



europe.regionpaca.fr



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR



l'Europe
s'engage
sur
le Massif Alpin



Opération soutenue par l'État
FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE

Séminaire final SIMOTER

**Interactions Mouvements de terrain / Laves torrentielles :
de l'instrumentation à l'alerte**

14 décembre 2022

<https://risknat.org/seminaire-final-simoter-mardi-8-decembre-2020/>



Présentation

1. **Contexte du projet et présentation du site**
2. **Bilan instrumentation SIMOTER 1**
3. **Conclusions**
4. **Perspectives**



1. Contexte

Mise au point d'un **S**ystème d'**I**nstrumentation de **M**Ouvements de **T**ERrain pour l'aide à la décision dans les territoires de montagne

SIMOTER 1: porteur *ISTerre*

Site pilote du Rieu Benoit (hameau des Verneys, commune de Valloire, 73)

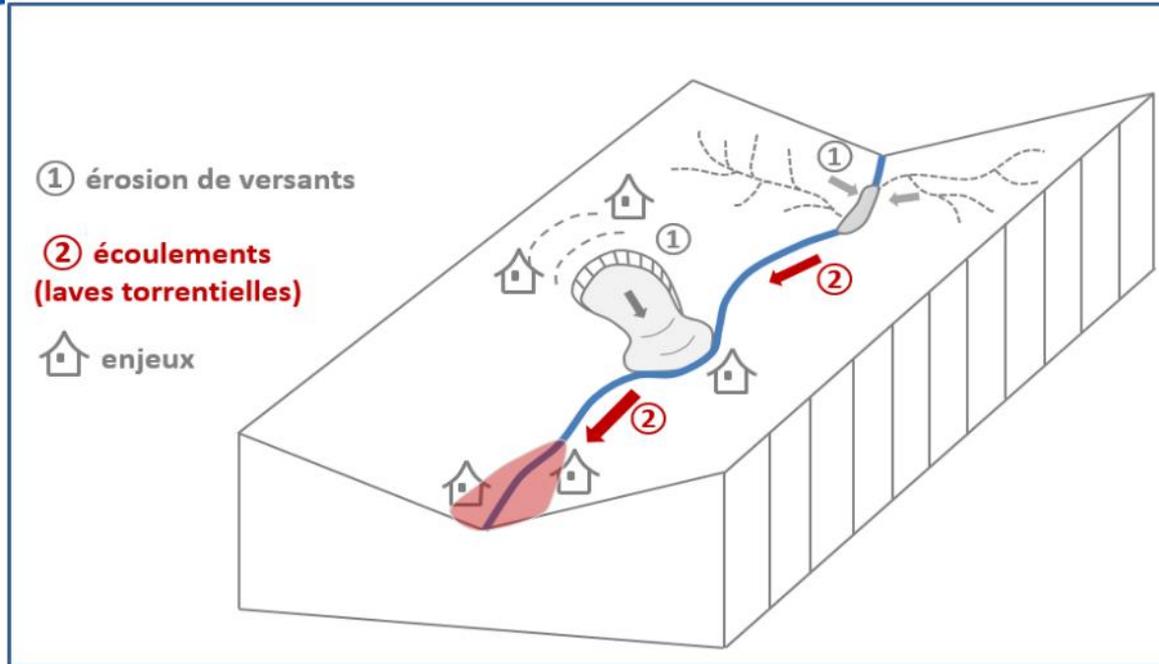
SIMOTER 2: porteur *INRAE*

Sites pilotes du Rieu Benoit (73) et du torrent du Réal (Peone, 06)

Projets de la programmation CIMA-POIA 2014/2020



SIMOTER



Objectifs

Objectif scientifique

Etudier les risques résultant de l'interaction entre un glissement de terrain et un torrent produisant des laves torrentielles.

Objectif opérationnel

Expérimenter un système de surveillance permettant une stratégie de gestion intégrée des risques.

Résultats transposables sur d'autres sites du Massif Alpin affectés par les mêmes phénomènes gravitaires.

Partenariat

- ISterre (Institut des Sciences de la Terre, Université de Grenoble Alpes)
- ETNA (Érosion Torrentielle, Neige et Avalanches, INRAE)
- Commune de Valloire, Communauté de Communes des Alpes d'Azur
- RTM73, RTM06
- Geolithe



europe.regionpaca.fr



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES



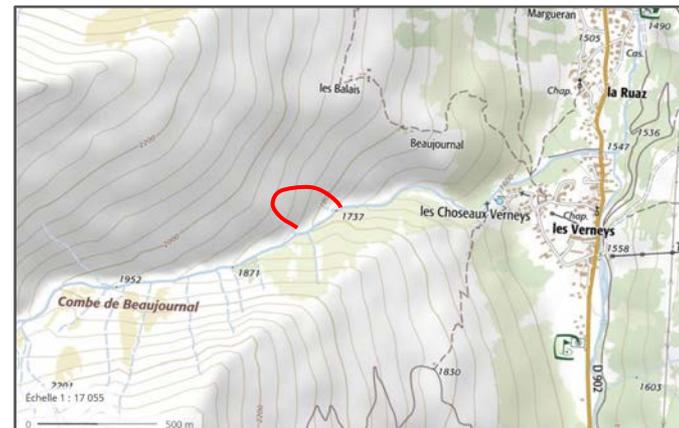
Opération soutenue par l'État
FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE

Le site de Valloire

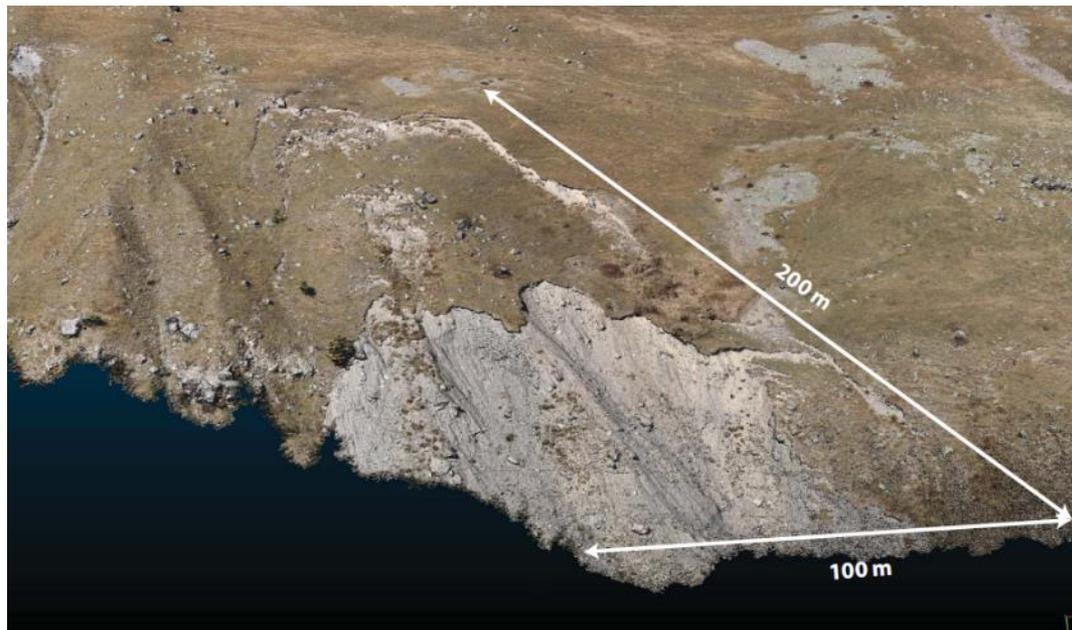
Localisation

Combe de Beaujournal, Rieu Benoit (hameau des Verneys), Valloire

Valloire



Galibier





Historique des évènements

Laves torrentielles



Principales laves torrentielles issues du Rieu Benoit

1682	1934	1935	1982	2006	2008	2009	2011
------	------	------	------	------	------	------	------

Dégâts mentionnés:

Destruction du hameau des Verneys, obstruction de la route, destruction de la passerelle des Arolles, pont de la RD902 submergé/endommagé

Estimation des volumes concernés: pour des évènements décennaux comme celui de 2006

20,000 à 30,000 m3

Glissement de terrain

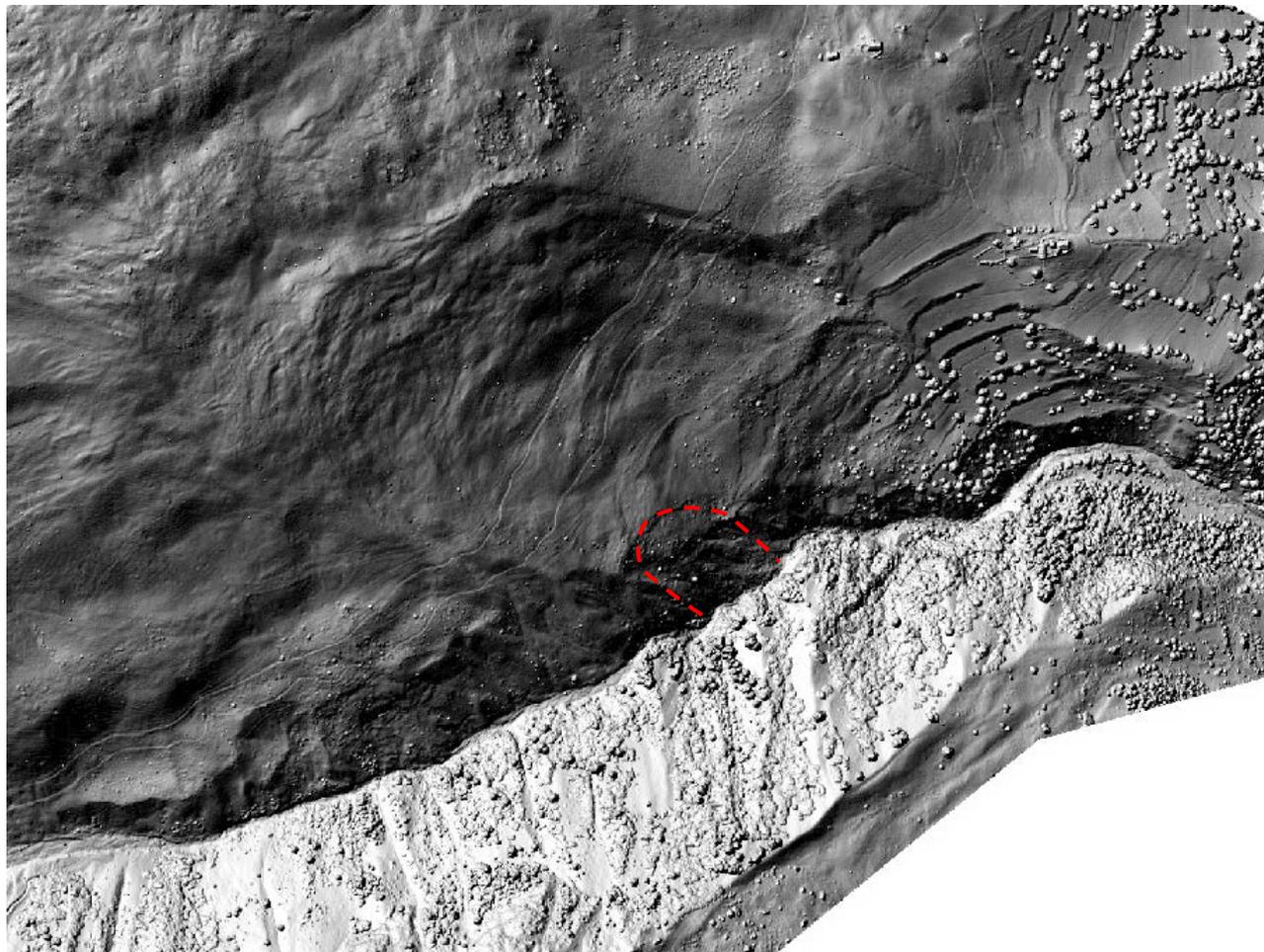


Observations RTM

- Zone ravinée peu active de 2006 à 2011
- Apparition d'une surface de rupture en mars 2012, associée à une activité importante de la zone ravinée

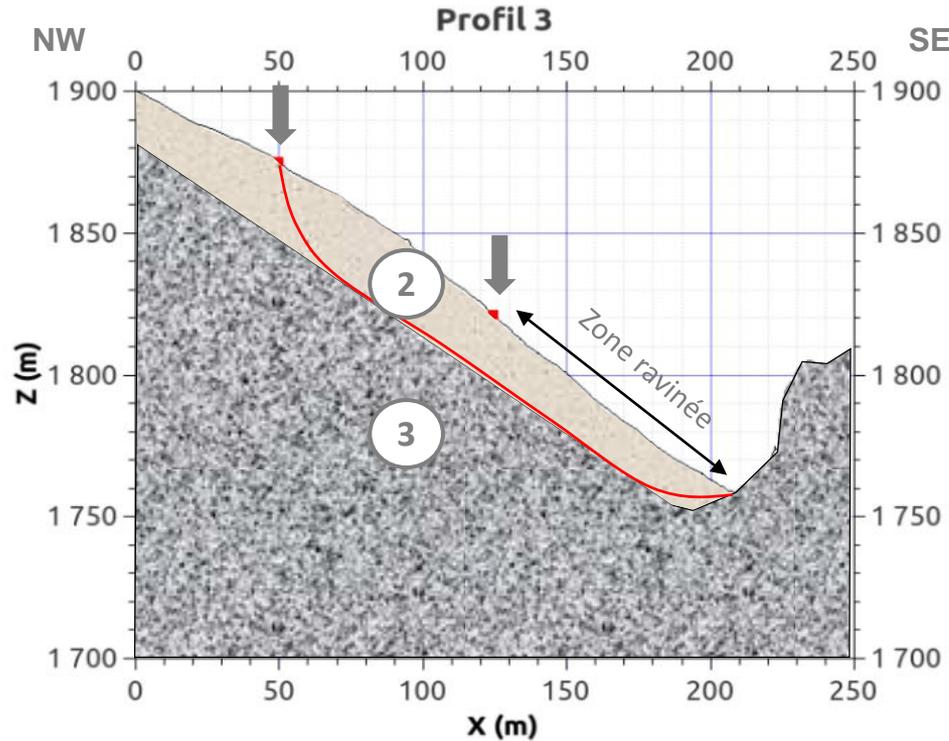


Reconnaissance : Lidar aérien





Reconnaissance Géologie, géophysique, photos, lidar



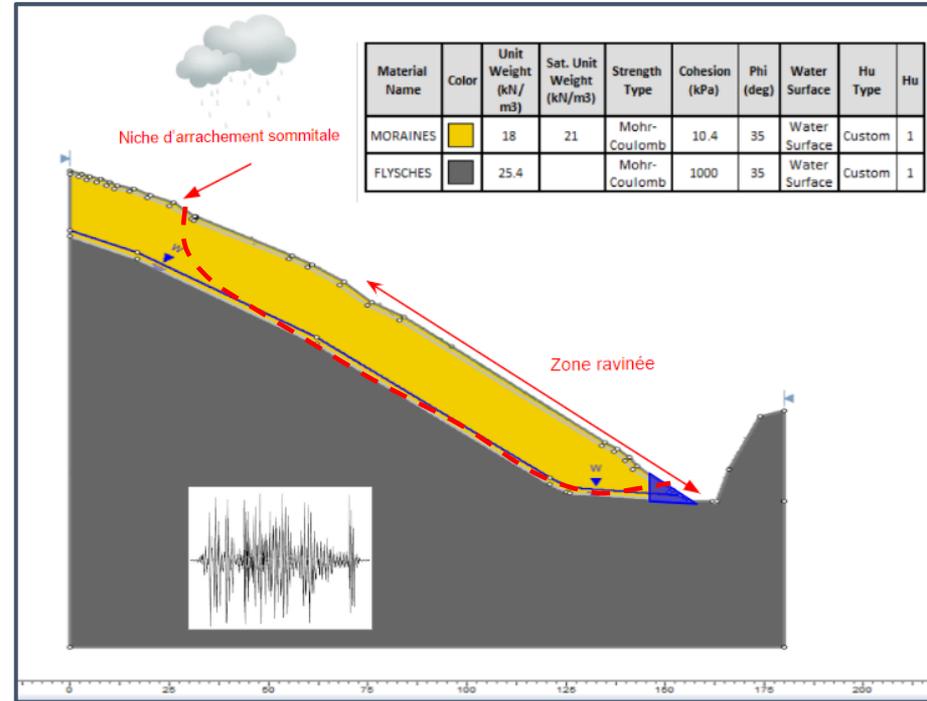
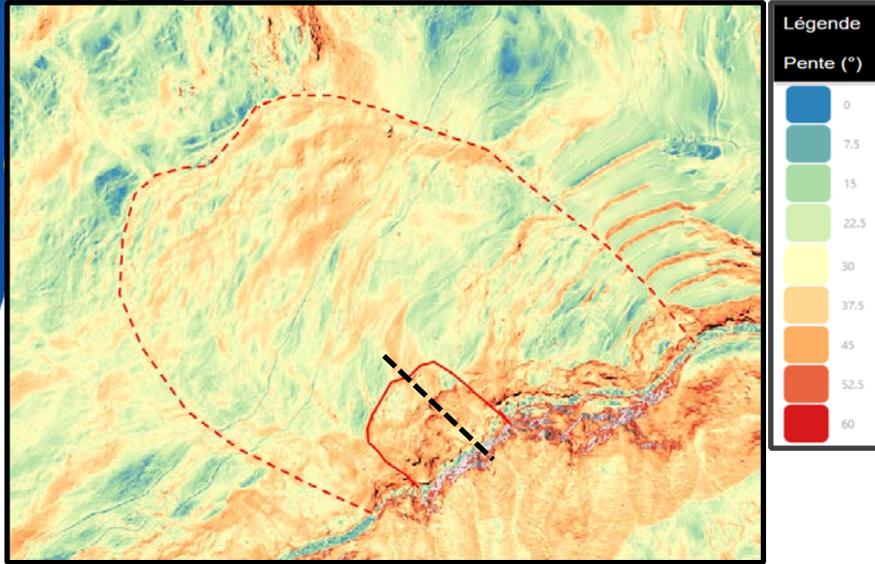
Hypothèse:
Glissement de terrain affecte les couches 1 et 2

Interprétation : Volume en glissement de l'ordre de 225000 m³

Couche	Vp (m/s)	ρ (ohm.m)	Epaisseur (m)	Nature des terrains	Cohésion kPa	Angle de frottement (°)
1	300 – 500	Très variable	1 – 4	Terre végétale et terrains peu compacts	10	35
2	800 - 1200	300 - 600	15 - 25	Moraines non saturées perméables	10	35
3	2100 - 2800	800 - 1000	-	Flyschs gréseux	> 100	35



Calculs de stabilité



Détermination de la cohésion par analyse en retour

- Hypothèse: $\phi=35^\circ$
- Nappe basse
- $\rightarrow c = 10 \text{ kPa}$

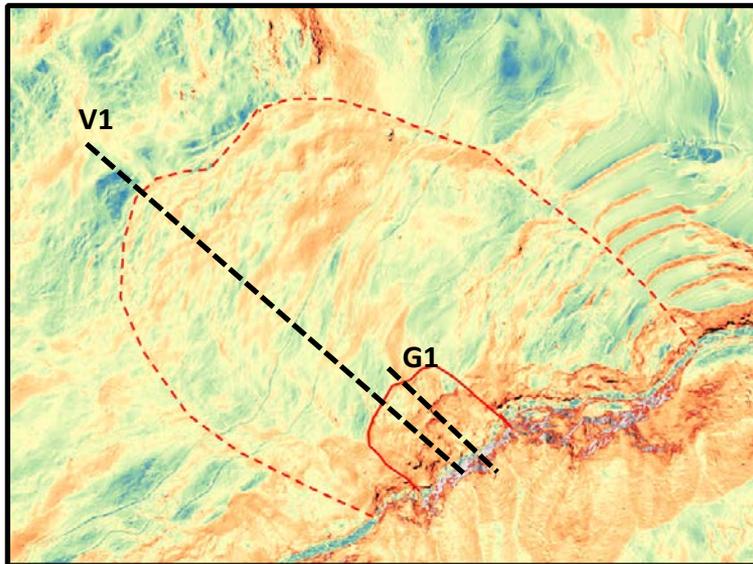
Etude des facteurs déclenchants

- Séisme
- Variation hauteur de nappe
- Érosion du pied par lave torrentielle



Calculs de stabilité

Valeurs de coefficient de sécurité (FS)



Conditions	Glissement G1	Versant V1
FS ($c_m = 10$ kPa)	1	1.300
FS Nappe 2 m	0.996	1.300
FS Séisme $a_g = 1.1$ m.s ⁻²	0.816	1.070
FS Lave torrentielle 4 m	0.989	1.300

Conclusions

- Séisme : facteur déclenchant le plus efficace
- Le mouvement de versant ancien déclenché par séisme ?



2. INSTRUMENTATION SUR SITE

Dispositif de surveillance complet et innovant

Dispositif de suivi	Observable	Intérêt	Zone observée
Sismologique	dV/V % (variation relative de la vitesse sismique)	« Rigidité » du terrain (pré-alerte)	haut + corps glissement
RFID	Déplacements (> cm)	Mouvement de surface zone haute	haut glissement
Photos / Lidar	Topographie de surface	Déformations, érosion / dépôt	glissement complet
Météo	Pluie, vent, température	Interprétation des autres mesures (alerte météo)	versant (zone basse du vallon)

demande d'accès

Valloire

RIM-Nat

Informations Générales

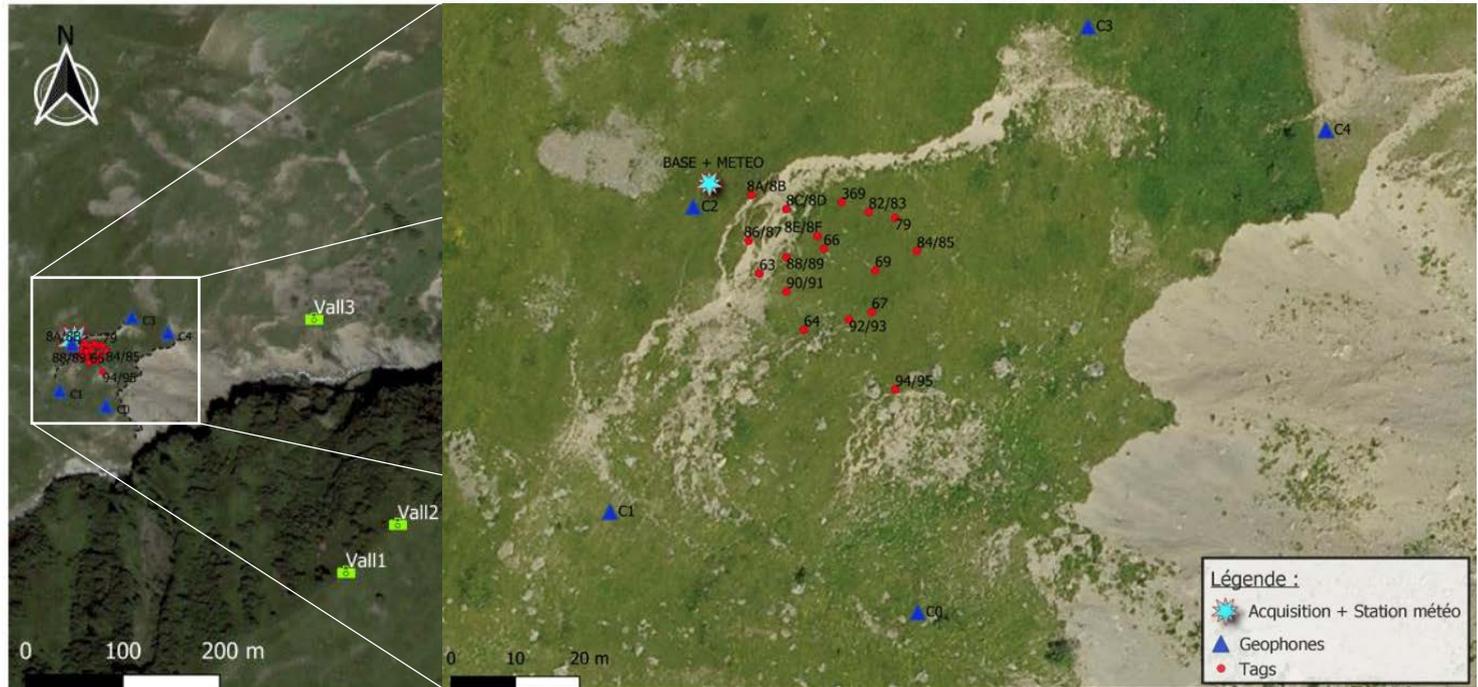
implantation capteurs

Météorologie

RFID

Sismologie Intercorrélations

Photos





INSTRUMENTATION SUR SITE

Dispositifs en place





BILAN DU FONCTIONNEMENT DES INSTRUMENTS DE MESURE

Dispositif initial

Données	Période	% récupération	% exploitable
Météorologique	01/09/2019 → 30/06/2021	99.3 %	99.3 %
Sismologique	01/09/2019 → 20/05/2020	99.1 %	46 %
R.F.I.D.	18/11/2019 → 30/06/2021	76 %	55.3 %
Photos	01/09/2019 → 02/06/2021	82 à 85 % (Harbortronics)	70 à 77 % des photos (fonction nébulosité)

Dispositif renforcé

Données	Période	% récupération	% exploitable
Météorologique	01/07/2021 → 17/10/2022	95.6 %	95.6 %
Sismologique	21/05/2020 → 17/10/2022	99.2 %	99.2 %
R.F.I.D.	01/07/2021 → 17/10/2022	86 %	86 %
Photos	03/06/2021 → 17/10/2022	81.5 à 89 % (Pièges Photos)	70 à 80 % des photos (fonction nébulosité)



Amélioration / durcissement pour passage à l'opérationnel (juin 2021 → oct. 2022)

*Intégration des traitements / logiciels issus du LabCom GEO3iLAB (SOILSTAB / GEORFID)
sur portail de surveillance EVORISK (GEOLITHE)*

Suivi sismologique de la rigidité du terrain (dV/V) :

- Remplacement géophones 1 Hz --> 4.5 Hz scellés et + stables (sans perte qualité significative)
- Amélioration des traitements dV/V --> plus robuste et lisible
- Affichage plus lisible pour des acteurs non spécialistes

Suivi des déplacements relatifs (RFID) :

- Remplacement des piquets souples → rigides (éviter inclinaison piquets liés à la reptation de la neige)
- Augmentation fréquence de mesures (qq sec /min) (éviter ambiguïtés liées aux sauts de phase éventuels)

Suivi photographique :

- Remplacement de 2/3 Digisnap Pro par pièges photos (+ fiable, interactif)
- Développement d'un outil de comparaison de photos

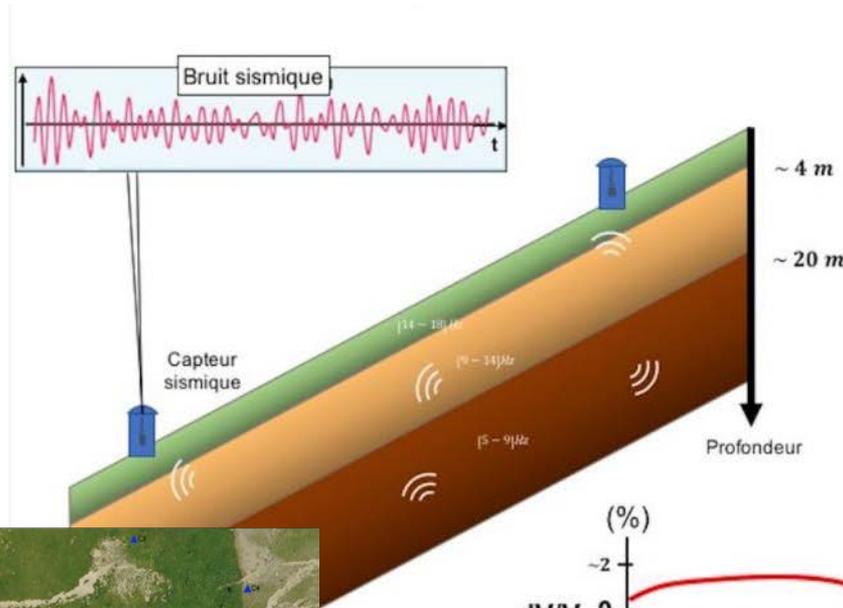
Suivi météo :

- Intégration pré-alerte définie sur torrent du Réal (Simoter 2, Péone, 06)



Suivi Sismologique (dV/V) : Principe de mesure

→ Suivi journalier de la rigidité du terrain



- Les **capteurs sismiques** mesurent les micro-vibrations du sol produites par des sources multiples (vent, pluie, trafic routier,...) en continu
- Le traitement de ces données sismiques permet de calculer une variation de vitesse sismique par jour (**dV/V**), par rapport à un état de référence
- Ce **dV/V** est directement lié à l'état de **rigidité** du milieu. Celle-ci peut être modifiée par des facteurs saisonniers (neige, infiltration d'eau de fonte,...), précurseurs à une **déstabilisation**.
- Suivant la **fréquence** utilisée, on peut surveiller le milieu à des profondeurs différentes.

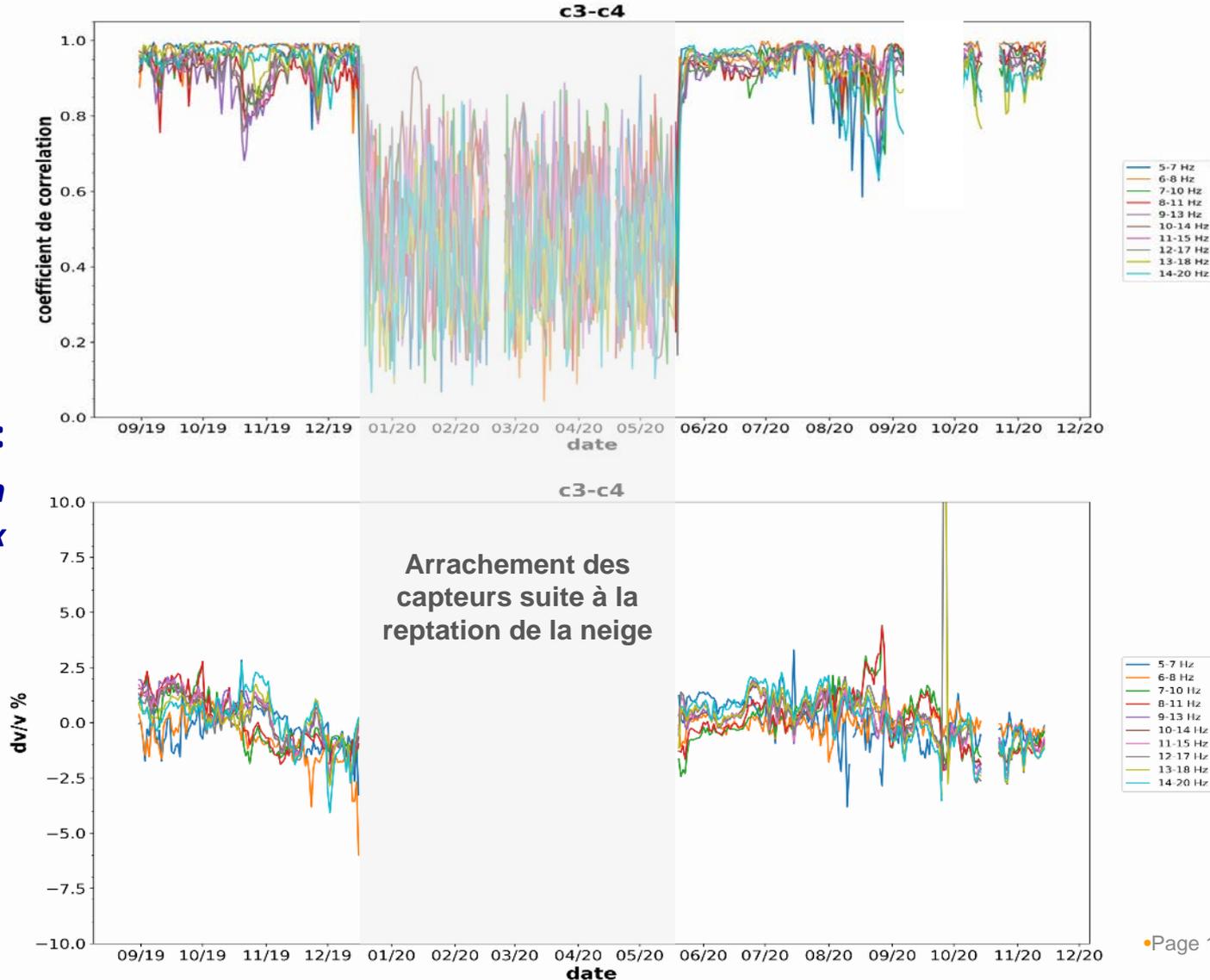




Suivi Sismologique (dV/V) : Difficultés

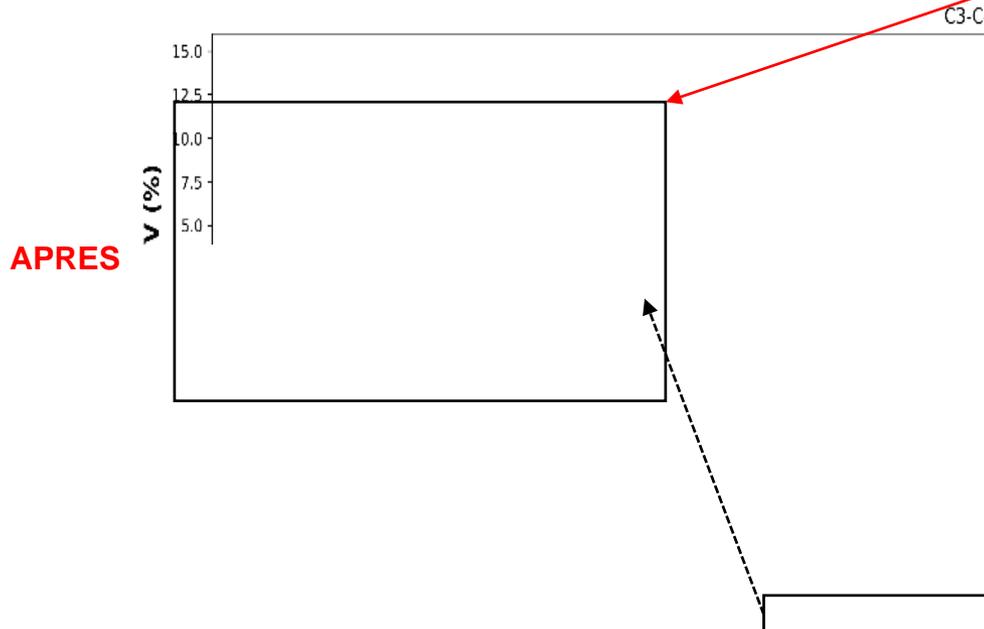
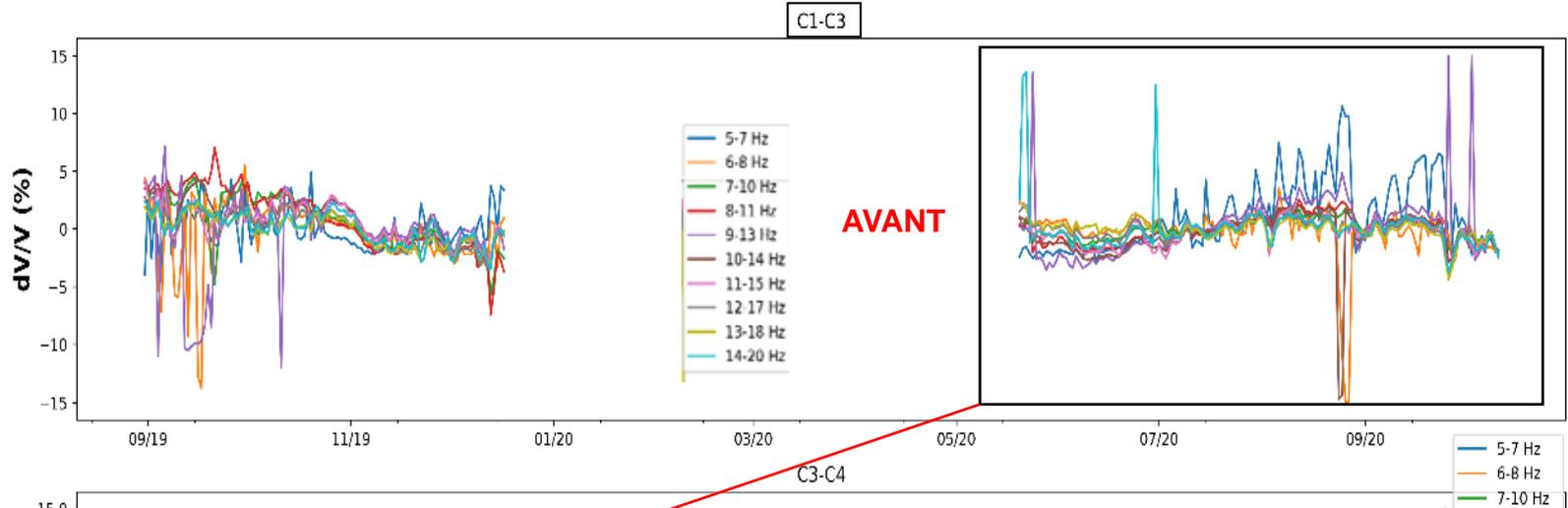
Hiver 19-20 :

Impact reptation manteau neigeux





Suivi Sismologique (dV/V) : Améliorations

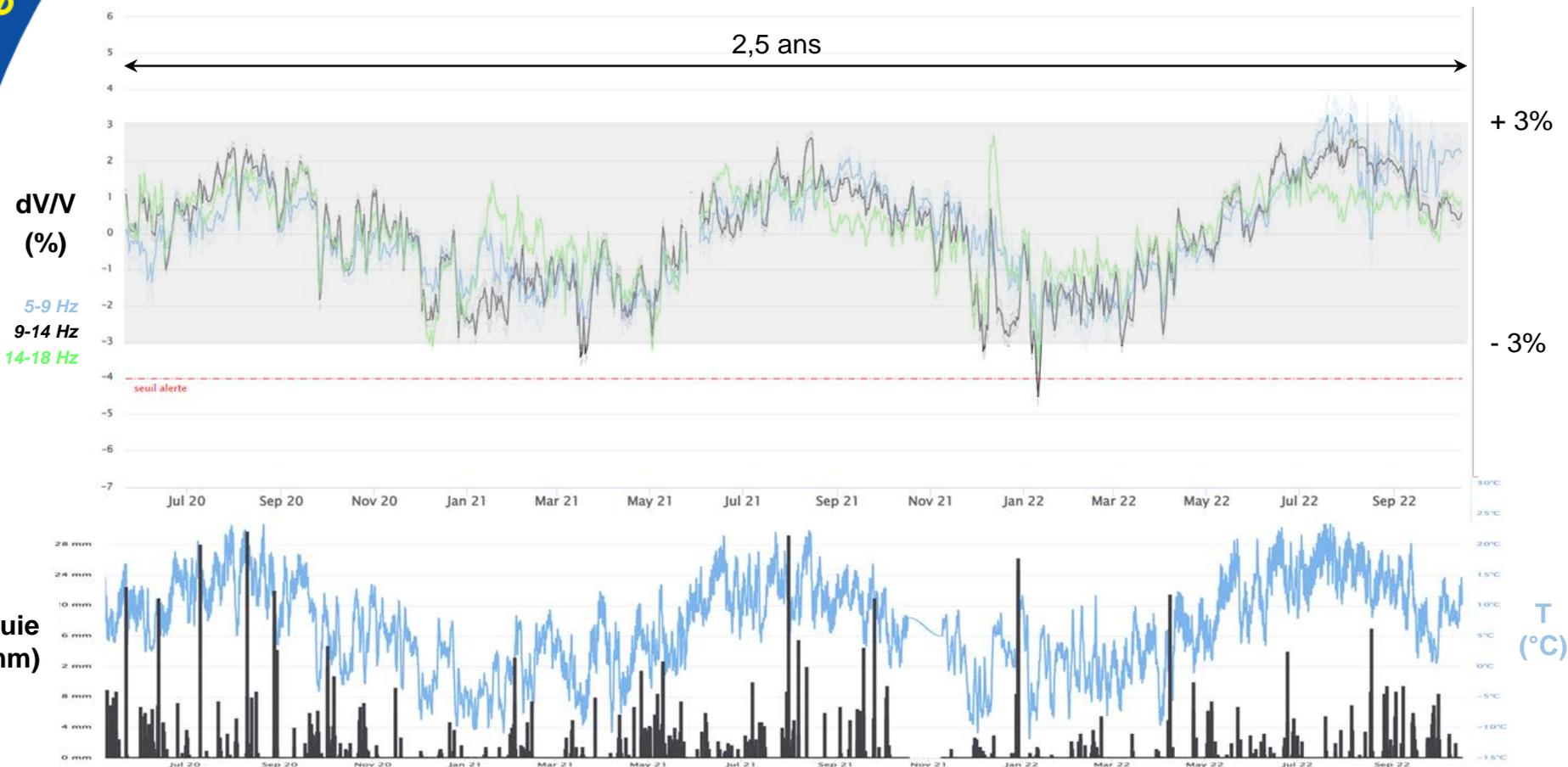


- Stabilisation observable (suppression des artefacts / fausses alertes)
- Intégration des 10 couples de capteurs en 1 seul var.
- 3 bandes de fréquence caractéristiques de 3 prof.
- Suppression des trous de données potentiels
- Ajout intervalles d'incertitude



Suivi Sismologique (dV/V) : Résultats

- Amplitude variations saisonnières → seuil alerte
- Corrélation avec température (BF, HF)





Suivi Sismologique (dV/V) : Bilan

- Durcissement du dispositif :
 - Remplacement géophones 1 Hz --> 4.5 Hz scellés + stables (sans perte qualité significative)
 - Amélioration des traitements dV/V --> plus robuste et lisible
 - Affichage plus lisible pour des acteurs non spécialistes (passage opérationnel)

- Fiabilisation du dispositif : données continues sur 2.5 ans en milieu difficile (ΔT 35°C, neige, gel...)

- Connaissance variations dV/V propres au versant (période stable) : +/- 3 %

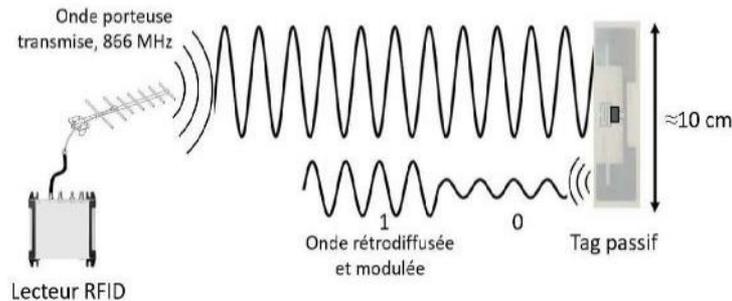
- Définition possible d'un seuil de pré-alerte (- 4 %, 2 courbes ou plus)

...vers un système d'instrumentation à bas coût (et sans fil)

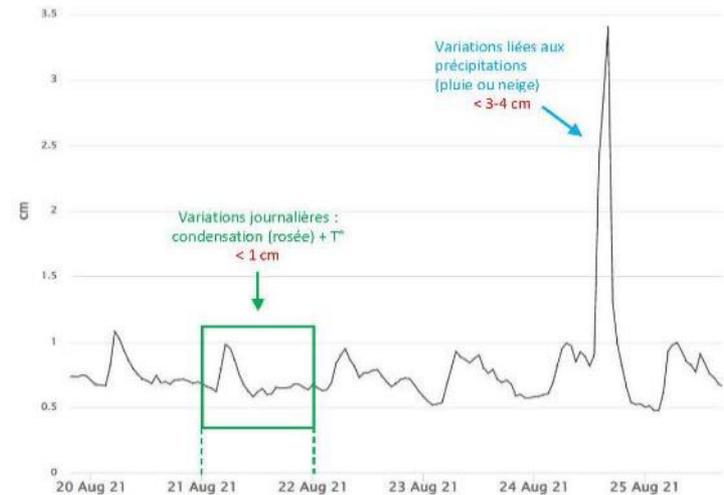


Suivi déplacements par RFID : Principe et grille de lecture

- L'antenne de base émet périodiquement une onde radio (bande libre) en direction des tags, qui rétrodiffusent cette onde en y ajoutant du signal (ID, phase,...)
- Le déplacement relatif des tags par rapport à l'antenne de base est obtenu à travers la variation de la mesure de phase du signal émis par le tag au cours du temps (brevet ISTerre/Geolithe)



- Les mesures de déplacement sont affectées par des variations périodiques réversibles liées aux facteurs environnementaux : température, humidité, pluie, neige...

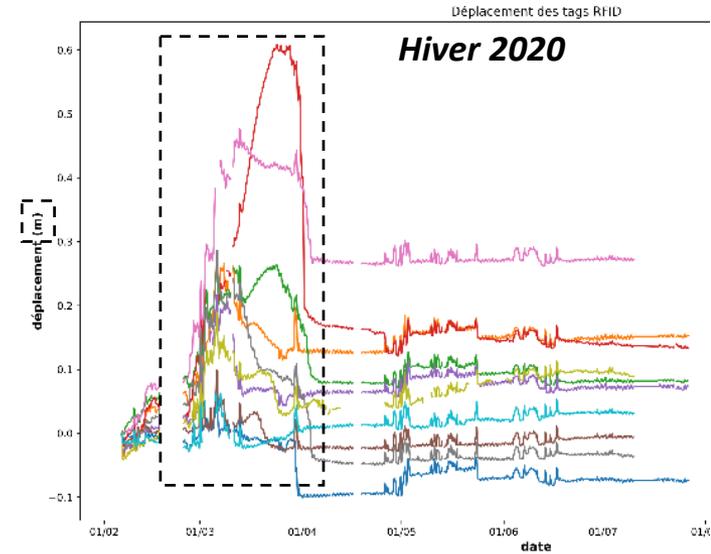




Suivi déplacements par RFID : Difficultés & Améliorations

Rappel contexte : inclinaison parasite des piquets support de tags → mesure déplacements virtuels liés à la reptation de la neige (hiver / printemps 2020)

Actions juin 2021 : Remplacement piquets souples → rigides + Augmentation fréquence acquisition



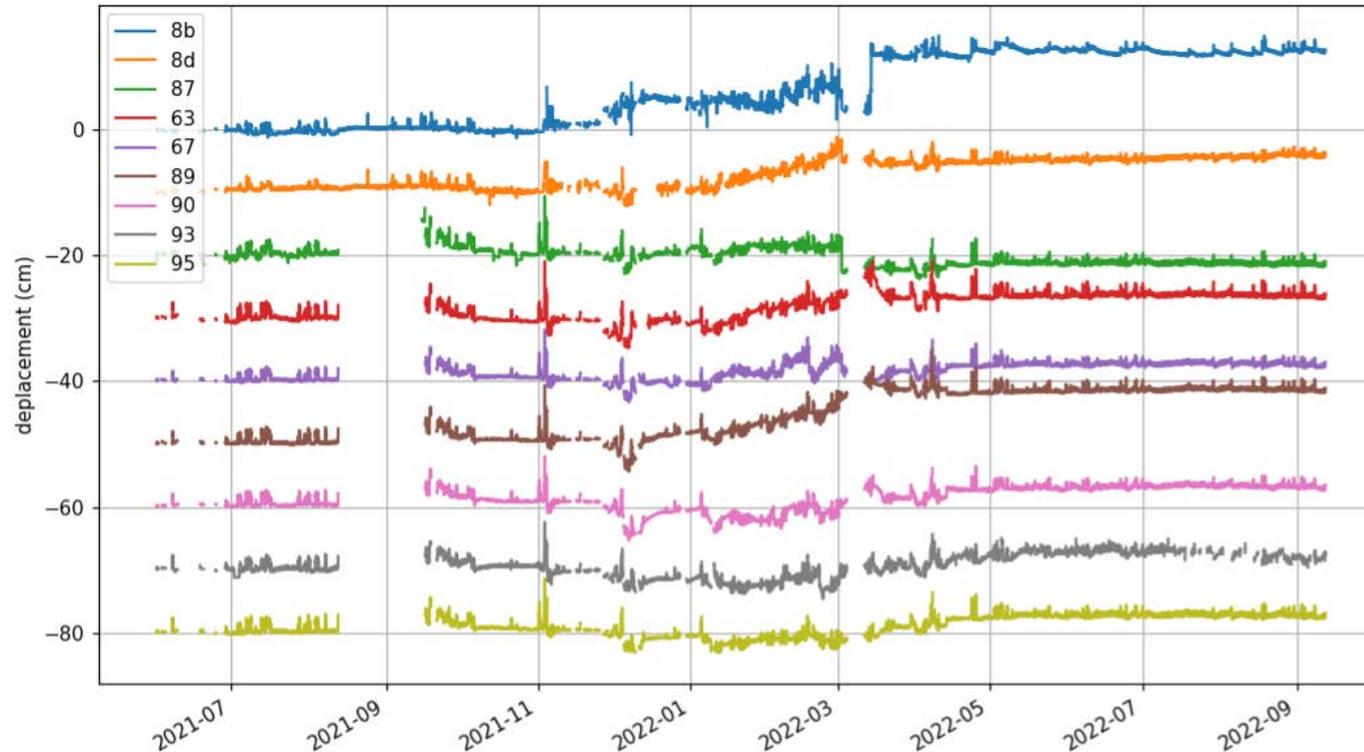
Variations résiduelles réversibles (2021 → 22) :

Effet précipitations (pluie/neige) : < 3-4 cm

Condensation / température (quotidien) : < 1 cm



Suivi déplacements par RFID : Résultats Eté 21 → Automne 22 (prolongation)



Cohérence avec les levés Lidar + GNSS → pas de mouvement significatifs



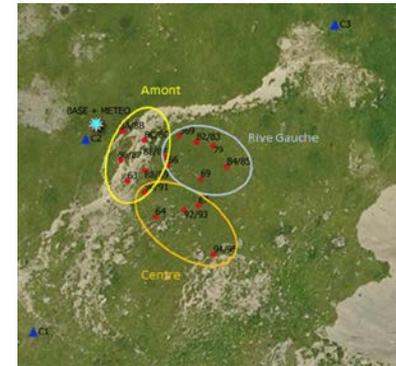
Suivi déplacements par RFID : Bilan

- Améliorations du dispositif (actuelles) :
 - Piquets rigides --> résistance à la reptation du manteau neigeux
 - Antennes moins sensibles aux précipitations (pluie, neige...)
 - Diminution fréquence d'échantillonnage
 - Améliorations logicielles

- Connaissance variations environnementales réversibles (en période stable)

- Définition possible d'un seuil de pré-alerte (10 mm, possible par secteur)

... vers une localisation absolue (suppression des ambiguïtés de phase en cas d'interruption)





Suivi photographique du glissement : *Comparaison de photos successives*

Portail de surveillance EVORISK (GEOLITHE)



Démo



3. Conclusions

- **Projet de 3 ans d'instrumentation (octobre 2019 - octobre 2022) en montagne**
 - Difficultés spécifiques surmontées
 - Fiabilité de ce dispositif innovant dans ce contexte difficile

- **Capacité du dispositif à fournir des mesures continues toute l'année (quelles que soient les conditions météo)**
 - Mesures de déplacement en présence d'un manteau neigeux
 - Mesures de variations de rigidité du milieu

- **Pas de réactivation du mouvement de terrain durant la période d'instrumentation (validation par Lidar, GNSS et photos)**

- **Effet stabilisateur de l'instrumentation ...!**



4. Perspectives

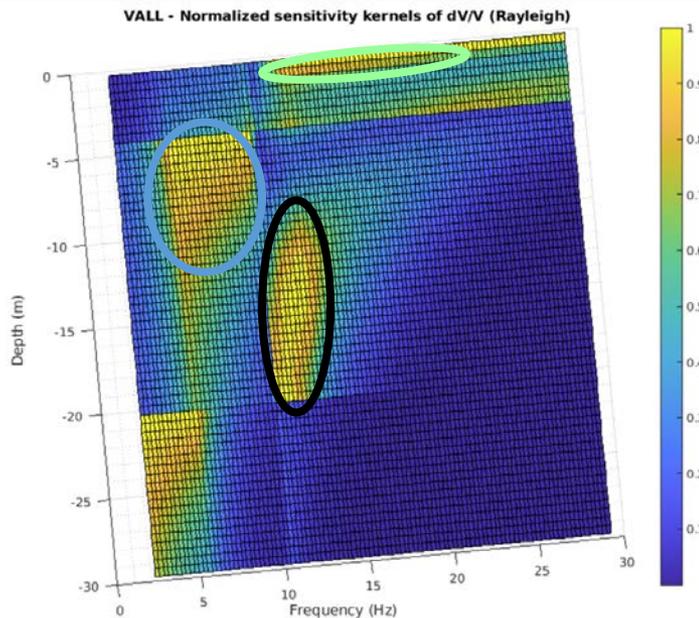
- Numériseurs sismiques à bas coût
- Transmission des données sans fil : facilité d'installation
- Développement RFID : localisation absolue des Tags dans le glissement
- Démontage --> Matériel disponible pour d'autres projets (RFID)



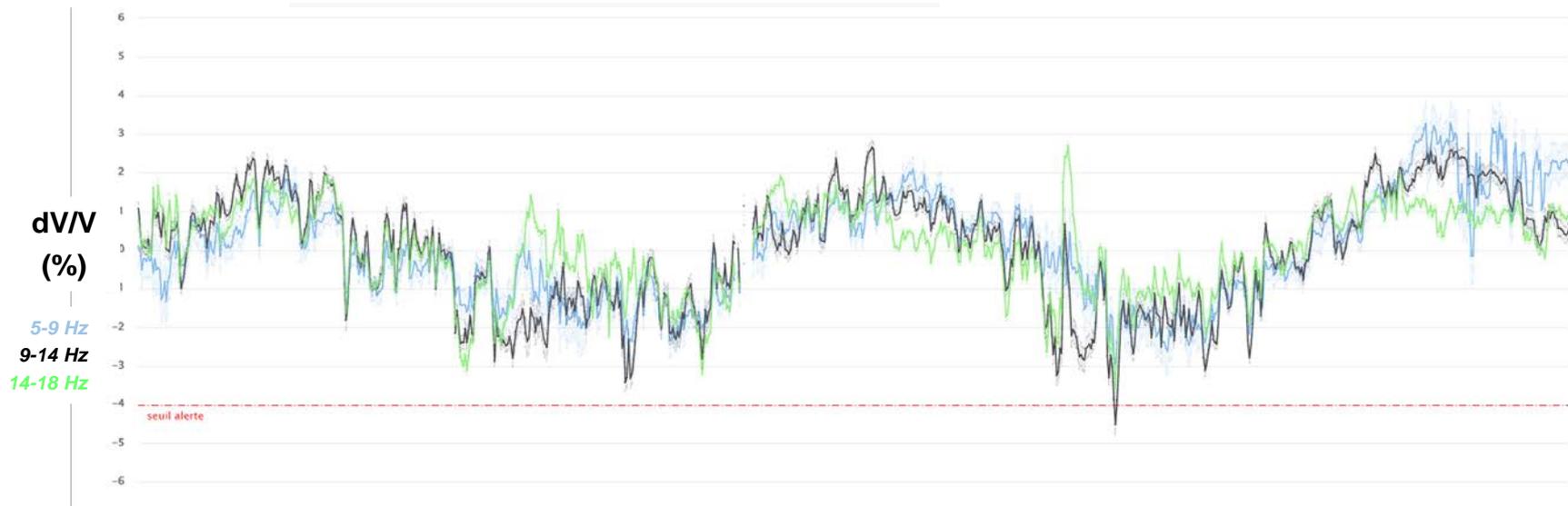
europe.regionpaca.fr



Région
Provence
Alpes
Côte d'Azur

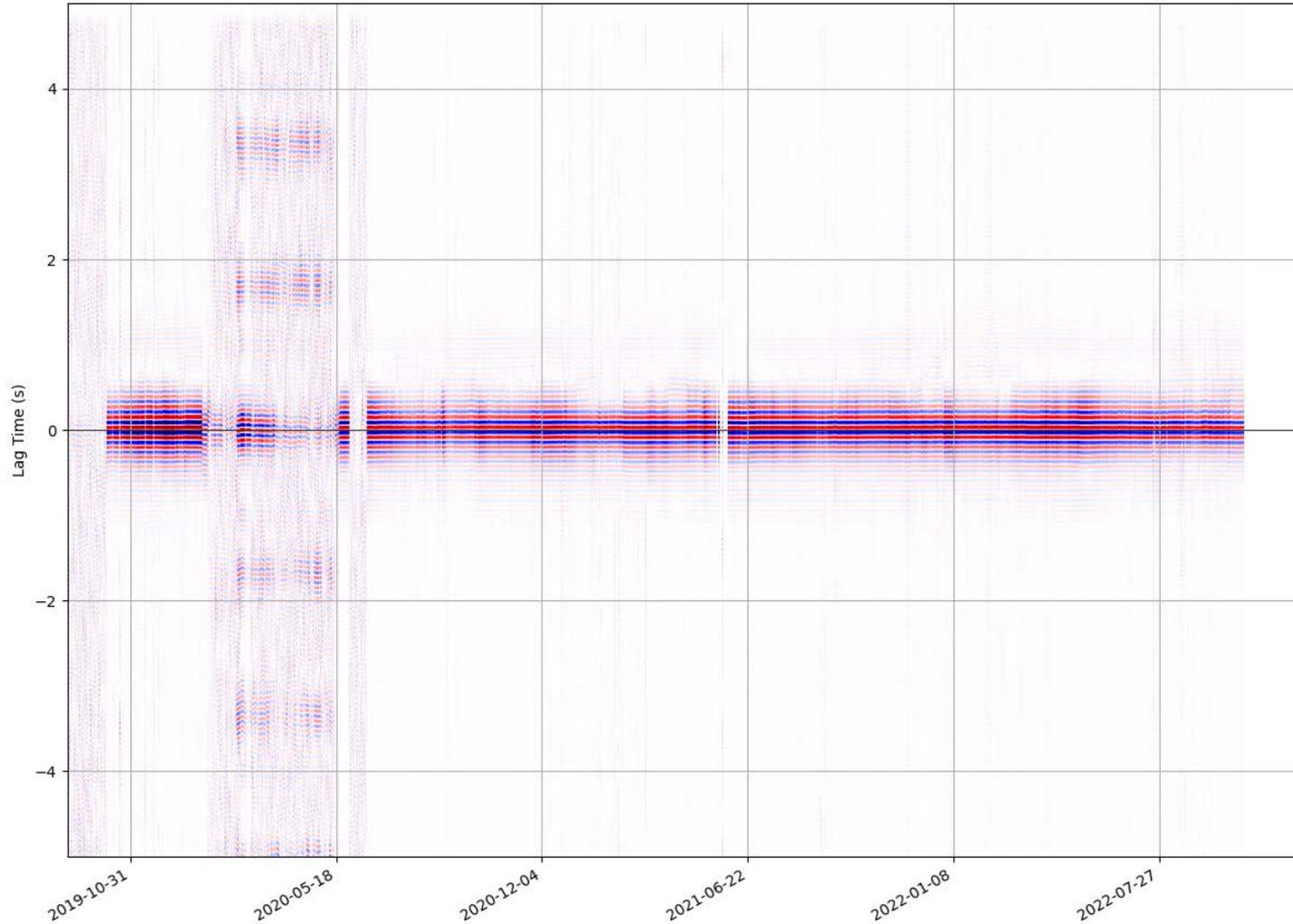


Sensibilité dV/V en fonction en fonction
de la fréquence et de la profondeur



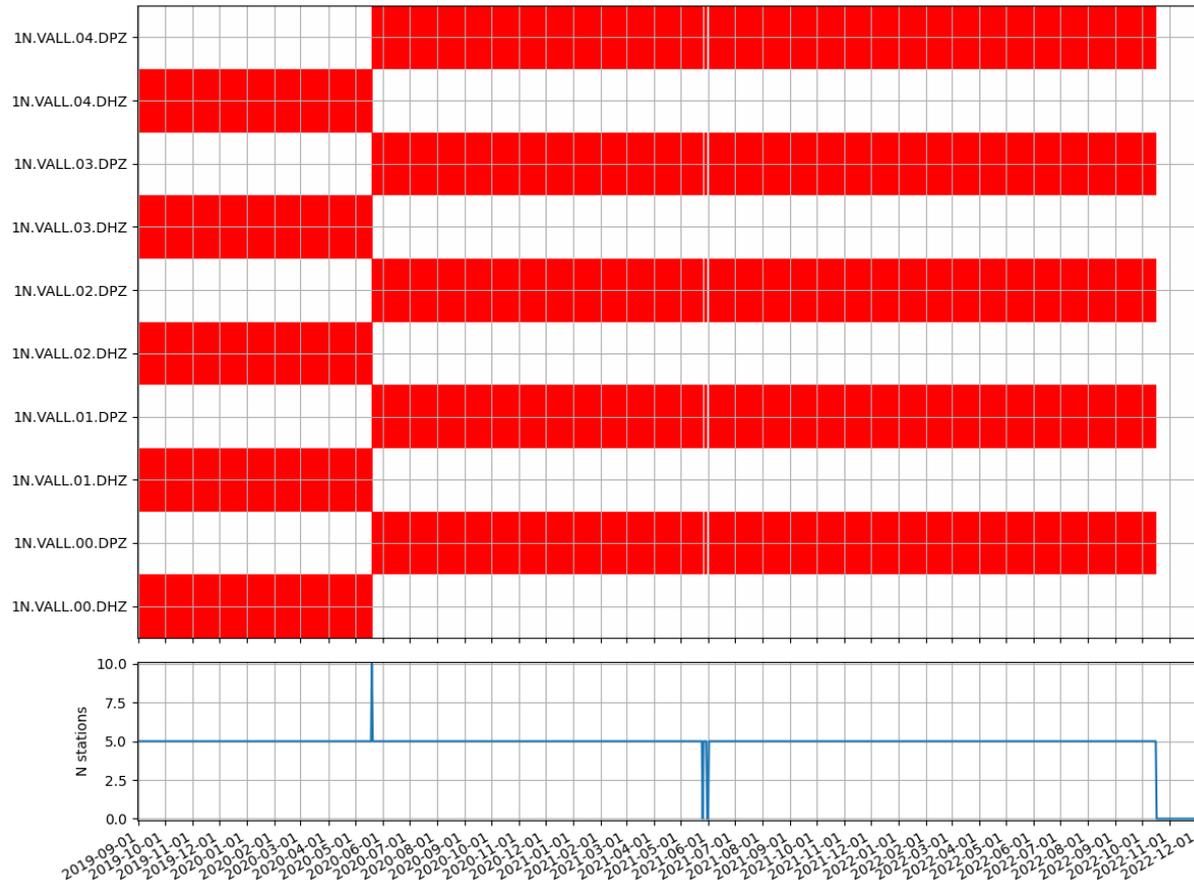


1N.VALL.00 : 1N.VALL.01, ZZ, Filter 1 (4.00 - 20.00 Hz), Stack 1, Re-filtered (5.00 - 9.00 Hz)



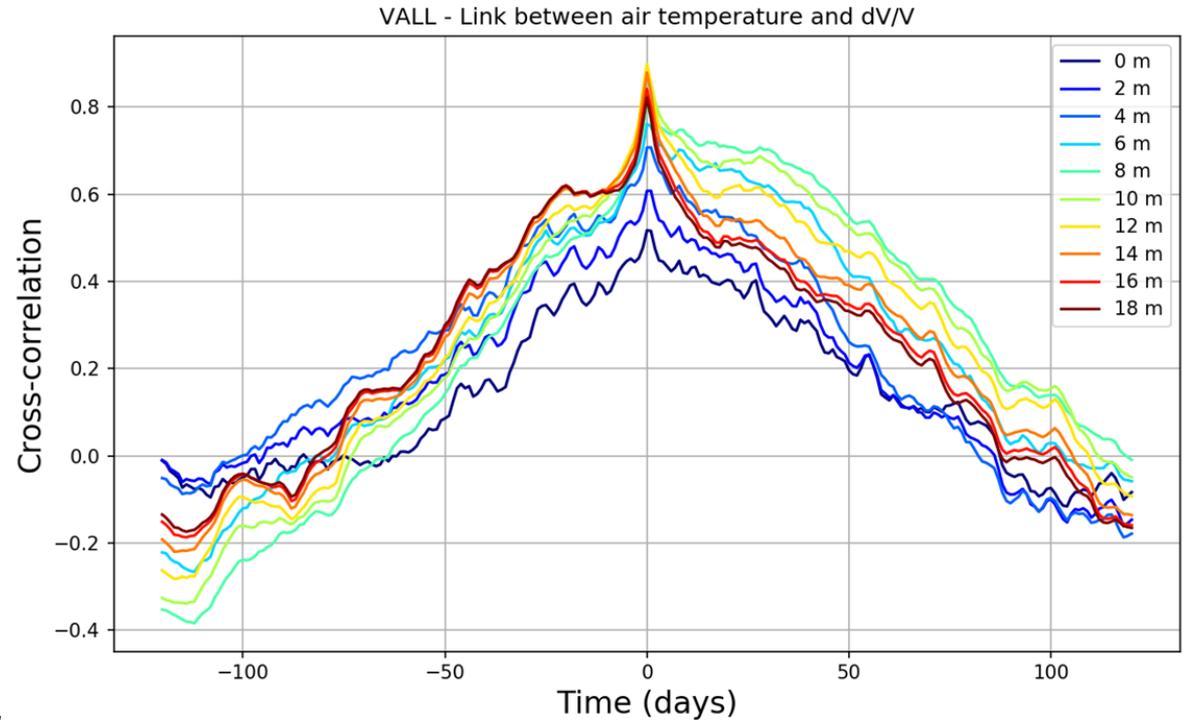


Disponibilité des données sismiques





Corrélation entre météo (température) et dV/V en fonction de la profondeur (inversion ondes de Rayleigh)



- Time window = $\pm[0.2 - 0.5]$ s
- Référence : Moyenne sur toute la période de données

-> délai de réponse < 1 jour, pour toute la profondeur du glissement

-> max de corrélation vers 12 m (pas en surface)



Séismes RENASS

- Magnitude >3 : 8 évènements en fév.-mars 2012 (~50 km)

Date et heure universelles	Date et heure locales	Magnitude	Pays
25/05/2012 12:51	25/05/2012 14:51	3.1	 Albertville
26/03/2012 20:11	26/03/2012 22:11	3.1	 Gap
25/03/2012 08:05	25/03/2012 10:05	3.6	 Gap
14/03/2012 07:03	14/03/2012 08:03	3.3	 Gap
05/03/2012 14:56	05/03/2012 15:56	3.2	 Gap
02/03/2012 07:15	02/03/2012 08:15	3.8	 Gap
26/02/2012 23:39	27/02/2012 00:39	3.6	 Gap
26/02/2012 22:37	26/02/2012 23:37	4.5	 Gap

- Magnitude >2 : 43 évènements sur nov. 2011 - mars 2012



BILAN DU FONCTIONNEMENT DES INSTRUMENTS DE MESURE

Dispositif initial

Données	Période	% récupération	% exploitable
Météorologique	01/09/2019 → 30/06/2021	99.3 %	99.3 %
Sismologique	01/09/2019 → 20/05/2020	99.1 %	46 %
R.F.I.D.	18/11/2019 → 30/06/2021	76 / 68 %	55.3 / 49.5 %
Photos	01/09/2019 → 02/06/2021	82 à 85 % (Harbortronics)	70 à 77 % des photos (fonction nébulosité)

Dispositif renforcé

Données	Période	% récupération	% exploitable
Météorologique	01/07/2021 → 17/10/2022	95.6 %	95.6 %
Sismologique	21/05/2020 → 17/10/2022	99.2 %	99.2 %
R.F.I.D.	01/07/2021 → 17/10/2022	86 / 77 %	86 / 77 %
Photos	03/06/2021 → 17/10/2022	81.5 à 89 % (Pièges Photos)	70 à 80 % des photos (fonction nébulosité)



Suivi des déplacements par RFID :

Représentation des résultats : sectorisation + graphiques

