

# Fracturation dans les glaciers alpins

**Caractérisation sismologique et surveillance:**

*de l'évènement discret au signal continu*

**Pierre-François Roux**  
Pierre-Francois.Roux@cggveritas.com



Strasbourg, le 22 novembre 2011



# Collaborations



- David Marsan (ISTerre, France)
- Jean-Luc Got (ISTerre, France)
- Fabian Walter (ETHZ, Suisse)
- Nicholas Deichmann (ETHZ, Suisse)
- Martin Funk (ETHZ, Suisse)
- Philippe Roux (ISTerre, France)
- Jérôme Weiss (LGGE, France)
- Gareth O'Brien (UCSD, Irlande)
- Luc Moreau (EDYTEM, France)
- ...

- Introduction
- La **sismicité glaciaire “profonde”** comme indice du frottement basal
- Ce que peut nous dire la **sismicité de surface** : lien avec un *jökulhlaup*
- Interférométrie sismique : vers une surveillance permanente?
- Conclusion et perspectives

## ■ Introduction

- De la fracturation dans les glaciers alpins
- Objectifs scientifiques de l'étude
- Sites et instrumentation
- Caractéristiques des signaux étudiés
- La sismicité glaciaire “profonde” comme indice du frottement basal
- Ce que peut nous dire la sismicité de surface : lien avec un *jökulhlaup*
- Interférométrie sismique : vers une surveillance permanente?
- Conclusion et perspectives



## Différents mécanismes de fracturation

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

## Séisme glaciaire

- Onde mécanique émise au sein de la masse de glace
- Mesurer ces ondes revient à caractériser l'un de ces mécanismes



# Introduction : des séismes à tous les étages!



Cliché F. Walter

## 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 profondeurs**



Cliché E. Walter

## Et ce que nous avons étudié:

- Frottement basal : localisation et caractérisation des séismes profonds  
→ **sismicité profonde**
- Hydrofracturation et modifications du champ de contraintes surfaciques :  
influence des variations de pression d'eau sur la dynamique glaciaire  
→ **sismicité surfacique**

- Introduction
- **La sismicité glaciaire “profonde” comme indice du frottement basal**
- Ce que peut nous dire la sismicité de surface : lien avec un *jökulhlaup*
- Interférométrie sismique : vers une surveillance permanente?
- Conclusion et perspectives



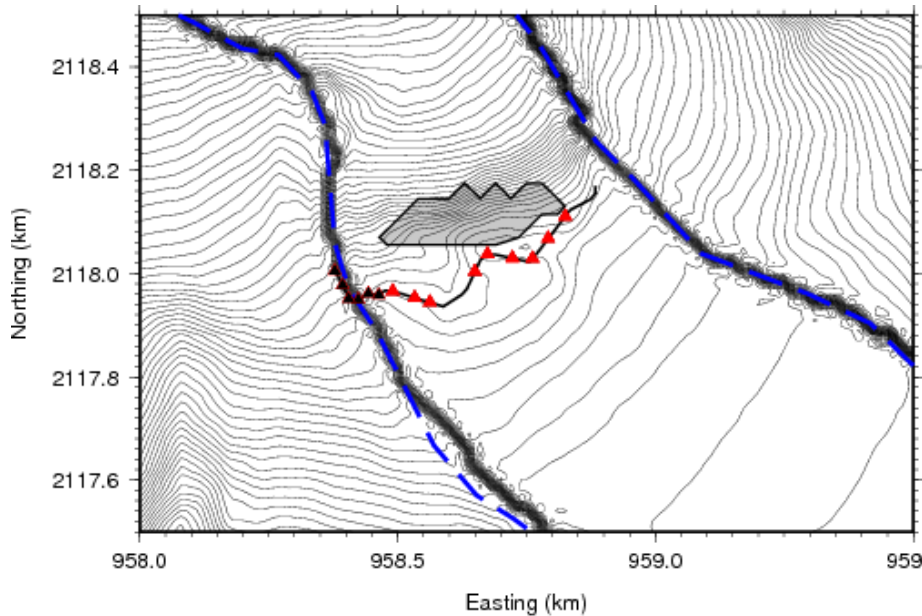
# Glacier d'Argentière



## Le glacier d'Argentière

- Glacier tempéré de 10 km de long et d'environ 19 km<sup>2</sup> de surface
- Importante chute de séracs
- Galeries creusées dans le lit rocheux, 5m sous la base du glacier
- Accès unique à la base du glacier

# Instrumentation

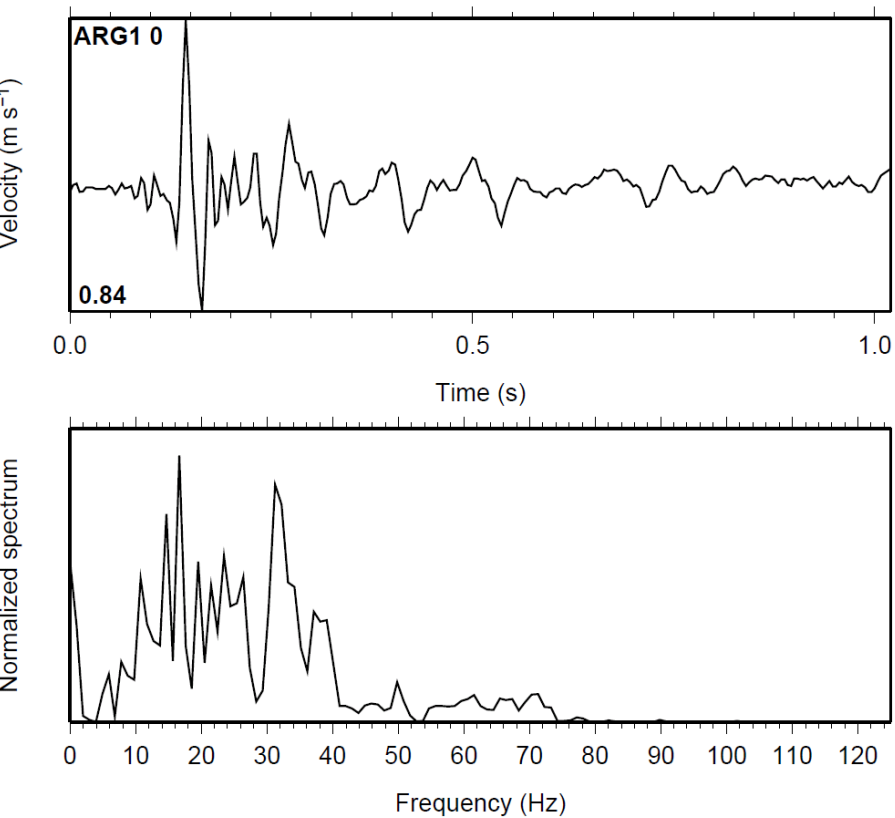


## Dispositif d'acquisition

- 9 sismomètres courte-période, verticaux
- Enregistrement continu et simultané (3 stations sismologiques) sur un mois
- Faible résolution verticale (tous les sismomètres sont à la même altitude!)

# Principales caractéristiques du signal

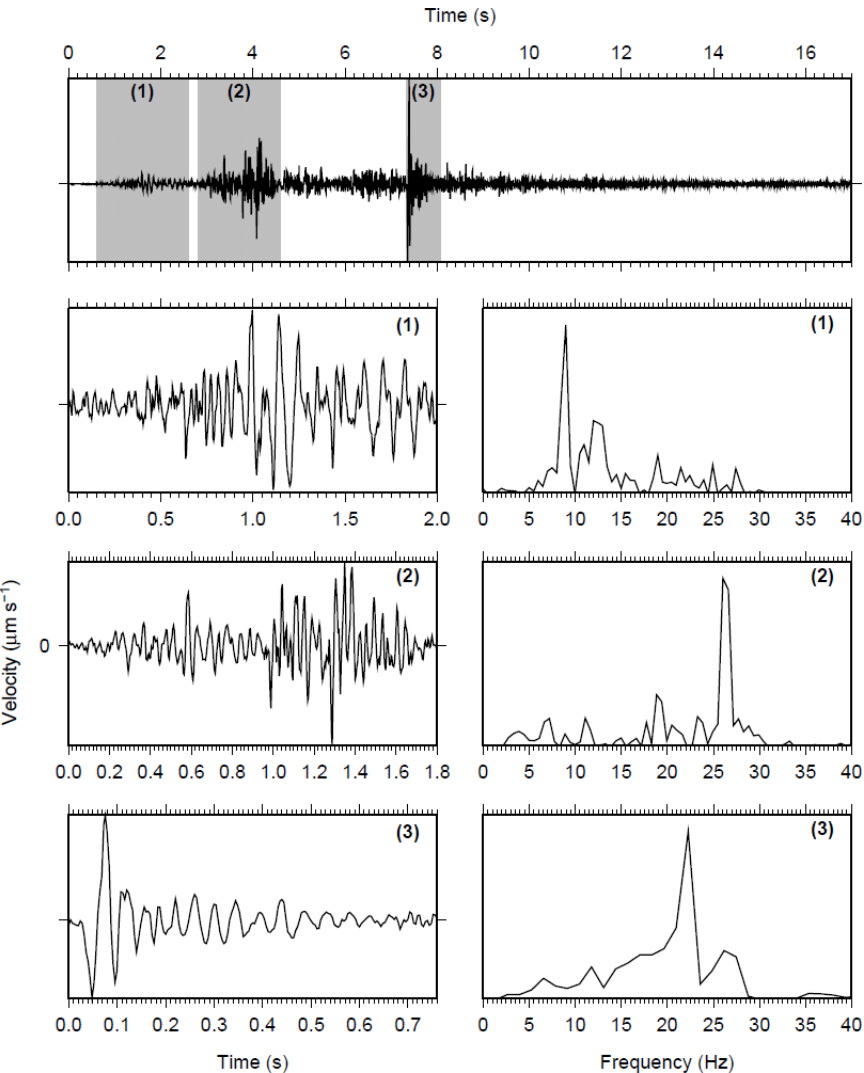
11 DEC 2003 00h13



## 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)

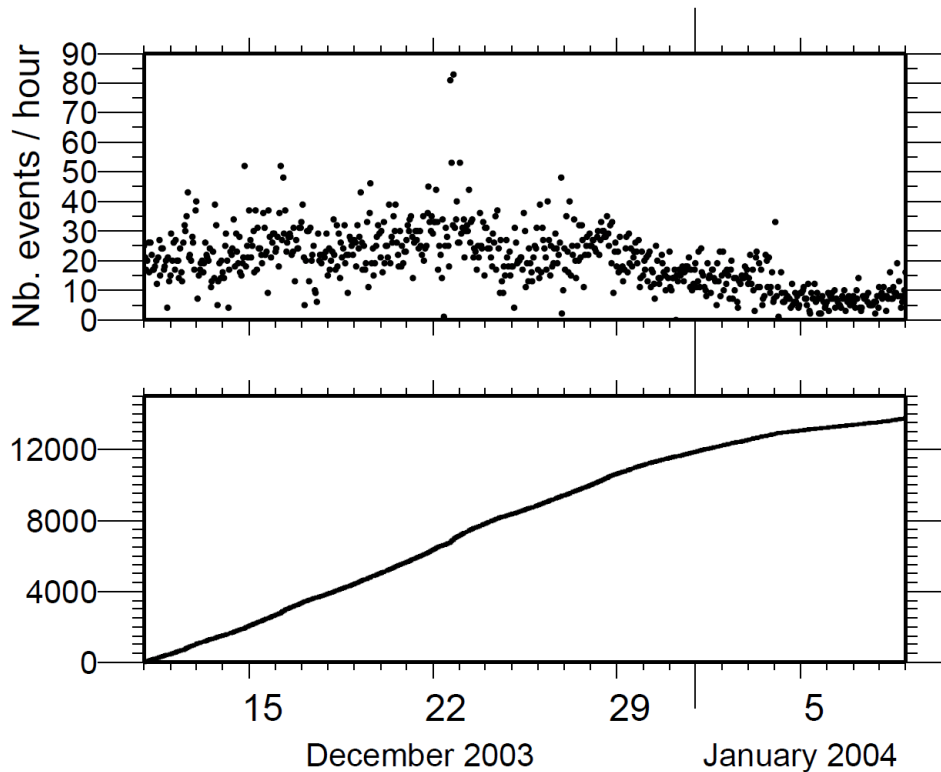
# Principales caractéristiques du signal



## 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)

# Caractéristiques de la micro-sismicité à Argentière



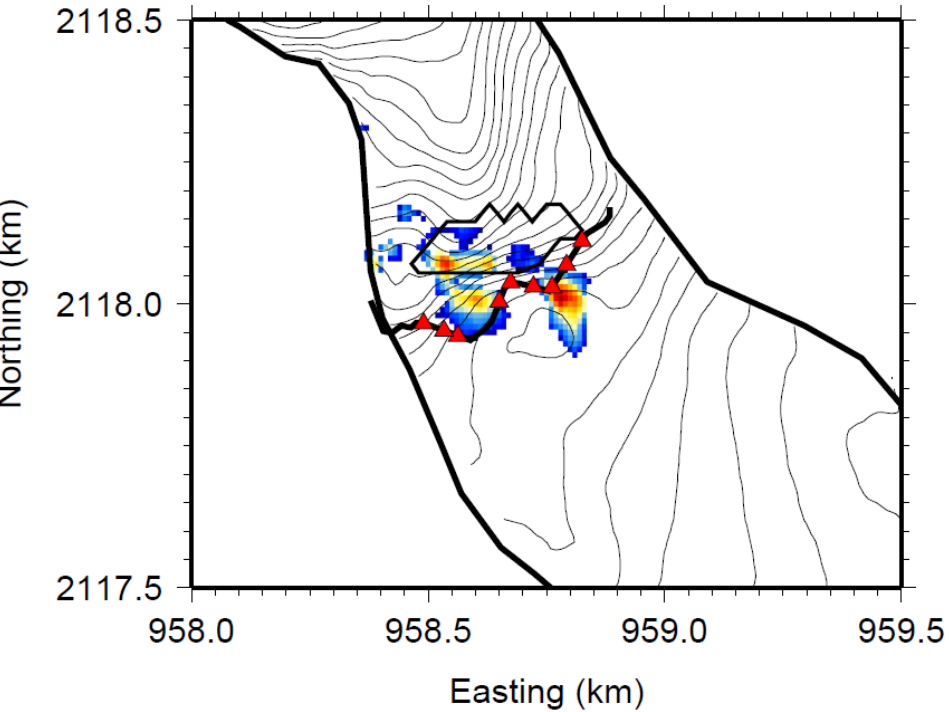
## Sismicité à Argentière

- **Forte émissivité** (près de 14000 séismes détectés)
- Détection par STA/LTA (Allen, 1978)
- Nombre moyen de séismes par heure : 19.34
- **Pas de cycle jour / nuit**
- Faible activité humaine



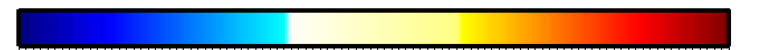
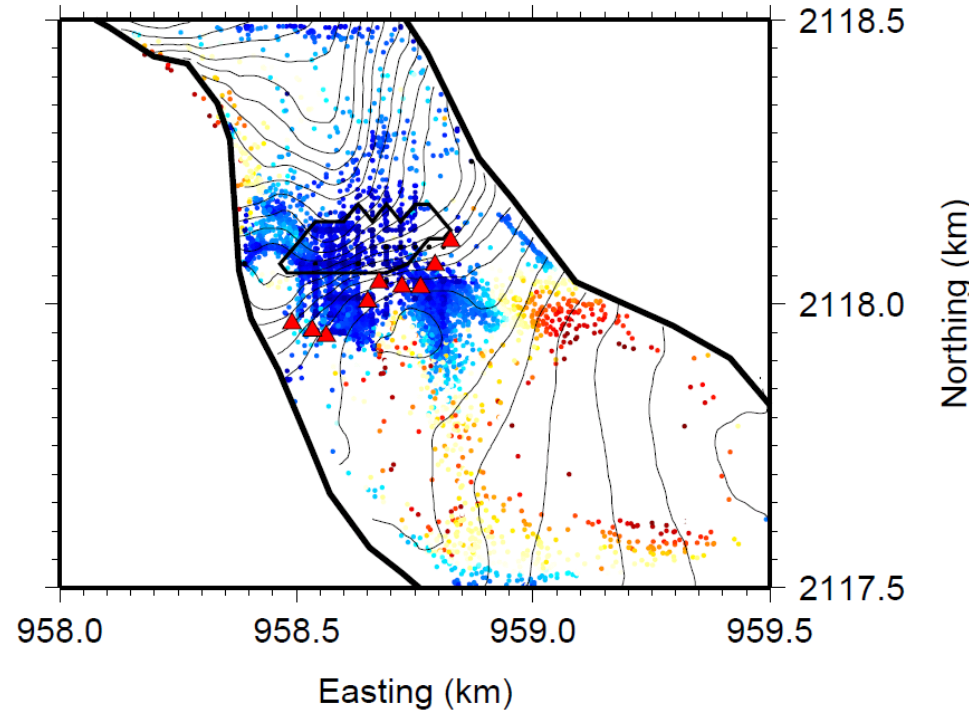
# Activité sismique : localisation

Average PDF



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

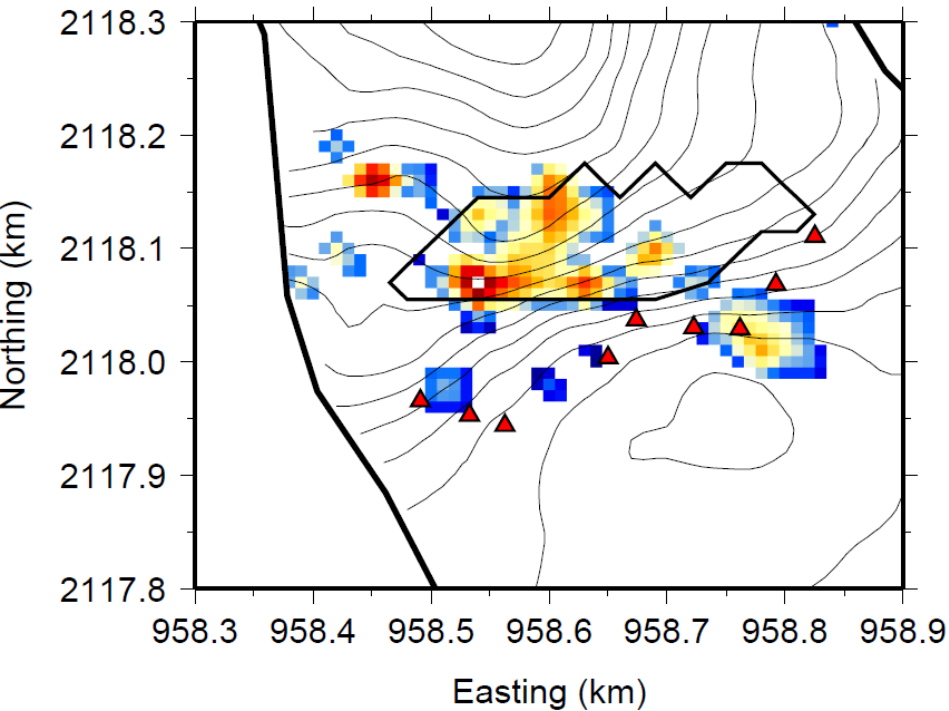
Mean Std. Dev.



Mean standard deviation (m)

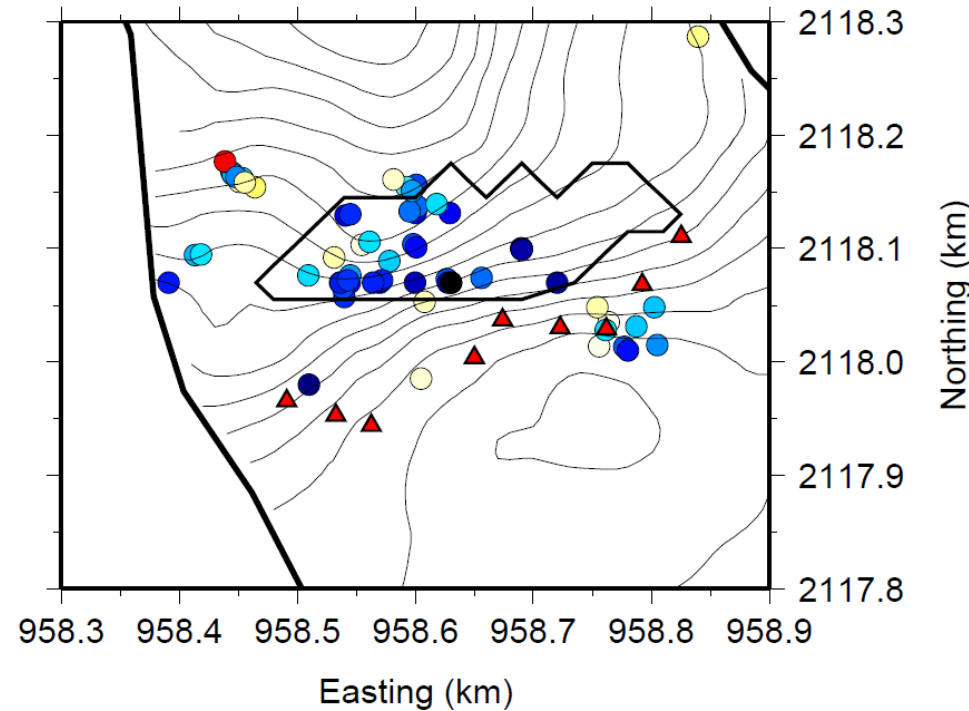
# Chutes de séracs

### Average PDF



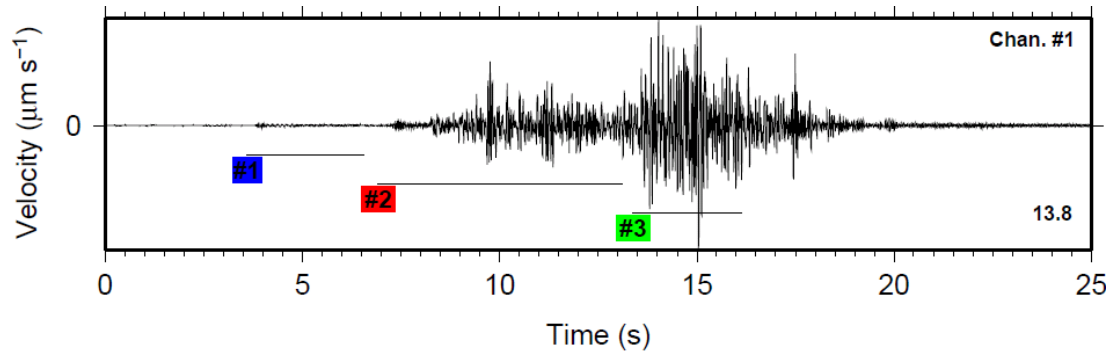
PDF ( $\times 10^{-4} \text{ m}^{-2}$ )

### Mean Std. Dev.

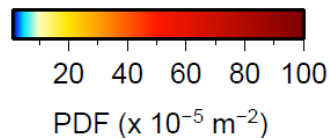
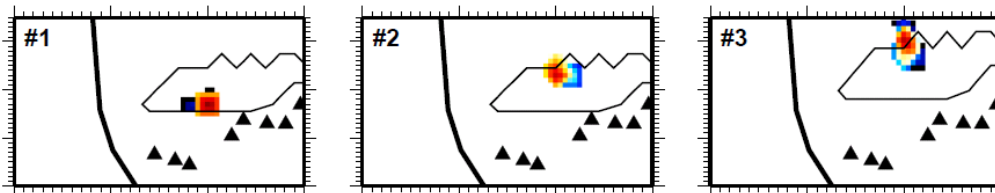
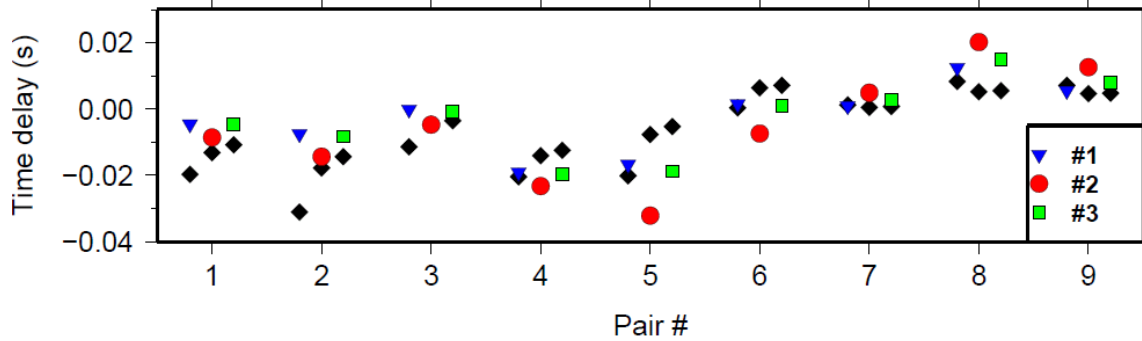


Mean standard deviation (m)

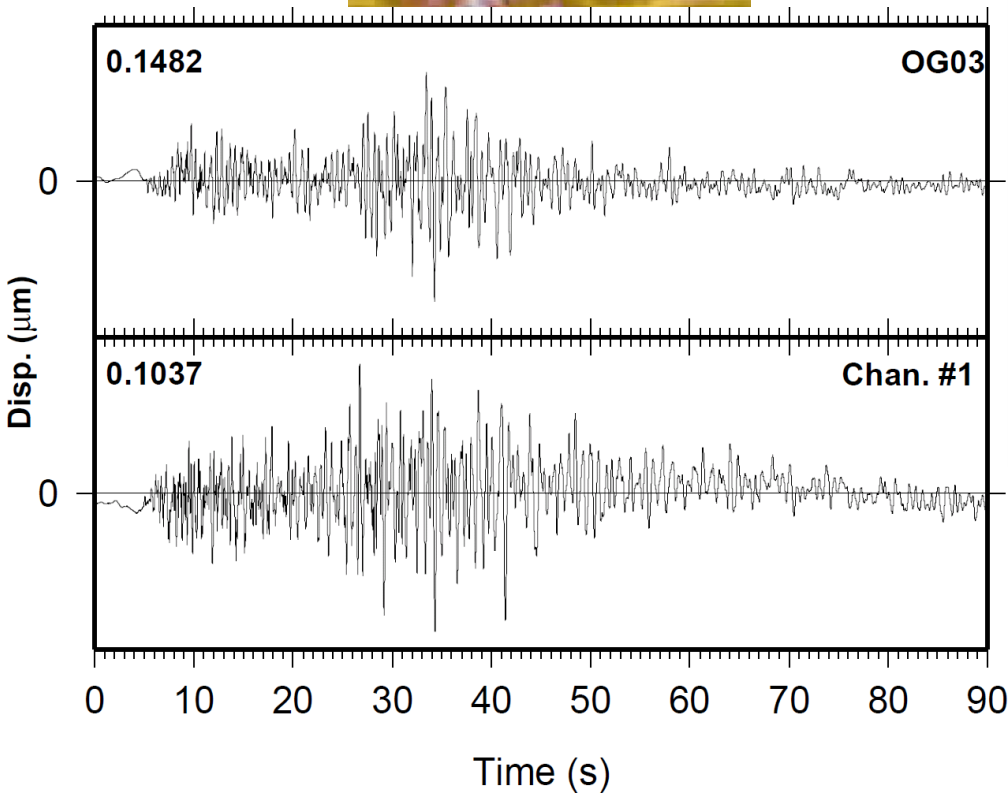
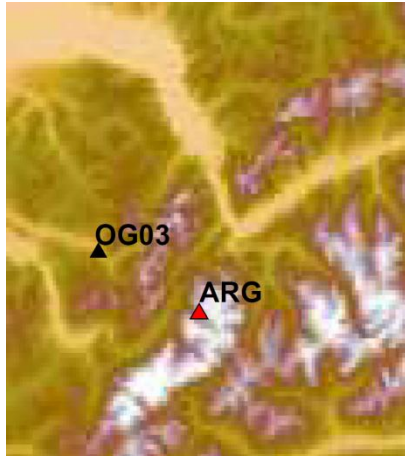
# Chute de sérac : exemple



Vitesse d'avalanche  $\sim 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



# Magnitudes locales

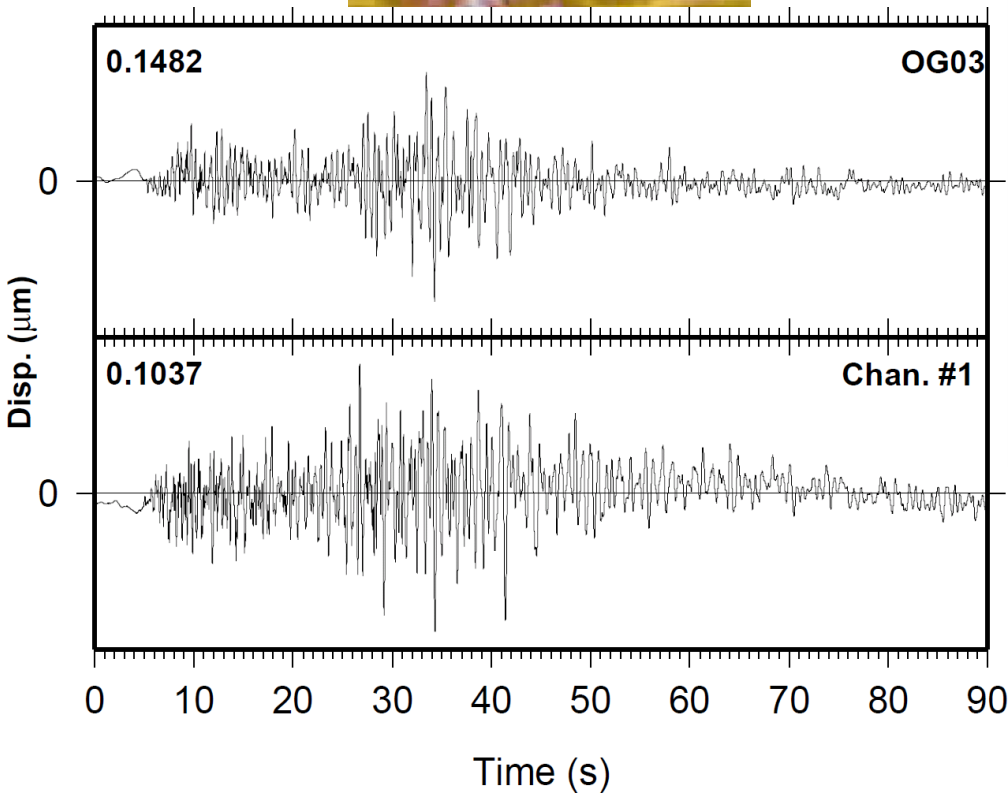
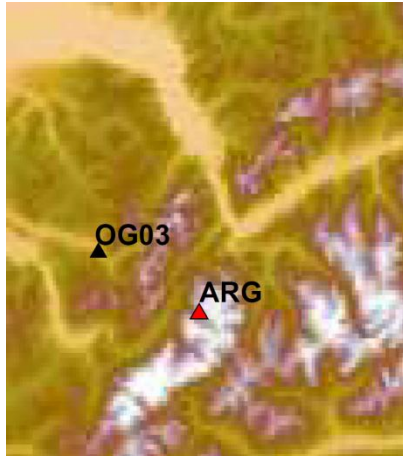


## Magnitude locale : définition

$$M_L = \log \left( \frac{A}{A_0} \right)$$

- A: amplitude maximum, en mm, mesurée sur un sismomètre de type Wood-Anderson
- $A_0$ : amplitude d'un séisme de référence :  $1\mu\text{m}$  à 100 km

# Magnitudes locales



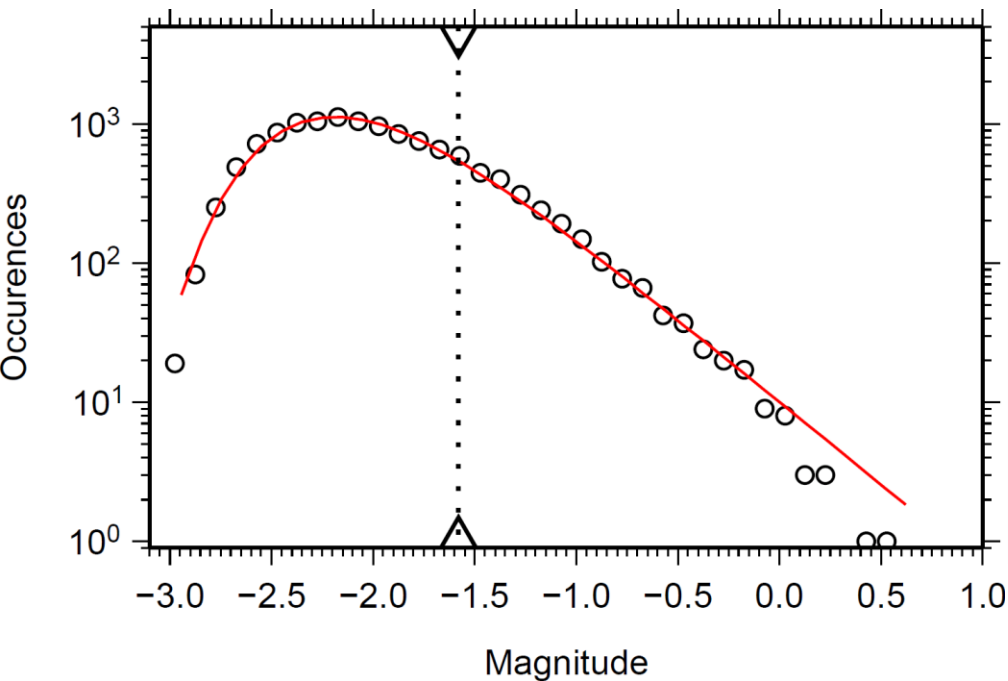
## Détermination d'une loi d'atténuation

- $\log A = a + c \log \Delta$
- $a$  : dépend de la station
- $c$  : caractérise l'atténuation géométrique
- $\Delta$  : distance source – station

- Calibration :  
Utilisation de séismes régionaux  
( $d_{\text{OG03-ARG}} = 20 \text{ km}$ )



# Magnitudes locales



## Distribution fréquence - magnitude

- Gutenberg – Richter  
(détection modélisée avec une loi de type Gumbel – Marsan et al. 2008)

- $m_c = -1.6$  ;  $b = 1.2$

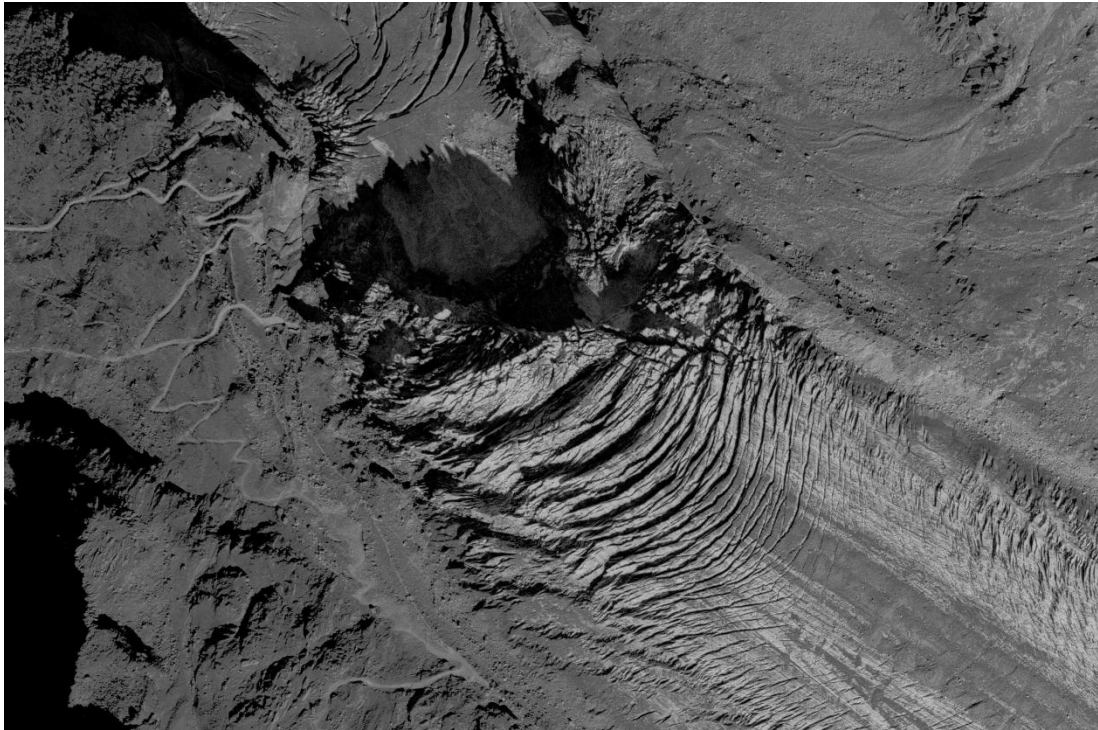
# Mécanismes proposés



## Sources possibles des séismes localisés

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

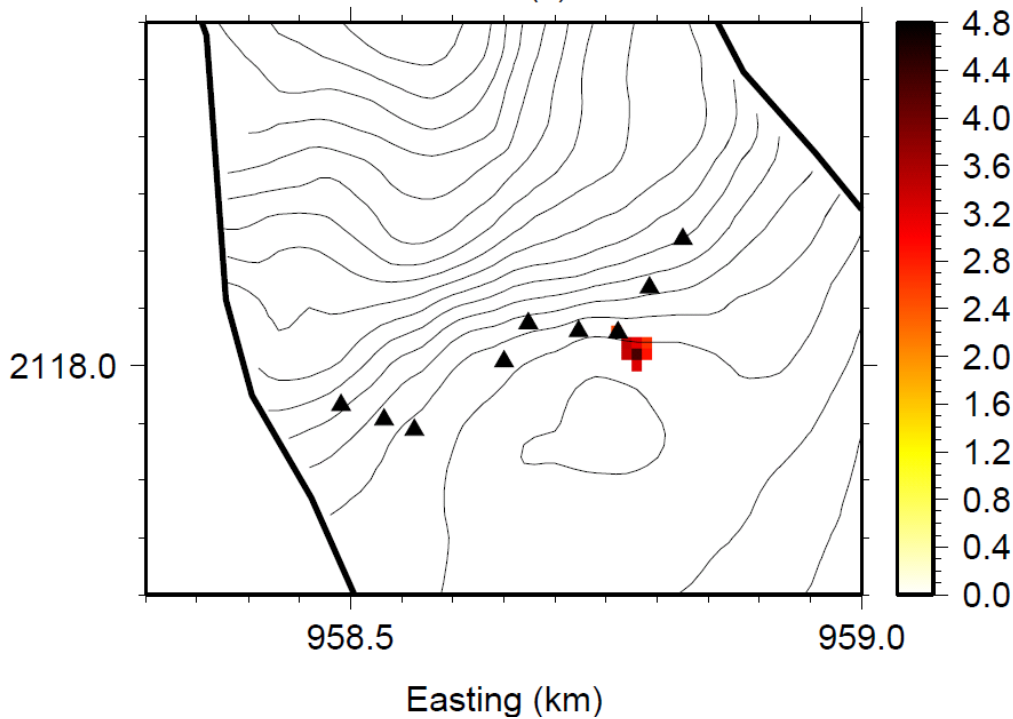
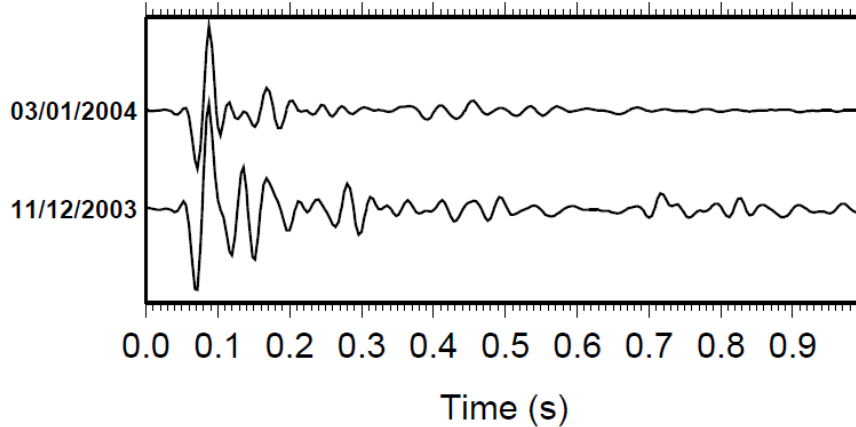
# Mécanismes proposés



## Sources possibles des séismes localisés

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

# Mécanismes proposés



Densité de probabilité d'un ensemble de 28 séismes (multiplet)

## Sources possibles des séismes localisés

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

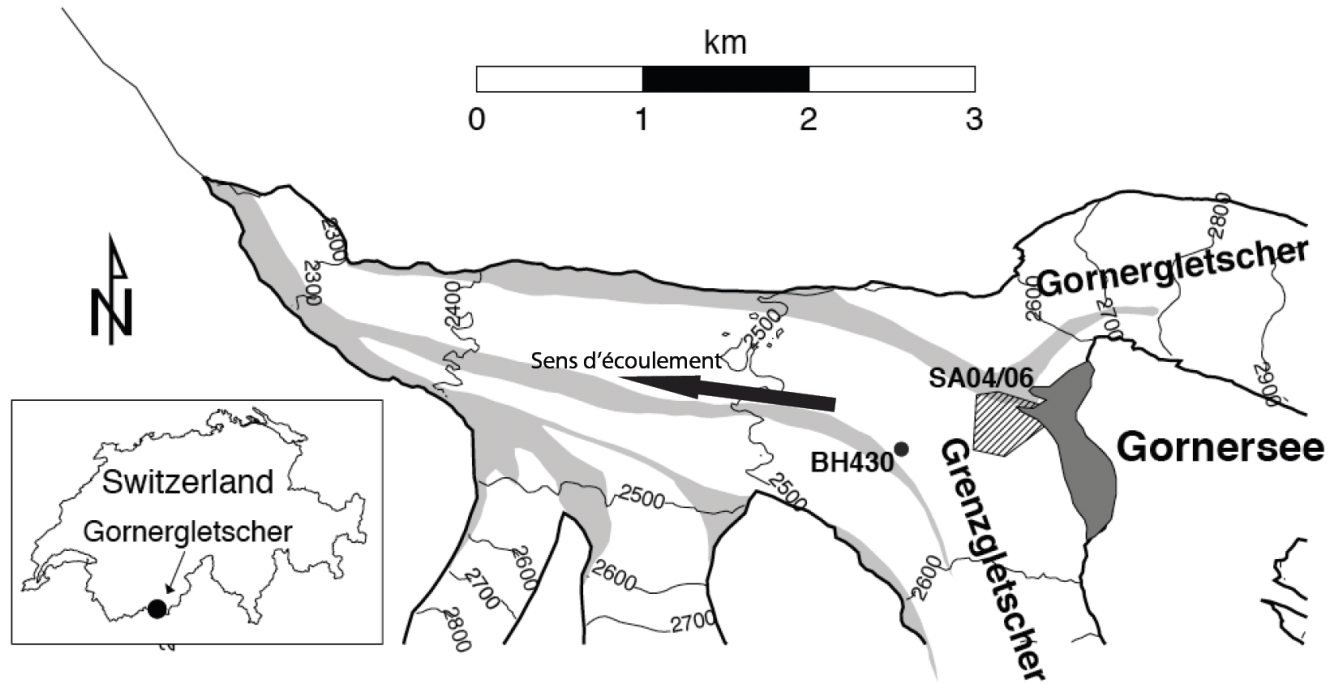
# Plan de l'exposé



- Introduction
- La sismicité glaciaire “profonde” comme indice du frottement basal
- Ce que peut nous dire la **sismicité de surface** : lien avec un *jökulhlaup*
- Interférométrie sismique : vers une surveillance permanente?
- Conclusion et perspectives



# Glacier du Gorner



## Gornergletscher

- Glacier polythermal de 14 km de long
- Convergence de deux glaciers : Grenz et Gorner
- Formation annuelle d'un lac supra-glaciaire : le Gornersee
- Vidange rapide (*jökulhlaup*) en juin / juillet

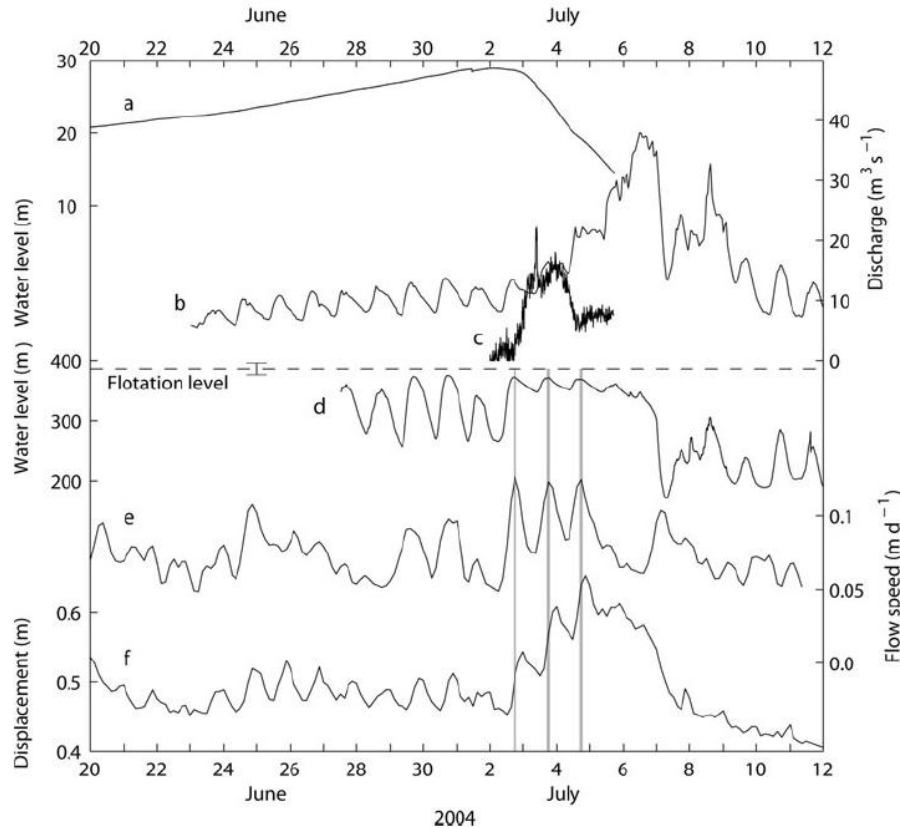
# Glacier du Gorner : *jökulhlaup*. Ordres de grandeurs



## *Jökulhlaup* : définition

- de l'islandais *jökull* (glacier) et *hlaup* (lit. explosion)
- Voie supra-, intra- ou sub-glaciaire

# Glacier du Gorner : *jökulhlaup*. Ordres de grandeurs

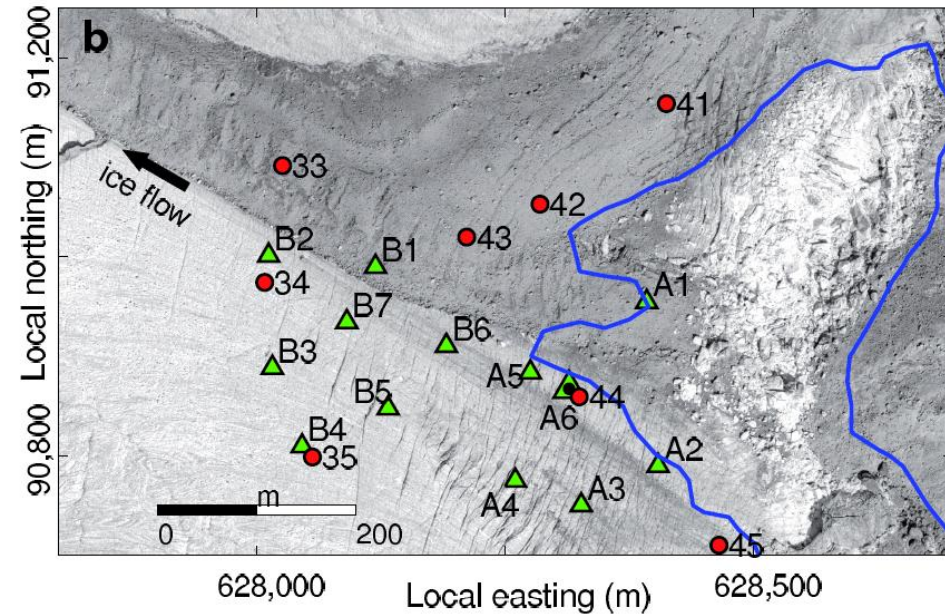
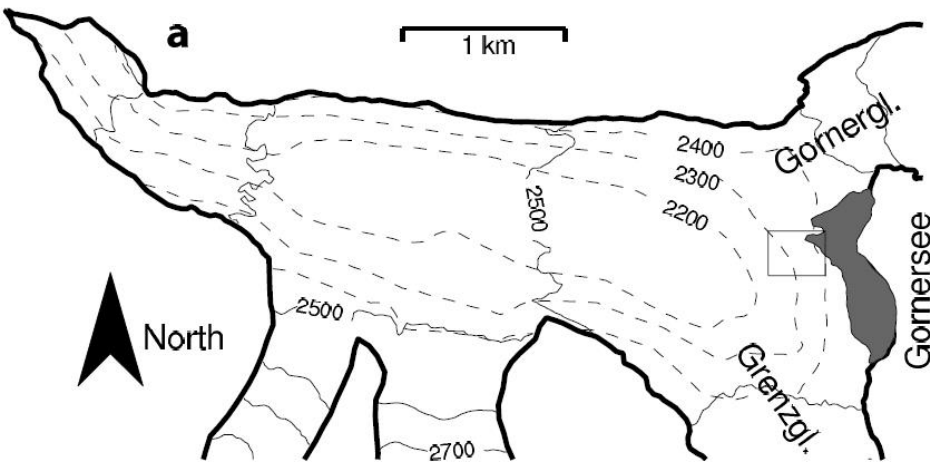


## Caractéristiques : 2004

- Volume du lac :  $\sim 4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
- Surface  $\sim 0.3 \text{ km}^2$
- Formation d'une digue par regel
- Chronologie :
  - 1<sup>er</sup> juillet : le niveau d'eau dépasse la hauteur de la digue de glace
  - 2% du volume total est transféré à l'espace sous-glaciaire
  - 2 juillet : vidange du lac (voies intra- et sub-glaciaires)

D' après Sugiyama et al. 2007

# Instrumentation au glacier du Gorner

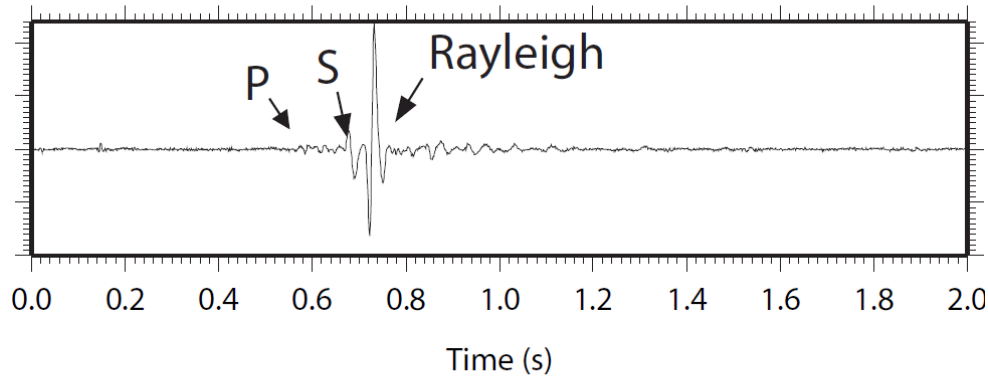


## Instrumentation

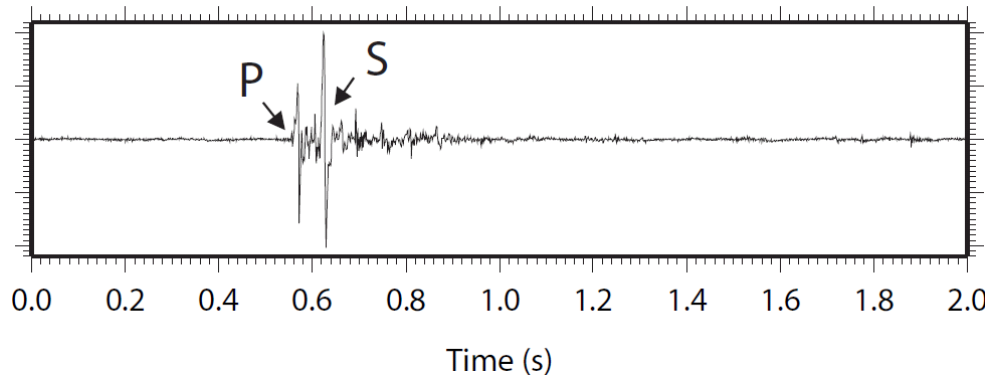
- 14 sismomètres courte période à trois composantes, dont 1 en forage
- Couplage avec mesures GPS, topo, hauteur d'eau, sismique active, ...
- Données 2004 acquises en déclenchement

# Caractéristiques du signal

Surface event



Deep event

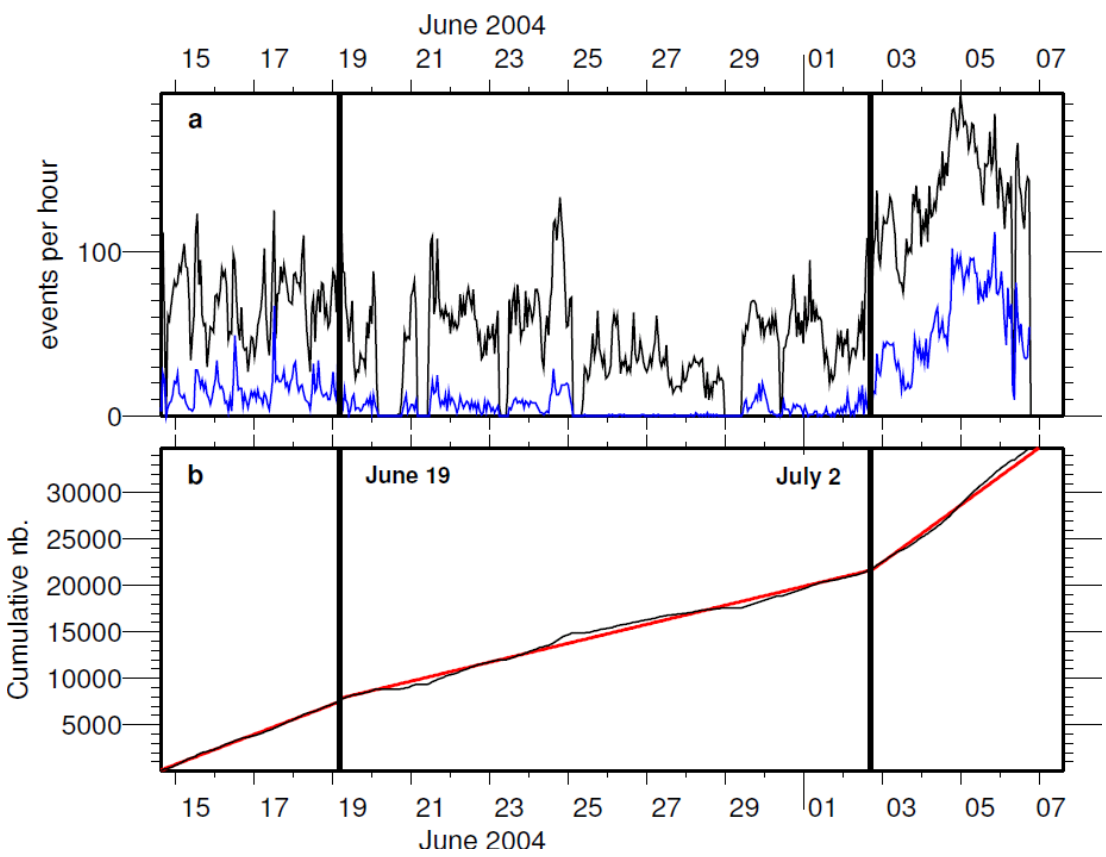


## Classification

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



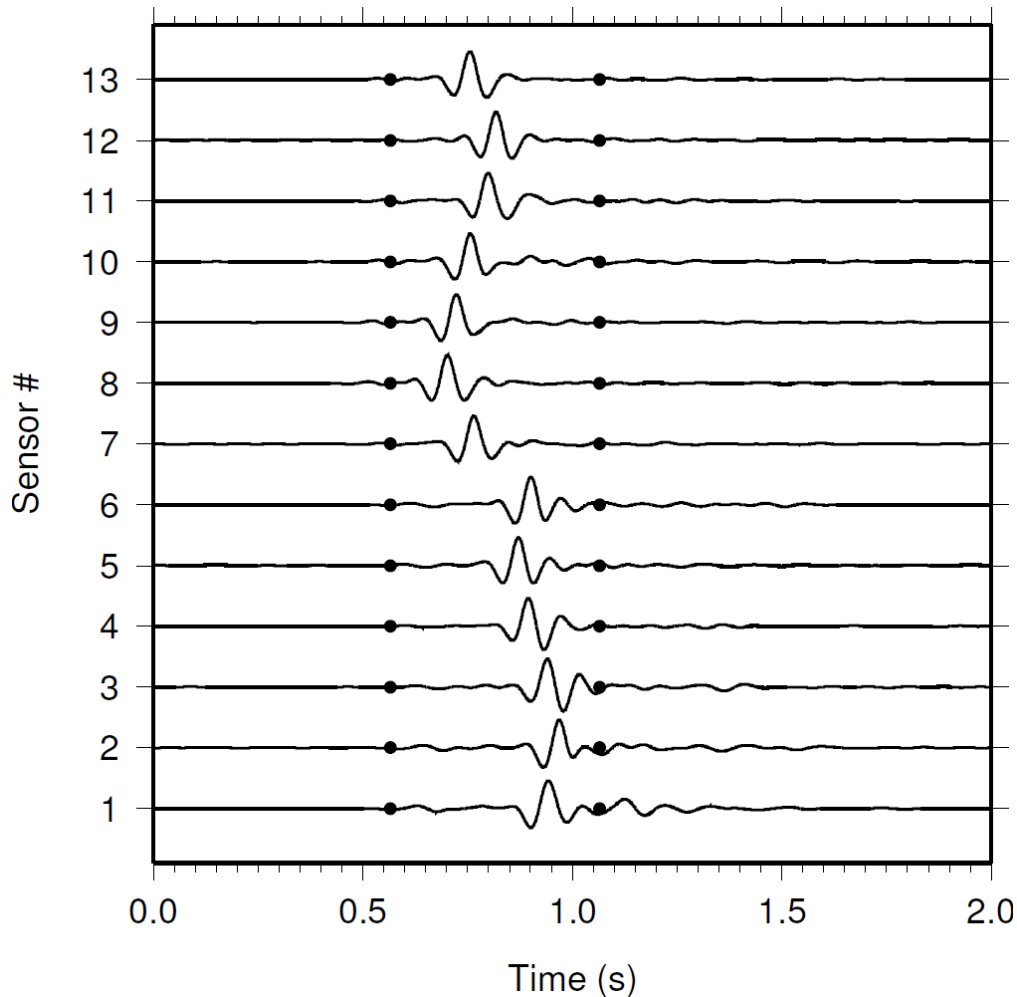
# Sismicité au glacier du Gorner



## Lien entre activité micro-sismique et *jökulhlaup*

- Grand nombre de micro-séismes détectés (plus de 30000)
- Nette augmentation après l'initiation de la vidange

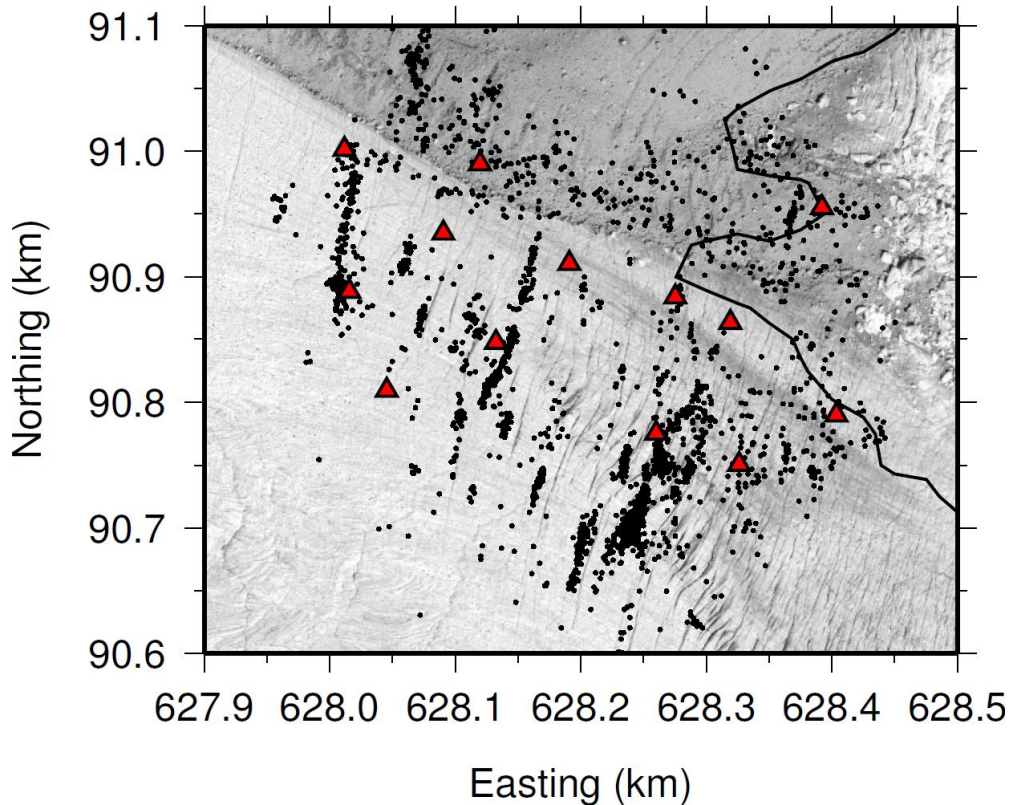
# Caractéristiques générales des séismes de surface



## Localisation des séismes

- Très peu de séismes profonds détectés (Walter et al., 2008)
- Onde de surface dominante et cohérente sur le réseau

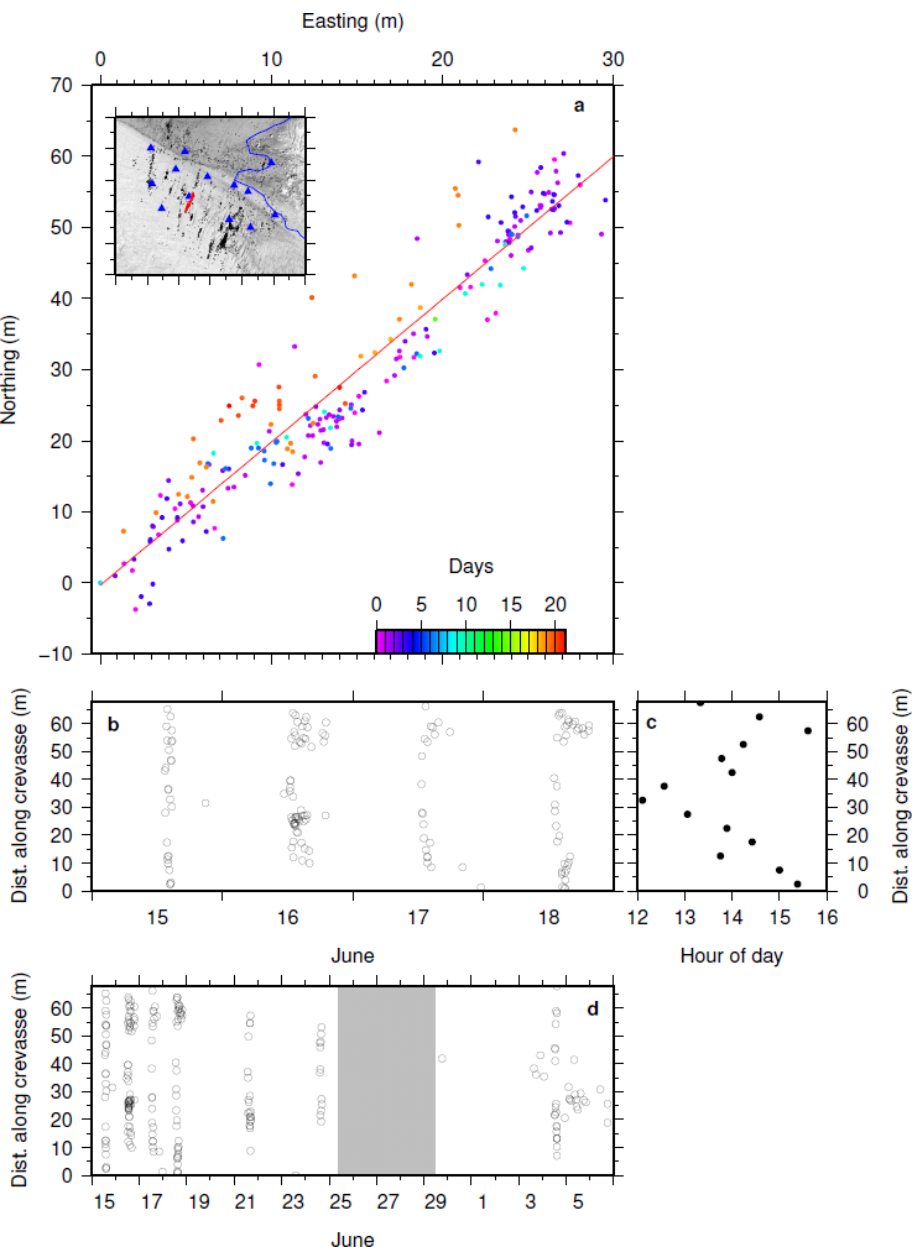
# Localisation *avant* le début du *jökulhlaup*



## Avant...

- Séismes localisés le long des crevasses apparentes
- Résultat semblable à ce que la littérature propose (Neave & Savage, 1970)
- Étude détaillée du mécanisme de crevassage

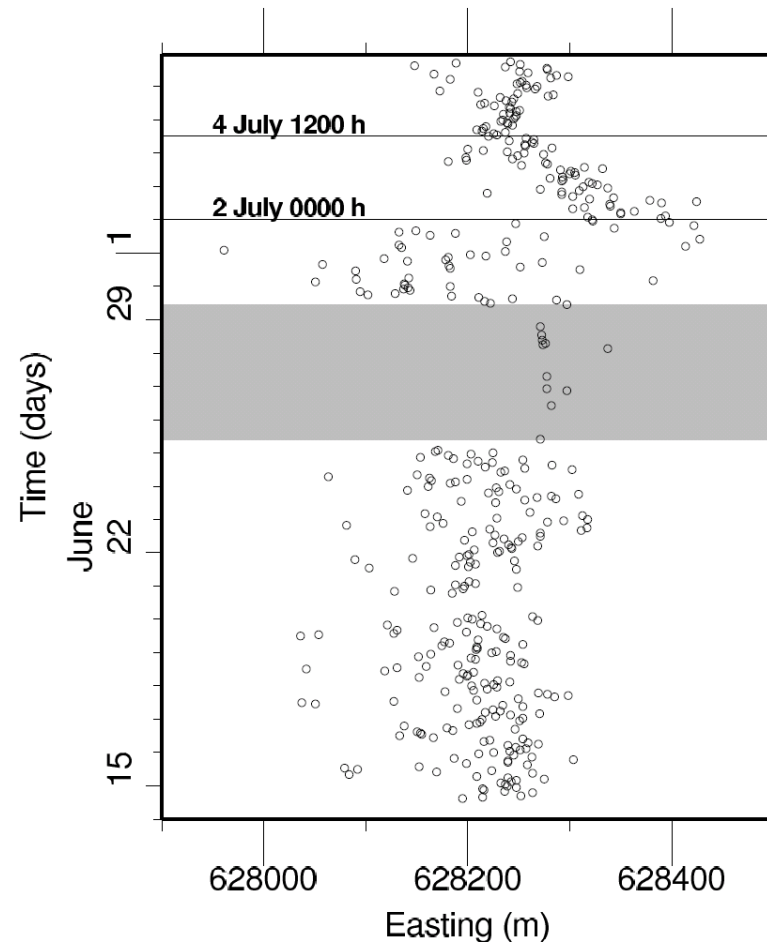
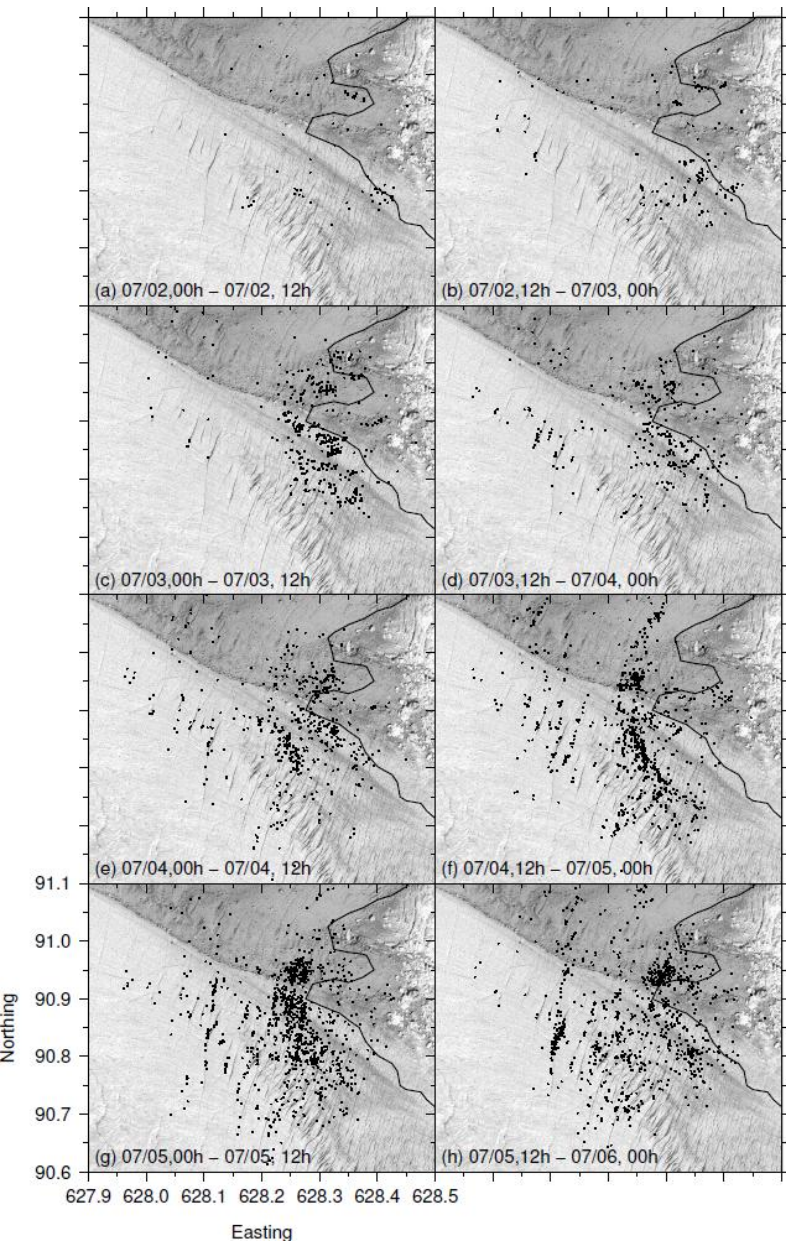
# Crevassage



**Mécanisme spatio-temporel de crevassage**

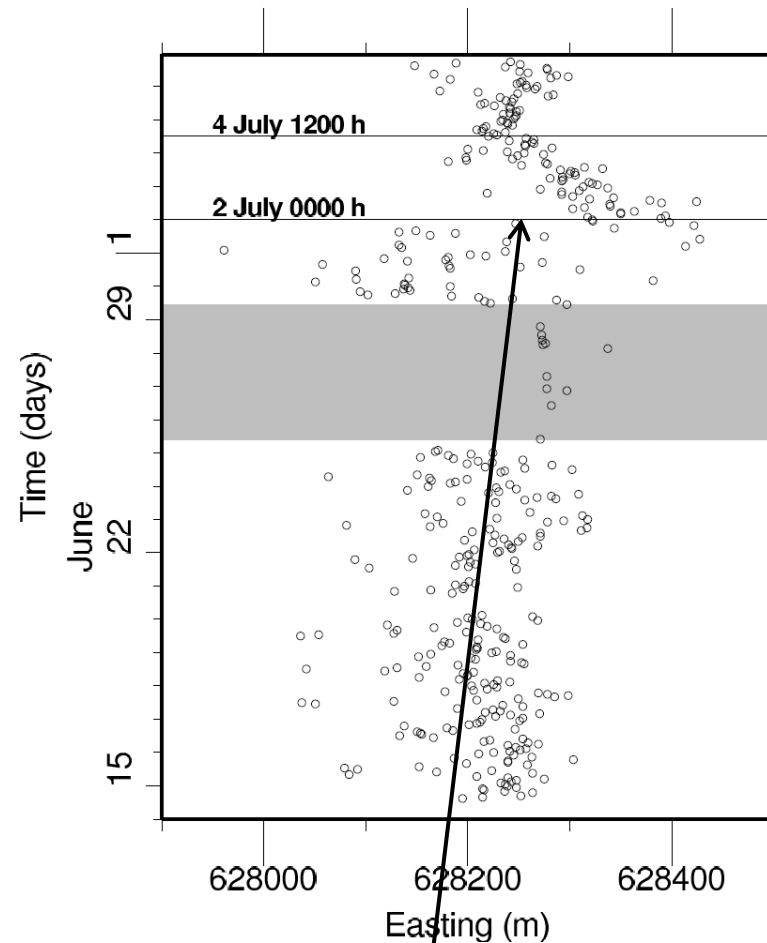
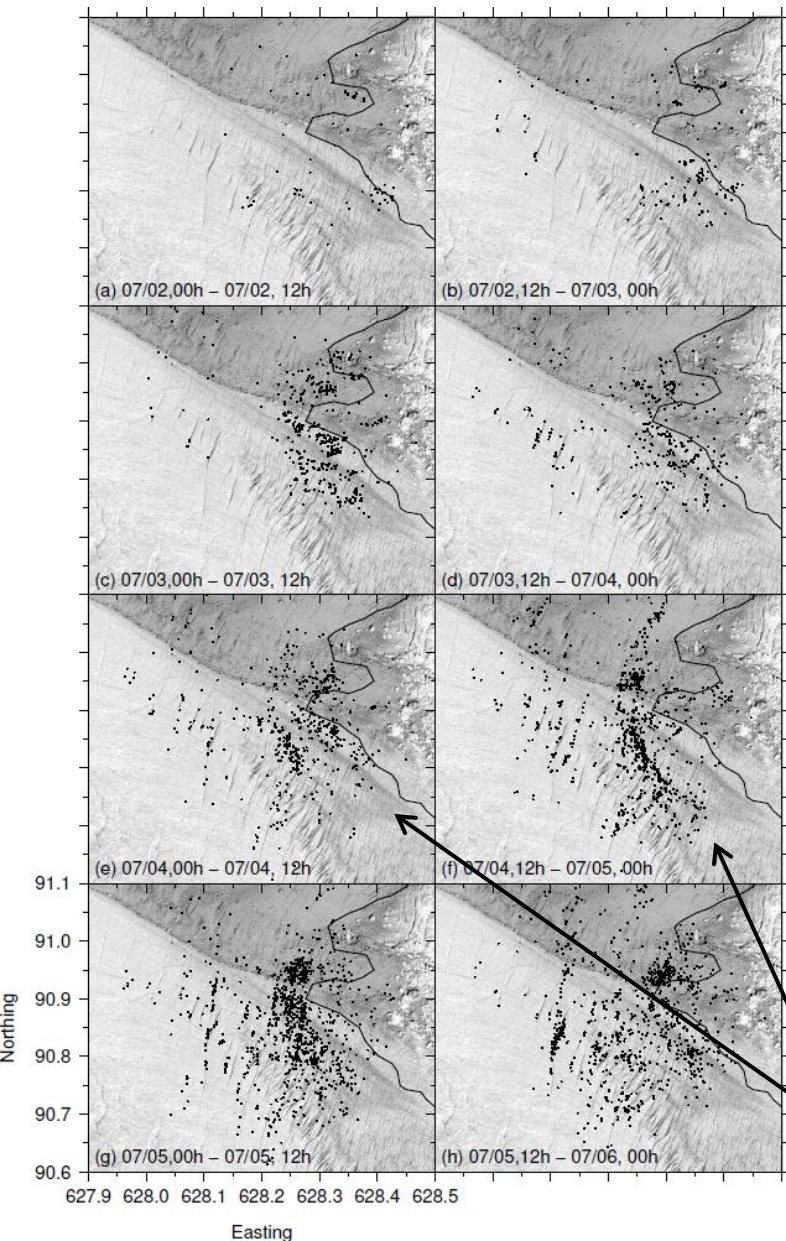
- **Aléatoire** aux longues périodes de temps
- **Évolution spatio-temporelle ordonnée** aux courtes (jour) échelles de temps

# Évolution temporelle de la micro-sismicité



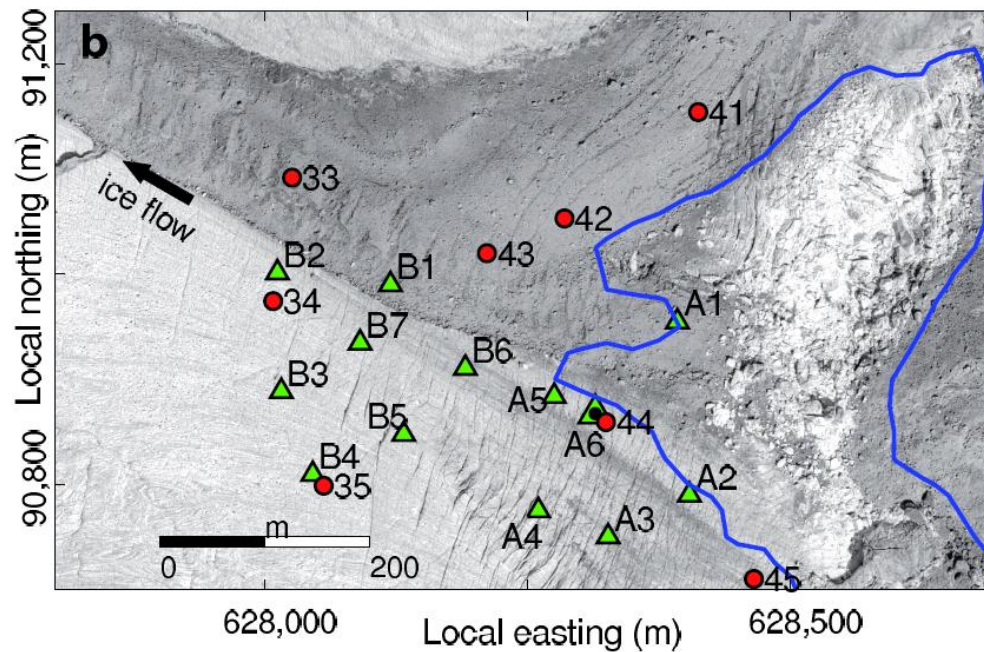


# Évolution temporelle de la micro-sismicité



**Migration des épicentres de l'Est vers l'Ouest**

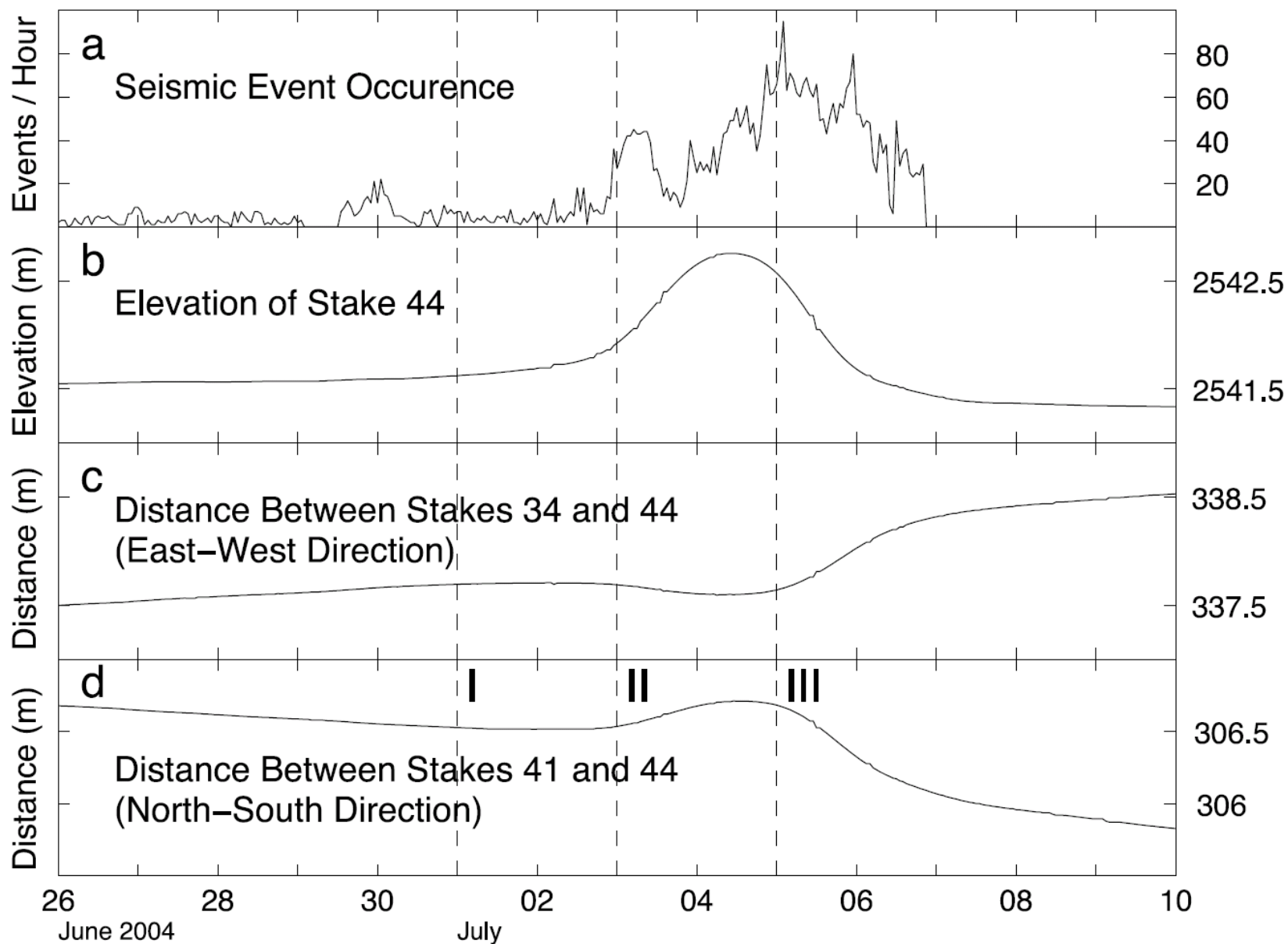
# Rappel de la position des sismomètres / GPS



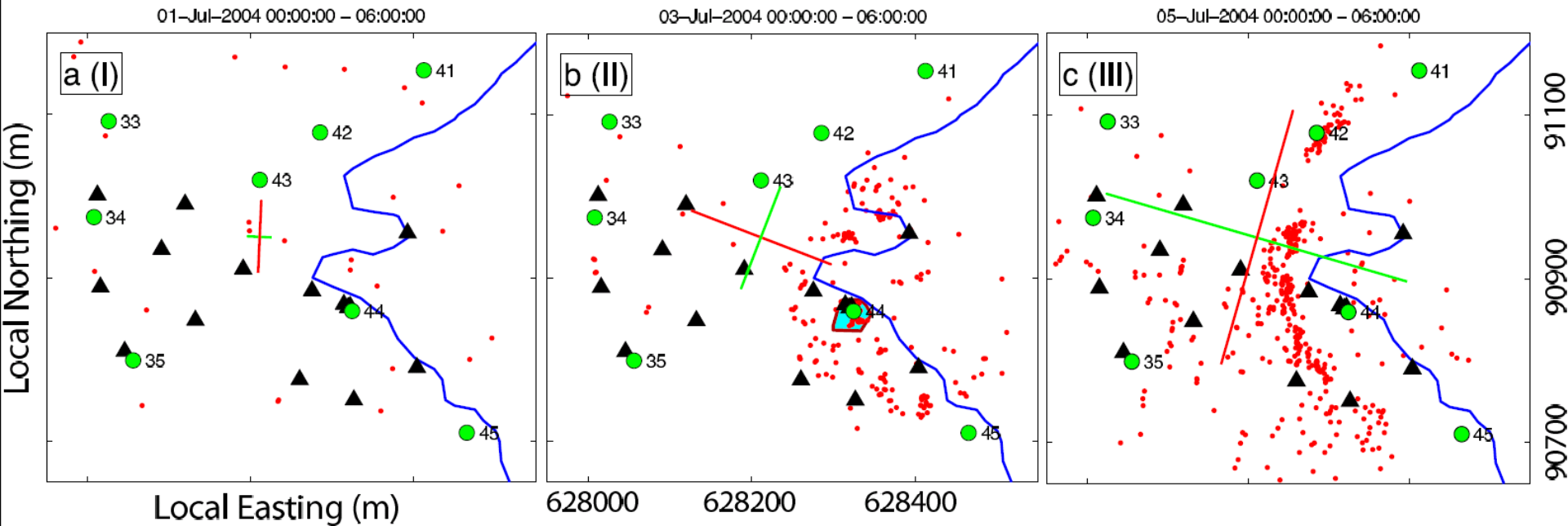
## Points de mesures déformation

- réflecteurs théodolites automatisés : 33 – 35, 41 & 43 – 45
- mesures GPSd : 42

# Soulèvement local de la langue glaciaire



# Rotation des déformations principales



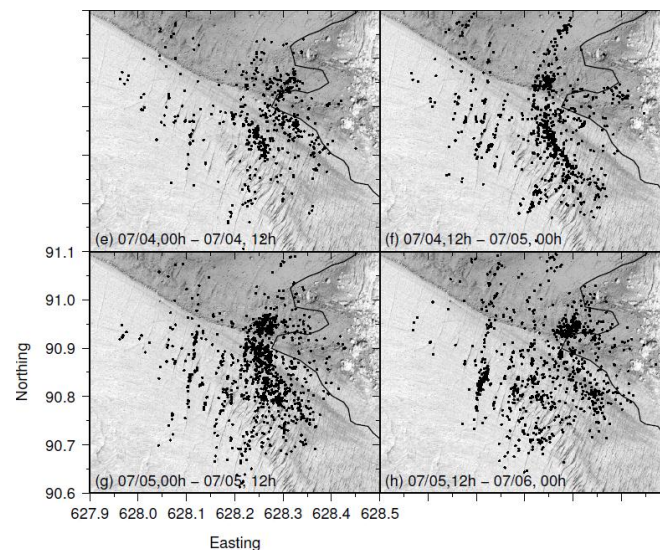
## Évolution temporelle des déformations principales

- Calcul de la déformation à l'aide des mesures de déplacement
- Rotation de  $90^\circ$  des composantes principales (2D) pendant la vidange
- Inversion des mécanismes au foyer des séismes *pendant la vidange* :
  - Plans de faille verticaux
  - Mode I (traction) NS (crevasses = EO)



# Chronologie de la réponse sismique

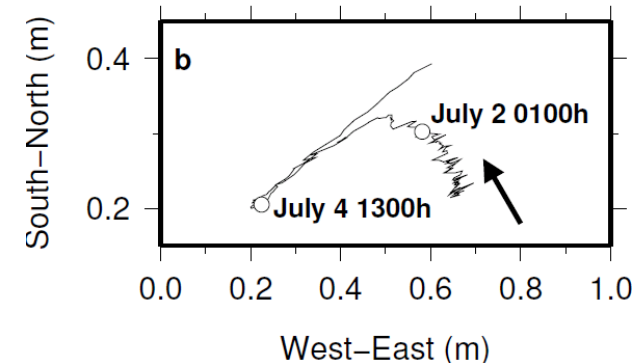
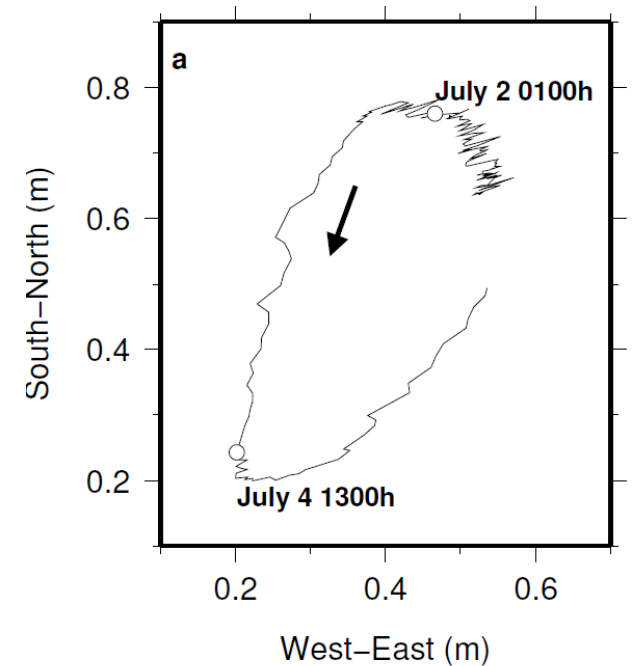
- 2 juillet : augmentation de la sismicité / début de la vidange
- Pic d'activité le 3 juillet, concomitant à :
  - La migration des épicentres vers l'Ouest
  - La rotation de 90° de la déformation principale
  - La rotation des mécanismes au foyer
- Déplacement **vertical** maximum le 4 juillet ; alignement des épicentres suivant un **demi-cercle**





# Explication proposée

- Découplage de la langue glaciaire d'avec le lit rocheux
- Effet “charnière” : soulèvement de la digue / lac sous l'effet de la pression d'eau
- Mouvement horizontal montre une inversion de l'écoulement glaciaire



# Plan de l'exposé

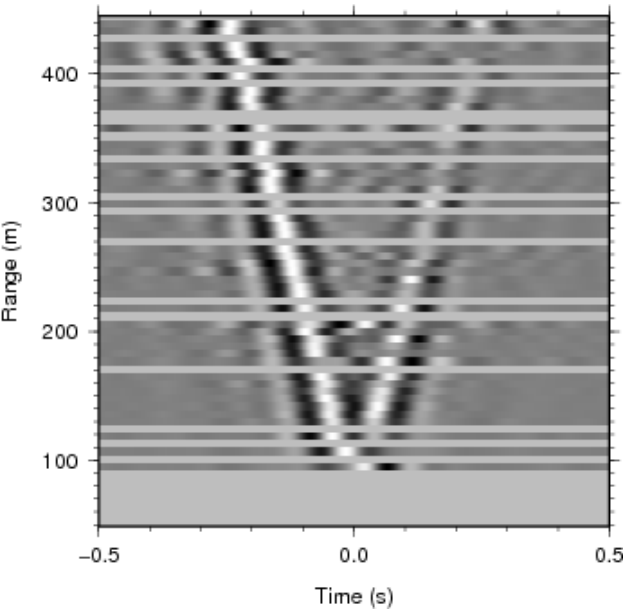
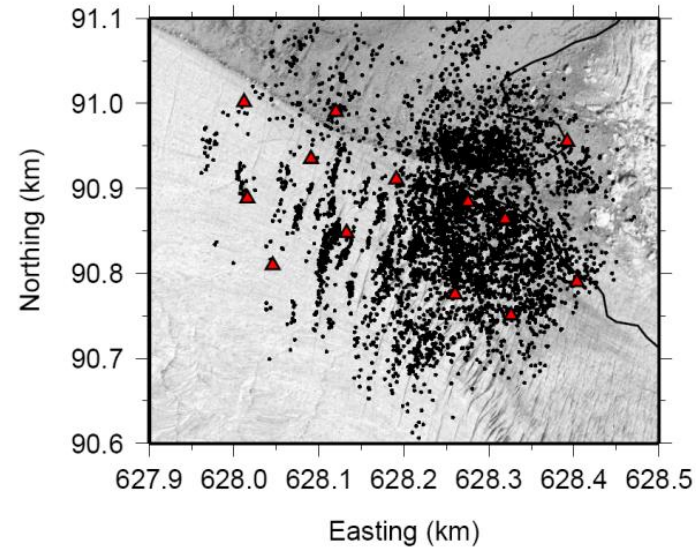
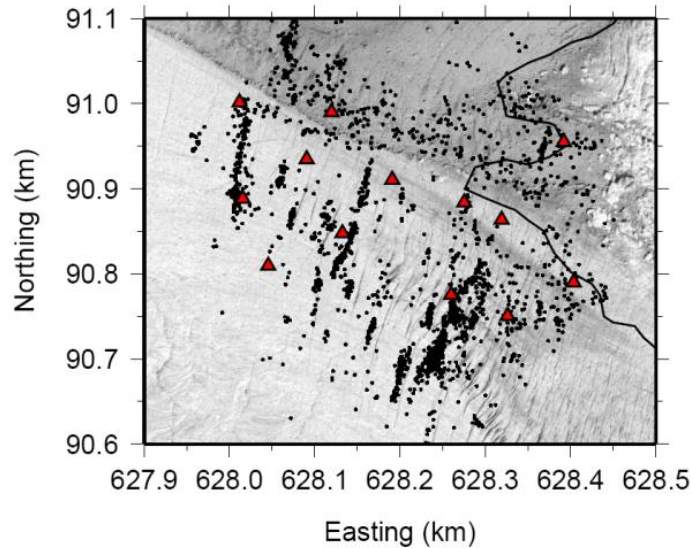
- Introduction
- La sismicité glaciaire “profonde” comme indice du frottement basal
- Ce que peut nous dire la sismicité de surface : lien avec un *jökulhlaup*
- Interférométrie sismique : vers une surveillance permanente?
  - Imagerie passive basse résolution
  - Augmentation de la résolution
  - Vers une tomographie “continue”
- Conclusion et perspectives



Cliché E. Walter

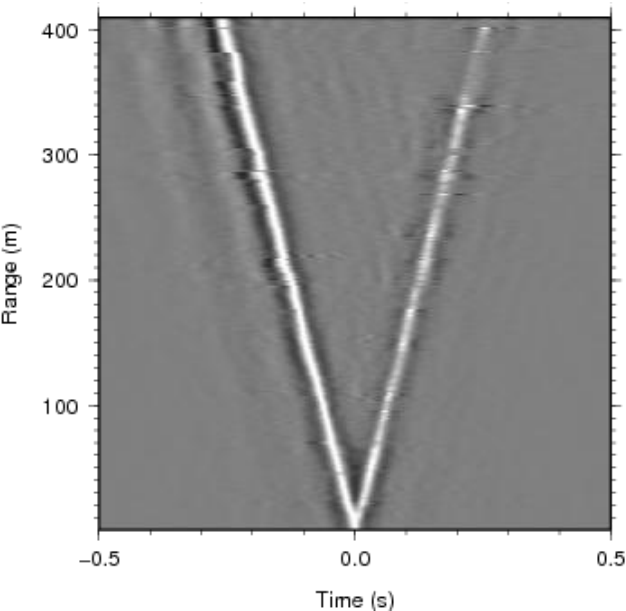
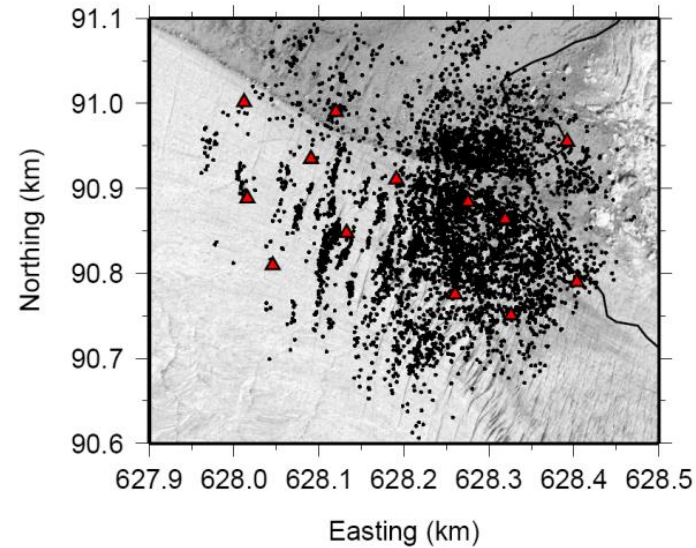
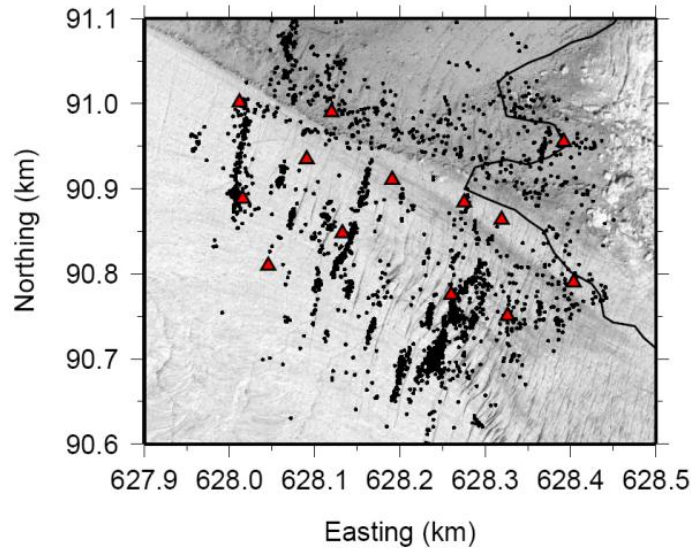
## “Corrélation de bruit” : principe

- Corrélation du bruit sismique ambiant  $\sim$  fonction de Green (réponse impulsionnelle du milieu)
- Un récepteur devient une source...
- ...ou une source devient un récepteur!



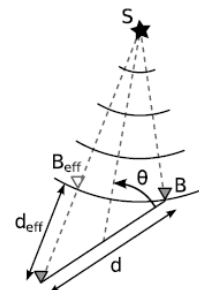
## Milieu homogène

- Corrélation = différence de temps de trajet
- Deux capteurs = un temps de trajet relatif
- Peu de trajets disponibles (autant qu'il y a de couples de capteurs)



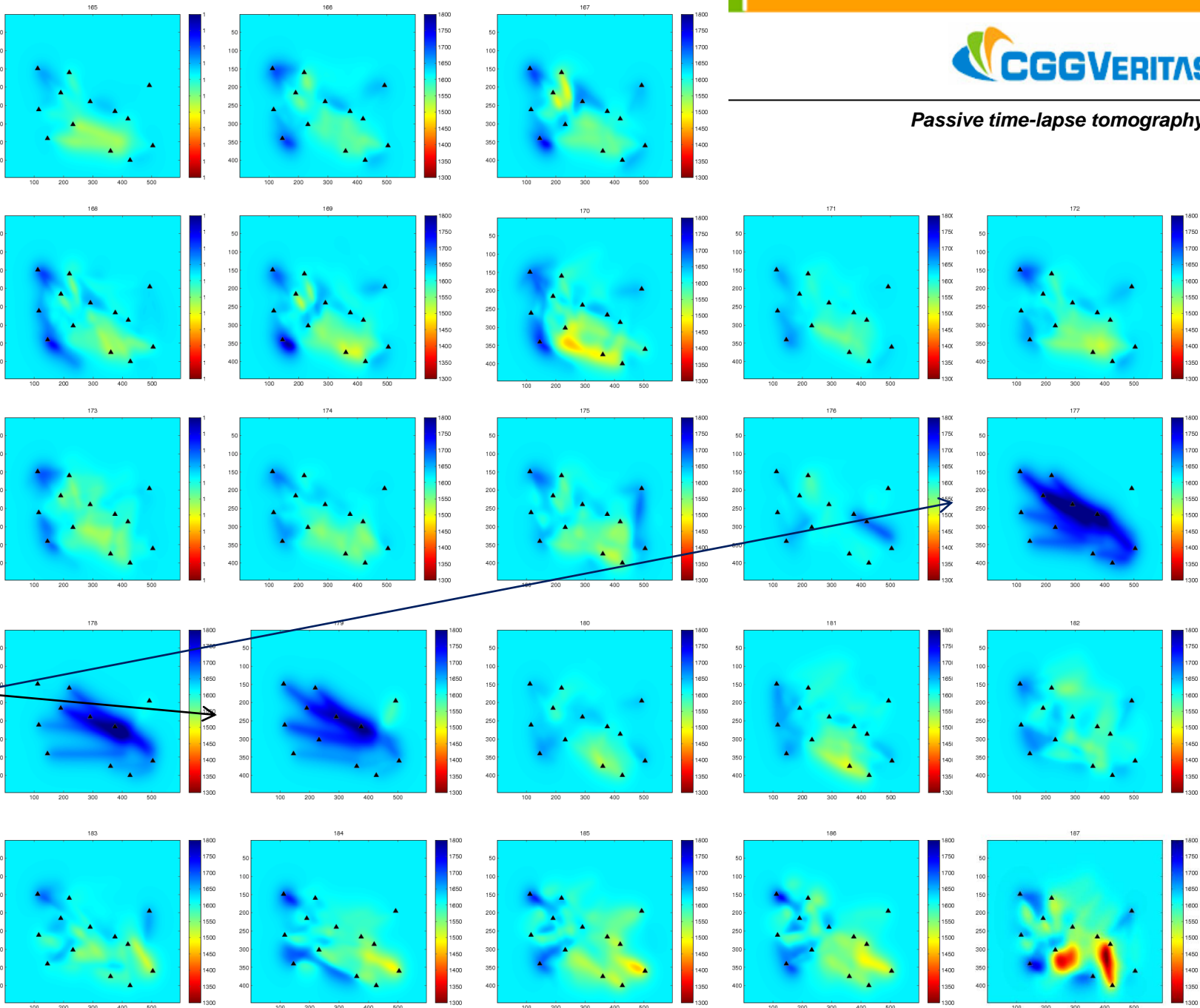
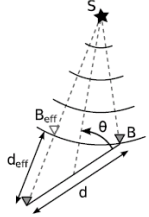
## Milieu latéralement homogène

- Corrélation = différence de temps de trajet
- Une source, un capteur = un temps de trajet
- Suivi temporel possible





Virtual receiver



Missing events due to instrument malfunction

Outburst starts here

# Conclusions

- Sismicité profonde : interface glace / roche
  - Mécanismes mal connus car mal contraints
  - Peu de sites dans le monde permettent un accès à la base du glacier
  - Travaux en cours (E.U.)
  
- Sismicité de surface : crevassage, hydrologie, mouvement gravitaire
  - Intérêt en **prévention des risques** (e.g. poche d'eau Tré-la-Tête, Rochemelon, etc.)
  - Notion de **surveillance passive**

# Conclusions

- Aux longues échelles de temps, **écoulement plastique**
- Aux échelles courtes : **déformation fragile** = fracturation (crevassage, frottement basal, etc.)
- **Caractériser** (parfaitement) **la fracturation** = **imager le champ de contraintes “limite”**
  
- Hydrologie glaciaire
  1. modification du mouvement
  2. modification du champ de contrainte
  3. modification de la sismicité

**La sismicité glaciaire nous renseigne sur les différents mécanismes interagissant au sein de la masse de glace**

- « Monitoring » : un sujet à la mode!
- Même si les objets ne sont pas les mêmes (un glacier vs un champ pétrolier), **les méthodes**, elles, **restent semblables**
- En particulier, l'aspect « tomographie en capteur virtuel » est tout à fait applicable dans le cadre du monitoring de fracturation hydraulique
- Stage M2/ingénieur à Grenoble