

Glissements de terrain

Comment les surveiller pour mieux anticiper et gérer les situations de crise ?

FREISSINIÈRES - 04-05 JUILLET 2024
Journées techniques TAGIRN STEPRIM

ETIENNE REY





Sommaire

1. Introduction
2. Méthodes de surveillance des glissements de terrain
3. Exemples de suivi par méthodes
4. Suivi multi-méthodes : Rieu Benoit à Valloire (73)
5. Alerte/alarme/(niveau de) sécurisation
6. Phasage d'une opération de surveillance
7. Synthèse

Que surveille t-on ?

Cadre d'étude

- **Glissements** : des zones instables déjà identifiées (ou a posteriori)
Indices de mouvement / déstabilisation pré-existants, détectés par :
 - levés de terrain ou observations naturalistes (*PPR, etc...*),
 - dégâts, destructions...
 - (→ *téledétection systématique à grande échelle...*)
- **Coulées**
- **Laves torrentielles** : des cours d'eaux/torrents déjà connus



Samoëns, 2016

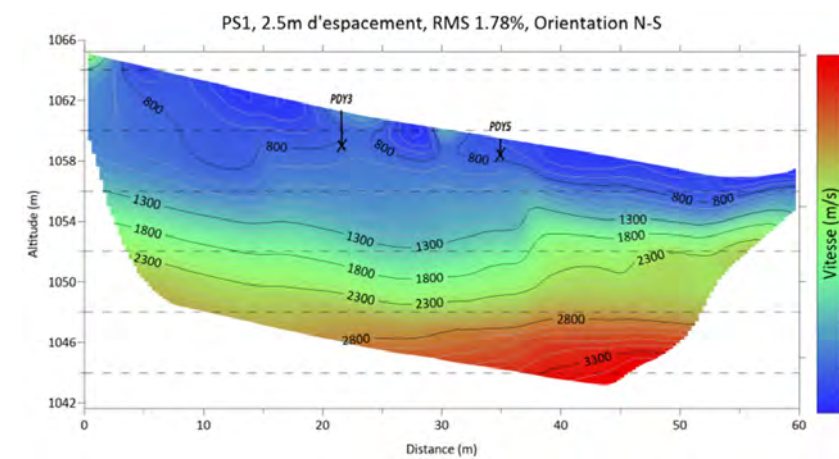
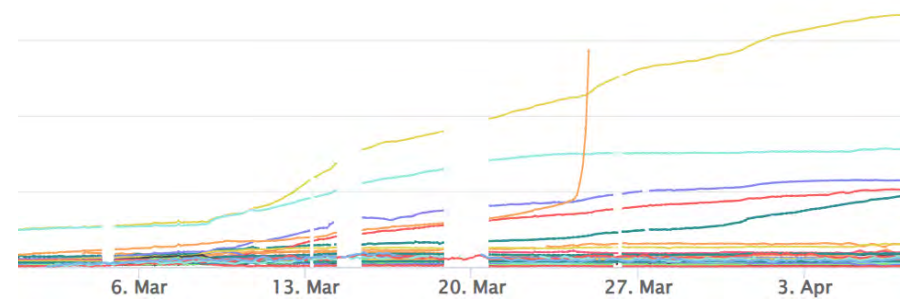
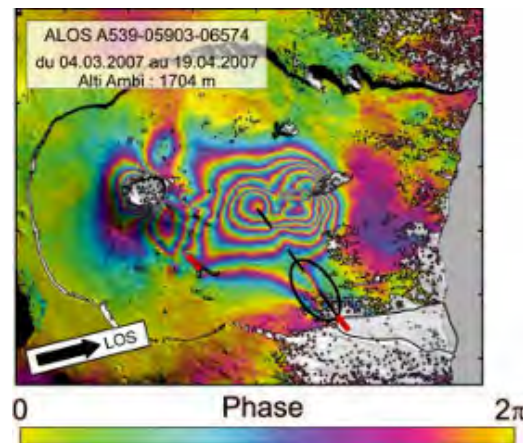
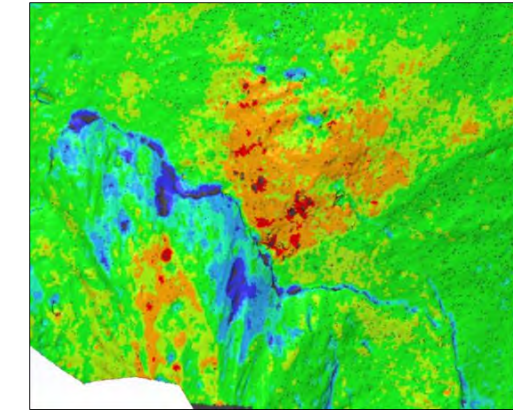
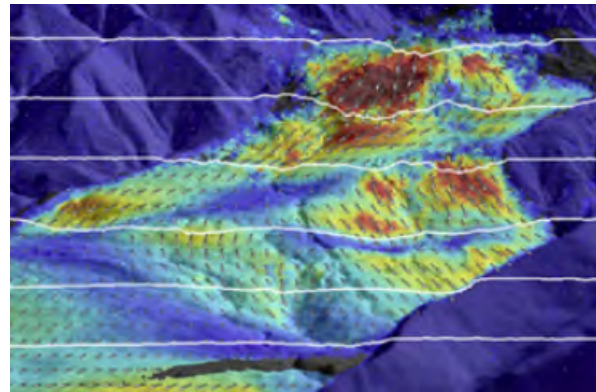


La Bérarde, 21 juin 2024



Le Reposoir, 6 nov. 2023

Panorama des méthodes de surveillance



Panorama des méthodes de surveillance

Mesure des déplacements de surface

Télédétection / mesures à distance (remote sensing)

Objet du suivi

Moyens de suivi des glissements de terrain (évolution dans le temps)	
En surface	Instrumentation in situ et instrumentation à distance leviers de terrain réguliers
En profondeur	Instrumentation géotechnique et instrumentation géophysique
Des conditions hydrauliques	Instrumentation géotechnique et instrumentation géophysique, leviers de terrain réguliers, relevés météorologiques

3 types de vecteurs :

- Satellite
- Avion /Hélico/Drone
- Support terrestre fixe

- Extensomètres
- Inclinomètres (manuel ou automatisés)
- GNSS ...

Instrum. géotechnique

Visites régulières

Emission de l'onde	Longueur d'onde	Méthodes
Méthodes passives	Optique	Corrélation d'images terrestres
		Corrélation d'images aériennes
		Corrélation d'images satellites
		Photogrammétrie terrestre
		Photogrammétrie aérienne
		Photogrammétrie satellite
Méthodes actives	Optique	Stations totales
		Scanner laser terrestre
		Scanner laser aéroporté
	Micro-ondes	Interférométrie radar satellitaire
		Corrélation d'images radar satellitaires
		Interférométrie radar terrestre
		Distancemètre radar terrestre

Cerema, 2016

Panorama des méthodes de surveillance

Autres que mesure des déplacements de surface

Type de suivi

– En surface

– En profondeur

– Hydraulique

- Instrumentation géophysique :

- **Suivi temporel (→4D) :**

- Électrique (venues d'eau, w%), PS, sismique active MASW, Vp...

- **Bruit de fond sismique :**

- suivi de la rigidité en profondeur (dV/V) → précurseur qq jours
 - écoute sismologique (micro-cracks)

Méthodes volumiques
(passives,
non destructives)

- Instrumentation géotechnique :

- **Inclinomètre :** manuel ou automatisé

- détermination de la profondeur déformée / cisailée

Méthodes ponctuelles
en forage

→ risque élevé de
cisaillement du tubage

- **Piézomètre :** manuel ou automatisé (hauteur nappe)

- **Débitmètre / limnigraphe** (débit)

- **Météo / pluviométrie**

- **Observations / suivi naturaliste(s)**

Méthodes indirectes

Intérêt des dispositifs
multi-méthodes

(surface + sous-sol + hydro)

Exemples de suivi / surveillance

Déplacements de surface

- Photogrammétrie (aéroportée/terrestre)
- Lidar (aéroporté/terrestre)
- Corrélation d'images satellites
- Interférométrie terrestre
- Station totale terrestre
- RFID
- GNSS différentiel
- Inclinomètres (surface)

En profondeur

- Rigidité du terrain (dV/V)
- Inclinomètres (forage)

Hydro

- piézomètres (forage)
- Météo / précipitations

- Réactivité (fréquence/périodicité des mesures)
- Disponibilité des données (masques : nuit, météo, végétation...)
- Mesures surfaciques, ponctuelles, en profondeur, hydrologiques
- Résolution spatiale et précision des mesures
- Mesures distantes ou in-situ

- Coût (installation, maintenance)
- Autonomie énergétique...

- Sécurisation : humaine, automatique

Avantage des dispositifs
multi-méthodes

Méthodes de surveillance des glissements

Déplacements de surface

Méthodes surfaciques

- Télédétection aéroportée (photos, Lidar...)
- Télédétection satellitaire (Insar, visible)
- GB Insar (terrestre)
- Lidar terrestre
- Photogrammétrie terrestre
- Time-lapse photo

Périodicité des mesures

- 1 mois
- 1 semaine

- 1 jour

- 1 heure
- 1 minute

Méthodes avec cibles

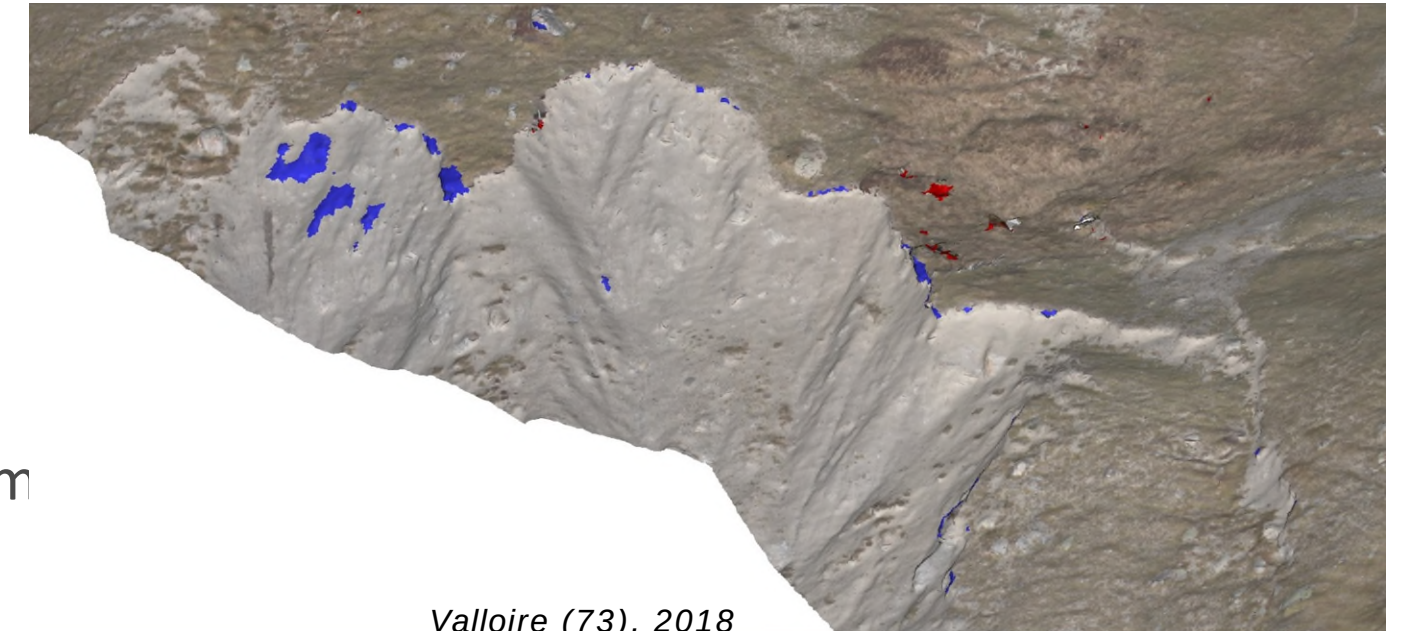
- *GNSS différentiel*
- Station totale
- RFID

Photogrammétrie aéroportée ou terrestre

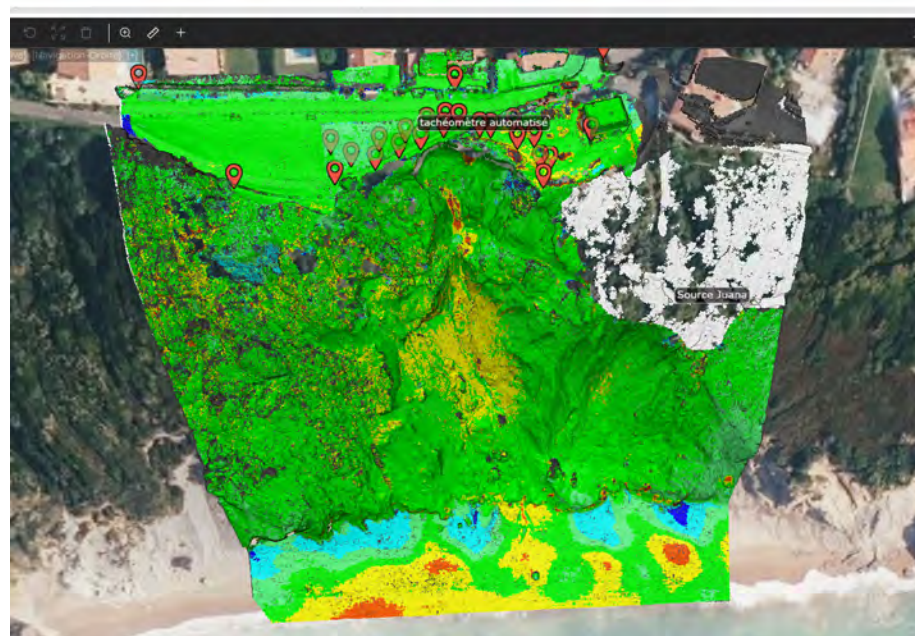
Objectif : **Suivi des déformations de surface sans végétation**



- bonne précision (cm à dm)
- MNT → calcul volumes
- bonne résolution surfacique (dm)
- Pas de cibles

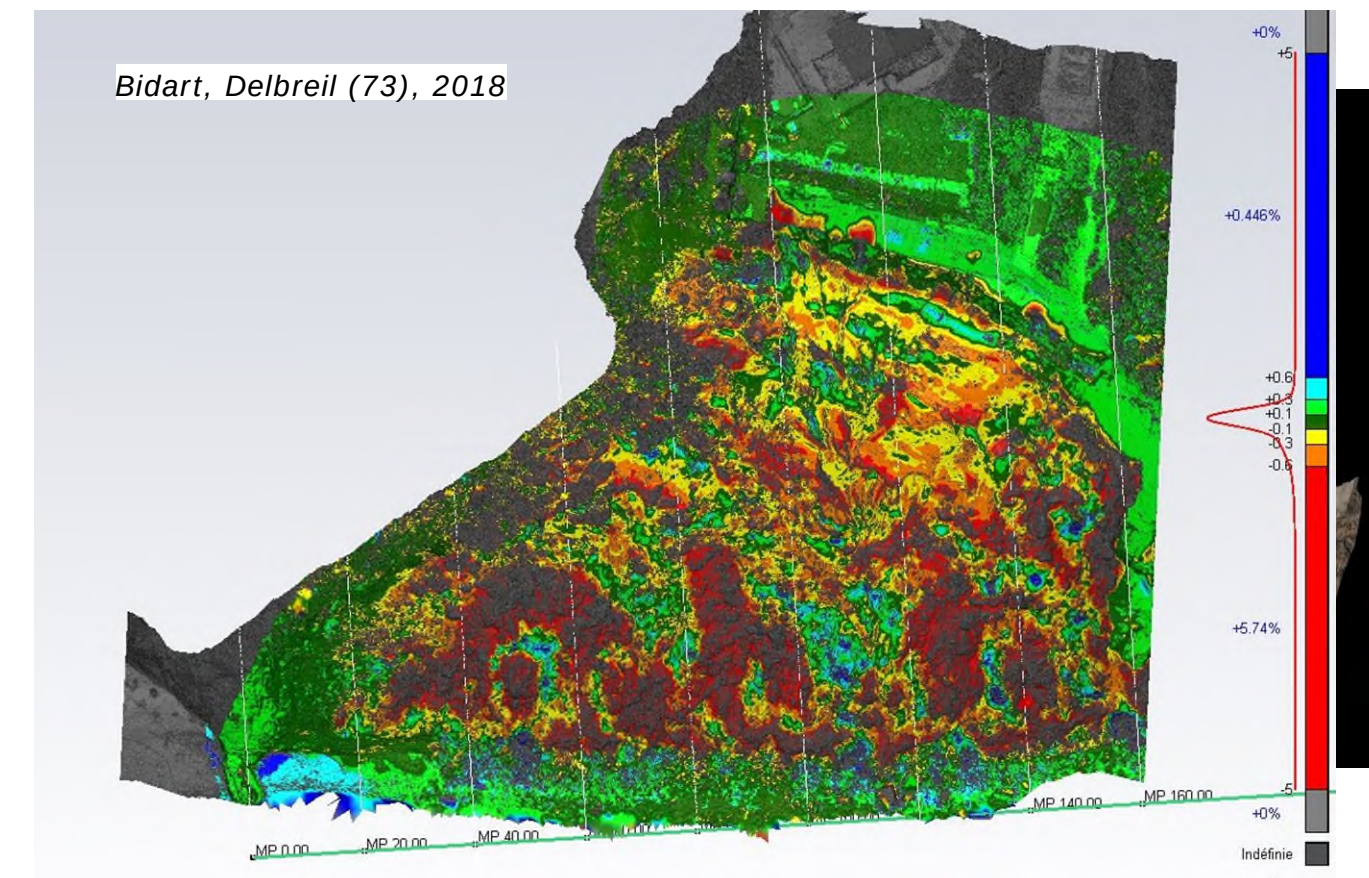


Valloire (73), 2018



- Volume de données
- Mesures espacées dans le temps
- Pas de filtrage végétation
- Sensibilité aux conditions météo

Corniche de Bidart (64), 2022



LIDAR aéroporté ou terrestre

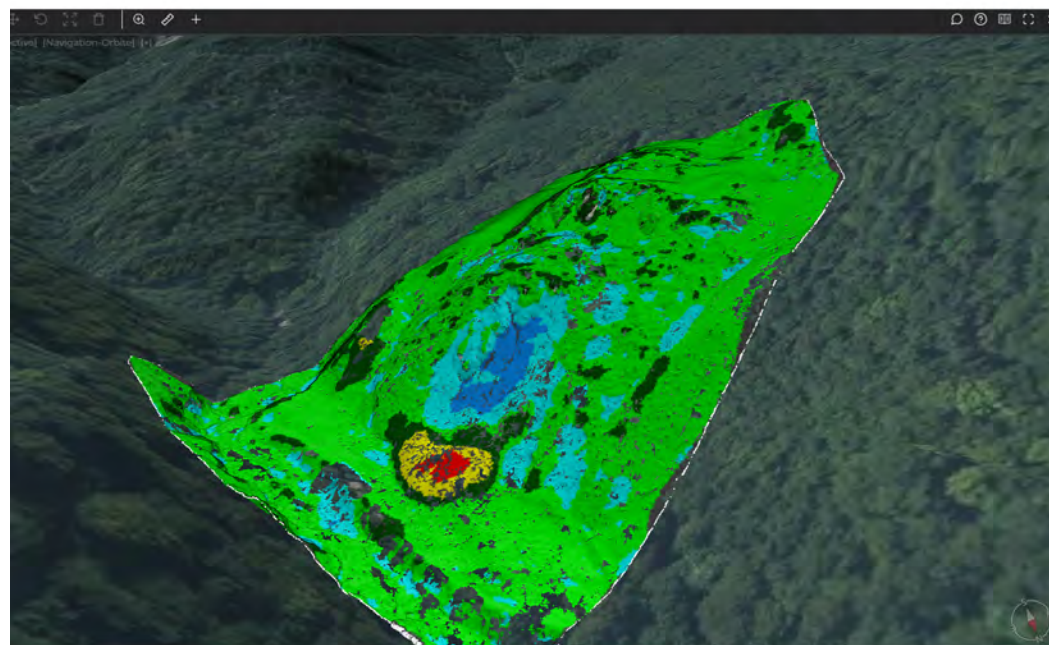
Objectif : Suivi des déformations centimétriques de surface avec (ou sans) végétation



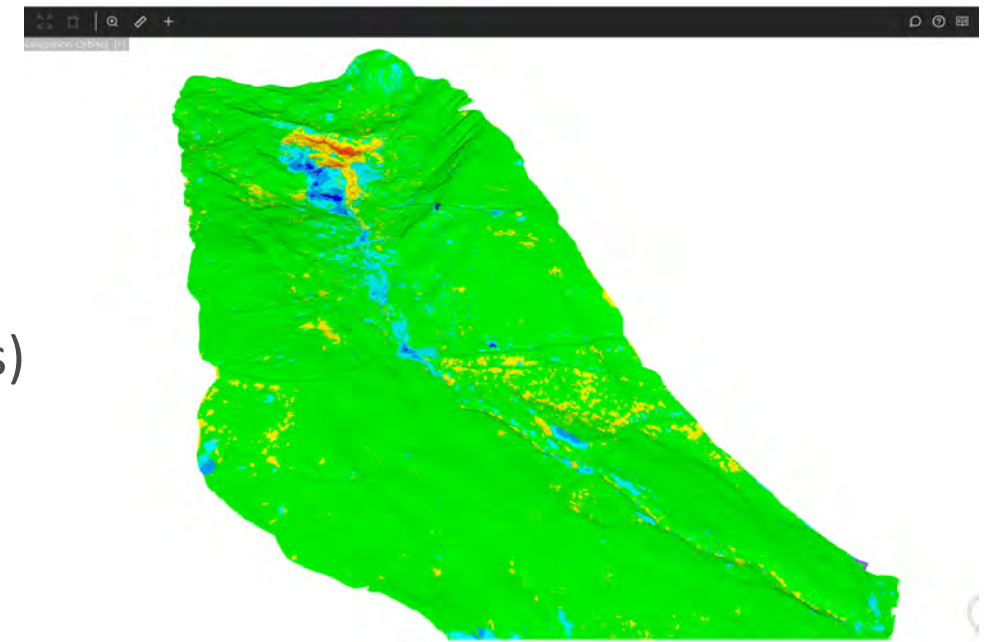
- Bonne précision (cm)
- MNT → calcul volumes
- Bonne résolution surfacique (cm à dm)
- Peu/pas sensible à la nébulosité/éclairage (possible nuit)
- Pas de cibles



- Volume de données
- Mesures espacées dans le temps (mois)



Saint-Barthélémy-de-Séchilienne (38), 2022



Le Reposoir (74), 2023

Corrélation d'images satellites

Objectif : **Suivi de déformations surfaciques, sans végétation**

Glissement de terrain de
l'Harmalière
-
série temporelle d'images
Sentinel-2

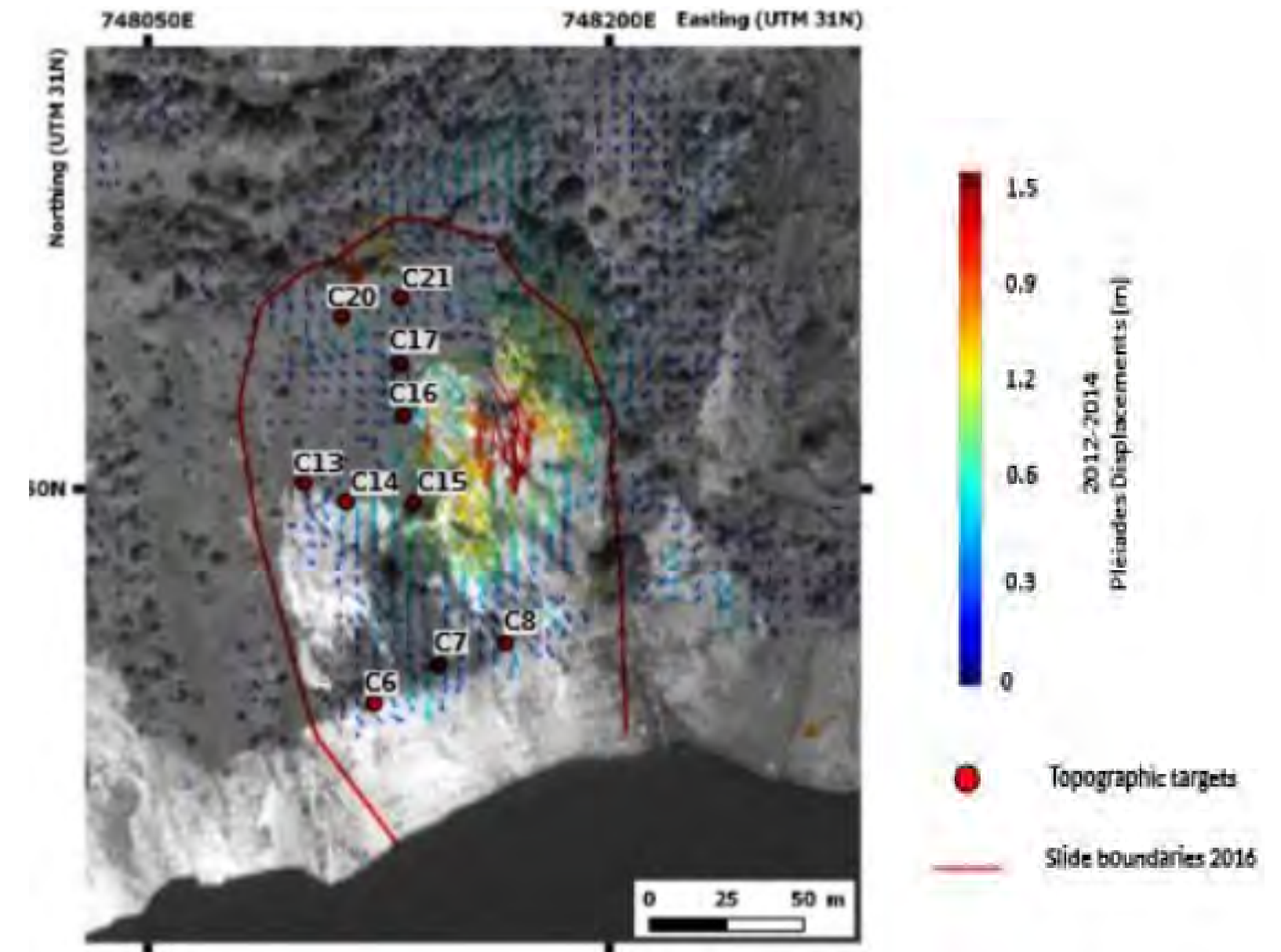
Harmalière (38), 2016 (ISTerre)



- Bonne précision (dm à m)
- pas d'instrument sur site
- faible coût



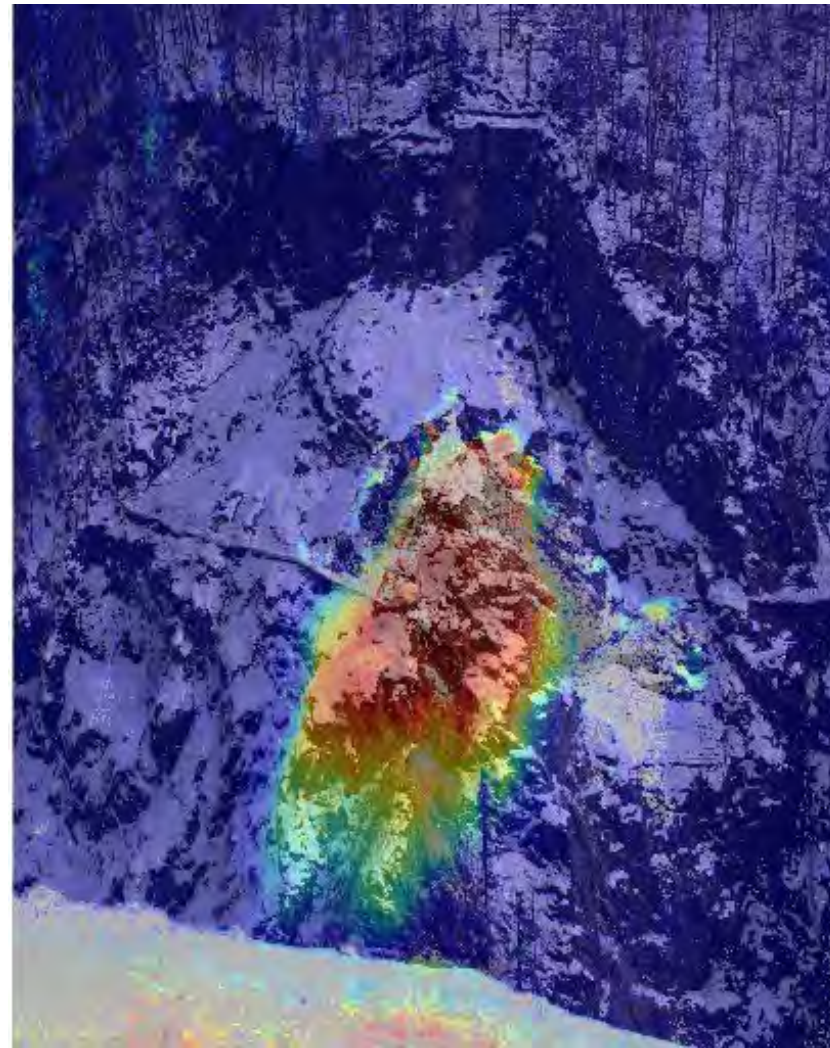
- Périodicité de quelques jours
- Résolution spatiale moyenne (pixel pluri-métrique)
- Données parfois indisponibles ou bruitées (nuit, météo,...)



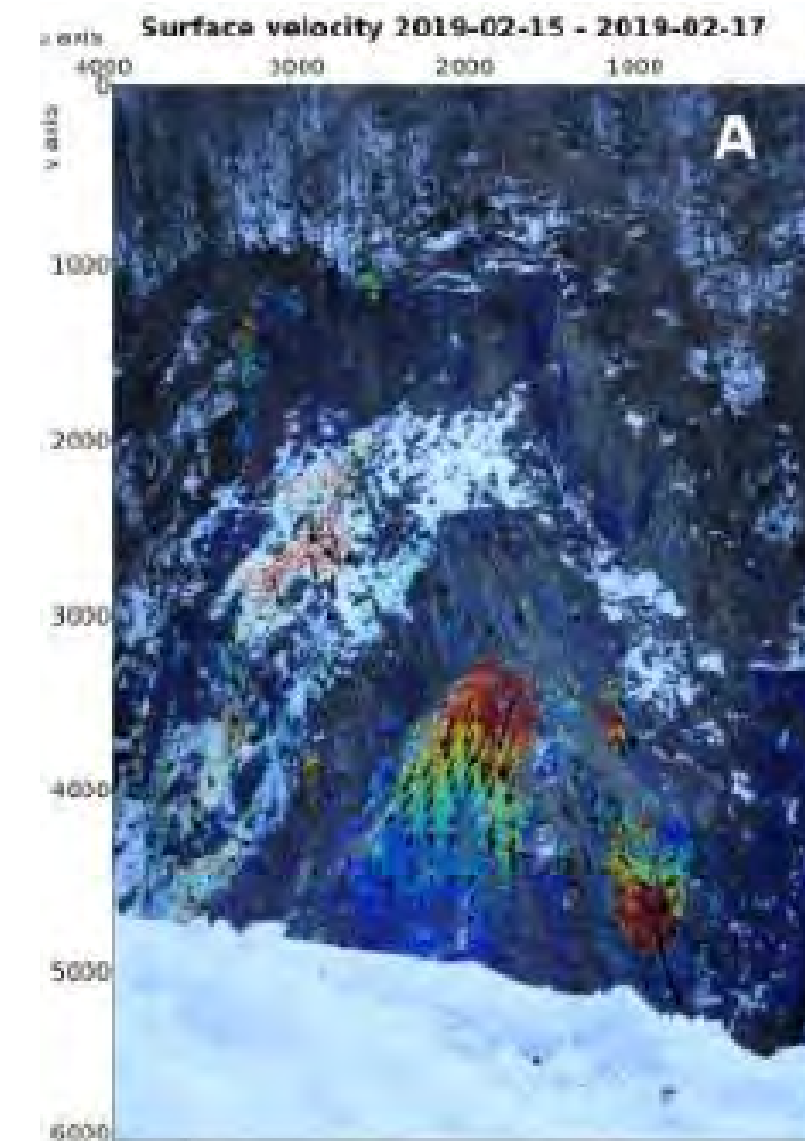
Le Chambon (38), 2014 (SAGE)

Corrélation d'images terrestres

Objectif : **Suivi de déformations surfaciques, sans végétation**



09/02/2019, 11-12h



Val d'Arly (73), 2019 (SAGE)



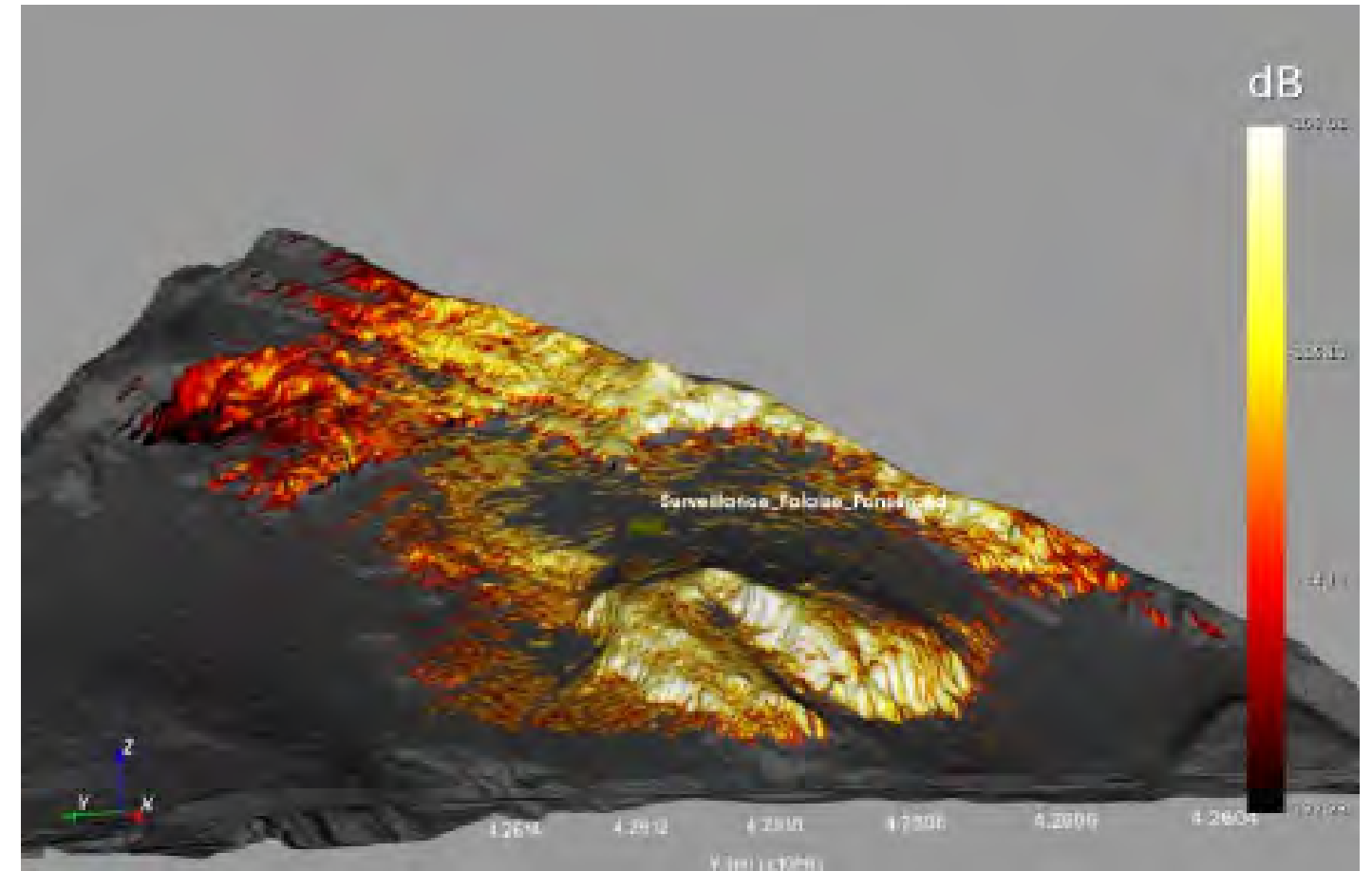
- Bonne précision (cm)
- Cartes de vitesses de déformation (2D)
- Périodicité rapide



- Données pas toujours disponible (nuit,...)
- Données bruitées (météo...)

Interférométrie Radar terrestre (GB InSAR)

Objectif : **Suivi des déformations millimétriques de surface avec (sans) végétation**



- Très bonne précision (mm)
- Très bonne périodicité (qq minutes)
- Suivi / alertes



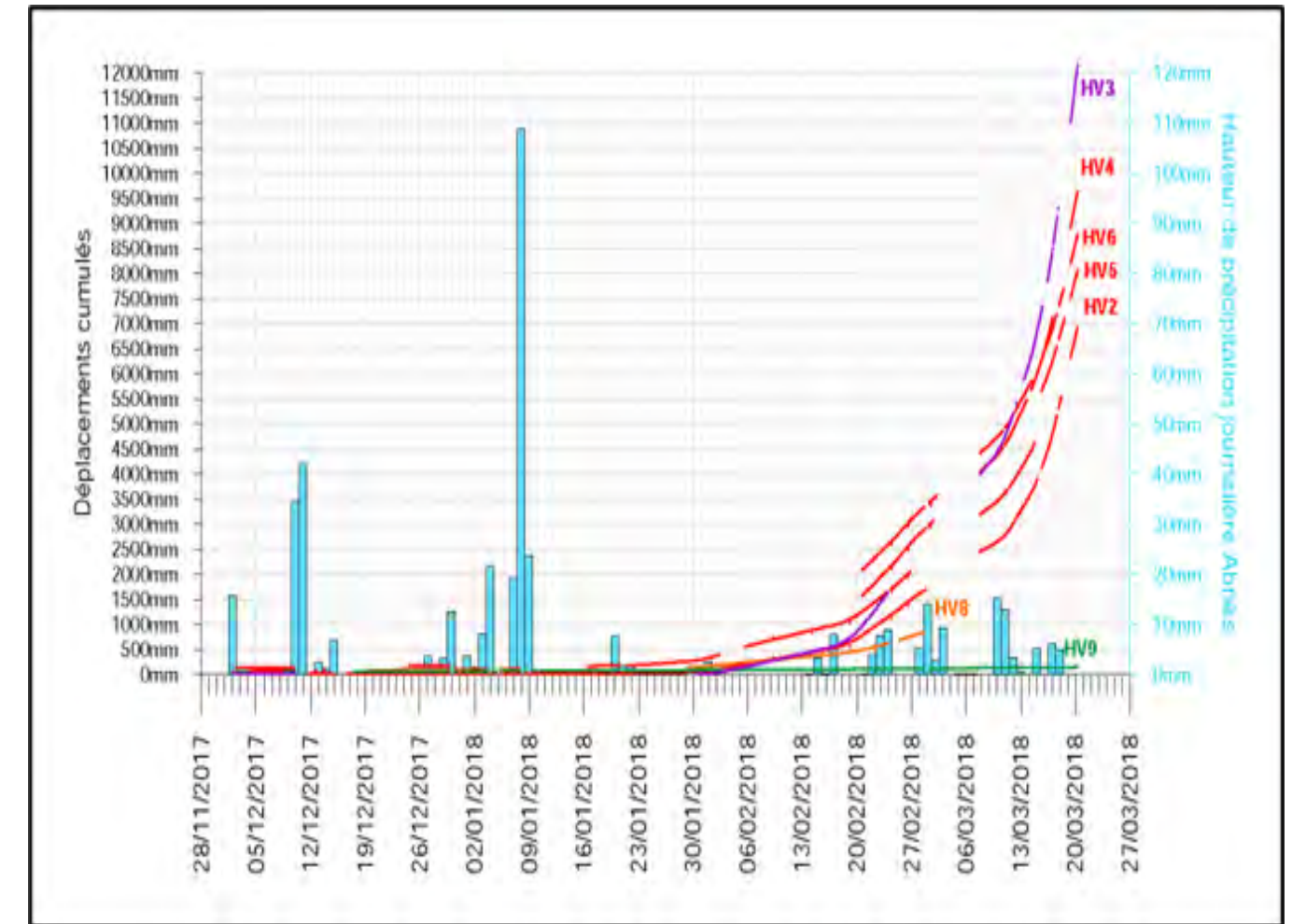
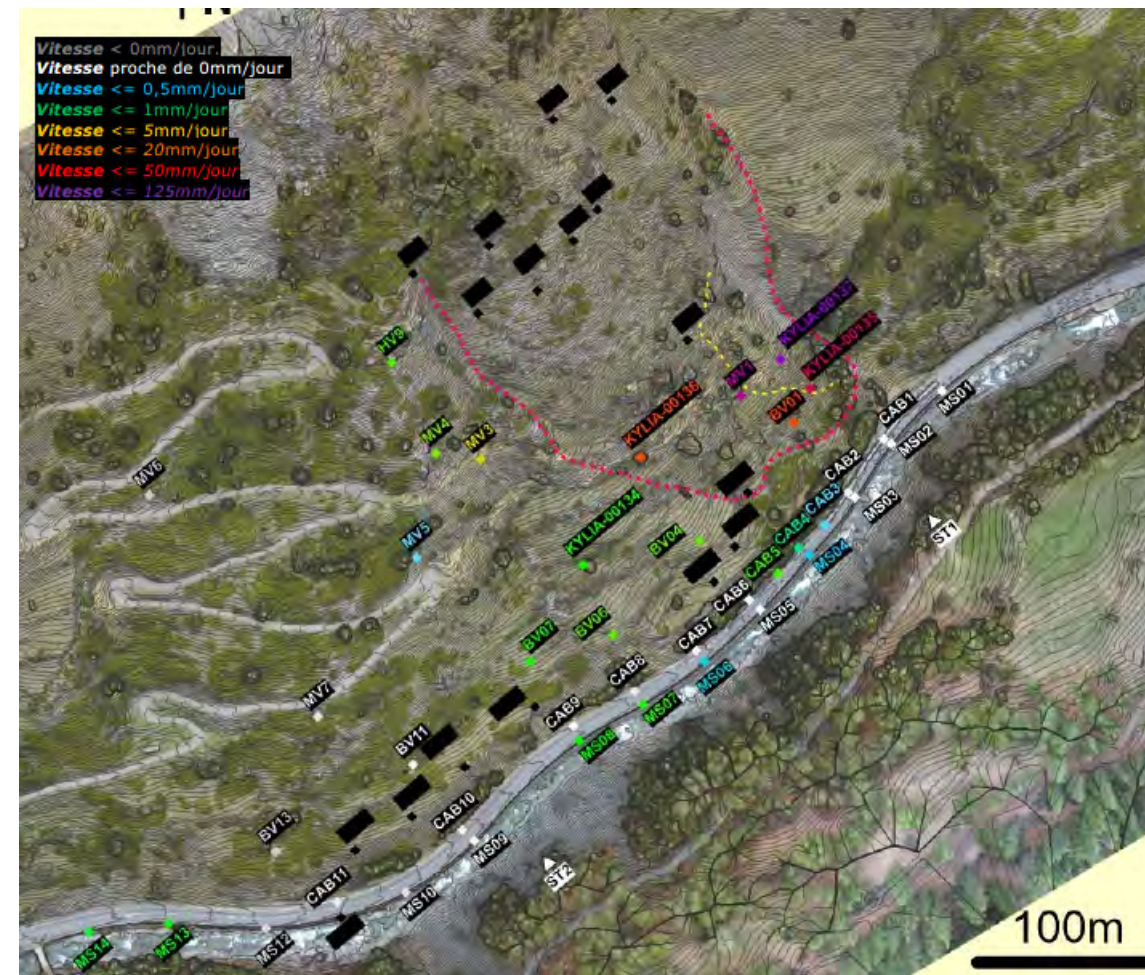
- Volume de données (brutes) très important
- Résolution spatiale moyenne (pixel pluri-métrique)
- Bruit lié aux mouvements de la végétation (vent)

Station totale terrestre

Objectif : **Suivi de déformations millimétriques sur cibles, sans végétation**



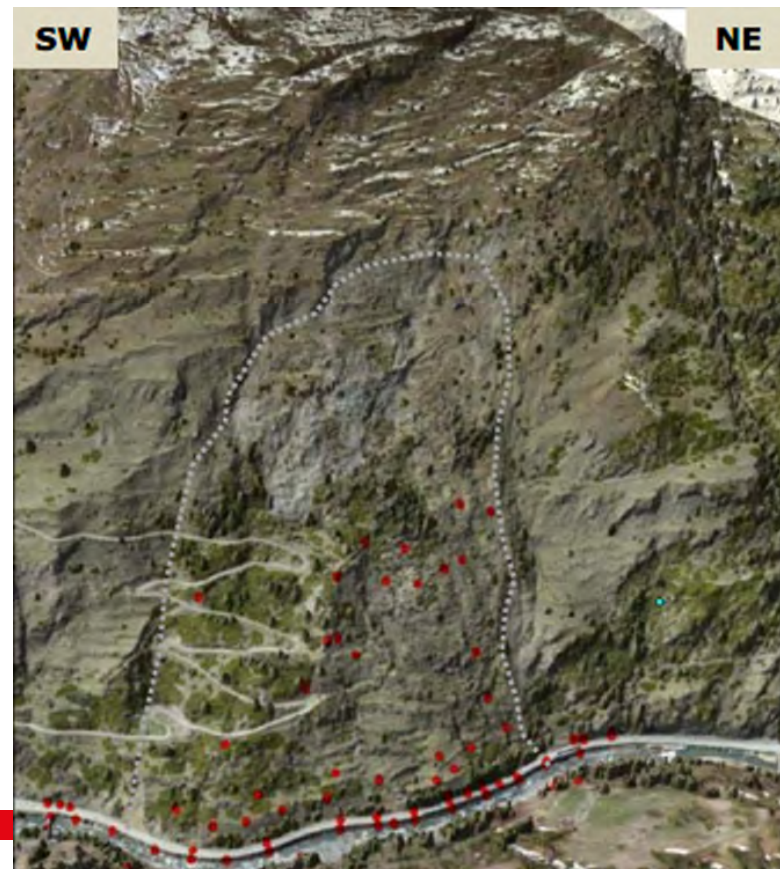
Pas de l'Ours (05),
Fév. Mars 2018



- Très bonne précision (mm à cm)
- Bonne périodicité (10 -60 minutes)

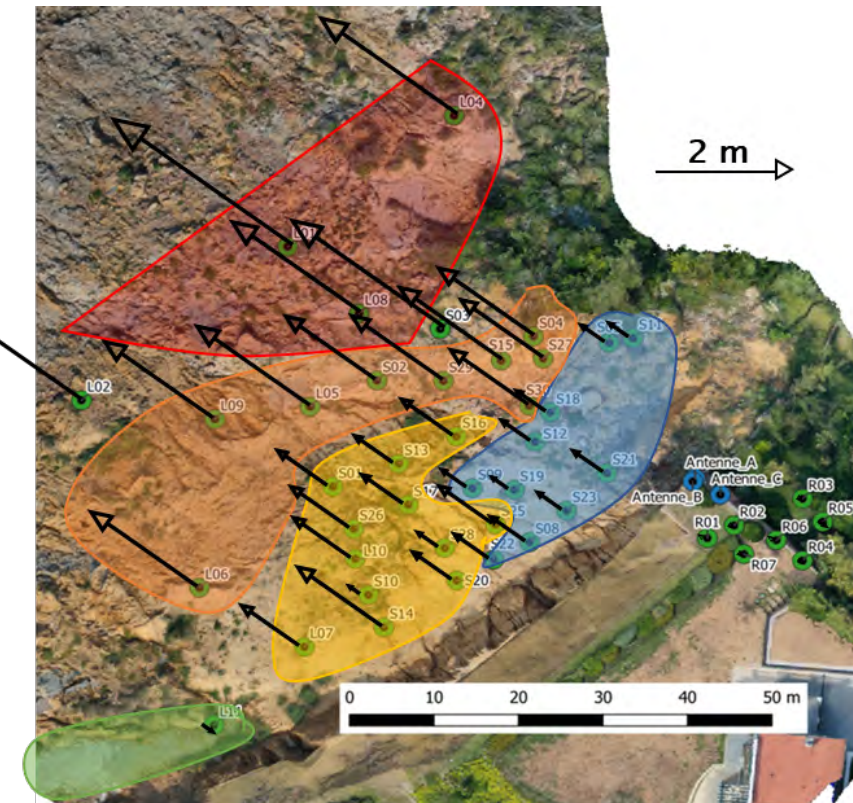
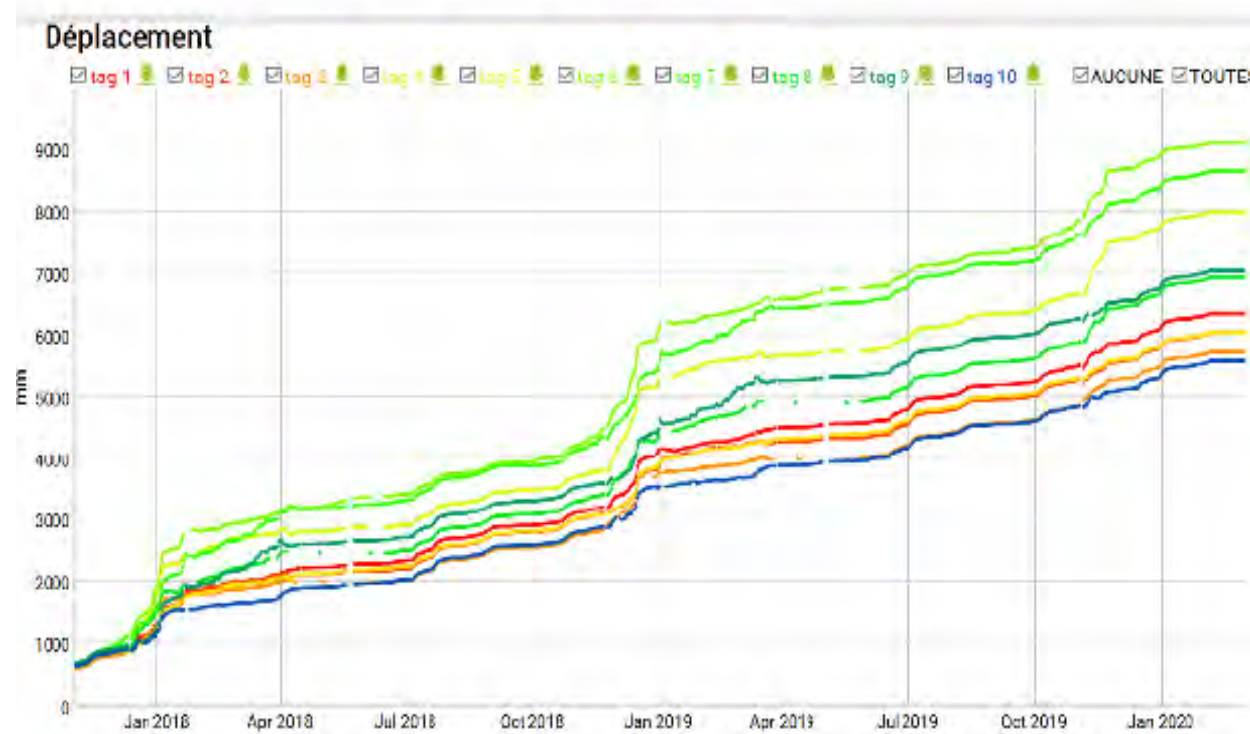
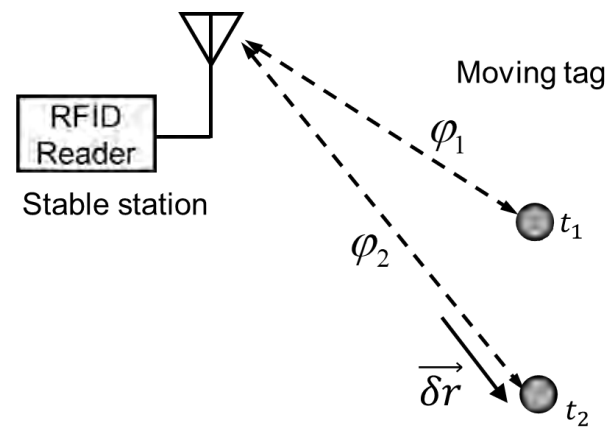


- Masque possible par végétation (vent)
- Corrections environnementales nécessaires



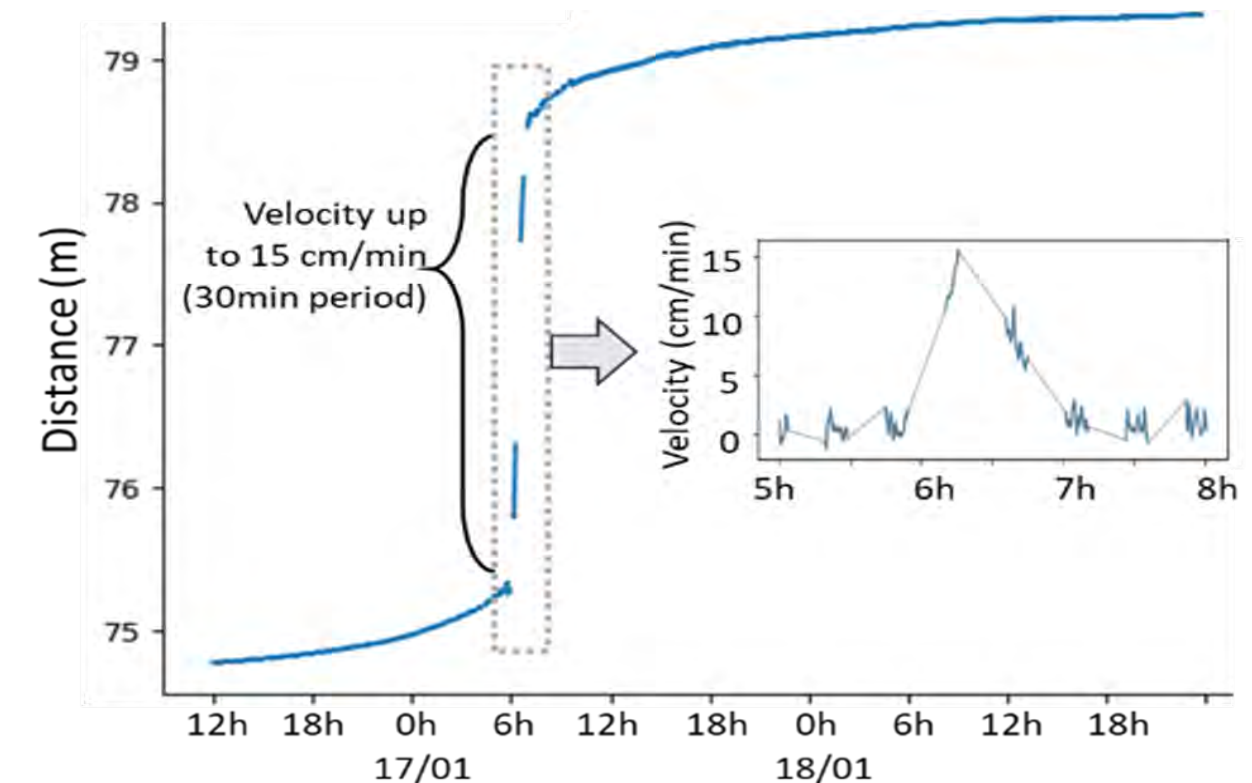
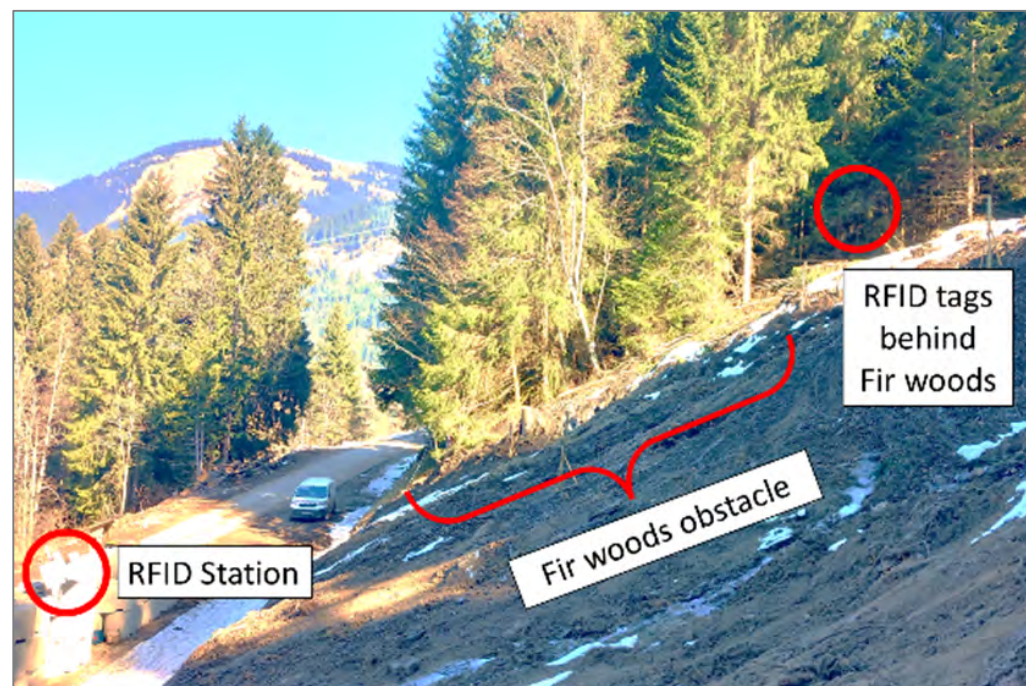
Mesures déplacement par RFID

Objectif : Suivi de déformations centimétriques sur cibles, avec (ou sans) végétation



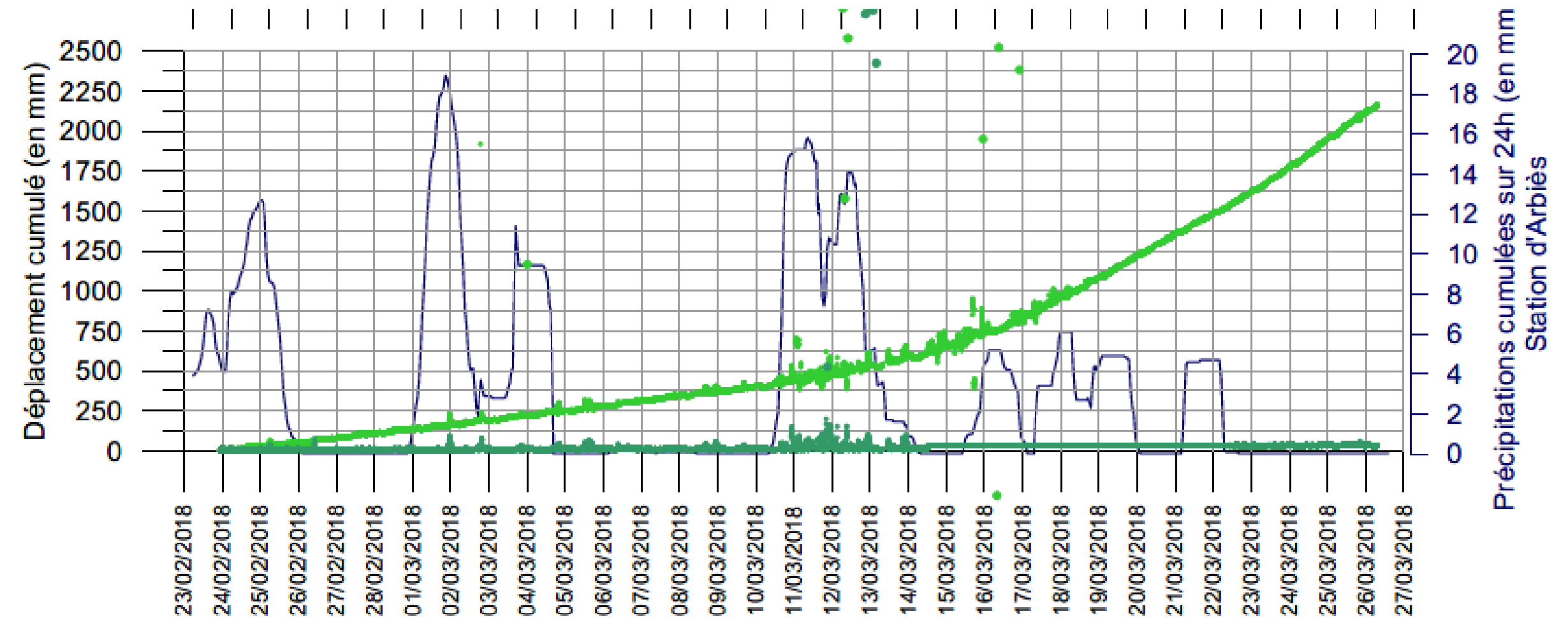
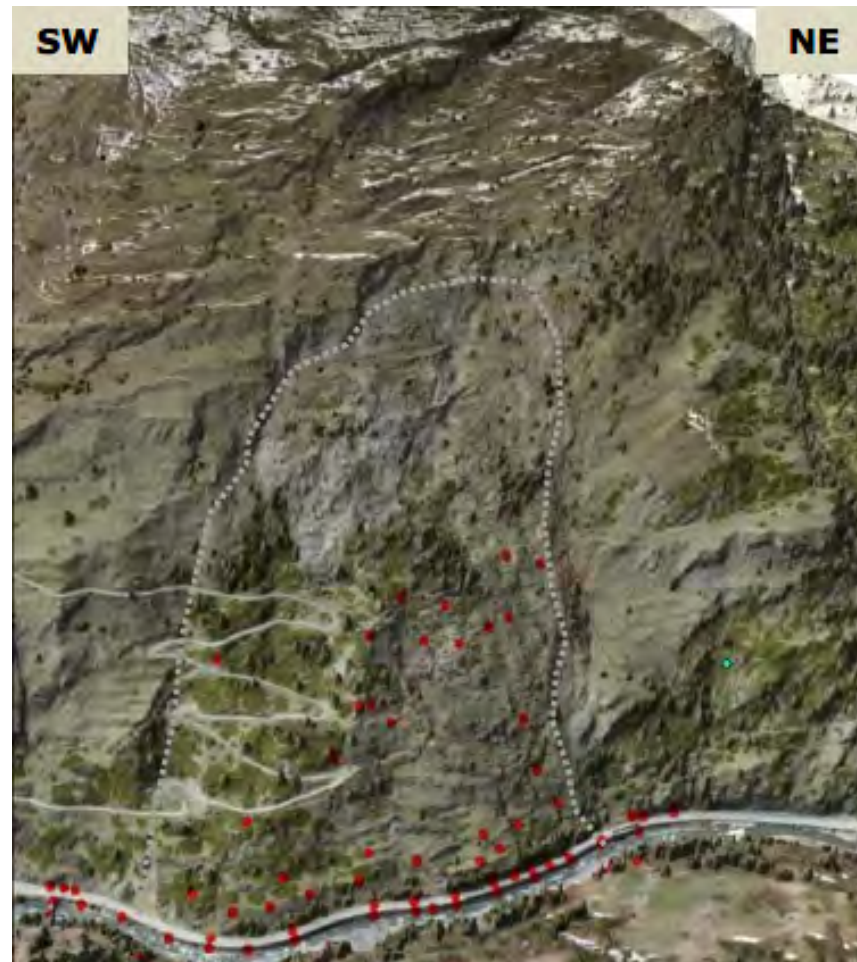
- Bonne précision de mesure (cm)
- Adapté aux mouvements rapides (périodicité : qq sec à min)
- Possible avec végétation
- Robuste et peu coûteux

- portée limitée (~100 m)



D-GNSS

Objectif : **Suivi de déformations ponctuel autonome (sans végétation)**



Pas de l'Ours (05), 2018



- Bonne précision (mm à cm)
- Balises autonomes
- Simplicité d'utilisation

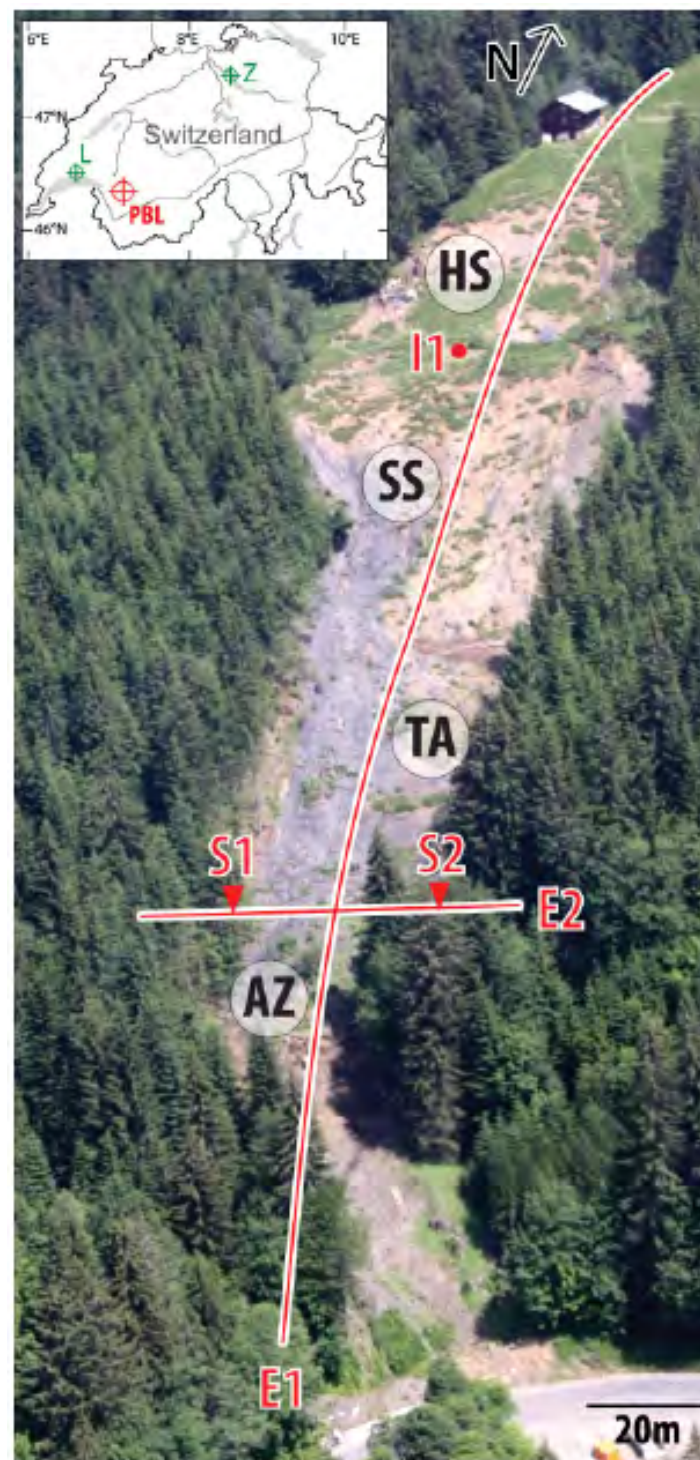


- Périodicité journalière
- Résolution spatiale moyenne (pixel pluri-métrique)
- Données parfois bruitées (météo,...)



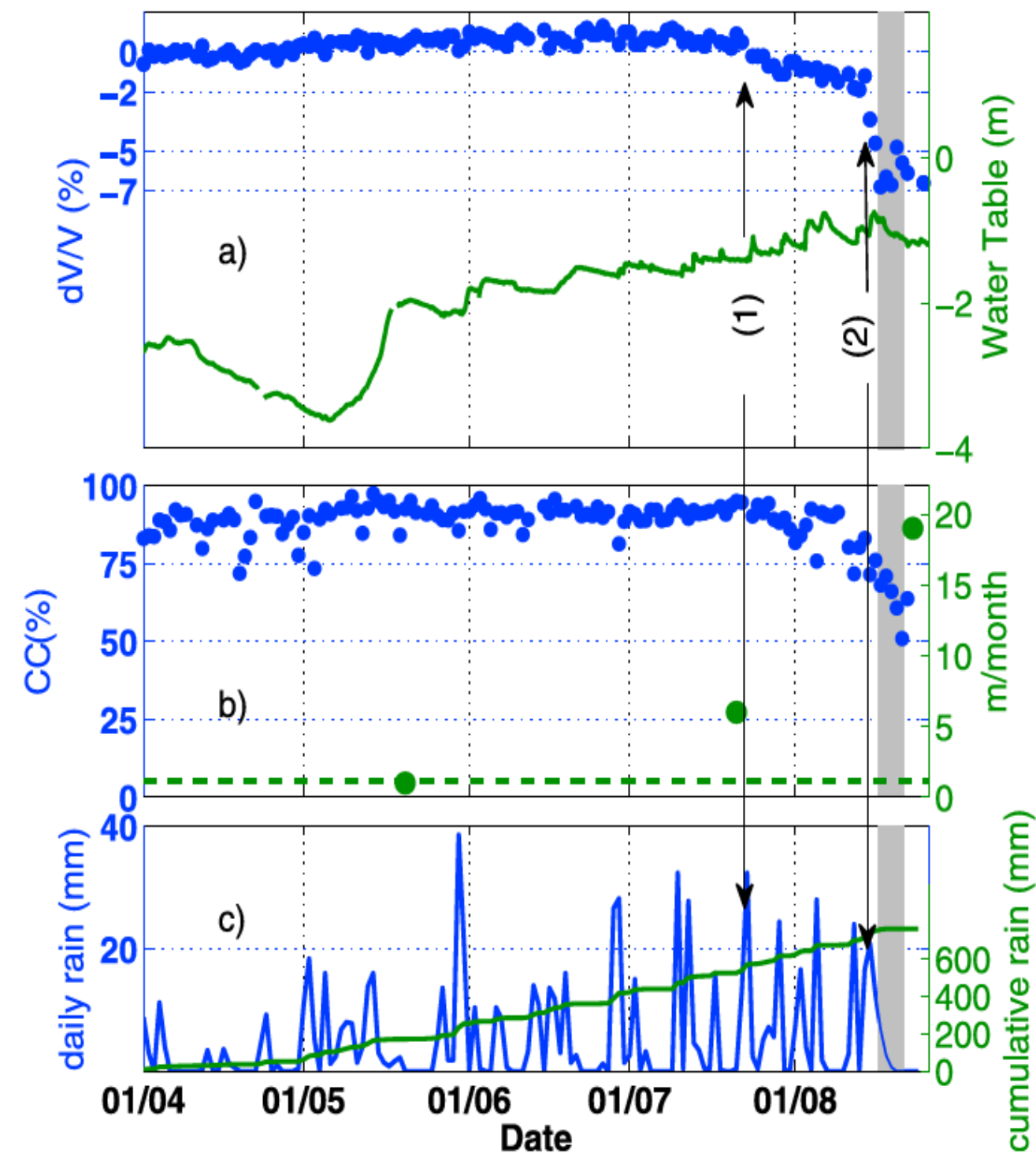
Interférométrie sismique (dV/V)

Objectif : Suivi de la rigidité du terrain en profondeur (précurseur)



- Précurseur (qq jours, qq % baisse)
- Profondeur différentes, fct (Fréq.)
- complémentaire des mesures de surface

- Volume de données
- Données parfois bruitées (T°, météo,...)



Pont-Bourquin (CH), 2010 (ISTerre)

Inclinomètres en forage

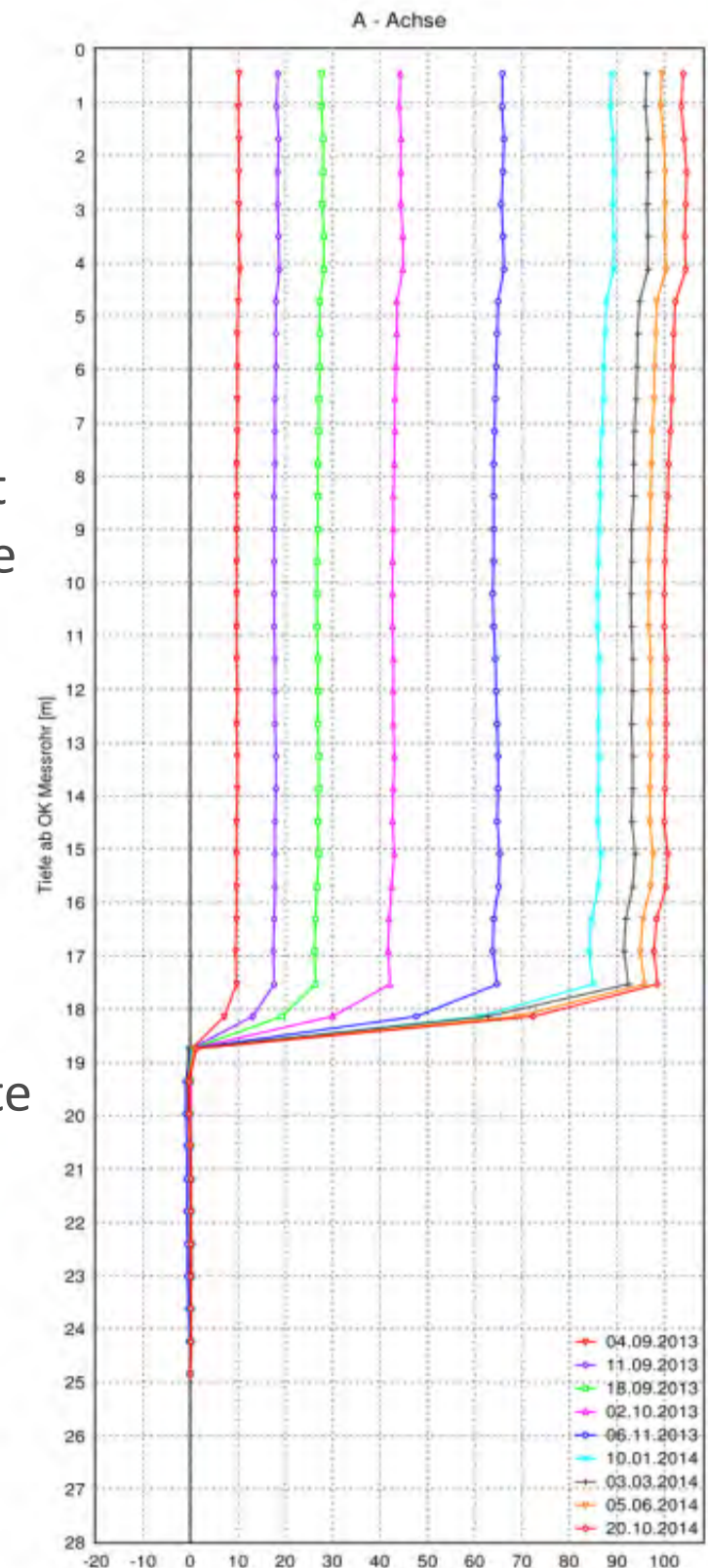
Objectif : Suivi de la déformation du terrain en fonction de la profondeur



- Bonne image de la profondeur du glissement
- Bonne résolution temporelle en automatique
- Complémentaire des mesures de surface



- Risque important de cisaillement du tube
- Réalisation de forage en zone glissée délicate
- Données espacées en version manuelle



Piézomètres

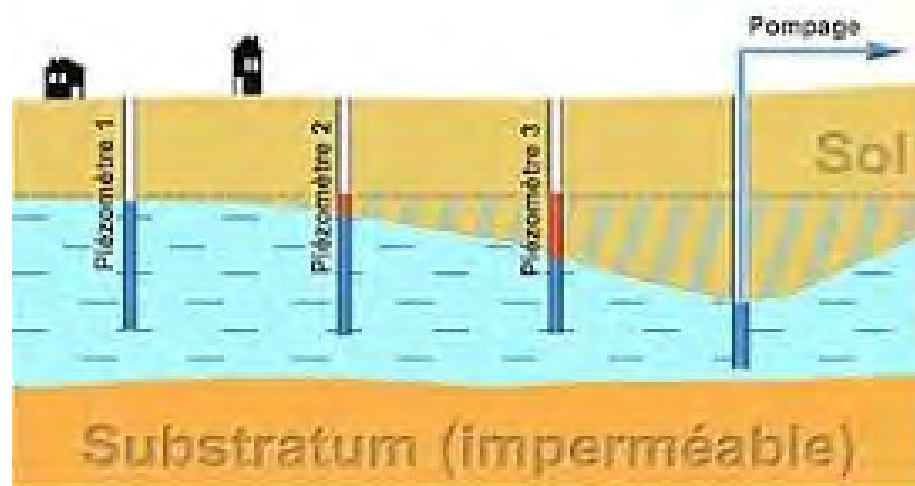
Objectif : **Suivi de la hauteur de nappe / d'eau en profondeur (déclencheur)**



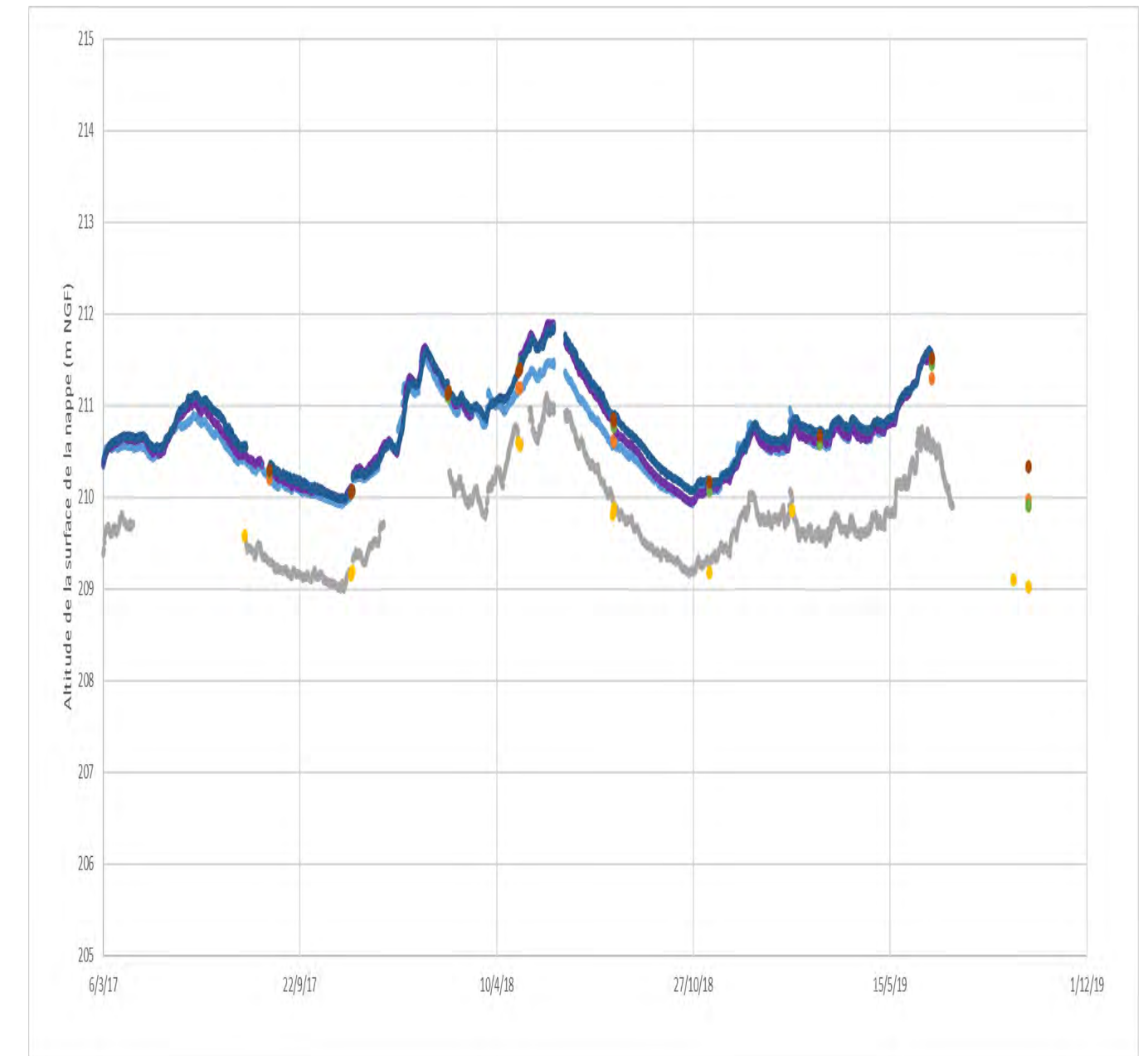
- Bonne image de la profondeur de la nappe (si existante)
- Bonne résolution temporelle en automatique
- Complémentaire des mesures de surface



- Risque important de cisaillement du tube
- Réalisation de forage en zone glissée délicate
- Données espacées en version manuelle



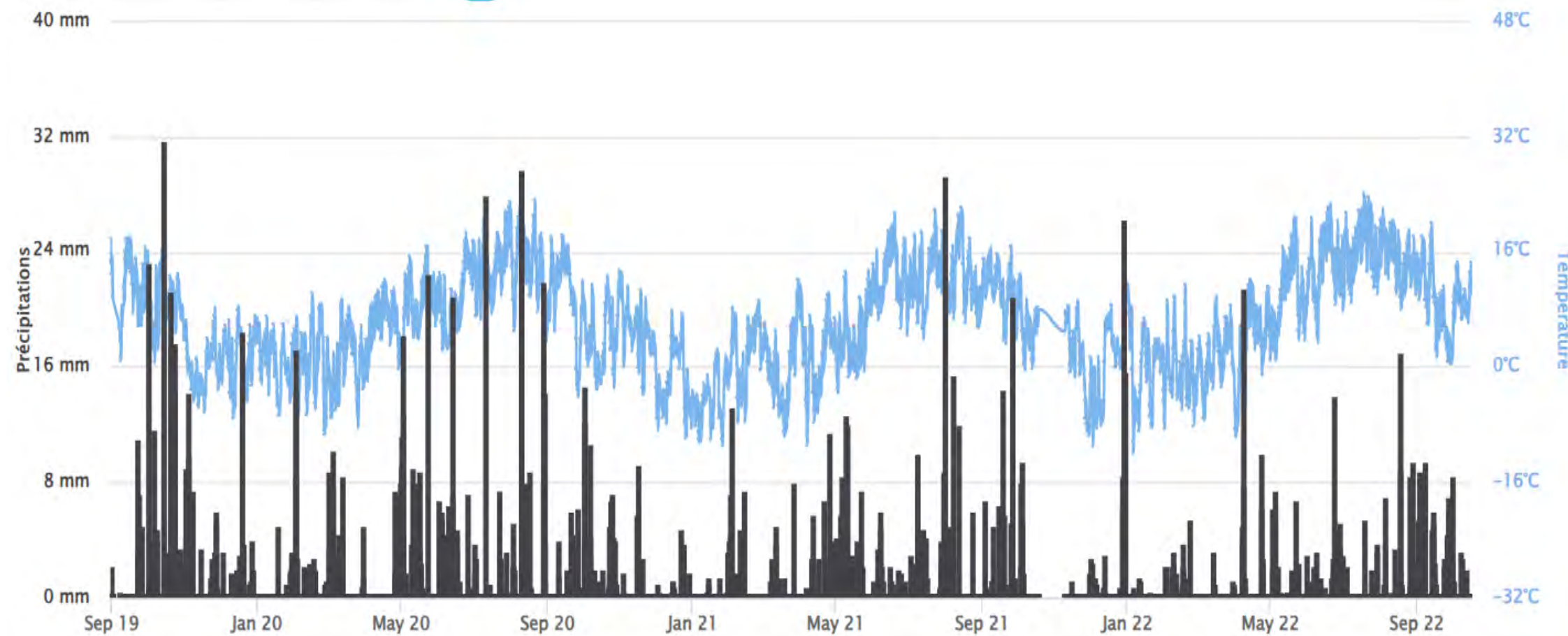
Wikipédia



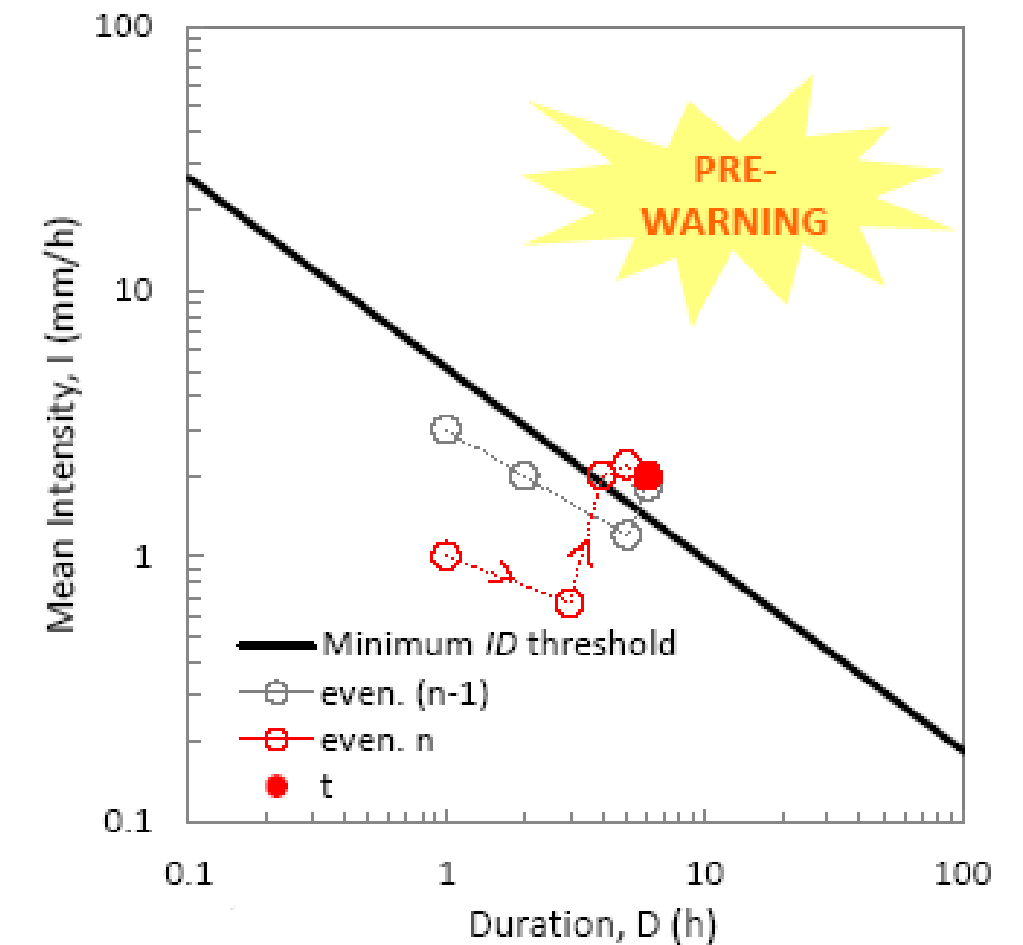
Obs'eau (38), 2019 (UGA/Phitem)

Suivi météo

Objectif : **Précipitations (modèles prévisionnel fiables, vigilance, alertes...)**



Valloire (73), 2019-2022 (SIMOTER 2)



INRAE (SIMOTER 1)



- Anticipation (vigilance, alerte...)
- Bonne résolution temporelle
- Prévisions toujours disponibles (APIC...)
- Mesures locales très simples
- Analyse a posteriori



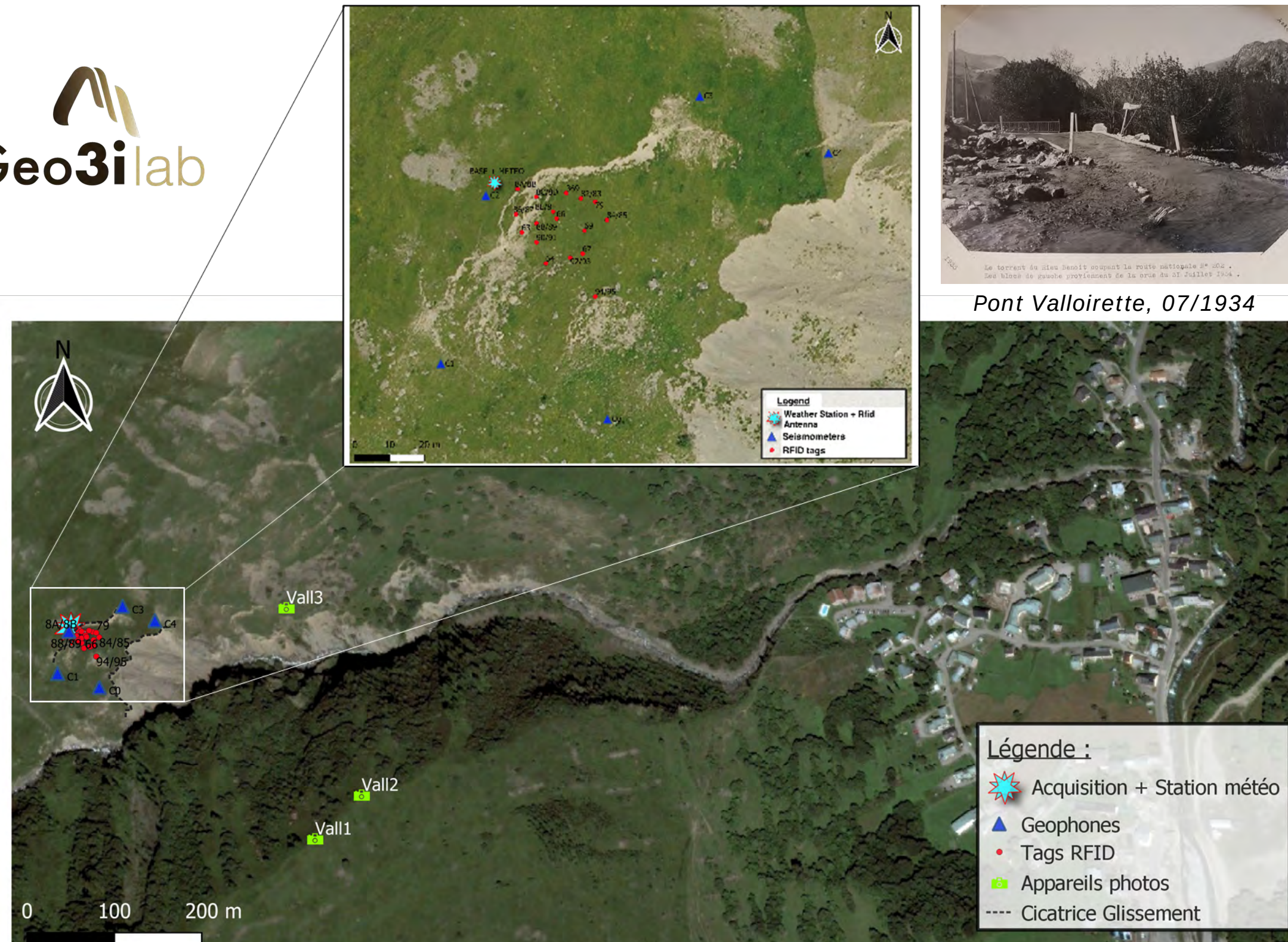
- Mesures indirectes
- besoin de calage

→ Détermination d'un seuil d'alerte (spécifique à un site donné) basé sur la météo

Suivi multi-méthodes : Valloire (73)

Projet POIA SIMOTER 1 & 2 (collaboration **ISTERRE** / **INRAE** / **GEOLITHE**)

Geo3ilab

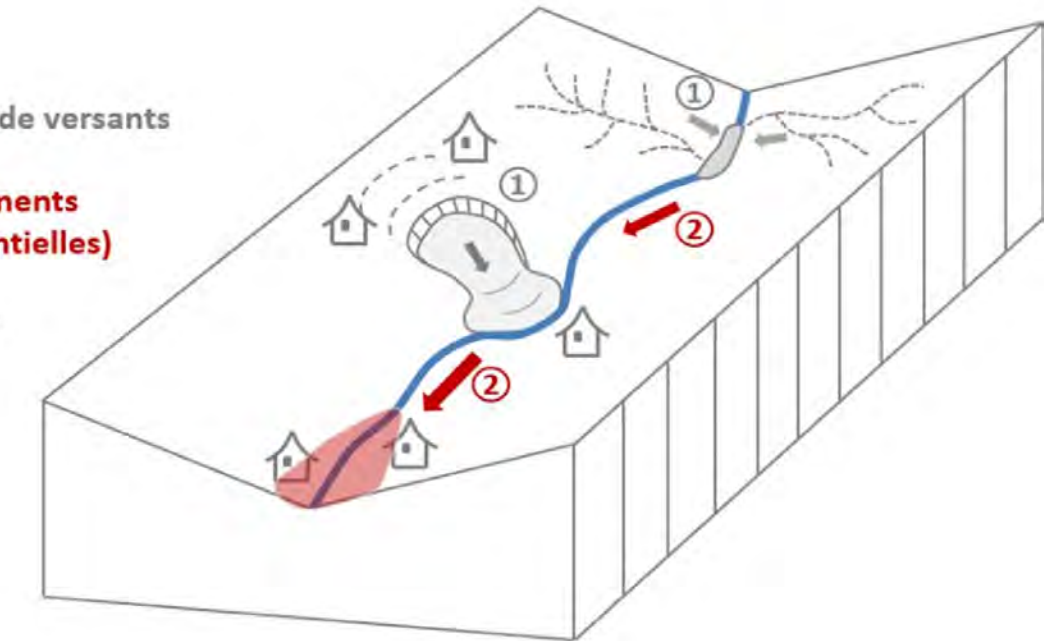


Pont Valloirette, 07/1934

① érosion de versants

② écoulements
(laves torrentielles)

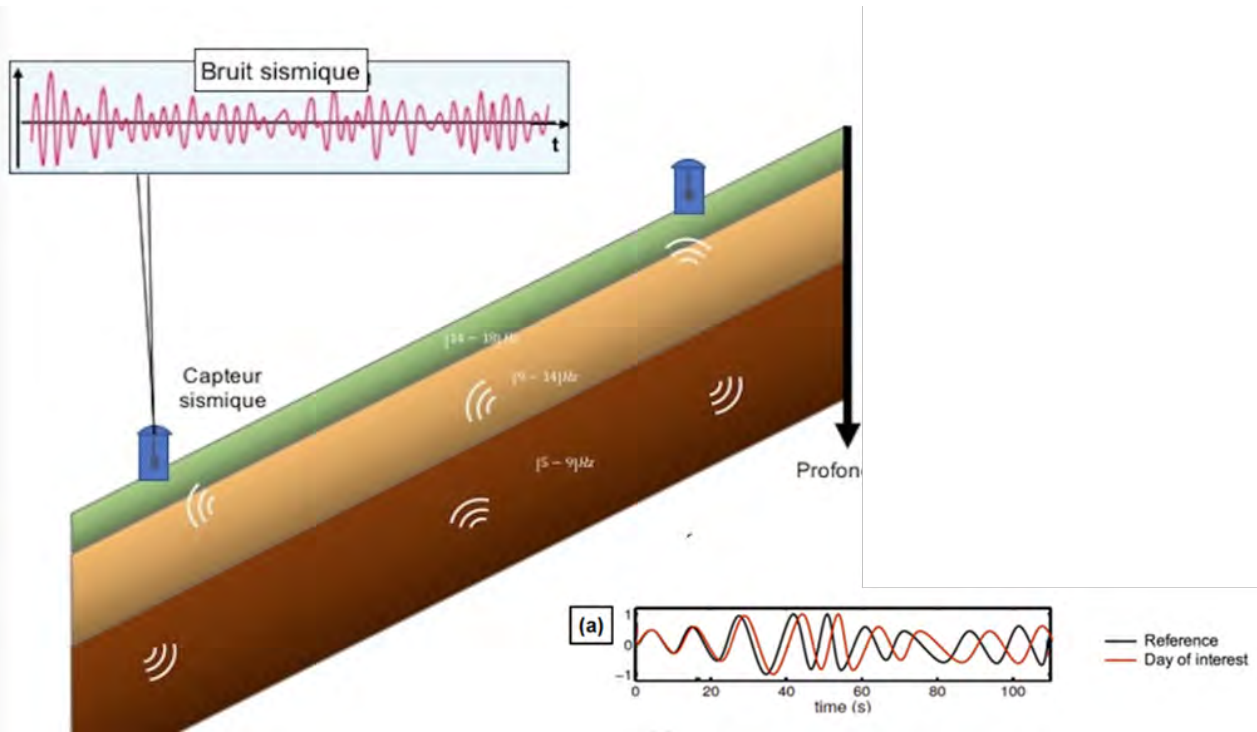
🏠 enjeux



Hameau des Verneys, Valloire (73), 09/2011

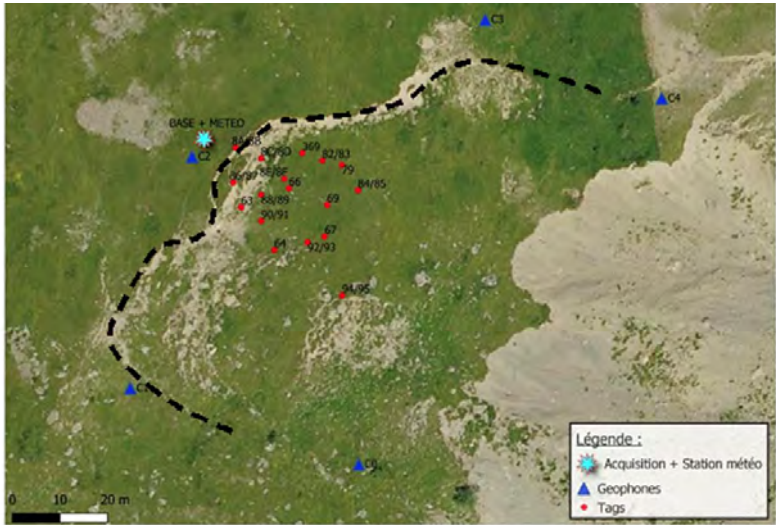
Suivi multi-méthodes : Valloire (73)

Projet POIA SIMOTER 1 & 2 (collaboration ISTERRE / INRAE / GEOLITHE)



Instrumentation	Zone observée	Observable	Intérêt
Sismologique	haut + corps glissement	dV/V % (variation relative de la vitesse sismique)	« Rigidité » du terrain (alerte amont)
RFID	Amont glissement	Déplacements (> dm)	Mouvement partie haute, affaissement
Météorologique	versant (haut glissement)	Pluie, vent, température	Interprétation autres mesures
Photos	haut + bas glissement	Evolution visuelle du terrain en surface	Estimation érosion / dépôt mobilisable

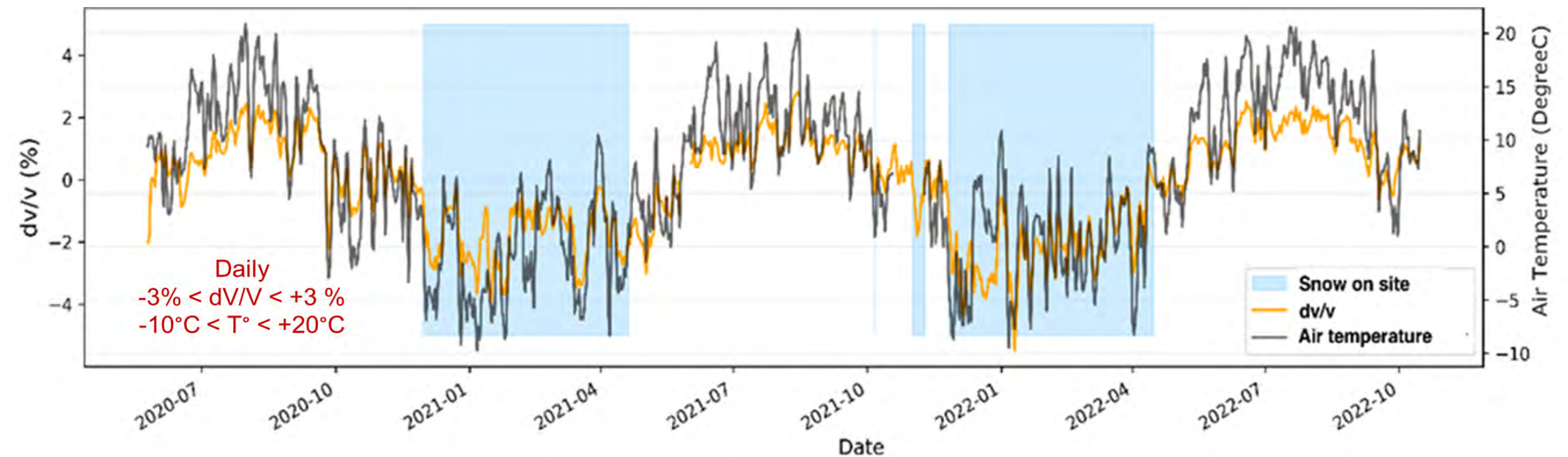
+ débitmètre et capteur acoustique sur Rieu Benoît (INRAE)



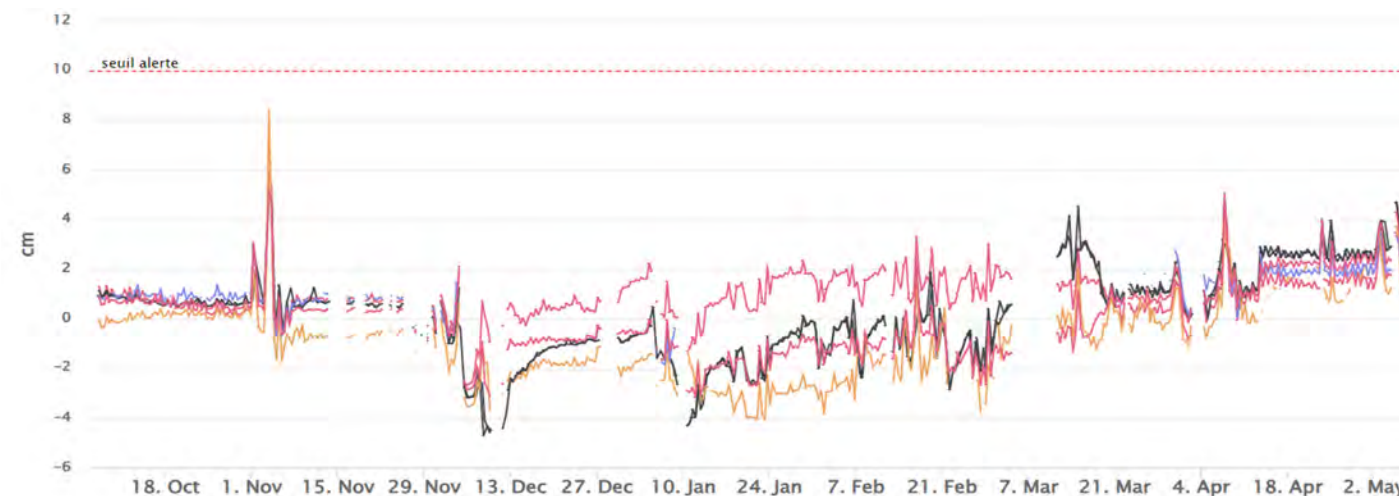
Suivi multi-méthodes : Valloire (73)

Projet POIA SIMOTER 1 & 2 (collaboration **ISTERRE / INRAE / GEOLITHE**)

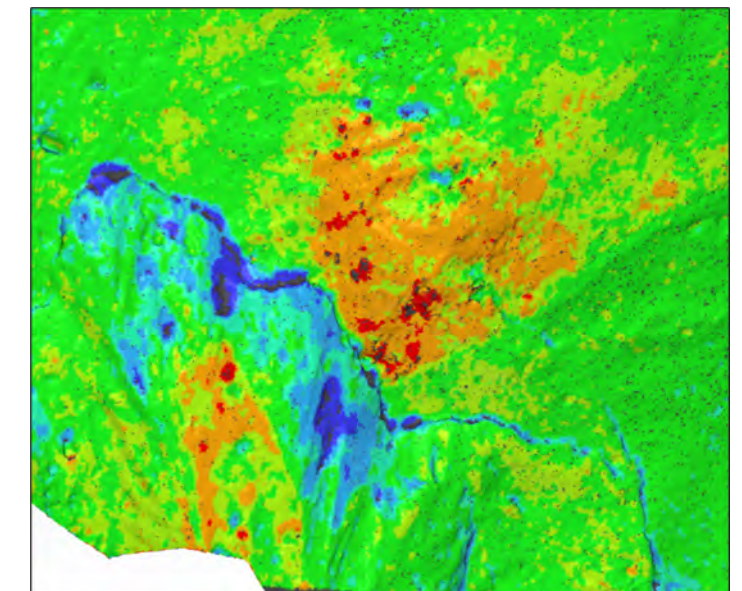
dV/V :
corrélation avec
la température



RFID :
Stabilité
(amélioration
du dispositif)



Photogrammétrie :
Zones d'ablation
à la marge

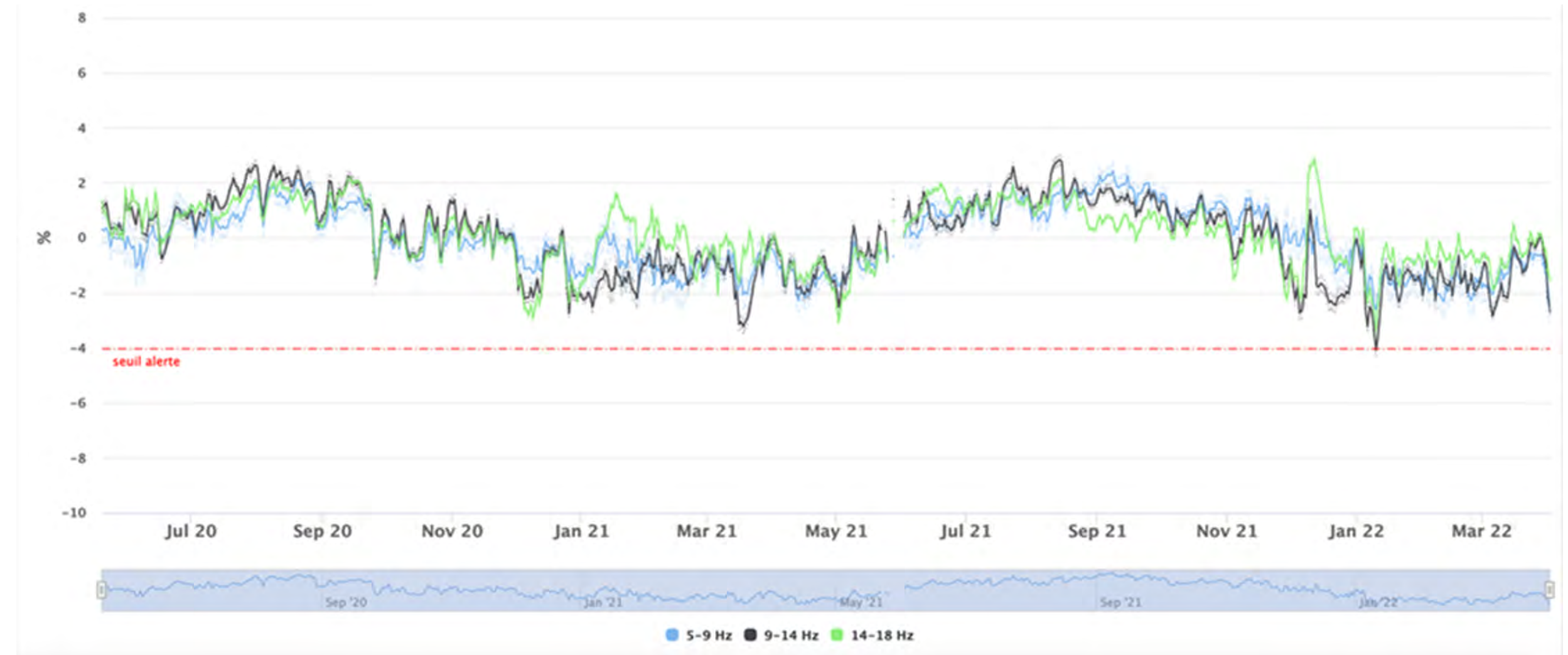


**Une instrumentation innovante, en contexte difficile d'altitude,
suivie en continue à distance sur un portail de surveillance sécurisé (EVORISK)**

Seuils d'alertes / alarme

Pertinence de la valeur des seuils : vigilance / alerte / alarme

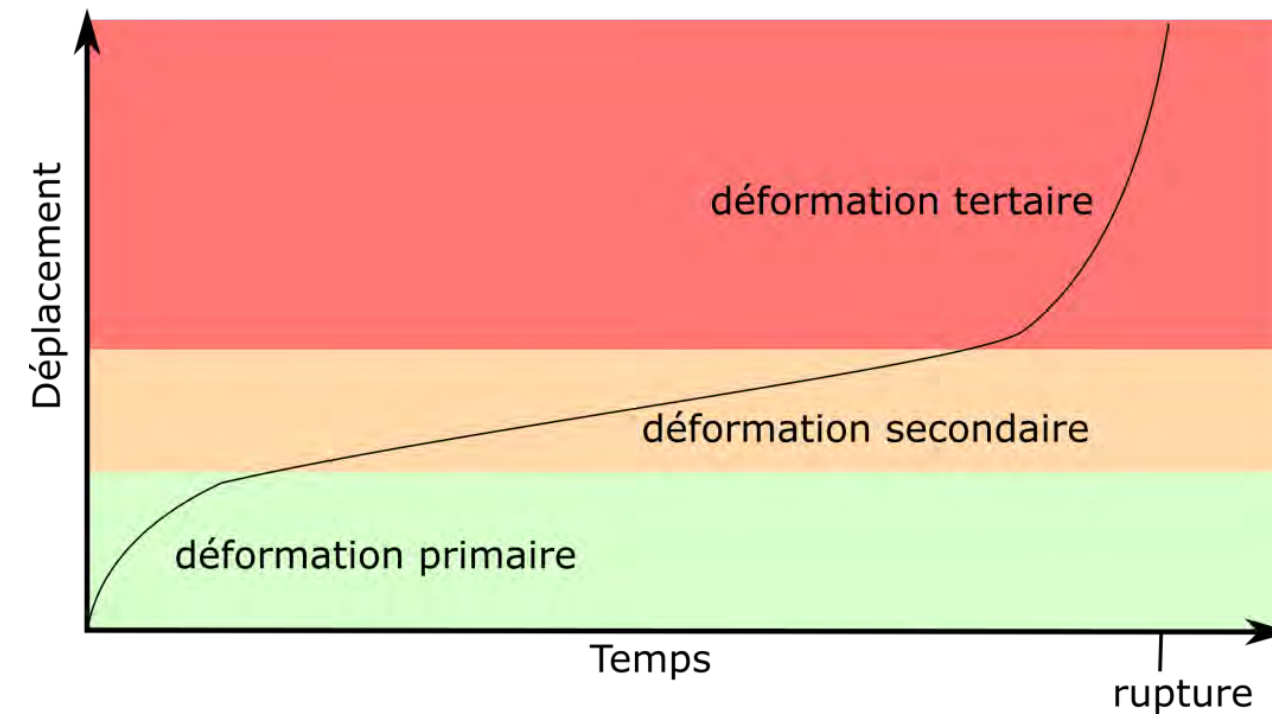
Seuils évolutifs, revus à la hausse suite à retour expérience sur période(s) de stabilité
(méthode obs., cf. eurocodes)



Eviter les fausses alertes (faux positif)
→ Vigilance intacte

Modèles prédictifs

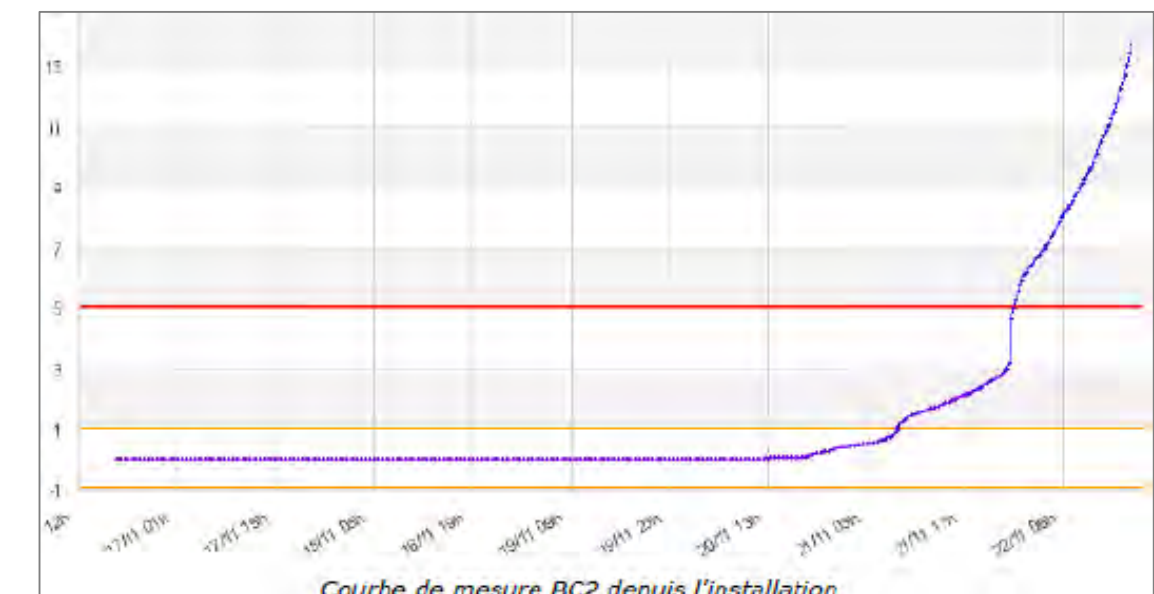
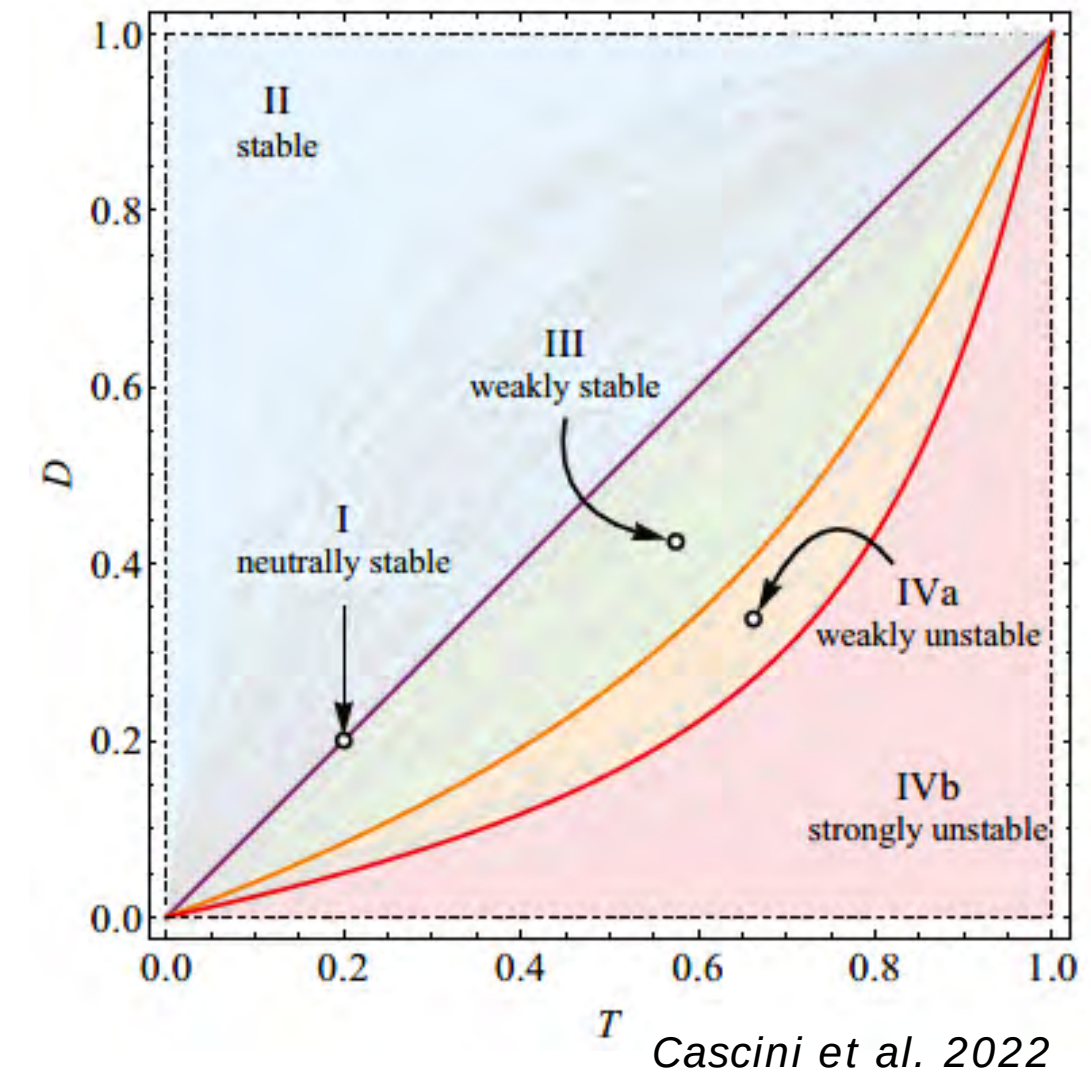
Pertinence des modèles / prévisions



Extrait du document de référence (guide) de la surveillance C2ROP

Projet Collaboratif C2ROP2 / action SCom2

Appel à contribution !



Sauzon (56). 2016

Sécurisation

Que faire des alertes / alarmes ?

- **Niveau de surveillance**

1. *Observation (humaine)*
2. *Auscultation (instrumentale)*
3. *Surv. Automatique*
4. *Surv. Auto + sécurisation*

Délai :

- *d'alerte*
- *de sécurisation*

Simulation Aléa
& ses conséquences
sur les enjeux :

- *Humains*
- *Matériels*

- **Type de Sécurisation**

- *Auto (boucle locale)*
- *humaine*

- **Intégration au PCS local**

- **Procédure opérationnelle**
en cas d'alerte/alarme

- **Vecteur d'alerte / alarme**

- *Sirène*
- *Alerte SMS...*

- **Simulations de crise :**

- *Régulières*
- *Avec les personnes concernées*
- *Scénarii réalistes...*

Niveaux de surveillance

Extrait du Guide de la surveillance des risques rocheux (livrable projet C2ROP)

Surveillance					
Typologie	Humaine		Instrumentale		
Niveau	1a	1b	2	3	4
Type d'action	Observation	Sécurisation par vigie	Suivi / Auscultation	Surveillance automatique*	Surveillance et sécurisation automatique
Mode de surveillance	Diagnostic et analyse experte différée	Surveillance par observation visuelle et sonore	Instrumentation et exploitation humaine	Instrumentation avec gestion automatique des alertes et alarmes	Instrumentation avec gestion des alertes, alarmes et sécurisation automatique
Dispositif de mesure*	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Type de capteurs	Sans	Sans	Mesures	Tout Ou Rien Mesures	Tout ou Rien Mesure
Périodicité	Variable suivant les besoins	Observation continue sur une ou des plages horaires définies	Mesures continues ou discontinues. Périodicité modulable en fonction de l'évolution	Mesures continues ou discontinues. Périodicité modulable en fonction de l'évolution.	Mesures continues et délai de surveillance court
Dispositif de traitement des données	Non	Non	Différé	Automatique, temps réel ou différé	Automatique- et délai de surveillance court
Dispositif d'exploitation des données	Non	Non	Humain ou automatique	Automatique	Automatique
Alerte et d'alarme	Non	Déclenchement humain avec éventuellement dispositif d'alerte et alarme	Déclenchement humain expert avec éventuellement dispositif d'alerte et alarme	Dispositif automatique	Dispositif automatique
Sécurisation	Non	Déclenchement humain avec éventuellement dispositif de sécurisation	Non	Non	Dispositif automatique

Phases d'une opération de surveillance (1)

Référentiel des missions géotechniques (norme NFP 94-500)

	Elément mission	Description	Objectifs à atteindre
	Conception	Maître d'œuvre conception	
G5	Diagnostic Géologique et Géotechnique	Etude détaillée des phénomènes.	Connaissance détaillée des phénomènes et de leurs cinétiques
	Diagnostic Risque Naturel	Etude détaillée des aléas, vulnérabilités et risques.	Connaissance détaillée des risques sur les enjeux, avec spécificités relatives à la surveillance
G1	Etude Préliminaire	Etude de faisabilité opérationnelle de surveillance	Prise en compte des contraintes environnementales et foncières. Vérification de la faisabilité opérationnelle de surveillance et validation du principe par Maître d'ouvrage et gestionnaire.
	Avant-Projet Sommaire	Etude comparative des solutions de surveillance	Choix de la solution de surveillance et des principales fonctionnalités attendues.
G2	Avant-Projet Définitif	Etude globale de la solution retenue.	Définition de l'architecture globale, des spécificités techniques remarquables et de l'ensemble des fonctionnalités détaillées.
	<u>PROjet</u>	Etude et dimensionnement détaillé des unités et composants.	Spécifications techniques de tous les éléments et fonctions.
	Dossier de Consultation des Entreprises Assistance pour passation des Contrats de Travaux	Réalisation du dossier de consultation. Analyse des candidatures et offres.	Choix optimum de l'offre permettant l'atteinte des exigences du projet.

Phases d'une opération de surveillance (2)

Référentiel des missions géotechniques (norme NFP 94-500)

	Réalisation	Entreprise instrumentation	Maître d'œuvre réalisation	
G3	Etudes d'EXEcution VISA des études d'exécution	Etude d'exécution (qui peut être sous traitée pour partie à un bureau d'études de mécanique des sols).	Supervision de l'étude d'exécution	Etude d'exécution conforme aux exigences du projet. Contrôles intermédiaires.
	Direction de l'Exécution des Travaux Assistance aux Opérations de Réception	Suivi d'exécution. Calage et participation aux opérations préalables à la réception. Interventions durant la période de garantie.	Supervision du suivi d'exécution. Supervision des opérations préalables à la réception, proposition de réception. Supervision durant la période de garantie	Exécution conforme aux exigences du projet. Contrôles et tests des systèmes préalablement à la mise en service. Adaptations et bon fonctionnement durant la période de garantie
G4	Exploitation	Entreprise instrumentation	Maître d'œuvre exploitation	
	Maintenance préventive	Etablissement des procédures techniques.	Supervision et validation des procédures techniques et procédures de sécurisation.	Procédure et planification spatio-temporelle de gestion préventive.
	Maintenance corrective	Participation aux procédures de sécurisation (chaîne complète de sécurisation). Proposition d'une programmation de maintenance	Supervision et validation des programmes de maintenance.	Procédure d'intervention de maintenance corrective.
	Procédure de sécurisation			Procédure intégrée de fonctionnement courant et d'urgence des systèmes, intégrant les différents services concernés. Adaptations et tests réguliers des procédures de sécurisation.
	Procédure d'arrêt			Procédure d'arrêt de surveillance.

- Choix du dispositif/méthode de surveillance en fonction du contexte et des enjeux :
 - *on pourra prioriser :*
 - *réactivité du dispositif*
 - *disponibilité des mesures*
 - *intégration d'une sécurisation*
 - *résolution, précision*
 - *fiabilité des instruments*
 - *alimentation autonome...*
 - *les limites pourront concerner :*
 - *alimentation énergétique (autonome...*
 - *zone couverte,*
 - *présence de masques*
 - *le coût...*
- Une opération de surveillance suit un phasage comparable à celui d'une étude géotechnique
- Quelque soit le système de surveillance retenu, la pertinence et la fluidité du protocole de sécurisation associé restent déterminantes pour son efficacité réelle (intégration au PCS, simulation de crise...)

Merci de votre attention !

Questions / Discussion

Observation des glissements de terrain, nouvelles technologies d'instrumentation à distance, Cerema, 2016.

Guide de la surveillance C2ROP (2021)

Safeland, deliverable D4.1, review of landslide detection, fast characterization, rapid mapping and long-term monitoring.

Livrables du projet POIA SIMOTER 1 & 2

Rapport d'études internes ou externes divers...