

Méthodes sismologiques pour l'étude de la fracturation dans les glaciers Alpins

Glaciers d'Argentière et du Gorner

Pierre-François Roux

Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique
Université de Savoie, Chambéry, France

Le Bourget du Lac, 3 mars 2008

Plan de l'exposé

- 1 Introduction
- 2 La sismicité profonde comme indice du frottement basal
- 3 Influence du *jökulhlaup* sur la sismicité
- 4 Corrélation de bruit au glacier d'Argentière
- 5 Conclusions et perspectives

Plan de l'exposé

- 1 Introduction
 - Motivations
 - Fracturation dans les glaciers alpins
 - Objectifs scientifiques
 - Sites et instrumentation
 - Caractéristiques des signaux
- 2 La sismicité profonde comme indice du frottement basal
- 3 Influence du *jökulhlaup* sur la sismicité
- 4 Corrélation de bruit au glacier d'Argentière
- 5 Conclusions et perspectives

Cadre



Cliché F. Walter

Contexte général

- Développement :
 - d'instruments
 - de méthodespour l'étude des mouvements gravitaires
- Application aux glaciers alpins

Fracturation et séismes glaciaires



Différents mécanismes de fracturation

- Fracturation thermique
- Ouverture de crevasses
- Hydrofracturation
- Frottement basal
- ...

Séismes glaciaires

- Onde émise au sein de la masse de glace
- Mesurer ces séismes permet de caractériser l'un de ces mécanismes

Études précédentes



Ce qui a été étudié jusque là...

- Neave et Savage (1970) : sismicité = ouverture de crevasses
- Weaver et Malone (1979) ; Deichmann et al. (2000) : sources localisées en profondeur

La sismicité de surface domine mais il existe des sources en profondeur

Objectifs



...et ce que nous avons étudié ...

- 1 Frottement basal : **localisation et caractérisation de séismes profonds**
- 2 Hydrofracturation et modifications du champ de contraintes : **influence des variations de pression d'eau**

Méthodes d'antennes



Principe de base

- Signal cohérent d'un capteur à l'autre ...
- ...mais décalé du temps de propagation nécessaire entre les deux sismomètres.

Intérêt des antennes

- Aspect pratique
- Précision accrue (information relative)

Glacier d'Argentière et instrumentation

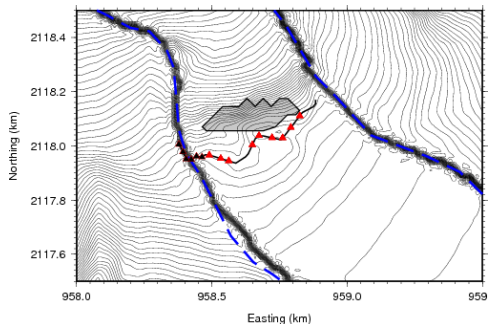


Glacier d'Argentière

- Glacier tempéré de 10 km de long et d'environ 19 km² de surface
- Importante chute de séracs
- Galeries creusées dans le lit rocheux, ≈ 5 m sous la base du glacier

Accès unique à la base du glacier

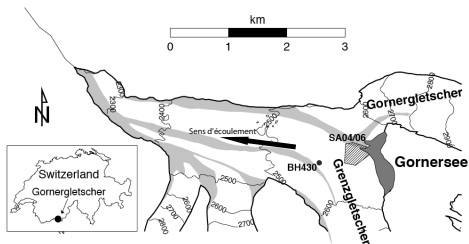
Glacier d'Argentière et instrumentation



Dispositif d'acquisition

- 9 sismomètres courte-période, verticaux
- Enregistrement **simultané** et **continu** sur un mois (de décembre 2003 à janvier 2004)
- Pas de résolution verticale

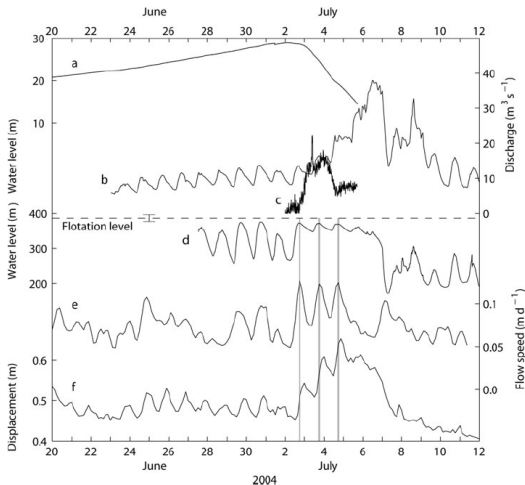
Glacier du Gorner et instrumentation



Gornergletscher

- Glacier polythermal de 14 km de long
- Convergence de deux glaciers (Grenz et Gorner)
- Formation d'un lac supra-glaciaire (*Gornersee* chaque printemps, et vidange rapide (*jökulhlaup*) en juin/juillet

Jökulhlaup : définition et ordres de grandeur



D'après Sugiyama et al. (2007)

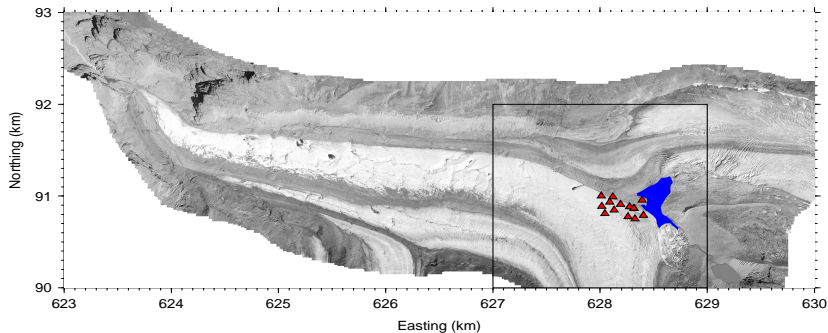
Définition

- *Jökull* (glacier) et *hlaup* (lit. "explosion")
- Voie supra-, intra- ou sub-glaciaire

Caractéristiques de la vidange

- Volume du lac : $\approx 4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
- Surface $\approx 0.3 \text{ km}^2$
- Hauteur d'eau augmente juste avant la vidange (Huss et al., 2007)

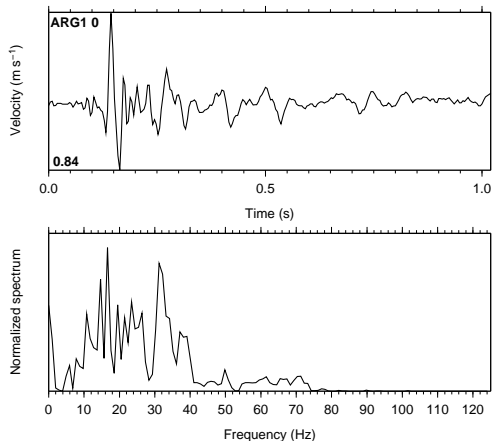
Glacier du Gorner et instrumentation



- Campagnes de terrain organisées par l'ETH Zürich (2004, 2006, 2007)
- 14 sismomètres courte-période à trois composantes, dont un en forage
- Couplage avec mesures GPS, hauteur d'eau, sismique active ...
- Données acquises en déclenchement

La sismicité à Argentière

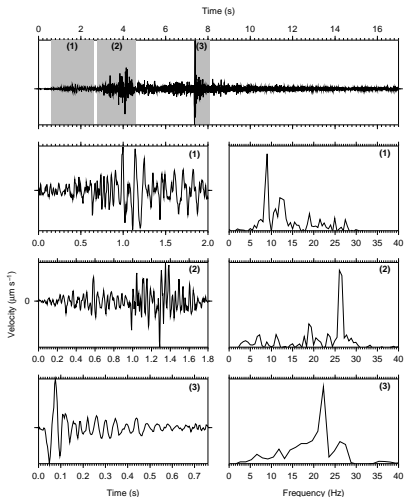
11 DEC 2003 00h13



Deux principaux types de séismes

- Signaux courts, impulsifs, contenus dans la bande spectrale 10 – 40 Hz (fracturation ?)
- Signaux longs, complexes et d'amplitude élevée. Spectre varie avec le temps (chutes de séracs)

La sismicité à Argentière

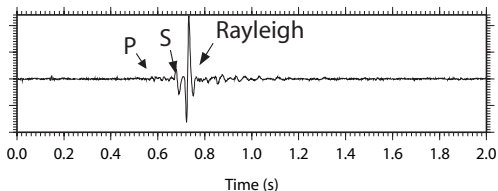


Deux principaux types de séismes

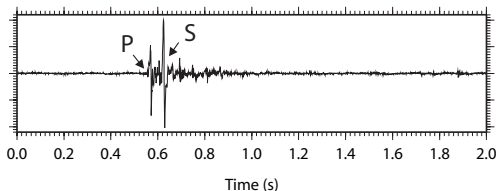
- Signaux courts, impulsifs, contenus dans la bande spectrale 10 – 40 Hz (fracturation ?)
- Signaux longs, complexes et d'amplitude élevée. Spectre varie avec le temps (chutes de séracs)

La sismicité du Gorner

Surface event



Deep event



Classification

- Séismes de surface : onde de surface dominante & faibles ondes de volume
- Séismes profonds : ondes de volume dominantes & faible onde de surface
- Séparation suivant des critères spectraux (Walter et al., 2008)

Plan de l'exposé

- 1 Introduction
- 2 **La sismicité profonde comme indice du frottement basal**
 - Méthode développée
 - Application au glacier du Gorner : complément d'information
 - Application au Glacier d'Argentière
- 3 Influence du *jökulhlaup* sur la sismicité
- 4 Corrélation de bruit au glacier d'Argentière
- 5 Conclusions et perspectives

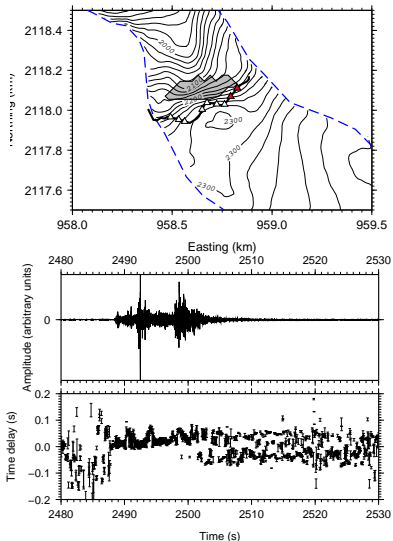
Méthode de recherche sur grille en trois étapes

3 étapes en un coup d'œil...

- Mesure des décalages temporels pour N_s séismes
- Calcul des décalages théoriques pour N_v modèles de vitesse
- Calcul de la densité de probabilité sur la position des N_s sources et le modèle de vitesse

On recherche le modèle de vitesse et les localisations qui ajustent au mieux les données

Calcul des décalages temporels



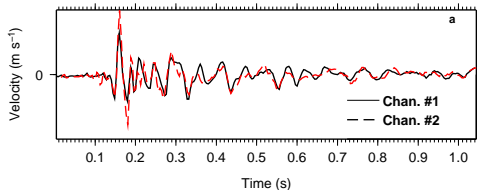
Étape I

- Différentes méthodes (temporelles, fréquentielles)
- Méthodes temporelles :
 - minimisation de la variance de la différence des deux traces
 - maximisation de l'intercorrélation

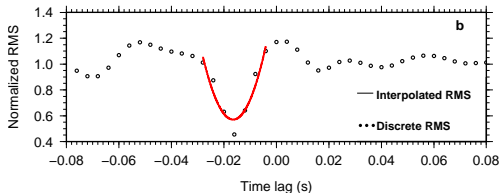
Précision inférieure au pas d'échantillonnage

Calcul des décalages temporels

Signal



RMS

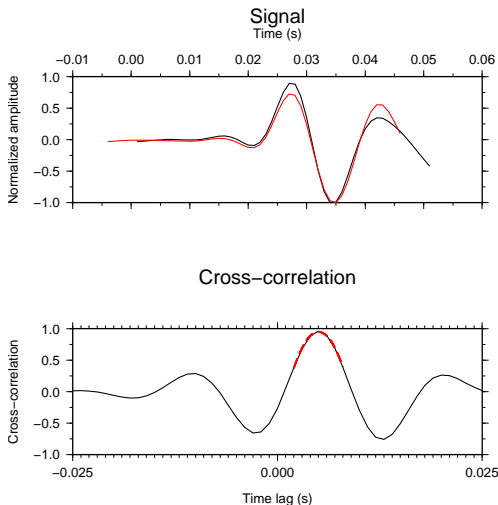


Étape I

- Différentes méthodes (temporelles, fréquentielles)
- Méthodes temporelles :
 - minimisation de la variance de la différence des deux traces
 - maximisation de l'intercorrélacion

Précision inférieure au pas d'échantillonnage

Calcul des décalages temporels



Étape I

- Différentes méthodes (temporelles, fréquentielles)
- Méthodes temporelles :
 - minimisation de la variance de la différence des deux traces
 - maximisation de l'intercorrélacion

Précision inférieure au pas d'échantillonnage

Calcul des décalages temporels

Étape I

- Différentes méthodes (temporelles, fréquentielles)
- Méthodes temporelles :
 - minimisation de la variance de la différence des deux traces
 - maximisation de l'intercorrélolation

Précision inférieure au pas d'échantillonnage

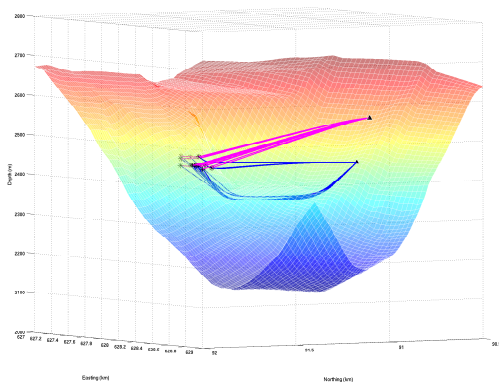
Calcul des décalages théoriques

$$\begin{aligned}\tau_{ij} &= T_j - T_i \\ &= \int_{P_j} v(s)^{-1} ds - \int_{P_i} v(s)^{-1} ds\end{aligned}$$

Étape II

- Décalage théorique entre les capteurs i et j (τ_{ij}^{cal})
- Chaque point du MNT = source potentielle
- Différents modèles de vitesse
- \Rightarrow calcul des temps de parcours (Podvin et Lecomte, 1991; Monteiller et al., 2005)
- Tracé de rai \Rightarrow prise en compte de la topographie

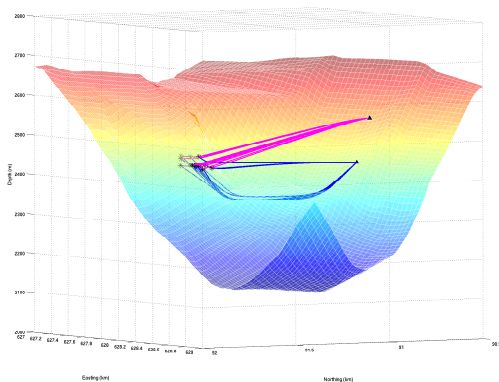
Calcul des décalages théoriques



Étape II

- Décalage théorique entre les capteurs i et j (τ_{ij}^{cal})
- Chaque point du MNT = source potentielle
- Différents modèles de vitesse
- \Rightarrow calcul des temps de parcours (Podvin et Lecomte, 1991; Monteiller et al., 2005)
- Tracé de rai \Rightarrow prise en compte de la topographie

Calcul des décalages théoriques



Étape II

- Décalage théorique entre les capteurs i et j (τ_{ij}^{cal})
- Chaque point du MNT = source potentielle
- Différents modèles de vitesse
- \Rightarrow calcul des temps de parcours (Podvin et Lecomte, 1991; Monteiller et al., 2005)
- Tracé de rai \Rightarrow prise en compte de la topographie

Calcul de la densité de probabilité

$$E = \sum_{ij} \frac{|\tau_{ij}^{obs} - \tau_{ij}^{cal}|^2}{\sigma_{ij}^2}$$

$$\rho(X_1, \dots, X_{N_s}, V_1, \dots, V_M) \propto \exp -E$$

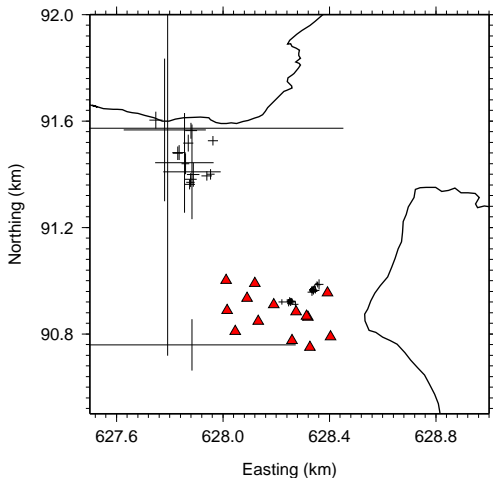
σ_{ij} : écart-type sur les données ; τ_{ij}^{obs} : décalages mesurés ; τ_{ij}^{cal} : décalages calculés

Étape III

- Calcul de la densité de probabilité ρ pour :
 - N_s séismes
 - N_v modèles de vitesse (M valeurs de vitesse de propagation)
- $\Rightarrow 3N_s + N_v$ paramètres à considérer
- Extraction des lois marginales

Densité de probabilité
complètement calculée

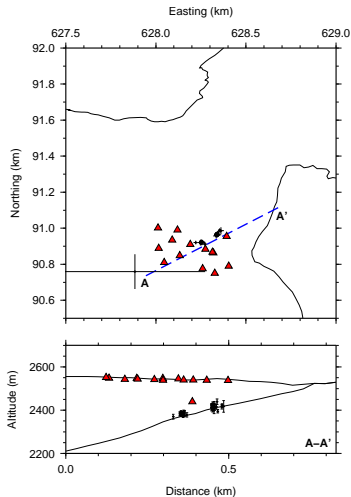
Localisation des séismes profonds



Trois essais de séismes profonds

- Deux sont localisés à *l'intérieur* du réseau, à l'interface glace-roche (Walter et al., 2008)
- Le troisième est situé en bordure du glacier

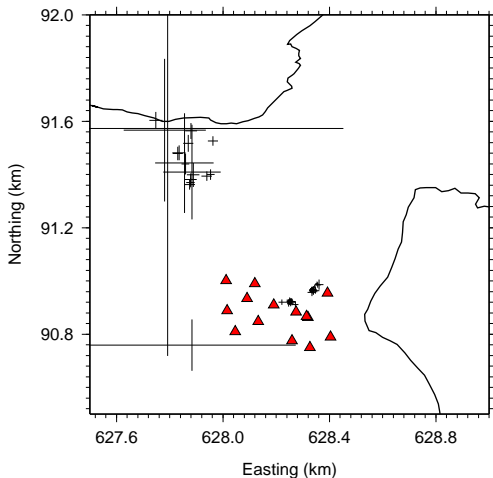
Localisation des séismes profonds



Trois essais de séismes profonds

- Deux sont localisés à l'intérieur du réseau, à l'interface glace-roche (Walter et al., 2008)
- Le troisième est situé en bordure du glacier

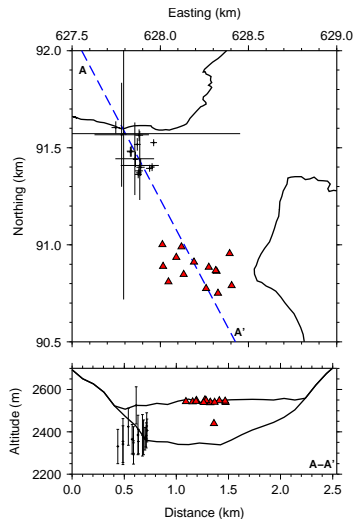
Localisation des séismes profonds



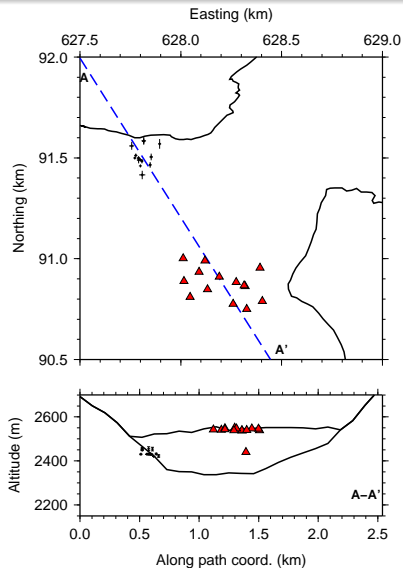
Trois essais de séismes profonds

- Deux sont localisés à l'intérieur du réseau, à l'interface glace-roche (Walter et al., 2008)
- Le troisième est situé en bordure du glacier

Essaim 3

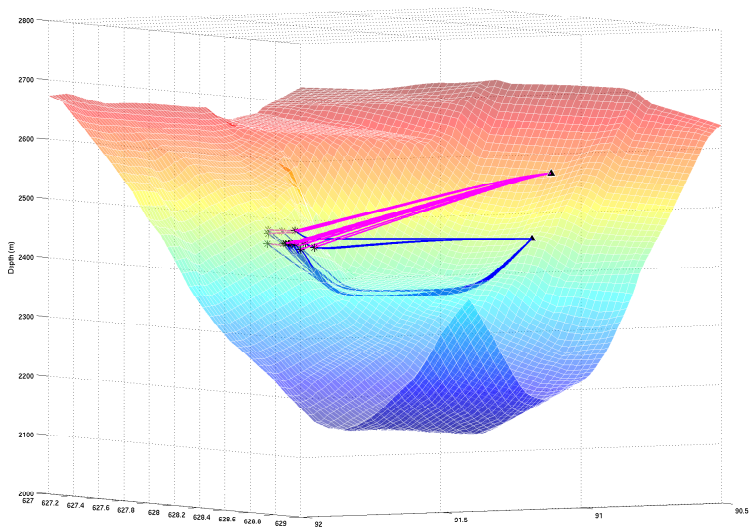


Application de la méthode



- $dx = dy = dz = 10 \text{ m}$
- $V_{\text{glace}} = 3600 \text{ m.s}^{-1}$
- $V_{\text{roche}} = 3900 \text{ m.s}^{-1}$

Application de la méthode



Stick-slip



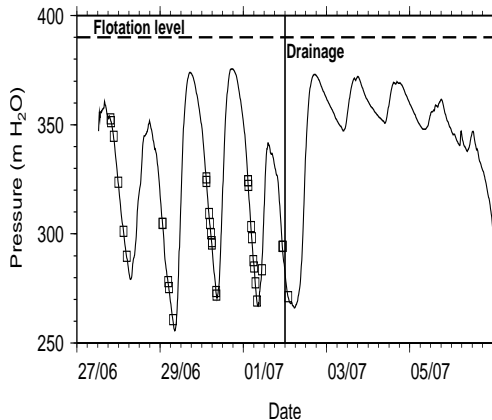
stick-slip

Existence de points froids à l'interface glace - roche (Goodman et al., 1979)

- 1 Accumulation de contrainte cisailante
- 2 Rupture

Fracturation mode I

Water pressure



D'après Walter et al. (2008)

Relation avec la hauteur d'eau

- Variations diurnes / nocturnes de la hauteur d'eau
- Séismes lorsque la hauteur d'eau diminue
- Plus de séismes après l'initiation de la vidange

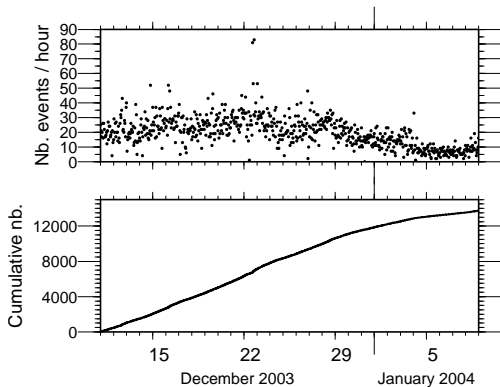
Fracturation mode I



fracturation en extension (mode I ; Walter et al. (2008))

- Hauteur d'eau élevée \Rightarrow découplage entre le glacier et le lit rocheux
- Hauteur d'eau faible : frottement sur le lit rocheux \Rightarrow déformation
- **fracturation en mode I de la glace basale**
- **compatibilité avec les diagrammes de radiation**

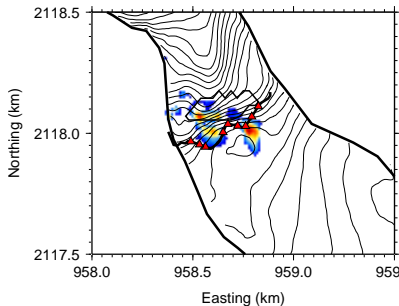
La sismicité à Argentière



- Forte émissivité du glacier (13 930 évènements détectés)
- Détection des séismes par STA/LTA (Allen, 1978)
- Nombre moyen de séismes par heure : 19.34
- Pas de cycle jour / nuit

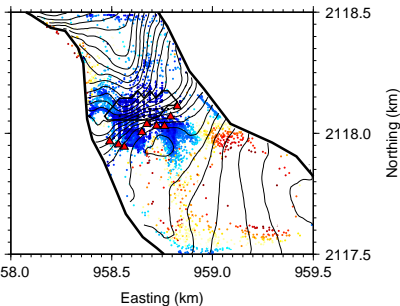
Localisation : essais de séismes

Average PDF



PDF ($\times 10^{-5} \text{ m}^{-2}$)

Mean Std. Dev.

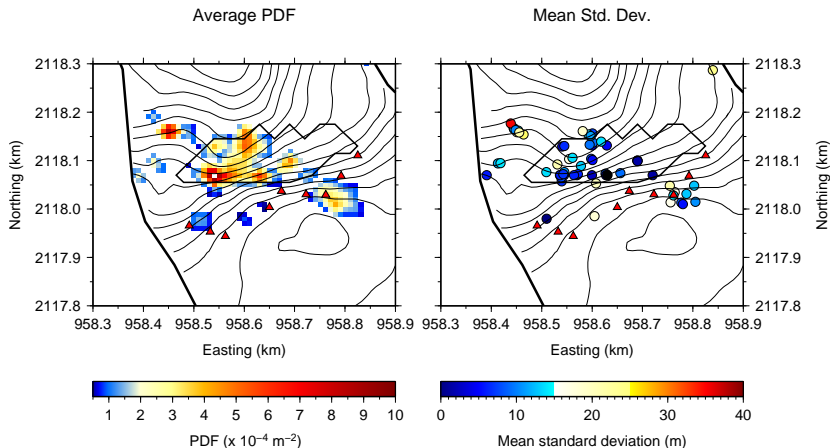


Mean standard deviation (m)

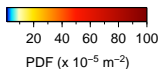
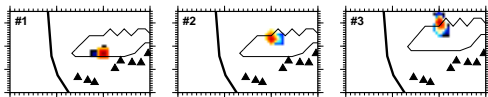
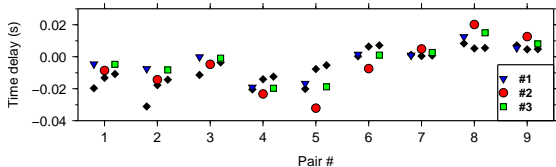
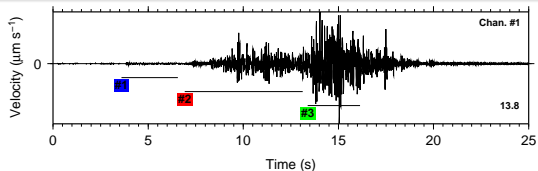
$$dx = dy = dz = 30 \text{ m}$$

$$V_{\text{glace}} = 2100 \text{ m.s}^{-1}, V_{\text{roche}} = 2300 \text{ m.s}^{-1}$$

Localisation : chutes de séracs

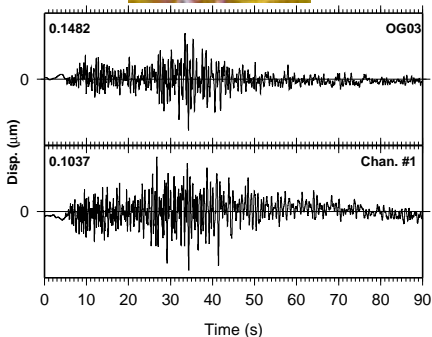


Localisation : chute de séracs



Vitesse d'avalanche $\approx 12 \text{ m.s}^{-1}$

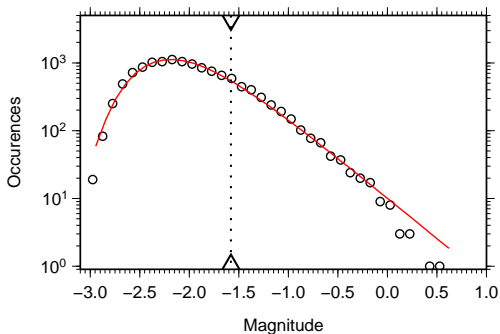
Magnitudes locales



Détermination d'une loi d'atténuation

- $\log A = a + c \log \Delta$
 a : dépend de la station
 c : caractérise l'atténuation géométrique
 Δ : distance source - station
- Utilisation de séismes régionaux
 ($d_{OG03-ARG} = 20 \text{ km}$)

Magnitudes locales



- Gutenberg-Richter (détection modélisée avec une loi de type Gumbel (Marsan et al., 2008))
- $m_c = -1.6$; $b = 1.2$

Mécanismes proposés



Sources possibles des séismes localisés

- Chutes de séracs
- Ouverture de crevasse
- Sources profondes (*stick-slip*)

Mécanismes proposés

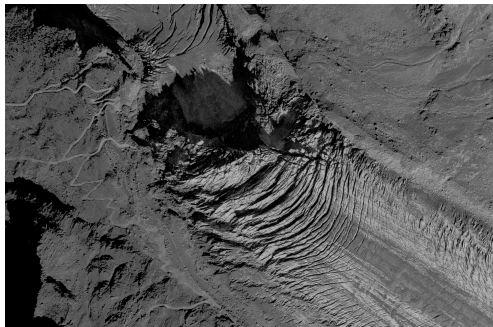
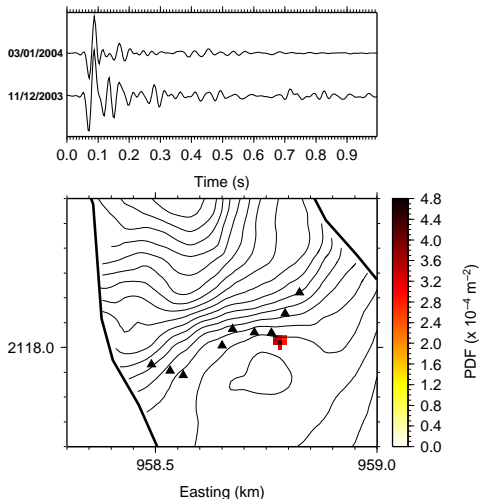


Image LGGE - C. Vincent

Sources possibles des séismes localisés

- Chutes de séracs
- Ouverture de crevasse
- Sources profondes (*stick-slip*)

Mécanismes proposés



Densité de probabilité de 28 séismes

Sources possibles des séismes localisés

- Chutes de séracs
- Ouverture de crevasse
- Sources profondes (*stick-slip*)

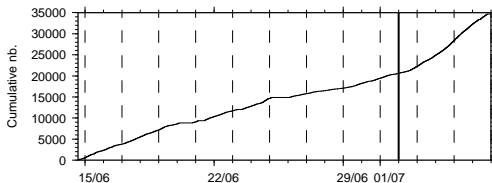
Mauvaise couverture instrumentale \Rightarrow pas de détermination des mécanismes au foyer

Plan de l'exposé

- 1 Introduction
- 2 La sismicité profonde comme indice du frottement basal
- 3 **Influence du *jökulhlaup* sur la sismicité**
 - Sismicité au glacier du Gorner
 - Localisation des séismes de surface
 - Variations des observables
 - Origine de ces variations ?
- 4 Corrélation de bruit au glacier d'Argentière
- 5 Conclusions et perspectives

Évolution de la sismicité avec l'initiation de la vidange

Cumulative number of icequakes

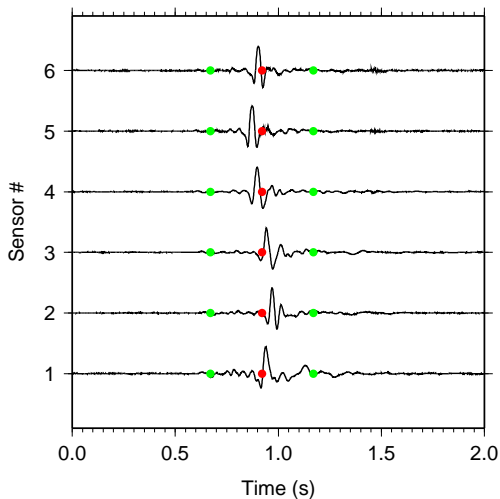


Évolution temporelle de la sismicité

- Grand nombre de séismes enregistrés
- Accélération de la sismicité après l'initiation de la vidange

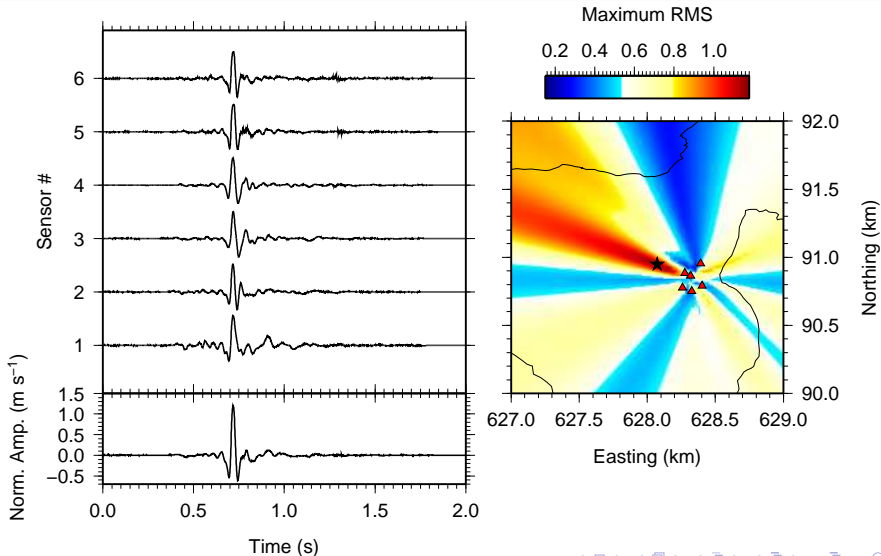
Sismicité de surface

Signal windowing



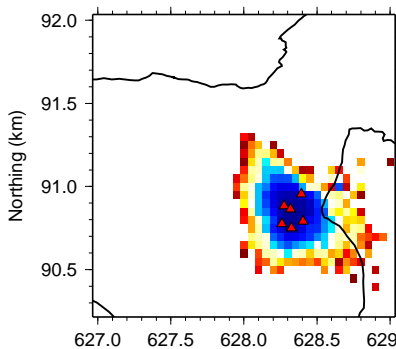
- Onde de surface cohérente
- Fenêtrage

Méthode de localisation

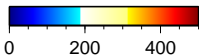


Incertitudes

Distance uncertainty

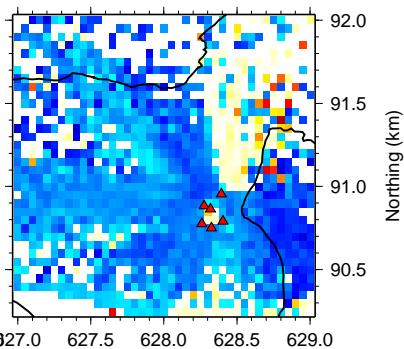


Easting (km)

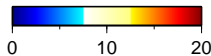


Distance uncertainty (m)

Azimuthal uncertainty

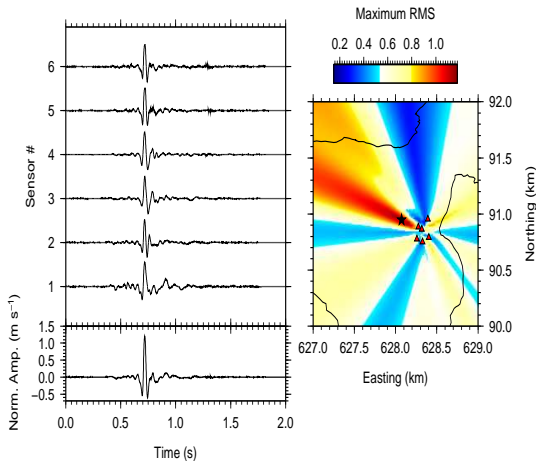


Easting (km)



Azimuthal uncertainty (°)

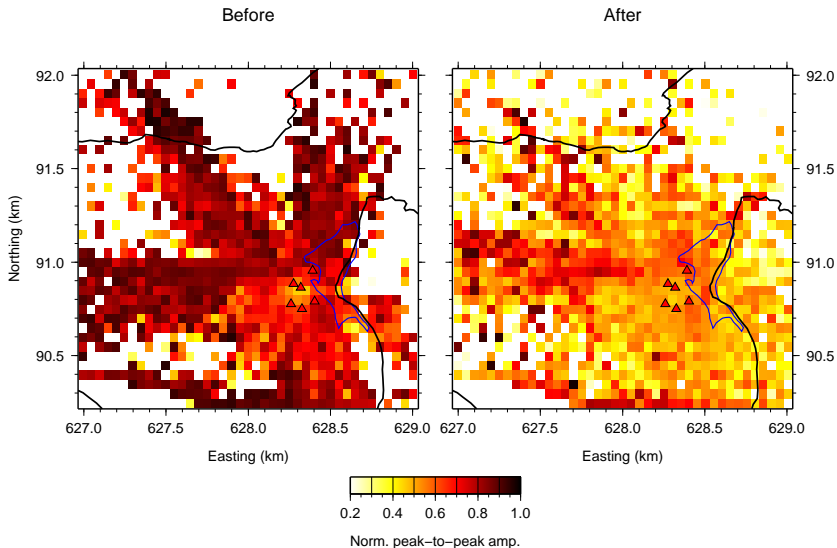
Localisation



Observables

- 2 observables :
 - amplitude crête-à-crête de la trace somme
 - vitesse apparente

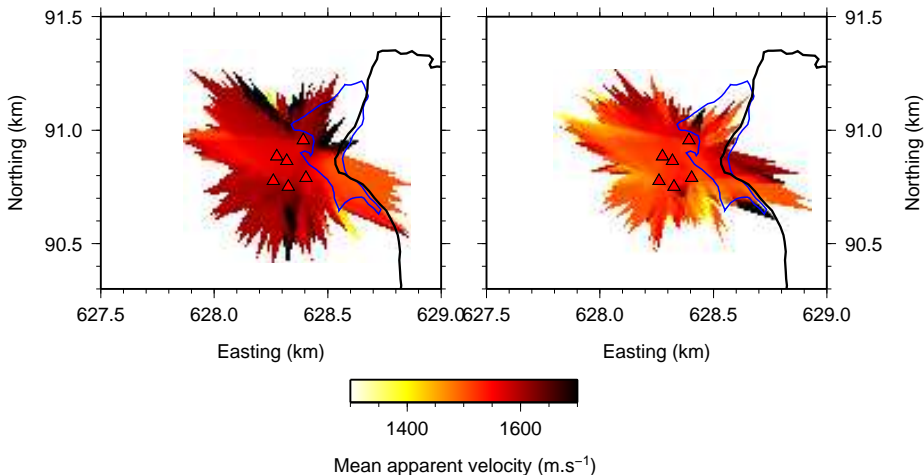
Amplitude crête-à-crête



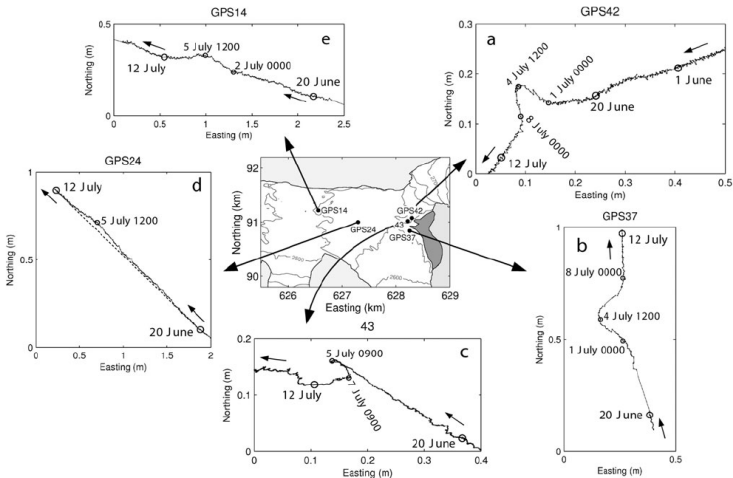
Vitesse apparente

Before

After

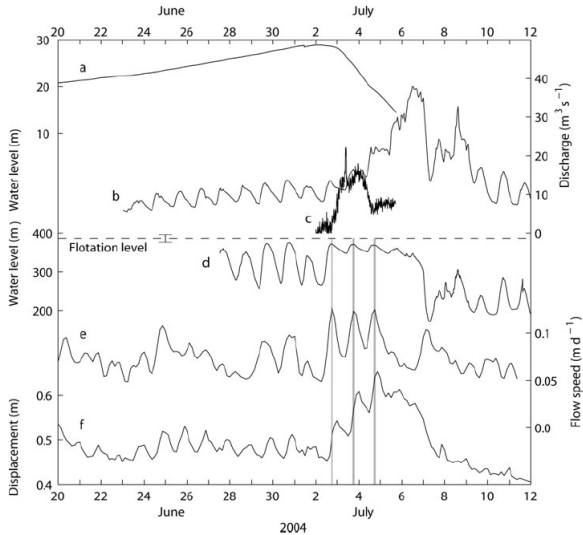


Modification du champ de contraintes



D'après Sugiyama et al. (2007)

Augmentation de la hauteur d'eau



En résumé...



Sources possibles

- Trajets source-stations plus complexes
- Sources plus superficielles
- Milieu plus saturé en eau
- ...

Plan de l'exposé

- 1 Introduction
- 2 La sismicité profonde comme indice du frottement basal
- 3 Influence du *jökulhlaup* sur la sismicité
- 4 Corrélation de bruit au glacier d'Argentière**
 - Méthode
 - Application à Argentière
 - Discussion
- 5 Conclusions et perspectives

Corrélation de bruit sismique



Relation corrélation \leftrightarrow fonction de Green

- Corrélation d'un champ aléatoire \propto fonction de Green (Lobkis et Weaver, 2001)
- Cas milieu ouvert et absorbant (Terre) :
 - Diffusion (coda)
 - Homogénéisation spatiale (temps longs)

Symétrie des fonctions de corrélation

- Corrélation \Rightarrow parties causales et acausales
- Asymétrie \Leftrightarrow bruit directif (Pedersen et al., 2007)

Données

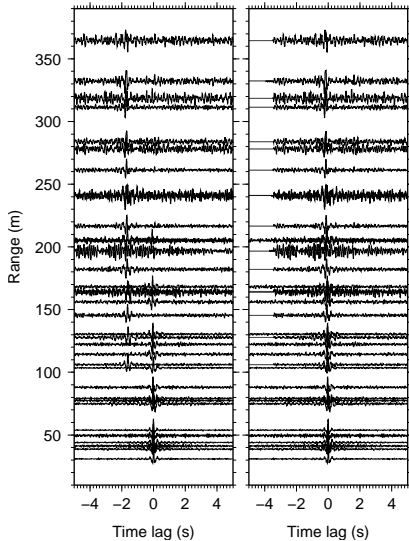


Pré-traitements

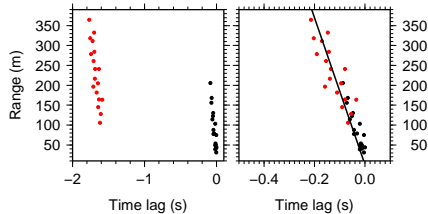
- Correction instrumentale
- Égalisation spectrale entre 2 *Hz* et 15 *Hz*
- Binarisation
- Corrélation

Corrélation sur 72 heures

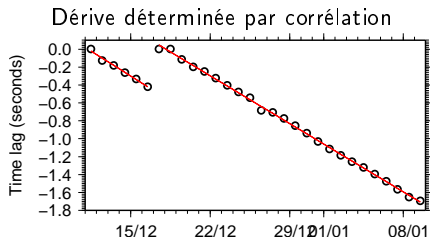
Fonctions de corrélation



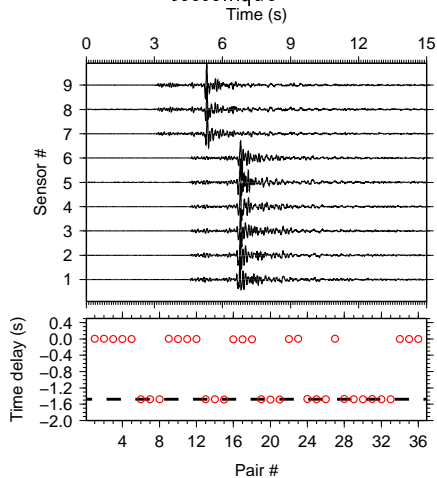
Positions des maxima



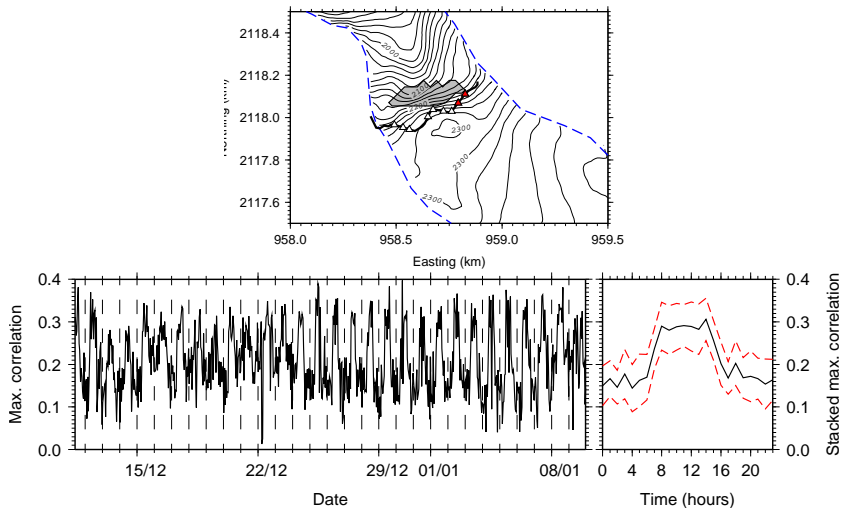
Dérive instrumentale



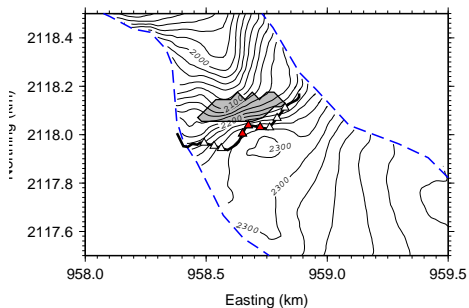
Dérive déterminée avec un séisme tectonique



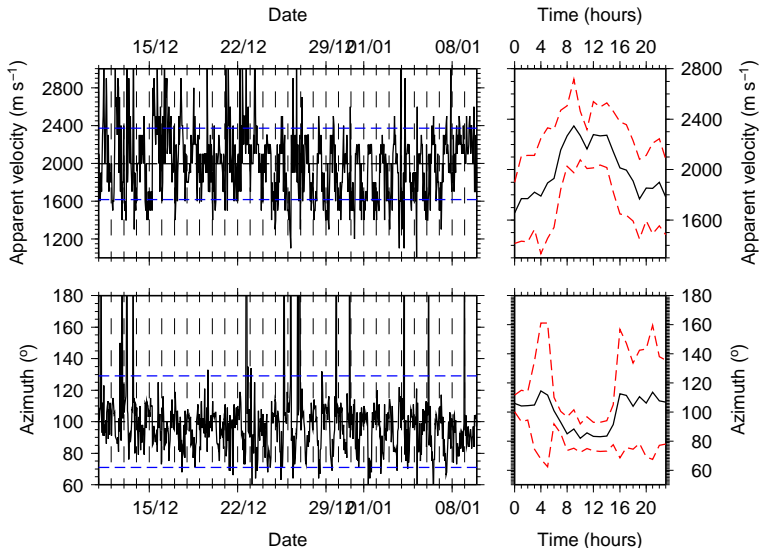
Variations du maximum de corrélation



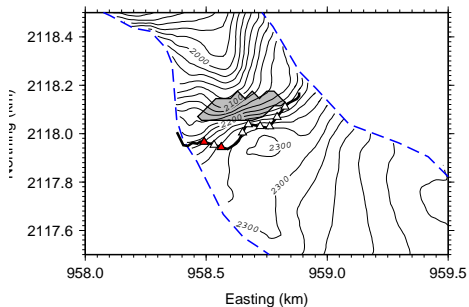
Deux sources de bruit distinctes ?



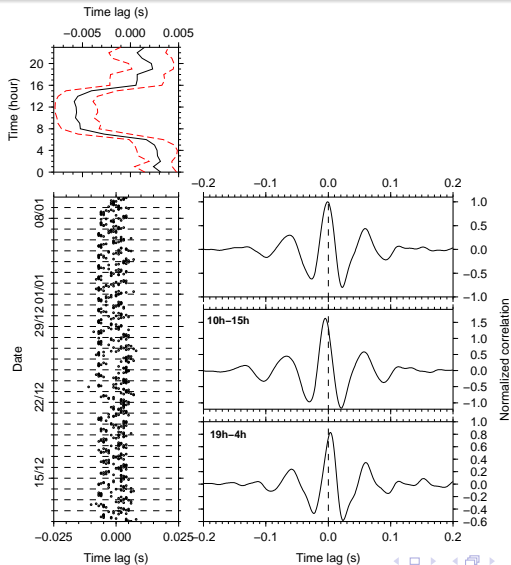
Deux sources de bruit distinctes ?



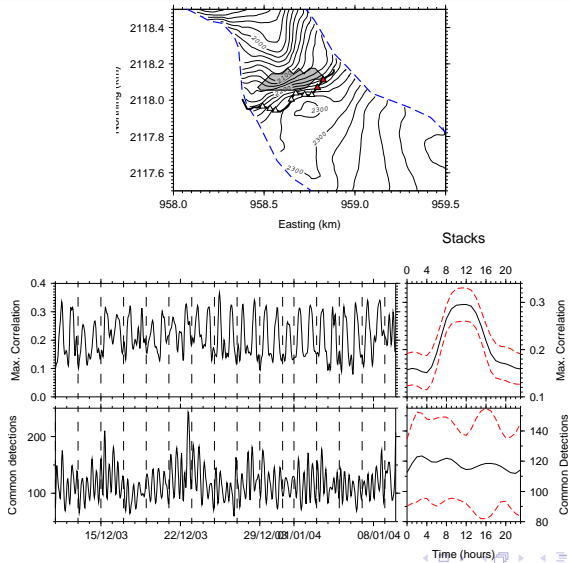
Deux sources de bruit distinctes ?



Deux sources de bruit distinctes ?



Variations dans la sismicité ?



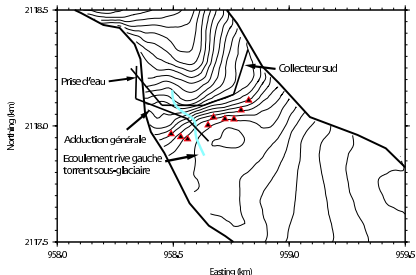
Sources de sismicité



Sources cycliques

- Crevassement
- Thermo-fracturation
- ...

Lien avec les écoulements d'eau ?



Réseau d'écoulement sous-glaciaire

- Conduites forcées et torrent naturel
- Collection d'eau : variation temporelles ?
- Proximité des conduites avec le réseau

Plan de l'exposé

- 1 Introduction
- 2 La sismicité profonde comme indice du frottement basal
- 3 Influence du *jökulhlaup* sur la sismicité
- 4 Corrélation de bruit au glacier d'Argentière
- 5 Conclusions et perspectives

Conclusions



Sources profondes

- Recherche sur grille prenant en compte la topographie
- Localisation à proximité de l'interface glace / roche
- Activité localisée en essaïms
- Corrélation avec des multiplèts
- ⇒ Mécanismes profonds (*stick-slip*, fracturation mode I)

Conclusions



Sources de surface

- Recherche sur grille
- Deux observables : amplitude crête-à-crête et vitesse apparente
- Corrélation avec l'occurrence de la vidange
- \Rightarrow Modification du champ de contraintes

Conclusions



Corrélation de bruit

- Caractérisation de ***toute la sismicité***
- Informations sur le milieu de propagation et les erreurs instrumentales
- Mise en évidence d'une cyclicité diurne
- Lien avec la sismicité ou les écoulements d'eau ?

Conclusions



Synthèse

- *Les méthodes d'antennes sont un bon outil pour les mouvements gravitaires*
- *La corrélation de bruit complète l'information*

Perspectives



Perspectives

- Nécessité de mieux contraindre les vitesses de propagation
- Localisation des sources de bruit
- Meilleure couverture instrumentale
- Mesures annuelles
- Relocalisation relative