

# SUIVI EN TEMPS REEL DES DEPLACEMENTS D'UN GLISSEMENT DE TERRAIN PENDANT LES TRAVAUX DE CONFORTEMENT

## LANDSLIDE DISPLACEMENT MONITORING IN REAL TIME DURING REINFORCEMENT WORKS

Alexis FAURE<sup>1</sup>, Quentin BARBIER<sup>1</sup>, Marie MADEC<sup>1</sup>, Jean-Philippe JARRIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> GEOLITHE, Crolles, France

**RÉSUMÉ** – Dans le cadre du confortement aval d'une route affectée par un glissement de terrain actif, Géolithe a mis en place un dispositif de surveillance optique des déplacements du talus en temps réel. Prévu et utilisé à l'origine dans un but d'alerte à destination des équipes travaux, ce dispositif a permis une analyse de mouvements en lien avec les travaux réalisés.

**ABSTRACT** – In the context of the reinforcement below a roadway subject to an active landslide, Géolithe implemented a real time optical monitoring system of the slope displacements. Initially used as a warning system for the site workers, this system allowed an analysis of the ground displacements in relation with the reinforcement work carried out.

### 1. Introduction

Dans le cadre d'un chantier de confortement d'une route en partie détruite par un glissement de terrain, Géolithe a mis en place un dispositif de suivi des déplacements en temps réel de la zone affectée par le glissement pendant la durée des travaux.

Depuis 2018, le talus routier a subi plusieurs épisodes de glissements de terrain localisés qui se sont déclenchés dans le talus aval. Géolithe est intervenu en août 2020 en phase conception pour définir une solution de confortement du glissement qui consiste à la réalisation d'une paroi clouée en pied.

Dès le début des premiers travaux préparatoires sur site, des indices visuels de réactivation du glissement ont été constatés.

Dans une démarche de réduction des risques, notamment vis-à-vis des équipes de travaux situées en pied du talus affecté par le glissement, un dispositif de surveillance optique des déplacements du talus en temps réel a été mis en place.

Cet article a pour objectifs de décrire la solution de surveillance et de sécurisation des équipes de travaux choisie et d'exposer l'apport d'un tel suivi en phase travaux sur la compréhension de l'impact des différentes étapes de mise en œuvre d'une paroi clouée sur les mouvements du talus à conforter.

### 2. Contexte du projet

Situé dans l'Est de la Drôme, le site se situe en fond de vallée, à une altitude de 550 m, en pied d'un versant orienté vers le Sud-Ouest. Ce versant est constitué par des marnes souvent altérées, communément appelées « Terres Noires » (Callovien), et recouvertes par des colluvions. Une rivière circule en pied du versant, dont les berges sont constituées d'alluvions formant des terrasses de faible largeur. Un canal de prise d'eau se situe au pied du talus aval de la route (Figure 1).

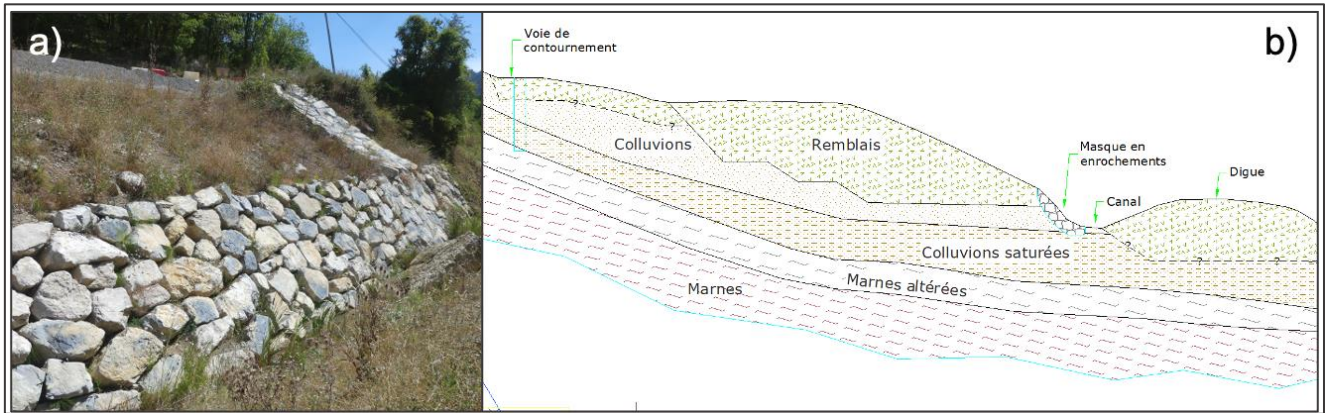


Figure 1. Vue depuis l'aval du talus routier.

Le glissement de terrain étudié affecte les deux voies d'une route ainsi que son talus aval. Ce talus, d'une hauteur d'environ 6 m, est composé d'une partie végétalisée inclinée à 25-30° et d'un masque d'enrochements libres en pied.

### 3. Historique des évènements, diagnostics et solution de confortement

#### 3.1. Évènements constatés et recherche des causes

Le site a fait l'objet de plusieurs épisodes de déformations de janvier 2018 à août 2020 (Figure 2).



Figure 2. Évolution du glissement : (a) activation initiale en janvier 2018, (b) réactivation à l'été 2020, (c) progression du glissement en février 2021.

Géolithe a identifié une double cause à ce phénomène de glissement : un défaut de butée de pied ainsi qu'une réactivation par la circulation d'eau au sein des colluvions et marnes altérées (effet de « couche savon »). La rétro-analyse de stabilité a montré des cercles préférentiels de glissement débouchant en pied du talus, dans le canal aval (Figure 3).

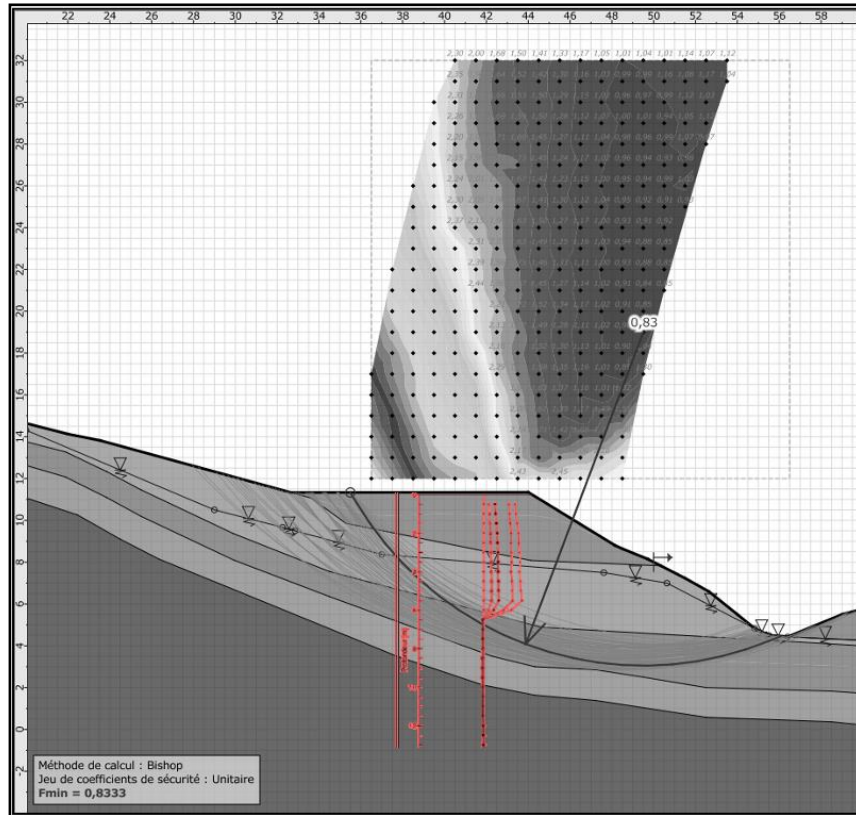


Figure 3. Superposition du cercle critique de glissement sous TALREN et des relevés inclinométriques (en rouge).

Cette cinématique de rupture est cohérente avec les observations sur site :

- les relevés d'inclinomètres mis en place sur la zone de glissement en février 2020, indiquant un cisaillement entre 4,0 et 6,5 m de profondeur par rapport à la route ;
- l'absence de mouvement dans le corps de la digue située en aval au-delà du canal ;
- la position de la niche d'arrachement en amont du glissement.

### 3.2. Solution de confortement

La solution retenue consiste en :

- une paroi clouée, superposée au masque d'enrochements existant, afin de restituer la butée manquant à l'équilibre ;
- un dispositif de drainage de type tranchée drainante en amont de la zone glissée, afin de réduire la charge en eau de la couche des marnes altérées, identifiée comme la « couche savon » du glissement (Figure 4).

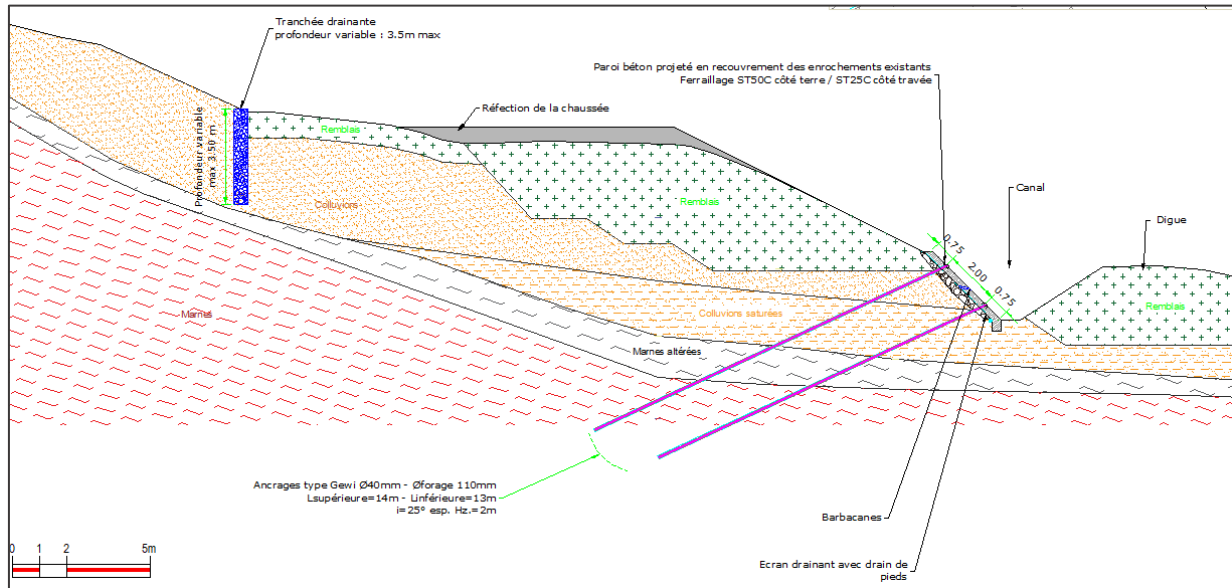


Figure 4. Coupe type de la solution retenue.

Les différentes contraintes du site (difficulté d'accès à la zone de travail, maintien de la butée actuelle en pied du talus, maintien de la circulation sur la bande déviée) imposaient un travail de réalisation des ancrages depuis le pied du glissement, avec forage des ancrages à travers le masque en enrochements libres existant.

Dès le début des travaux préparatoires (en janvier 2021), des mouvements ont été constatés à la fois en partie supérieure (Figure 2c) et en partie inférieure.

Dès lors, quatre mesures ont été prises :

- une limitation stricte du stockage et des circulations d'engins dans la partie active du glissement (le talus en remblais) ;
- la réalisation d'un gunitage de confinement préventif systématique du masque en enrochements ;
- la réalisation par plots alternés et concentriques ;
- la mise en place d'un suivi des mouvements du talus aval avec système d'alerte en temps réel.

### 3.3. Déroulement et phasage travaux

Afin de fiabiliser la sécurisation, un phasage alterné par plots concentriques a été retenu, divisant le linéaire en 5 plots de 12 à 18 ml (Figure 5). Ce phasage permet de « fermer » progressivement la zone sensible et donc de réduire au plus vite le volume de matériaux en jeu dans le phénomène de glissement.

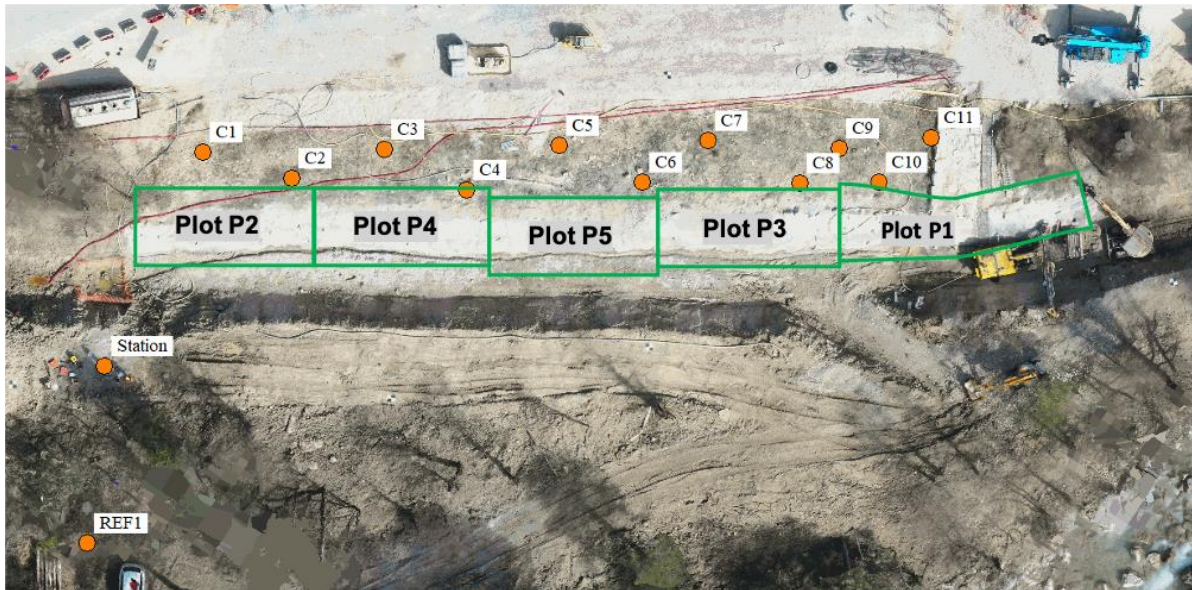


Figure 5. Localisation des plots de travaux. La localisation des cibles (de C1 à C11, et la référence) ainsi que la position de la station de mesure topographique est également indiquée.

Le site a été numérisé par photogrammétrie (à partir de prise de vues par drone) afin d'obtenir un modèle 3D de terrain sous forme de nuage de points. Ce modèle numérique a été couplé aux informations de mesures, via une plateforme Web 3D collaborative, permettant un suivi du site plus aisé.

### 3.4. Surveillance des mouvements du talus aval

Le dispositif de surveillance consistait au suivi de 11 cibles placées dans la zone active du glissement, réalisé par une station de mesure topographique autonome et connectée (Figure 6). Cette station était couplée à une interface web (SaaS) permettant un suivi en temps réel et l'envoi d'alertes mail et SMS dans un court délai en cas de dépassement de seuils de déplacement ou de vitesse prédéfinis. Ceux-ci ont été fixés en concertation avec les différents intervenants (Tableau 1).



Figure 6. (a) Implantation générale des éléments du dispositif de mesures. (b) Détail de la station de mesure de type Trimble S9. (c) Détail d'une cible.

Tableau 1 . Définition et valeurs des seuils du dispositif de surveillance.

	Niveau des seuils	(Mesure d'origine comparée à la mesure la plus récente)
Dépassement du seuil de vigilance	Niveau 2	≥ 25.0 mm
Dépassement du seuil d'alerte	Niveau 3	≥ 50.0 mm
Dépassement du seuil d'alarme	Niveau 4	≥ 75.0 mm

Quelques périodes de mesure ne sont pas exploitables, du fait de perturbations météorologiques et de chantier. Par ailleurs, l'incertitude de mesure est estimée de l'ordre de 2 mm.

#### 4. Résultats du suivi et interprétations

##### 4.1. Résultats généraux

Les déplacements les plus importants ont été mesurés dans la zone centrale du glissement, avec un cumul maximum de 48 mm sur la période de mesure. Les vitesses maximales de déplacement lors des épisodes particuliers sont de l'ordre de 15 mm/jour.

##### 4.2. Lien entre les phases de travaux et les déplacements

Le suivi des déplacements journaliers a mis en évidence l'impact variable des différentes phases de travaux sur les mouvements de la zone glissée ; il a également permis de valider la solution de réalisation par plots concentriques.

La réalisation des forages est la phase de travaux la plus sujette aux déplacements (Figure 7) avec l'observation de « sauts » de 10 à 15 mm dans les déplacements des cibles lors de la réalisation des forages.

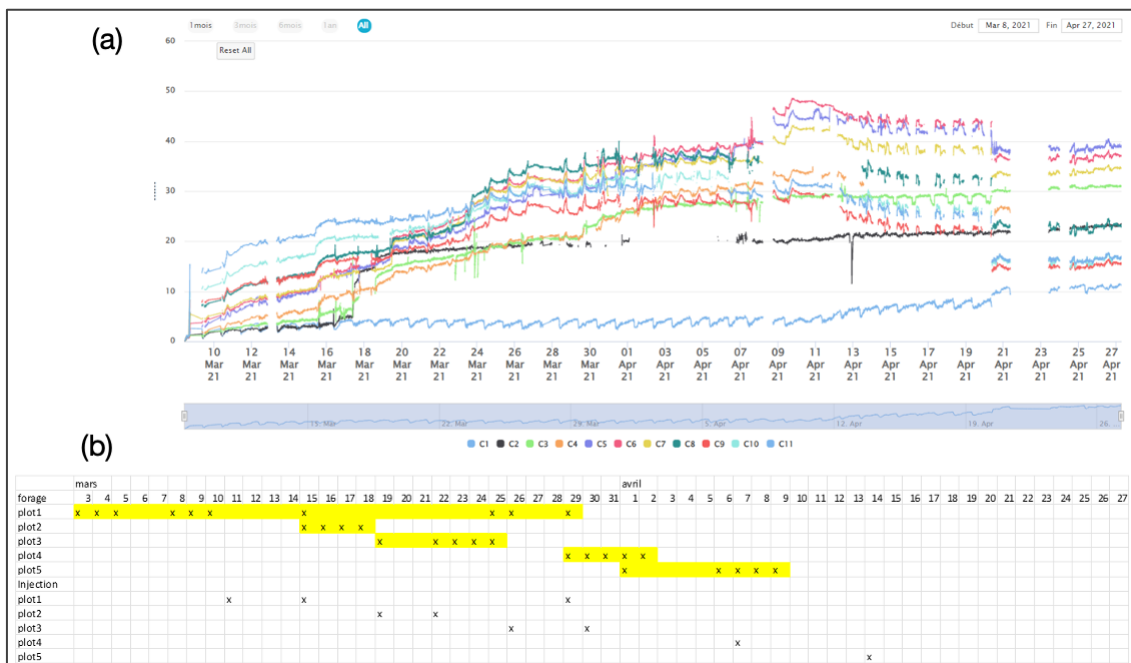


Figure 7. (a) Séries temporelles des déplacements cumulés des cibles C1 à C11 sur les 7 semaines de réalisation de la paroi clouée. (b) Déroulé des travaux sur la période correspondante.

Ces déplacements rapides et localisés se situent au droit des plots exécutés. Les premiers pics de déplacements sont en effet localisés au niveau des cibles C10 et C11, voisines du premier plot réalisé (plot 1), et dans une moindre mesure au niveau des cibles C8 et C9. Ces déplacements plus importants sont synchrones avec les phases de forages ;

le second pic marqué de déplacements a lieu lors du forage des ancrages du plot 2. On constate également que la cible C1 est peu affectée et semble située dans une zone peu sensible aux déplacements (limite de zone et présence d'enrochements). L'enchainement des phases est particulièrement visible sur les cibles afférentes au plot 2.

Des évolutions similaires sont constatées pour les autres cibles, avec une réduction des déplacements pour les derniers plots réalisés (effet de cloisonnement du glissement). À la suite des forages, les injections des ancrages puis la projection du béton ont été réalisées afin de stabiliser progressivement les plots.

L'arrêt des forages en fin de journée du 18 mars marque le début de l'arrêt des déplacements. Les injections de coulis et la mise en place du parement béton ont confiné définitivement le plot 2 jusqu'en partie centrale (C2 sur Figure 8). Son extrémité amont (C3 sur Figure 8) est restée sujette aux déplacements jusqu'à la fin de la réalisation des forages du plot 4 voisin.

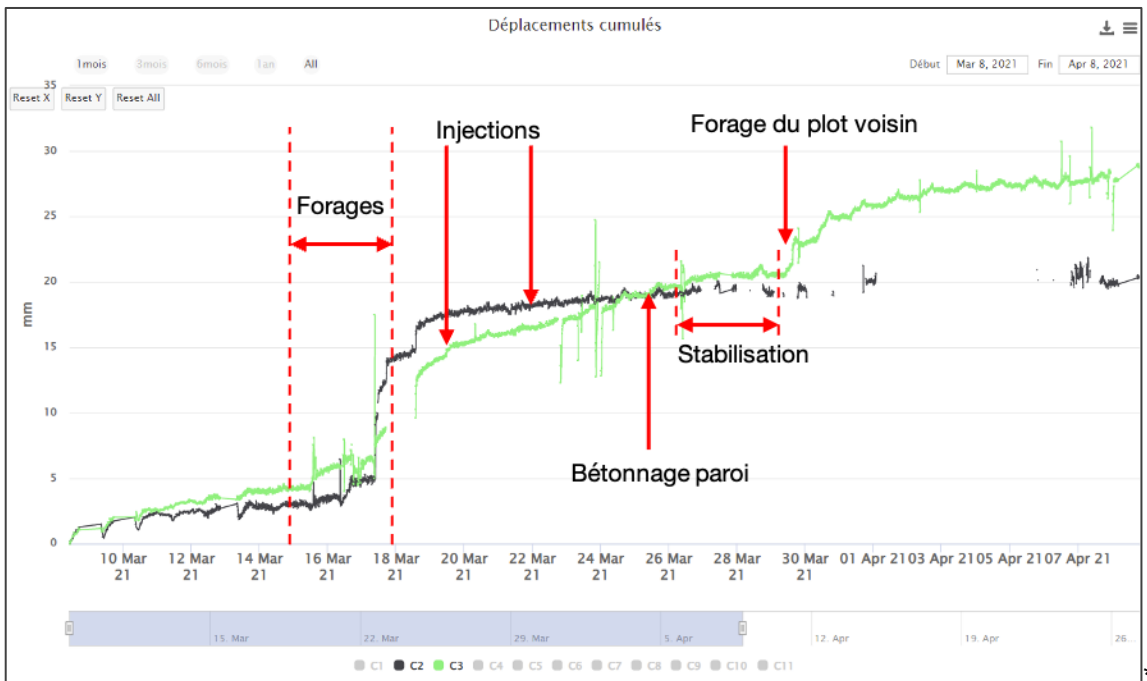


Figure 8. Séries temporelles des déplacements des cibles C2 (noir) et C3 (vert).

#### 4.3. Lien entre précipitations et déplacements

Une des causes identifiées du glissement est l'apport d'eau dans les couches marneuses situées en profondeur. Un lien entre précipitations et déplacements a en effet été identifié, notamment autour du 15 mars, où les stations météo les plus proches ont enregistré des précipitations importantes, et où l'on peut observer une réaction très rapide du glissement avec un déplacement généralisé à l'ensemble des cibles, de l'ordre de 3 à 5 mm en 24 h (Figure 9).

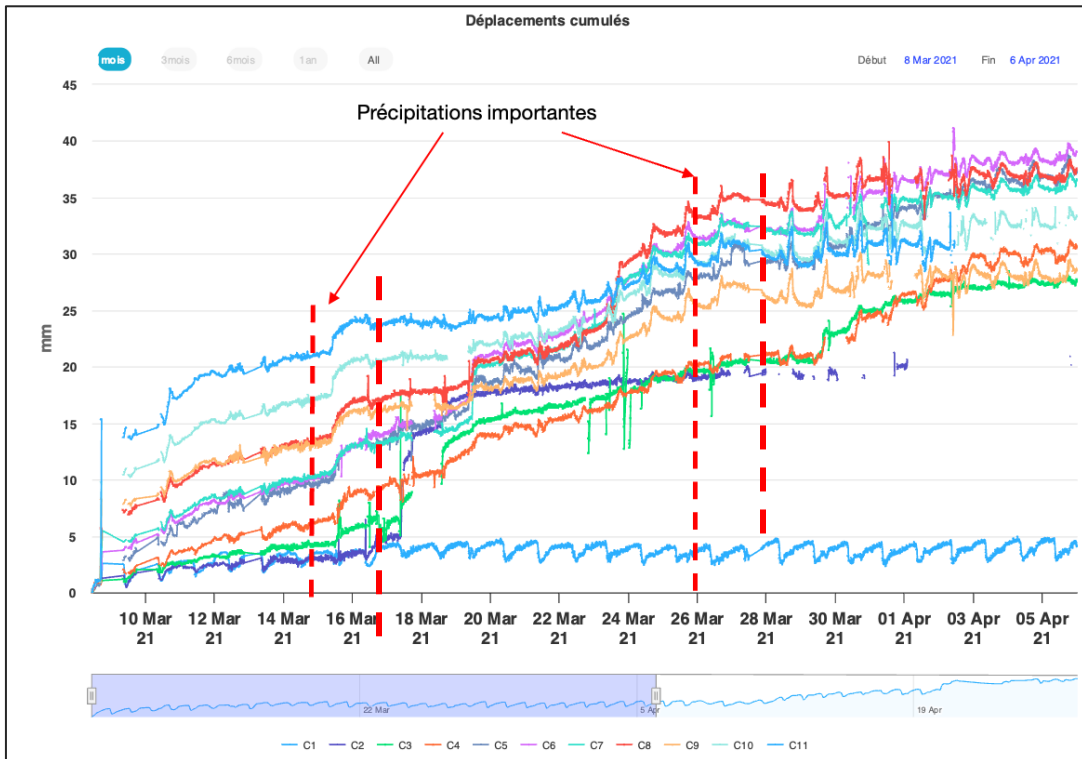


Figure 9 : évolution temporelle des déplacements des cibles, entre le 9 mars et le 3 avril.

On observe également que l'épisode de précipitations du 26 mars n'a quasiment pas d'effet sur les mouvements du glissement. Nous interprétons ceci par la contribution favorable des plots 1 et 2, déjà entièrement réalisés à cette date. De la même manière, les fortes précipitations relevées fin avril n'ont aucun effet particulièrement visible sur le glissement, preuve de l'efficacité du confortement réalisé.

## 5. Conclusions

Au-delà de l'apport sécuritaire indéniable apporté par le dispositif mis en œuvre en phase travaux (surveillance et alertes programmables), la quantité de données obtenues a permis de quantifier les mesures de déplacements lors des grandes phases de travaux, et donc de qualifier le comportement du glissement, réputé actif, lors des opérations de confortement.

En particulier, l'analyse des déplacements mesurés montre que la stabilisation du glissement en surface a été atteinte à l'issue des travaux, validant ainsi la solution de confortement mise en place. De plus, le ralentissement des déplacements au cours des travaux illustre la pertinence du phasage par plots concentriques.

Enfin, les glissements du type étudié étant souvent en limite de stabilité, de faibles perturbations suffisent à les remobiliser, y compris pendant les périodes de travaux. L'ordre de grandeur des déformations associées étant difficile à estimer, cette analyse *a posteriori* a permis d'améliorer les connaissances du comportement de ce type de glissement, réputé actif, et dont le confortement doit s'effectuer en contexte contraint.