

PROJET MLA3 - AXE B

SUIVI DES MOUVEMENTS DE TERRAIN ET INSTRUMENTATION

INSTRUMENTATION : REX MULTISITES

Séminaire de Clôture
14 Décembre 2022

Yohan PERU – Cerema Centre-Est



SOMMAIRE

1. Sites instrumentés : Localisation et instrumentations
 2. Inclinométrie
 3. Piézométrie
 4. LiDAR aéroporté
 5. Suivi géodésique
 6. Scan laser terrestre et nuages de points 3D
 7. Interférométrie radar satellite
- Conclusions et perspectives

1. Sites instrumentés :

Localisation et types d'instrumentation



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Avec le soutien de

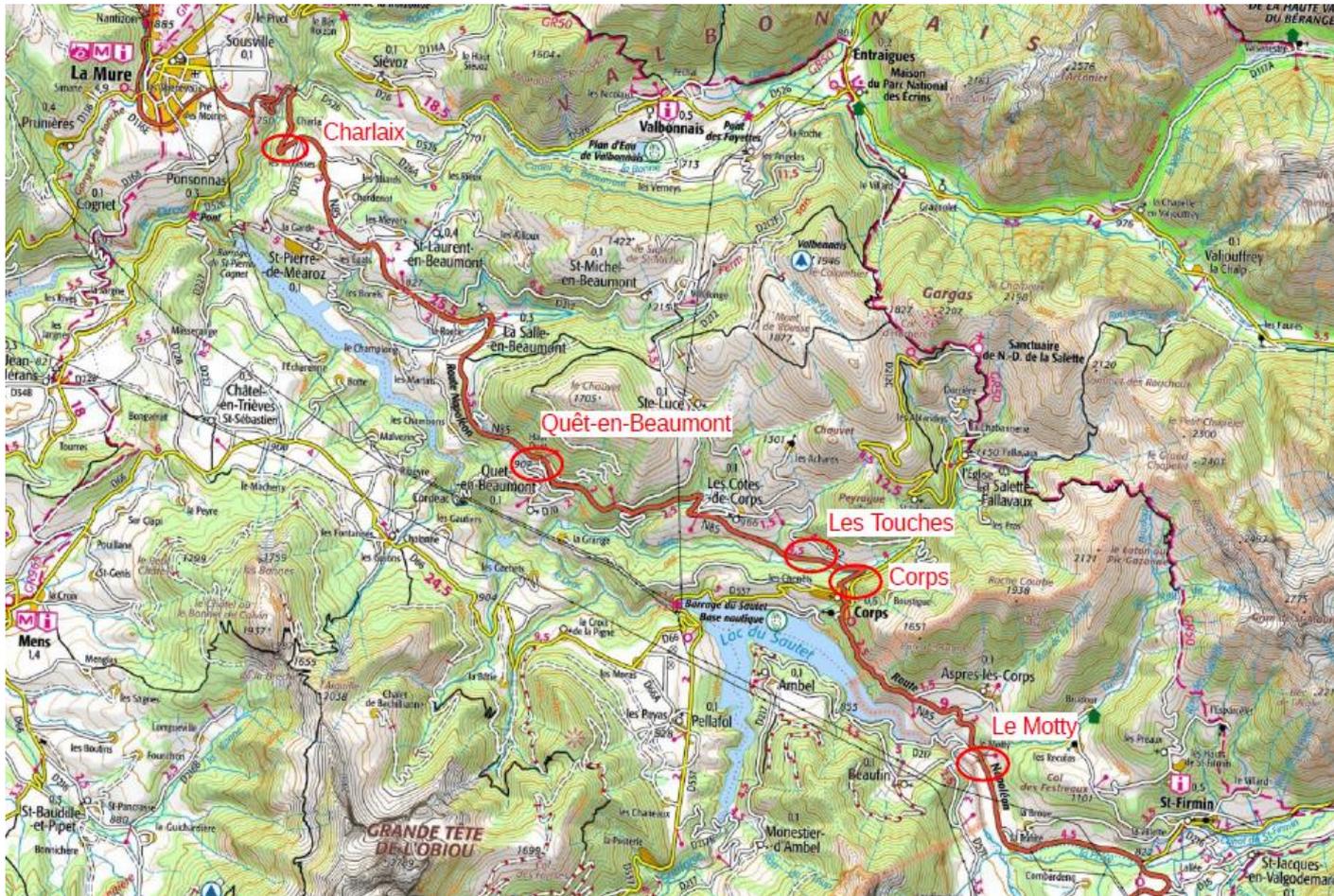


**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

FONDS NATIONAL
D'AMENAGEMENT
ET DE DEVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

1. SITES INSTRUMENTÉS – LOCALISATION



Localisation des cinq sites instrumentés entre La Mure (38) et Saint-Firmin (05)

1. SITES INSTRUMENTÉS – TYPE D'INSTRUMENTATION

Pour le suivi des glissements présentés précédemment, le Cerema a mis en œuvre ou testé les instrumentations suivantes :

- l'inclinométrie (inclinomètres classiques et chaîne inclinométrique) ;
- le suivi piézométrique (piézomètres ouverts, sondes CPI) ;
- le LiDAR aéroporté ;
- le suivi géodésique ;
- le levé scan laser 3D terrestre ;
- l'interférométrie Radar satellite.

2. Suivi inclinométrique



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Avec le soutien de



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**
*Liberté
Égalité
Fraternité*

FONDS NATIONAL
D'AMENAGEMENT
ET DE DEVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

2. LE SUIVI INCLINOMÉTRIQUE

Principe : déterminer localement les variations d'inclinaison et évaluer les déplacements du tube de mesure dans le temps par rapport à une de ses extrémités supposée fixe et en déduire la profondeur de la surface de cisaillement ou de glissement. Le pas de mesure est la longueur de la sonde, soit 0,5 m dans notre cas.

Deux types d'inclinomètres :

- inclinomètres classiques (répartis sur l'ensemble des sites) ;
- une chaîne inclinométrique (I4 sur le site de Charlaix) =
 - système constitué d'accéléromètres MEMS en série, espacés tous les 0,5 m ;
 - calibré et flexible, qui mesure la déformation du tube en 3D ;
 - température est mesurée dans chaque segment et compensée pour la mesure de la variation angulaire;

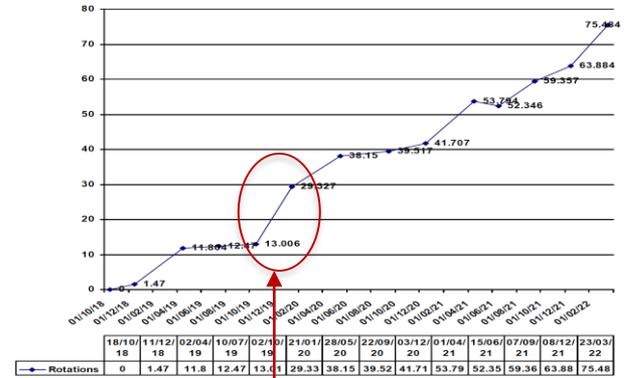
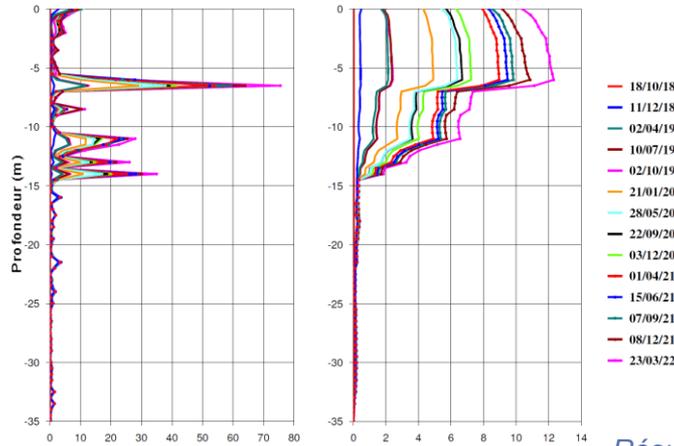
Objectif de l'expérimentation :

- Comparer les résultats de deux types d'inclinomètres implantés à proximité sur le même site.

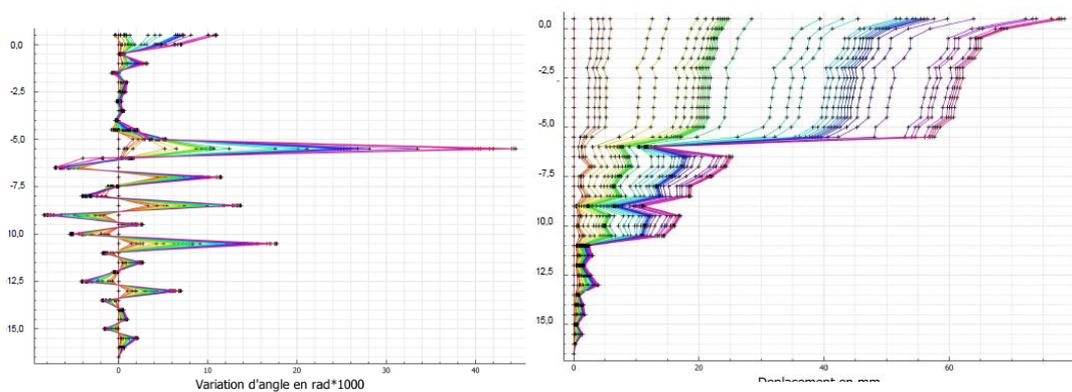
2. LE SUIVI INCLINOMÉTRIQUE

Résultats et comparaison des deux inclinomètres I4 et I8 sur le site de Charlaix :

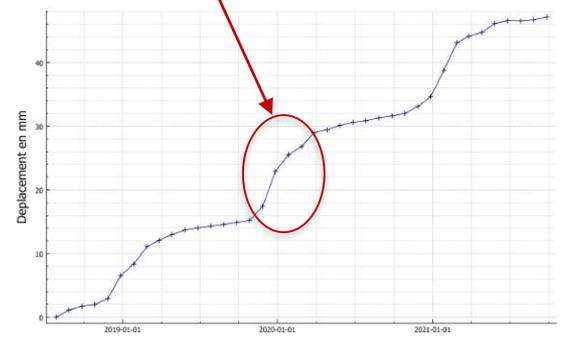
Résultats des mesures en I8



Résultats des mesures en I4



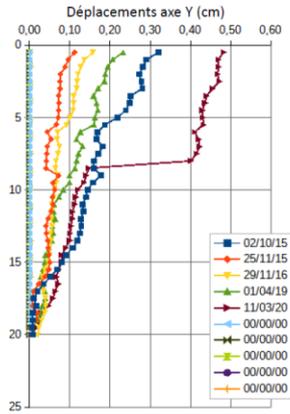
Accélération des déplacements Hiver 2020



2. LE SUIVI INCLINOMÉTRIQUE

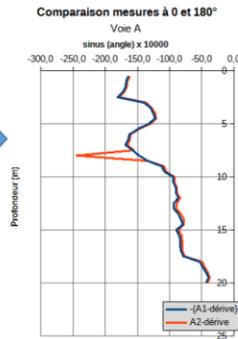
REX des deux méthodes

- Bonne corrélation entre les deux technologies
- Inclinomètre classique : Attention parfois à ne pas sur-interpréter les résultats
 1. rejet non corrigé = glissement qui n'existe pas ;
 2. un mauvais étalonnage qui fausse les mesures ;
 3. déterminer un glissement qui n'existe pas (flambement ou tassement du tube) ;
 4. une accélération qui ralentit = prendre le recul suffisant pour l'interprétation des mesures.

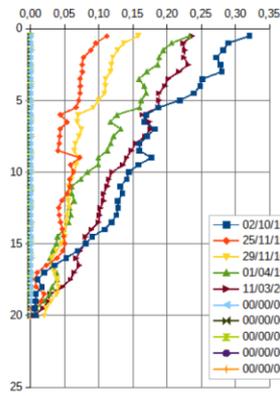


Un glissement à -8 m ?

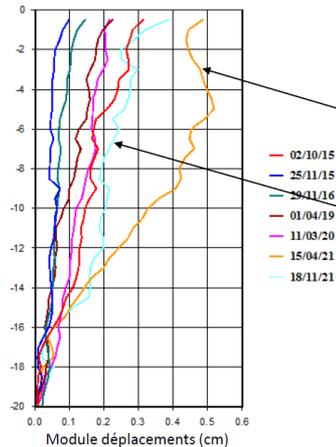
Exemple d'un rejet non corrigé



Mais un rejet à corriger...



Après correction



Tube test de Bron (69)

Mesure avant étalonnage

Mesure après étalonnage

Exemple d'un mauvais étalonnage

2. LE SUIVI INCLINOMÉTRIQUE

REX des deux méthodes (suite)

- Chaîne inclinométrique
 - Avantages :
 - deux mesures quotidiennes, téléchargeables depuis un site ftp ;
 - pas de déplacement sur site – intéressant si l'accès est difficile ;
 - l'homogénéité des capteurs permet de pouvoir comparer les mesures de manière certaine ;
 - le coût, si la chaîne peut être récupérée...
 - Inconvénients :
 - coût élevé, sachant qu'une fois cisailée, la chaîne n'est plus récupérable ;
 - exploitation des mesures = logiciel non transmis par le fabricant – à programmer en interne ;
 - cisaillement du tube reconnu quand les fichiers de mesures deviennent inexploitable.

3. Suivi piézométrique



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Avec le soutien de



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**
*Liberté
Égalité
Fraternité*

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

3. LE SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE

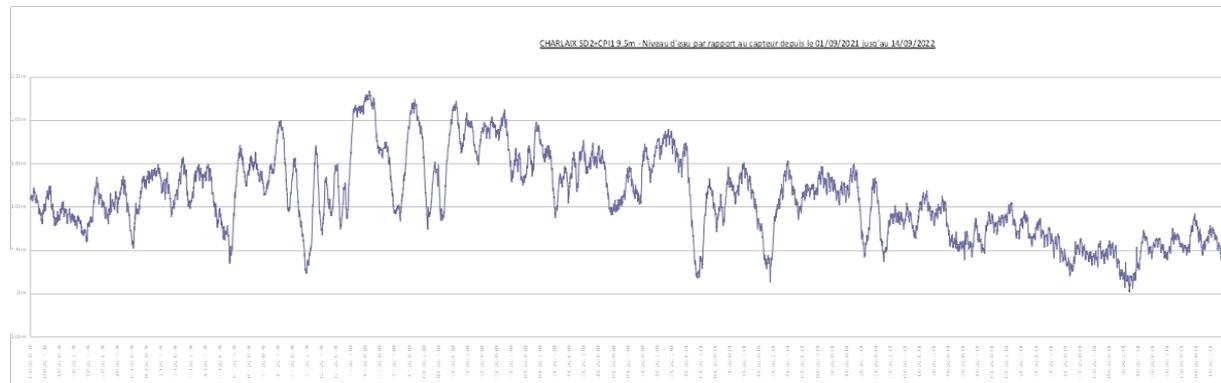
Principe : suivre l'évolution des niveaux d'eau dans les sols.

Instrumentation :

- **Piézomètres ouverts**
 - mesure du niveau d'eau dans un tube piézométrique ouvert à l'atmosphère ;
 - relevé manuel.
- **Cellules de Pression Interstitielle**
 - sondes à capteur de niveau immergé descendu dans le tube ;
 - sondes à capteur à corde vibrante ;
 - enregistrement des mesures via un data logger.

Résultats :

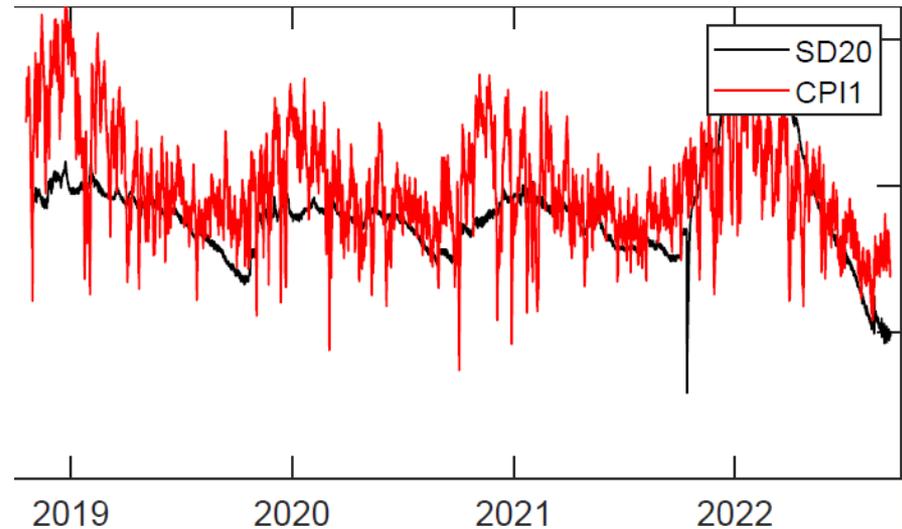
Suivi piézométrique CPI2 à Charlaix entre 09/2021 et 09/2022



3. LE SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE

Analyse des résultats :

- Bonne corrélation entre les données pluviométriques et les mesures piézométriques ;
- Décalage de quelques heures à quelques jours selon la profondeur et l'implantation des cellules par rapport aux évènements climatiques notables ;
- Différences de rendus entre les deux types de sondes CPI,
 - mesures très bruitées pour les mesures avec les capteurs à cordes vibrantes (courbe rouge) ;
 - sauts observés dans les mesures sur une durée courte (la journée) qui ne s'expliquent pas par les données météorologiques.



Superposition des courbes piézométriques SD20 et CPI1 à Charlaix entre 2019 et 2022

3. LE SUIVI PIÉZOMÉTRIQUE

- Pistes de réponses :
 - échantillonnage des mesures selon le type d'appareillage ;
 - vitesse du pas d'acquisition : plus le pas est lent, plus les données sont lissées ;
 - effet de la correction de la température sur le capteur ?

Retour d'expérience :

- privilégier l'instrumentation data loggée notamment dans les terrains de faible perméabilité ;
- limite des piézomètres ouverts,
 - suivi limité par la fréquence de mesures ;
 - ne permet pas toujours de bien comprendre les mécanismes de battement de la nappe.

Inclinométrie / Piézométrie :

- l'analyse des mesures sur l'ensemble des sites met en évidence l'importance de coupler inclinométrie et piézométrie pour le suivi des glissements de terrains ;
- très bonnes corrélations entre les mesures inclinométriques, piézométriques et pluviométriques.

4. Le LiDAR aéroporté



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Avec le soutien de



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

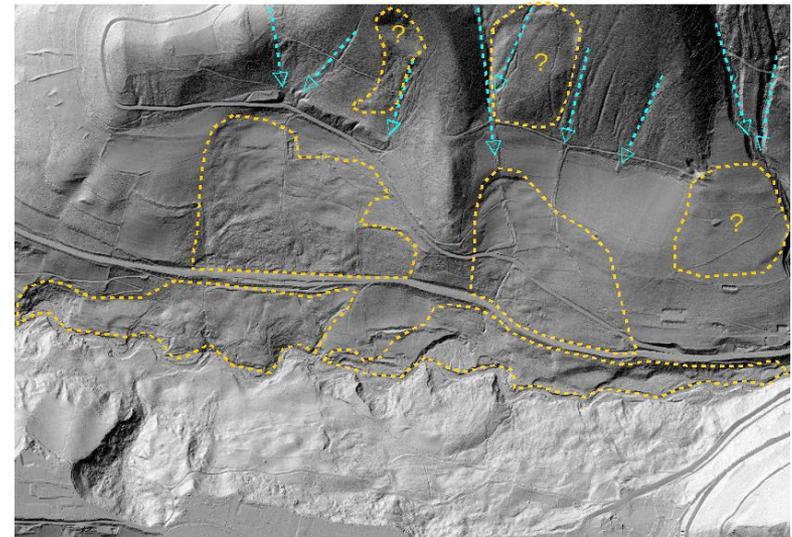
FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

4. LE LIDAR

Un relevé LiDAR a été réalisé sur l'ensemble des sites instables le long de la RN85

Principe : Télédétection par scanner laser infrarouge embarqué dans un avion géolocalisé par GNSS et qui balaie une bande de terrain afin d'obtenir un nuage de points 3D.

Objectif : établir une analyse géométrique structurale



Extrait du relevé LiDAR sur le site des Touches et observations de zones de morphologie chahutée (Source Cerema)

- Zones de morphologie chahutée évoquant des mouvements de terrains
- > Principales combes et chenaux probables d'écoulement d'eau

5. Suivi géodésique



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Avec le soutien de



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

FONDS NATIONAL
D'AMENAGEMENT
ET DE DEVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

5. SUIVI GÉODESIQUE

Objectif : réaliser un suivi topographique avec mesures semestrielles de 3 sites : Charlaix, Quêt-en-Beaumont et Les Touches.

Dispositif de suivi :

- Charlaix : 26 bornes, 3 stations et 2 repères sur les cadres de 2 ouvrages ;
- Quêt-en-Beaumont : 36 clous d'arpentage sur chaussée et 3 stations ;
- Les Touches : 72 clous d'arpentage.

Mode opératoire :

- Relevé à la station totale de précision ;
- Géoréférencement du relevé par la mise en place d'un triplet d'antennes GPS en post-traitement ;
- Précision des mesures : ± 1 cm.

Principale problématique rencontrée :

- Abords des sites instables
 - difficultés de positionnement de repères fixes
 - résultats des mesures non cohérents avec les autres instrumentations (par exemple, des zones remontaient en altimétrie alors qu'il était observé des affaissement sur le terrain...)

Conclusion : l'auscultation n'a pas été menée à son terme.

6. Levé scan laser terrestre et nuages de points 3D



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Avec le soutien de



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**
*Liberté
Égalité
Fraternité*

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

6. LEVÉ SCAN LASER TERRESTRE ET NUAGES DE POINTS 3D

Objectif :

- expérimenter le suivi de l'évolution du glissement de Charlaix à partir de deux nuages de points 3D à un an d'intervalle ;
- essayer de détecter des mouvements dans la zone de glissement connue de l'ordre du centimètre.



*Levé scan laser à Charlaix
Octobre 2022*

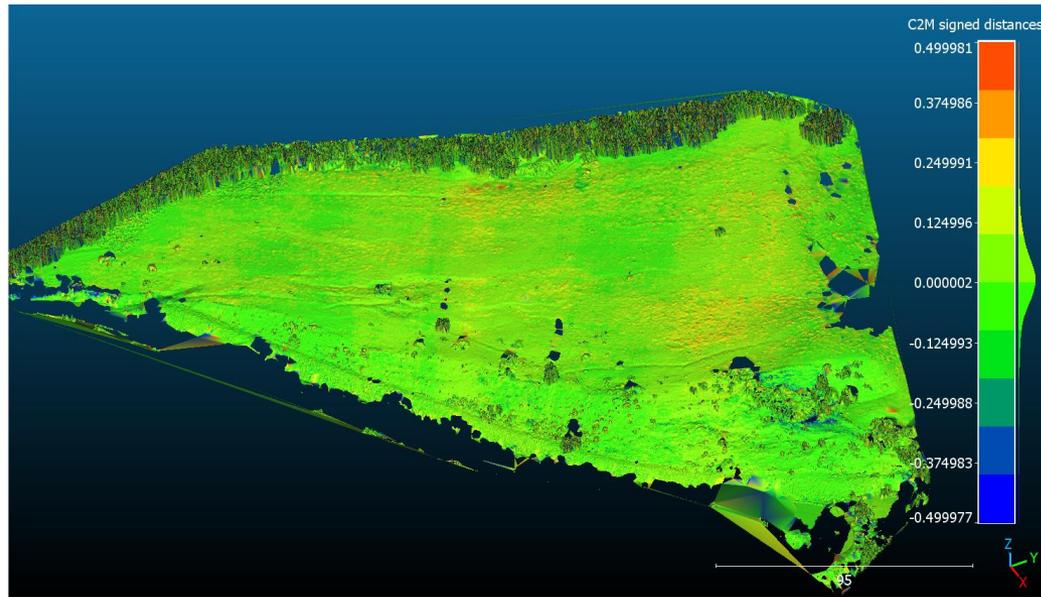
Contexte :

- distance de levé scan = entre 800 et 850 m ;
- appareil : Riegl VZ 2000 ;
- levés réalisés en août 2021 et octobre 2022 pour analyse diachronique.

6. LEVÉ SCAN LASER TERRESTRE ET NUAGES DE POINTS 3D

Méthode :

- Recalage manuel " grossier " avec au moins 3 points ;
- recalage fin des deux nuages de points par la méthode ICP ;
- calcul de la distance entre les deux nuages de points par la méthode C2M (Cloud to Mesh ou Nuage-Maillage).



Résultats du calculs des distances C2M entre les deux nuages.

6. LEVÉ SCAN LASER ET NUAGES DE POINTS 3D

Limites de l'exercice :

- précision donnée de l'appareil = 3 mm à 100 m, donc pour une distance entre 800 et 850 m, la précision est de l'ordre du centimètre soit dans la gamme des déplacements recherchés ;
- difficultés de recalage des nuages de points = est-on sûr que les points de référence pris pour le recalage sont fixes ?
 - essai d'un recalage à partir de panneaux de signalisation routière = essai non concluant car certains panneaux sont dans une zone du glissement ;
 - recalage à partir d'une zone considérée stable
- choix de ne pas dévégétaliser la scène : si on dévégétalise, on supprime trop de points pour l'analyse.

Toutefois, si on zoome sur la zone des inclinomètres, on mesure des déplacements de 5 cm environ, ce qui est assez proche des déplacements mesurés en surface... Approfondissement de l'analyse en cours.

7. Interférométrie radar satellite



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Avec le soutien de



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**
*Liberté
Égalité
Fraternité*

FONDS NATIONAL
D'AMENAGEMENT
ET DE DEVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

7. INTERFÉROMÉTRIE RADAR SATELLITE

Objectif : Évaluer les conditions d'applicabilité des traitements d'interférométrie radar pour le suivi à long terme des glissements de terrain.

2 Approches :

1. **méthode DinSAR** = traitement interférométrique par différence de phase à partir de 2 images espacées du temps de revisite du satellite (12 jours).

- **Résultats :**

- les zones stables ne se distinguent pas des zones instables ;
- les zones de végétation évoluent entre deux images ;
- après filtrage, le niveau de bruit sur les zones naturelles reste trop élevé.

- **Conclusion :**

→ cette méthode ne permet pas d'identifier les zones instables en milieu naturel sur notre zone d'étude.

7. INTERFÉROMÉTRIE RADAR SATELLITE

2. méthode SARPROZ = traitement interférométrique sur une série de 16 images, à raison d'une image tous les 12 jours par l'approche PSInsar.

- **Méthodologie** : étude de certains points de l'image appelés diffuseurs permanents (PS ou persistent scatter).
- **Résultats** :
 - densité forte de points au niveau des zones urbaines ;
 - densité très faible de points au niveau des zones naturelles.
- **Conclusion** :
 - cette méthode ne permet pas d'identifier les zones instables en milieu naturel sur notre zone d'étude.

7. INTERFÉROMÉTRIE RADAR SATELLITE

Conclusion

Les résultats obtenus avec les deux méthodes ne permettent pas d'identifier, sur notre zone d'étude, les zones en mouvement, ni de les suivre :

- les algorithmes ne fournissent pas de résultats pertinents sur des zones naturelles, de montagne ;
- un grand nombre d'images (20 à 25 minimum) est nécessaire pour le traitement, d'où besoin d'une puissance de calcul et un temps de traitement conséquent ;
- avec les algorithmes de sélection des points, on ne maîtrise pas la localisation des points au sein des zones. On ne cible pas les zones les plus pertinentes à instrumenter.

Perspectives

Toutefois, des développements peuvent être envisagés :

- utiliser des algorithmes de sélection de points plus adaptés, comme STAMPS ;
- forcer la sélection de certains points par les algorithmes PSInsar en installant des réflecteurs sur le terrain.

Conclusion



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Avec le soutien de



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**
*Liberté
Égalité
Fraternité*

FONDS NATIONAL
D'AMENAGEMENT
ET DE DEVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le projet a permis :

- une collecte d'un grand nombre de données dans différents domaines (géotechnique, hydrogéologie, traitement d'images, etc.) qui seront accessibles à tous ;
- d'instrumenter et de suivre cette instrumentation sur une longue période (4 ans), bien plus longtemps que dans le cadre des délais moyens pour les études géotechniques ;
- de tester des nouvelles instrumentations pour le suivi des glissements lents ;
- et d'ouvrir de nouvelles perspectives sur l'usage de nouveaux matériels initialement pas dédiés à l'étude des glissements (scan laser par exemple).

Remerciements à toutes les personnes qui ont participées aux campagnes de mesures et qui ont permis de recueillir l'ensemble de ces données : Bernard CARNUS, Hélène DECOURCELLE, Jérôme GINEYS, Agnès JOSEPH, Mathieu MLYNARSKI, Mélanie PONCET, Fabrice ROJAT et Nicolas VINOT



MERCI POUR VOTRE ATTENTION



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

Avec le soutien de



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE
Massif des Alpes