



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

brgm

INSTABILITÉS ROCHEUSES DU MAÏDO

Présentation des résultats de l'écoute sismique et de la tomographie par muographie

Clara LEVY et Benoit LE MOIGNE (b.lemoine@brgm.fr)

DÉROULÉ DE LA PRÉSENTATION

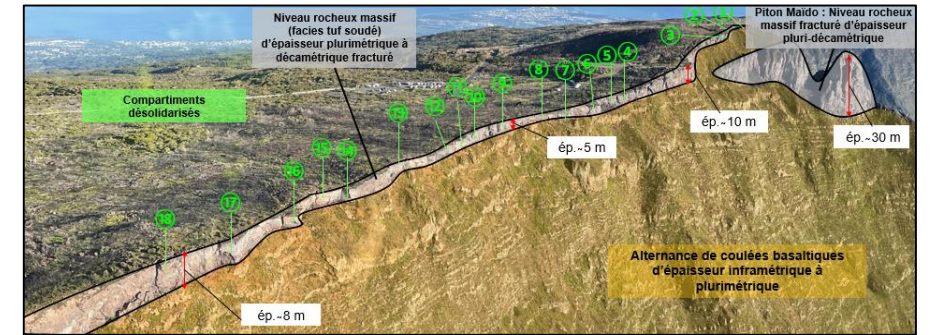


- 1. RAPPEL DES ALÉAS MOUVEMENTS DE TERRAIN SUR LE SITE DU MAÏDO**
- 2. ÉTUDES EN COURS SUR CE SITE**
- 3. L'ÉCOUTE SISMIQUE POUR LE SUIVI D'INSTABILITES ROCHEUSES DU MAÏDO ET PLUS GLOBALEMENT LA CARACTÉRISATION DE L'ALÉA REcul DE REMPART**
- 4. TOMOGRAPHIE DU REMPART PAR MUOGRAPHIE**

1 - CONNAISSANCES SUR LES ALÉAS MOUVEMENTS DE TERRAIN DU SITE DU MAÏDO

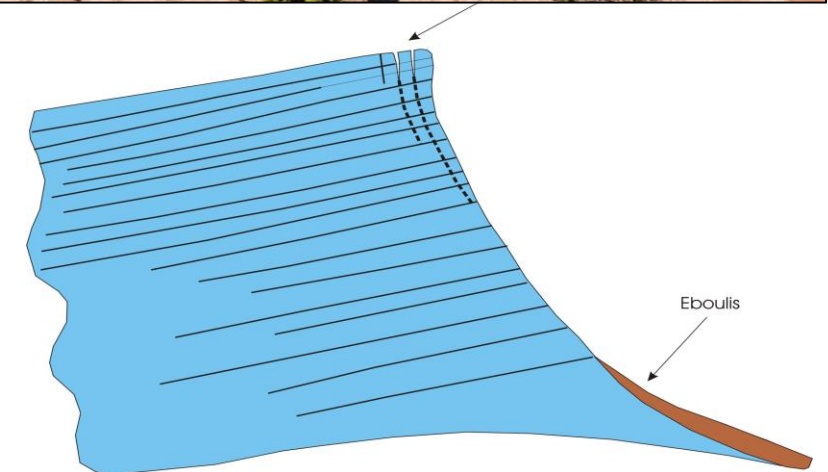
Compartiments désolidarisés en bordure immédiate du rempart

- Fissures à quelques mètres en recul de la crête largement ouvertes
- Affectant principalement un épais (5-10m) niveau massif tête de rempart
- Volumes mobilisables **plusieurs dizaines à centaines de m³**
- Déstabilisation **redoutée à court/très court terme** (années /décennie)
- Déclenchement possible sous l'effet de l'érosion progressive de l'assise scoriacé des compartiments, surcharge d'une ou plusieurs personnes pouvant constituer le facteur déclenchant
- Etude de trajectographie récente

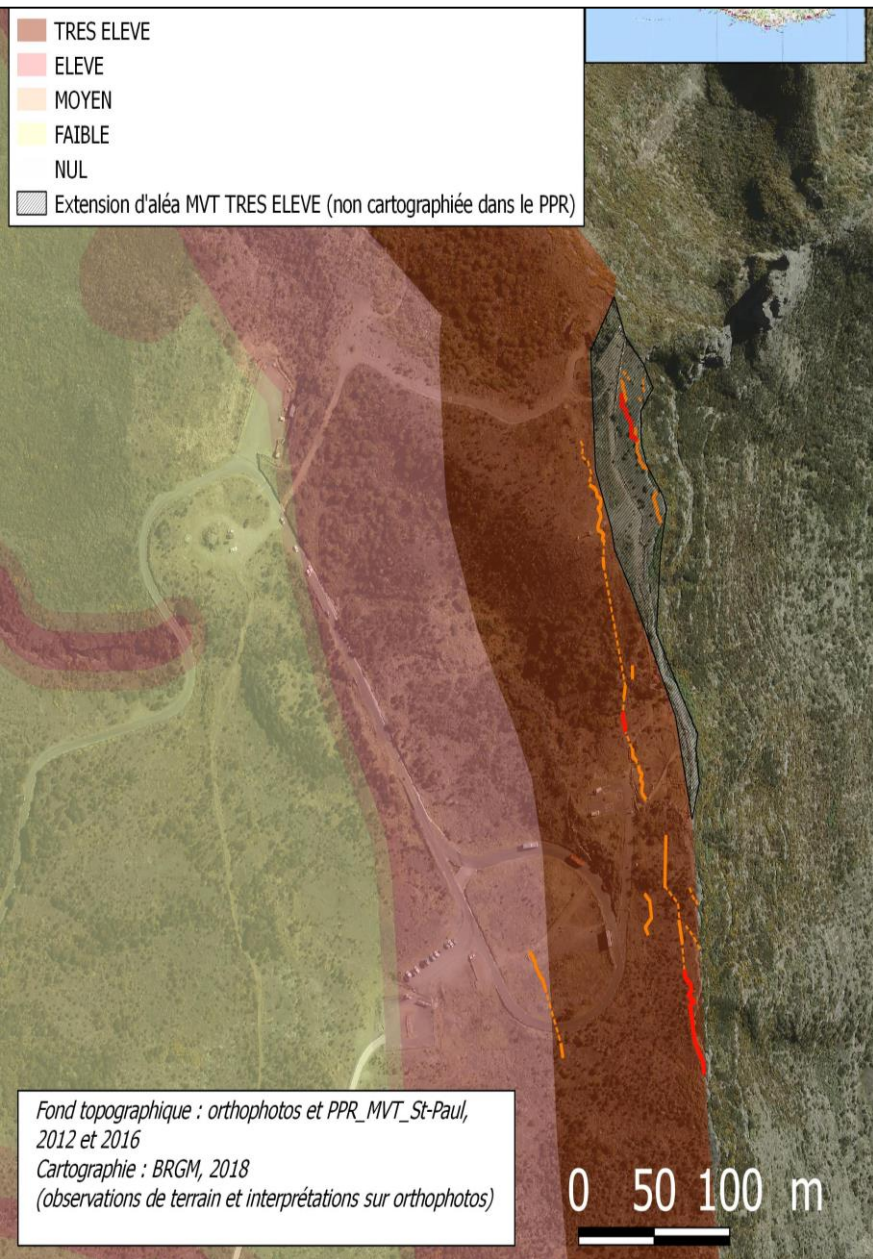


Ecailles découpant le rempart

- Réseau de fissures à plusieurs dizaines de mètres, voire centaine de mètres en recul de la crête
- Volumes mobilisables plusieurs à centaines de **milliers de m³ voire millions de m³**
- Aucune activité historique connue /observée – pas de suivi perenne
- **Occurrence non prévisible** (à l'heure actuelle) – Moyen Long terme (>plusieurs décennies) ?
- Probable mécanisme de rupture : **appel au vide**, extension des fissures en profondeur, jusqu'à la rupture de la base de l'écaille



2 - ETUDES EN COURS SUR LE SITE DU MAÏDO



1 - « Suivi des instabilités rocheuses du Maïdo » en partenariat avec la DEAL (post incendie novembre 2020)

- ✓ Installation d'un **référentiel topographique** multi échelle (capteur, repère géodésique)
- ✓ Précision de l'exposition des enjeux en pied de rempart (trajectographie)
- ✓ Suivi topographique HR du sommet du rempart (Lidar et photogrammétrie) + Calcul des points d'équilibre des compartiments proches de la bordures
- ✓ Tomographie par Muographie

2 - « Etude Remparts » en partenariat avec la DEAL

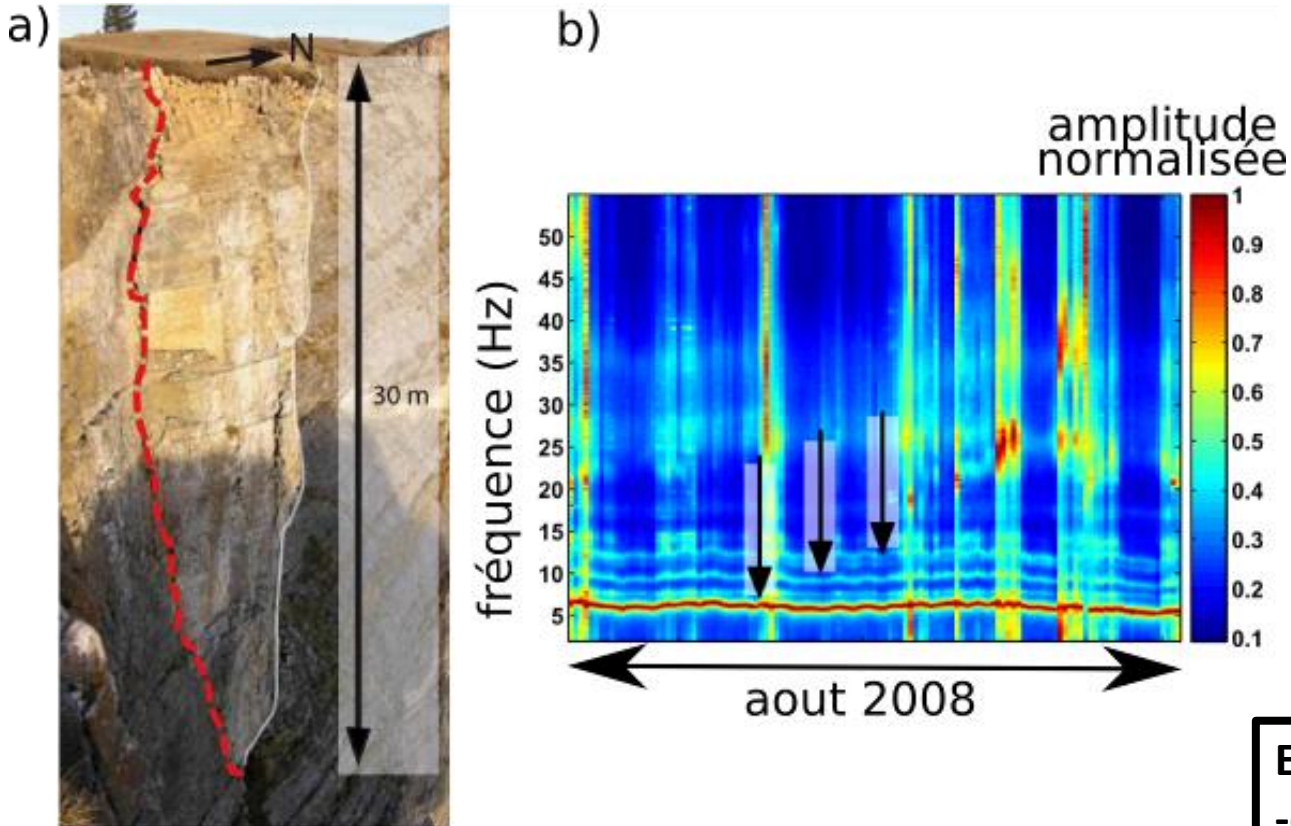
- ✓ **Adaptation de la méthodologie recul de rempart des PPR** en fonction des typologies de remparts
- ✓ **Tester des méthodes de caractérisation locale de cet aléa**
Approches:
 - Analyse de données topo THR
 - Ecoute sismique

2 sites d'expérimentation

- Le Maïdo
- Bras de Pontho (le Tampon)

3- L'ECOUTE SISMIQUE POUR LE SUIVI D'INSTABILITES ROCHEUSES

- **Observation dans le bruit sismique des fréquences de résonance d'écailles instables**



Validé pour des volumes de quelques milliers à quelques centaines de milliers de mètres cubes (Lévy et al., 2011; Burjanek et al., 2012; Bottelin et al., 2013b; Burjanek et al., 2017; Colombero et al., 2018 ; Valentin, 2018)

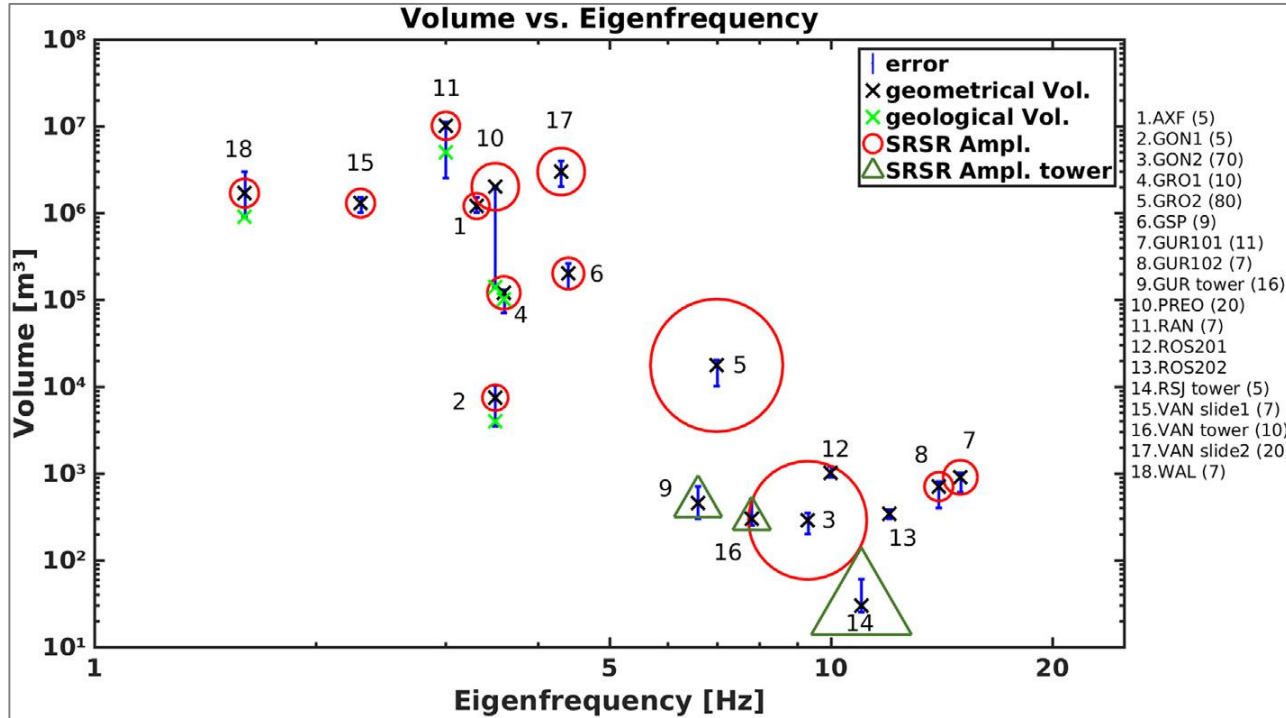
Pics stables dans temps, avec variations selon les conditions thermo-mécaniques (Lévy, 2011 ; Bottelin, 2014 ; Colombero et al., 2018 ; Valentin, 2018)

En particulier:

- observation de la décroissance du 1^{er} pic avant un éboulement (Lévy et al., 2011)
- observation de l'augmentation du 1^{er} pic avec la pose de tirants d'ancrage (Bottelin et al., 2017)

3- L'ECOUTE SISMIQUE POUR LE SUIVI D'INSTABILITES ROCHEUSES

- **Pas de relation universelle f_0 – volume** (en particulier pour les écaïlles rocheuses) *Kleinbord et al. (2019)*



Deux écaïlles de volumes différents, toutes choses comparables par ailleurs (=dans un même état d'instabilité, un mécanisme de rupture quasi identique et constituées de matériaux similaires)

- si $Vol_1 > Vol_2$
- alors $f_{0_1} < f_{0_2}$

Deux écaïlles dans un état de détachement différent, toutes choses comparables par ailleurs

- si état_1 plus instable que état_2
- alors $f_{0_1} < f_{0_2}$

Et dans ce cas l'amplitude de f_{0_1} est plus grande que f_{0_2} (et l'amortissement est moins grand)

La détermination de F_0 est ici un enjeu important, car couplée à une estimation des volumes des compartiments elle permet d'approcher ou de comparer le degré de désolidarisation entre blocs

3- L'ECOUTE SISMIQUE POUR LE SUIVI D'INSTABILITES ROCHEUSES

- **1 campagne longue durée (près de 2 ans) au Maïdo**

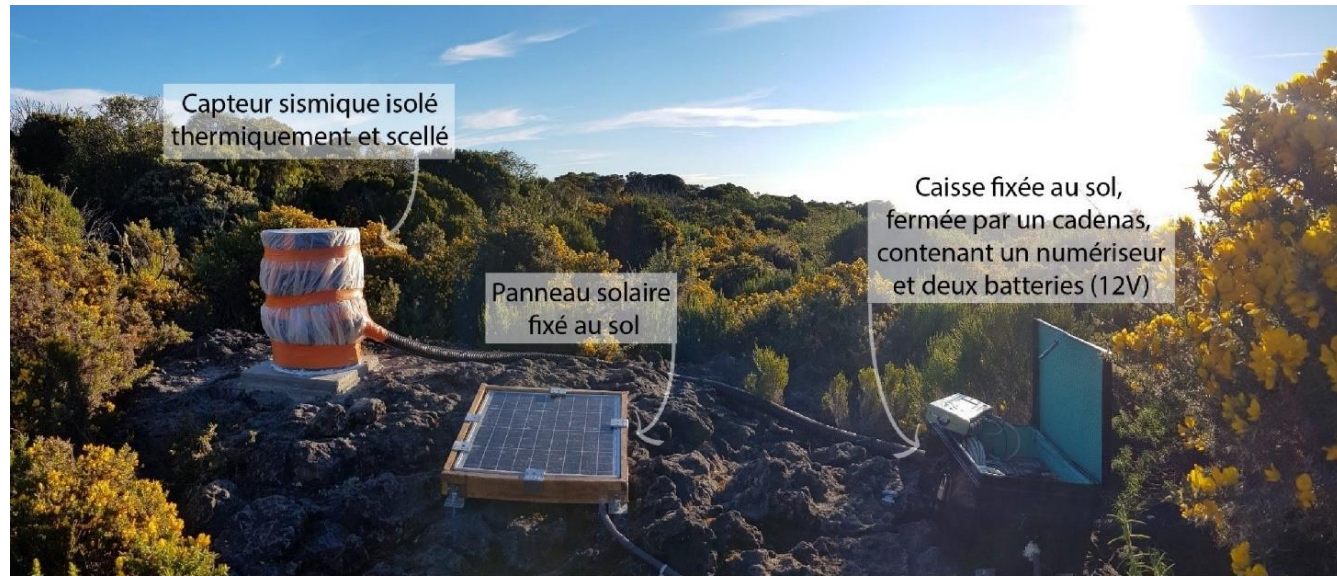
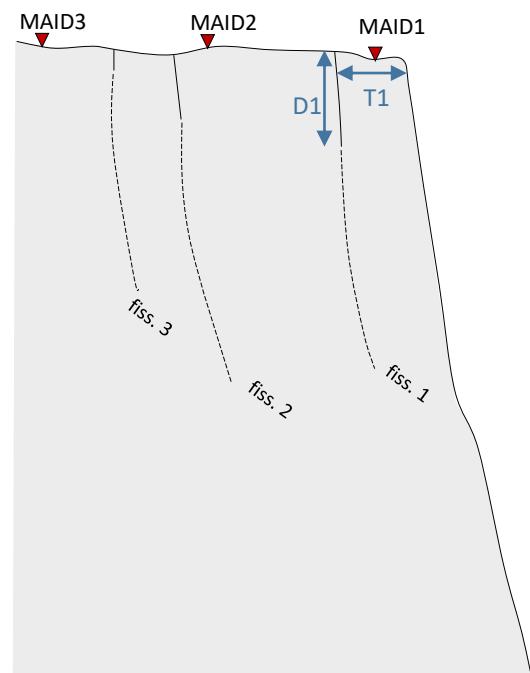
- Un potentiel compartiment instable de volume de plusieurs milliers de m³
- Objectif : identifier les facteurs influençant l'évolution de ses fréquences de résonance

- **2 campagnes de mesures courte durée**

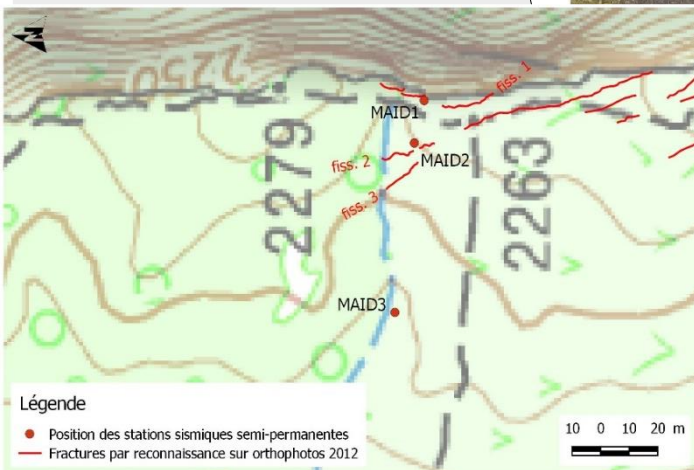
- Enregistrement du bruit sismique selon un maillage spatial dense pendant plusieurs heures.
- Objectif : Délimiter les zones de comportement homogène en fréquence et évaluer leur degré d'instabilité
- 2 sites d'expérimentation :
 - ✓ Maïdo (zone des Belvédères)
 - ✓ Bras de Pontho au Tampon

3- L'ECOUTE SISMIQUE POUR LE SUIVI D'INSTABILITES ROCHEUSES

- **Campagne longue durée : Le dispositif**



- De Avril 2019 à Novembre 2020 au Maïdo
- 3 sismomètres STS-2 à 3 composantes
- Large bande : entre 120 s et 45 Hz
- bande de fréquence utile pour laquelle on observe habituellement des fréquences de résonance de blocs instables (1 à 10 Hz)

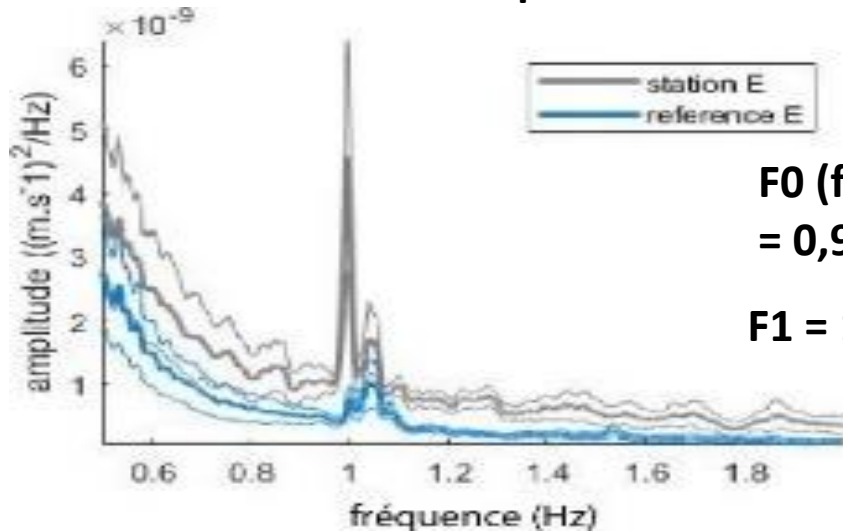


3- L'ECOUTE SISMIQUE POUR LE SUIVI D'INSTABILITES ROCHEUSES

● Campagne longue durée : Résultats

- Traitements : Filtres des données (butterworth d'ordre 4, rapport signal/bruit>3, fenêtre de bruit 90 s avec recouvrement de 50%) et calcul des spectres de fréquence (FFT; lissage) > Temps de traitements longs

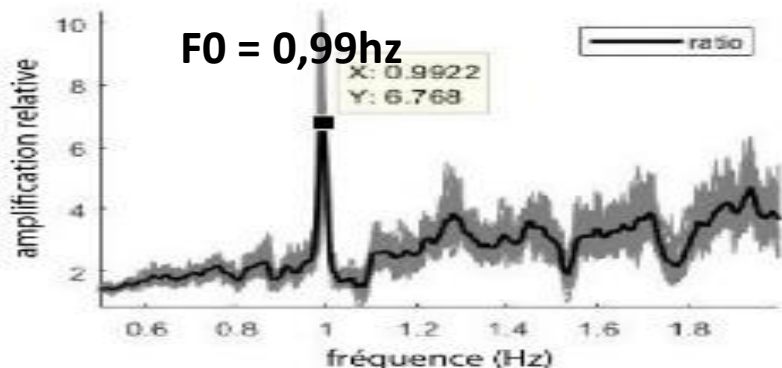
Station MAID 1 composante Est



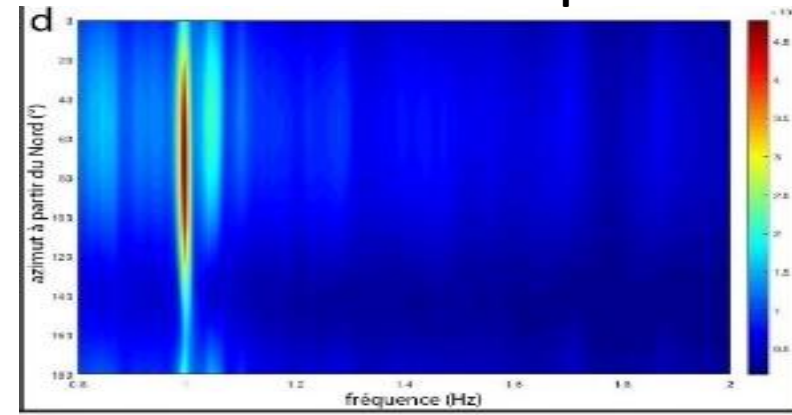
F0 (fondamentale)
= 0,99hz

F1 = 1,04hz

Amplification relative des vibrations de la composante Est MAID1 vs. MAID3 (référence)



Distribution des pics de résonances en fonction des azimuts et des fréquences

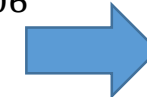


Pic de résonance le plus énergétique dans la direction N70 (perpendiculaire à la fissure arrière du compartiment N160)

Valentin et al. (2017)

$$(1) A_{H/V} = 5,436 * \left(\frac{T_1}{D_1}\right)^{-0,906}$$

$$(2) A_{H/Href} = 13,49 * \left(\frac{T_1}{D_1}\right)^{-0,658}$$



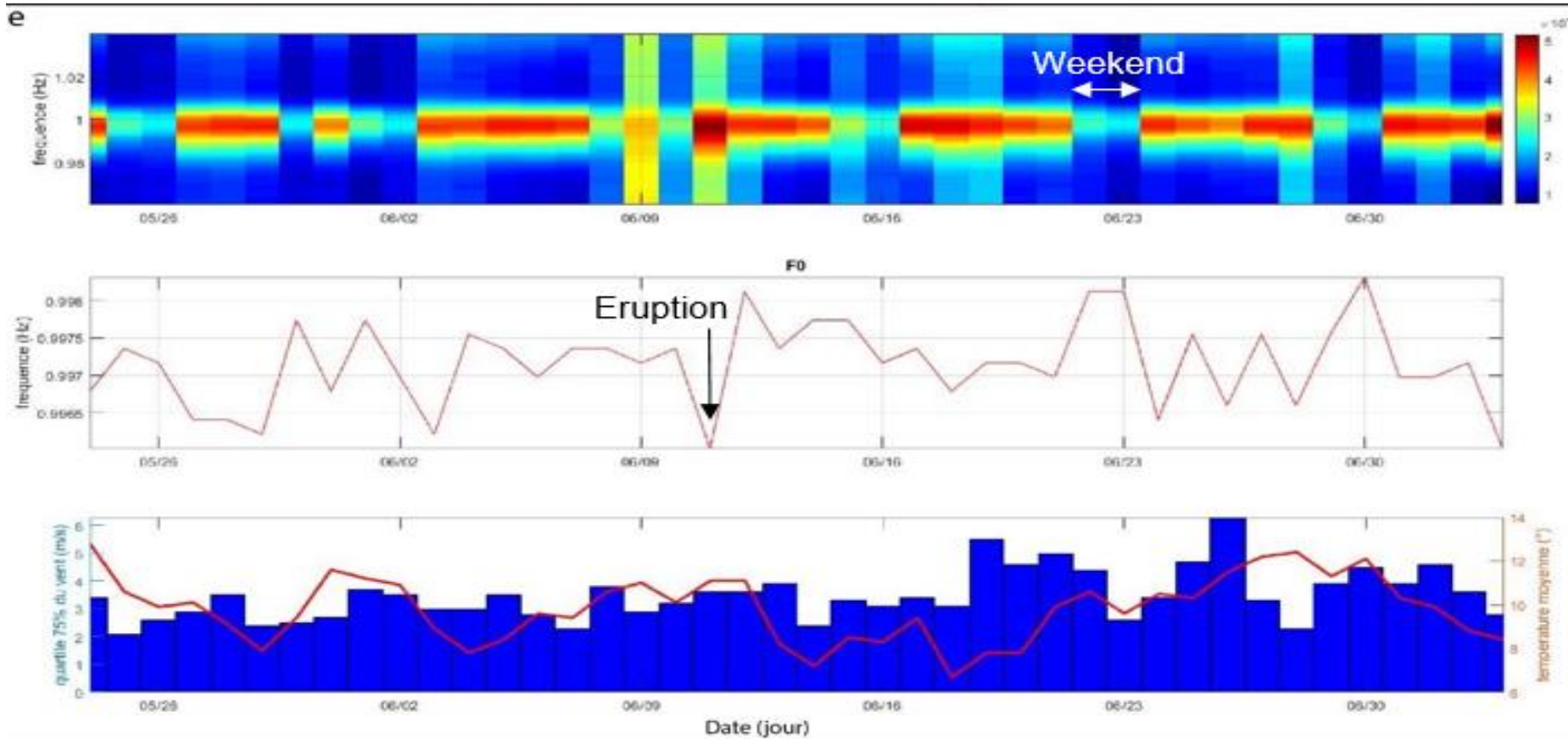
Sur MAID1
Profondeur de la
fissure arrière : 12,2 m

3- L'ECOUTE SISMIQUE POUR LE SUIVI D'INSTABILITES ROCHEUSES

- **Campagne longue durée : *Effet des conditions environnementales sur la fréquence de résonance***

23 mai
2019

3 juillet
2019



Influence conjuguée de la température et du vent à étudier plus en détail

Possible influence de la sismicité induite par les éruptions à étudier plus en détail

3- L'ECOUTE SISMIQUE POUR LE SUIVI D'INSTABILITES ROCHEUSES

- **Campagne courte durée : le dispositif**



- 2 campagnes de 3 jours en aout 2021 au Maïdo et au Bras de Pontho
- Mesures de nuit au Bras de Pontho
- Réseau de capteurs sismique large-bande 3 composantes (CMG 6TD) entre 0,33 Hz et 40 Hz
- Capteurs au nord géographique position mesurée au dGPS
- Un capteur de référence en partie stable pour normaliser les amplitudes de vibration enregistrées
- Enregistrements simultanés par une 10-12 capteurs sur 2 à 4 heures
- Touts les capteurs sont installés si possible au rocher ou sur une dalle béton (meilleur couplage avec le sol)



Matériel scientifique fragile, merci de ne pas toucher

MESURES EN COURS

Station de mesures sismiques pour l'observation et la caractérisation des mouvements de terrain des remparts de la Réunion

Campagne de mesures du 02/08/21 au 13/08/21



BROM - SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL
Direction régionale de La Réunion
5, rue Sainte Anne - CS51016
97404 Saint-Denis Cedex
La Réunion
Contact: +262 262 21 22 14



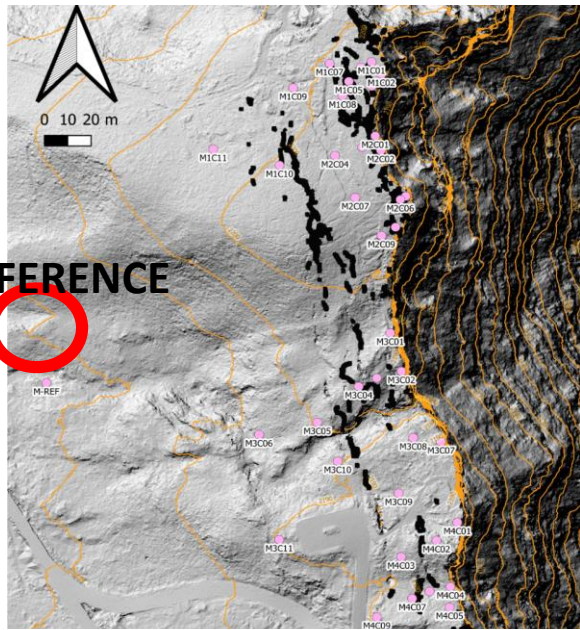
AVERTISSEMENT: La destruction, la dégradation ou la détérioration de ce matériel d'utilité publique est punie de 3 ans d'emprisonnement et 45 000 euros d'amende.
(Art. R-332-1 et 322-2 de code pénal)



3- L'ECOUTE SISMIQUE POUR LE SUIVI D'INSTABILITES ROCHEUSES

- Objectif: identifier des compartiments potentiellement instables

Maïdo



Temps de mesure 2h

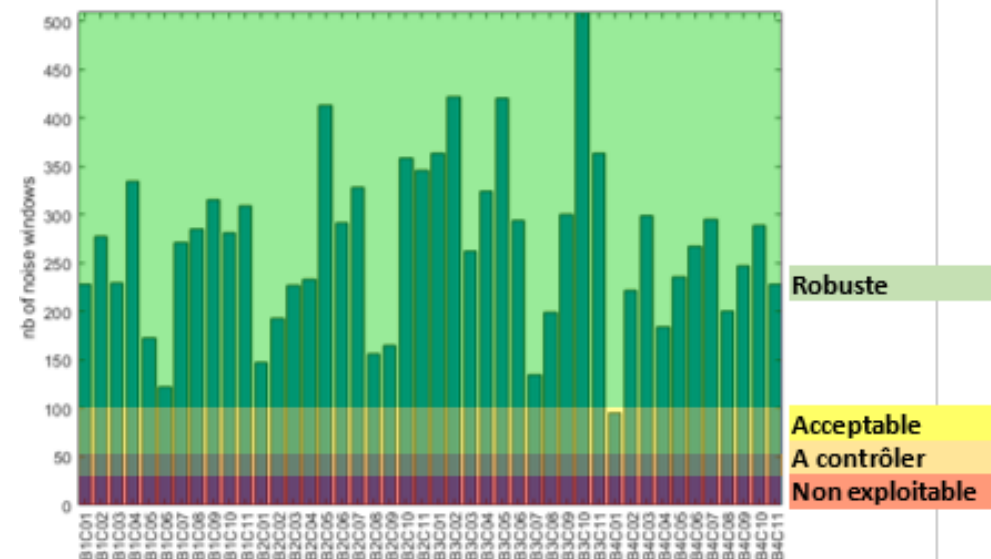
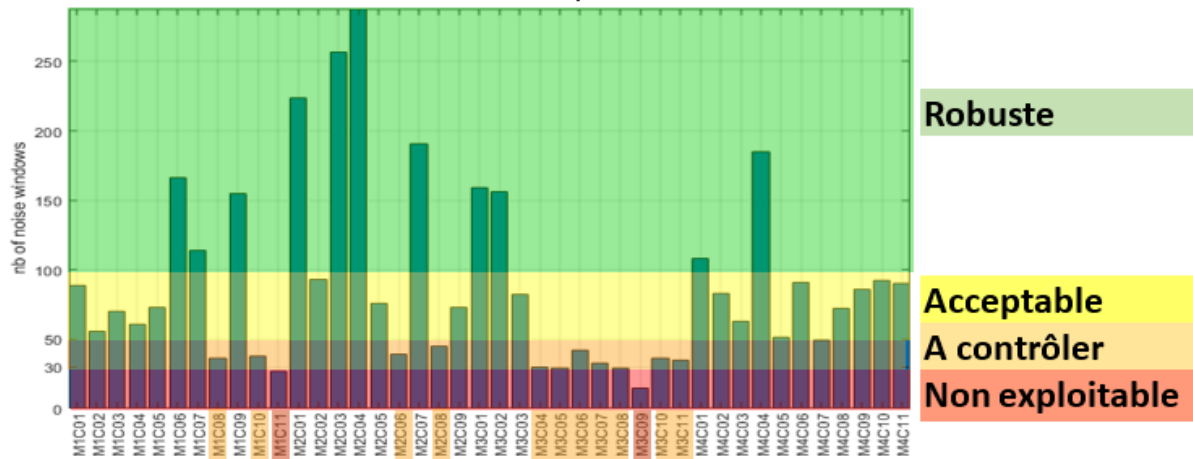
temps de mesure : 4h de nuit

40 à 42 stations de mesures
+ 1 référence

Bras de Pontho (le Tampon)



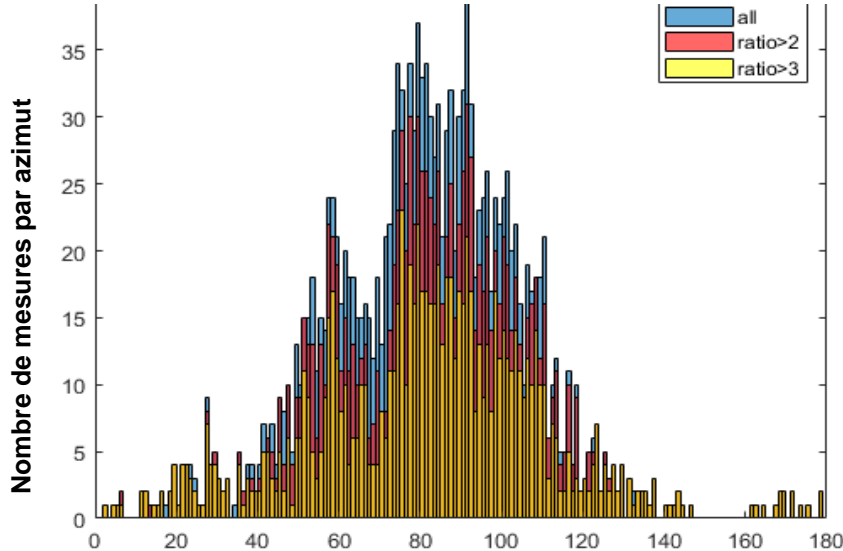
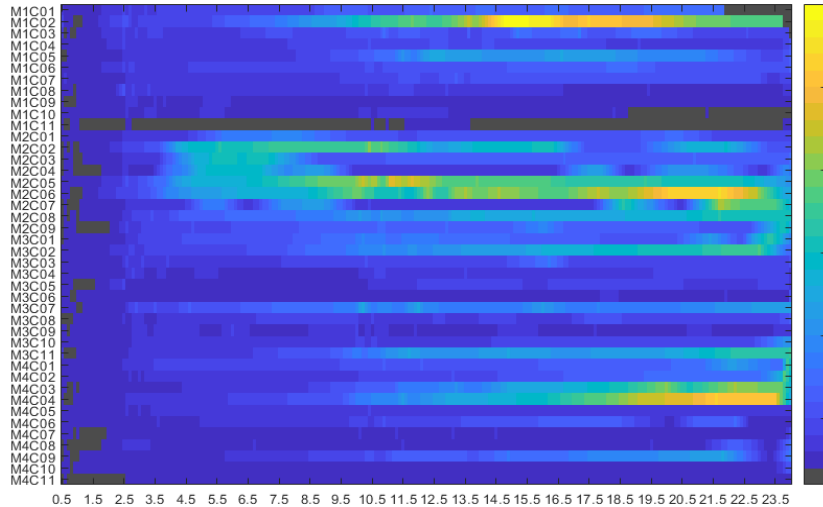
Nb fenêtres de bruit simultanément au capteur et à la référence



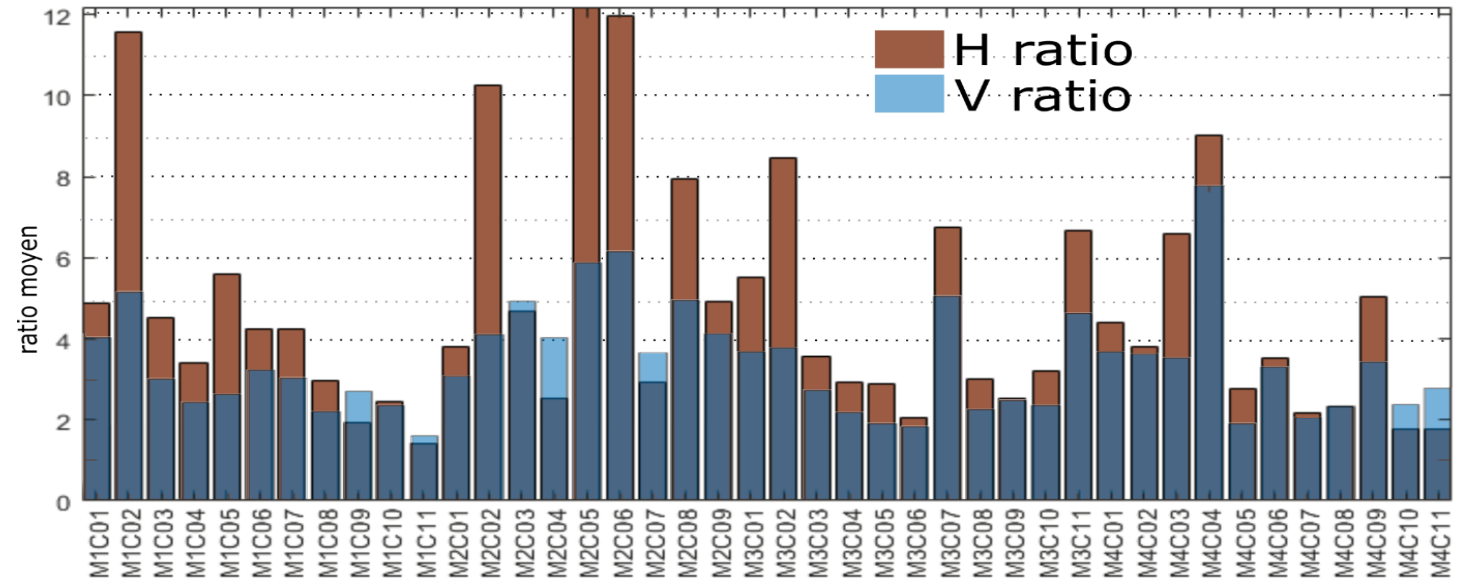
3- L'ECOUTE SISMIQUE POUR LE SUIVI D'INSTABILITES ROCHEUSES

• Les résultats au Maido

NB: bleu → 0,5 Hz, jaune → 24 Hz



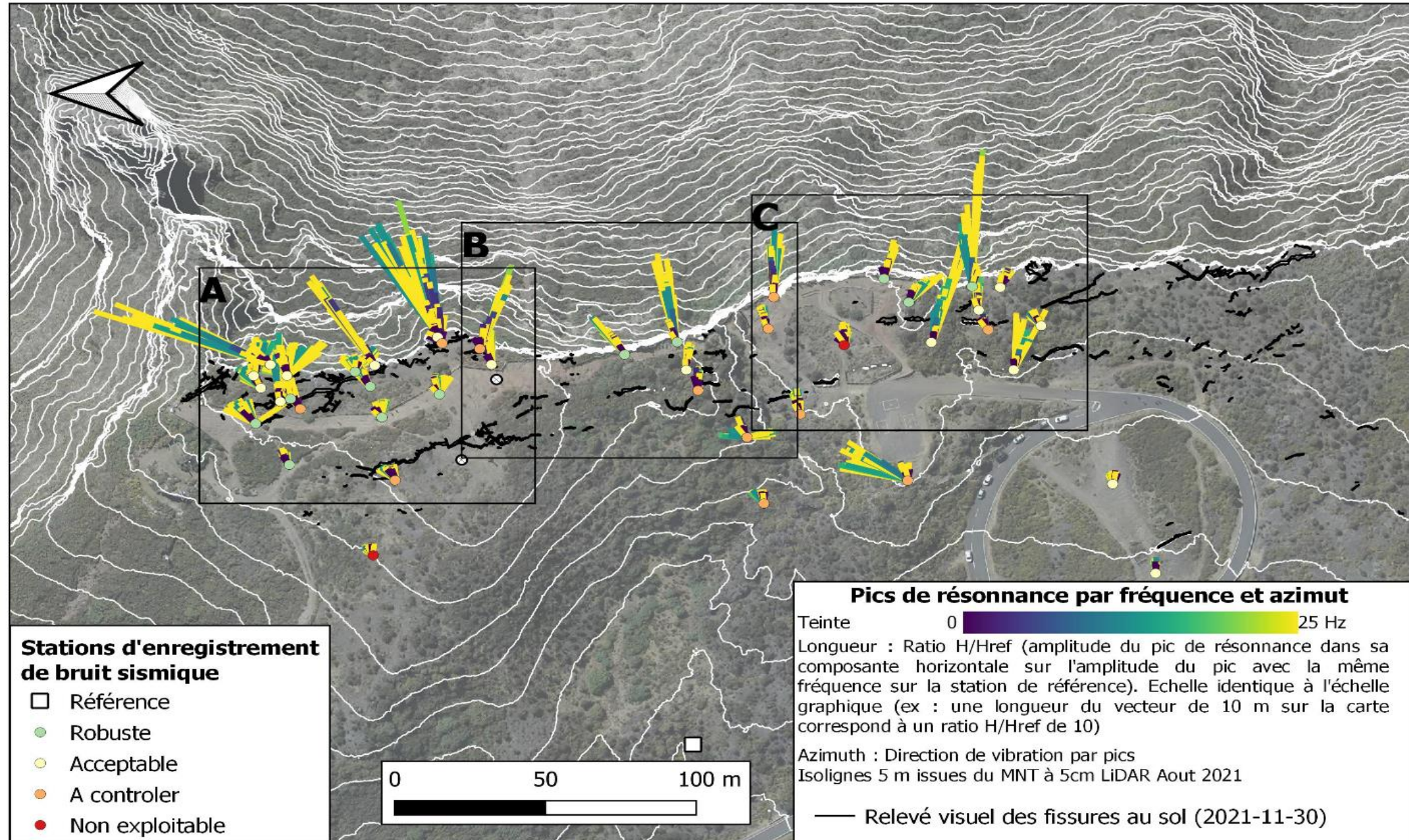
Azimut de vibration préférentiel par bande de fréquence de 0,1 Hz (en degrés par rapport au Nord géographique, dans le sens des aiguilles d'une montre).



- **Très très nombreux pics observés!**
- **Quelques points en bord de rempart avec des amplifications remarquables (max ratio = 30)**
- **Amplification max entre 10 et 24 Hz**
- **Globalement, orientation des vibrations les plus remarquables dans la direction perpendiculaire au rempart (compatible hypothèse vibration compartiment instable découpé par fracture arrière sub-v verticale)**

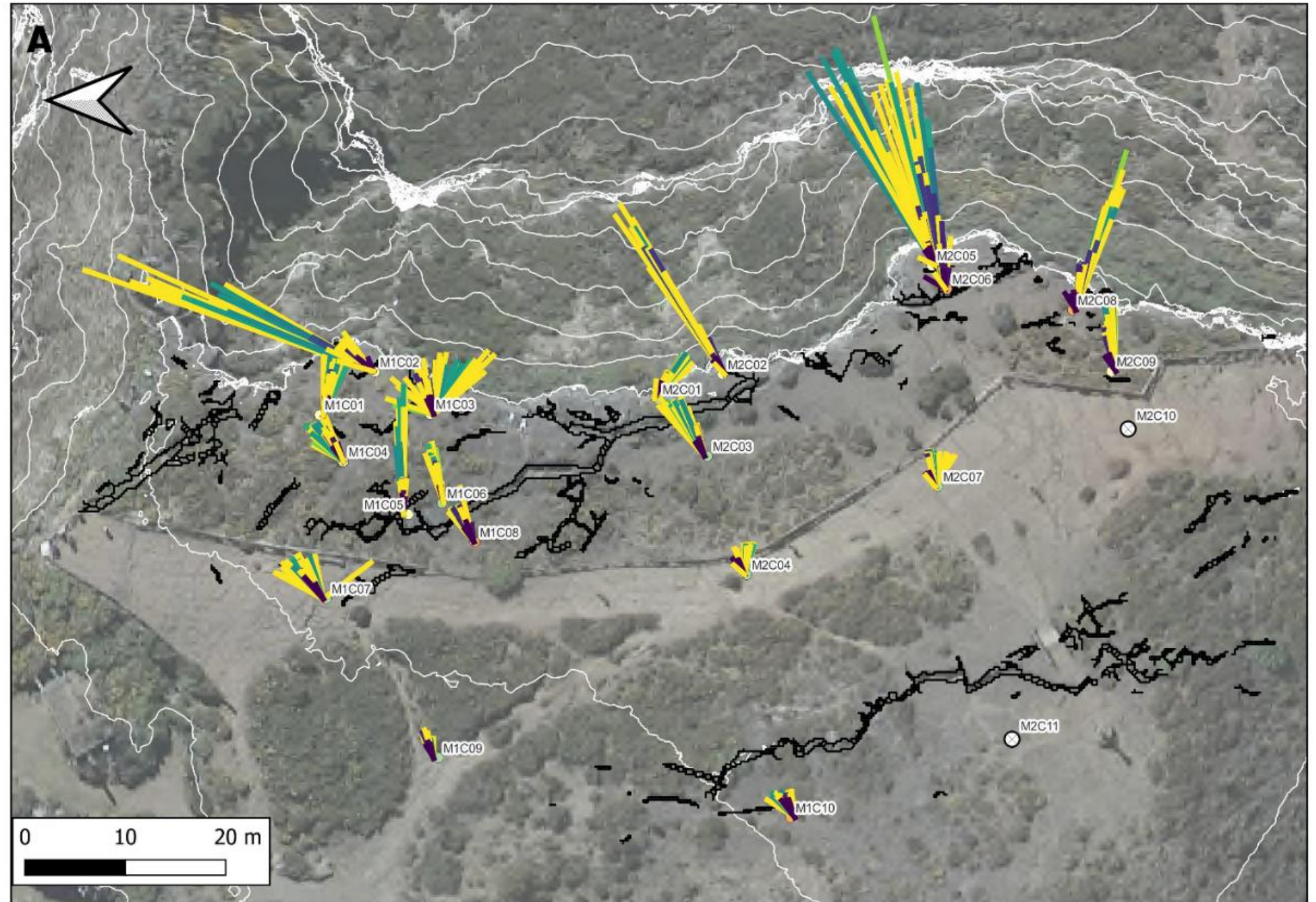
3- L'ECOUTE SISMIQUE POUR LE SUIVI D'INSTABILITES ROCHEUSES

- Les résultats au Maïdo

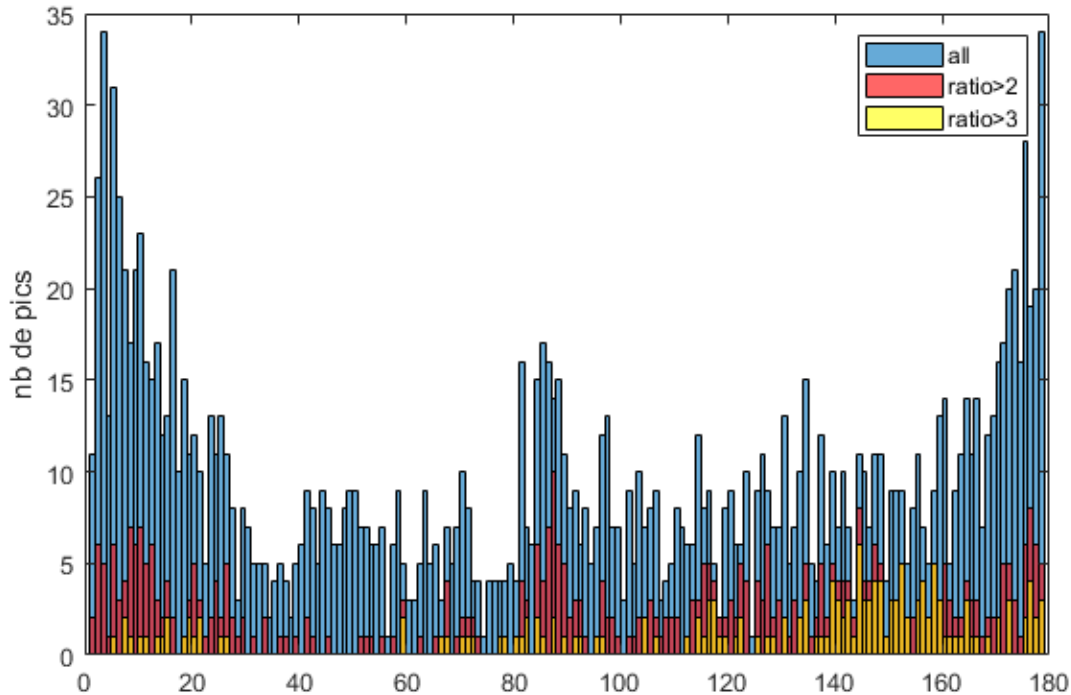
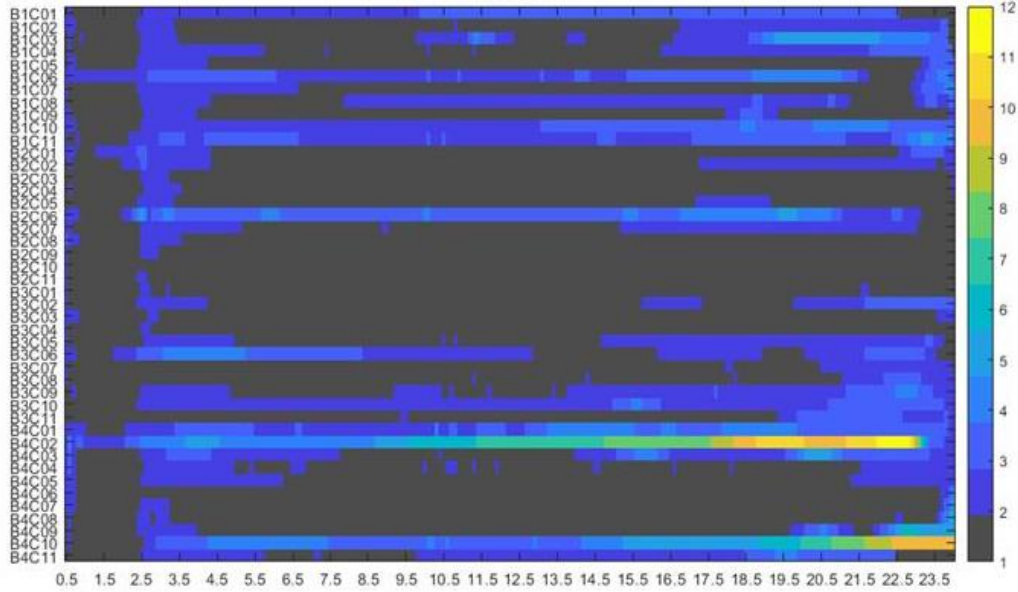


L'ECOUTE SISMIQUE AU MAÏDO

- Les résultats au Maïdo

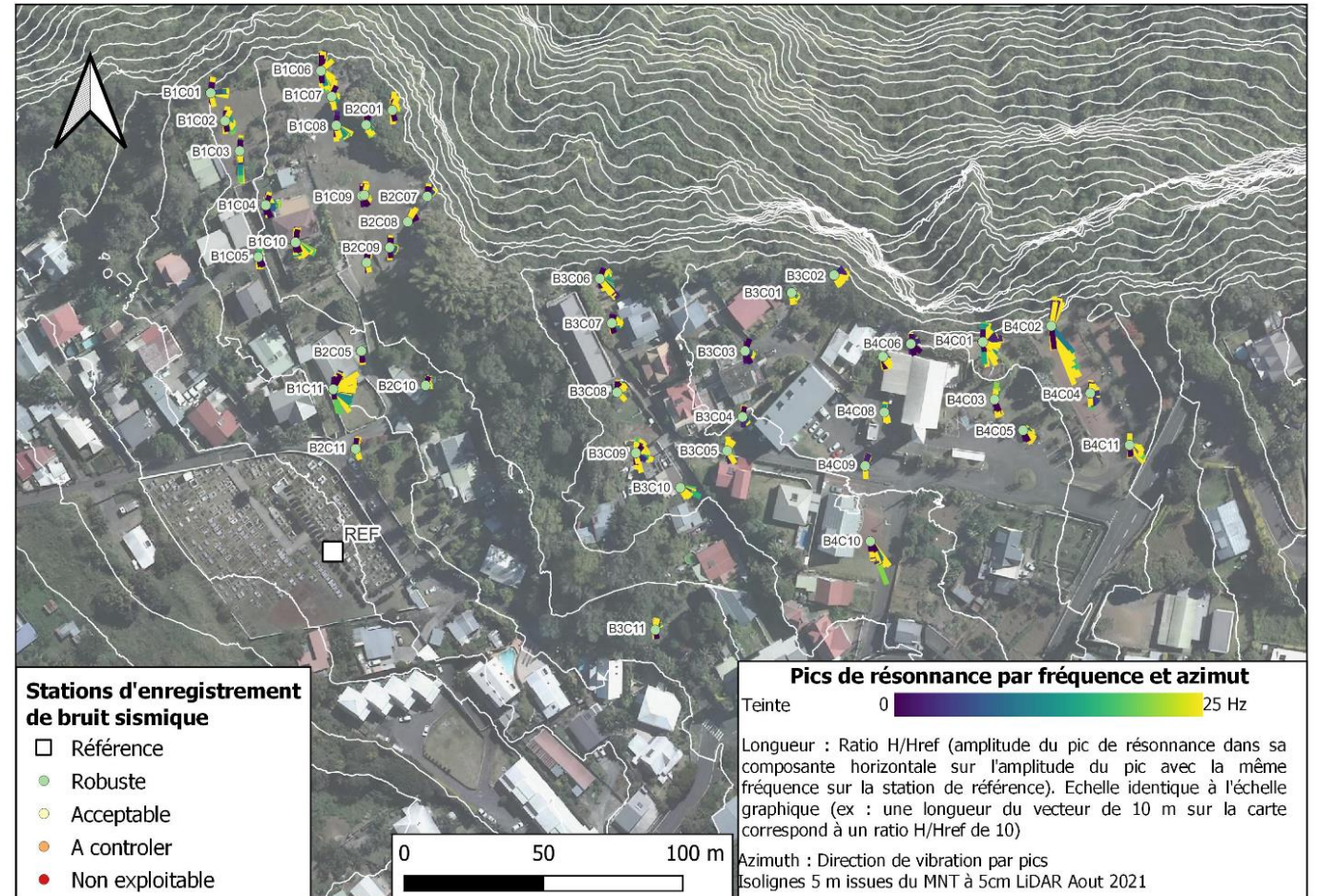


L'ECOUTE SISMIQUE AU MAIDO



Les résultats au Bras de Pontho

- Peu de pics observés
- Amplifications max : 12
- Amplification max entre 17 et 24 Hz
- Globalement, orientation perpendiculaire au rempart (N5)



L'ECOUTE SISMIQUE AU MAIDO

- Cartographie du degré de désolidarisation

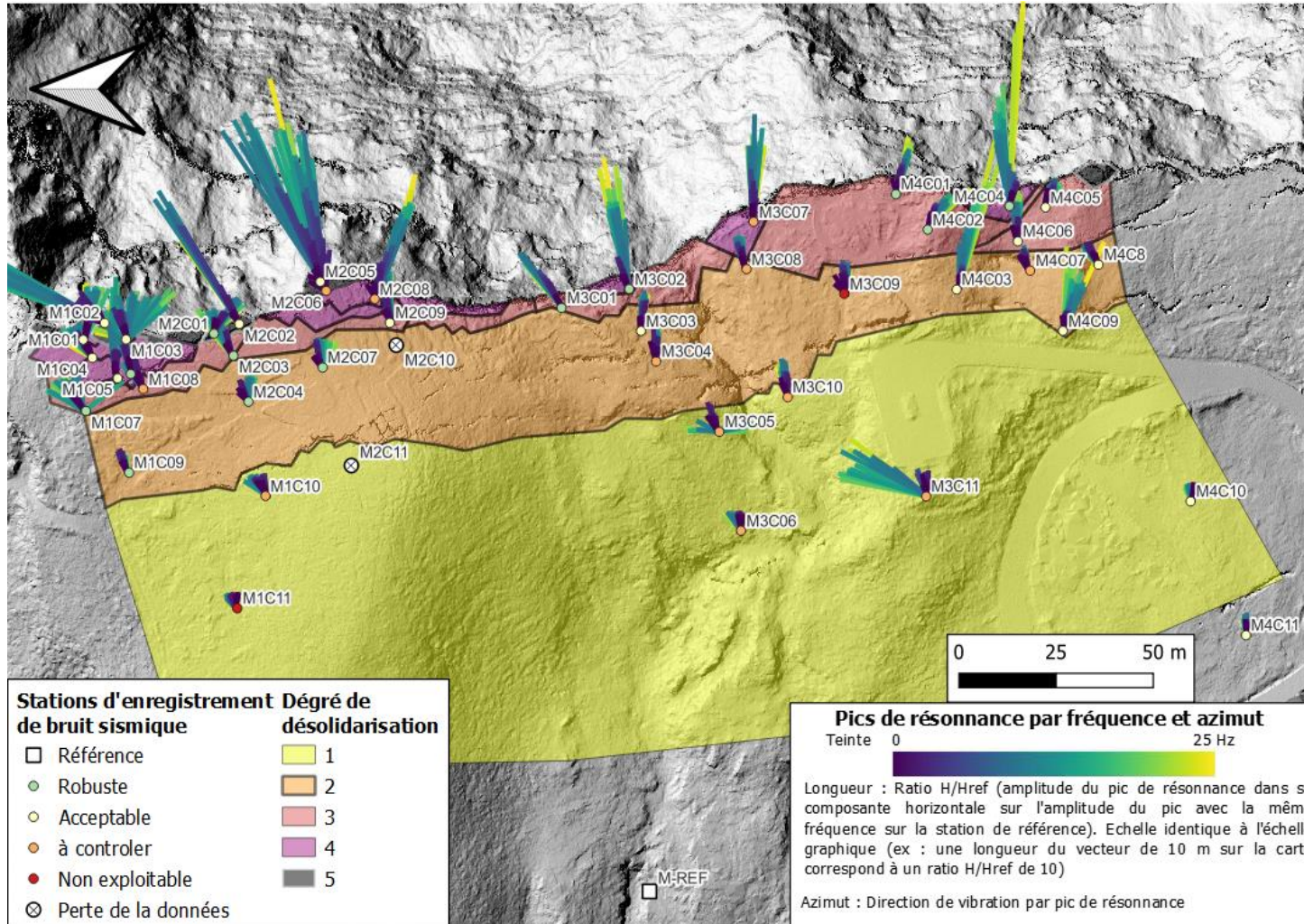
Etapes

1 Indices ou historique

2 Estimation du volume des compartiments

3 Analyse des signaux d'écoute sismique

4 Hiérarchisation du degré de désolidarisation

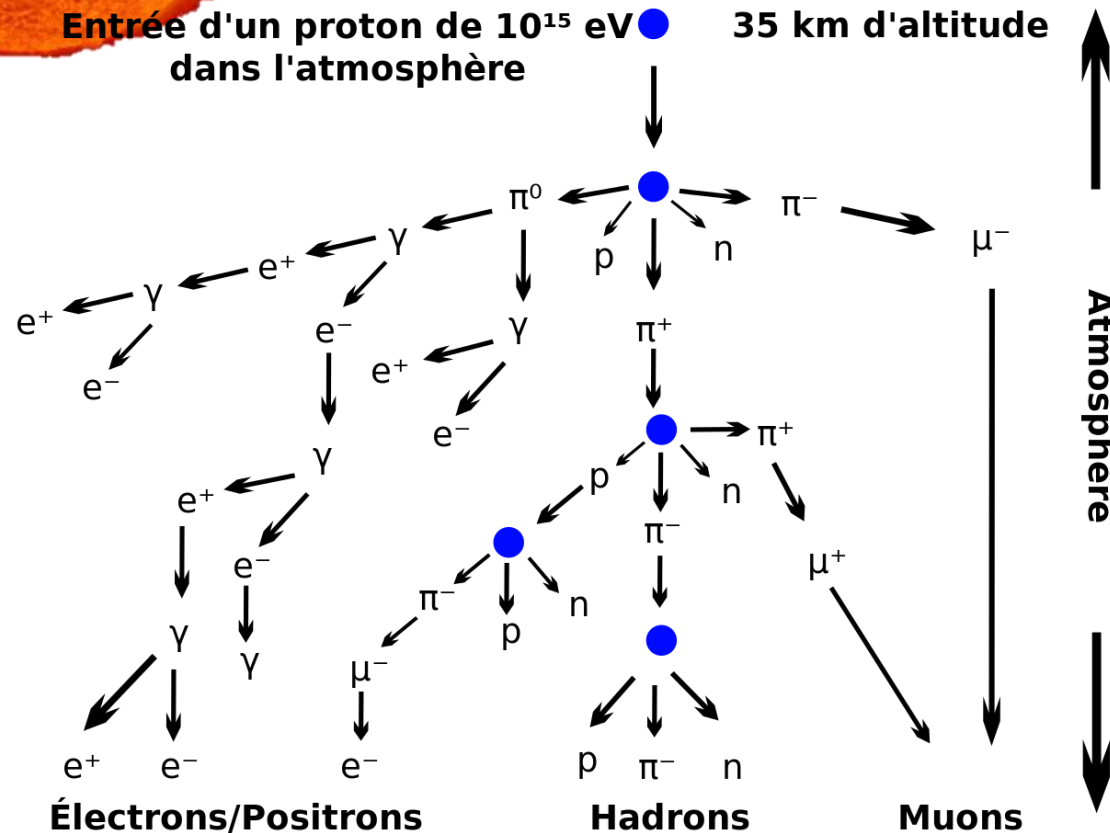


La répartition spatiale des pics communs à plusieurs capteurs est analysés

Si cohérence des amplitudes et des directions de déplacement: l'interprétation des données est en faveur de l'hypothèse selon laquelle les capteurs sont sur une même unité (=bloc)

Tomographie par muographie du rempart du Maïdo : Premiers résultats

Principe

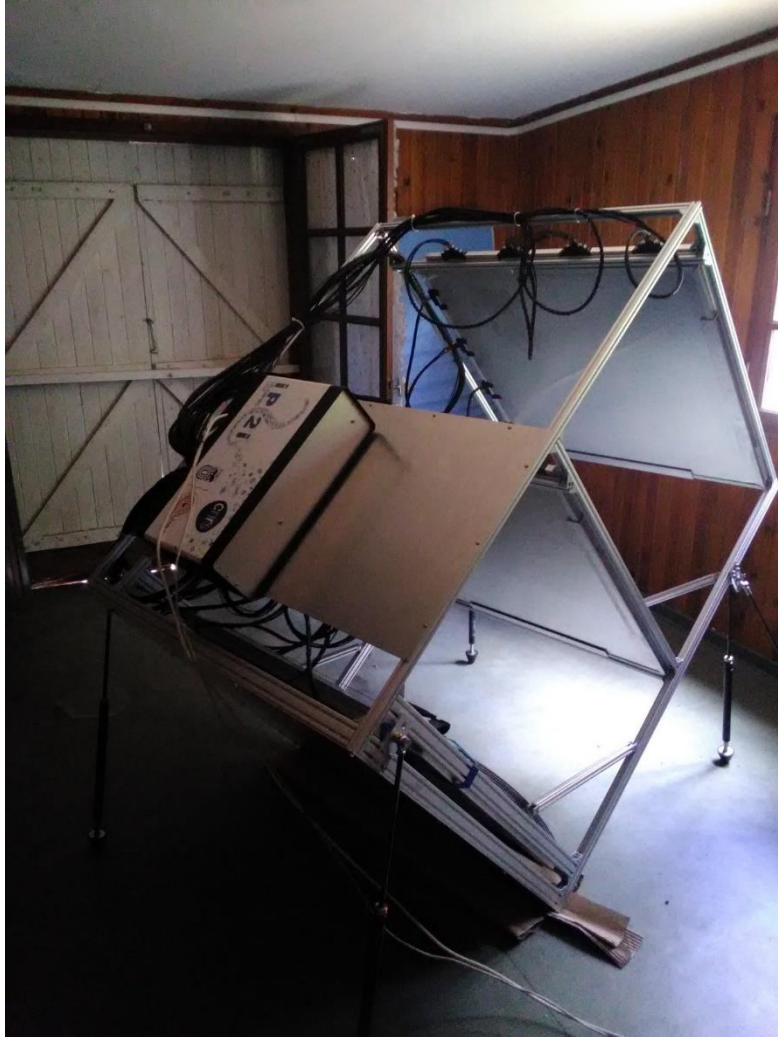


Arrivée au sol de quelques 10^{16} particules :
80% γ ; 18% e^-/e^+ ; 1,7 % muons ; 0,3% hadrons

- **Muons** : particule cosmique créée dans la haute atmosphère
- Particules **capables de traverser beaucoup de matière** avant d'être absorbés (quelques centaines de mètres de roches)
- **Flux de muons relativement faible** en surface (environ 150 muons/m²/min) > temps de mesure long pour obtenir une image détaillée

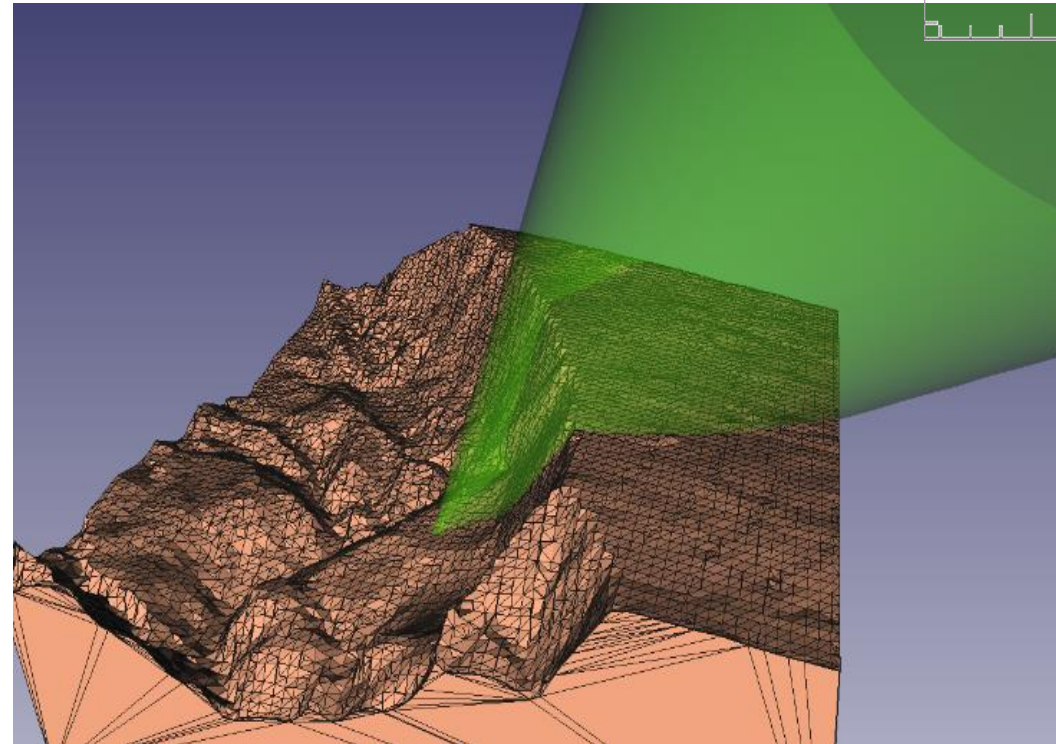
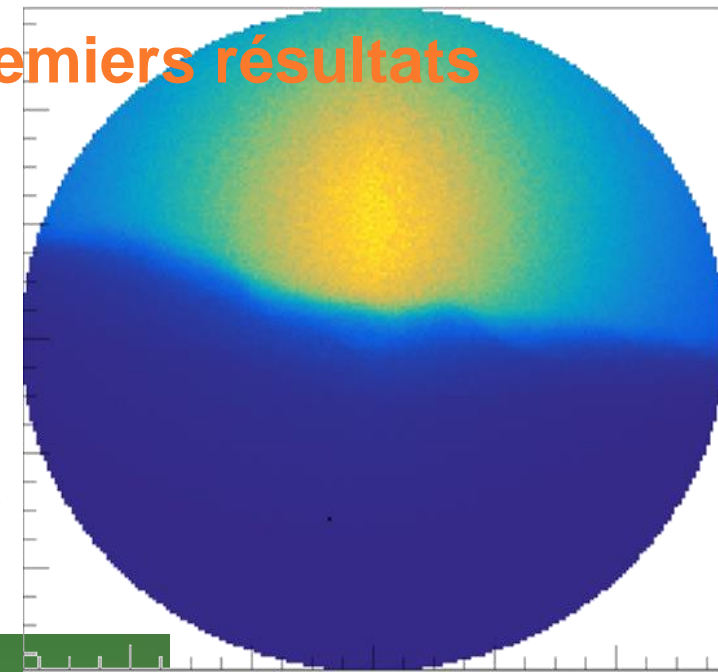
Tomographie par muographie du rempart du Maito : Premiers résultats

Installation d'un télescope à Muons de décembre 2021 à novembre 2022 au pied du rempart du Maito



Objectifs :

- Sonder la répartition de densité du rempart pour évaluer l'enracinement des fissures de décompression
- Si possible étudier les variations temporelles du flux de muons en lien avec les paramètres environnementaux (pluviométrie, piézométrie notamment)

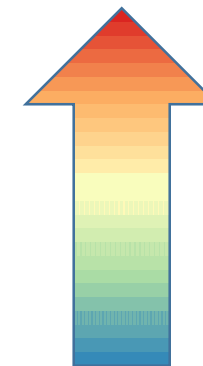
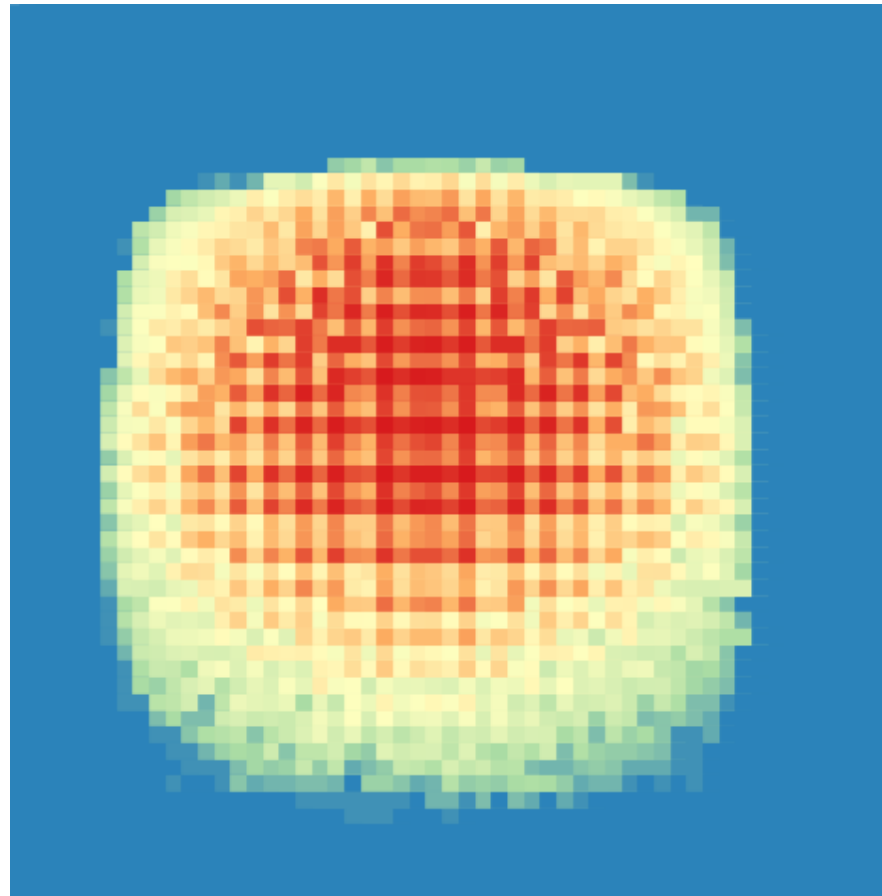


Tomographie par muographie du rempart du Maïdo : Premiers résultats

Etapes du traitement

1. Calibration du télescope

- Visée avec une direction azimutale à 180° (à l'opposé du rempart) avec la même inclinaison
- Maximum d'acceptance au centre de la visée



Nombre de
muons

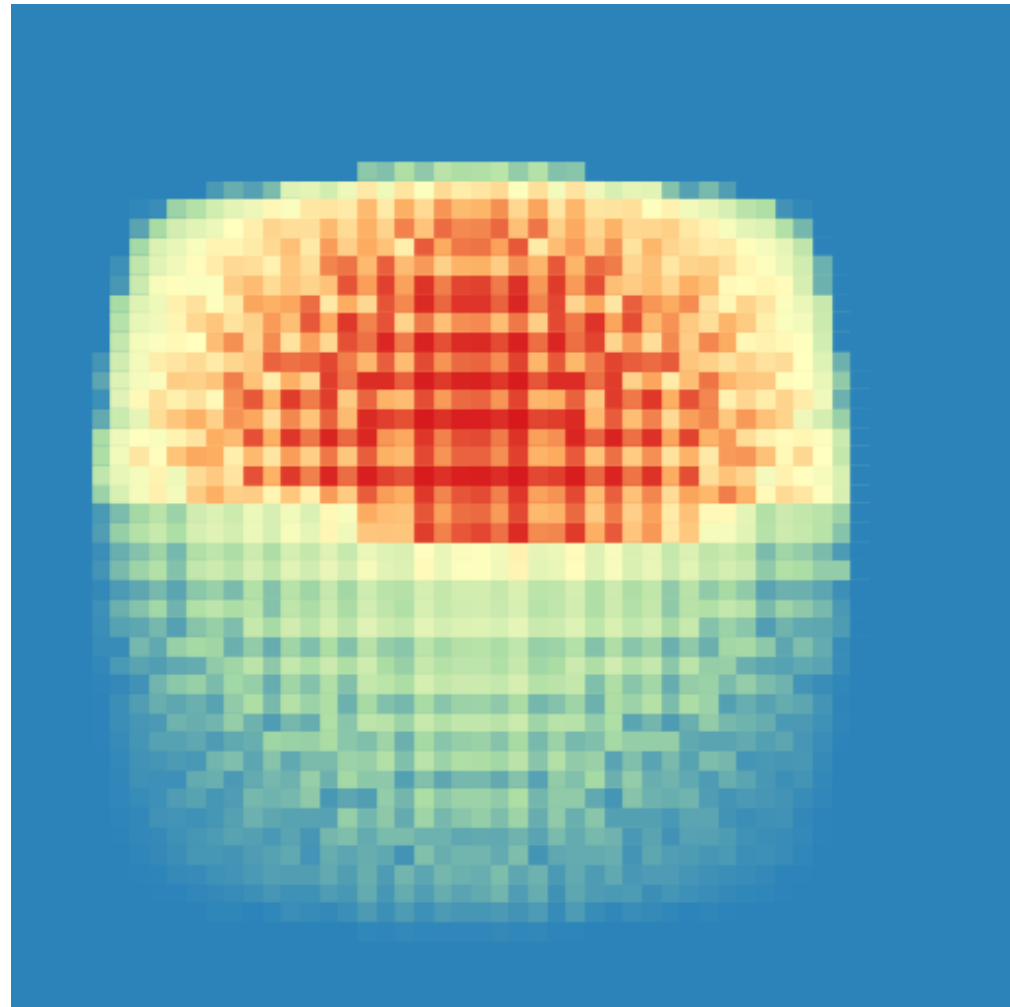
Tomographie par muographie du rempart du Maïdo : Premiers résultats

Etapes du traitement

2. Acquisition du flux de muons

*Ici de novembre 2021 à
mai 2022*

*(données jusqu'en
novembre 2022 en
cours d'analyse)*



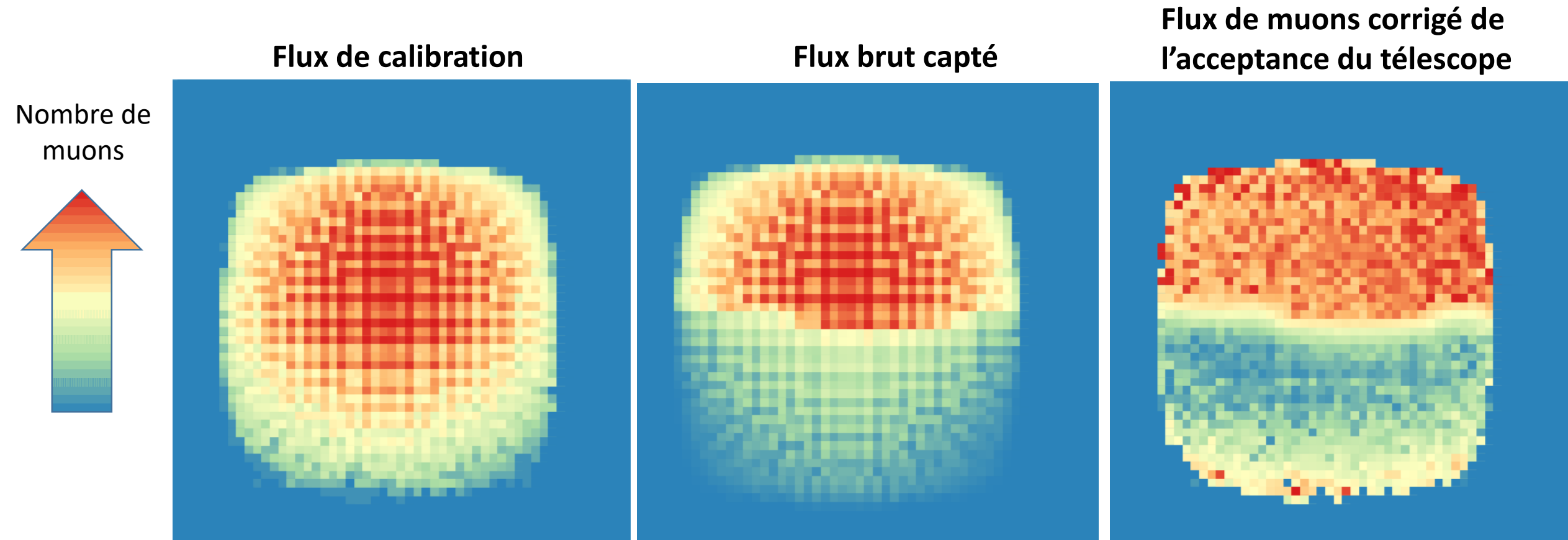
Ciel ouvert

Rempart

Tomographie par muographie du rempart du Maïdo : Premiers résultats

Etapes du traitement

3. Correction de l'acceptance du télescope

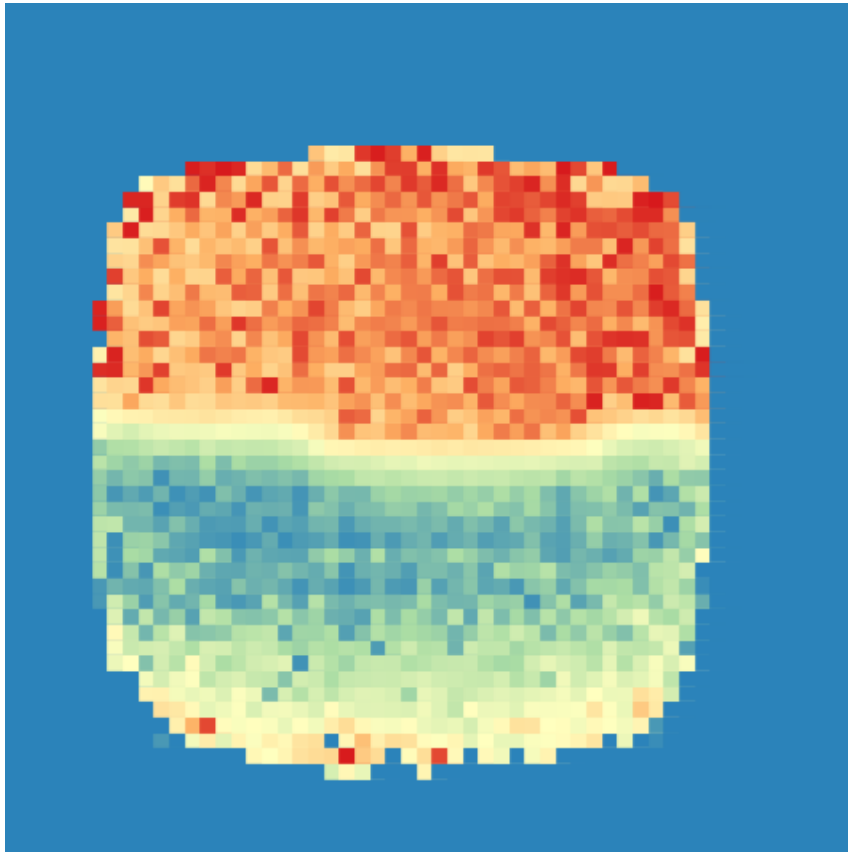


Tomographie par muographie du rempart du Maïdo : Premiers résultats

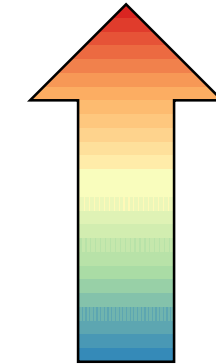
Etapes du traitement

4. Correction de l'épaisseur de massif traversée

Flux de muons corrigé de l'acceptance du télescope

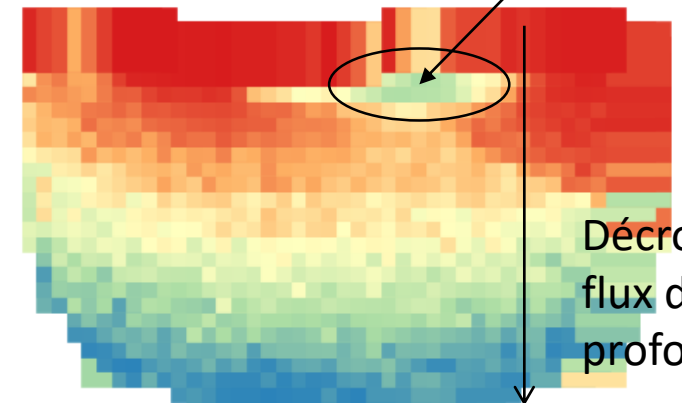


Correction de l'épaisseur de roche traversée



Nombre de muons

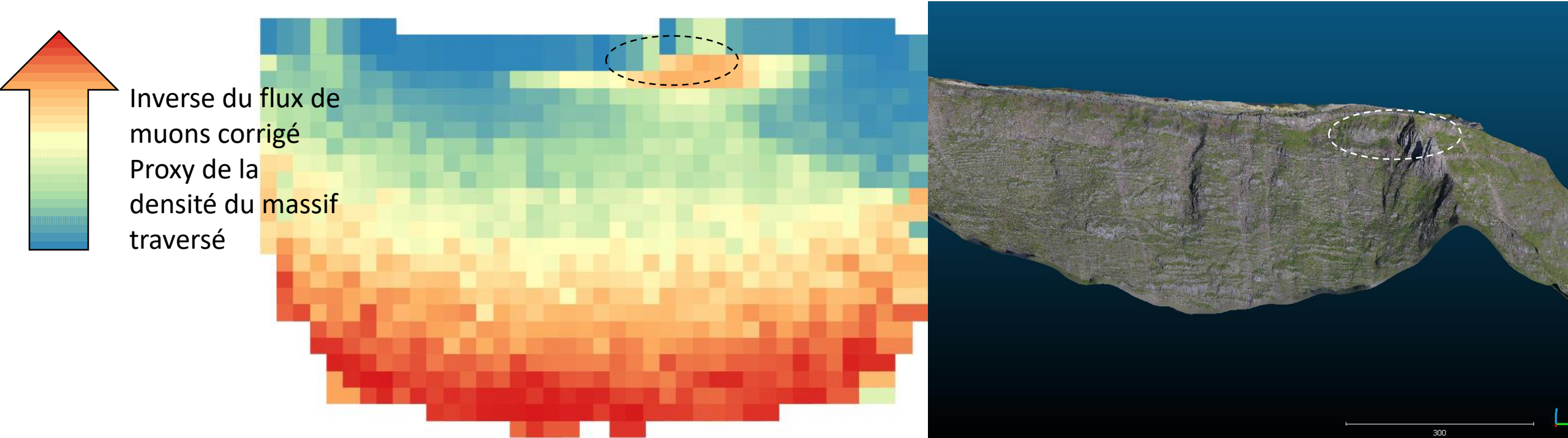
Anomalie négative (moins de muons)



Décroissance du flux de muons en profondeur

Tomographie par muographie du rempart du Maïdo : Premiers résultats

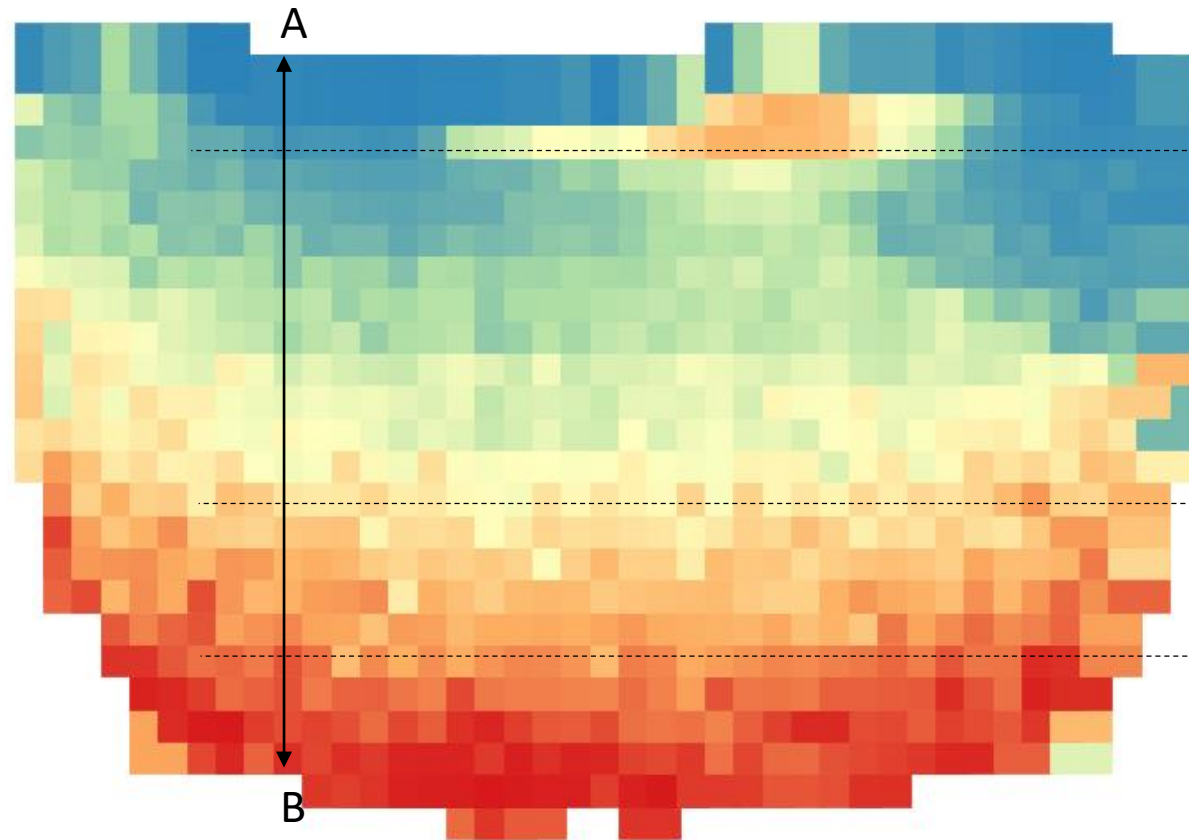
Résultats



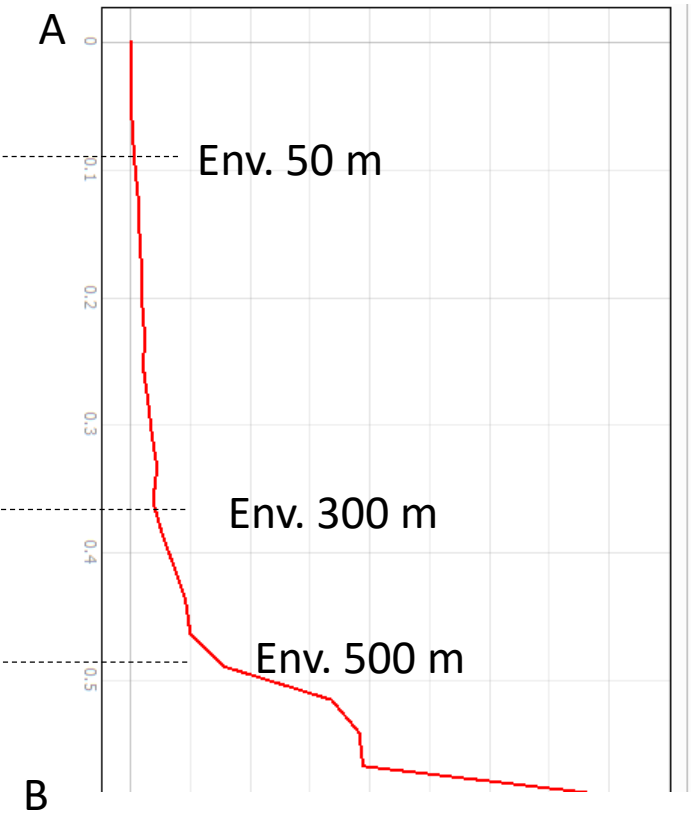
Incertitude croissante en profondeur du fait de l'épaisseur du massif traversé

Tomographie par muographie du rempart du Maïdo : Premiers résultats

Résultats



Inverse du flux de muons corrigé
Proxy de la densité du massif traversé



Densité croissante avec la profondeur : plus de fissures ouvertes en surface ?

Ruptures de densité : enracinement de réseaux de fissures ?

Nécessite des analyses approfondies d'un jeu de données important (stage, thèse, ...)