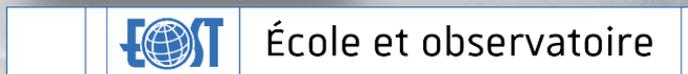


Approche combinée sismologie et apprentissage machine pour l'étude des instabilités gravitaires

Clément Hibert, Floriane Provost, Jean-Philippe Malet,
David Michéa, Alessia Maggi, Marten Geertsema, Quentin Pillot,
Mathilde Radiguet, Agnès Helmstetter

Journées RESIF
Biarritz – 13 Novembre 2019



des **sciences de la Terre**

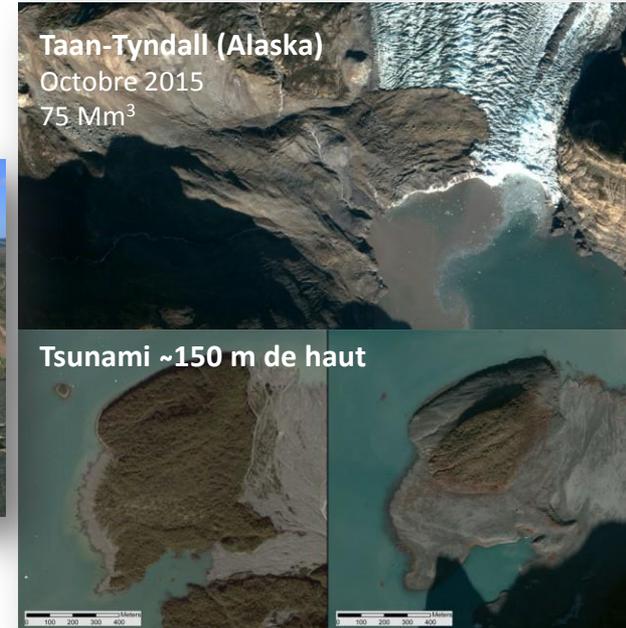
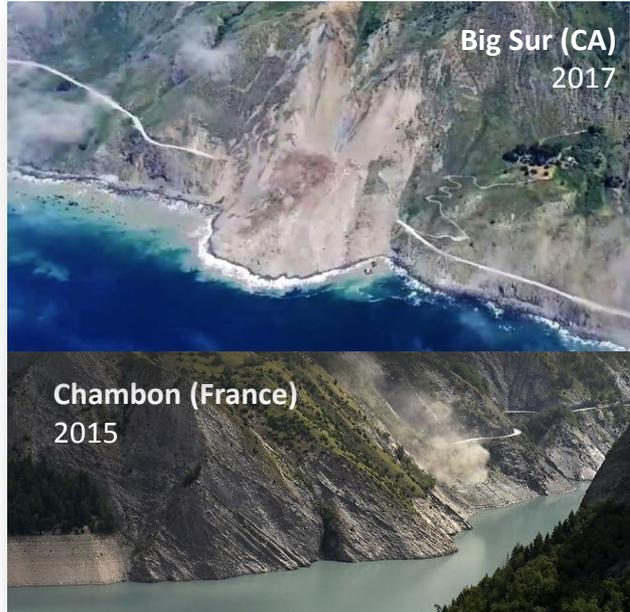
Université de Strasbourg



Introduction : Aléa et Enjeux

300 millions de personnes exposées dans le monde
17% décès annuels liés aux catastrophes naturelles

[Sassa & Canuti, 2009]



Besoin d'outils pour la prévention / gestion des risques liés aux aléas gravitaires :

- Détection et identification des **zones à risques** (*où? quoi?*)
- Surveillance des versants instables pour l'**alerte sur des ruptures** possibles (*quand?*)
- Déterminer l'influence des différents **forçages** (météorologiques, climatiques, tectoniques) sur l'activité gravitaire (*pourquoi?*)

Instabilités gravitaires : spontanées, destructrices, difficiles à observer et prévoir > difficultés à produire des catalogues exhaustifs

Que peut apporter la sismologie? :

- > Surveillance et détection à **distance** et en **continu**
- > Possibilité de reconstruire les **propriétés** et la **dynamique** des évènements

Catalogues instrumentaux à très haute résolution spatio-temporelle

Instabilités gravitaires : spontanées, destructrices, difficiles à observer et prévoir > difficultés à produire des catalogues exhaustifs

Que peut apporter la sismologie? :

- > Surveillance et détection à **distance** et en **continu**
- > Possibilité de reconstruire les **propriétés** et la **dynamique** des évènements

Catalogues instrumentaux à très haute résolution spatio-temporelle

2 approches :

1. Ondes sismiques basse-fréquence (<0,1 Hz) :

- Détection en temps court (e.g. GCMT project) – 2013-2015 : **5/6** des plus grands glissement de terrain mondiaux d'abord détectés sismologiquement
- Caractérisation de la source (inversion, simulation, etc.)

e.g. Kanamori et al., 1982; Favreau et al., 2010; Moretti et al., 2012; Ekström & Stark, 2013; Allstadt, 2013; Hibert et al., 2014, 2015, 2017

Limites : Seuls les plus grands glissements de terrain (<1% des évènements) vont générer ces ondes basse-fréquence

2. Ondes sismiques haute-fréquence (>1 Hz) :

Limites : source mal comprise, plus impactées par les effets de propagation, **très grands nombre d'évènements non gravitaire dans cette bande de fréquence**

Introduction : sismologie et instabilités gravitaires

Instabilités gravitaires : spontanées, destructrices, difficiles à observer et prévoir > difficultés à produire des catalogues exhaustifs

Que peut apporter la sismologie? :

- > Surveillance et détection à **distance** et en **continu**
- > Possibilité de reconstruire les **propriétés** et la **dynamique** des évènements

Catalogues instrumentaux à très haute résolution spatio-temporelle

2 approches :

1. Ondes sismiques basse-fréquence (<0,1 Hz) :

- Détection en temps court (e.g. GCMT project) – 2013-2015 : **5/6** des plus grands glissement de terrain mondiaux d'abord détectés sismologiquement
- Caractérisation de la source (inversion, simulation, etc.)

e.g. *Kanamori et al.*, 1982; *Favreau et al.*, 2010; *Moretti et al.*, 2012; *Ekström & Stark*, 2013; *Allstadt*, 2013; *Hibert et al.*, 2014, 2015, 2017

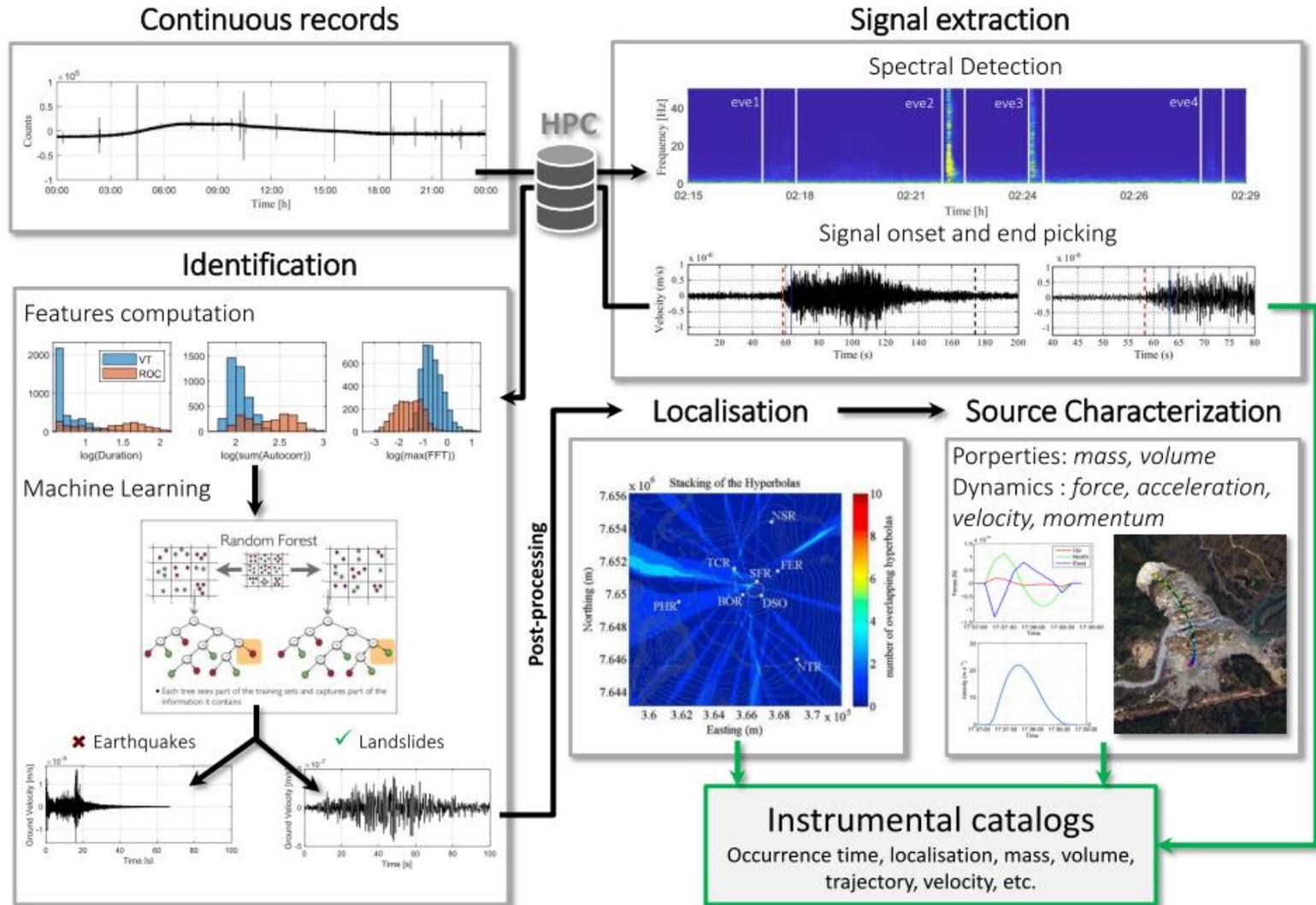
Limites : Seuls les plus grands glissements de terrain (<1% des évènements) vont générer ces ondes basse-fréquence

2. Ondes sismiques haute-fréquence (>1 Hz) :

Limites : source mal comprise, plus impactées par les effets de propagation, **très grands nombre d'évènements non gravitaire dans cette bande de fréquence**

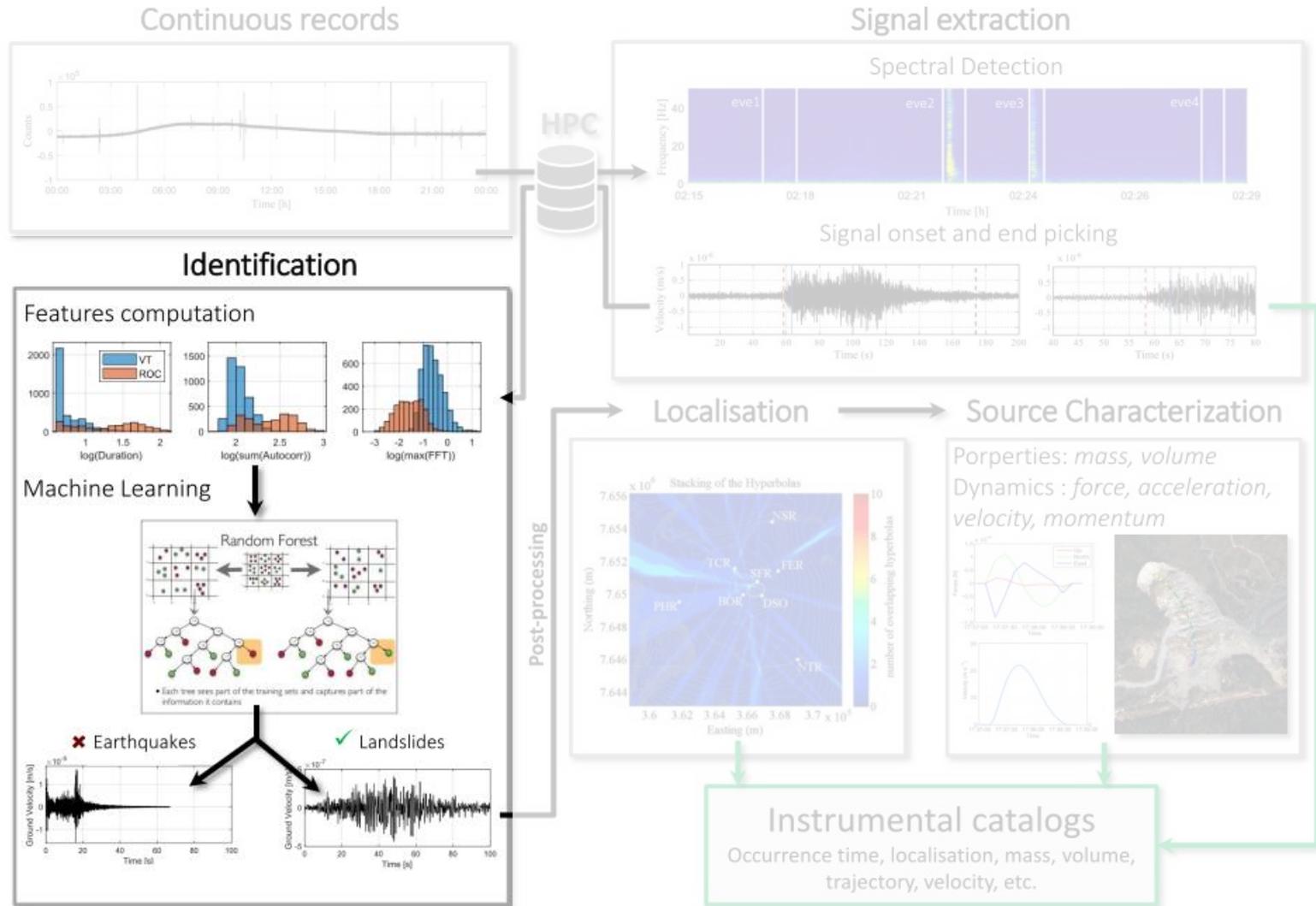
Détection : échelle locale et régionale

Un grand nombre d'évènements : Besoin d'automatiser les chaînes de traitement



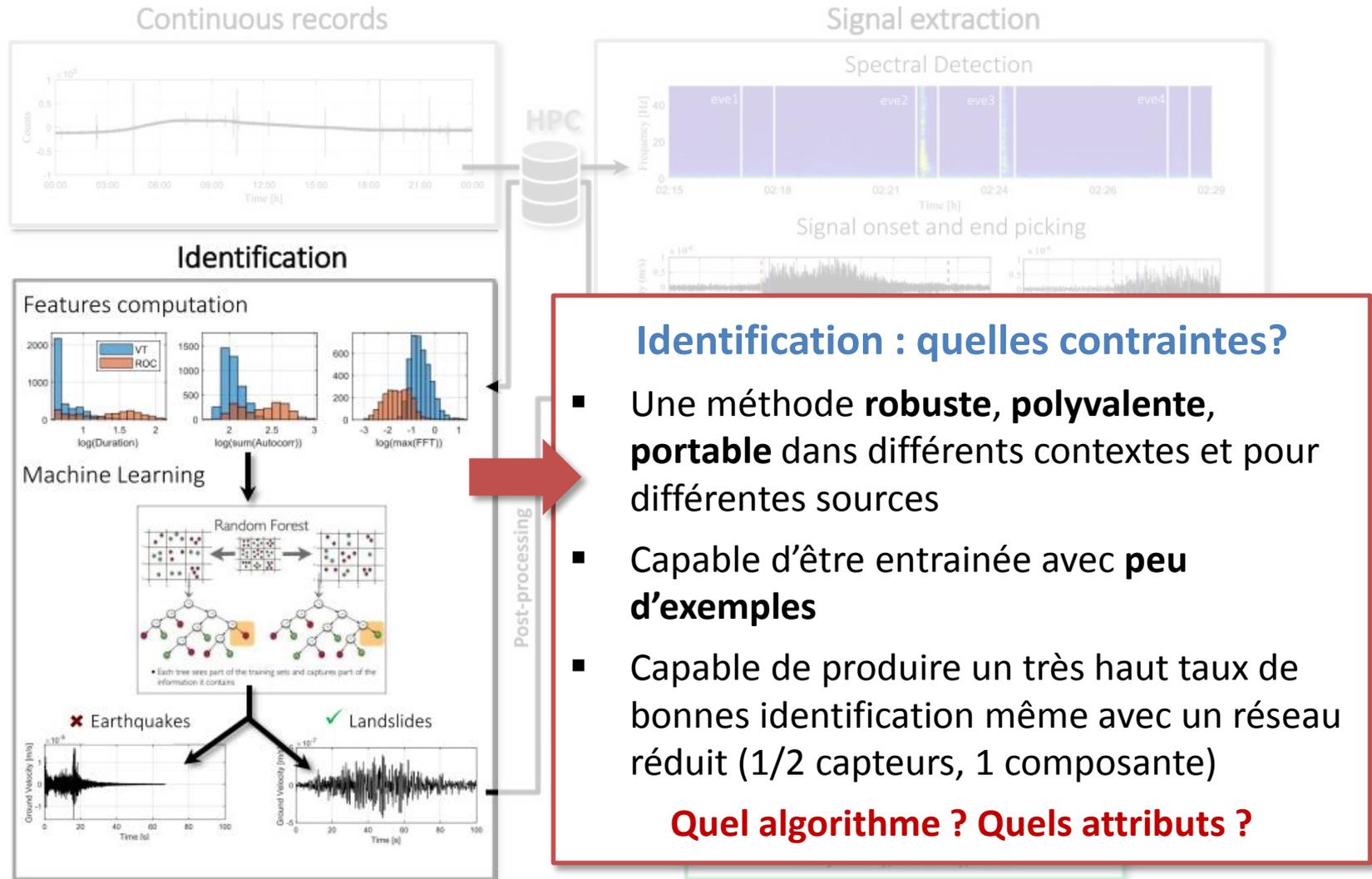
Identification des sources sismologiques

Un grand nombre d'évènements : Besoin d'automatiser les chaînes de traitement



Identification des sources sismologiques

Un grand nombre d'évènements : Besoin d'automatiser les chaînes de traitement



« Random Forest » : Algorithm proposé par *Breiman et Cutler* [2001]

Principe

- Grand nombre (> 500) d'**arbres décisionnels** à partir du jeu de données d'entraînement
- Le **vote majoritaire** exprimé par la forêt donne la classification

Pourquoi utiliser cet algorithme ?

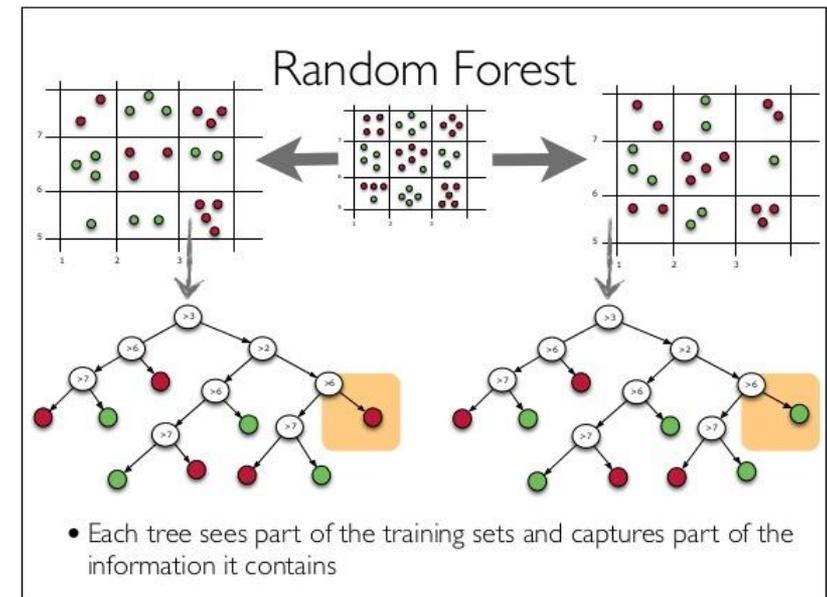
+ Très **rapide**

+ Un des plus **performants**

[Fernández-Delgado et al., 2014]

+ Peu intégrer des données au comportement non-linéaire

+ Le vote exprimé donne **une mesure de l'incertitude** sur le processus de classification et de l'importance de chaque attribut



Quels attributs ?

57 attributs sélectionnés :

Formes d'ondes:

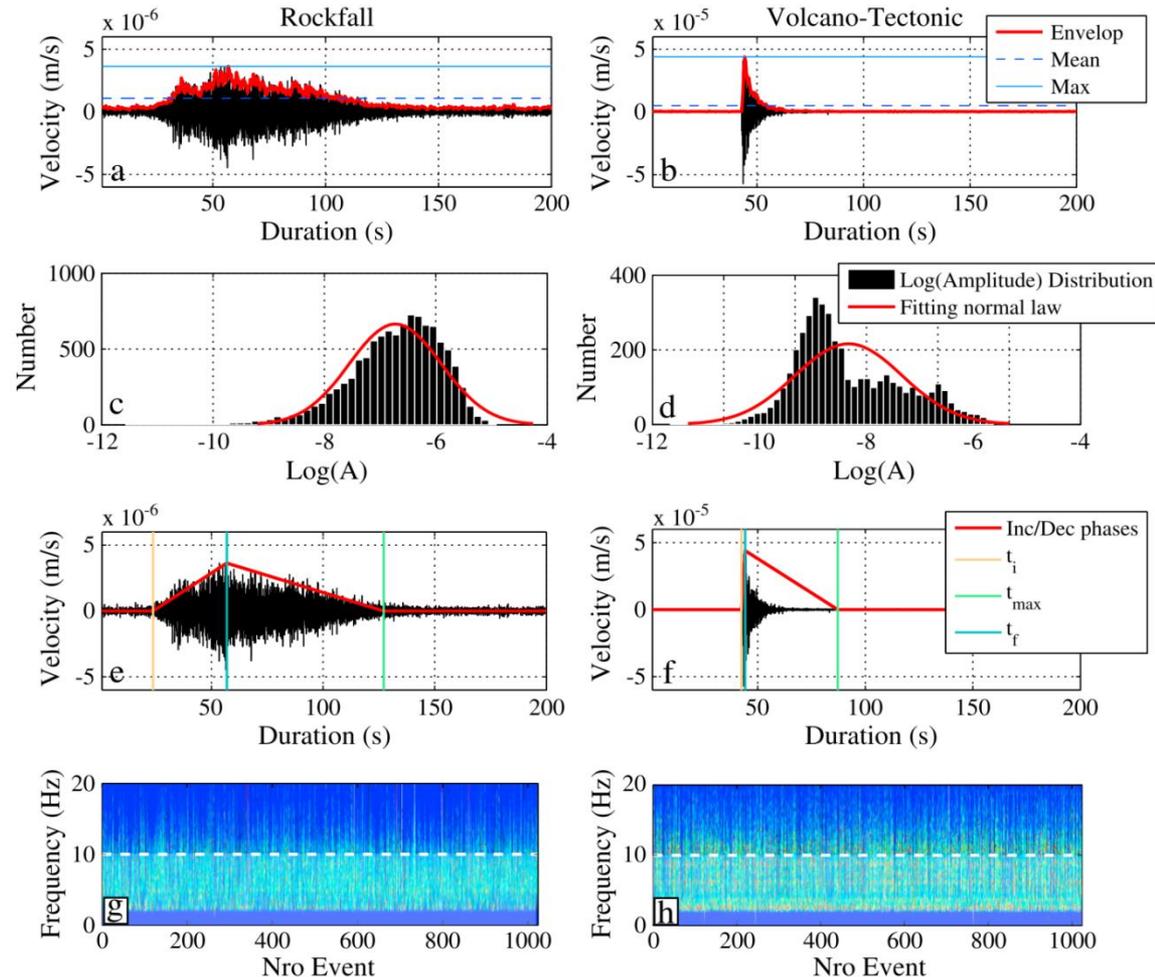
Durée, rapport max/median, enveloppe, Kurtosis, energie \neq FB, etc.

Spectre :

Max Freq., energie LF, HF, nombre de pics, largeur pics, etc.

Pseudo-Spectrogramme :

Forme, évolution temporelle, rapport des enveloppes, etc.



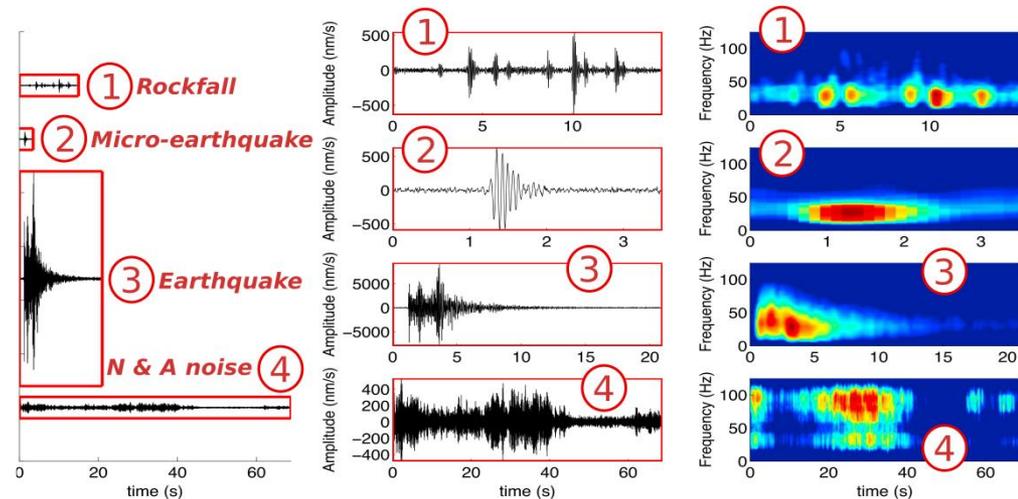
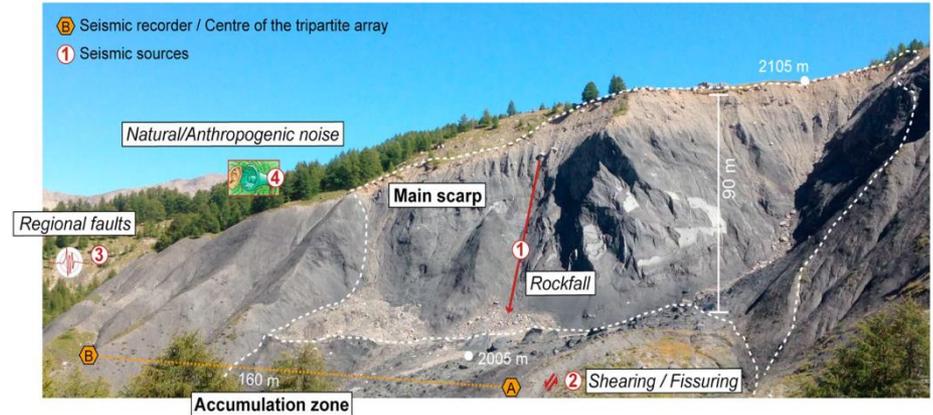
Test de l'algorithme RF + Attributs dans différents contextes

Echelle locale :

- **Super-Sauze** [Provost et al., 2017] – 4 classes, ~900 évè.
Taux de réussite : **90%**
- **La Clapière** – 4 classes, ~11100 évè. :
Taux de réussite : **92%**
- **Séchilienne** – 4 classes, ~130000 évè. :
Taux de réussite : **91%**
- **Piton de la Fournaise volc.** [Hibert et al., 2017; Maggi et al., 2017] – 2-8 classes, 13000+ évè. :
Taux de réussite : **>95%**

Echelle régionale :

- **Alaska** [Hibert et al., 2019]
- **Alps** : WIP



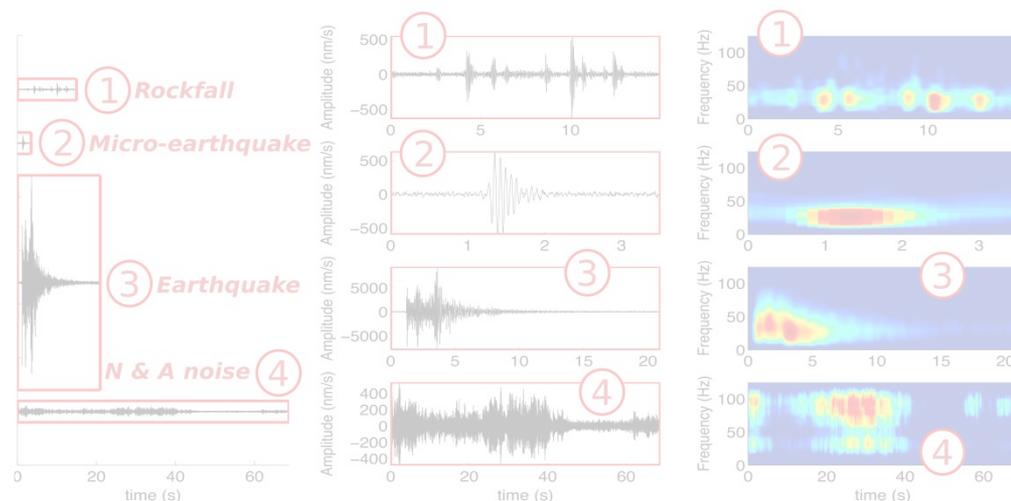
Test de l'algorithme **RF + Attributs** dans différents contextes

Echelle locale :

- **Super-Sauze** [Provost et al., 2017] – 4 classes, ~900 évè.
Taux de réussite : **90%**
- **La Clapière** – 4 classes, ~11100 évè. :
Taux de réussite : **92%**
- **Séchilienne** – 4 classes, ~130000 évè. :
Taux de réussite : **91%**
- **Piton de la Fournaise volc.** [Hibert et al., 2017; Maggi et al., 2017] – 2-8 classes, 13000+ évè. :
Taux de réussite : **>95%**

Echelle régionale :

- **Alaska** [Hibert et al., 2019]
- **Alps** : WIP



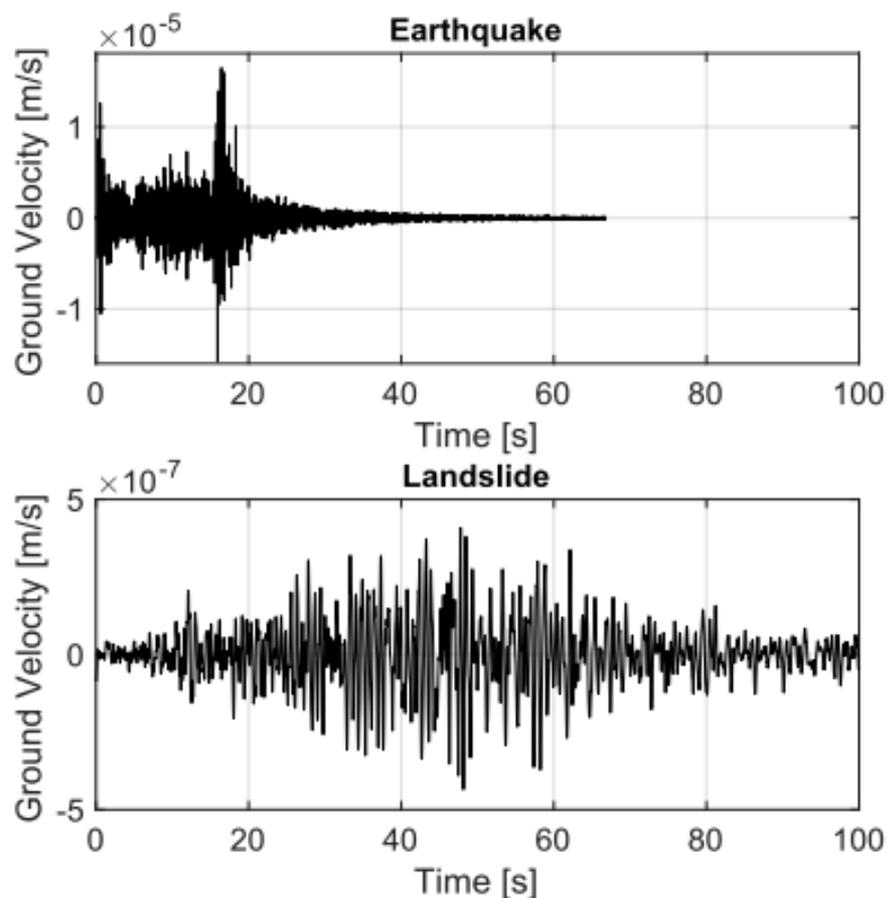
Jeu de données d'entraînement : 2 classes

Séismes :

- **290** séismes enregistrés par le réseau Alaska (AK) en janvier 2016 (Mw 2.5-7.1)
- **3636** signaux HF enregistrés par 124 stations

Glissements :

- **11** glissements (Volume > 1 Mm³)
- **205** HF signaux HF enregistrés
- Evènements connus (GCMT project, *Ekström et al.*)



Implémentation de l'algorithme

Tests conduits : Entraînement du modèle avec un sous-échantillon du training-set et classification du reste : répété 100 fois

Approche « Signal » :

Identification d'un évènement à partir d'un signal

Précision : **98%**

Mais haut taux de **fausse alarme!**

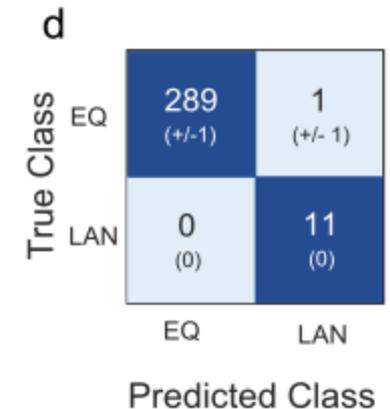
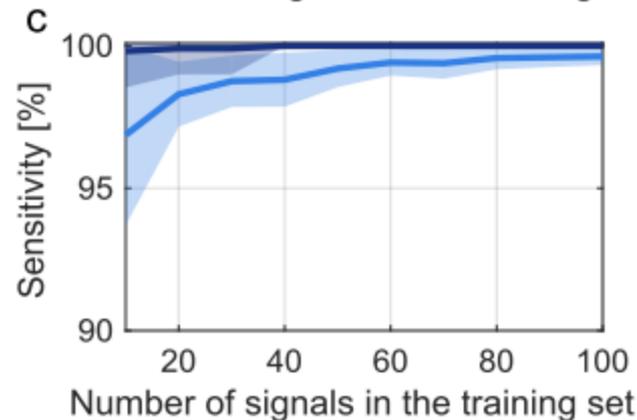
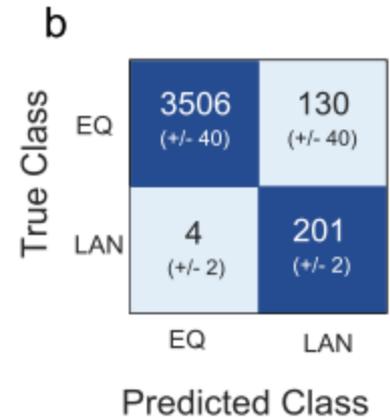
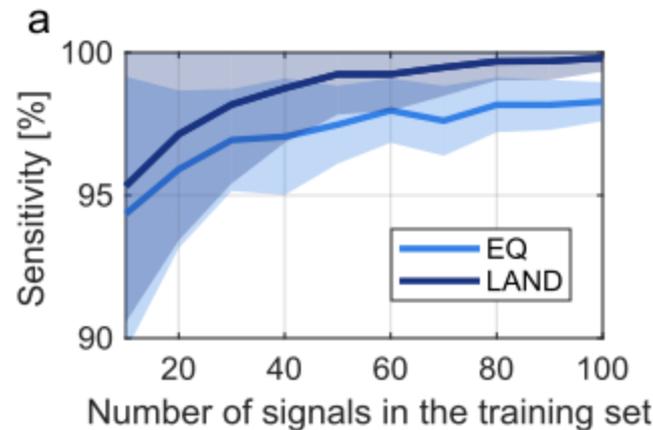
Approche « évènements » :

Identification d'un évènement à partir de la classification de tous les signaux qu'il a généré

Précision : **99%**

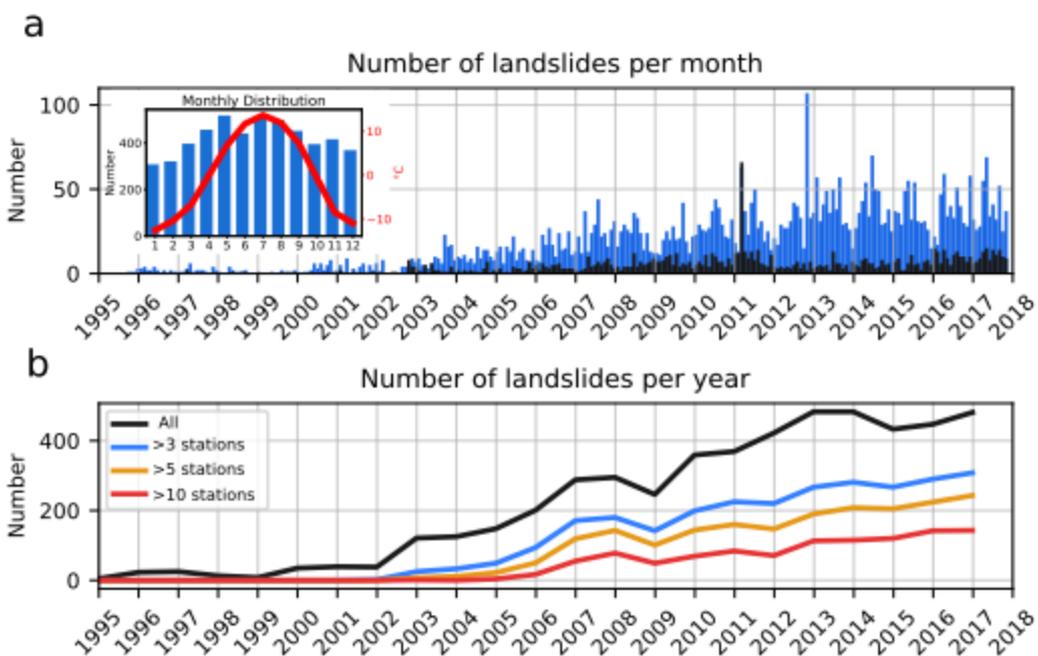
Pire scénario : 1 séisme identifié comme glissement.

Pas un seul glissement manqué



Application à 22 années d'enregistrement continu

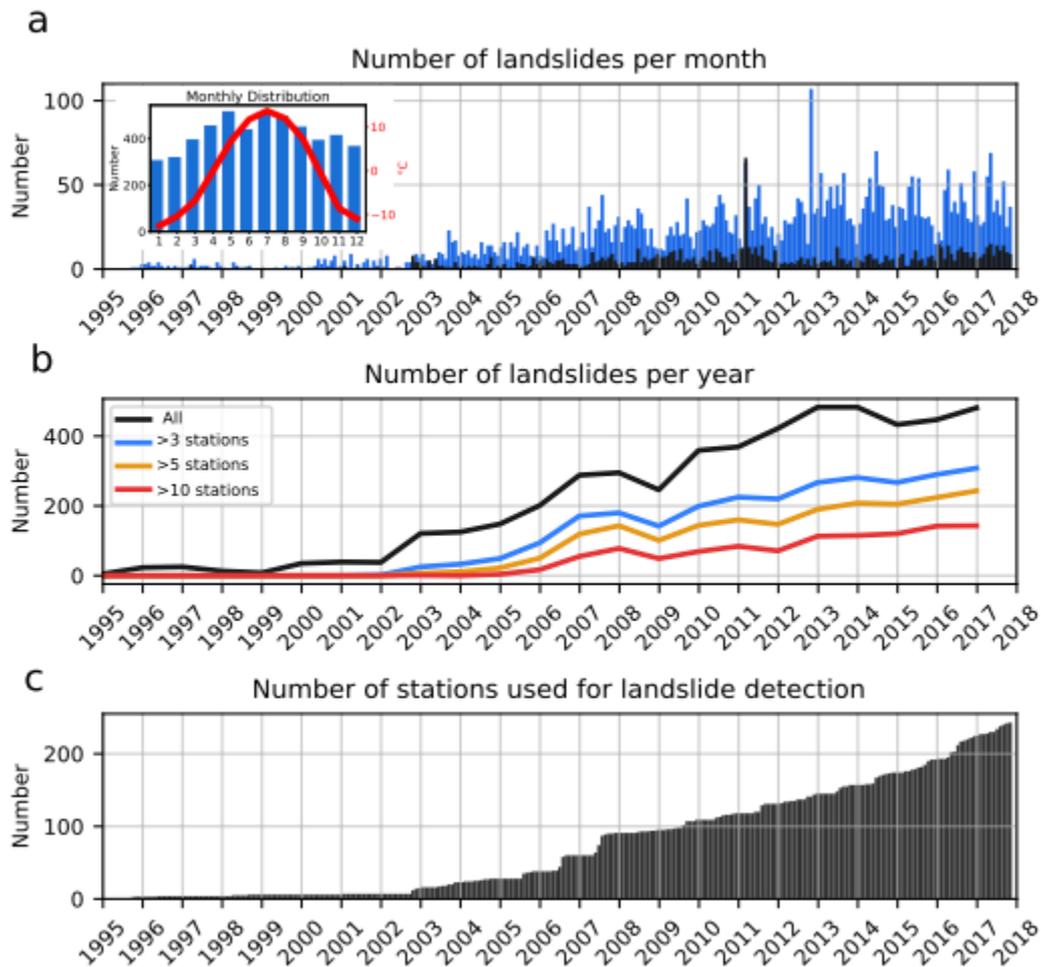
- Implémentation HPC : **10h de processing pour 240+ stations** (~12 mois pour un PC personnel)
- Zone de détection: **20° x 20°** - Lat: 48/68, Lon: -124/-144
- **6213** détections de glissement sur **plus d'une station**, **5087 (82%)** glissements confirmés par inspection manuelle des signaux
- **Tous** les glissements précédemment connus ont été détectés



Application à 22 années d'enregistrement continu

Comment expliquer l'augmentation du nombre de glissements?

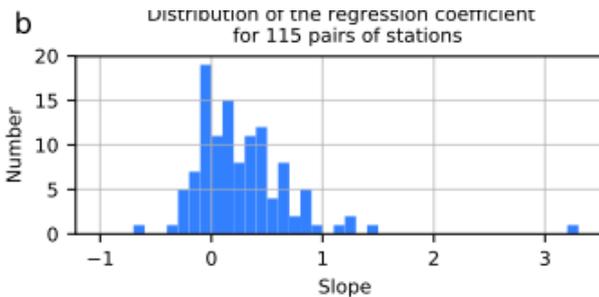
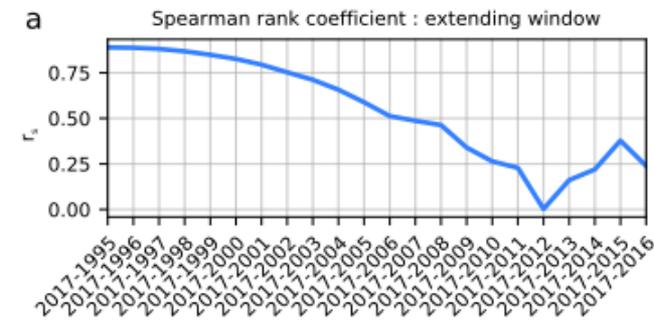
Effet du réseau ?



Application à 22 années d'enregistrement continu

Comment expliquer l'augmentation du nombre de glissements?

Effet du réseau ?

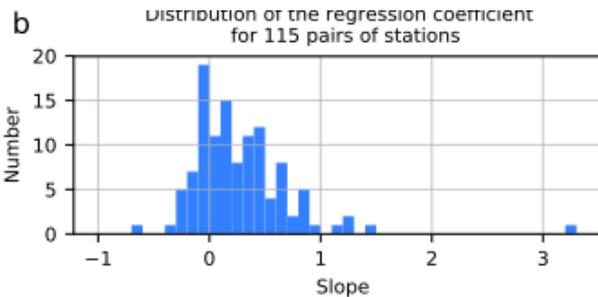


Faible corrélation statistique après 2004

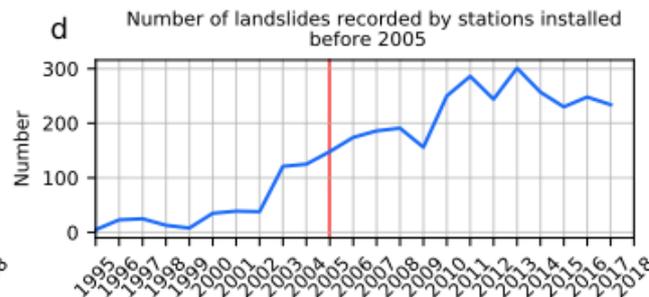
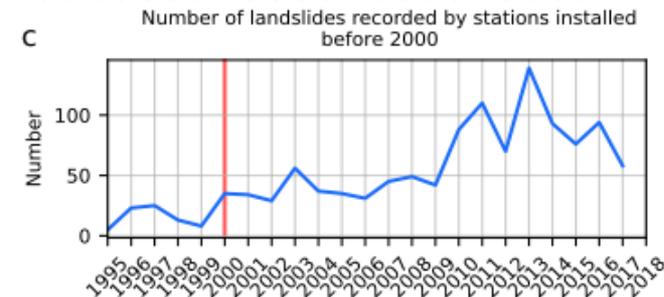
Application à 22 années d'enregistrement continu

Comment expliquer l'augmentation du nombre de glissements?

Effet du réseau ?



Faible corrélation statistique après 2004

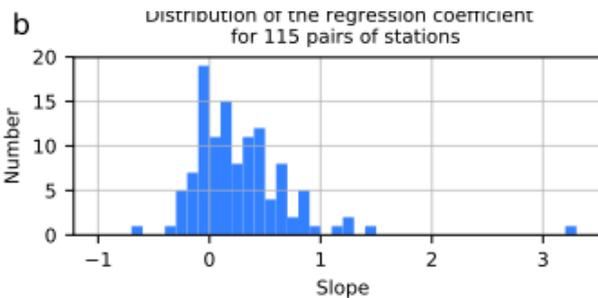
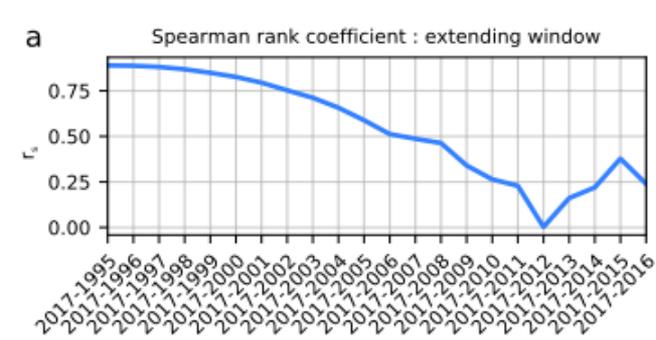


Augmentation visible avec les stations les plus anciennes

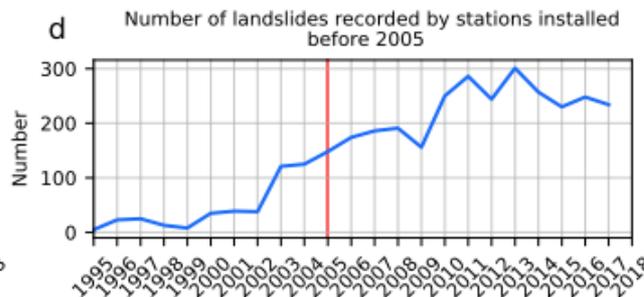
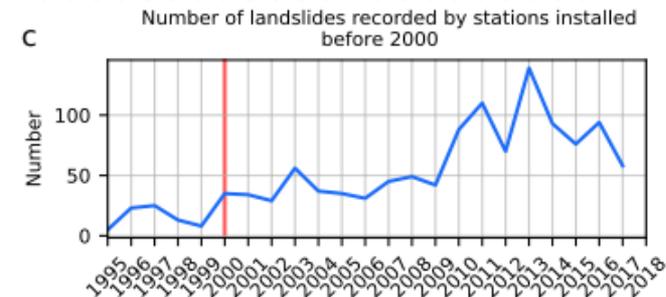
Application à 22 années d'enregistrement continu

Comment expliquer l'augmentation du nombre de glissements?

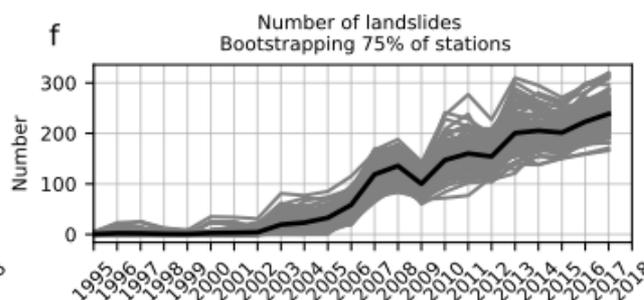
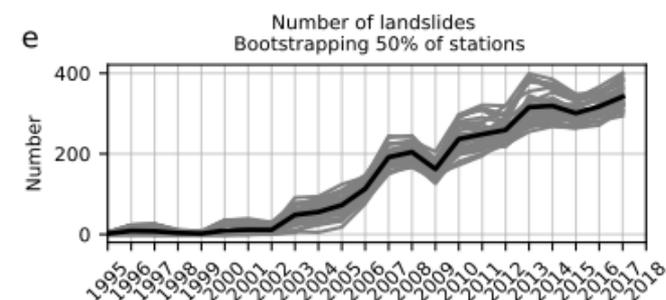
Effet du réseau ?



Faible corrélation statistique après 2004



Augmentation visible avec les stations les plus anciennes

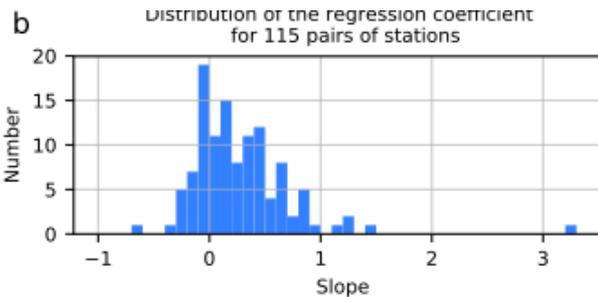


Augmentation observée sur tout le réseau : pas de biais spatial

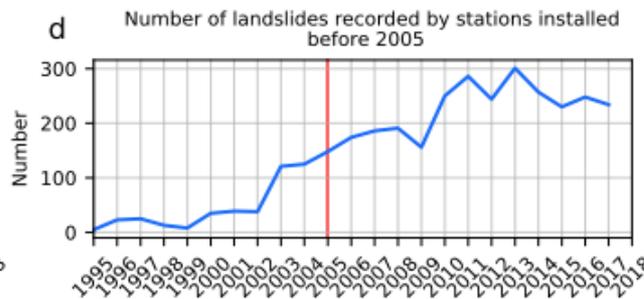
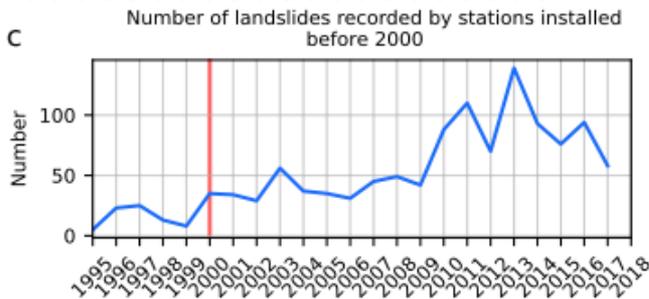
Application à 22 années d'enregistrement continu

Comment expliquer l'augmentation du nombre de glissements?

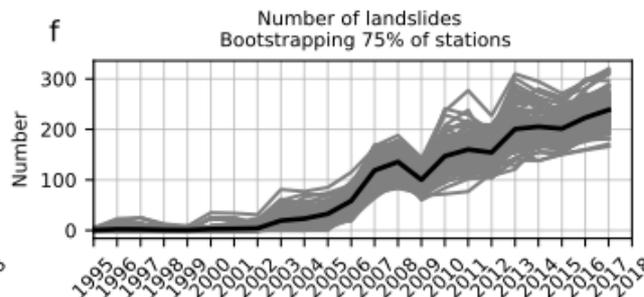
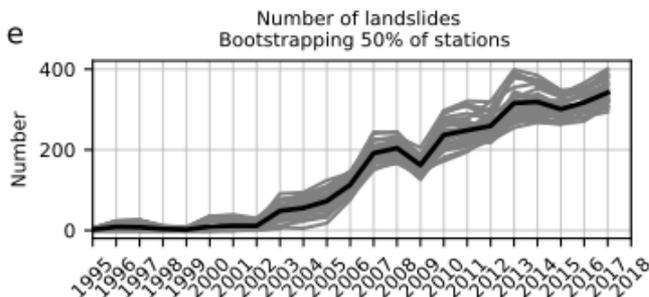
~~Effet du réseau?~~



Pas de corrélation statistique après 2004



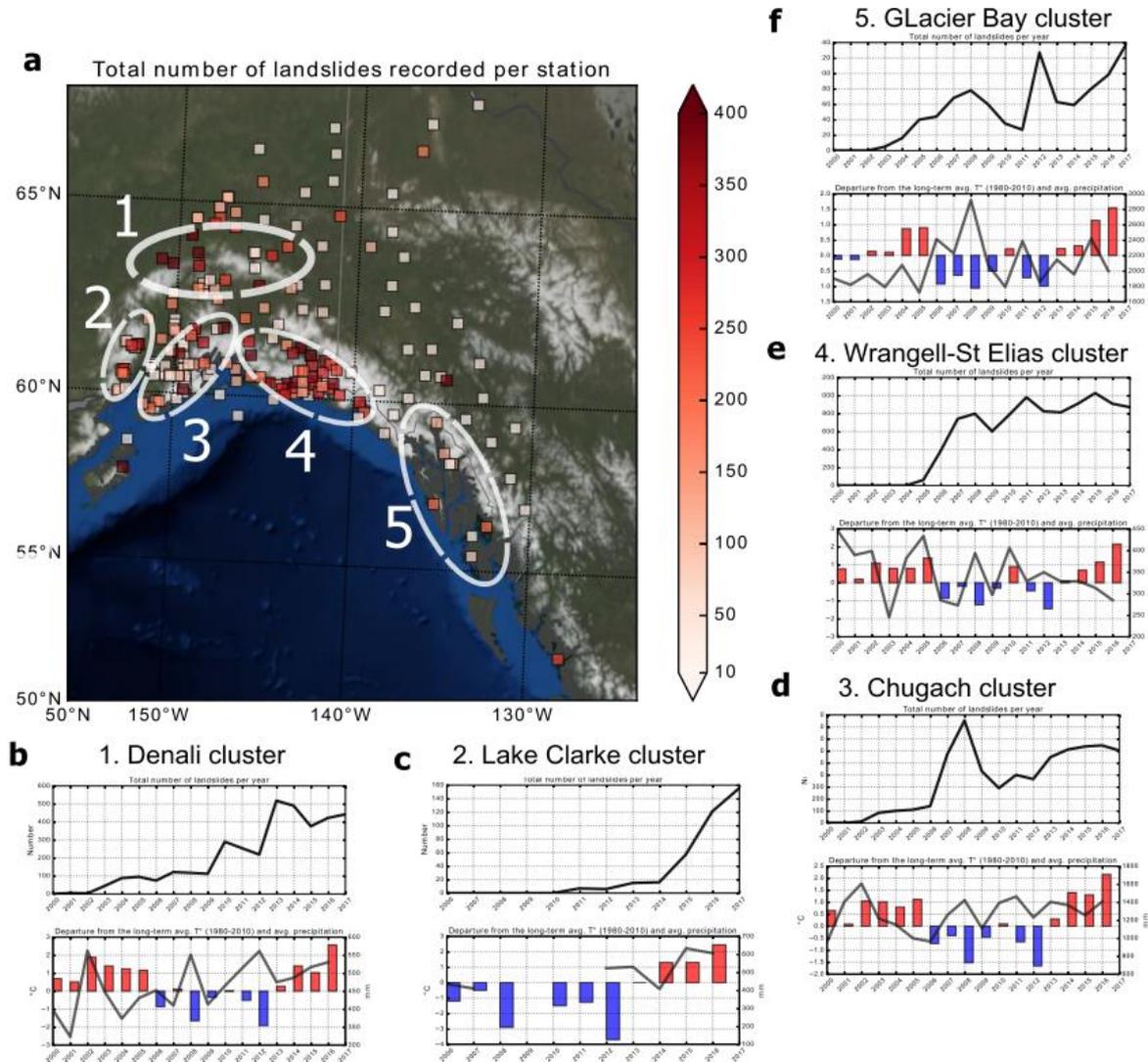
Augmentation visible avec les stations les plus anciennes



Augmentation observée sur tout le réseau : pas de biais spatial

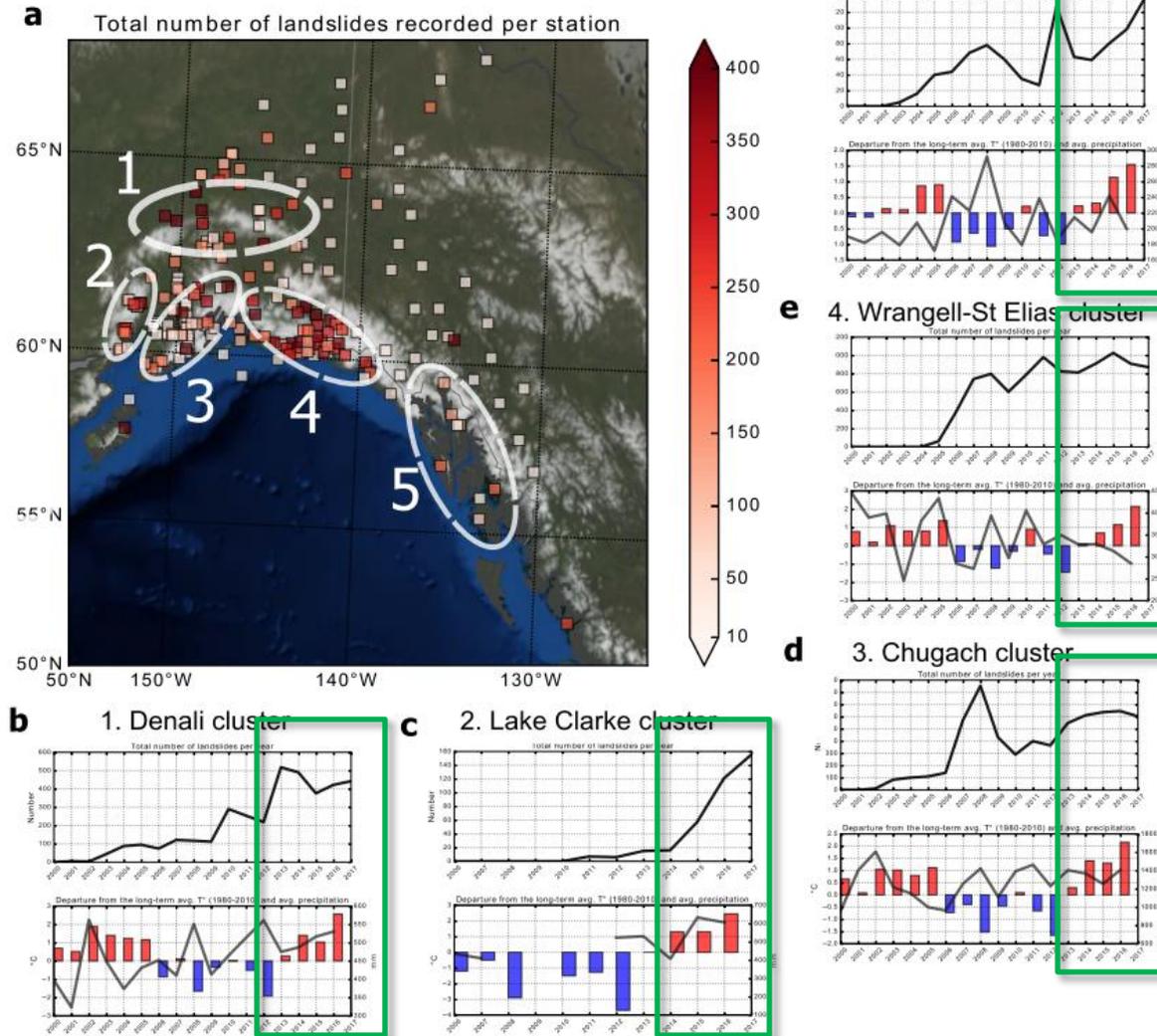
Application à 22 années d'enregistrement continu

Comment expliquer l'augmentation du nombre de glissements?



Application à 22 années d'enregistrement continu

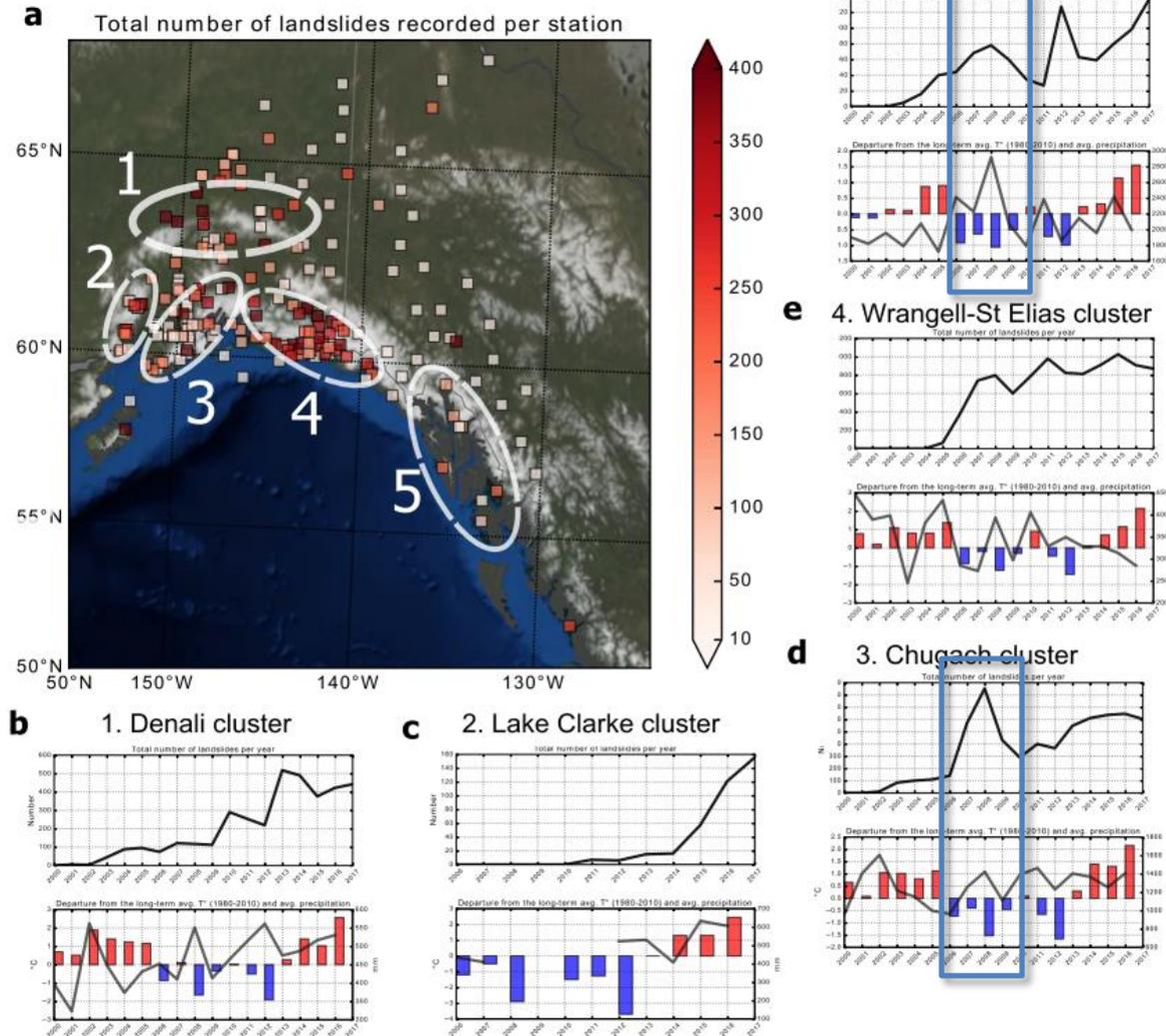
Comment expliquer l'augmentation du nombre de glissements?



Température moyenne?
(fonte du pergélisol,
retraite des glaciers?)

Application à 22 années d'enregistrement continu

Comment expliquer l'augmentation du nombre de glissements?

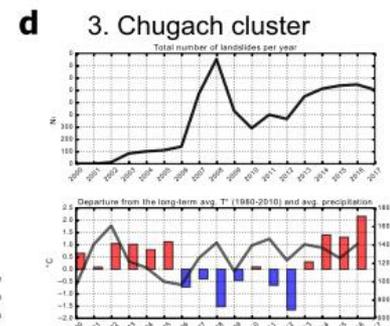
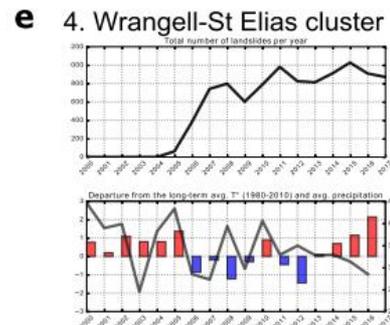
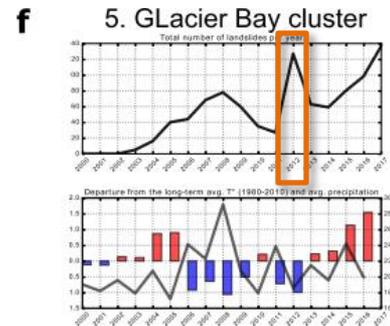
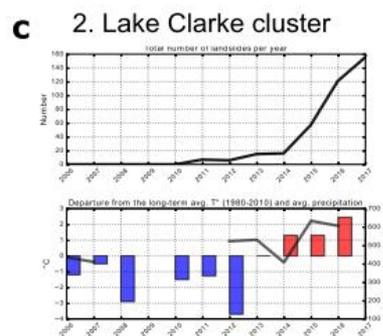
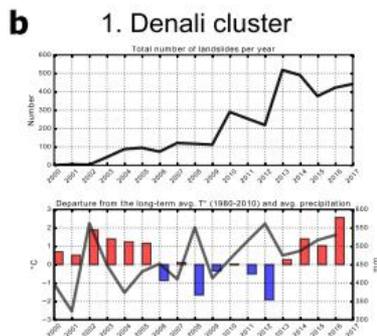
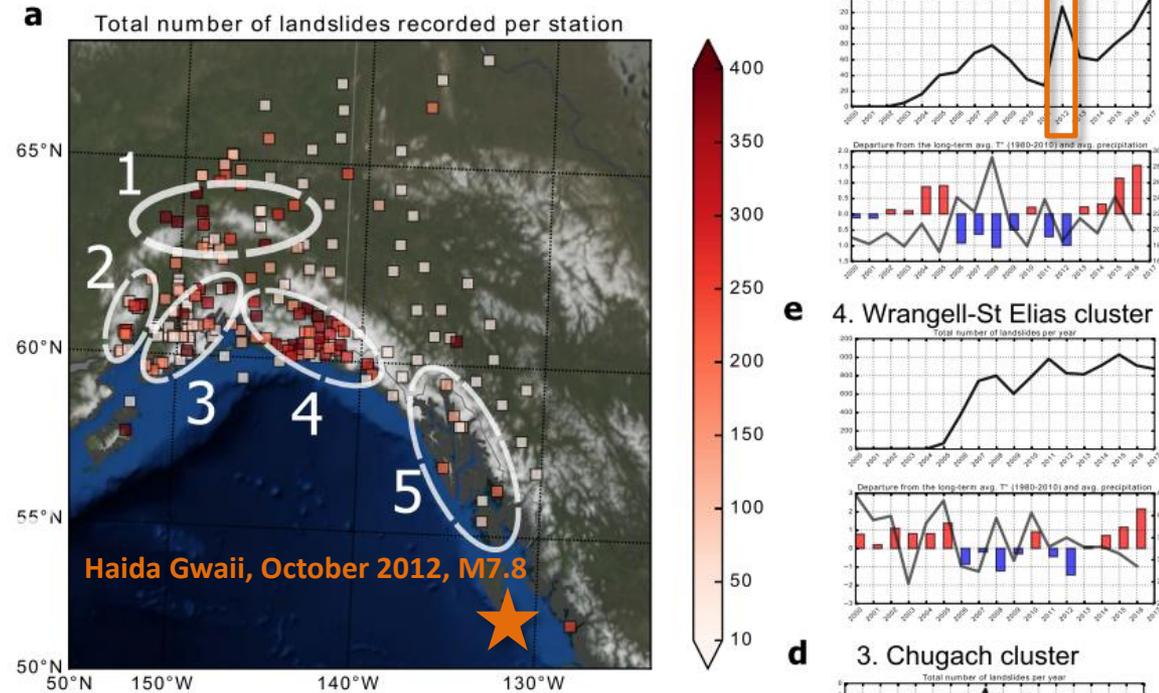


Température moyenne?
(fonte du pergélisol,
retraite des glaciers?)

Précipitation (Effets
locaux?)

Application à 22 années d'enregistrement continu

Comment expliquer l'augmentation du nombre de glissements?



Température moyenne?
(fonte du pergélisol,
retraite des glaciers?)

Précipitation (Effets
locaux?)

Grands séismes

Application à 22 années d'enregistrement continu

Comment expliquer l'augmentation du nombre de glissements?

En résumé :

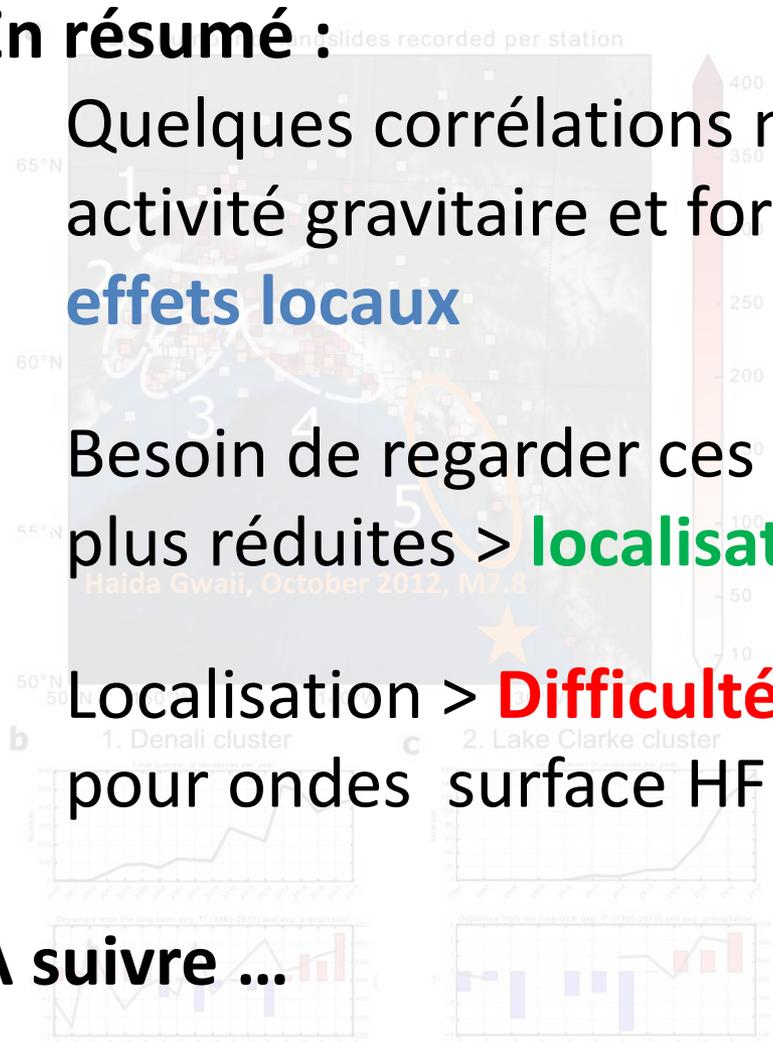
- Quelques corrélations mais pas systématiques entre activité gravitaire et forçages environnementaux > **effets locaux**
- Besoin de regarder ces corrélations à des échelles S-T plus réduites > **localisation**
- Localisation > **Difficultés** : Modèle de vitesse régional pour ondes surface HF (>1 Hz) ?

A suivre ...



Avg, temperature
(Permafrost thawing
glaciers retreat?)

Precipitation (local
effects?)



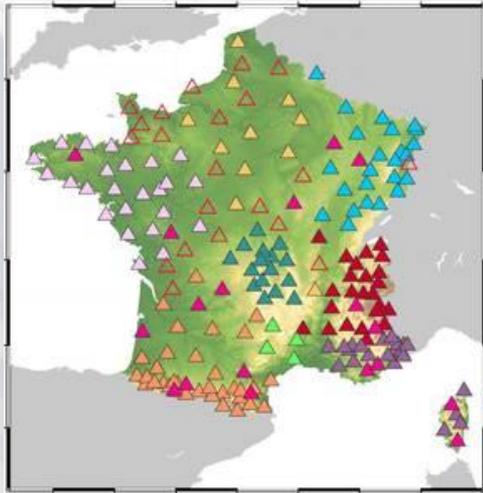
Conclusions :

- ✓ **SeisLearning (RF-HPC)** : Un nouvel algorithme qui permet d'extraire d'enregistrements continus des catalogues d'évènements gravitaires
- ✓ Qui permet d'explorer des chroniques couvrant des décennies et de produire des **catalogues instrumentaux à haute res. spatio-temporelle**
- ✓ Permettant de mieux comprendre **les facteurs déclencheurs** à court et à long terme (tectonique, météorologie, climat, etc.)

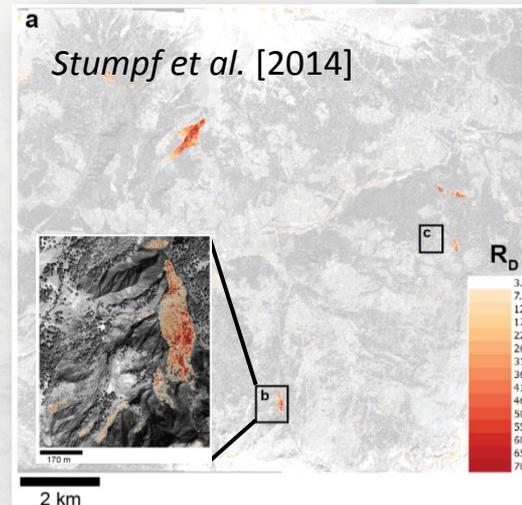
Perspectives :

Construction **automatique** de catalogues et
détection en **temps court**

Existing seismic networks



Automatic landslide remote sensing
(Sentinel 1+2)



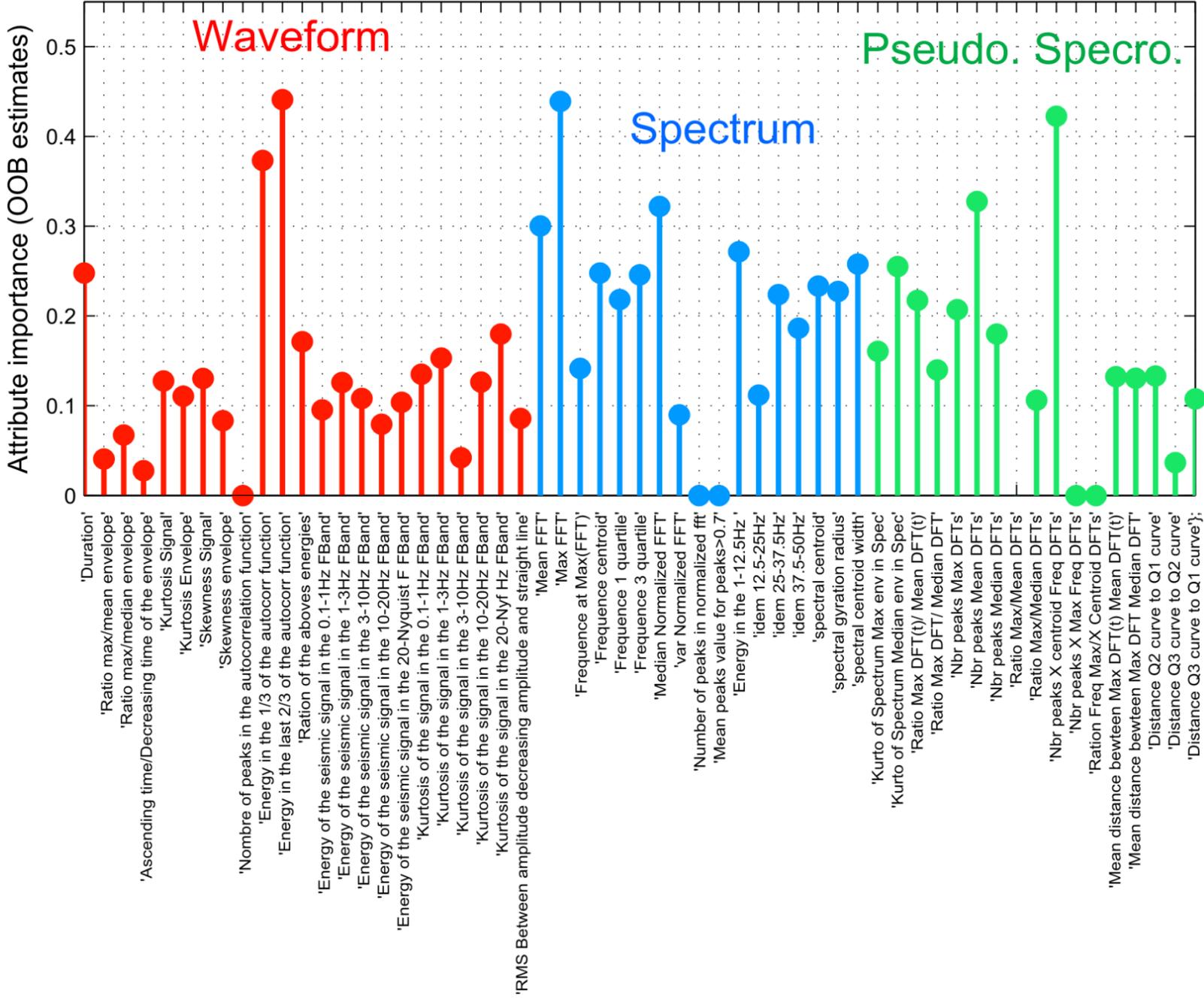
- Implementation dans des contextes variés (Alaska, Alpes, Antilles, Japon, Taiwan, Monde?)



Merci!

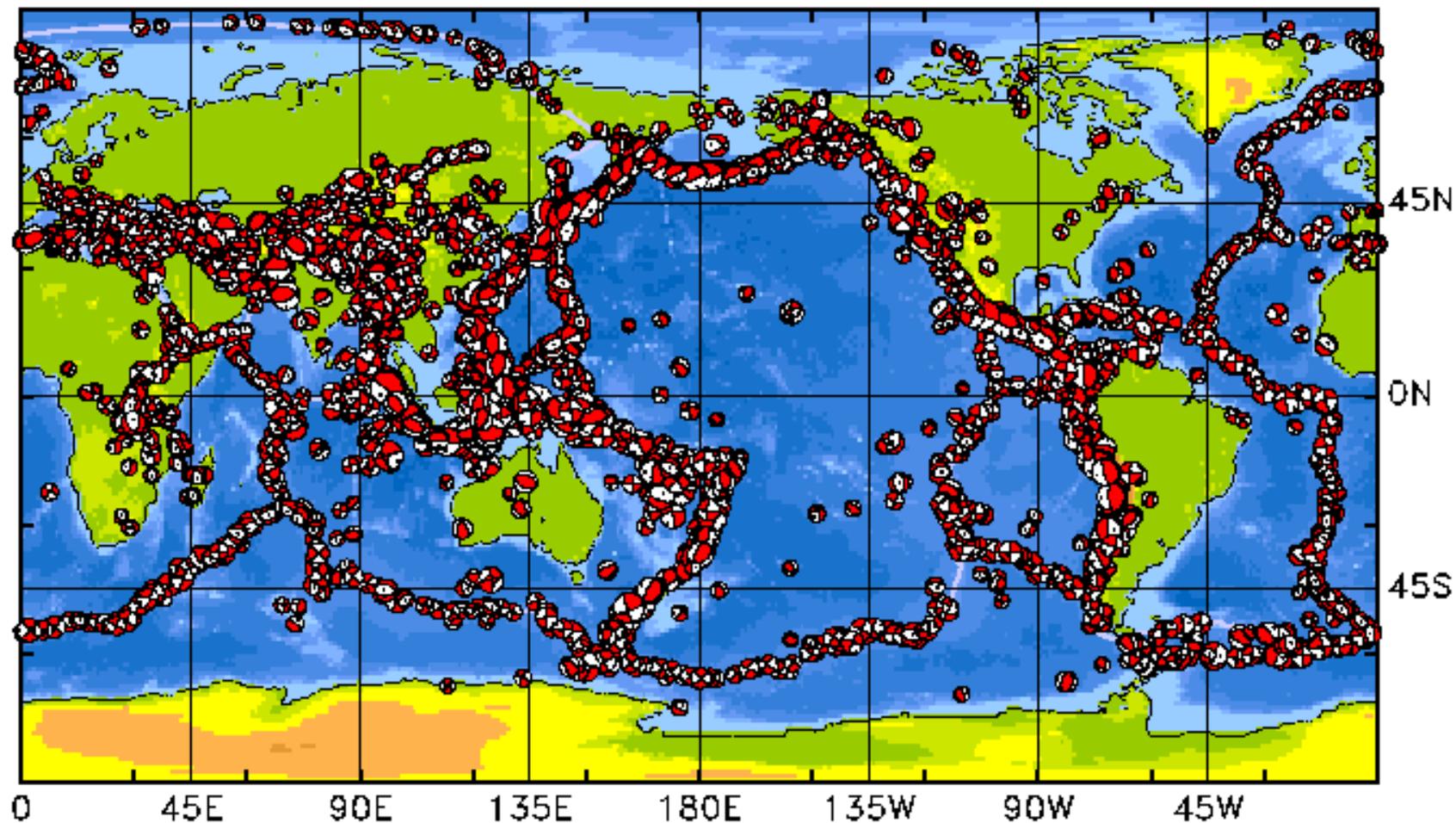
Contact : hibert@unistra.fr

© Drake Olson



Détection et localisation : échelle globale

- Détection et localisation sismologique à l'échelle globale (GCMT) [Ekström, 2006] (volcanisme, ice-quakes, météorite, glissements)
- Identification manuelle : forme d'onde + localisation



Détection et localisation : échelle globale



Confirmation par observations directe (satellitaire, aérienne, terrain) :

Jours/semaines

Détection et localisation : échelle globale



Confirmation par observations directe (satellitaire, aérienne, terrain) :

Jours/semaines

Détection et localisation : échelle globale

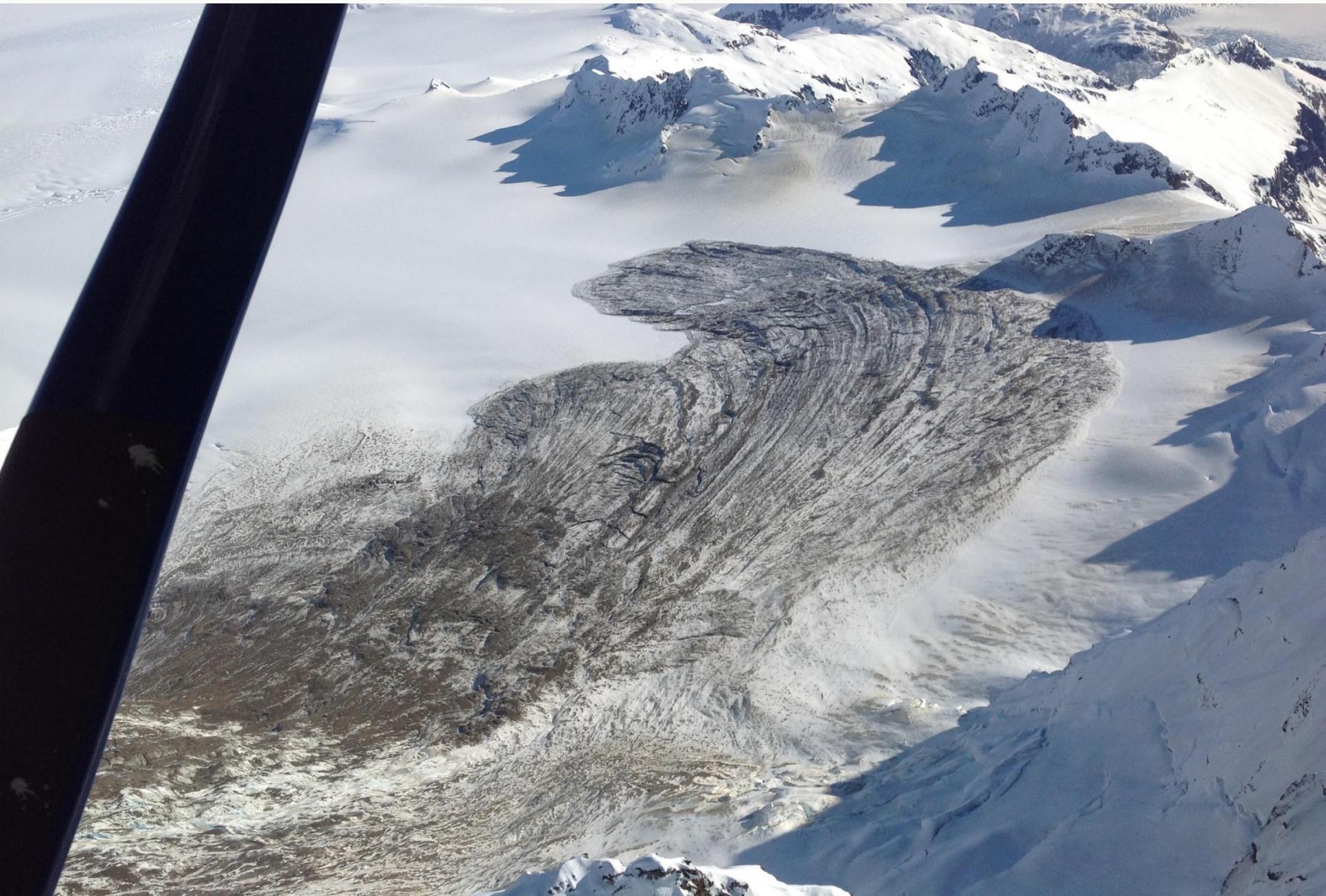
Wrangell
25-07-2013
20 Mt

debris

200 m



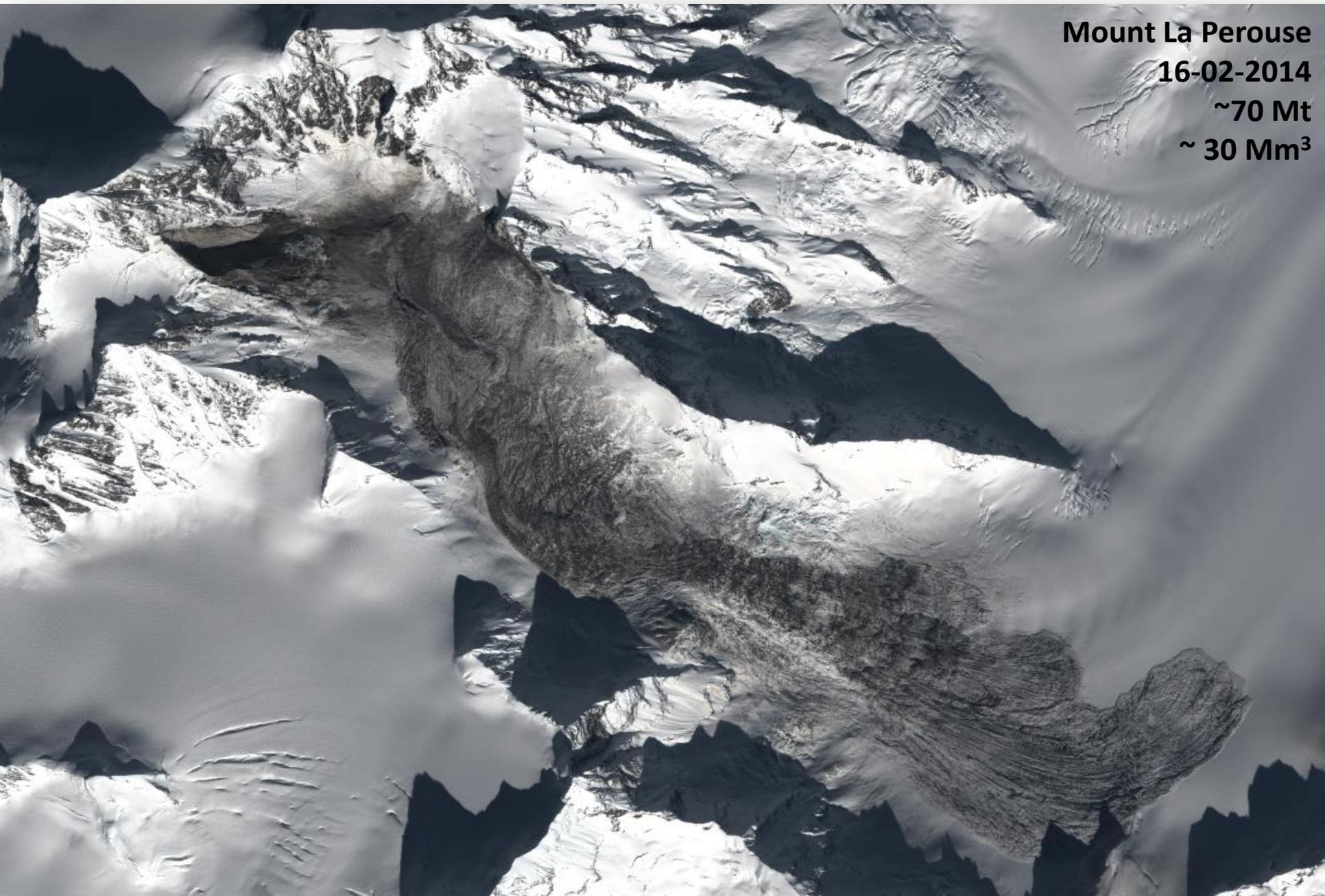
Détection et localisation : échelle globale



Détection et localisation : échelle globale



Détection et localisation : échelle globale



Mount La Perouse

16-02-2014

~70 Mt

~ 30 Mm³

An aerial photograph of a large glacier system, showing various ice flows and meltwater channels. A semi-transparent white box with a black border is centered over the image, containing green text.

**2013—2015 : 5 des 6 plus grands
glissements mondiaux détectés par
méthode sismologique**