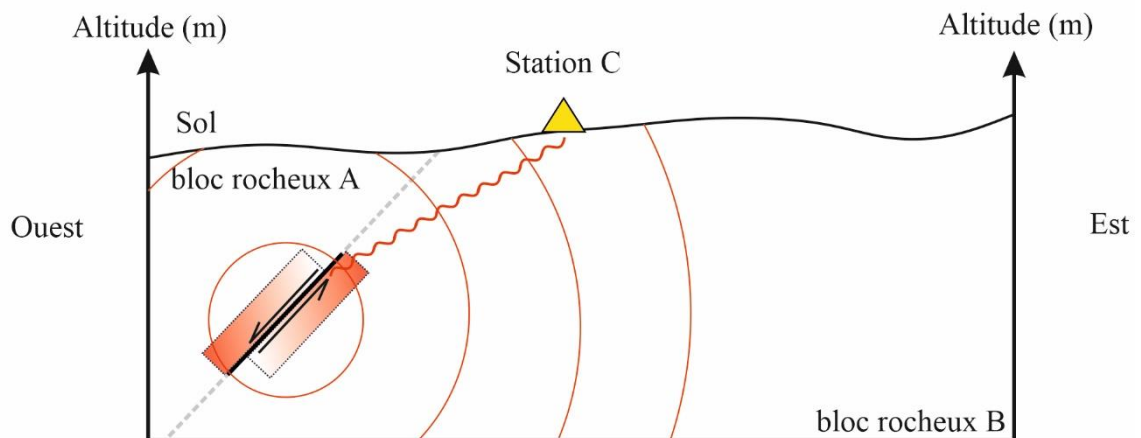
- Sur la figure 2, dessiner les polarités simplifiées de la première onde P selon les deux cas proposés.
- Quel est pour chaque cas la direction de la composante horizontale du mouvement ?
- Est-ce que le sens de cette composante est suffisant pour déterminer la position de l'épicentre ?



(a) Cas numéro 1: schéma simplifié d'une rupture en faille inverse à l'Est d'une station C.



(b) Cas numéro 2: schéma simplifié d'une rupture en faille inverse à l'Ouest d'une station C.



(c) Sismogrammes très simplifiés observés au niveau de la station sismologique (triangle jaunes), zoomés sur la première onde P :

| Cas n°1 | Cas n°2 |
|--------------|--------------|
| Composante N | Composante N |
| Composante E | Composante E |
| Composante Z | Composante Z |

Figure 2. Coupes schématiques Ouest/Est passant par une station sismologique, détectant le passage d'ondes sismiques générées par une rupture sismique. (a) Faille située à l'Est. (b) Faille située à l'Ouest. (c) Dessiner de façon simplifiée la polarité attendue à chaque composante, selon les deux cas (a) et (b).



En sismologie, il existe deux termes en rapport avec le sens du premier mouvement (Fig. 3) :

- l'azimut, qui est l'angle entre la direction du nord géographique et la direction du sens de la composante horizontale du premier mouvement (angle positif vers l'Est),

- le back-azimut, qui renseigne sur la position de l'épicentre le long de la direction matérialisée par l'azimut :

- si la polarité de l'onde P sur la composante verticale est positive, la valeur du back-azimut est égale à la valeur de l'azimut plus la valeur de π (ou $+180^\circ$ > vers l'Est)
- si la polarité de l'onde P sur la composante verticale est négative, la valeur du back-azimut est égale à la valeur de l'azimut.

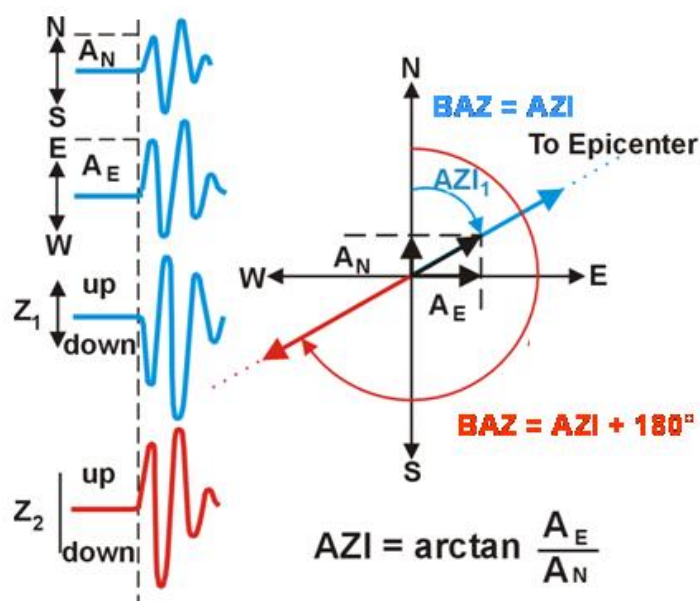


Figure 3. Cette figure est issue de la publication (doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_11.1) de Jens Havskov (Université de Bergen), Peter Bormann (German Research Centre for Geosciences), et Johannes Schweitzer (NORSAR). Elle décrit la détermination de l'azimut et du back-azimut à partir d'un exemple simplifié de l'enregistrement de l'onde P sur trois composantes d'un même capteur.

- Déterminer la valeur du back-azimut, l'angle donnant le sens où se trouve l'épicentre :

back-azimut = :



Une distance, un sens : mais où-est-ce sur Mars ?

L'interface éducative Marsview (développée par Philippe Cosentino).

Spécialement développée pour le volet Educatif France de la mission InSight, l'interface Marsview permet une visualisation simple et pratique des résultats obtenus.

- Connectez-vous à l'interface via l'URL suivante :

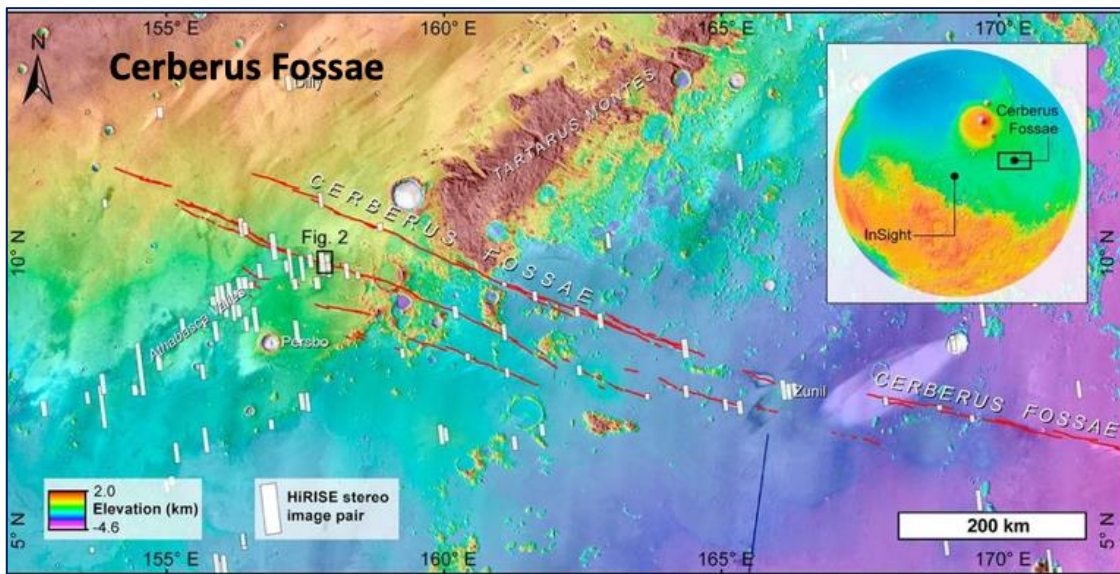
➤ <http://philippe.cosentino.free.fr/productions/marsview/>

- Dans la colonne de gauche, cocher la case [*cercle*] dans l'espace [*Outil*]

- Repérer la localisation de l'épicentre estimée à partir de la distance épacentrale calculée, et du back-azimut :

- latitude : - longitude :

- Replacer cette localisation sur la carte ci-après :





Les résultats de la Science Team

L'épicentre a été localisé à environ 25.9° du sismomètre, soit à environ 1535 km. L'azimut correspondant a été estimé à environ 77° .

Félicitations ! Vous avez à votre tour identifié cette zone martienne sismiquement active : **Cerberus Fossae**. Cette zone correspond à des grabens indiquant un contexte extensif lors de leur formation. Des travaux précédents s'étaient penchés sur une quantification de l'activité sismique de cette zone, à partir d'images satellitaires HiRISE (Taylor et al., 2013, doi:10.1002/2013JE004469). Cette zone était déjà évoquée comme une source sismique probablement utile pour la mission InSight. C'est maintenant chose confirmée.

Vous êtes maintenant prêts pour analyser les futures données du mouvement du sol martien, qui seront mises à disposition progressivement sur le site web du volet InSight Education :

➤ <https://insight.oca.eu/fr/accueil-insight>

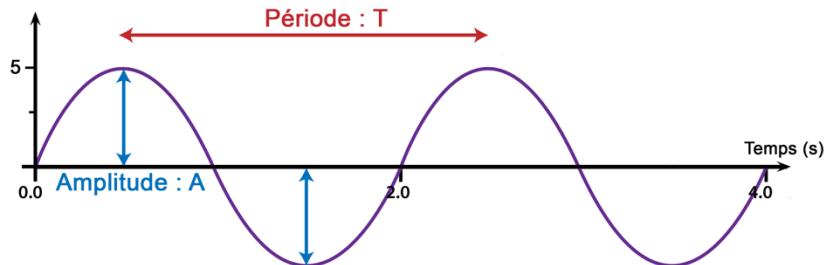
A vous de jouer !



ANNEXE A : fréquence, analyse spectrale et spectrogramme

Définition de l'amplitude, de la période, de la fréquence

Les signaux périodiques se répètent sur un intervalle de temps appelé la Période (T). Ils sont caractérisés par leur amplitude (A) et leur fréquence (f).



Un signal périodique est caractérisé par son amplitude et sa fréquence

Figure 1 : Dans cet exemple, le signal a une période de 2 secondes (soit une fréquence de 0,5 Hz) et une amplitude de 5 exprimée ici en unités arbitraires.

L'amplitude (A) correspond à l'écart maximal de la variable avec sa valeur médiane. L'amplitude traduit « l'énergie » du mouvement ondulatoire. La fréquence s'exprime en Hertz, elle est égale à l'inverse de la période (T) mesurée en secondes. $f = \frac{1}{T}$

L'analyse de Fourier

Quand on veut étudier des signaux complexes (figure 2), on peut les décomposer en une somme de fonctions sinusoïdales. C'est Joseph Fourier, mathématicien et physicien Français du 18^{ème} siècle, qui a proposé le premier les outils mathématiques permettant cette décomposition.

Dans la Figure 2, le signal a été décomposé en 2 fonctions sinusoïdales, chacune caractérisée par une fréquence et une amplitude. On peut alors représenter sur un diagramme le contenu fréquentiel du signal, c'est le spectre fréquentiel !

Pour déterminer les différentes composantes spectral d'un signal sismique, on utilise la transformation de Fourier. Le spectre fréquentiel du signal à l'instant t prend alors la forme d'une courbe continue (Figure 3).

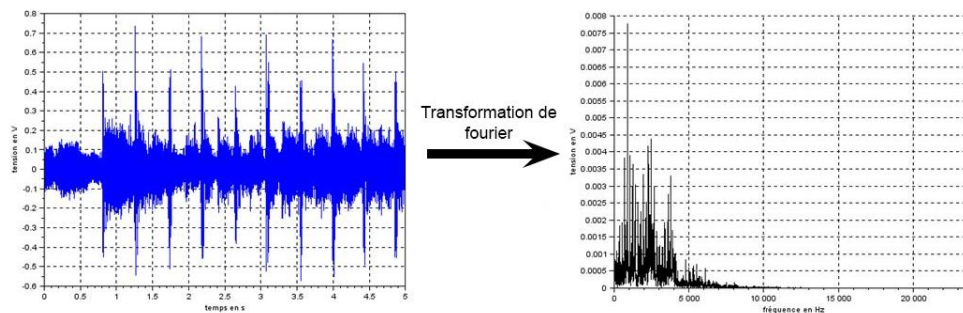
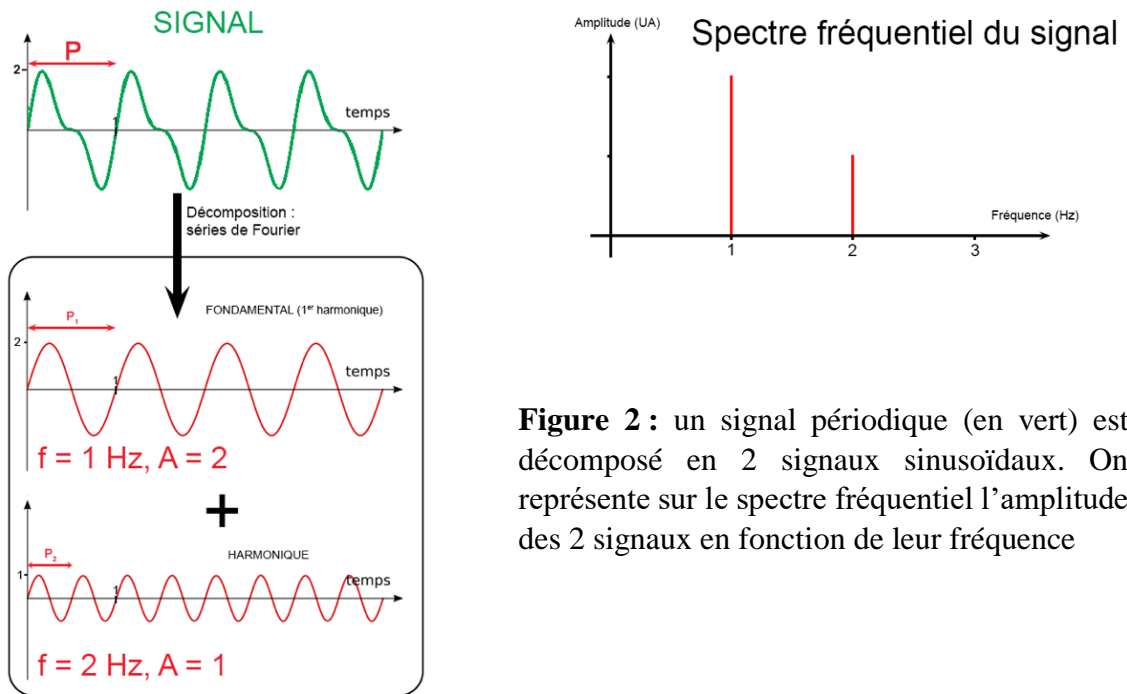


Figure 3 : Un signal (à gauche) et sa transformée de Fourier qui est son spectre fréquentiel (source : cours BTS SNIR, le web pédagogique)

Les filtres

Si on souhaite retirer ou diminuer l'amplitude de certaines fréquences d'un signal, il faut le filtrer. On sait qu'un signal peut être définie comme une somme de sinusoïdale. Le but d'un filtre est donc de jouer sur l'amplitude et la phase de ces sinusoïdes. Pour chacune d'entre elles, un facteur de correction sur l'amplitude peut être appliqué. De cette manière, il est possible de supprimer certaines d'entre elles. Plus précisément, on utilise un filtre numérique qui effectue une succession d'opérations mathématiques sur le signal. C'est cette procédure qui modifie le contenu **spectral** du signal d'entrée en atténuant ou en éliminant certaines fréquences (composantes spectrales) non désirées.



Le Spectrogramme

Au cours du temps, le contenu spectral d'un signal (fréquence et intensité) évolue. Pour représenter cette évolution. On effectue des transformées de Fourier (TF) avec une fenêtre glissante sur un pas de temps déterminé. En concaténant les spectres obtenus, on obtient un diagramme en 3D qui représente l'évolution du spectre fréquentiel au cours du temps : c'est le spectrogramme (figure 4).

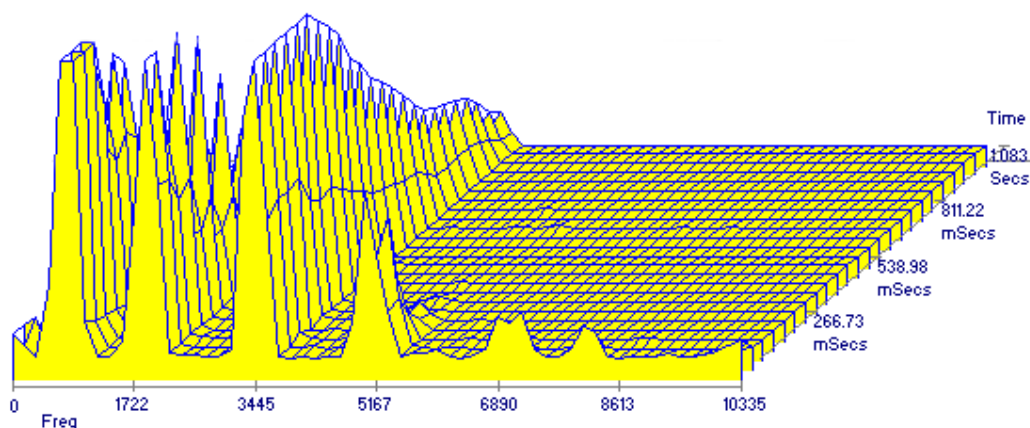


Figure 4 : Ce spectrogramme en 3D est constitué de plus de 20 analyses FFT réalisées les unes après les autres (Source : INRP).

Le diagramme en 3D est intéressant mais difficilement exploitable. On lui préfère une vue en 2D où l'amplitude des différentes fréquences est représentée par un code couleur. (Figure 5).

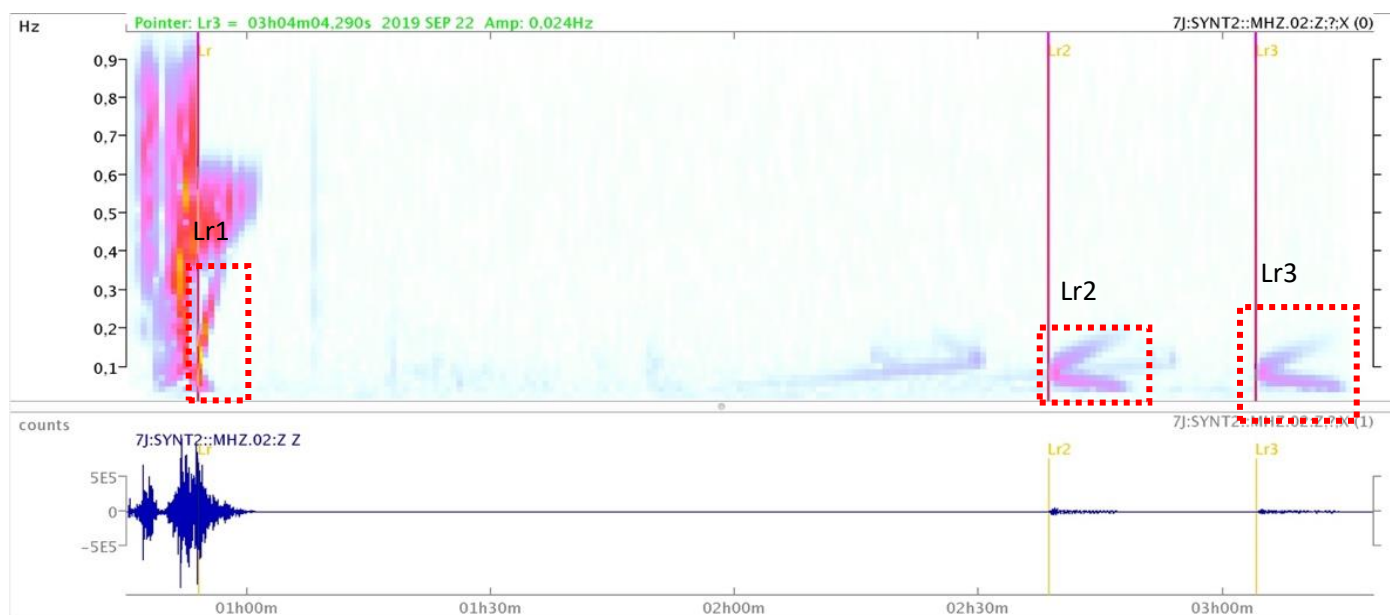


Figure 5 : Spectrogramme et sismogramme (en bas) réalisés avec le logiciel seisgram2K à partir des données simulées du blind-test de la mission INSIGHT. La couleur renseigne sur l'amplitude du signal, de faible (bleu clair) à grande (jaune).



On observe que les ondes de surface (ondes de Rayleigh) Lr1, Lr2 et Lr3 sont des ondes basse fréquence. Elles sont reconnaissables à leur forme de virgule qui est dû à leur vitesse de propagation différentes selon leur fréquence, le spectrogramme permet de les identifier. Grâce à une visualisation rapide du contenu fréquentiel au cour du temps, le spectrogramme permet de discerner des informations importantes dans l'analyse d'un signal. On l'utilise en sismologie pour pointer les différents trains d'ondes

SECTION BONUS : Transformation de Fourier

Dans un mémoire daté de 1807, Joseph FOURIER, mathématicien français, affirma, qu'il était possible, dans certaines conditions, de décomposer une fonction périodique sous la forme d'une somme infinie de signaux sinusoïdaux.

Soit un signal $x(t)$ périodique, de période $T_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$.

Ce signal peut être développé sous la forme :

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)$$

$$\text{Avec : } a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) dt \quad a_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) \cos(n\omega_0 t) dt, \quad b_n = \frac{2}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) \sin(n\omega_0 t) dt$$

L'objectif de la transformation de Fourier est de trouver une nouvelle représentation du signal autre que l'espace amplitude/temps qui nous aide à la compréhension du contenu physique du signal. Le développement en série de Fourier permet d'obtenir une représentation fréquentielle (spectre) d'un signal, cela nous renseigne sur les différentes composantes spectrales qu'il contient.



ANNEXE B

Le premier mouvement du sol lors de l'arrivée d'une onde P

Lorsque le sol se met à trembler, il est soumis à l'influence de la première onde P qui arrive. Ce tout premier mouvement peut se définir par un vecteur possédant trois composantes dans l'espace : deux horizontales (AN et AE) et une verticale (AZ). Ces trois composantes peuvent être identifiées avec les enregistrements fournis par les stations sismologiques possédant trois capteurs (deux horizontaux, de directions Nord/Sud et Est/Ouest, et un capteur vertical).

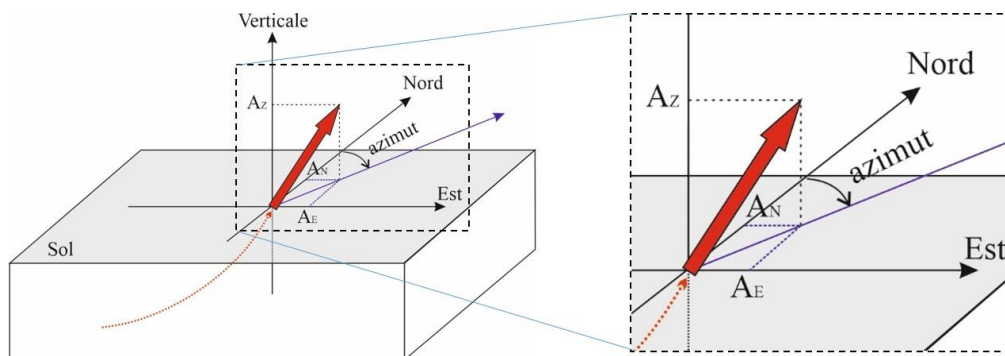
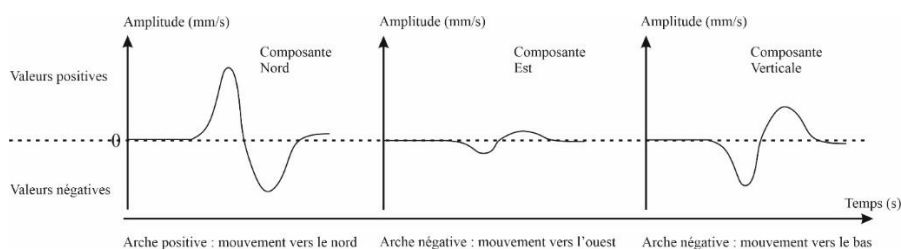


Schéma simplifié de l'arrivée d'un ray sismique (flèche rouge en pointillés) en surface, et du vecteur en trois dimension (flèche rouge épaisse) caractérisant le premier mouvement du sol correspondant, traduit par un vecteur. AE : décomposition du vecteur selon la direction Est. AN : décomposition du vecteur selon la direction Nord. AZ : décomposition du vecteur selon la direction verticale. Azimut : angle entre la direction du nord géographique et de la projection du vecteur dans le plan horizontal.

En analysant l'allure de l'arrivée de l'onde P sur les composantes horizontales, il est possible de déterminer l'angle de la direction de ce premier mouvement. Cet angle, nommée azimut, sera pris en compte pour définir la position exacte de l'épicentre.

Chaque composante fournit une information sur le sens du premier mouvement du sol lors de l'arrivée de la première onde P. Par convention, si la première arche correspondante à l'onde P pointe vers le haut du tracé, cela signifie que le mouvement est positif dans la direction de la composante. La Figure 4 illustre ce point.



Représentation schématique de l'arrivée d'une même onde P sur trois composantes. La polarité de la première arche donne le sens du mouvement selon la direction considérée.

Sur ces trois composantes ayant enregistré une même onde P, selon l'orientation des arches le mouvement associé à cette première onde P est à la fois vers le nord, vers l'ouest, et vers le bas.



ANNEXE C

Analyse de la polarité de l'onde P dans les trois directions du sismomètre

La sismologie aime bien poser des énigmes à ses adeptes. Penser que le sens du premier mouvement du sol dans le plan horizontal permet de retrouver la position de l'épicentre est un peu rapide. Voyons pourquoi. La Figure ci-dessous montre des coupes schématiques de coupes géologiques, de direction Ouest/Est, passant par deux stations sismologiques quelconques. Attention, un séisme se prépare. En effet, quelque part en profondeur à l'Est, se trouve une faille prête à rompre. Lors de la rupture, l'état de contrainte de part et d'autre de la faille n'est pas le même dans toutes les directions. Il y a des zones soumises à une compression (zones rouges), et des zones soumises à une dilatation (zones blanches). Cette approche très simplifiée de la réalité permet tout de même de mettre en évidence deux types d'ondes P :

- des ondes P générées dans les zones en compression : le premier mouvement des particules se fait en « poussant » les suivantes ;
- des ondes P générées dans les zones en dilatation : le premier mouvement des particules se fait en « tirant » les suivantes.

Cette caractéristique se retrouve au niveau de la polarité de la première onde P selon la direction verticale : positive (par convention vers le haut) pour une onde générée dans une zone en compression, négative (vers le bas) pour une onde générée dans une zone en dilatation. L'onde arrive ainsi avec une polarité précise selon le plan vertical au point de mesure. Mais elle a aussi une polarité dans le plan horizontal au point de mesure. Les sismogrammes très simplifiés de la figure suivante montrent ces polarités de la première onde P aux deux stations sismologiques. On constate qu'un même séisme peut induire deux types d'ondes aux caractéristiques différentes.

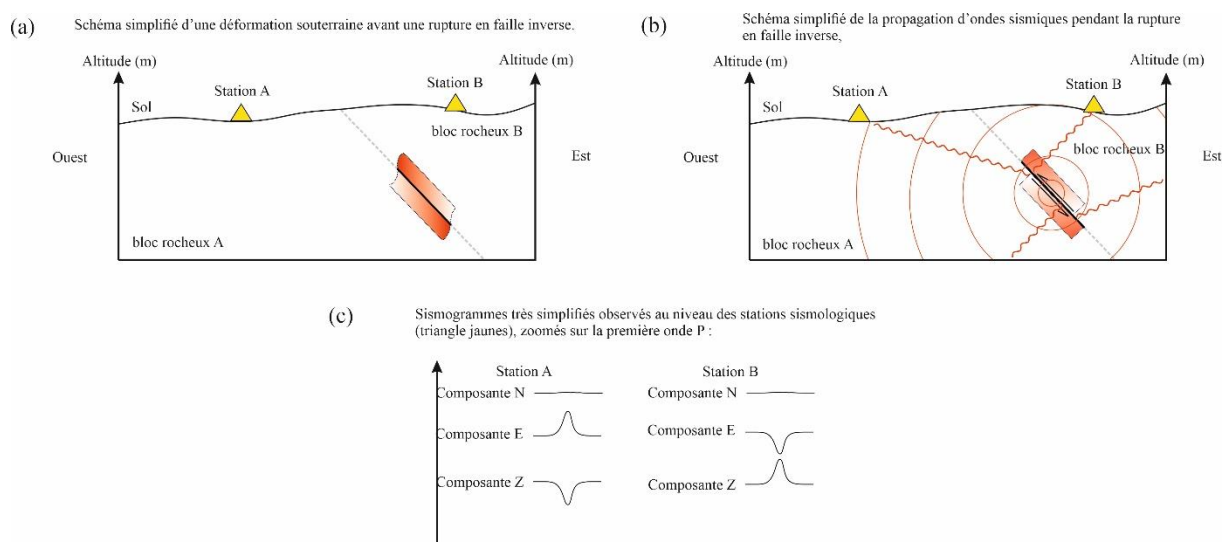


Schéma simplifié mettant en relation une rupture sismique et polarité de l'onde P. (a) Coupe schématique Ouest/Est passant par deux stations sismologique A et B, illustrant une rupture sismique en préparation. La coloration dégradée de part et d'autre de la faille indique la contrainte subit par les roches environnantes : rouge : compression ; blanc : dilatation. (b) Rupture sismique et évolution du front d'onde (cercles rouges) et directions de rais sismiques (c) Polarité de la première onde P enregistrée sur chaque composante des deux stations.



ANNEXE D

Petite introduction au mécanisme au foyer, et à la radiation des ondes P

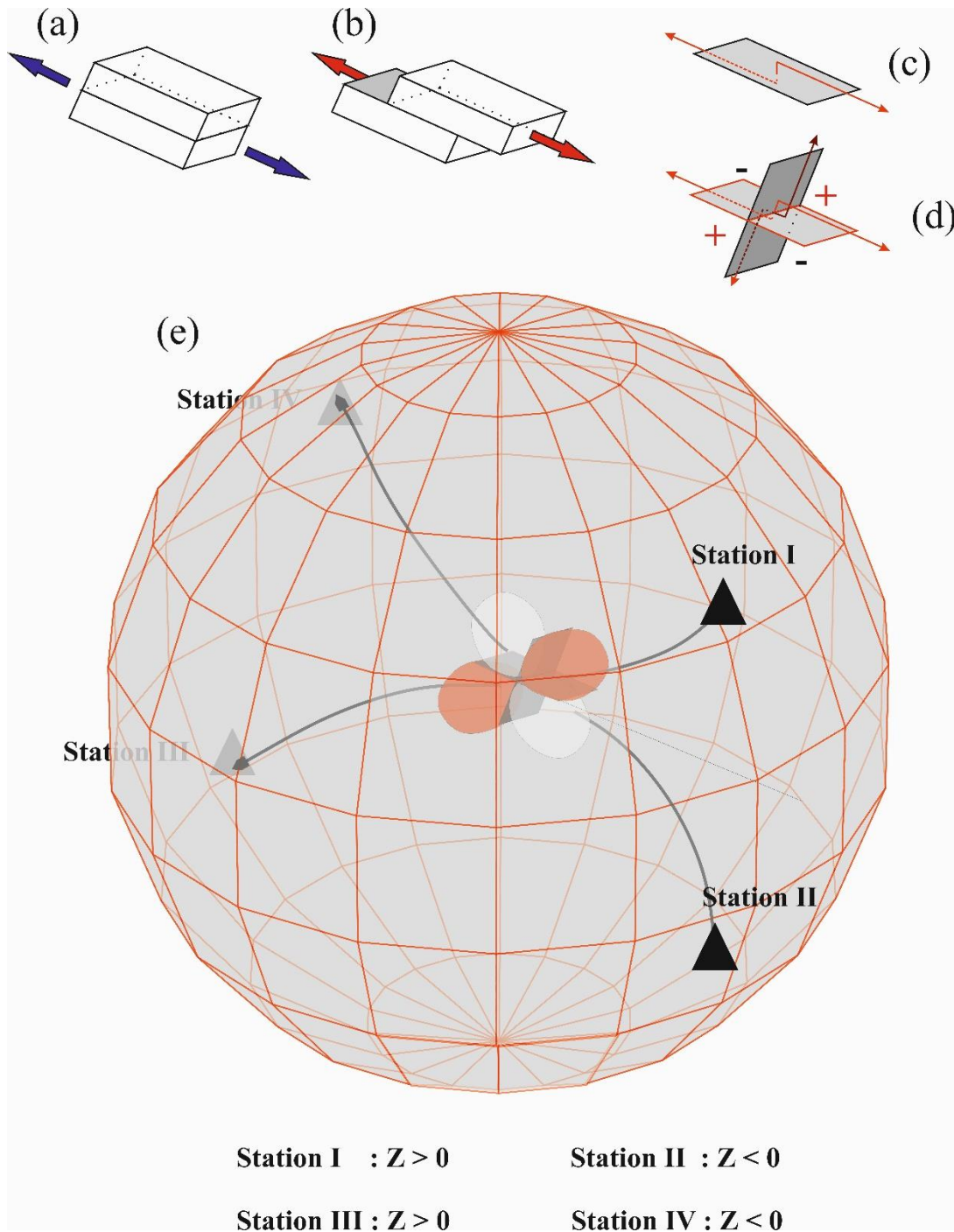
La figure suivante présente deux blocs rocheux soumis à un contexte extensif (a), qui provoque un séisme, c'est-à-dire une instabilité de glissement brutale, la rupture, le long d'une discontinuité mécanique, la faille (b). Le plan de faille qui sépare les deux compartiments rocheux a une orientation bien précise dans l'espace, qui va avoir une influence sur les ondes P générées. La rupture sismique peut se décrire comme un phénomène cisailant, entraînant un mouvement relatif des deux blocs disloqués. Une approche simple est d'expliquer ce mouvement comme la résultante de l'application d'un couple de forces (c), de même norme mais de direction opposée. Cette approche autorisant une rotation du plan de faille par l'application de ces forces, et une telle rotation n'étant pas possible sous terre (milieu confiné) il faut ajouter à ce modèle un deuxième couple de forces, identique au premier mais qui lui est orthogonal. Ce modèle, dit double-couple (d), est utilisé pour décrire une rupture cisailante. Cela veut dire que ce modèle prend en compte un deuxième plan virtuel, dit plan auxiliaire, orthogonal au plan de faille.

Ces deux plans définissent dans l'espace quatre zones au niveau desquelles la matière va réagir différemment à proximité de la rupture : deux zones sont soumises à une compression (d), deux zones sont soumises à une dilatation (d).

Les particules mises en mouvement vont avoir un type d'impulsion qui varie en fonction de la zone où elle est initiée :

- une impulsion comme une poussée dans les zones en compression,
- une impulsion comme une traction dans les zones en dilatation.

Ce tout premier mouvement se retrouvera lors de l'enregistrement de la première onde P au niveau d'une station sismologique (e). Si l'onde P a été générée dans une zone en compression, la polarité dans le plan vertical sera positive vers le haut, ou négative si l'onde P a été générée dans une zone en dilatation. Une même rupture, mais des caractéristiques variables.



(a) Flèches bleues : direction de la traction exercée de part et d'autre d'un volume rocheux, caractérisant un contexte extensif. (b) Flèches rouges : direction du mouvement de chaque bloc rocheux pendant la rupture de part et d'autre du plan de faille (surface grisée). (c) Schématisation physique d'une rupture cisailante autour du plan de faille (surface grisée). (d) Le modèle double couple. « + » rouge : zones en compression par rapport au jeu de la rupture. « - » noirs : zones en dilatation. (e) Schéma simplifié de cette rupture en profondeur d'une planète, disposant de quatre stations sismologiques à sa surface. Flèches noires : trajets internes de rais sismiques. Ellipsoïdes rouges : zones en compression autour de la rupture. Ellipsoïdes blancs : zones en dilatation autour de la rupture. $Z > 0$: polarité positive, ou vers le haut, du premier mouvement. $Z < 0$: polarité négative, ou vers le bas, du premier mouvement.