



HAL
open science

Dispositif d'observation 3D des déplacements internes à un massif de sol ou de roche par fibre optique - Évaluation in situ

Jean-Pierre Rajot, Yannick Fargier, Patrick Joffrin, Nicolas Vermorel,
Christophe Pruvost

► To cite this version:

Jean-Pierre Rajot, Yannick Fargier, Patrick Joffrin, Nicolas Vermorel, Christophe Pruvost. Dispositif d'observation 3D des déplacements internes à un massif de sol ou de roche par fibre optique - Évaluation in situ. Université Gustave Eiffel. 2023, pp.29. hal-04434648

HAL Id: hal-04434648

<https://hal.science/hal-04434648>

Submitted on 2 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Convention DGPR-Université Gustave Eiffel 2022 n°2201357657 du 26 juillet 2022

Action 11 : Jean-Pierre RAJOT

Dispositif d'observation 3D des déplacements internes à un massif de sol ou de roche par fibre optique

Évaluation *in situ* du dispositif

Date : 24 mai 2023

Auteurs : J.P. Rajot, Y. Fargier, P. Joffrin, N. Vermorel, C. Pruvost

Nomenclature d'activité : RP3-J22071
Référence sur Numéro de contrat* :
Confidentialité..... : Diffusion libre

Université Gustave Eiffel,
Campus de Lyon
Département Géotechnique Environnement, Risques naturels et Sciences de la terre (GERS),
Laboratoire Risques Rocheux et Ouvrages Géotechniques (RRO)
25 Avenue François Mitterrand, Case 24
F-69675 Bron Cedex

Téléphone : +33 4 72 14 24 58
Adresse électronique : jean-pierre.rajot@univ-eiffel.fr

Version

Version	Date	Modification	Préparé par	Contrôlé par
1	26/05/2023	Version initiale	J.P. Rajot	Y. Fargier

Destinataires

MTE/DGPR/SRNH : M. Bruno JANET

Université Gustave Eiffel : Mme Céline BOURDEAU-LOMBARDI

Table des matières

1	Introduction	7
2	Rappel des caractéristiques du prototype	8
3	Mise en œuvre sur site.....	12
3.1	Glissement de Charlaix – Contexte géotechnique et activité.....	12
3.2	Installation du prototype en tube inclinométrique.....	18
3.3	Mesures réalisées et interprétation	20
4	Conclusion et perspectives.....	27
	Annexe A : Références bibliographiques	28
	Annexe B : Relevés inclinométriques du tube I10 (Cerema).....	29

RESUME

Un prototype de dispositif d'observation en 3D des déplacements dans les sols et les roches le long d'une ligne quelconque a été développé. Ce dispositif est composé d'une structure linéique en polyéthylène extrudé, conçue pour être équipée de fibres optiques collées longitudinalement en différents points de la section droite.

L'observation par fibres optiques des déformations en plusieurs point de la section droite de la structure linéique support permet de déterminer, sur un élément de longueur ds , l'allongement à l'axe neutre, la direction du plan de courbure (perpendiculaire au plan neutre), la valeur de la courbure et le gauchissement de la structure (déviation par rapport au plan de courbure). Par intégration, ces paramètres permettent de décrire une courbe régulière dans l'espace (théorie de Frenet-Serret).

Les déformations en quatre points de la section droite suffisent pour reconstituer la déformée d'une structure linéique sous une sollicitation en traction et flexion de direction quelconque. Au total cinq fibres équipent le dispositif : une première placée à l'axe neutre et quatre périphériques à 10 mm de l'axe neutre, sur des ailettes radiales orientées à 90° les unes des autres. Cette distance autorise des rayons de courbure minimum de l'ordre de 90 cm sans solliciter les fibres optiques en verre au-delà de leur déformation maximale admissible. Le nombre d'ailettes, leur disposition et leur largeur ont été choisis pour pouvoir installer le dispositif dans un tube inclinométrique usuel, dans l'objectif de limiter le saut technologique par rapport à la pratique courante des mesures inclinométriques.

Les performances du dispositif ont été évaluées en conditions contrôlées début 2022. Des essais en laboratoire de flexion plane quatre points d'un tube inclinométrique long de 15 m équipé du dispositif ont montré que la déformée réelle était reconstruite avec précision à partir des mesures de déformations dans les fibres le long du profilé support.

Ce rapport présente la mise en œuvre du dispositif sur le terrain et une première évaluation de son fonctionnement in situ. Le dispositif a été installé sur le site du glissement de terrain de Charlaix, près de F-38350 La Mûre, dans un forage vertical profond de 20 m équipé d'un tube inclinométrique mis à disposition par le Cerema. La mise en œuvre du dispositif dans le tube inclinométrique sur le terrain s'est avérée très difficile, la tolérance étant insuffisante entre le diamètre de la structure support des fibres optiques et le diamètre en fond de gorges du tube inclinométrique. Le retournement des fibres optiques à l'extrémité du dispositif en fond de forage, visant à pouvoir interroger chaque fibre depuis ses deux extrémités, s'est également avéré être source potentielle d'endommagement des fibres.

Quelques mesures ont néanmoins été obtenues mais les résultats ont été peu concluants, les fibres ayant été apparemment endommagées à la mise en œuvre. Seules deux fibres ont fourni des mesures, partiellement sur leur longueur. En outre les mesures réalisées sur une courte période (du 18 octobre 2022 au 23 janvier 2023) ne permettent pas d'analyser correctement les déplacements du sol. Une perte de mesure entre deux interventions conduit également à s'interroger sur la durabilité dans le terrain de la fibre choisie.

Ce retour d'expérience a permis d'identifier les modifications à apporter au prototype pour le rendre opérationnel sur site : choisir une nouvelle fibre optique, interroger directement chacune des cinq fibres depuis le sommet (pas de retournement en fond de forage), modifier la filière d'extrusion de fabrication du profilé support pour en faciliter l'insertion dans un tube inclinométrique.

MOTS-CLES

Mouvements de terrain ; Fibre optique ; Plan de courbure ; Plan neutre ; Courbes dans l'espace ; Théorie de Frenet-Serret ; Essai in situ.

1 Introduction

L'identification de la pathologie des mouvements de terrains ou la surveillance d'ouvrages relevant de la sécurité publique (digues, barrages, réservoirs...) reposent fréquemment sur l'observation de la cinématique à l'intérieur des massifs de sol ou de roche. Les dispositifs d'observation actuels (inclinomètres, extensomètres) présentent des limites en termes d'application, comme l'orientation des forages d'installation ou l'observation simultanée de déplacements longitudinaux et transversaux. L'objet de ce projet est de développer un nouveau dispositif d'observation 3D des déplacements internes d'un massif de sol ou de roche par fibre optique pour la caractérisation des mouvements de terrains.

Une première étude [1] a permis de démontrer la faisabilité d'un dispositif de caractérisation de la déformée d'une structure linéique en observant, par fibres optiques, les déformations en différents points de sa section droite. Un prototype expérimental adapté au suivi des mouvements de terrains a ensuite été fabriqué et testé au laboratoire en conditions contrôlées [2]. Une filière d'extrusion a été développée avec un industriel pour produire en polyéthylène haute densité une structure linéique, conçue pour être équipée de fibres optiques précisément collées à différentes positions et distances de l'axe neutre. Les essais de flexion plane quatre points réalisés au laboratoire sur un tube inclinométrique long de 15 m équipé du prototype ont montré que la déformée réelle était reconstruite avec précision à partir des mesures de déformations observées dans les fibres le long du profilé support.

Pour évaluer sa performance en situation réelle, le dispositif a été installé sur le site du glissement de terrain de Charlaix, près de La Mûre (F-38350), dans un forage vertical profond de 20 m équipé d'un tube inclinométrique, mis à disposition par le Cerema. Ce rapport d'étude présente la confrontation au terrain du nouveau dispositif.

La suite de ce document tout d'abord rappelle les spécifications techniques du dispositif développé pour observer les déplacements dans les sols le long d'une ligne de direction quelconque. La mise en œuvre sur site est ensuite présentée, avec une brève description des conditions géotechniques du site, l'installation en forage du prototype et les résultats des premières mesures. Enfin, cette expérimentation du dispositif sur le terrain permet de tirer des conclusions sur le caractère opérationnel du nouveau dispositif et les améliorations à apporter.

2 Rappel des caractéristiques du prototype

Le nouveau dispositif d'observation des déplacements dans les sols ou roches le long d'une ligne comporte un profilé fabriqué par extrusion de polyéthylène haute densité (PEHD). Ce profilé présente des gorges longitudinales dans laquelle sont insérées et collées des fibres optiques de mesure des déformations. Cette section tout d'abord rappelle les caractéristiques du prototype de dispositif et illustre ses performances évaluées par essais en laboratoire.

Pour être compatible avec l'équipement des forages employé pour observer les déplacements latéraux par sonde inclinométrique courante, le dispositif doit pouvoir être inséré dans un tube inclinométrique. La Figure 2.1 décrit les caractéristiques géométriques de la section du tube inclinométrique considéré pour fabriquer le prototype. Ce tube est composé d'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS). Il est produit par éléments de longueur 3 m raccordés par manchons extérieurs collés.

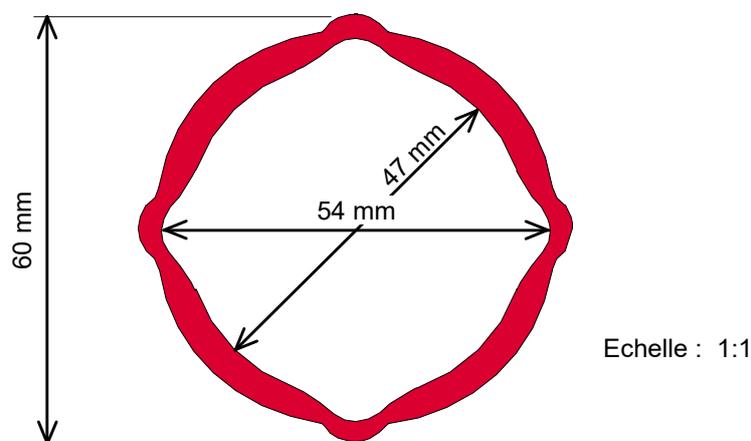


Figure 2.1 Section du tube inclinométrique retenu pour la conception du nouveau dispositif

Les caractéristiques géométriques de la section du profilé support des fibres optiques sont données en Figure 2.2. La section comporte quatre ailettes épaisses de 2 mm, orientées à 90° les unes des autres. La hauteur du profilé est de 53.1 mm, laissant un jeu de 0.45 mm de part et d'autre pour que les ailettes, arrondies en extrémité, coulissent à l'intérieur du tube inclinométrique dont la coupe est représentée en Figure 2.1. Chaque ailette comporte une gorge permettant de positionner de manière précise une fibre optique périphérique (de couleur bleue dans la figure) à une distance de 10 mm de la fibre neutre du profilé ($r_a = r_b = r_c = r_d = 10$ mm) et selon un rayon orienté à 90° des deux rayons adjacents ($\theta_a = \theta_b = \theta_c = \theta_d = 90^\circ$).

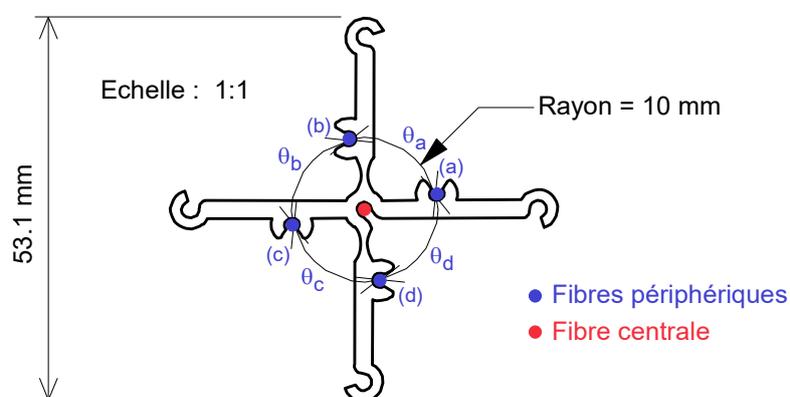
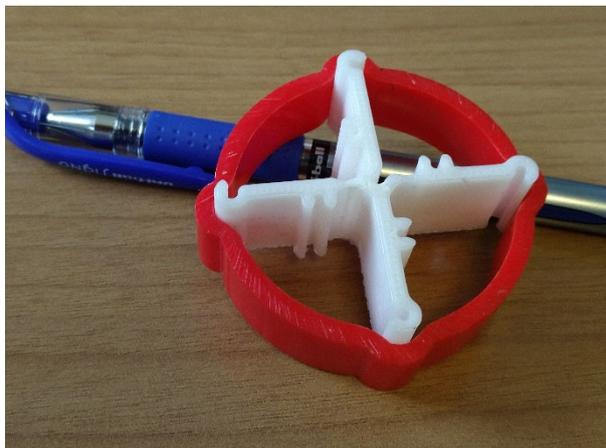


Figure 2.2 Section du profilé support des fibres optiques du nouveau dispositif

Pour illustration, la Figure 2.3 montre, en (a), une tranche de tube inclinométrique dans lequel coulisse un tronçon de profilé support des fibres optiques et, en (b), le prototype installé au laboratoire dans un tube inclinométrique long de 15 m. Dans cette dernière photographie, le tube inclinométrique est de couleur jaune, le profilé support en PEHD en blanc et les fibres optiques en bleu.



(a) Tronçon de profilé support des fibres optiques (b) Tube inclinométrique équipé du dispositif

Figure 2.3 Illustrations du profilé support des fibres optiques

Pour être transporté sur site en un seul élément, de la longueur du forage et équipé des fibres optiques collées au laboratoire, le profilé doit pouvoir être enroulé sur un tambour de diamètre de l'ordre de 1 m sans endommager les fibres optiques. C'est pourquoi, comme le montre la section du profilé en Figure 2.2, deux ailettes opposées comportent à leur base un amincissement, permettant de replier chacune de ces deux ailettes sur la suivante dans un même sens de rotation. Une fois ces ailettes repliées, le profilé forme une bande qui peut être enroulée pour le transport sur le terrain. Sur site, le profilé peut être débobiné et les deux ailettes réorientées à 90° des autres avant introduction dans un tube inclinométrique.

Pour une déformation maximale admissible par le cœur de la fibre de l'ordre de 1 % (cœur en silice) et une distance à l'axe neutre de la structure support des fibres optiques de 10 mm (cf. Figure 2.2), le rayon de courbure minimal admissible du dispositif se trouve réduit à 90 cm. Toutefois, il est probable qu'en réalité des rayons de courbure plus faibles puissent être observés sans endommager le dispositif, la déformation maximale admissible des fibres optiques comportant probablement un facteur de sécurité non précisé par les fabricants.

La Fibre Optique utilisée pour cette application est la fibre DNS-5553 fabriquée par l'entreprise AFL. La Figure 2.4 montre une coupe schématique de cette fibre extraite de la fiche technique fournie par l'entreprise. Le diamètre total de la fibre est de 2.1 mm, correspondant au diamètre extérieur de la gaine de protection (de couleur bleu). Cette fibre comporte six cœurs en silice, revêtus pour canaliser la lumière laser de l'interrogateur optique. Ces cœurs sont dits « monomode », interrogeables à une seule fréquence à la fois. De diamètre très faible et de comportement fragile, les cœurs sont noyés dans une couche de silicone épaisse de 0.7 mm et protégés des elongations excessives par un câble central de diamètre 0.4 mm.

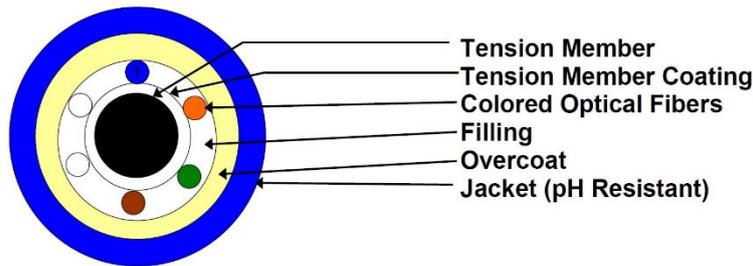


Figure 2.4 Section de la fibre optique utilisée pour le prototype de dispositif dans cette étude

Pour cette application, un seul cœur de la fibre est utilisé (interrogé). Le phénomène physique de rétrodiffusion de Rayleigh, influencé par l'indice de réfraction qui varie avec l'élongation du cœur, est utilisé pour déterminer précisément la déformation du cœur optique à une distance donnée de l'extrémité d'interrogation de la fibre. L'interrogateur optique utilisé est un appareil fabriqué par la société Luna, de la série ODiSI 6000. La configuration actuelle de l'appareil de l'Université Eiffel permet l'interrogation des fibres optiques sur une longueur maximale de 100 m. En termes de résolution, la déformation longitudinale du cœur optique peut être déterminée sur des tronçons de cœur de longueur très faible, jusqu'à 0.6 mm. La précision de la mesure de déformation sur un tronçon de cœur est de l'ordre de 1 μ -strain.

Enfin, comme le montre la photographie en Figure 2.3(b), les fibres optiques parcourent le dispositif en décrivant des aller-retours depuis une extrémité. L'intention est d'éviter toute terminaison de fibre optique, susceptible de s'altérer dans le temps au contact de l'eau et du terrain, en fond de forage. Chaque brin de fibre optique correspond donc à un aller-retour le long du dispositif. En cas d'endommagement de la fibre en un point, le brin pourra en cas d'être interrogé depuis l'une ou l'autre de ses deux extrémités en sommet du dispositif, à la surface du terrain, pour reconstituer les mesures sur toute la longueur du brin.

L'observation des déformations en plusieurs point de la section droite du profilé support support permet de déterminer, sur un élément de longueur ds , l'allongement à l'axe neutre, la direction du plan de courbure (perpendiculaire au plan neutre), la valeur de la courbure et le gauchissement de l'axe neutre (déviation du plan de courbure). Par intégration, ces caractéristiques permettent de décrire une courbe régulière dans l'espace (théorie de Frenet-Serret). Rajot et a. (2022) [2] contient les équations donnant les caractéristiques locales de la courbe décrivant l'axe neutre en fonction des déformations dans une section droite et présente les bases de la méthode pour reconstruire la trajectoire de l'axe neutre à partir des caractéristiques locales de la courbe décrite par l'axe neutre.

Des essais de flexion plane quatre points d'un tube inclinométrique long de 15 m équipé du dispositif ont été réalisés au laboratoire par Rajot et a. (2022) [2]. Le principe de ces essais est représenté en Figure 2.5. Pour cinq valeurs de flèche imposée, la Figure 2.6 montre le résultat brut de l'inversion donnant la courbure au droit des sections de mesures des déformations sur la longueur du tube inclinométrique. La valeur de la courbure déduite des mesures de déformations dans les fibres optiques présente un « bruit » relativement important entre sections de mesure des déformations, distantes de 2.6 mm.

Les extrémités du tube inclinométrique de part et d'autre des appuis simples correspondent aux portions où la courbure est quasiment nulle. Pour chacune des flèches maximales imposées, selon la théorie, la courbure augmente linéairement à partir des appuis jusqu'aux points d'application des charges et enfin est constante dans la partie centrale, entre les points d'application des charges. Les diminutions localisées de courbure observables dans ces graphes correspondent aux emplacements des manchons de raccordement des longueurs de tube inclinométrique qui localement raidissent le tube.

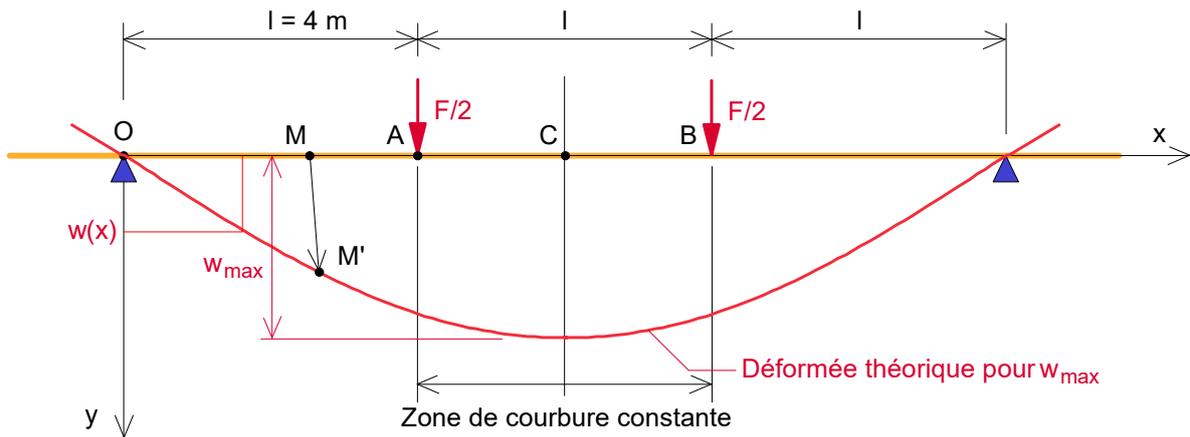


Figure 2.5 Sollicitation en flexion quatre points du tube inclinométrique équipé du dispositif

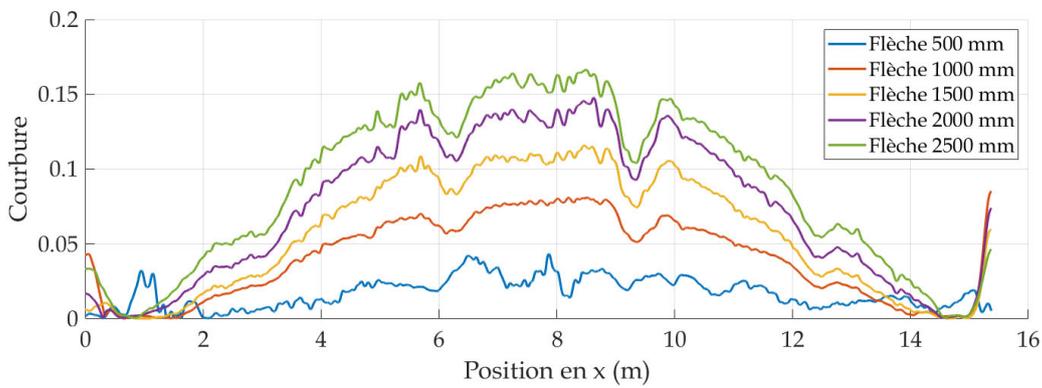


Figure 2.6 Courbure de long du tube inclinométrique déduite des mesures de déformations dans les fibres optiques pour les cinq valeurs de flèche maximale imposées

Enfin, la Figure 2.7 compare les déformées observées pendant les essais (courbes avec puces) à celles reconstruites par analyse inverse à partir des mesures de déformations. Il apparaît que les déformées directement observées tous les 0.50 cm pendant les essais coïncident assez précisément avec les déformées calculées à partir des mesures de déformations dans les fibres optiques. L'intégration des courbures lisse les résultats : une courbure localisée excessive déduite des mesures de déformation dans une section est compensée par une courbure insuffisante dans la section suivante.

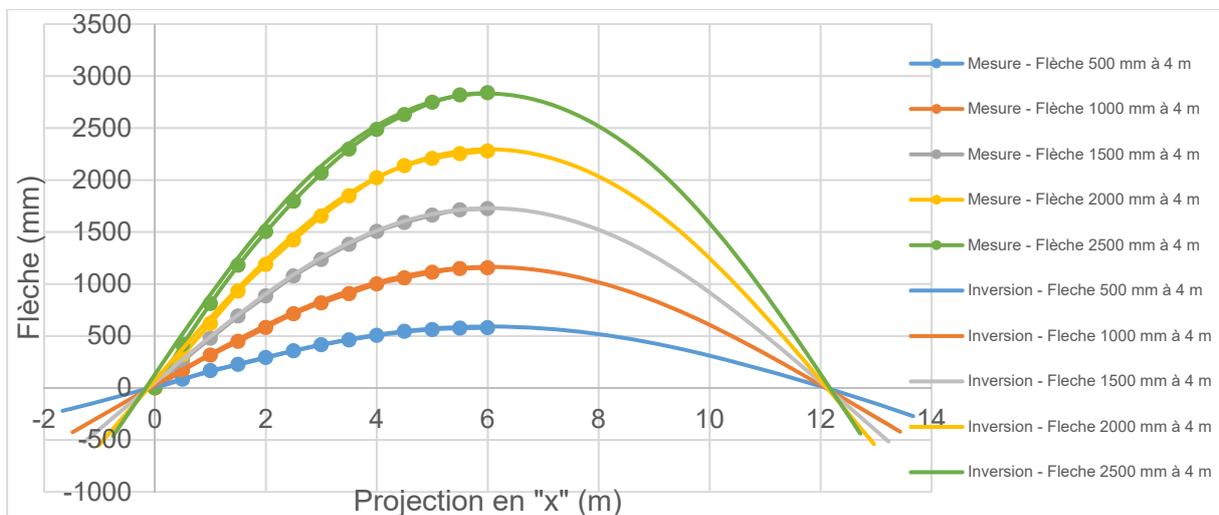


Figure 2.7 Comparaison des déformées observées et calculées par analyse inverse des déformations

3 Mise en œuvre sur site

Cette Section présente la mise en œuvre sur le terrain du dispositif d'observation par fibre optique des déplacements dans les sols le long d'une ligne. Avec le soutien du Cerema, un prototype du dispositif long de 20 m équipé de fibres optiques a été installé sur le site du glissement de terrain de Charlaix, près de La Mûre (F-38350), dans un forage équipé d'un tube inclinométrique. Il s'agit d'un grand glissement concernant la RN 85, dans un secteur où aucune alternative de transport routier raisonnable n'est possible. Le Cerema surveille donc ce grand glissement pour anticiper les mouvements et les travaux de confortement de la route. Le site est ainsi équipé de plusieurs piézomètres et inclinomètres, remplacés périodiquement car cisailés par les mouvements des sols. À l'automne 2021, à l'occasion d'une campagne de remplacement d'inclinomètres, le Cerema a réalisé un forage profond de 20.50 m équipé d'un tube inclinométrique pour tester sur site le nouveau dispositif.

La suite de cette Section tout d'abord présente succinctement le glissement de Charlaix et les conditions géotechniques du site. La mise en œuvre du prototype sur le terrain et la réalisation des premières mesures à l'installation (le 18 octobre 2022) sont ensuite décrites. Les mesures réalisées jusqu'en janvier 2023 sont ensuite présentées et interprétées.

3.1 Glissement de Charlaix – Contexte géotechnique et activité

Le glissement de Charlaix a été localisé en Figure 3.1, page suivante, dans un extrait de carte avec représentation du relief. Depuis La Mûre, en direction de Gap (vers le Sud), la RN 85 descend en fond de vallée, traverse la rivière La Bonne et remonte en versant opposé. Le glissement de Charlaix se trouve dans ce versant et concerne l'ensemble du premier lacet de la RN 85 depuis le franchissement de la rivière.

Ce glissement a fait l'objet de nombreuses études scientifiques et techniques. La Figure 3.2, extraite de Bièvre et al. [3], est une vue en plan du glissement affectant l'ensemble du lacet. Deux zones de glissement actuellement actives ont été délimitées sur cette vue (lignes discontinues de couleur bleu). Les vitesses de déplacement en surface du glissement de mars 2016 à juin 2017 ont également été cartographiées sur cette Figure. L'inclinomètre dans lequel sera placé le dispositif est situé dans la partie droite (Est) de la zone de couleur orange, correspondant à une vitesse moyenne de l'ordre de 6 cm/an sur la période 2016-2017.

Selon cette carte des vitesses de déplacement moyennes, les déplacements de surface les plus importants se trouvent dans la partie amont du glissement, comme si le glissement se trouvait buté en pied, au niveau de la RN où les vitesses de déplacement sont actuellement faibles, éventuellement en raison de travaux récents (masque en enrochements). Ce type de situation, qui correspond à une consolidation des sols en partie aval, est également observée pour les glissements affectant la route d'accès au tunnel du Fréjus, où la pente d'éboulis se compacte progressivement en pied de versant.

Ceci étant, pour les grands glissements, il est fréquent d'observer à différentes périodes des accélérations ou ralentissements de mouvements sur des zones variables du glissement. En effet, à un instant donné, les efforts provenant de zones instables se concentrent sur les zones plus stables et, en raison de l'effet du fluage sur la résistance au cisaillement des sols fins, ces zones stables progressivement entrent en rupture et se déplacent. Ce déplacement conduit d'une part à réduire les poussées provenant des zones précédemment instables et, aussi, à remobiliser la résistance au cisaillement, ce qui les stabilise de nouveau. Cette mobilisation en dents de scie de la résistance au cisaillement due au fluage conduit à observer des mouvements de reptation à des vitesses variables dans l'axe du glissement, mais aussi latéralement, le glissement étant en fait tridimensionnel. Concernant le glissement de Charlaix, il est possible que dans les prochaines années les mouvements redeviennent prépondérants dans la partie plus au Sud du glissement, ou au niveau du lacet de la RN.



Figure 3.1 Localisation du glissement de Charlaix près de La Mûre (38350)

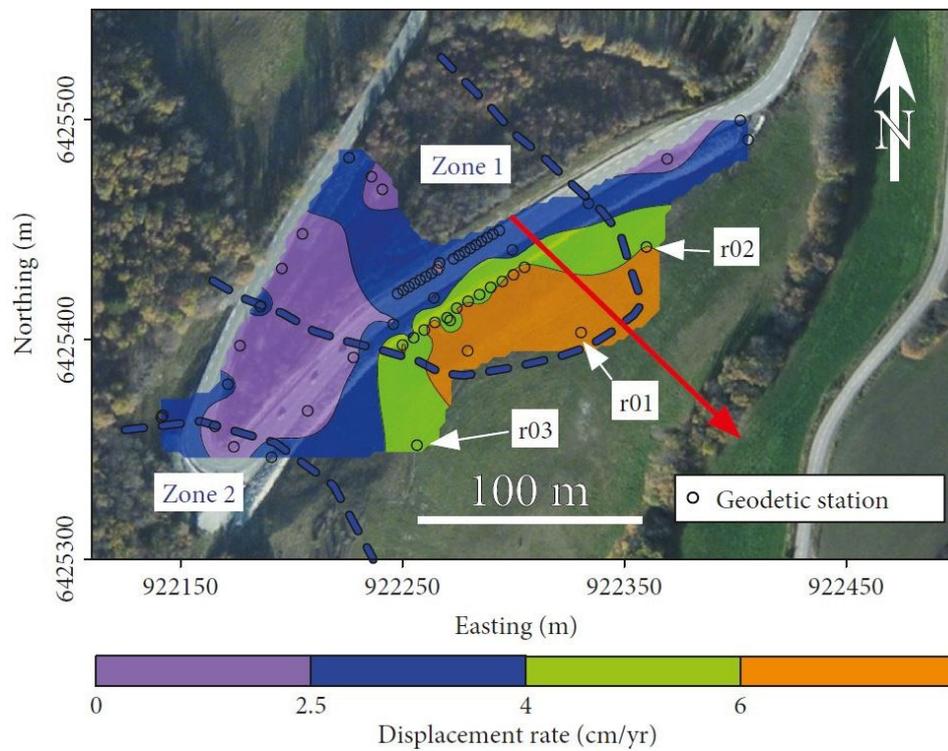


Figure 3.2 Limites du glissement et vitesses de déplacement en surface de mars 2016 à juin 2017 (d'après Bièvre et al. (2018) [3])

La géologie et hydrogéologie du site résulte d'avancées et de retraits successifs du glacier de la Bonne au cours du quaternaire [3], conduisant à une lithologie de couches de natures contrastées. Un lac limité par le glacier existait de manière périodique, dans lequel des sédiments se déposaient par couches successives composées de passées d'argile, de limon ou de sable, suivant la distance au glacier à une époque donnée. Ces matériaux, nommés « argiles litées du Trièves », sont connus pour les problèmes de stabilité de versants. En effet, avec des passées subhorizontales argileuses canalisant les écoulements vers l'aval dans les passées plus limoneuses ou sableuses, l'anisotropie de la perméabilité tend à accroître la pression de l'eau circulant dans les passées plus perméables couvertes par les passées plus étanches et alimentées par infiltration en sommet de formation.

La Figure 3.3, extraite de Bièvre et al. (2018) [3], montre une coupe du modèle géotechnique utilisé pour effectuer des calculs de stabilité du glissement du Charlaix. La plate-forme de la RN se trouve en pied de talus, à gauche dans la Figure. Depuis la surface, le site comporte une couche de moraines et de sables lacustres épaisse d'environ 5 m (de couleur orange dans la Figure), reposant sur une formation d'argiles litées du Trièves. Sur une épaisseur allant jusqu'à 12 m (de couleur grise dans la Figure), ces argiles litées sont considérées remaniées par les mouvements du sol, présentant ainsi une résistance au cisaillement réduite, plus faible que celle des argiles litées inférieures (de couleur jaune) considérées intactes.

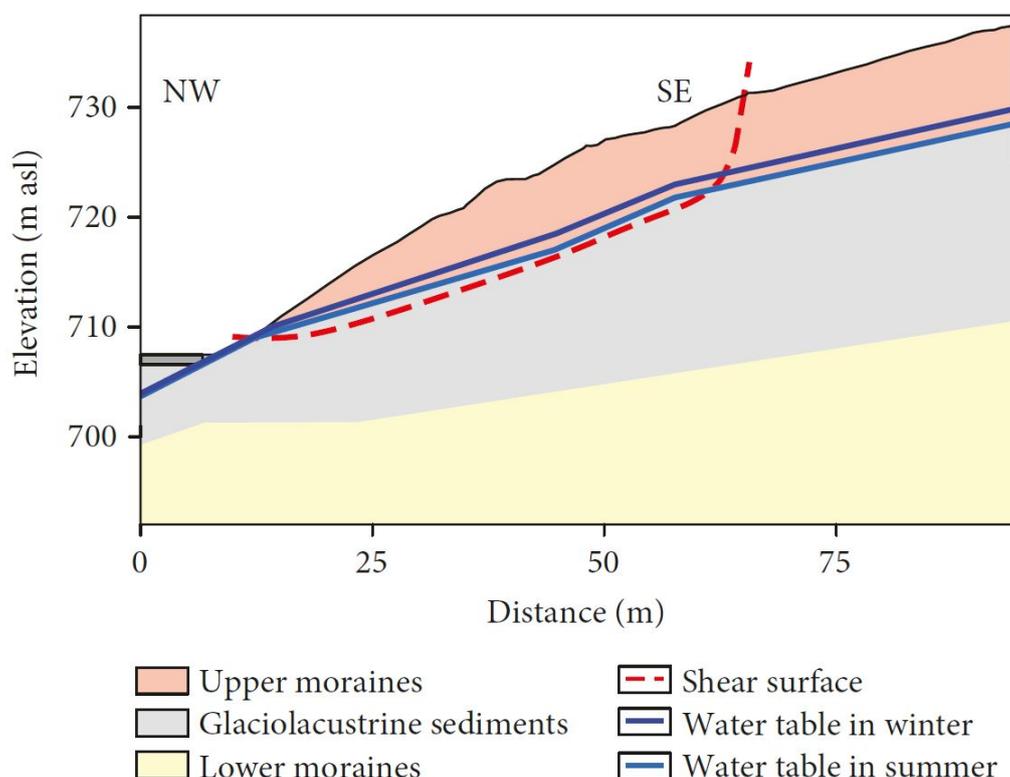


Figure 3.3 Modèle de profil géotechnique du site dans la direction du glissement (d'après Bièvre et al. (2018) [3])

Une courbe de rupture a été représentée en Figure 3.3. Cette courbe correspond à la surface de rupture la moins profonde du glissement, observée par inclinomètres installés sur le site. Le niveau piézométrique, représenté en bleu dans la Figure, a été déduit des capteurs de pression interstitielle installés en forage sur le site. Il fluctue de quelques mètres entre l'été (nappe plus basse) et l'hiver (nappe plus haute). Les paramètres décrivant la résistance au cisaillement des couches de sol ont été calés par analyse à rebours de la stabilité relative de la pente (proche de l'équilibre). Le Tableau 3.1 indique les valeurs de ces paramètres données par [3]. Avec ce modèle géotechnique, le coefficient de sécurité pour cette surface de rupture

est évalué à 1.15 en hiver et 1.23 en été. Ce modèle peut ensuite être utilisé pour étudier les effets de différents confortements pour ralentir le glissement, comme le masque en enrochements installé en talus amont de la RN il y a quelques années.

Tableau 3.1 Poids volumique et résistance au cisaillement des sols du profil

Couche	Poids volumique (kN/m ³)	Cohésion effective (kPa)	Angle de frottement interne (°)
Moraine, sable	20	0	30
Argiles litées remaniées	19	2	19
Argiles litées intactes	19	4	20

Pour se faire une idée de la structure réelle du glissement en profondeur, il est intéressant de suivre les mouvements observés par inclinomètre. Le forage équipé de tube inclinométrique mis à disposition de l'Université Eiffel pour cette étude est dénommé « I10 » dans la liste des instrumentations du Cerema installées pour suivre ce glissement. Le Tableau 3.2 indique la date de réalisation du forage, sa profondeur et les coordonnées et altitude de la tête du forage. La position du sondage a également été repérée sur une carte en Figure 3.4.

Tableau 3.2 Identification du sondage utilisé pour tester in situ le nouveau dispositif d'observation des déplacements par fibre optique

Nom	Date réalisation	Profondeur (m)	Tête de forage		
			Longitude (*)	Latitude (*)	Cote NGF (m)
I10	Sept. 2021	20	5.8168277059	44.8922407375	725.12

(*) longitude/latitude au format WGS84



Figure 3.4 Position du forage équipé d'un tube inclinométrique utilisé pour tester le dispositif

La Figure 3.5 montre l'évolution des déplacements horizontaux du tube inclinométrique I10 entre le 8/12/2021 (date de la première mesure) et le 18/10/2022, jour de la mise en place

dans le tube du nouveau dispositif d'observation des déplacements par fibre optique. Au droit du sondage qui sera instrumenté avec le nouveau dispositif par fibre optique, trois niveaux de glissements emboîtés apparaissent, vers 7 m, 12 m et 14 m de profondeur. Ces observations illustrent la complexité du glissement, avec une zone remaniée de 7 m à 14 m de profondeur. Au niveau du Terrain Naturel, les déplacements cumulés sur 10 mois sont de l'ordre de 2 cm, soit une vitesse annuelle moyenne de 2.4 cm/an, inférieure aux vitesses observées de 2016 à 2017 représentées en Figure 3.2.

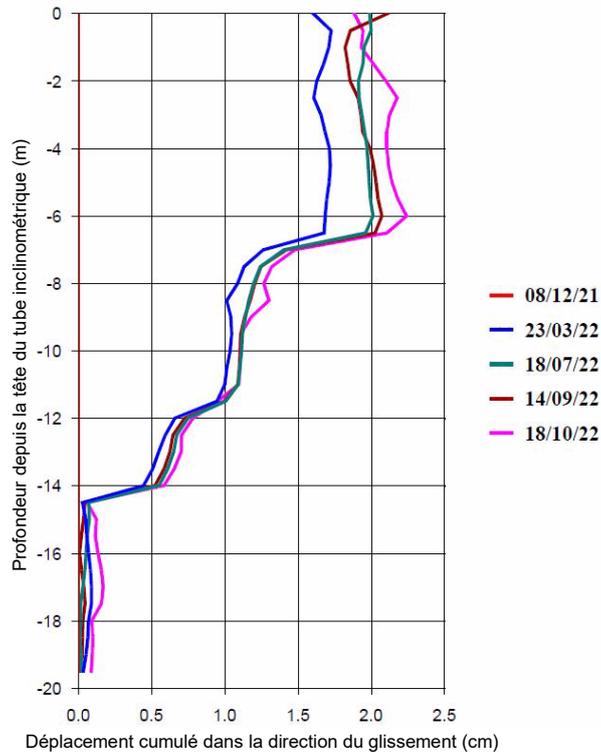
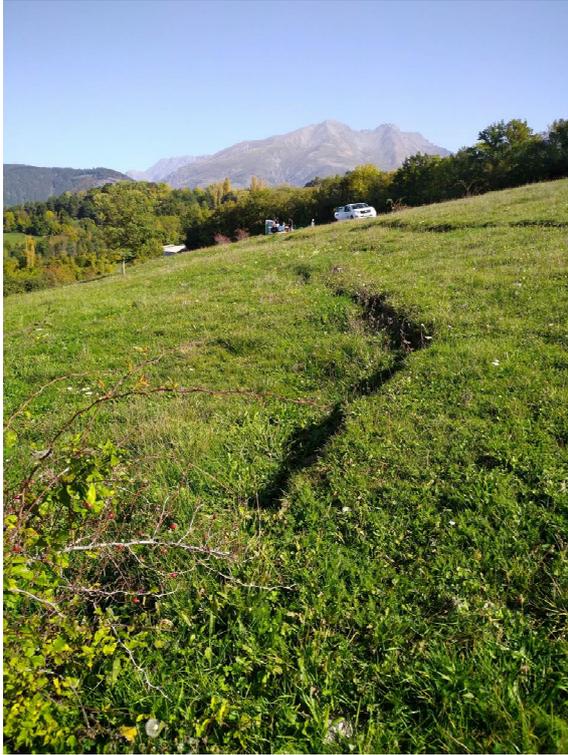


Figure 3.5 Déplacements horizontaux cumulés le long du forage utilisé pour tester le dispositif par fibre optique, depuis le 8/12/2021 (première mesure) jusqu'au 18/10/2022 (installation du dispositif)

Enfin, à l'occasion de l'installation sur le terrain du nouveau dispositif, le 18 octobre 2022, quelques observations ont été réalisées sur le site du glissement. La photographie en Figure 3.6(a) montre des arrachements à l'intérieur du glissement. Le véhicule tout terrain en arrière-plan dans le pré est le véhicule d'intervention sur site de l'Université Eiffel. Il a été stationné à proximité du forage I10 pour approcher l'ensemble du matériel nécessaire à l'installation du dispositif et aux premières mesures. La photographie en Figure 3.6(b) montre les enrochements installés en talus amont de la RN dans la zone du glissement. Ce talus ne présente pas de désordre majeur, mais des blocs sont tout de même descendus en pied de talus, indiquant d'éventuels mouvements d'ensemble.

En direction du lacet, le talus amont de la RN présente d'importants désordres, comme le montre les photographies en Figure 3.7. De nombreuses fissures ouvertes, favorisant l'infiltration des eaux de ruissellement, sont présentes dans le talus. Cette partie du glissement, de couleur bleu en Figure 3.2 présentait des vitesses moyennes de déplacement relativement faibles en 2016 et 2017. Aujourd'hui il semble que les désordres devraient prochainement s'accroître dans cette zone non confortée en talus.



(a) Lignes d'arrachement dans le glissement



(b) Masque en enrochements en talus de RN

Figure 3.6 Photographies du glissement prises le 18 octobre 2022



(a) Désordres dans le talus près du lacet



(b) Fissures ouvertes

Figure 3.7 Désordres dans le talus amont de la RN au voisinage du lacet (18/10/2022)

3.2 Installation du prototype en tube inclinométrique

Le prototype d'observations des déplacements dans les sols par fibre optique a été installé le 18 octobre 2022 en présence du Cerema dans le forage I10 équipé de tube inclinométrique. La photographie en Figure 3.8 (a) montre l'arrivée sur le terrain et l'ouverture de la bouche à clé protégeant la tête du forage. Le dispositif équipé de fibre optique, long de 20 m, se trouve enroulé sur la bobine en arrière-plan. Avant installation du dispositif, le Cerema a réalisé un dernier relevé en utilisant une sonde inclinométrique usuelle, par pendule inverse (Figure 3.8 (b)). Ce relevé correspond à la courbe de couleur rose dans le graphe des déplacements horizontaux cumulés représentée en Figure 3.5.



(a) Arrivée sur le terrain



(b) Relevé inclinométrique du tube I10

Figure 3.8 Arrivée sur le terrain et dernière mesure par sonde inclinométrique courante

L'étape suivante a consisté à mettre en place le dispositif équipé de fibres optiques dans le tube inclinométrique. Pour cela, le profilé en PEHD équipé de fibres optiques était progressivement déroulé de la bobine de transport (Figure 3.9 (a), page suivante). Au fur et à mesure, les deux ailettes repliées étaient redressées pour être disposées radialement à 90° des autres ailettes et le dispositif directement inséré dans le tube inclinométrique.

D'importantes difficultés ont été rencontrées pour faire pénétrer de profilé à l'intérieur du tube inclinométrique jusqu'à 20 m de profondeur. Le jeu de 0.45 mm entre diamètre externe du profilé support et diamètre interne en fond de rainures du tube inclinométrique s'est avéré être bien trop faible. D'important frottements sont apparus, probablement accentués par la déformée du tube à 7 m, 12 m et 14 m de profondeur (cf. déformée du tube au 18/10/2023 en Figure 3.5). À plusieurs reprises, le profilé support a dû être ressorti, lubrifié et foncé de nouveau dans le tube, plusieurs personnes exerçant une poussée. Finalement, comme le montre la photo en fin de fonçage en Figure 3.9 (b), un des opérateurs (avec veste rouge) entaillait légèrement l'extrémité d'une des ailettes pour accroître le jeu entre le profilé et le tube et ainsi pouvoir descendre le profilé jusqu'en fond de tube, à 20 m de profondeur.

Une optimisation du dispositif est donc à prévoir pour faciliter son installation sur le terrain en tube inclinométrique. Tous les efforts exercés et flexions répétées supportées par la structure support sont sources de dommages aux fibres optiques lors de l'installation.



(a) Début du débobinage



(b) Fin du fonçage dans le tube inclinométrique

Figure 3.9 Débobinage et fonçage difficile du profilé dans le tube inclinométrique

Enfin, le dispositif est installé dans le tube inclinométrique. En Figure 3.10, les photographies montrent en (a) les terminaisons des fibres optiques à connecter à l'interrogateur et en (b) une vue du sommet du dispositif avec l'arrivée de l'ensemble des fibres optiques. Les localisations des différentes fibres dans une section du profilé support sont identifiées par des étiquettes collées sur les fibres en extrémité du dispositif.



(a) Connecteurs optiques au sommet de dispositif



(b) Arrivée et repérage des fibres optiques

Figure 3.10 Sommet du dispositif installé dans le forage I10

Une première interrogation des fibres optiques a alors été réalisée à l'installation, le 18 octobre 2022. Cette première mesure de déformations le long des fibres optiques serviront de référence pour, à l'issue des futurs relevés, calculer les variations de déformations et l'évolution de la déformée du tube par rapport à cette date. La photographie en Figure 3.11 montre l'installation utilisée pour la réalisation de cette première mesure. Un groupe électrogène a été employé pour alimenter les boîtiers de connexion des fibres optiques, l'interrogateur (de couleur gris clair) et l'ordinateur de pilotage de l'interrogateur et de stockage des mesures. La mise en œuvre du nouveau dispositif implique des moyens sur le terrain et une logistique plus importante que pour un relevé inclinométrique par sonde courante.



Figure 3.11 Réalisation de l'interrogation initiale des fibres optiques le 18/10/2022

3.3 Mesures réalisées et interprétation

La première interrogation des fibres à la mise en œuvre du dispositif est aussi l'occasion de tester le fonctionnement des fibres optiques après installation. Il s'est avéré que les brins de fibre optique avaient été endommagés en plusieurs points pendant la mise en œuvre. Les brins de fibre optique décrivant plusieurs aller-retours le long du profilé support, pour tenter de récupérer davantage de mesures, une seconde intervention sur site s'est déroulée le 25 octobre 2022, pour ajouter des connecteurs optiques en sommet du dispositif et ainsi accroître

le nombre de points d'interrogation des brins de fibre optique. Une dernière mesure a été réalisée le 25 janvier 2023 pour observer d'éventuels déplacements sur une période de 3 mois.

La suite de cette Section présente et commente les mesures réalisées les 18 et 25/10/2022, puis le 23/01/2023. La Figure 3.12 permet d'identifier la position des différentes fibres optiques dans une section du profilé support et leur localisation par rapport aux principaux déplacements des sols d'après les derniers relevés par inclinomètre usuel. Comme aucune terminaison de fibre optique n'était souhaitée dans le sol en fond de forage, six fibres apparaissent dans cette Figure. Les fibres 2, 3, 33, 4 et 44 sont les fibres principales du dispositif, permettant de caractériser la déformée tridimensionnelle du profilé support. La fibre 1, en périphérie, en fait correspond au retour de la fibre 2 située à l'axe neutre. Les mesures sur la fibre 1, qui introduit de la redondance, ont toutefois été utilisées dans le dépouillement des données et l'analyse des résultats présentés dans la suite.

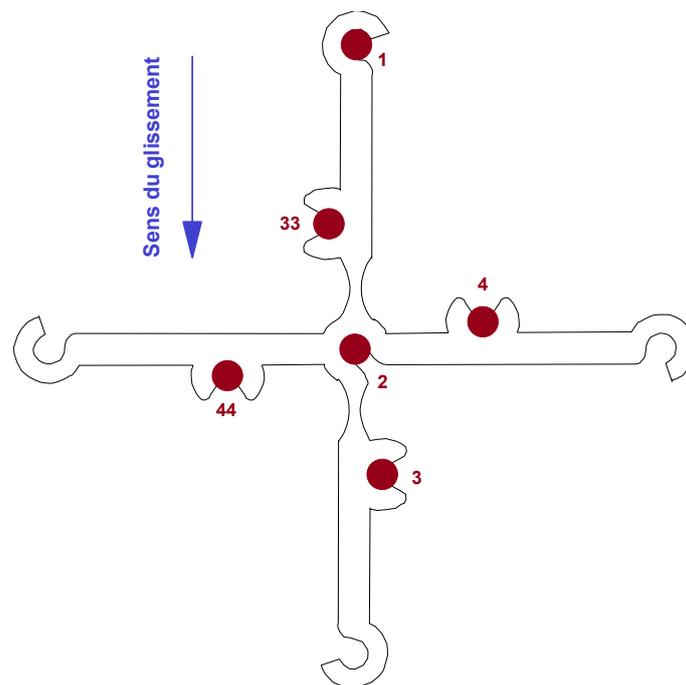


Figure 3.12 Numérotation des fibres dans une section du profilé et leur localisation par rapport aux principaux déplacements escomptés

Même si le dépouillement des mesures de déformations le long des fibres est tridimensionnel, pour accroître les chances d'interpréter les mesures en terme de déplacements des sols, une majorité de fibres ont été placées dans un plan vertical a priori contenant la direction du glissement (cf. Figure 3.12, depuis l'amont, les fibres 1, 33, 2 et 3). Les fibres 4 et 44 doivent permettre d'observer les déplacements transverses au glissement.

Le Figure 3.13 montre les mesures de déformation brutes observées le 25 janvier 2023 depuis l'extrémité de la fibre 2, sur le brin formant les fibres 1 et 2. L'abscisse du graphe correspond au numéro de jauge de déformation optique le long de la fibre (tronçons de fibre longs d'environ 26 mm) et l'ordonnée les différentes mesures au droit de chaque jauge, acquises sur une période de 2 secondes à une fréquence de 100 Hz. Les couleurs traduisent la valeur de la déformation mesurée. En partie gauche, la couleur bleu-clair indique des déformations pratiquement nulles, ce qui est cohérent avec la position à l'axe neutre de la fibre 2. Par contre, peu après le fond de forage, correspondant à la fibre 1, la mesure est perdue, la couleur bleu-foncé traduisant une absence de signal. Des mesures intermittentes (non fiables) apparaissent entre les jauges d'indices 10000 à 11000 et vers la jauge d'indice 14000. Le fibre 1 s'avère donc être endommagée.

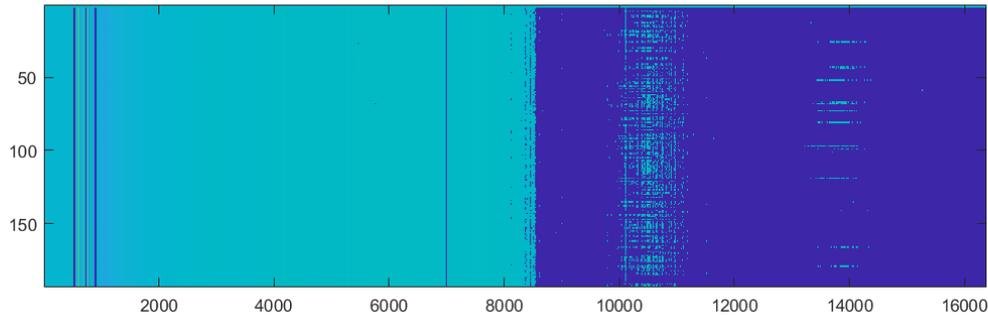


Figure 3.13 Mesures brutes observées le 25 janvier 2023 depuis l'extrémité de la fibre 2 (en abscisse, numéro de la jauge optique et ordonnée nombre de mesures successives)

L'interprétation des mesures réalisées sur le brin formant les fibres 2 (à l'axe neutre) et 1 (en périphérie extérieure du dispositif, côté amont de l'axe neutre par rapport au sens du glissement) a été représentée en Figure 3.14, page 24. Dans la fibre 2, les déformations sont restées faibles entre le 18 octobre 2022 et le 25 janvier 2023, ce qui est cohérent avec la position à l'axe neutre de la fibre 2. Par contre, comme mentionné précédemment, la fibre 1, en périphérie côté amont, a été endommagée sur plusieurs tronçons et les mesures perdues définitivement perdues à partir du 25 janvier 2023. Ces deux fibres à elles seules auraient pu être utilisées pour calculer la déformée du dispositif dans l'axe du glissement, mais la perte du signal rend impossible l'analyse.

Les mouvements de terrain dans la direction du glissement peuvent être déduits des mesures de déformations dans les fibres 33, 2 (à l'axe neutre) et 3. La Figure 3.15 représente les mesures le long de la fibre 3, depuis son extrémité au sommet du dispositif jusqu'à l'extrémité en fond de forage et sa remontée vers le sommet dénotée « fibre 33. » Cette figure montre que la fibre 3 est bien interrogée aux différentes dates, les 18 et 25 octobre 2022 et 25 janvier 2023. Par contre, en remontant le long de la fibre 33 les mesures sont perdues vers 2 m au-dessus du fond de forage. Le brin de fibre optique long d'environ 80 m constituant les fibres 3, 33, 4 et 44, fut donc coupé le 25 octobre 2022 au sommet du dispositif pour souder des connecteurs optiques supplémentaires et interroger chaque fibre depuis le sommet.

La Figure 3.16 montre les mesures de déformations le long de la fibre 33 obtenues par interrogation depuis le sommet du dispositif. La seconde intervention sur site, le 25 octobre 2022, pour ajouter des connecteurs optiques a donc bien permis de récupérer des mesures le long de la fibre 33 jusqu'à proximité de l'extrémité du dispositif en fond de forage, mais la mesure a définitivement été perdue lors de l'interrogation pour le relevé suivant, le 25 janvier 2022. La sensibilité à l'environnement sur site et dans le sol des fibres et des connecteurs ou terminaisons optiques pose question. Enfin, aucune mesure n'a pu être obtenue sur les fibres 4 et 44, supposées permettre l'observation de déplacements transverses à la direction principale du glissement.

Par conséquent, sur les six fibres installées le long du dispositif, seules deux fournissent des mesures sur la période d'observation, du 18 octobre 2022 au 25 janvier 2023 : la fibre 2 située à l'axe neutre du dispositif et la fibre 3 côté aval dans le sens du glissement. La fibre 2 (Figure 3.14) indique une compression du dispositif décroissante sur les sept premiers mètres de profondeur. Cette interprétation est douteuse, puisque le dispositif est supposé coulisser dans le tube inclinométrique. Lorsqu'un déplacement vertical significatif se produit (tassement), les inclinomètres présentent une succession de déplacements vers l'amont et vers l'aval, indiquant une déformée « en accordéon » du tube.

Sur la période du 18 octobre 2022 au 25 janvier 2023, la fibre 3 (Figure 3.15) présente également une compression qui décroît progressivement depuis le sommet du dispositif jusque vers une profondeur de l'ordre de 10 m. Cette déformation est compatible avec la position de la fibre, à distance de l'axe neutre du profilé support dans le sens du glissement. Ces mesures semblent traduire une reptation des terrains sur la période, plus importante en surface du site, la courbure du dispositif décroissant avec la profondeur.

Étant donné la faible quantité de mesures, l'analyse en termes de déformée du dispositif a été réalisée sans donner de résultat probant. En fait, même si une interprétation en terme de déplacements peut être réalisée en utilisant les mesures de déformations le long des fibres 2 et 3, cette tentative est incertaine en raison des faibles déplacements des sols sur la période d'observation de trois mois (du 18 octobre 2022 au 23 janvier 2023). En effet, l'incrément de déplacements dans le terrain sur une période de trois mois peut être tiré des relevés inclinométriques en Figure 3.5, par exemple entre les relevés des 18/07/2022 et 18/10/2022. Le faible incrément de déplacement ne présente alors qu'une décroissance progressive des déplacements avec la profondeur sur une épaisseur de sol de l'ordre de 10 m, sans nettement faire apparaître de surface de glissement.

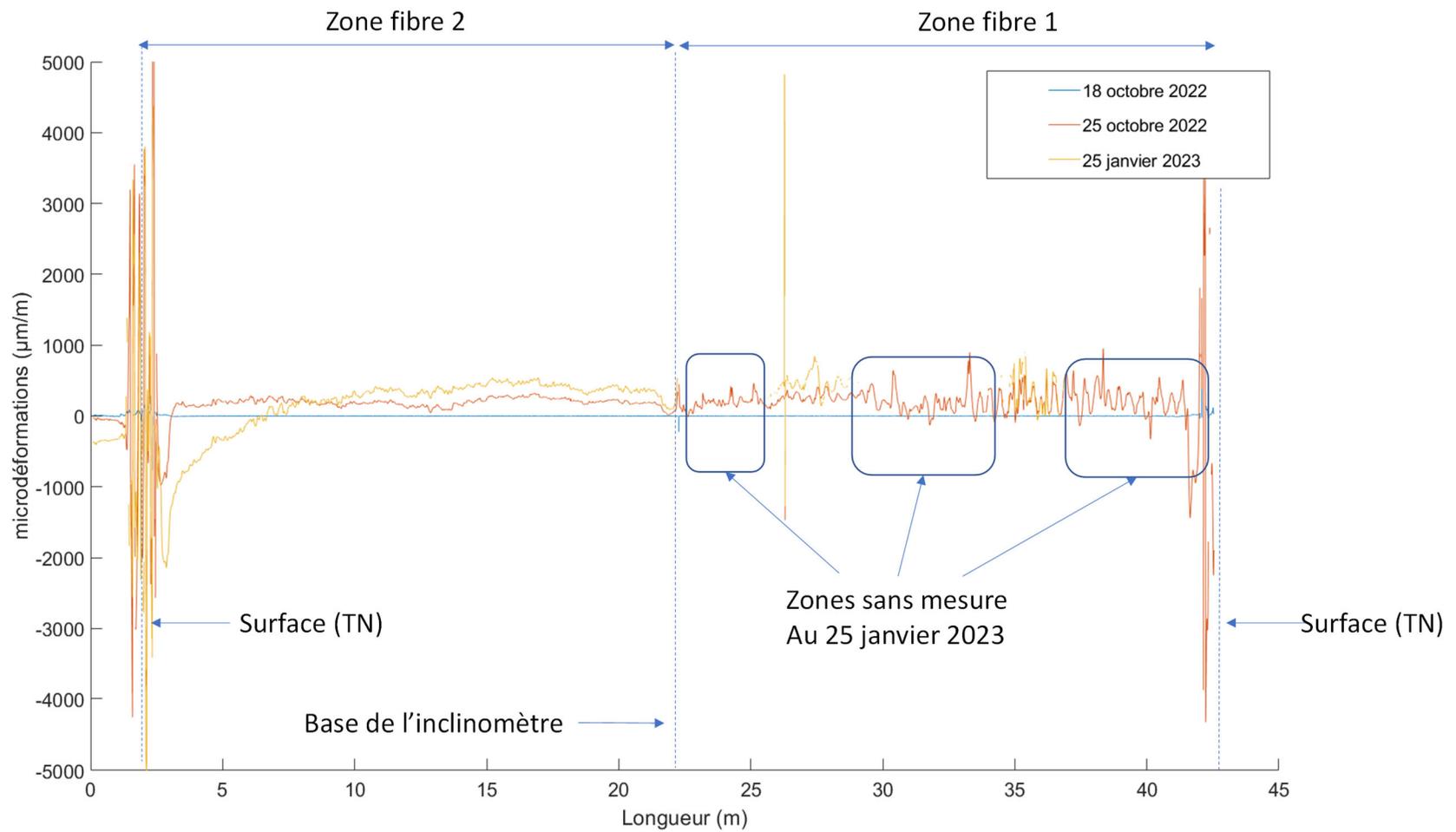


Figure 3.14 Comparaison sur la période d'observation des déformations le long de la fibre 2 (axe neutre) et de la fibre 1 (en périphérie côté amont)

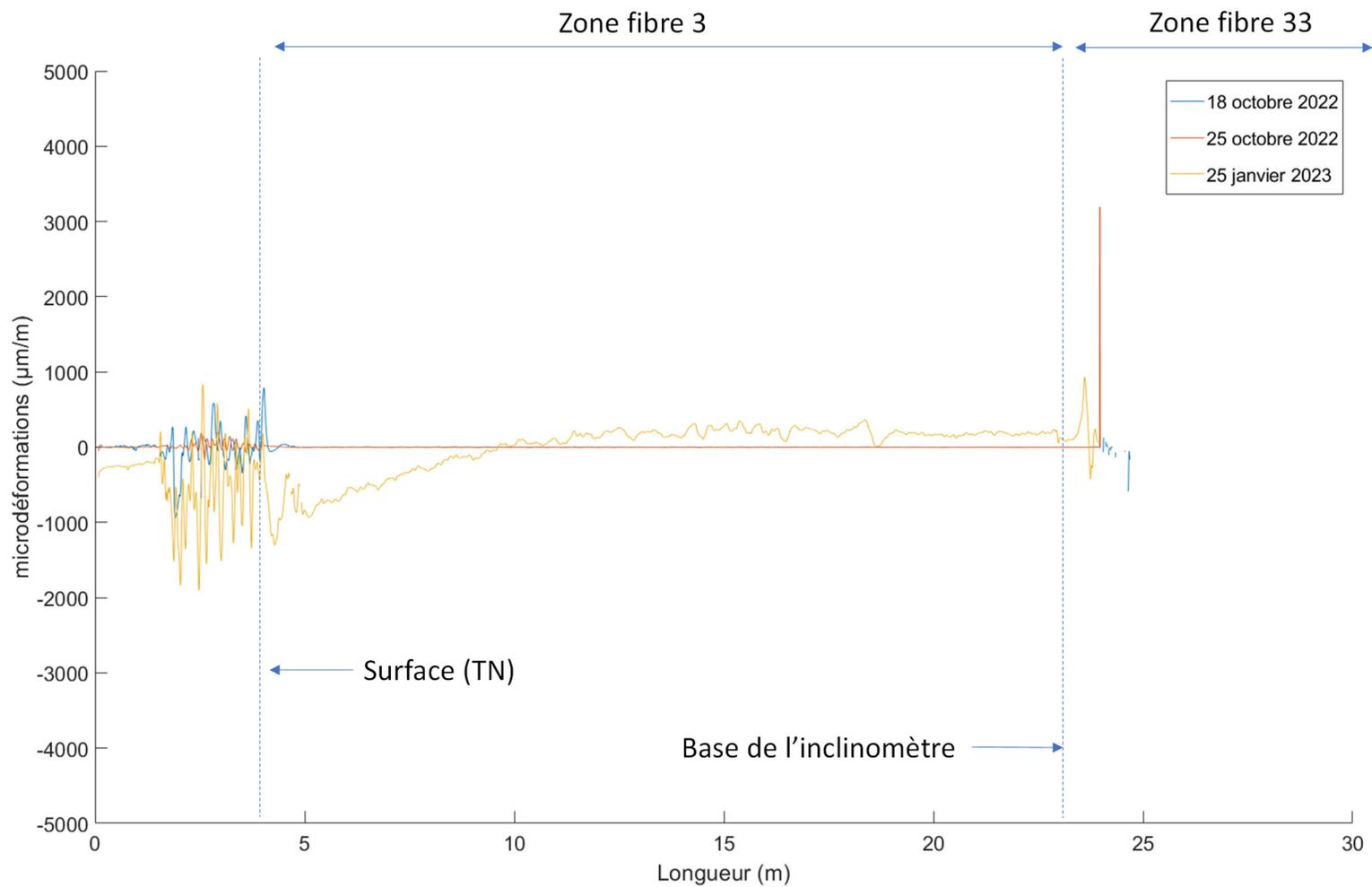


Figure 3.15 Comparaison sur la période d'observation des déformations observées depuis l'extrémité au sommet du dispositif de la fibre périphérique 3 (aval) et en remontant depuis la base du dispositif par la fibre périphérique dénotée 33 (amont)

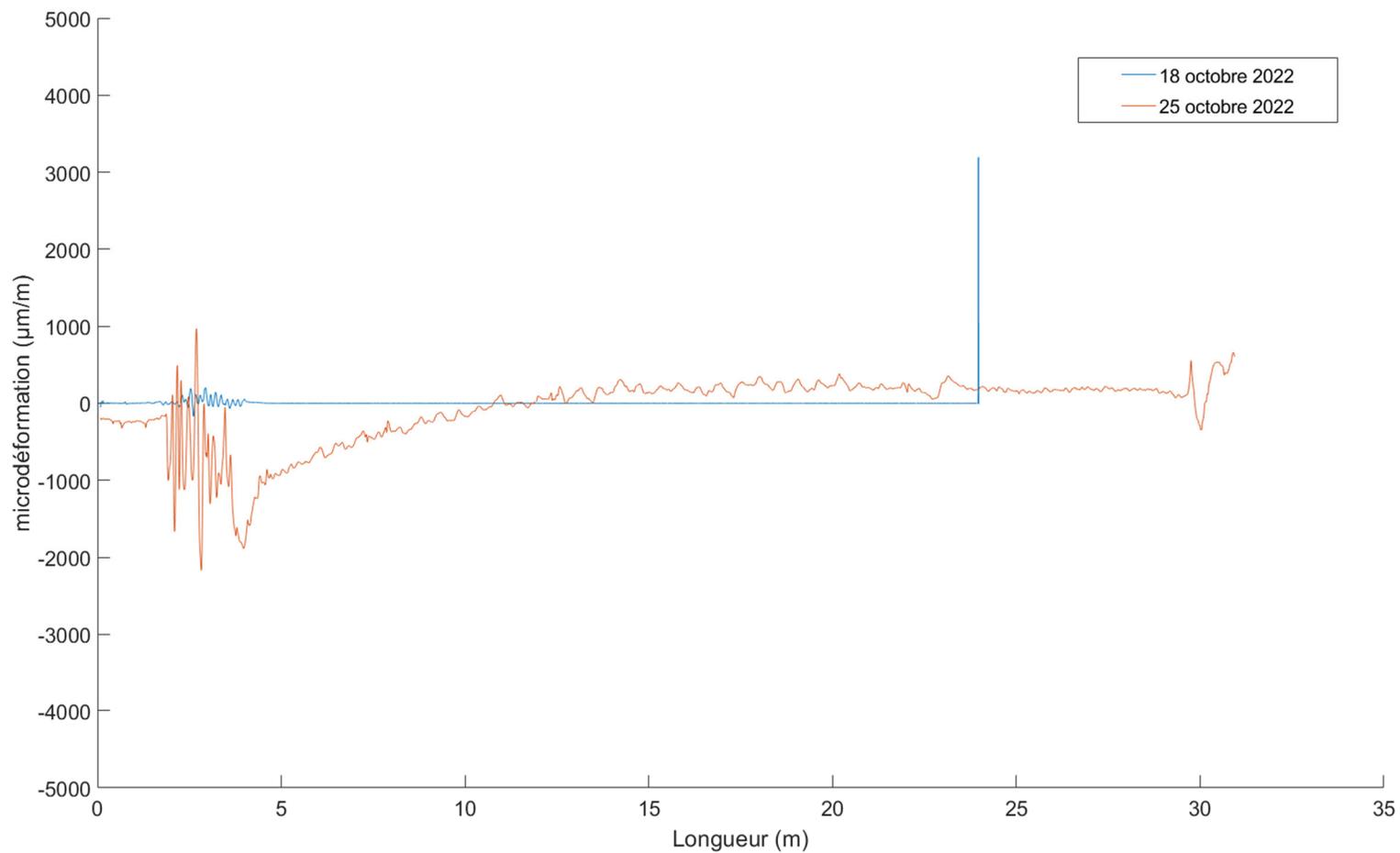


Figure 3.16 Déformations observées le 25 octobre 2022 depuis l'extrémité au sommet du dispositif le long de la fibre périphérique 33 (amont)
(mesures perdues lors de l'intervention du 25 janvier 2023)

4 Conclusion et perspectives

Le nouveau dispositif d'observation des déplacements dans les sols par fibre optique a été mis en œuvre sur site, dans le glissement de Charlaix affectant la RN 85 près de La Mûre (F-38350), dans un forage équipé de tube inclinométrique mis à disposition par le Cerema.

Le fonçage du prototype dans le tube inclinométrique s'est avéré difficile en raison d'importants frottements, le jeu entre diamètre externe du profilé support des fibres et diamètre interne en fond de rainures du tube inclinométrique étant trop faible pour un fonçage sur une longueur de 20 m. En outre, entre la date d'installation du tube en forage en septembre 2021 et la mise en œuvre du dispositif en octobre 2022, plusieurs surfaces de rupture à différentes profondeurs dans le glissement avaient déformé le tube inclinométrique. Ces déplacements ont aussi accru la difficulté à faire pénétrer le dispositif à l'intérieur du tube inclinométrique.

Les multiples tentatives pour insérer le prototype dans le tube inclinométrique ont endommagé les brins de fibre optique en plusieurs points. Sur les six fibres collées à la structure support, seules deux ont donné des mesures sur la période d'observation, du 18 octobre 2022 au 25 janvier 2023. La fibre no. 2, placée à l'axe neutre de la structure support, a donné des mesures de déformations faibles, cohérentes avec sa position dans le profil, mais avec une compression au sommet du tube difficile à interpréter.

La fibre no. 3, à 10 mm de l'axe neutre côté aval dans le sens du glissement, est également observée en compression décroissante avec la profondeur, depuis le sommet du tube jusqu'à une profondeur de l'ordre de 10 m. Ces mesures en compression sont cohérentes avec la position de la fibre, pour un mouvement de reptation des sols d'amplitude décroissante avec la profondeur. En fait, sur une période de trois mois, le faible incrément de déplacements dans le terrain peut apparaître comme une décroissance progressive avec la profondeur sur l'épaisseur des sols en mouvement, sans pour autant permettre de distinguer les différentes surfaces de glissement emboîtées.

Les résultats de cette étude sont donc décevants au regard des résultats prometteurs obtenus au laboratoire en conditions d'essais contrôlées. Toutefois la confrontation avec le terrain a permis de dégager des pistes pour rendre le prototype opérationnel sur le terrain :

- Utiliser une fibre adaptée à une utilisation dans les sols saturés ou partiellement saturés (tests de durabilité à réaliser) et ne comportant qu'un cœur optique monomode.
- Supprimer les boucles d'aller-retour des brins de fibre optique en fin de forage. Prévoir donc des connecteurs et des terminaisons de fibre optique étanches pour chacune des fibres collées le long de la structure support.
- Revoir la filière d'extrusion pour tenir compte du diamètre la nouvelle fibre et accroître jeu pour insertion dans un tube inclinométrique.

Par ailleurs, en termes de perspectives, il semble pertinent de développer sur la base de ce prototype deux systèmes complémentaires :

- (1) Une sonde trajectographique de longueur limitée, utilisable en forage de direction quelconque, aisément transportable et coulissant facilement dans un tube inclinométrique.
- (2) Un dispositif pour observer les déplacements en 3D, y compris longitudinaux, à sceller directement dans le terrain. Ce nouveau dispositif nécessiterait de revoir le prototype pour garantir l'orientation des ailettes en l'absence de guidage par tube inclinométrique et d'être en mesure d'identifier une éventuelle torsion du dispositif.

Annexe A : Références bibliographiques

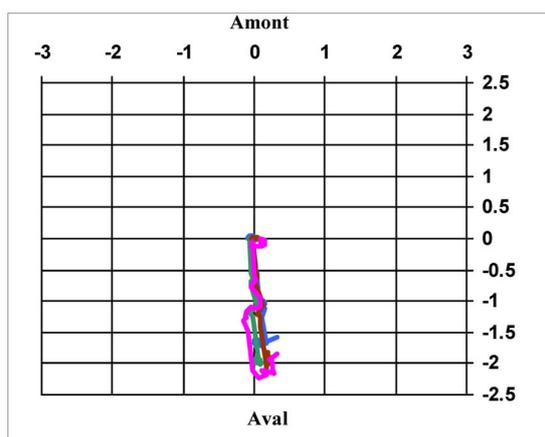
- [1] J.P. Rajot, Y. Fargier, P. Joffrin, A. Kadhour, N. Vermorel et C. Pruvost (2021), Dispositif d'observation 3D des déplacements internes d'un massif de sol ou de roche par fibre optique – Faisabilité, Convention DGPR – Université Gustave Eiffel 2020, Action 11, 35p.
- [2] J.P. Rajot, Y. Fargier, P. Joffrin, N. Vermorel et C. Pruvost (2022), Dispositif d'observation 3D des déplacements internes d'un massif de sol ou de roche par fibre optique – Prototype final et tests en milieu contrôlé, Convention DGPR – Université Gustave Eiffel 2020, Action 11, 42p.
- [3] Bièvre, G., Joseph, A., Bertrand, C. (2018), Preferential Water Infiltration Path in a Slow-Moving Clayey Earthslide Evidenced by Cross-Correlation of Hydrometeorological Time Series (Charlaix Landslide, French Western Alps), *Geofluids*, Volume 2018, Article ID 9593267, 20p. <https://doi.org/10.1155/2018/9593267>
- [4] Cui, J., Zhao, S., Yang, C., Tan, J., 2018. Parallel Transport Frame for Fiber Shape Sensing. *IEEE Photonics Journal* 10, 1–12. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2017.2782736>
- [5] Jäckle, S., Eixmann, T., Schulz-Hildebrandt, H., Hüttmann, G., Pätz, T., 2019. Fiber optical shape sensing of flexible instruments for endovascular navigation. *Int J Comput Assist Radiol Surg* 14, 2137–2145. <https://doi.org/10.1007/s11548-019-02059-0>
- [6] Moore, J.P., Rogge, M.D., 2012. Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions. *Opt. Express*, OE 20, 2967–2973. <https://doi.org/10.1364/OE.20.002967>
- [7] Paloschi, D., Korganbayev, S., Bronnikov, K., Wolf, A., Dostovalov, A., Saccomandi, P., 2020. Transformation matrices for 3D shape sensing with polyimide-coated multicore optical fiber, in: 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 IoT. Presented at the 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 IoT, pp. 250–254. <https://doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138221>

Annexe B : Relevés inclinométriques du tube I10 (Cerema)



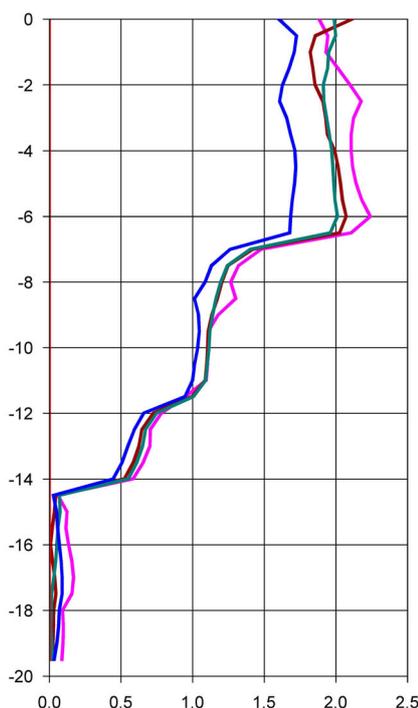
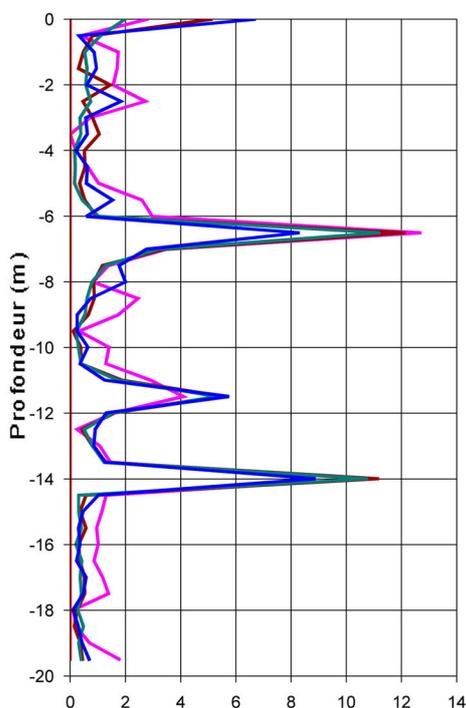
CEREMA Centre-Est
 Département Laboratoire
 de Lyon

DEPLACEMENT DU TUBE (cm)



ROTATIONS LOCALES (rd*1000)

MODULES DEPLACEMENTS CUMULES (cm)



- 08/12/21
- 23/03/22
- 18/07/22
- 14/09/22
- 18/10/22