

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Références

GEO1303 – MÉTHODES SISMIQUES

Surveillance par sismique passive

Bernard Giroux

(bernard.giroux@ete.inrs.ca)

Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement

Version 0.1
Automne 2018

Principes

Source sismique

Acquisition des
données

Traitement des
données

Références

Principes

Introduction

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitements des données

Références

- La sismique passive, ou écoute microsismique, consiste à enregistrer et interpréter les ondes sismiques générées par des phénomènes qui ne sont pas *directement* provoqués ;
- On distingue *l'imagerie* par sismique passive et la *surveillance* par sismique passive ;
- En imagerie, on utilise le bruit ambiant et ou les microséismes pour construire un modèle ;
- En surveillance, on étudie la variation dans le temps, dans un volume donné :
 - Changements de contraintes dans les exploitations minières ;
 - Fracturation hydraulique ;
 - Déformation des réservoirs en exploitation ;
 - Risque sismique et géotechnique ;
 - Sismicité induite en géothermie ;
 - et plus encore...
- Ce cours se concentre sur la surveillance par sismique passive.

Introduction

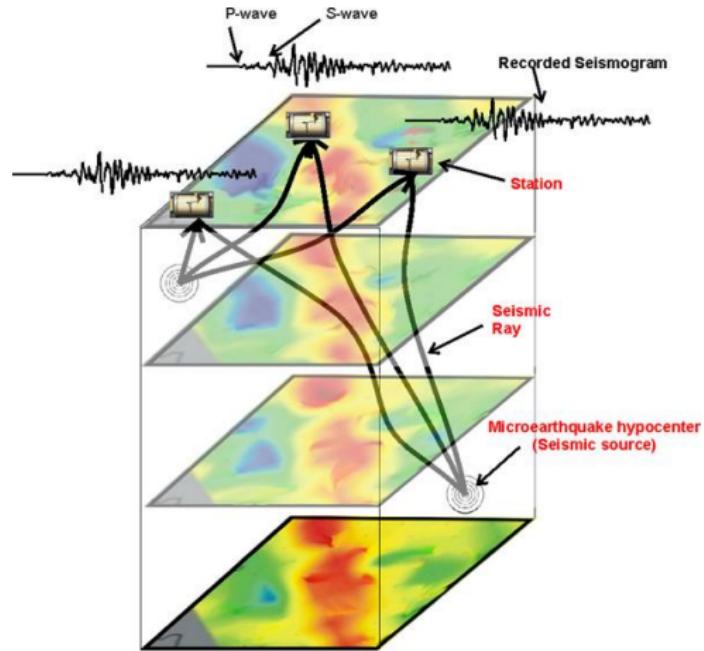
Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitements des données

Références



Source : www.landtech-geophysics.com

Principes

Source sismique

Tenseur de moment

Diagrammes de
rayonnement

Magnitude

Spectre

Acquisition des
données

Traitement des
données

Références

Source sismique

Source sismique

Principes

Source sismique

Tenseur de moment

Diagrammes de rayonnement

Magnitude

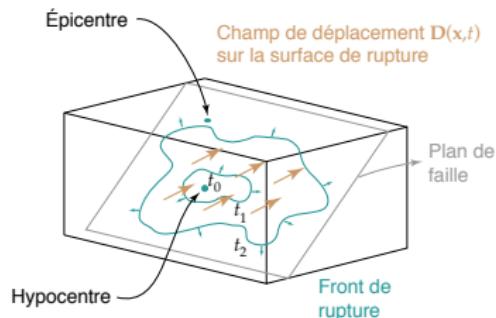
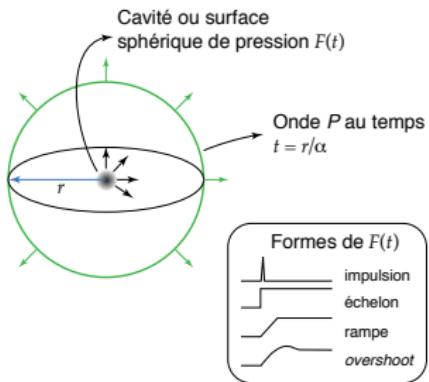
Spectre

Acquisition des données

Traitements des données

Références

- Les enregistrements microsismiques sont le témoignage d'une énergie libérée dans un volume restreint de roche ;
- Le concept de *source sismique* permet de décrire les mécanismes en cause ;
- On distingue deux catégories de source :
 - surfacique : rupture le long d'un plan de faille ;
 - volumique : explosion.



Source sismique

Principes

Source sismique

Tenseur de moment

Diagrammes de
rayonnement

Magnitude

Spectre

Acquisition des
données

Traitements des
données

Références

- La distribution spatiale et temporelle des forces à l'origine des ondes sismiques peut être complexe ;
- On utilise un système de forces équivalentes pour représenter les mécanismes au foyer ;
- Le *tenseur de moment* est une telle représentation, permettant de décrire une source ponctuelle, à une distance plus grande que les dimensions réelles de la source ;
- Ce tenseur s'écrit

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

où les éléments ij sont chacun un couple composé de forces opposées, orientées dans la direction i et décalées mutuellement selon j .

Source sismique

Principes

Source sismique

Tenseur de moment

Diagrammes de
rayonnement

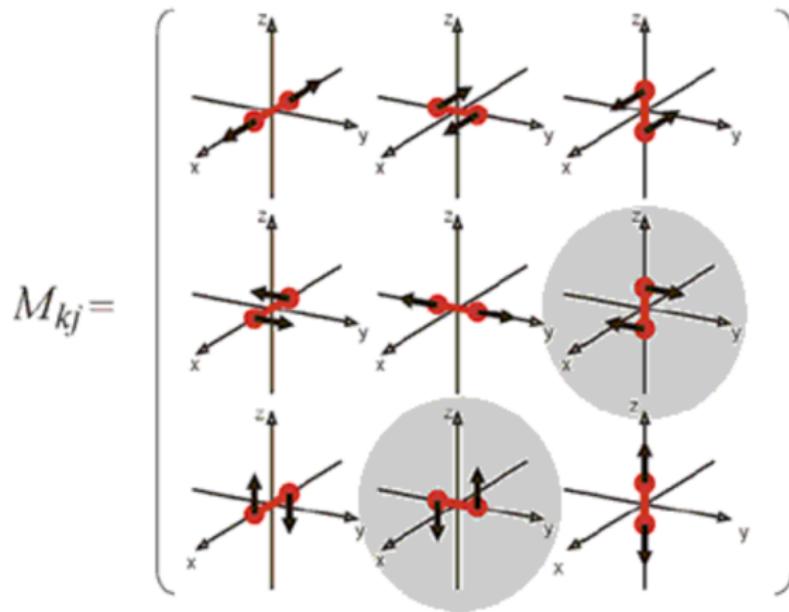
Magnitude

Spectre

Acquisition des
données

Traitement des
données

Références



Source : minewiki.engineering.queensu.ca

Source sismique

Principes

Source sismique

Tenseur de moment

Diagrammes de
rayonnement

Magnitude

Spectre

Acquisition des
données

Traitements des
données

Références

- Diagonale de **M** : couple de forces normales
 - signe positif vers l'extérieur ;
 - si la trace de **M** est 0 : pas de changement de volume.
- Hors diagonale : couple de forces en cisaillement
 - signe positif pour décrochement dextre (*right-lateral shear*).
- Le tenseur **M** présente une symétrie $M_{ij} = M_{ji}$
(conservation du moment angulaire)
 - une source ponctuelle ne peut produire un couple *net* non nul ;

Source sismique

Principes

Source sismique

Tenseur de moment

Diagrammes de
rayonnement

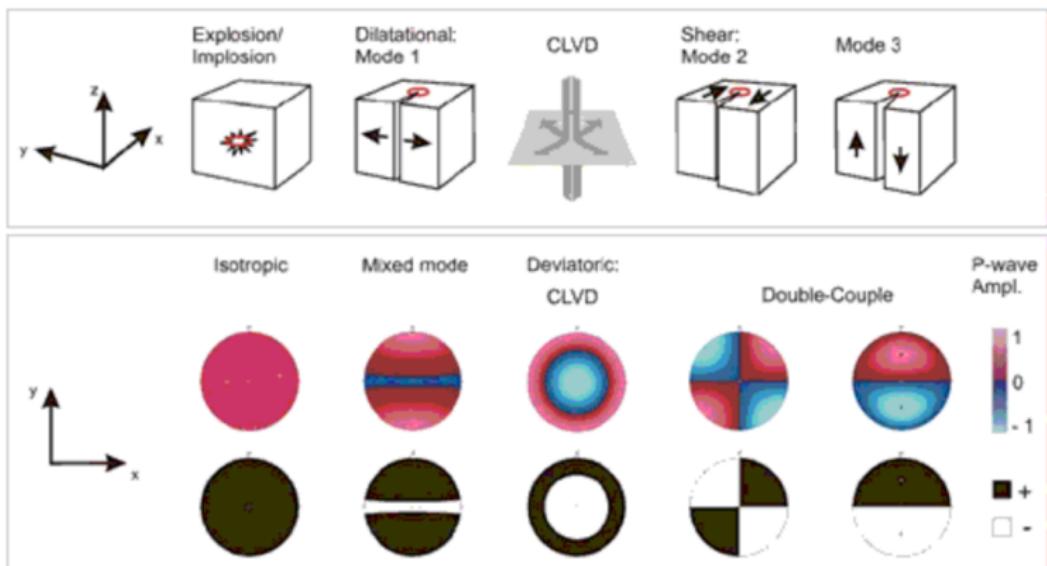
Magnitude
Spectre

Acquisition des
données

Traitements des
données

Références

Représentation des sources



Source : minewiki.engineering.queensu.ca

Source sismique

Principes

Source sismique

Tenseur de moment

Diagrammes de
rayonnement

Magnitude

Spectre

Acquisition des
données

Traitements des
données

Références

Moment tensor	Beachball	Moment tensor	Beachball
$\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$		$-\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	
$-\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$		$\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	
$\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$		$-\frac{1}{\sqrt{6}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix}$	

Source sismique

Principes

Source sismique

Tenseur de moment

Diagrammes de
rayonnement

Magnitude

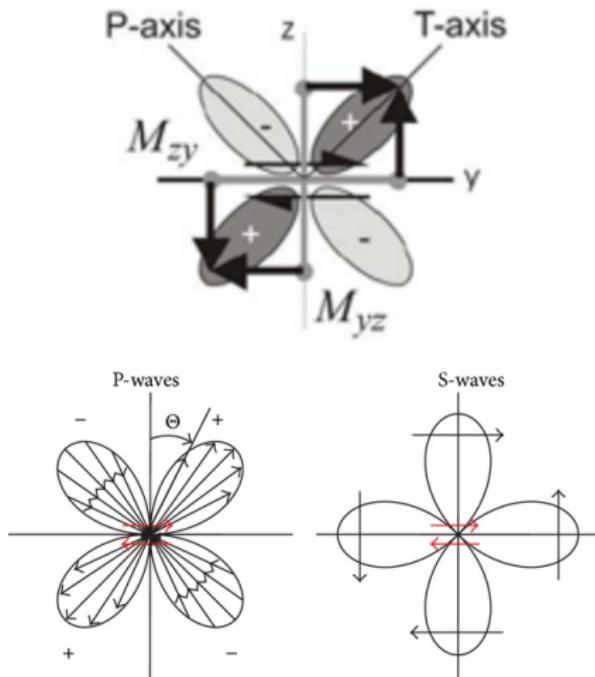
Spectre

Acquisition des
données

Traitement des
données

Références

Diagrammes de rayonnement 2D



Source sismique

Principes

Source sismique

Tenseur de moment

Diagrammes de
rayonnement

Magnitude

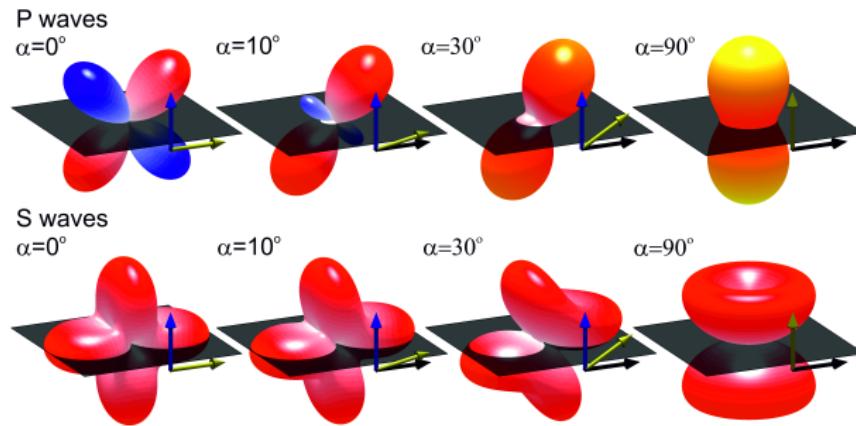
Spectre

Acquisition des
données

Traitements des
données

Références

Diagrammes de rayonnement 3D



Source : minewiki.engineering.queensu.ca

Source sismique

Principes

Source sismique

Tenseur de moment

Diagrammes de
rayonnement

Magnitude

Spectre

Acquisition des
données

Traitement des
données

Références

- L'importance relative d'un évènement sismique peut être quantifiée par le *moment sismique* scalaire M_0 ;
- Pour un tenseur donné, M_0 peut être exprimé en fonction de ses valeurs propres :

$$M_0 = \sqrt{\frac{1}{2} (M_1^2 + M_2^2 + M_3^2)} \quad (2)$$

- Pour un double-couple, on retrouve

$$M_0 = \mu A \bar{d} \quad (3)$$

où μ est le module de cisaillement représentatif de la faille, A est la surface de glissement et \bar{d} est le déplacement net sur A ;

- Le moment scalaire est habituellement exprimé en N m.

Source sismique

Principes

Source sismique

Tenseur de moment

Diagrammes de
rayonnement

Magnitude

Spectre

Acquisition des
données

Traitements des
données

Références

- La *magnitude* est plus fréquemment utilisée pour quantifier l'importance des événements ;
- Il existe plusieurs échelles de magnitude, la plus célèbre étant l'échelle de Richter ;
- L'échelle basée sur le moment sismique est la plus utilisée actuellement, et est définie par

$$M_W = \frac{2}{3} \log_{10} M_0 - 6. \quad (4)$$

- On peut séparer les séismes des événements sismiques en fonction de M_W :
 - Séisme : $M_W > 2$ correspondant plus ou moins au seuil des événements ressentis ;
 - Événement sismique : $M_W < 2$, peu probable d'être ressenti à la surface.

Source sismique

Principes

Source sismique

Tenseur de moment

Diagrammes de
rayonnement

Magnitude

Spectre

Acquisition des
données

Traitements des
données

Références

- Le spectre du déplacement au champ lointain est utile pour estimer certains paramètres de la source ;
- Un modèle général pour décrire ce spectre est

$$A(\omega) = \frac{A_0 e^{-(\omega t/2Q)}}{\left[1 + (\omega/\omega_c)^{n\gamma}\right]^{1/\gamma}} \quad (5)$$

où Q est le facteur de qualité sismique du milieu, A_0 est la valeur plateau aux basses fréquences, et ω_c est la fréquence coin.

Source sismique

Principes

Source sismique

Tenseur de moment

Diagrammes de
rayonnement

Magnitude

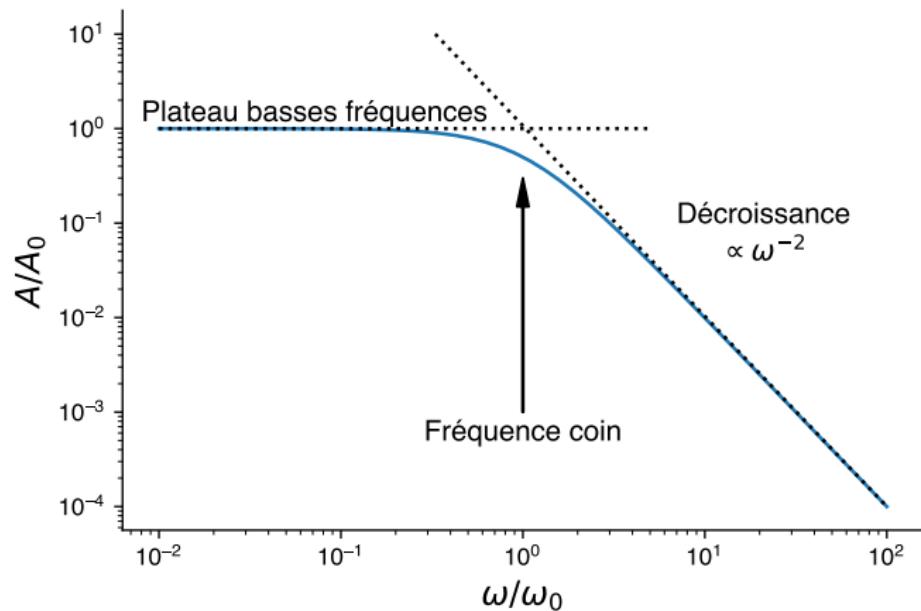
Spectre

Acquisition des
données

Traitement des
données

Références

Spectre de source ($Q \rightarrow \infty$, $n = 2$ et $\gamma = 1$)



Source sismique

Principes

Source sismique

Tenseur de moment

Diagrammes de
rayonnement

Magnitude

Spectre

Acquisition des
données

Traitements des
données

Références

- Pour un cisaillement sur une fracture circulaire, $n = 2$ et $\gamma = 1$ (modèle de Brune);
- Le relâchement de contrainte (*stress drop*) peut être approximé par la contrainte de rupture en cisaillement multipliée par 2μ , et vaut, pour une fracture de rayon a

$$\Delta\tau = \frac{7M_0}{16a^3} \quad (6)$$

- Avec certaines hypothèses, on peut exprimer le rayon de la fracture par

$$a = 2.34 v_s / \omega_c \quad (7)$$

- Le déplacement moyen est

$$\bar{d} = \frac{16a\Delta\tau}{7\pi\mu}. \quad (8)$$

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Systèmes d'acquisition

Capteurs

Tirs de calibration

Traitement des données

Références

Acquisition des données

Composantes

Principes

Source sismique

Acquisition des données

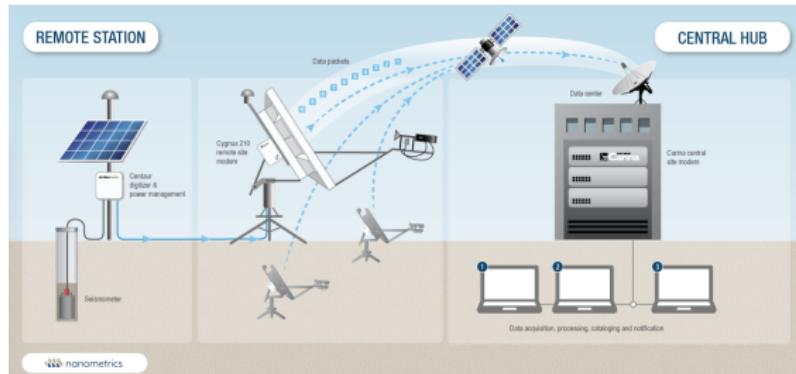
Systèmes d'acquisition
Capteurs

Tirs de calibration

Traitement des données

Références

- Les systèmes d'acquisition sont déployés pour des périodes \pm prolongées, selon les applications;
- Les systèmes comportent :
 - capteurs;
 - convertisseur analogique-numérique;
 - alimentation;
 - réseau et serveur central de contrôle et stockage.



Source : nanometrics.ca

Convertisseurs

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Systèmes d'acquisition

Capteurs

Tirs de calibration

Traitement des données

Références

- Deux types de convertisseurs :
 - compacts, pour déploiements à faible densité de capteurs;
 - multi-canaux, déploiements à haute densité de capteurs.
- Caractéristiques des convertisseurs compacts :
 - en général 24-bit, 32-bit maintenant disponible;
 - 3 ou 6 canaux;
 - consommation faible : $\approx 1\text{-}3 \text{ W}$;
 - boîtier robuste;
 - gamme étendue de température d'opération;
 - synchronisation par signal GPS;
 - interface réseau;
 - stockage local des données (mémoire flash).



Sources : esgsolutions.com & nanometrics.ca

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Systèmes d'acquisition

Capteurs

Tirs de calibration

Traitement des données

Références

- Les choix des capteurs est fonction de l'application ;

Laboratoire

Géophone 15 Hz

Géophone 4.5 Hz

FBA (accéléromètre à force équilibrée)

Systèmes microseismiques

Systèmes large bande

Courtes périodes

Systèmes régionaux

Longues périodes

Systèmes mondiaux



Capteurs

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Systèmes d'acquisition

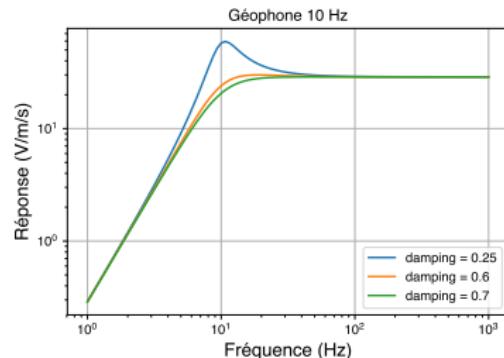
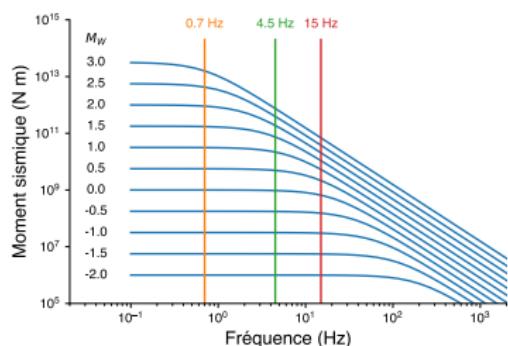
Capteurs

Tirs de calibration

Traitement des données

Références

- Règle générale : la fréquence coin est inversement proportionnelle au moment sismique.
- Le choix des capteurs est fonction de la magnitude des événements anticipés ;
 - une fréquence trop élevée conduit à une “saturation” pour les événements à moment élevé.



Capteurs

Principes

Source sismique

Acquisition des données

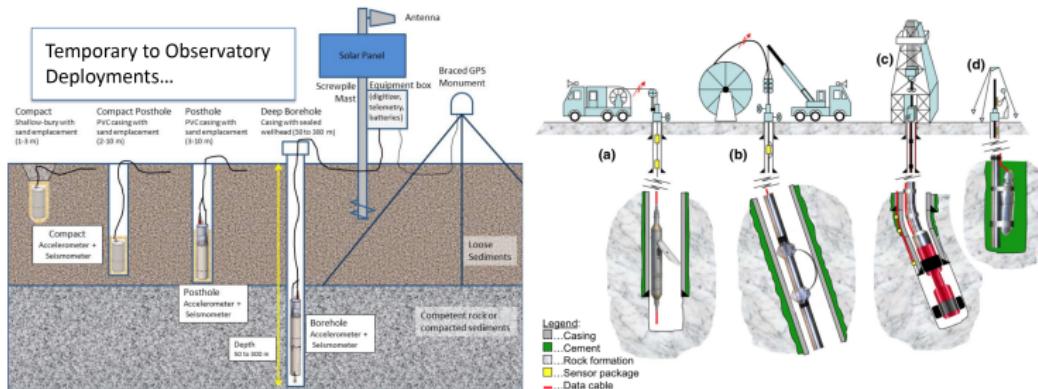
Systèmes d'acquisition
Capteurs

Tirs de calibration

Traitement des données

Références

- Les capteurs peuvent être installés
 - en forage : S/B plus élevé;
 - en surface : moins coûteux → nombre élevé → meilleure couverture.
- Une combinaison de capteurs en surface et en forage est parfois utilisée.



Sources : nanometrics.ca & Prevedel et al. (2015)

Principes

Source sismique

Acquisition des données

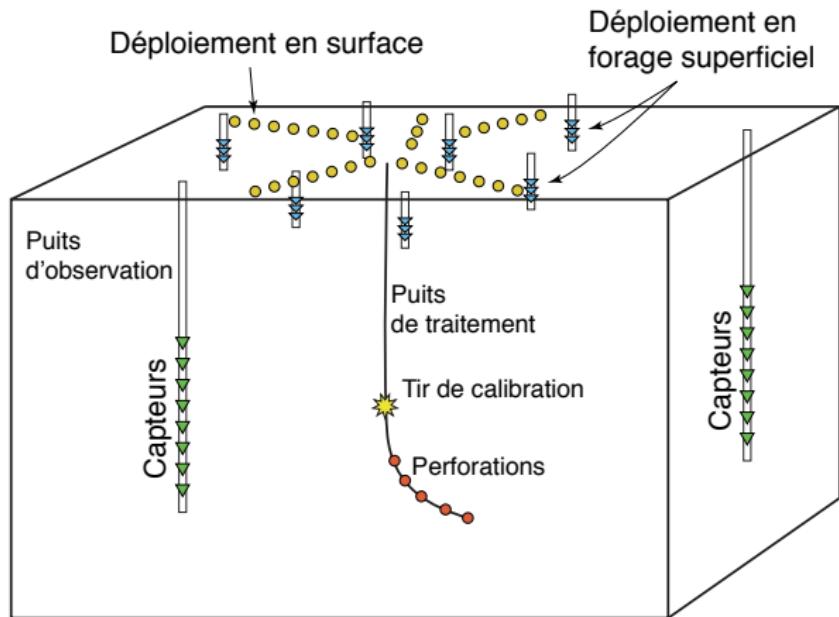
Systèmes d'acquisition

Capteurs

Tirs de calibration

Traitement des données

Références



Tirs de calibration

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Systèmes d'acquisition

Capteurs

Tirs de calibration

Traitement des données

Références

- Pour localiser les hypocentres, v_p et v_s doivent être connues ;
- Une fois le système d'acquisition en fonction, des tirs de calibration (x_0, y_0, z_0, t_0 connus) sont effectués pour
 - permettre d'estimer v_p et v_s ;
 - orienter les capteurs en forage à trois composantes ;
 - vérifier le fonctionnement du système.
- Les opérations en puits (perforations, *sleeve opening*) peuvent aussi servir pour calibrer les vitesses ;
 - le temps d'émission t_0 peut cependant être imprécis.

Principes

Source sismique

Acquisition des
données

**Traitement des
données**

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des
événements

Estimation du modèle de
vitesse

Références

Traitement des données

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitemennt des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- Le traitement des données de sismique passive comporte deux étapes principales :
 - la **détection** des évènements ;
 - la **localisation** des hypocentres,
- et des étapes intermédiaires :
 - l'inscription de la géométrie d'acquisition et la mise des données dans un système de coordonnées unique ;
 - la rotation des capteurs ;
 - le pointé des temps d'arrivée ;
 - la distinction des phases *P* et *S*.
- Les données de calibratioon nécessite également leur traitement.
- Le traitement doit s'adapter à la géométrie d'acquisition :
 - les méthodes diffèrent pour les acquisitions de surface et en forage.

Détection des évènements

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- La méthode *short-time average/long-time average* (STA/LTA) est probablement la plus connue;
- Soit une série temporelle \mathbf{u} , les paramètres STA et LTA sont, pour un échantillon i

$$\text{STA}_i(\mathbf{u}) = \frac{1}{N_S} \sum_{j=1}^{i+N_S-1} \text{CF}_j(\mathbf{u}), \quad (9)$$

et

$$\text{LTA}_i(\mathbf{u}) = \frac{1}{N_L} \sum_{j=1-N_L+1}^i \text{CF}_j(\mathbf{u}), \quad (10)$$

où

- N_S et N_L sont le nombre d'échantillon dans les fenêtres courtes et longues;
- $\text{CF}(\mathbf{u})$ est une mesure de l'amplitude ou de l'énergie dans la fenêtre (énergie, valeur absolue, enveloppe).

Détection des évènements

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

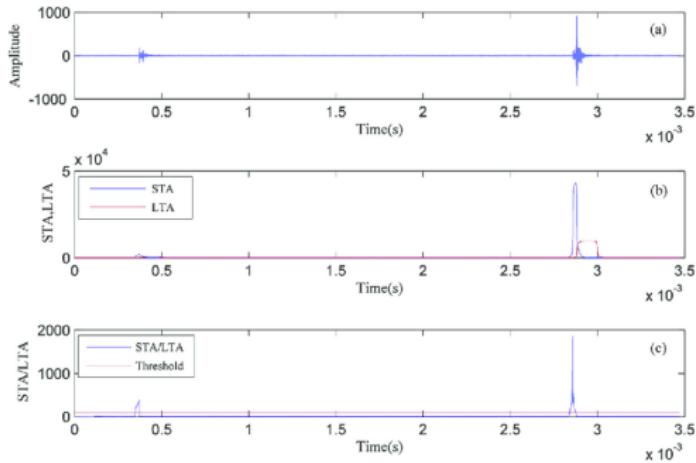
Estimation du modèle de vitesse

Références

- Le paramètre STA/LTA pour l'échantillon i est

$$\text{STA/LTA}_i(N_S, N_L) = \frac{\text{STA}_i}{\text{LTA}_i} \quad (11)$$

- Si le ratio excède un seuil donné, le signal est alors présent.



Détection des évènements

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- La performance de l'algorithme STA/LTA dépend du choix des longueurs de fenêtre ainsi que de la valeur seuil;
- La fenêtre STA devrait être 2-3 fois la période dominante du signal recherché;
- La fenêtre LTA devrait être 5-10 fois la fenêtre STA;
- La valeur seuil est fonction du rapport S/B et varie d'un site à l'autre;
 - la valeur seuil est habituellement choisie par essai/erreur.

Détection des évènements

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- Une autre critère est basé sur le coefficient d'aplatissement (*kurtosis*)

$$K_i(\mathbf{u}) = \frac{\sum_{j_1(i)}^{j_1(i)+N-1} (u_j - \bar{u}_i)^4}{N\sigma_i^4} \quad (12)$$

où \bar{u}_i est la moyenne à l'intérieur de la fenêtre N et σ_i^2 est la variance.

- À l'instar de la méthode STA/LTA, la méthode fonctionne avec deux fenêtres, une courte (N_S) et une longue (N_L), où l'indice $j_1(i)$ vaut i pour la fenêtre courte et $i - N$ pour la fenêtre longue ;
- La détection se fait avec

$$STK/LTK_i(N_S, N_L, \varepsilon) = \frac{STK_i}{LTK_i + \varepsilon} \quad (13)$$

avec ε une valeur faible servant à stabiliser la fonction.

Détection des évènements

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- Les méthodes STA/LTA et STK/LTK sont des algorithmes à un capteur;
- Environnements bruités : possible que des événements soient ratés à plusieurs capteurs;
 - limite l'intérêt à poursuivre le traitement.
- Méthodes automatiques de traitement : l'évènement est conservé s'il est détecté à un nombre minimal prédéfini de capteurs, à l'intérieur d'une fenêtre de temps donnée.

Pointé des temps d'arrivée

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitements des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- Les algorithmes de détection précédents permettent d'estimer le temps d'arrivée de l'onde :
 - Par exemple, le maximum de la dérivée de fonction STA/LTA survenant immédiatement avant t_{max} est un "bon" estimé du temps d'arrivée (t_{max} correspond au maximum de la fonction).
 - Pour des applications sur des sites de dimensions restreintes, la précision des détecteurs est souvent insuffisante.
 - Des méthodes à plusieurs capteurs basées sur l'inter-corrélation peuvent permettre de raffiner les pointés avec un minimum d'intervention manuelle.

Analyse de polarisation

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- Dans le cas de capteurs 3C en forage, il est nécessaire de faire une rotation des composantes vers un système nord-est-vertical (à moins de disposer d'un gyroscope);
- La rotation est généralement faite partant de la connaissance de la polarisation de l'onde P ;
- Les tirs de calibration sont utilisés pour ce faire;
- La polarisation est déterminée à partir de la *matrice de covariance de la forme d'onde*

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \quad (14)$$

où les termes sont calculés pour une fenêtre de N échantillons

$$C_{jk} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_{ij} u_{ik} \quad (15)$$

où u_{ij} dénote l'échantillon i et la composante j .

Analyse de polarisation

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- Les valeurs propres de \mathbf{C} correspondent aux axes de l'ellipsoïde de polarisation ;
- Pour une onde P , il n'y a en principe qu'une valeur propre non nulle ;
 - En présence de bruit, la valeur propre *principale* correspond à la polarisation de l'onde P .
- L'azimut de polarisation est donné par

$$\tilde{\theta}_a = \arctan [\hat{\gamma}_{11} \text{sign}(\hat{\gamma}_{31}), \hat{\gamma}_{21} \text{sign}(\hat{\gamma}_{31})] \quad (16)$$

où $\hat{\gamma}_{ij}$ représente la composante i du vecteur propre unitaire de la valeur propre λ_j (pour $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$);

- L'angle de plongée est

$$\hat{\phi}_a = \cos^{-1} \hat{\gamma}_{31}. \quad (17)$$

Analyse de polarisation

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitements des données

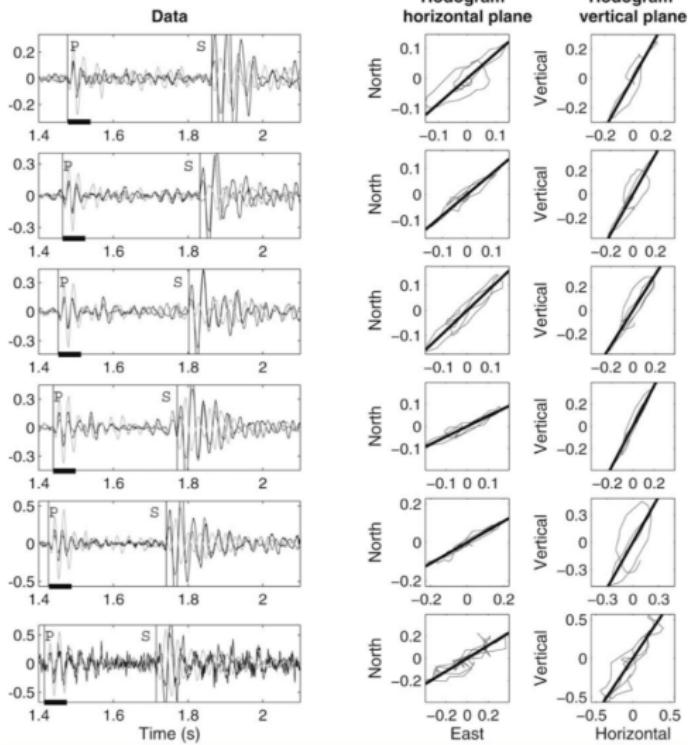
Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références



Localisation des évènements

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- Hypocentre : coordonnées (x_0, y_0, z_0) et temps d'origine t_0 d'un évènement ;
- Deux familles de méthodes existent pour localiser les hypocentres :
 - méthodes basées sur l'inversion des temps d'arrivée, parfois combinée aux données d'azimut obtenues de l'analyse de polarisation ;
 - méthodes basées sur la cohérence.
- Les méthodes basées sur l'inversion des temps d'arrivée sont les plus couramment employées ;
- Les méthodes basées sur la cohérence gagnent en popularité pour la surveillance en temps réel car le pointé des temps n'est pas requis.
- Toutes les méthodes reposent sur une connaissance *a priori* de la distribution spatiale des vitesses sismiques ;
 - des méthodes d'inversion conjointe hypocentre-vitesse existent, mais sont sensibles au modèle de départ.

Localisation – Inversion des temps d'arrivée

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- La localisation par inversion des temps d'arrivée consiste à minimiser la différence entre les temps observés et les temps prédits à partir d'un modèle ;
- Lorsque la vitesse est connue, le modèle comporte quatre paramètres, soit x_0, y_0, z_0, t_0 ;
 - Il faut au moins quatre mesures pour résoudre le problème ;
 - On dispose généralement d'un nombre supérieur de mesures : le problème est surdéterminé → solution par moindres-carrés.
- Problème surdéterminé avec bruit dans les données : la solution n'est pas unique ;
 - L'utilisation combinée des temps d'arrivée des ondes P et S permet de contraindre la solution.

Localisation – Inversion des temps d'arrivée

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitements des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- Soient t_i le temps d'arrivée d'un évènement se produisant au temps d'origine t_0 et mesuré à un capteur i , et T_i le temps de parcours de la source à ce capteur, alors

$$t_i = T_i + t_0; \quad (18)$$

- Si l'onde sismique se propage à une vitesse constante v , alors

$$t_i = \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}{v} + t_0, \quad (19)$$

où (x_i, y_i, z_i) sont les coordonnées du capteur et (x_0, y_0, z_0) les coordonnées de l'hypocentre.

Localisation – Inversion des temps d'arrivée

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- Le problème inverse est résolu de façon itérative en partant d'un modèle initial $\mathbf{m} = (x_0^0, y_0^0, z_0^0, t_0^0)$;
- L'objectif est de trouver une correction $\Delta\mathbf{m}$ pour minimiser l'écart entre le temps observé t_i^o et le temps calculé avec le modèle t_i^c , que l'on note $\Delta\mathbf{d}$;
- En linéarisant le problème, on a

$$\Delta\mathbf{d} = \mathbf{G}\Delta\mathbf{m} \quad (20)$$

où la matrice \mathbf{G} contient les dérivées partielles

$$G_{ij} = \frac{\partial t_i}{\partial m_j}. \quad (21)$$

Localisation – Inversion des temps d'arrivée

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitements des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- Partant de l'équation (19), on trouve les dérivées

$$\begin{aligned}\frac{\partial t_i}{\partial x_0} &= \frac{-(x_i - x_0)}{v\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}} \\ \frac{\partial t_i}{\partial y_0} &= \frac{-(y_i - y_0)}{v\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}} \\ \frac{\partial t_i}{\partial z_0} &= \frac{-(z_i - z_0)}{v\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}} \\ \frac{\partial t_i}{\partial t_0} &= 1\end{aligned}$$

Localisation – Inversion des temps d'arrivée

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitements des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- La solution par moindres-carrés est

$$\Delta \mathbf{m} = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \Delta \mathbf{d}. \quad (22)$$

- Si l'erreur sur les temps d'arrivée suit une distribution normale de variance σ^2 , l'erreur sur le modèle sera

$$\sigma_m^2 = \mathbf{G}^{-1} \sigma^2 \left(\mathbf{G}^{-1} \right)^T. \quad (23)$$

- L'intérêt de cette méthode est qu'elle est extrêmement rapide, (systèmes d'équation à résoudre de taille modeste);
- Par contre, on peut rarement assumer que le modèle de vitesse est homogène;
- La matrice $\mathbf{G}^T \mathbf{G}$ peut être singulière si l'hypocentre est loin des capteurs :
 - solution par décomposition SVD;
 - l'utilisation combinée des arrivées P et S stabilise le système.

Localisation – Différence-double

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- La précision de la localisation peut être améliorée avec la méthode “différence-double” (Waldhauser and Ellsworth, 2000);
- L'idée est de tirer profit d'une trajectoire source-récepteur similaire pour annuler l'erreur due à l'incertitude sur v ;
- Hypothèses :
 - un hypocentre est déjà localisé avec précision;
 - distance entre événements < distance source-récepteur;
 - distance entre événements < échelle d'hétérogénéité de v ;
 - bonne couverture azimutale.
- Le problème est formulé en se basant sur deux différences :
 - la différence entre les temps d'arrivée de deux événements mesurés à un récepteur;
 - la différence entre les temps d'arrivée des deux événements, calculés à partir d'un modèle de vitesse.

Localisation – Différence-double

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- Soit un évènement i mesuré à un capteur k , le résidu est

$$\Delta t_k^i = (t^o - t^c)_k^i \approx \frac{\partial t_k^i}{\partial \mathbf{m}} \Delta \mathbf{m}^i, \quad (24)$$

où la dérivée partielle est évaluée à l'hypocentre.

- De façon similaire, nous avons un 2^e évènement j

$$\Delta t_k^j = (t^o - t^c)_k^j \approx \frac{\partial t_k^j}{\partial \mathbf{m}} \Delta \mathbf{m}^j, \quad (25)$$

- Si on connaît le délai entre les évènements $(t_k^i - t_k^j)^o$, on peut montrer que

$$\Delta t_k^{ij} \approx \frac{\partial t_k^{ij}}{\partial \mathbf{m}} \Delta \mathbf{m}^{ij} \quad (26)$$

où $\Delta \mathbf{m}^{ij} = (\Delta dx_0^{ij}, \Delta dy_0^{ij}, \Delta dz_0^{ij}, \Delta dt_0^{ij})$ est le changement entre les paramètres relatifs des hypocentres des deux évènements (la source est le centroïde des hypocentres).

Localisation – Différence-double

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- Le terme Δdt_k^{ij} est la différence-double, et s'écrit

$$\Delta dt_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^o - (t_k^i - t_k^j)^c \quad (27)$$

- On peut récrire l'équation (26)

$$\Delta dt_k^{ij} \approx \frac{\partial t_k^i}{\partial \mathbf{m}} \Delta \mathbf{m}^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial \mathbf{m}} \Delta \mathbf{m}^j \quad (28)$$

ou, au long,

$$\begin{aligned} \Delta dt_k^{ij} = & \frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta t_0^i \\ & - \frac{\partial t_k^j}{\partial x} \Delta x^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial y} \Delta y^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial z} \Delta z^j - \Delta t_0^j \end{aligned} \quad (29)$$

- Il y a huit paramètres inconnus, il faut combiner les mesures à huit récepteurs (quatre si on peut compter sur les ondes S).

Localisation – Différence-double

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- En combinant les données, on peut construire un système matriciel de la forme

$$\mathbf{WGm} = \mathbf{Wd} \quad (30)$$

où

- \mathbf{G} est de taille $M \times 4N$ (M : n. observations, N : n. événements);
- \mathbf{d} contient les différence-double (27);
- \mathbf{m} contient les paramètres de hypocentres;
- \mathbf{W} est une matrice diagonale de pondération calculée à partir de l'incertitude sur les délais.
- La solution par moindres-carrés pondérés est

$$\mathbf{m} = \left(\mathbf{G}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{G} \right)^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{W}^{-1} \mathbf{d}. \quad (31)$$

Localisation – Capteurs en forage

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

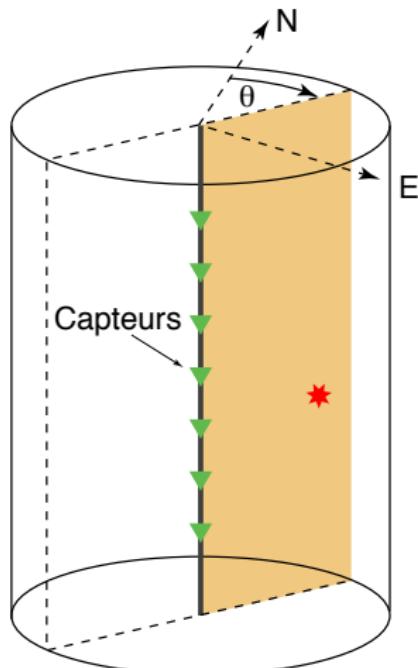
Détection des événements
Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- Dans le cas où on ne dispose que de capteurs dans un seul forage, il y a ambiguïté en raison de la géométrie cylindrique du problème ;
- Pour réduire l'ambiguïté, on utilise les données de rétro-azimut θ (*backazimuth*) obtenues de l'analyse de polarisation.



Localisation – Capteurs en forage

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- L'inversion consiste à minimiser la fonction objectif

$$\phi = \sum_{i=1}^N (t_i^c(\mathbf{m}) - t_i^o)^2 + w \sum_{j=1}^M (\theta_j^c(\mathbf{m}) - \theta_j^o)^2 \quad (32)$$

où w est un facteur de pondération (généralement estimé par le rapport des incertitudes sur t et θ).

- Le problème est fréquemment solutionné en deux parties :
 - le 1^{er} terme est solutionné en coordonnées cylindrique (ρ, z);
 - le 2^e terme est habituellement solutionné avec le mouvement des ondes P .
- Avec un seul forage, l'ambiguité subsiste car la polarité de l'onde P est inconnue;
 - il faut inclure une information *a priori* pour lever l'ambiguité.

Estimation du modèle de vitesse

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitements des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- La localisation des hypocentres repose sur une bonne connaissance des vitesses sismiques ;
- Habituellement, un modèle initial est construit à partir des diagraphies en forage, en particulier dans le domaine pétrolier ;
 - ce modèle est souvent 1D;
 - l'anisotropie est souvent prise compte (milieux sédimentaires);
 - l'atténuation doit également être estimée si on souhaite déterminer les mécanismes au foyer;
 - les tirs de calibration sont utilisés pour mettre à jour le modèle.

Inversion conjointe

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- Il est possible d'inverser conjointement les hypocentres et la vitesse;
- Posons que la vitesse est définie aux N noeuds d'une grille régulière;
- En incluant les vitesses dans les paramètres du modèle, on peut écrire

$$\Delta d = \Delta t_0 + \frac{\partial t_i}{\partial x_0} \Delta x_0 + \frac{\partial t_i}{\partial y_0} \Delta y_0 + \frac{\partial t_i}{\partial z_0} \Delta z_0 + \sum_{j=1}^N \frac{\partial t_i}{\partial v_j} \Delta v_j \quad (33)$$

- On peut construire un système matriciel où les dérivées partielles de l'hypocentre sont séparées des dérivées partielles de la vitesse, i.e.

$$\Delta \mathbf{d} = \mathbf{G}_h \Delta \mathbf{m} + \mathbf{G}_v \Delta \mathbf{v} \quad (34)$$

Inversion conjointe

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- Pour résoudre le système (34), on peut factoriser la matrice \mathbf{G}_h pour obtenir une matrice \mathbf{T} telle que $\mathbf{T}^T \mathbf{G}_h = 0$;
- On peut alors construire un système

$$\begin{aligned}\mathbf{T}^T \Delta \mathbf{d} &= \mathbf{T}^T \mathbf{G}_h \Delta \mathbf{m} + \mathbf{T}^T \mathbf{G}_v \Delta \mathbf{v} \\ \Delta \mathbf{d}' &= \mathbf{G}_v' \Delta \mathbf{v}\end{aligned}\tag{35}$$

et résoudre pour $\Delta \mathbf{v}$;

- On peut ainsi mettre à jour le modèle de vitesse en tenant compte du lien avec les hypocentres.
- Une fois le modèle de vitesse mis à jour, on utilise le système (22) pour mettre à jour les hypocentres.
- Le processus est répété jusqu'à convergence.

Inversion conjointe

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitement des données

Détection des événements

Analyse de polarisation

Localisation des événements

Estimation du modèle de vitesse

Références

- L'estimation du modèle de vitesse est un problème inverse mal posé :
 - certaines zones sont traversées par plusieurs rais sismiques ;
 - d'autre zones ne sont pas traversées.
- Le problème doit être régularisé, typiquement
 - en minimisant un terme de lissage ;
 - en imposant une pénalité pour des valeurs sortant d'une fourchette prédéfinie.
- Il est possible d'inclure dans la formulation
 - une contrainte aux noeuds où la vitesse est connue ;
 - les données des tirs de calibrationpour améliorer la justesse des résultats.

Principes

Source sismique

Acquisition des
données

Traitement des
données

Références

Références

Références

Principes

Source sismique

Acquisition des données

Traitements des données

Références

Référence principale

- Eaton, D. W. (2018). *Passive Seismic Monitoring of Induced Seismicity : Fundamental Principles and Application to Energy Technologies*. Cambridge University Press

Références additionnelles

- Aki, K. and Richards, P. G. (2002). *Quantitative Seismology*. University Science Books, Sausalito, CA, 2nd edition
- Gibowicz, S. J. and Kijko, A. (1994). *An Introduction to Mining Seismology*. Academic Press
- Maxwell, S. (2014). *Microseismic Imaging of Hydraulic Fracturing*. Society of Exploration Geophysicists