MLA 3 : Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

B1 – Suivi instrumenté : Résultats des mesures



Projet soutenu par l'Union Européenne au travers du Fonds Européen de Développement Régional – Programme Opérationnel Interrégional du Massif des Alpes et de la région Provence Alpes Côte d'Azur en partenariat avec la Région Auvergne Rhône Alpes

Projet soutenu par l'Etat – Fonds National d'Aménagement et de Développement du Territoire, Convention Interrégionale du Massif des Alpes

LIVRABLE N° B1

Date : Mars 2023

MLA3 – Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Livret B1 – Suivi instrumenté : Résultats des mesures

Références du projet	
Acronyme du projet :	MLA3
Nom complet du projet :	Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager
AAP :	FEDER – POIA
Num. convention :	PA0014948
AAP cofinancement :	FNADT CIMA
Cofinancement num. convention :	2019_D38_83 et 2021_D38_208
Chef de file :	Cerema Centre-Est
Partenaires :	ISTerre – UMR CNRS 5275, Université Grenoble Alpes EV-RIVES – UMR CNRS 5600, ENTPE.

Références du livrable		
Nature du livrable :	Rapport (R)	
Diffusion :	Public (PU)	
Intitulé :	Livret B1 – Suivi instrumenté : Résultats des mesures	
Date d'édition :	Mars 2023	
Nombre de pages :	118	
Coordinateur :	Yohan PERU (Cerema)	
Rédacteurs du rapport :	Grégory BIEVRE (ISTerre), Yohan PERU (Cerema)	
Avec la participation de :	Laurent DUBOIS, Jean-Luc GENOIS, Mélanie PONCET et Nicolas VINOT (Cerema)	
Relecteurs :	Marie-Aurélie CHANUT, Fabrice ROJAT et Geneviève RUL (Cerema)	
Valideur :	Cédric GIRARDY (Cerema)	Le directeur du département Risques Infrastructures Matériaux Cédric Girardy Signature numérique de Cedric Girardy

Résumé du livrable

Le présent document est l'un des livrables de l'axe B du projet FEDER POIA « MLA3 » (Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager). Il détaille les différentes instrumentations mises en place ou expérimentées dans le cadre du projet sur l'ensemble des sites d'études et rassemble les résultats des mesures réalisées. Ces résultats font l'objet d'une interprétation en lien avec le contexte géotechnique du site. Ce document est à relier aux autres livrables du projet, livrables de l'Axe A (notamment le livrable L-A1 précisant le référentiel géologique et L-A2 à L-A5 présentant les matériaux, leurs propriétés et les modèles de site) et de l'axe B (L-B2 Evaluation des Méthodes).

Mots clés

MLA3	**RN85**
Instrumentation	**Charlaix**
Inclinométrie	**Quet-en-Beaumont**
Piézométrie	**Les Touches**
Scan laser	**Corps**
Sismique	**Le Motty**
GPS	

Statut de communication du rapport

Ce document est accessible librement au public sur internet. Il est capitalisé sur la plateforme documentaire CeremaDoc : https://doc.cerema.fr/

Contexte du rapport

Le présent rapport fait partie des livrables du projet MLA3 « Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager », cofinancé par le Fonds Européen de Développement Régional – Programme Opérationnel Interrégional du Massif des Alpes (FEDER – POIA) ainsi que par le Fonds National d'Aménagement et de Développement du Territoire – Convention Interrégionale du massif des Alpes (FNADT – CIMA).

Le projet MLA3 s'articule autour de 5 sites pilotes de glissements de terrain lents le long de la RN85, au niveau des communes de Saint-Laurent-en-Beaumont (38), Quet-en-Beaumont (38), Les Côtes-de-Corps (38), Corps (38), Aspres-les-Corps (05), Saint-Firmin (05). Ces sites présentent une similarité d'origines géologiques, les terrains en mouvement étant majoritairement issus de dépôts accumulés aux époques glaciaires et interglaciaires du Würm (vers -50 000 ans) dans de grands lacs d'obturation aujourd'hui disparus.

Le projet comprend trois axes (A, B, C) orientés vers la géologie / géotechnique, visant à la caractérisation des phénomènes, à leur suivi, à leur évolution dans le temps, et un axe sociologique (D) associant largement les habitants et les acteurs locaux, pour mettre en place des conditions de dialogue entre savoirs techniques et d'usage sur la compréhension et la gestion des mouvements de terrain.

- Axe A – Connaissance des phénomènes : préciser la géologie et les propriétés des argiles afin de comprendre les mécanismes de glissements à l'œuvre ;
- Axe B – Instrumentation : comparer les méthodes de suivi adaptées à des glissements lents et identifier les limites de ces méthodes ;
- Axe C – Modélisation du comportement mécanique et analyse d'incertitudes (annulé) ;
- Axe D – Approche humaine et sociale du risque : Questionner les places respectives de l'expert et du citoyen dans la gestion des risques provoqués par les glissements lents.

Le projet MLA3 associe 3 partenaires : le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema - direction territoriale Centre-Est), l'Université Grenoble Alpes (UGA - Laboratoire ISTerre – UMR CNRS 5275), l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE – Laboratoire RIVES – UMR CNRS 5600). Il a bénéficié de la participation ou de la contribution ponctuelle de multiples acteurs externes au cours de son déroulement (DIR Med [1], RTM, PARN, communes, conseils départementaux, habitants, acteurs économiques locaux, etc.).

1 DIR Med : Direction Interrégionale des Routes Méditerranée – RTM : Service de Restauration des Terrains de Montagne de l'Office National des Forêts – PARN : Pôle Alpin d'études et de recherche pour la prévention des Risques Naturels.

Sommaire

1 Objet de l'axe B du projet MLA3 9
2 Moyens de mesure et de traitement des donnees 10
2.1 Campagnes de mesures 10
2.2 Inclinométrie 10
2.2.1 Inclinomètre 10
2.2.2 Chaîne inclinométrique 11
2.3 Piézométrie 12
2.3.1 Piézomètres ouverts 12
2.3.2 Sondes piézométriques 12
2.3.3 Cellules de pression interstitielle (CPI) 12
2.4 Déplacements de surface par positionnement satellite 13
2.5 Sismique 15
2.6 Scan-laser 3D 16
2.7 Images satellites 2D et interférométrie radar 17
3 Site n°1 - Charlaix 19
3.1 Présentation du site 19
3.1.1 Historique et connaissances préalables 19
3.1.2 Contexte géologique 19
3.1.3 Géomorphologie et mouvements de terrain 20
3.1.4 Localisation et dispositif d'instrumentation 20
3.2 Résultats des mesures de niveaux d'eau 22
3.2.1 Présentation des mesures 22
3.2.2 Synthèse des mesures piézométriques 26
3.3 Résultats des mesures inclinométriques 29
3.3.1 Branche amont du lacet 29
3.3.2 Branche aval du lacet 33
3.3.3 Synthèse des mesures inclinométriques 35
3.4 Résultats des mesures GPS 36
3.4.1 Relevés périodiques 36
3.4.2 Mesures continues 37
3.5 Résultats des mesures sismiques 39
3.5.1 Variations de vitesse des ondes de surface 39
3.5.2 Relation entre dV/V et paramètres environnementaux 44
3.6 Résultats des levés scan laser 48
3.6.1 Description du matériel 48

3.6.2 Acquisition des nuages de points 48
3.6.3 Méthode générale d'analyse diachronique 50
3.6.4 Analyse et interprétation 51
3.6.5 Conclusions 52
3.7 Analyses d'images satellites 53
3.7.1 L'approche DinSAR 53
3.7.2 L'approche PSInSAR 54
3.7.3 Résultats et conclusion 55
4 Site n°2 – Quet-en-Beaumont 56
4.1 Présentation du site 56
4.1.1 Historique et connaissances préalables 56
4.1.2 Contexte géologique et hydrogéologique 56
4.1.3 Géomorphologie et mouvements de terrain 57
4.1.4 Dispositif d'instrumentation 58
4.2 Résultats des mesures de niveaux d'eau 59
4.2.1 Présentation des mesures 59
4.2.2 Synthèse des mesures piézométriques 61
4.3 Résultats des mesures inclinométriques 61
4.3.1 Présentation des mesures 61
4.3.2 Synthèse des mesures inclinométriques 65
4.4 Synthèse 66
5 Site n°3 – Les Touches 67
5.1 Présentation du site 67
5.1.1 Historique et connaissances préalables 67
5.1.2 Contexte géologique et hydrogéologique 67
5.1.3 Géomorphologie et mouvements de terrain 68
5.1.4 Dispositif d'instrumentation 69
5.2 Résultats des mesures de niveaux d'eau 70
5.2.1 Présentation des mesures 70
5.2.2 Synthèse des mesures piézométriques 71
5.3 Résultats des mesures inclinométriques 74
5.3.1 Présentation des mesures 74
5.3.2 Synthèse des mesures inclinométriques 78
6 Site n°4 – Corps 80
6.1 Présentation du site 80
6.1.1 Historique et connaissances préalables 80

6.1.2 Contexte géologique et hydrogéologique 80
6.1.3 Géomorphologie et mouvements de terrain 81
6.1.4 Dispositif d'instrumentation 82
6.2 Résultats des mesures de niveaux d'eau 83
6.2.1 Présentation des mesures 83
6.2.2 Synthèse des mesures piézométriques 84
6.3 Résultats des mesures inclinométriques 84
6.3.1 Présentation des mesures 84
6.3.2 Synthèse des mesures inclinométriques 90
6.4 Synthèse 91
7 Site n°5 – Le Motty 92
7.1 Présentation du site 92
7.1.1 Historique et connaissances préalables 92
7.1.2 Contexte géologique 92
7.1.3 Géomorphologie et mouvements de terrain 92
7.1.4 Dispositif d'instrumentation 93
7.2 Résultats des mesures de niveaux d'eau 93
7.2.1 Présentation des mesures 93
7.2.2 Synthèse des mesures piézométriques 99
7.3 Résultats des mesures inclinométriques 100
7.3.1 Profil 1 – Inclinomètres SC3-1 et SC3-2 100
7.3.2 Profil 2 – Inclinomètres SC3-5 et SC3-6 102
7.3.3 Profil 3 – Inclinomètres SC3-5 et SC3-6 103
7.3.4 Profil 4 – Inclinomètre SC3-7 105
7.3.5 Profil 5 – Inclinomètres SC3-8 et SC3-9 106
7.3.6 Profil 6 – Inclinomètres SC3-10 et SC3-11 109
7.3.7 Synthèse des mesures inclinométriques 110
8 Synthèse - Conclusion 112
9 Annexes 113
9.1 Bibliographie 113
9.2 Table des illustrations 115

1 OBJET DE L'AXE B DU PROJET MLA3

Cet axe de travail a pour objet de tester un ensemble de méthodes d'instrumentation afin de suivre cinq sites pilotes affectés de glissements lents et de proposer un ou des systèmes de suivi en cherchant les techniques les plus adaptées et les plus compétitives économiquement.

Les cinq sites pilotes retenus sont localisés le long de l'itinéraire de la RN85 dans le secteur du Beaumont en Isère (Charlaix, Quet-en-Beaumont, Les Touches et Corps) et dans les Hautes-Alpes (Le Motty / Saint-Firmin). Ces sites, à l'exception du site de Charlaix, ont également fait l'objet d'études de diagnostic géotechnique G5 liées à la gestion de l'itinéraire pour le compte de la Direction Interdépartementale des Routes Méditerranée (DIR Med).

L'instrumentation des sites pilotes repose essentiellement sur des mesures inclinométriques et piézométriques, dont le matériel a été en grande partie mis en œuvre en 2018 dans le cadre des études de diagnostic géotechnique, et complété fin 2021 dans le cadre du projet MLA3. Les mesures ont été réalisées au sein du projet sur les années 2018-2022. Le site de Charlaix fait quant à lui l'objet d'un suivi plus complet et d'expérimentations d'instrumentations nouvelles, du fait de la connaissance déjà acquise par le passé et depuis plusieurs années par le Cerema et l'UGA/ISTerre.

La localisation des sites est présentée sur l'illustration n°1.



Source : www.geoportail.fr

Illustration 1 : Localisation des sites pilotes

2 MOYENS DE MESURE ET DE TRAITEMENT DES DONNEES

2.1 Campagnes de mesures

Les campagnes de mesures (inclinométrie, niveaux d'eau) ont été menées depuis octobre 2018, année de mise en place de l'instrumentation sur les différents sites d'étude, avec un rythme trimestriel jusqu'à septembre 2022 afin d'identifier les critères saisonniers impactant les mécanismes de glissements lents.

2.2 Inclinométrie

2.2.1 Inclinomètre

Les mesures à l'inclinomètre ont pour objectif de déterminer localement les variations d'inclinaison d'un tube de mesure dans le temps, de connaître la position de ce tube par rapport à la verticale et d'évaluer ses déplacements par rapport à une de ses extrémités, supposée fixe.

La méthode consiste à descendre, dans un tube rainuré placé au sein d'un massif de sol, une sonde inclinométrique et à mesurer l'angle que fait l'axe du tube avec la verticale à une profondeur donnée. L'inclinaison du tube par rapport à la verticale est ainsi obtenue en déplaçant la sonde avec un pas constant égal à la longueur de la sonde. Dans le cas présent, le pas de mesure est de 0,5 m.

Les mesures sont répétées avec le même appareillage et selon la même procédure à différents intervalles de temps en vue de déterminer les déplacements relatifs du tube.

Les mesures sont effectuées simultanément dans la direction principale du glissement et dans la direction orthogonale, depuis le fond du tube, en remontant la sonde avec un pas égal à la longueur de la sonde (0,5 m) et par la lecture des valeurs d'inclinaison (à 1 x 10^{-4} radian près). Une mesure pour une direction donnée consiste en deux lectures de l'inclinaison (α) de la sonde après retournement axial à la même profondeur.

Les mesures sont réalisées manuellement par les agents du Cerema lors de campagnes trimestrielles (quatre mesures annuelles pour chaque tube).

L'exploitation des mesures est réalisée suivant les principes généraux définis par la norme NF EN ISO 18674-3 et, pour le détail de l'analyse statistique, suivant l'approche de l'ancienne norme NF P 94-156. Le logiciel Capitoul 2000 du Cerema, qui permet également la détection et la correction des éventuelles mesures aberrantes, est utilisé.





Source : Cerema

Illustration 2 : À gauche : équipement inclinométrique (sonde, câble et centrale d'acquisition) – À droite : passage de la sonde dans un tube de mesure rainuré

Dans le présent livrable, les exploitations suivantes sont notamment utilisées :

- Rotation locale : il s'agit de la rotation localisée d'une section de tube de 50 cm par rapport à sa position initiale, indépendamment du reste du tube. Cette grandeur, exprimée en radian, permet d'identifier les zones principales de cisaillement ou de déformation : une surface de rupture apparaît par exemple typiquement comme un pic de rotation dans les graphiques en fonction de la profondeur. Les rotations locales peuvent être représentées soit de manière orientée, en projection sur les axes X (droite-gauche) et Y (amont-aval) du glissement, avec des valeurs positives et négatives, soit dans un référentiel tournant suivant la direction de la déformation locale du tube (valeurs positives uniquement dans ce cas).
- Déplacement : il s'agit du déplacement d'un point donné du tube par rapport à sa position initiale, en supposant le fond du tube fixe. Le graphique des déplacements cumulés en fonction de la profondeur correspond donc à la déformée du tube. À nouveau, la représentation peut être soit orientée, en projection suivant les axe X (déplacement DXT0) et Y (déplacement DYT0), soit en module (valeur positive $\sqrt{(DXT0^2+DYT0^2)}$).

2.2.2 Chaîne inclinométrique

La chaine inclinométrique ou inclinomètre vertical autonome est un système de mesure calibré et flexible qui mesure la déformation d'un tube inclinométrique en 3D à l'aide d'accéléromètres MEMs[2] mis en série. Les accéléromètres sont espacés tous les 0,5 m (segments). La température est mesurée dans chaque segment, permettant de compenser en température les mesures de variation d'inclinaison.

La chaine inclinométrique est connectée à un enregistreur autonome. Le paramétrage est basé sur deux mesures quotidiennes (04h01 et 16h01). Les mesures sont ensuite transmises une fois par semaine sur un site FTP puis téléchargées depuis ce site.

L'exploitation des mesures est réalisée avec un logiciel interne développé au Cerema (Département Risques Infrastructures Matériaux de Bron) dans le cadre du projet MLA3, qui permet de réaliser toutes les sorties graphiques nécessaires (analyses de déformations et évolutions temporelles).

Du fait du coût élevé de cette instrumentation (acquise en amont du projet), une seule chaine inclinométrique a été implantée parmi les zones suivies, sur le site de Charlaix.





Source : Solexperts / Cerema

Illustration 3 : Chaîne inclinométrique (enrouleur et pose sur site)

[2] MicroElectroMécaniques

2.3 Piézométrie

Sur l'ensemble des sites d'études, dans le cadre du suivi des niveaux d'eau ou des nappes, trois types d'équipements ont été installés :

- des piézomètres ouverts dans les terrains perméables ;
- des sondes piézométriques ou capteurs de niveau immergés (sondes Paratronic) ;
- des cellules de pression interstitielle dans les terrains faiblement perméables (capteurs Solexperts).

2.3.1 Piézomètres ouverts

Un piézomètre ouvert est un dispositif qui permet de mesurer un niveau d'eau dans un tube piézométrique mis à l'atmosphère dans un terrain dont la perméabilité globale estimée est usuellement supérieure ou égale 10^{-7} m.s^{-1}.

Le tube piézométrique est constitué d'un tube vertical, crépiné dans sa partie inférieure permettant le passage de l'eau du terrain vers l'intérieur du tube. La partie crépinée est enrobée d'un géotextile ou de matériaux drainants jouant le rôle de filtre. La partie supérieure est non crépinée et est équipée d'une tête munie d'un couvercle amovible : cela permet sa protection et garantit l'absence d'alimentation en eau par les écoulements de surface, tout en autorisant même en position fermée une mise en pression atmosphérique de l'intérieur du tube.

La mesure est effectuée par un détecteur de niveau d'eau (ou sonde piézométrique) descendu manuellement dans le tube. Le niveau piézométrique est obtenu par la mesure de la distance entre le sol et la surface de l'eau dans le tube piézométrique.





Source : Cerema

Illustration 4 : Piézomètre ouvert (capot métallique à gauche et sonde de mesure à droite)

2.3.2 Sondes piézométriques

Ces sondes sont constituées d'un capteur piézo-résistif équivalent à un capteur de niveau piézométrique immergé et qui est relié à un enregistreur autonome de données (data logger). La mesure s'effectue par application directe de la pression d'eau sur la cellule sensible (piézorésistive / capacitive / piézoélectrique / etc.) et la température est compensée en continu. La mise à la pression atmosphérique est assurée par un système de câble double peau ne comportant pas de capillaire. L'étendue de la mesure est comprise entre 0 et 100 m.

2.3.3 Cellules de pression interstitielle (CPI)

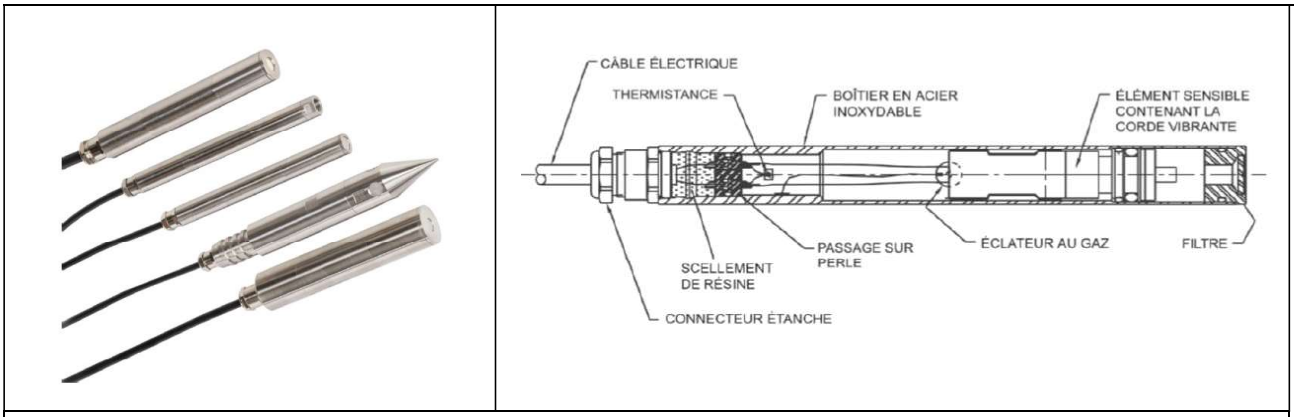
Une cellule de pression interstitielle est constituée d'un capteur (à corde vibrante ou autre) avec un enregistreur autonome des données. La mesure est effectuée par la cellule qui est descendue dans un forage (ensuite rebouché) et connectée à une interface d'acquisition à mémoire. Ce type de cellule ne

possède pas de câble d'évent pour la compensation barométrique. Ce type de capteur effectue une mesure absolue.

La cellule piézométrique consiste en une membrane sensible à la pression, généralement reliée à une corde vibrante. La pression du fluide (l'eau) agit sur la surface externe de la membrane générant des mouvements de celle-ci qui sont répercutés sur la tension et la fréquence de la corde vibrante. Le changement de fréquence est détecté et transmis au dispositif de lecture par une bobine électrique.

Les mesures sont réalisées dans une gamme de pression comprise entre 0 et 3 bars et une fréquence d'acquisition d'une heure sur les sites instrumentés du projet MLA3. L'enregistrement des mesures est réalisé avec un boitier d'acquisition autonome (data logger) pour CPI ayant une capacité d'enregistrement de six mois et une autonomie de 48 mois pour une fréquence d'une mesure par heure.

Dans le cadre du programme de suivi des sites instrumentés, quatre cellules de pression interstitielle ont été mises en œuvre, trois sur le site de Charlaix et une sur le site de Quet-en-Beaumont.



Source : Solexperts

Illustration 5 : Cellules de pression interstitielle et schéma de fonctionnement

2.4 Déplacements de surface par positionnement satellite

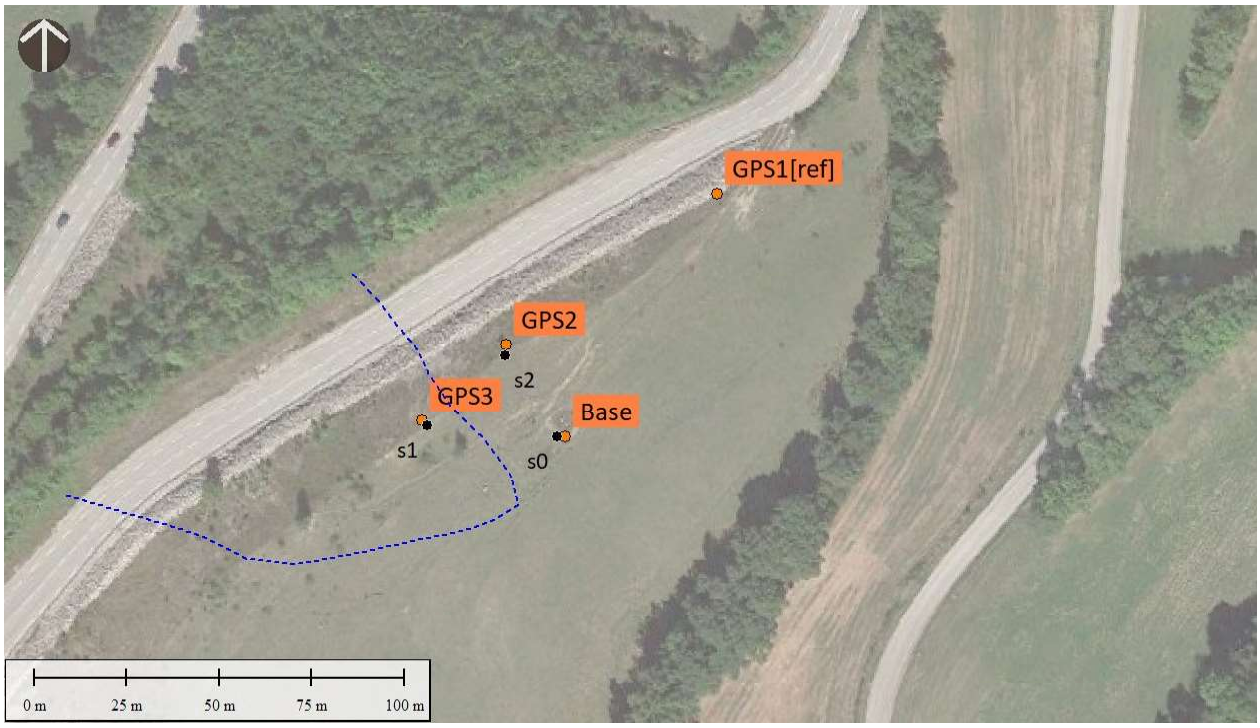
Le suivi des déplacements par satellite est une méthode classiquement employée pour le suivi des glissements de terrain. Elle peut se faire par la mesure périodique de stations positionnées sur site, ou bien au moyen d'une instrumentation permanente. Dans le premier cas, la technique consiste à implanter des bornes qui sont relevées périodiquement par un opérateur. L'avantage est de pouvoir relever un nombre important de bornes lors de chaque visite (jusqu'à plusieurs dizaines). L'inconvénient est de disposer d'un faible nombre de mesures dans le temps. Dans le deuxième cas, une station autonome et permanente est laissée en place sur le site : l'avantage est de disposer d'une bonne résolution temporelle (par exemple, une mesure par jour). L'inconvénient est de disposer de peu de points de mesure en regard du coût de la station permanente.

Dans le cadre de ce projet, les deux approches ont été expérimentées sur le site de Charlaix. Sur ce site, une trentaine de bornes avaient été préalablement suivies entre novembre 2014 et juin 2017, soit avant le début du projet MLA3. Depuis 2021, environ 55 bornes sont relevées périodiquement et traitées « manuellement ». Deux stations permanentes ont également été installées sur le site, qui fournissent une mesure de positionnement par jour. Dans ce cas, le traitement des données est automatisé.

Une station permanente a également été installée sur chaque site suivant : Corps, Quet-en-Beaumont et les Touches.

Les stations permanentes sont de type « Geomon » et fabriquées par la société Infrasurvey (Suisse). L'implantation sur le site de Charlaix est présentée sur l'illustration 6 et des détails sont matérialisés sur l'illustration 7. Trois stations de mesures (GPS1 à GPS3) ont été installées : GPS1 dans une zone qui bouge peu, GPS2 immédiatement en dehors de la zone la plus active actuellement et GPS3 au sein de

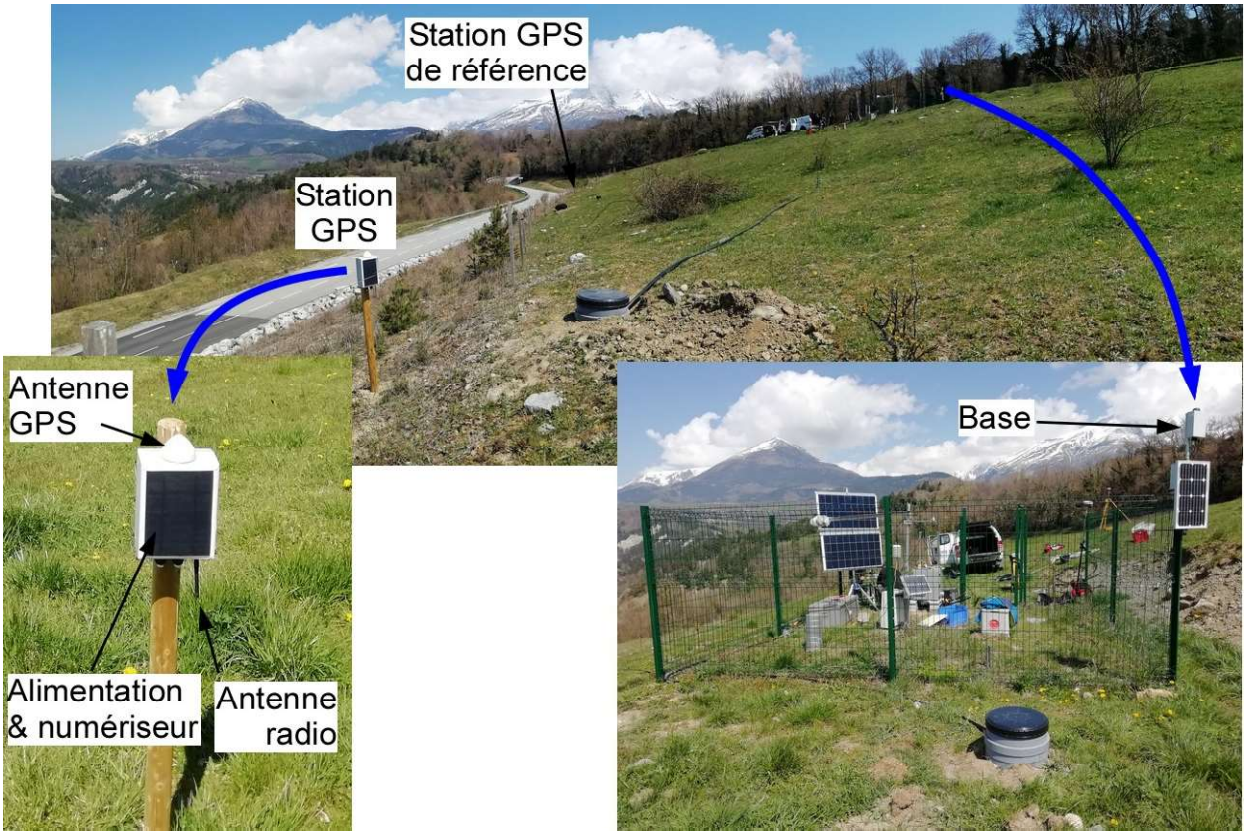
cette zone active. Les stations GPS2 et GPS3 sont colocalisées avec les stations sismiques s2 et s1, respectivement.



Source : Isterre

Illustration 6 : Implantation des stations GPS Geomon et des capteurs sismiques (s0 à s2) sur le site de Charlaix.

Les stations de mesures sont autonomes en énergie et permettent des sessions de mesure de 1 h par jour. L'ensemble des données brutes sont collectées par la station de base au moyen d'une liaison radio et sont ensuite télétransmises au laboratoire. Il est également possible de procéder à un calcul de position quotidienne par la technique de double-différence. Succinctement, la position des stations GPS2 et GPS3 est calculée par rapport à la station de référence GPS1 supposée fixe. Les données sont également télétransmises au laboratoire. Un exemple d'application est présenté dans Fiolleau *et al*. (2021).



Source : Isterre

Illustration 7 : Installation et fonctionnement du système GPS Geomon sur le site de Charlaix.

2.5 Sismique

Depuis quelques années, des travaux de recherche ont montré la possibilité de suivre temporellement l'activité d'un glissement de terrain à l'aide de mesures de bruit de fond sismique. Le bruit de fond sismique permet de monitorer, par inter-corrélation entre deux capteurs, les variations de vitesse des ondes de surface. La vitesse des ondes de surface est principalement contrôlée par la vitesse des ondes de cisaillement (V_S, en m/s). De plus, V_S est reliée au module de cisaillement G (~ rigidité, en Pa) du matériau ainsi qu'à sa densité (ρ, en kg/m^3) comme indiqué par l'équation suivante :

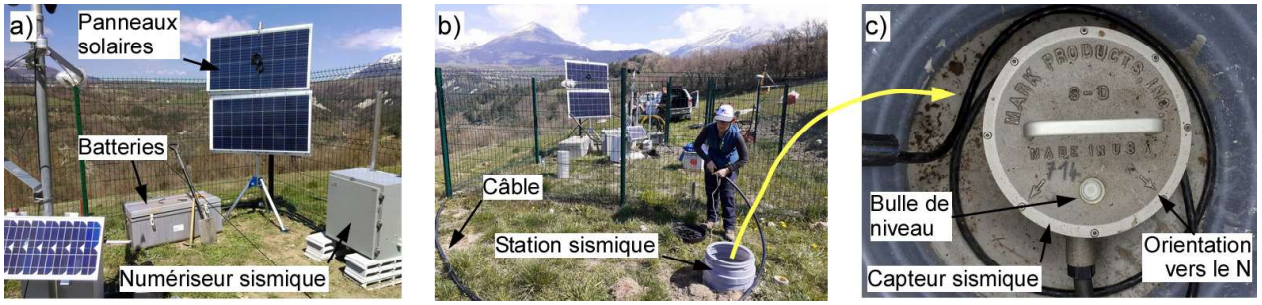
$$V_S \approx \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Alors, le suivi temporel de V_S permet de suivre l'évolution de l'état hydro-mécanique (G, ρ) du sous-sol. Finalement, comme les ondes de surfaces sont dispersives (leur vitesse dépend de leur fréquence et la fréquence est reliée à la longueur d'onde, donc à la profondeur d'investigation), il est théoriquement possible de suivre l'évolution de l'état mécanique du sous-sol à différentes profondeurs.

L'application de cette technique de suivi temporel aux glissements de terrain a permis de détecter des réactivations brutales plusieurs jours avant leur occurrence sur les glissements-coulées du Pont-Bourquin en Suisse (Mainsant *et al.* 2012) et d'Harmalière en Isère (Fiolleau *et al*. 2020). Par ailleurs, cette technique a également permis de mettre en évidence l'influence des forçages environnementaux sur les déformations réversibles de plusieurs glissements de terrain (Bièvre *et al.* 2018a, Le Breton *et al*. 2021, Colombero *et al.* 2021).

Sur le site de Charlaix, trois capteurs sismiques (s0, s1 et s2) ont été installés (localisation sur l'illustration 6). L'instrumentation nécessite l'autonomie énergétique (panneaux solaires, packs de batteries ; figure 8.a). Le numériseur est ensuite relié au capteur vélocimétrique qui est mis en place

dans une buse semi-enterrée (figure 8.b) afin de le protéger. Les capteurs utilisés disposent de trois composantes : une voie verticale et deux voies horizontales orientées nord-sud et est-ouest (figure 8.c). Les vibrations sont enregistrées en continu à une fréquence de 200 Hz et les données sont télétransmises directement au laboratoire.



Source : Isterre

Illustration 8 : Installation du système de suivi temporel sismique sur le site de Charlaix. a) Système énergétique et numériseur. b) Mise en place du capteur s0 dans une buse semi-enterrée. c) Détail d'un capteur sismique (vélocimètre). La bulle permet d'assurer l'horizontalité du capteur et la flèche de l'orienter vers le nord.

2.6 Scan-laser 3D

Les levés scan-laser permettent de construire des modèles numériques de terrain (MNT), qui sont des représentations tridimensionnelles de l'ensemble de la surface scannée. Le principe du suivi des glissements sur cette base est **de comparer deux MNT acquis à différentes dates**. Leur comparaison permet de détecter les changements, de quantifier les évolutions entre les deux surfaces des deux jeux de données et de calculer les volumes déplacés.

Les scan-lasers terrestres sont couramment utilisés pour le suivi des glissements de terrain et permettent d'atteindre une bonne précision. Cette précision va dépendre des conditions environnementales (végétation, météo, distance versant-appareil) mais également de l'appareil en lui-même.

L'exploration des capacités de ce type d'appareils pour le suivi des déplacements de terrains naturels est très récente mais prometteuse (Jaboyedoff et *al.*, 2012). Il s'agira donc d'identifier les limites et potentialités de ces appareils généralistes au coût accessible pour le suivi de glissements lents.

Cette technique a été testée sur le site de Charlaix avec un scan laser 3D Riegl VZ-2000i (illustration 9).



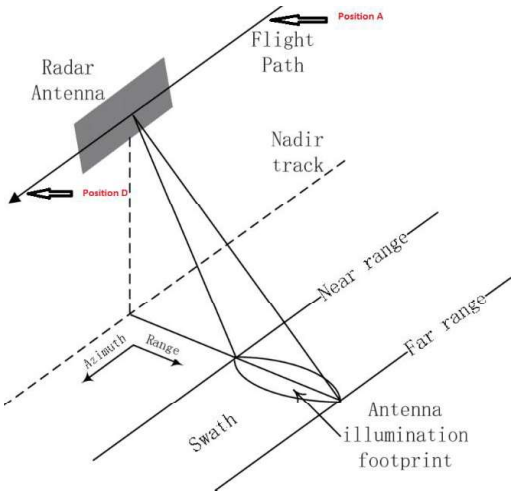
Source : Cerema

Illustration 9 : Scan laser 3D Riegl VZ-2000i sur le site de Charlaix

2.7 Images satellites 2D et interférométrie radar

Un radar est un dispositif actif à micro-ondes, capable d'enregistrer l'écho électromagnétique rétrodiffusé par la surface de la Terre et de l'organiser en une carte d'image 2D, dont les dimensions sont la distance cible-capteur, appelée distance oblique ou ligne de visée (LOS) et la direction de vol de la plate-forme, appelée azimut. Le radar à synthèse d'ouverture (SAR) est un cas particulier des techniques radar classiques développées au début du 20e siècle. Il surmonte le problème de la faible résolution spatiale du radar à ouverture latérale en utilisant des techniques de compression d'impulsion pour offrir une télédétection à résolution plus fine et le concept d'"ouverture synthétique" est mis en œuvre en utilisant une antenne relativement petite.

Le radar type SAR est donc capable d'une télédétection à résolution plus fine, indépendamment de l'altitude de vol et des conditions météorologiques. Il peut sélectionner des fréquences pour éviter l'atténuation du signal causée par les conditions météorologiques. Il est également capable de prendre des images de jour comme de nuit, l'éclairage étant assuré par ses propres moyens. Les deux images sont acquises sur la même scène par le même capteur (ou un capteur différent avec des spécifications similaires) à un moment différent, le modèle d'interférence entre les phases des deux images SAR peut être utilisé pour générer ce que l'on appelle un "interférogramme".



Source : Cerema

Illustration 10 : Géométrie d'un radar à ouverture latérale avec trajectoire de la position initiale A à la position finale D

Les systèmes à passages répétés sont couramment utilisés dans les études d'interférométrie, c'est-à-dire les capteurs dotés d'une seule antenne. Pour ces systèmes, les deux images sont prises à des moments différents avec des orbites légèrement différentes, et il est donc presque certain que les deux images sont acquises à partir de positions légèrement différentes. La seconde image, également appelée "image esclave", est d'abord enregistrée et rééchantillonnée sur la même grille que la première image, appelée "image maîtresse". Ensuite, l'interférogramme peut être calculé en multipliant l'image maître par le conjugué complexe de l'image esclave (voir Chkeir, 2020).

Dans notre étude, nous utilisons un système à passages répétés.

3 SITE N°1 - CHARLAIX

3.1 Présentation du site

3.1.1 Historique et connaissances préalables

Le glissement de Charlaix concerne une section en lacet de la Route Nationale 85, au lieu-dit Charlaix, sur la commune de Saint-Laurent-en-Beaumont (Isère). Le glissement, situé dans les terrains glacio-lacustres de l'ancien lac glaciaire du Beaumont affecte les deux branches du lacet. Ces terrains sont de nature très argileuse (argiles litées).

Étudié depuis 1979, le site de Charlaix a fait l'objet de plusieurs campagnes de reconnaissances, avec différents moyens d'investigation, principalement par méthodes géophysiques et reconnaissances par sondages géotechniques avec prélèvements et essais de laboratoire. Ces campagnes, étalées dans le temps, ont été pilotées par différents bureaux d'études (ADRGT, SAGE, CETE de Lyon puis Cerema) entre 1980 et 2006.

Les études menées de 1979 à 2002 avaient pour objectif de caractériser le glissement (morphologie, cartographie, régime de circulation des eaux superficielles et souterraines, cinématique, géologie, caractéristiques des formations en place) et de définir des solutions de traitement possibles. Puis en 2006 et 2007, les campagnes de reconnaissances ont eu pour objectif l'étude de solutions de traitement et de réparation de l'infrastructure routière, et le dimensionnement d'ouvrages géotechniques nécessaires à cette réhabilitation. Ces études ont mené à la réalisation de travaux, qui ont débuté en 2007 et se sont terminés en 2009.

À la fin des travaux, le site est resté sous surveillance, car les solutions de traitement mises en œuvre n'avaient pas pour objectif la stabilisation du glissement, mais le maintien de l'infrastructure routière à un niveau de service acceptable. Ce niveau de service est évalué sur deux critères : la sécurité des usagers et la qualité de l'infrastructure routière se traduisant par la limitation des interventions (recharges récurrentes d'enrobés, pontage des fissures) avec un coût d'entretien acceptable par le gestionnaire, aujourd'hui la DIR Méditerranée.

Les campagnes de reconnaissances initiées depuis 2009 ont eu ensuite pour objectif principal l'instrumentation et la surveillance du site, avec un complément d'instrumentation et son remplacement le cas échéant.

À partir de 2012, les résultats obtenus amènent à réfléchir de nouveau sur le fonctionnement général de ce glissement dans l'objectif d'établir des valeurs prédictives. Un projet partenarial « VOR » (Vulnérabilité des Ouvrages aux Risques) est alors initié avec l'UGA/ISTerre. De nouvelles investigations sont entreprises dans l'objectif de répondre aux interrogations soulevées, avec une composante de recherche s'inspirant de travaux récents entrepris sur versants argileux instables (notamment Bièvre 2010) et de travaux issus du RGCU ANR[3] SIGMA (Surveillance des sites Instables des Glissements de terrain lents et récurrents du changement cliMAtique).

En 2018, le site a de nouveau reçu une instrumentation complémentaire dans le cadre du projet MLA3.

Il s'agit donc d'un site qui dispose d'un recul important tant sur la connaissance des phénomènes que sur les techniques de mesures, et qui est bien approprié à l'expérimentation de nouvelles méthodes. Le dispositif d'instrumentation est présenté dans les paragraphes suivants.

3.1.2 Contexte géologique

Le site de Charlaix est caractérisé par la présence de deux séries de dépôts glaciaires liées à deux avancées consécutives du glacier de la Bonne. Ces dépôts glaciaires datés du Würm recouvrent un substratum marneux appelé "Terres Noires" du Jurassique (Bajocien – Bathonien).

[3] RGCU = Réseau Génie Civil et Urbain – ANR = Agence Nationale de la Recherche

Sur la base des résultats des reconnaissances géotechniques réalisées sur le site, le modèle géologique du site se caractérise de manière sommaire par la présence, depuis la surface :

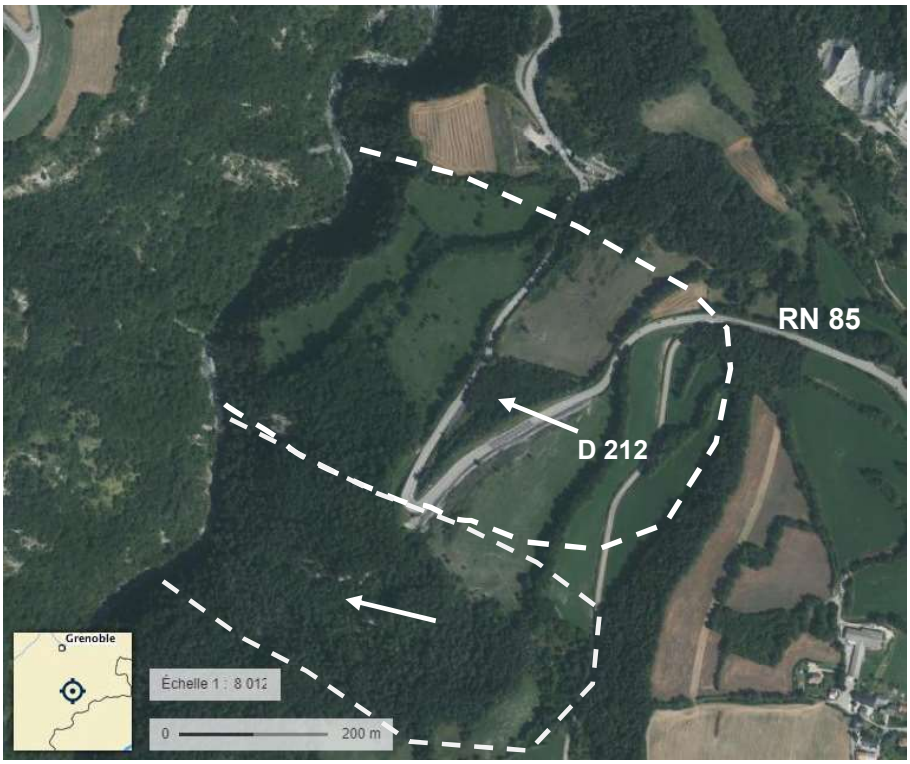
- d'une moraine supérieure, datée du Würm III, d'une épaisseur de l'ordre de 5 m qui augmente vers le sud-est ;
- d'argiles litées noires ou argiles du Beaumont, datées du Würm II. Ces argiles peuvent être fortement remaniées au niveau des zones en mouvement ;
- d'une moraine argileuse inférieure.

Le substratum, situé à une centaine de mètres de profondeur, n'a pas été rencontré lors des différentes campagnes de reconnaissances géotechniques.

Les investigations réalisées au cours du temps ont permis de proposer une structure des terrains, comme par exemple dans Bièvre et al. (2018), et de proposer des coupes et modèles de terrain (voir livrables L-A2 et L-A5).

3.1.3 Géomorphologie et mouvements de terrain

Le glissement de Charlaix est constitué de deux glissements distincts, un premier glissement qui affecte l'extrémité de l'épingle du lacet, au sud-ouest, et un second glissement qui affecte les deux branches de la RN85 de part et d'autre du lacet, avec une zone plus active notamment soulignée par la reprise de chaussée sur l'illustration ci-après.

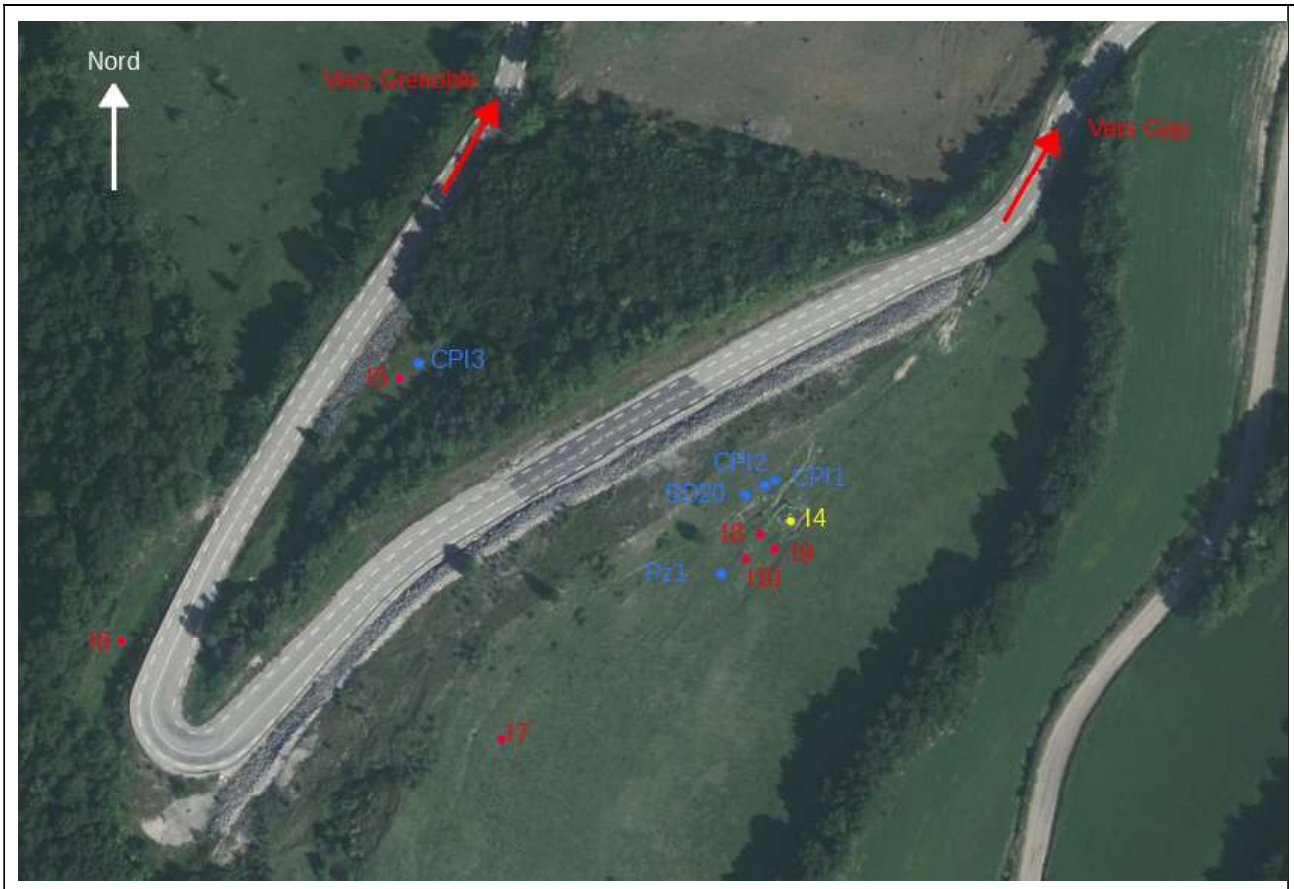


Source : adapté de www.google.earth.com

Illustration 11 : Limites approximatives des glissements affectant le lacet de Charlaix

3.1.4 Localisation et dispositif d'instrumentation

Le dispositif d'instrumentation en inclinométrie et piézométrie sur le site de Charlaix est récapitulé sur le plan et le tableau ci-après. Le positionnement des instrumentations complémentaires en GPS Géomon et capteurs sismiques était précisé sur l'illustration n°6.



Source : adapté de www.géoportail.fr

Illustration 12 : Implantation du dispositif d'instrumentation en inclinométrie et piézométrie sur le site de Charlaix

Tableau n°1 : Récapitulatif du dispositif d'instrumentation

Nom	***Type d'instrumentation***	***Observations***	***Profondeur***	***Date***
I4	Chaîne inclinométrique	Cisaillé en octobre 2021	19,0 m	2018
I5	Inclinomètre	Cisaillé en septembre 2022	20,5 m	2018
I6	Inclinomètre		26,0 m	2018
I7	Inclinomètre	Cisaillé en 2020	30,5 m	2018
I8	Inclinomètre	Cisaillé en mars 2022	35,5 m	2018
I9	Inclinomètre	Arrachement du tube à la pose	35,0 m	2021
I10	Inclinomètre		20,0 m	2021
CPI1	Cellule de Pression Interstitielle		9,5 m	2018
CPI2	Cellule de Pression Interstitielle		28,0 m	2018
CPI3	Cellule de Pression Interstitielle	Panne entre mai 2020 et février 2022	15,0 m	2018
SD20	Cellule de Pression Interstitielle		12,5 m	2015
Pz1	Piézomètre ouvert		25,0 m	2018

3.2 Résultats des mesures de niveaux d'eau

3.2.1 Présentation des mesures

Le suivi hydrogéologique sur le site de Charlaix a été mené à partir d'un piézomètre ouvert (Pz1) et de quatre cellules de pression interstitielle (CPI). L'instrumentation est répartie comme suit :

- en partie supérieure du glissement, au-dessus de la branche amont de la RN85 :
  - Pz1, crépiné entre 22,0 et 25,0 m dans les argiles grises litées ;
  - CPI1 à 9,5 m de profondeur dans les argiles grises litées ;
  - CPI2 à 28,0 m de profondeur dans les moraines sablo-graveleuses et à matrice argileuse ;
  - SD20 qui est une CPI à 12,5 m de profondeur, dans les argiles grises litées ;
- en partie inférieure du glissement, entre les deux branches du lacet de la RN85,
  - CPI3 à 15 m de profondeur, dans les argiles grises à galets.

Les cellules CPI1 et CPI2 ont été mises en place le 25 juillet 2018, CPI3 le 1er août 2018 et Pz1 le 16 juillet 2018. La cellule SD20 est en place depuis 2015.

3.2.1.1 *Piézomètre ouvert*

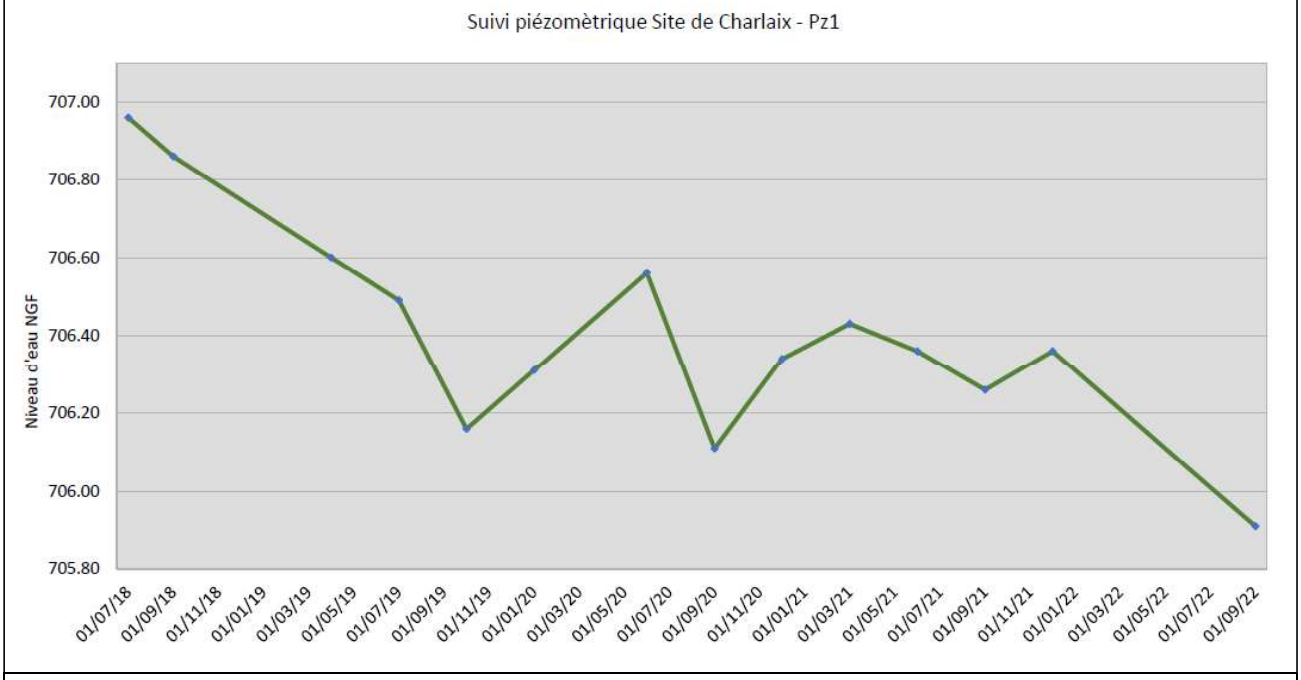
Les mesures ont été réalisées avec une fréquence trimestrielle, correspondant aux campagnes de mesures inclinométriques. Les résultats sont joints en annexe.

Les niveaux d'eau mesurés manuellement (sonde à eau) dans le piézomètre Pz1 sont compris entre 18,9 et 19,95 m de profondeur (706,96 et 705,91 m NGF) au sein des argiles grises litées à interlits sableux millimétriques (voir par exemple livrable L-A2 ou coupe de sondage S6_SC1_Pz1 – Dossier Géotec 16/07261/Lyon/2018).

Tableau n°2 : Récapitulatif des relevés piézométriques Pz1

Date	Niveau d'eau (N.E.)	
	Profondeur (m)	Cote NGF
25/07/2018	18,90	706,96
20/09/2018	19,00	706,86
02/04/2019	19,26	706,60
10/07/2019	19,37	706,49
02/10/2019	19,70	706,16
21/01/2010	19,55	706,31
08/06/2020	19,30	706,56
22/09/2020	19,75	706,11
03/12/2020	19,52	706,34
25/03/2021	19,43	706,43
15/06/2021	19,50	706,36
08/09/2021	19,60	706,26
08/12/2021	19,50	706,36
14/09/2022	19,95	705,91

Le battement du niveau d'eau relevé dans les argiles grises à inter-lits sableux est relativement faible, de l'ordre du mètre avec une tendance à l'abaissement continu au cours des quatre années de suivi.



Source : Cerema

Illustration 13 : Courbe piézométrique au droit de Pz1 – Site de Charlaix

3.2.1.2 *Données météorologiques*

Les données de pluviométrie proviennent de la station Météo France La Mure-Radome. Les données sont disponibles à une période journalière qui permet une comparaison avec les valeurs piézométriques relevées dans les différents appareillages (voir graphiques en annexe). Le Tableau n°3 donne une vision synthétique des principales périodes de cumuls de précipitations.

Tableau n°3 : Synthèse des données pluviométriques sur la période de Septembre 2018 à août 2022 (principaux cumuls pluviométriques)

Année	Dates	Cumuls de précipitations (en mm)
2018	Du 22/10 au 07/11	142
	Du 20/11 au 26/11	69
	Du 30/11 au 11/12	78
	Du 15/12 au 23/12	78
2019	Du 27/01 au 03/02	75
	Du 01/03 au 18/03	57
	Du 02/04 au 11/04	65
	Du 23/04 au 27/04	51
	Du 04/05 au 20/05	92
	Du 6/06 au 22/06	105

	27 et 28/06	36 (orage)
	Du 14/10 au 23/10	122
	Du 31/10 au 07/11	94
	Du 14/11 au 26/11	106 (+ neige)
	Du 8/12 au 14/12	55
	Du 20/12 au 27/12	73
2020	Du 25/02 au 05/03	85
	Du 25/04 au 01/05	66
	Du 28 au 30/08	78
	Du 21/09 au 27/09	52
	Du 23/10 au 26/10	46
	Du 05/12 au 12/12	62 (+ neige)
2021	Du 01 au 20/01	Neige
	Du 27/01 au 12/02	114
	Du 25/04 au 21/05	147
	Du 21/06 au 24/06	31
	6 et 7/07	31 (orage)
	Du 27/07 au 7/08	98
	Du 3/10 au 5/10	92
	Du 30/10 au 5/11	60
	Du 27/11 au 11/12	98 (+ neige)
	Du 27 au 29/12	66
2022	Du 4 au 9/01	26
	Du 14 au 17/02	34
	Du 6 au 8/004	30
	Du 20 au 24/04	22
	Du 3 au 5/05	29
	Du 21 au 24/06	21
	14 et 17/08	29 + 29 (orages)

L'analyse des mesures pluviométriques montre que les cumuls de pluie ont lieu principalement au printemps et à l'automne, voire en hiver associés à des chutes de neige. Des épisodes orageux estivaux (juillet / août) peuvent apporter ponctuellement et subitement des cumuls de pluie importants.

Les données indiquent pour l'année 2022 (jusqu'à fin août) un déficit de pluie au cours du premier semestre.

3.2.1.3 *Cellules de pression interstitielle*

Les mesures sont réalisées avec une fréquence d'une mesure par heure. Les mesures présentées ci-après sont comprises dans la période du 1er septembre 2018 au 31 août 2022 et analysées sur des périodes annuelles allant de septembre (année n) à août (année n+1). L'ensemble des données recueillies est joint en annexe. Pour rappel, les sondes CPI1, 2 et 3 sont à technologie corde vibrante contrairement à la sonde SD20 à capteur piézo-résistif.

- *Période de septembre 2018 à août 2019*

La **cellule CPI1**, à 9,5 m de profondeur au sein des argiles grises litées, indique un niveau d'eau qui varie entre +1,3 et +2,2 m / CPI (ou entre 7,3 et 8,2 m de profondeur), soit une amplitude de l'ordre de 90 cm.

Les niveaux d'eau hauts sont mesurés entre mi-novembre et mi-janvier ; ils correspondent avec un décalage de quelques jours aux périodes de fortes précipitations enregistrées à la station de La Mure (Tableau n°3). Les niveaux d'eau les plus bas sont enregistrés fin octobre et en janvier après des périodes sans ou à faibles précipitations (hors neige).

De juin à fin août, le niveau d'eau est relativement stable (+1,6 m/CPI ou 7,9 m de profondeur) correspondant au niveau bas de la nappe et à la période sèche.

La **cellule CPI2**, à 28,0 m de profondeur dans les moraines sablo-graveleuses à matrice argileuse, donne un niveau d'eau entre +0,4 et -0,4 m / CPI (ou entre 27,6 et 28,4 m de profondeur), soit une amplitude de l'ordre de 80 cm.

Le niveau d'eau est relativement stable entre octobre et juin, autour de -0,2 m / CPI avec des pics positifs ou négatifs liés aux périodes humides ou sèches. On observe comme pour la cellule CPI1 un décalage de quelques jours entre les périodes de précipitations et la montée du niveau d'eau.

On observe au cours du mois de juin 2019 de fortes variations journalières et une remontée du niveau d'eau vers +0,4 m / CPI. Cela correspond à une période de fortes précipitations (105 mm entre le 6 et 22 juin) suivie d'un épisode orageux les 27 et 28 juin (avec 36 mm d'eau cumulés). Cette remontée n'est toutefois pas observée sur la cellule CPI1 (dans les argiles litées).

La **sonde SD20**, dans les argiles grises litées, relève un niveau d'eau entre +1,8 et +2,0 m (entre 10,5 et 10,7 m de profondeur) et une amplitude de l'ordre de 20 cm. On observe une baisse du niveau d'eau jusqu'à fin octobre puis une augmentation correspondant aux fortes précipitations enregistrées à partir de début novembre. Le niveau d'eau se stabilise autour de +1,9 m tout au long de l'hiver et du printemps avant de s'abaisser légèrement mais continuellement à partir de début juin et tout au long de la période estivale.

La **cellule CPI3**, à 15 m de profondeur dans les argiles grises à galets, indique un niveau d'eau relativement stable autour de +1,8 m / CPI (13,2 m de profondeur) et un battement qui varie entre +1,4 et 2,2 m, soit une amplitude de l'ordre de 80 cm. On observe les mêmes variations et tendances que pour les cellules CPI1 et CPI2. Le niveau d'eau se stabilise vers +1,8 m à partir d'avril jusqu'à fin août. On n'observe pas de remontée rapide fin juin comme sur la cellule CPI2.

- *Période de septembre 2019 à août 2020*

Le niveau d'eau mesuré **en CPI1** varie entre +1,2 et +2,0 m / CPI au cours de cette période avec un niveau moyen autour de +1,8 m.

Au droit de **CPI2**, le niveau d'eau est stable entre septembre et novembre, autour de -0,1 et -0,4 m / CPI, soit entre 28,1 et 28,4 m de profondeur. Le niveau d'eau remonte à partir de la deuxième quinzaine de novembre jusqu'à +0,3 m (27,7 m de profondeur). Ce niveau d'eau se maintient constant, entre +0,2

et +0,3 m jusqu'à fin août. On observe les mêmes variations, avec de plus faibles amplitudes qu'en CPI1.

Au cours de cette période, **SD20** montre les mêmes évolutions qu'au cours de la période précédente.

Les mesures pour **CPI3** donnent un niveau d'eau relativement constant vers +1,8 m / CPI, variant entre +1,6 et +2,0 m / CPI (13 et 13,4 m de profondeur), soit un battement de 40 cm. Les mesures ont été interrompues à partir du 26 mai suite à une mise en défaut du boitier d'enregistrement jusqu'au 2 février 2022.

- *Période de septembre 2020 à août 2021*

La cellule **CPI1** indique un niveau d'eau qui varie entre +1 et +2 m (entre 7,5 et 8,5 m de profondeur), soit une amplitude de l'ordre du mètre.

Le pic négatif le plus important est mesuré mi-octobre après une longue période sans forte précipitation ainsi qu'en décembre et en janvier 2021. A l'inverse, les pics positifs suivent des périodes de fortes précipitations, avec un décalage de quelques jours entre précipitations et augmentation du niveau d'eau mesuré par la cellule.

Au sein de **CPI2**, plus profonde, les variations mesurées sont plus atténuées, entre 0 et +0,4 m ; soit une amplitude de l'ordre de 40 cm.

Au cours de cette période, pour les deux cellules, le niveau d'eau se stabilise à partir de mai jusqu'à fin août.

SD20 poursuit sur la tendance des deux périodes précédentes avec une diminution de niveau moyen qui démarre un peu plus tôt, dès début mai pourtant pluvieux.

- *Période de septembre 2021 à août 2022*

CPI1 donne un niveau d'eau qui varie entre +1,2 et +2,1 m / CPI (entre 7,6 et 8,3 m de profondeur) ; soit une amplitude de l'ordre de 90 cm et un niveau moyen autour de +1,6 m. A partir de fin mai, le niveau moyen baisse et se stabilise vers +1,4 m au cours de la période estivale.

CPI2 indique un niveau moyen autour de +0,3 m / CPI, variant entre +0,1 et +0,5 m avec les mêmes tendances qu'observées en CPI1.

La **cellule SD20** montre un comportement différent des périodes précédentes. On observe une diminution du niveau d'eau jusqu'à mi-octobre (fin de la saison estivale) puis une nette augmentation sur quatre périodes (courbe en marches d'escalier) jusqu'au 20 mars environ. Le niveau d'eau passe de +1,7 à +2,4 m entre l'automne 2021 (pluvieux et neigeux) et le printemps 2022. Puis le niveau baisse continuellement à partir de fin mars jusqu'à fin août et atteint son niveau le plus bas, vers +1,4 m / CPI (11,1 m de profondeur / T.N).

Les mesures relevées par la cellule **CPI3**, du 2 février au 14 mai 2022 montrent un niveau stable autour de +1,8 m jusqu'à fin mars correspondant à une période peu active en précipitations puis une courbe qui oscille un peu plus à partir d'avril et lors de quelques périodes pluvieuses en avril et début mai (tableau n°3).

3.2.2 Synthèse des mesures piézométriques

Le **piézomètre ouvert Pz1**, en partie haute du glissement, montre une véritable saisonnalité des variations piézométriques avec des niveaux bas annuels mesurés en septembre ou octobre, à la fin de la saison estivale et des niveaux annuels hauts plutôt en hiver et fin du printemps. La courbe montre également une évolution à la baisse du niveau piézométrique sur la partie crépinée entre 22,0 et 25,0 m de profondeur (partie crépinée) au cours des quatre années de suivi. Toutefois, s'agissant d'un piézomètre ouvert au sein de matériaux peu perméables (argiles grises litées), les résultats sont à considérer avec prudence. En effet, les argiles peuvent induire des phénomènes de rééquilibrage lents ou des effets différés, qui sont difficilement quantifiables : les niveaux d'eau relevés peuvent donc ne pas être systématiquement représentatifs de l'état réel des pressions interstitielles au sein du matériau.

Les cellules **CPI1 et CPI2**, en partie haute du glissement, présentent respectivement des variations de l'ordre 90 cm à 12,5 m de profondeur dans les argiles grises litées et 40 cm à 28 m de profondeur dans des sables graveleux à matrice argileuse. La **cellule SD20** dans les argiles grises litées à 12,5 m de profondeur et à proximité des deux précédentes, présente une variation annuelle du niveau d'eau de l'ordre de 20 cm sur la période 2018-2021 et 70 cm sur la période 2021-2022.

Globalement, les mesures identifient bien les variations saisonnières ainsi que les périodes de fortes précipitations ou les périodes sèches en corrélation avec les données météorologiques locales, avec un délai de quelques jours de décalage entre la période de pluie et la mesure du niveau d'eau. Ce délai semble augmenter avec la profondeur et la diminution de perméabilité du matériau.

On observe également une bonne corrélation et une similitude entre les résultats des deux sondes CPI1 et 2, de même technologie à corde vibrante et implantées à proximité. Les courbes de la sonde SD20 de technologie différente montre les mêmes variations sur de longues périodes que les deux sondes précédentes mais des différences sur des périodes plus courtes (temps de réaction plus lent). Cet écart entre les deux méthodes de mesures sera analysé plus précisément dans le livrable L-B2.

La cellule **CPI3**, en partie basse du glissement entre les deux branches du lacet de la RN85, donne des variations annuelles de l'ordre de 0,4 à 0,8 m au sein des argiles grises à galets.

La sonde **CPI2**, à 28 m de profondeur dans les moraines sablo-graveleuses à matrice argileuse, indique régulièrement des niveaux d'eau plus bas que la cote de la sonde et du capteur. Cela est le cas au cours de la première année, entre octobre 2018 et novembre 2019 avec un niveau d'eau mesuré entre -0,2 et -0,4 m sous le capteur. Ces niveaux d'eau mesurés sous le niveau du capteur indiquent que les matériaux seraient désaturés ou en cours de désaturation. Or cela ne semble pas être le cas dans les prélèvements. Il est possible que cette observation soit due un problème de correction de la pression atmosphérique. En effet, cela a une influence significative sur les résultats des mesures : si l'on considère une plage min-max de pression atmosphérique allant de 985 à 1035 hPa par exemple, un défaut de correction peut représenter une erreur allant jusqu'à 50 cm sur les niveaux d'eau mesurés, ce qui est l'ordre de grandeur des variations relevées. On pourra se référer également à la section 3.5.2 qui démontre que les CPI 1 à 3 sont beaucoup plus fortement corrélées à la pression atmosphérique que la sonde SD20.

Il convient de noter enfin qu'une alimentation en eau au-dessus du glissement, provenant d'une dérivation du canal du Beaumont, a été observée de façon régulière lors des interventions sur le site. Cette alimentation d'eau a pour objet de remplir un abreuvoir (baignoire) pour le bétail présent ponctuellement sur le site. Or il a été constaté que lors de l'absence de bétail, l'arrivée d'eau n'était pas coupée, qu'elle débordait de l'abreuvoir et s'infiltrait dans les terrains à l'aplomb du glissement. Une zone humide et de l'herbe très épaisse est observable à proximité de l'abreuvoir quelle que soit la saison. Un débit de l'ordre du demi-litre à la minute a été mesuré lors d'une campagne de relevés.





Source : Cerema

Illustration 14 : Bouche d'alimentation du canal de dérivation du Beaumont et zone humide aval

Il est difficile d'appréhender l'impact de cette arrivée sur le glissement via les mesures mais il ne peut être qu'un facteur aggravant sur le glissement. Des mesures chimiques sur les eaux provenant de cette alimentation et sur les eaux recueillies au sein de la tranchée drainante aval n'ont pas permis d'associer ou de corréler les eaux aval et amont.

Par ailleurs, il est également difficile de déterminer si cette arrivée d'eau a pu influencer les mesures piézométriques par rapport au régime hydraulique « normal » de la nappe. Même si les tendances relevées dans les piézomètres sont cohérentes avec les apports hydriques naturels, elle pourrait par exemple lisser localement les périodes de basses eaux ou, en étant tantôt ouverte tantôt fermée, superposer une contrainte hydrique additionnelle aux variations naturelles issues de l'impluvium.

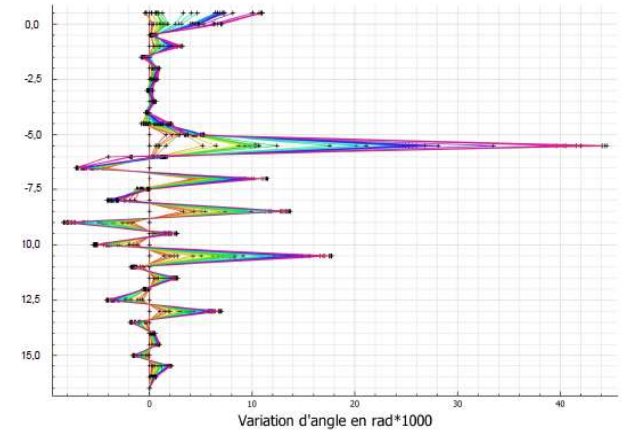
3.3 Résultats des mesures inclinométriques

L'ensemble des inclinomètres a été installé au cours de la deuxième quinzaine de juillet 2018, exceptés les inclinomètres I9 et I10, en octobre 2021. Les mesures se sont déroulées de septembre 2018 à septembre 2022, au rythme d'un levé trimestriel (sauf en 2022 où il n'y a pas eu de mesure fin juin). En 2020 les mesures ont également été perturbées en raison du confinement sanitaire (pas de mesure au début du printemps). L'inclinomètre I10 qui devait reprendre la suite de I8 (proche du cisaillement en octobre 2021) présente un défaut de scellement du tube ; les résultats ne sont pas interprétables et ne sont donc pas présentés dans ce document.

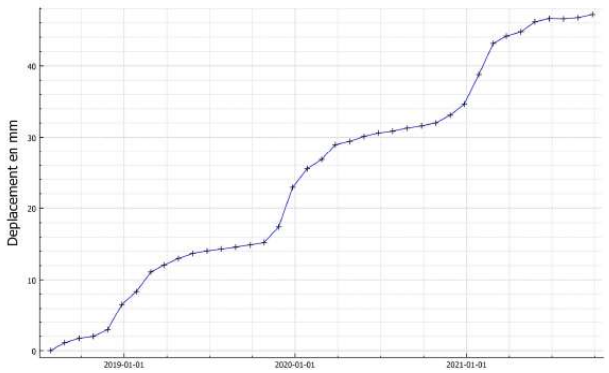
Les résultats des mesures inclinométriques sont présentés ci-après et sont répartis en deux secteurs, branche amont (I4, I7, I8 et I9) et branche aval du lacet (I5 et I6). L'ensemble des résultats des mesures est joint en annexe.

3.3.1 Branche amont du lacet

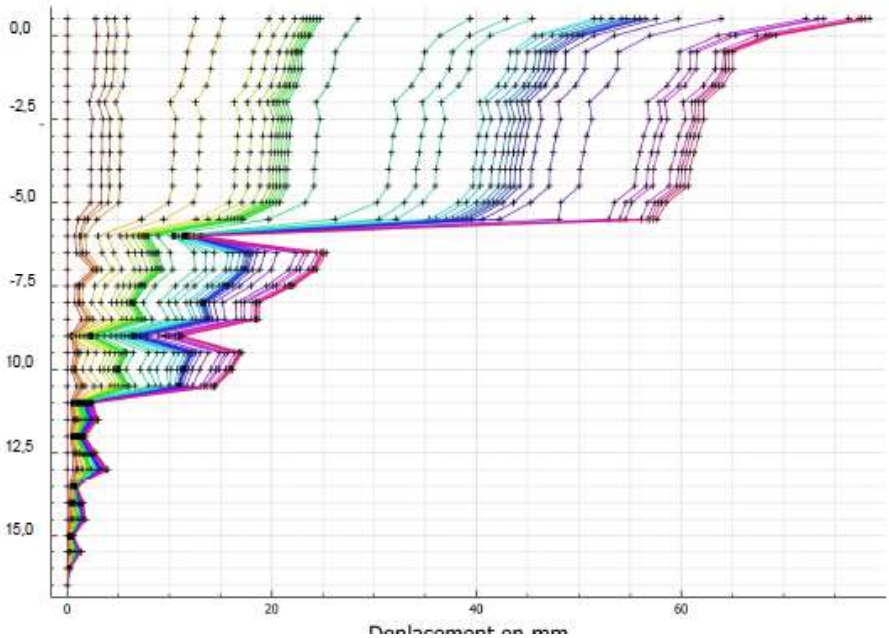
3.3.1.1 *Chaine inclinométrique I4*



15a. Rotations observées en I4 (octobre 2021)



15b. Rotation locale dans le temps à 6,0 m de prof.(rad.10^{-3})



15c. Modules de déplacements cumulés (mm) en I4

Source : Cerema

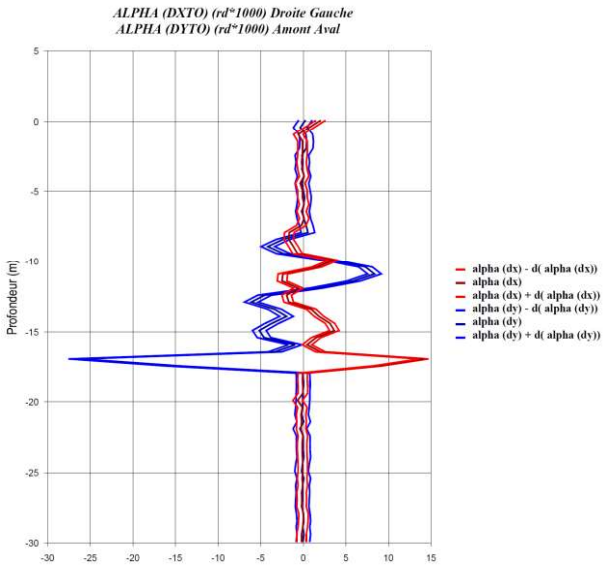
Illustration 15 : Résultats des mesures inclinométriques en I4 (chaîne inclinométrique)

L'inclinomètre I4 (chaîne inclinométrique) met en évidence un pic de rotation vers 5,5-6,0 m de profondeur, de l'ordre de 45.10^{-3} rad, et un déplacement cumulé de 60 mm jusqu'au cisaillement de la chaîne en octobre 2021.

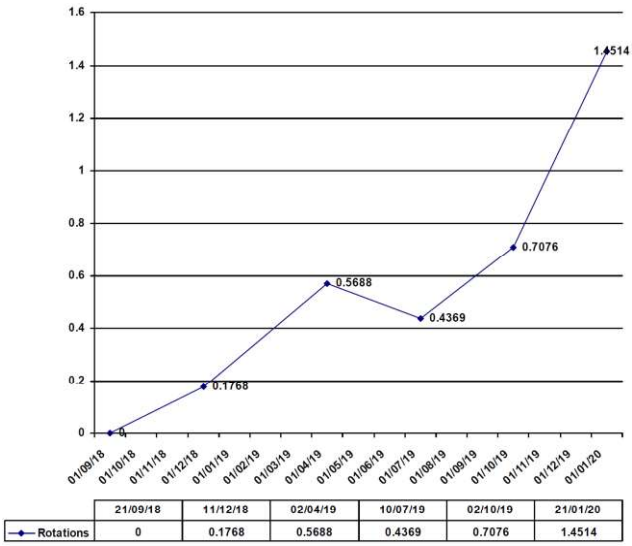
D'autres pics de rotations sont identifiables, notamment vers 8,5 et 10,5 m de profondeur avec des valeurs de rotations respectives de 14 et 18.10^{-3} rad (pouvant être des signes de flambement comme le suggère l'alternance de valeurs positives et négatives de rotations locales) et des déplacements cumulés respectifs de 15 et 25 mm.

Le déplacement est discontinu (illustration 5b) au cours du temps, avec des vitesses importantes en période hivernale (début novembre à fin mars) et des vitesses modérées en période estivale (début avril à fin octobre).

3.3.1.2 *Inclinomètre I7*

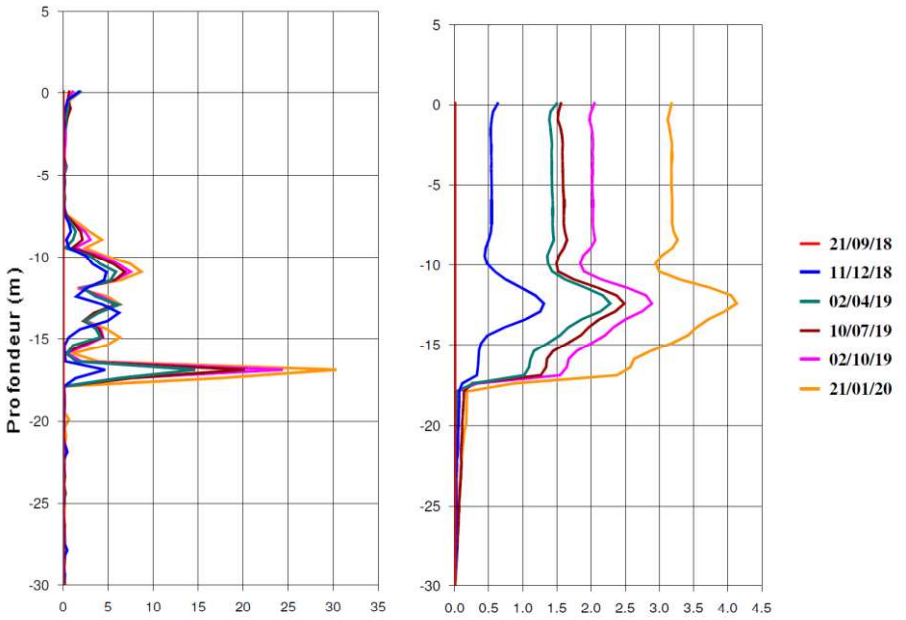


16a. Rotations observées en I7 (janvier 2020)



	21/09/18	11/12/18	02/04/19	10/07/19	02/10/19	21/01/20
Rotations	0	0.1768	0.5688	0.4369	0.7076	1.4514

16b. Rotation locale dans le temps à 16 m de prof.(rad.10^{-3})



16c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I7

Illustration 16 : Résultats des mesures inclinométriques en I7

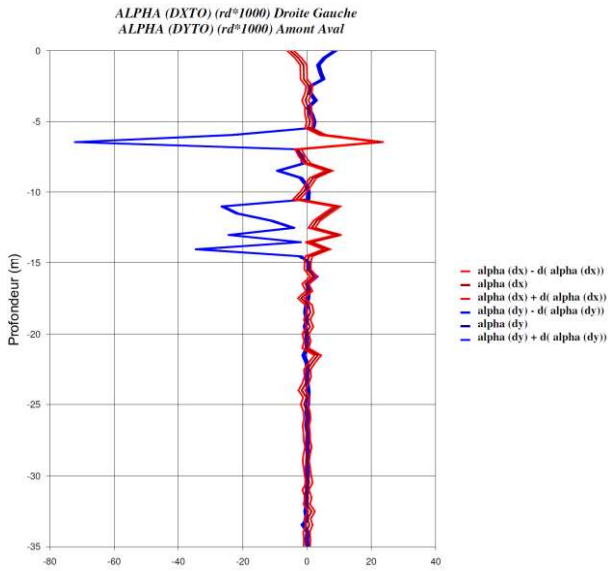
Source : Cerema

L'inclinomètre I7 indique un pic de rotation maximal à 16 m de profondeur, typique d'une surface de rupture, avec une valeur de 30.10^{-3} rad, et un déplacement cumulé de 2,5 cm en janvier 2020 avant cisaillement du tube.

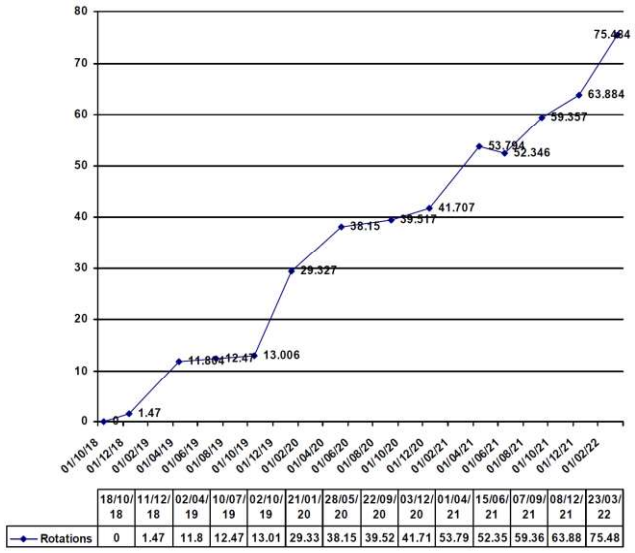
Sur la figure 6a, l'alternance de valeurs de rotations locales positives et négatives semble indiquer un flambement du tube entre 8 et 12 m de profondeur.

Le déplacement est discontinu (figure 16b) avec à nouveau des vitesses élevées en période humide et faibles en période estivale. Les accélérations importantes à partir d'octobre 2019 ont conduit au cisaillement du tube entre la fin de l'hiver et le printemps 2020.

3.3.1.3 *Inclinomètre I8*

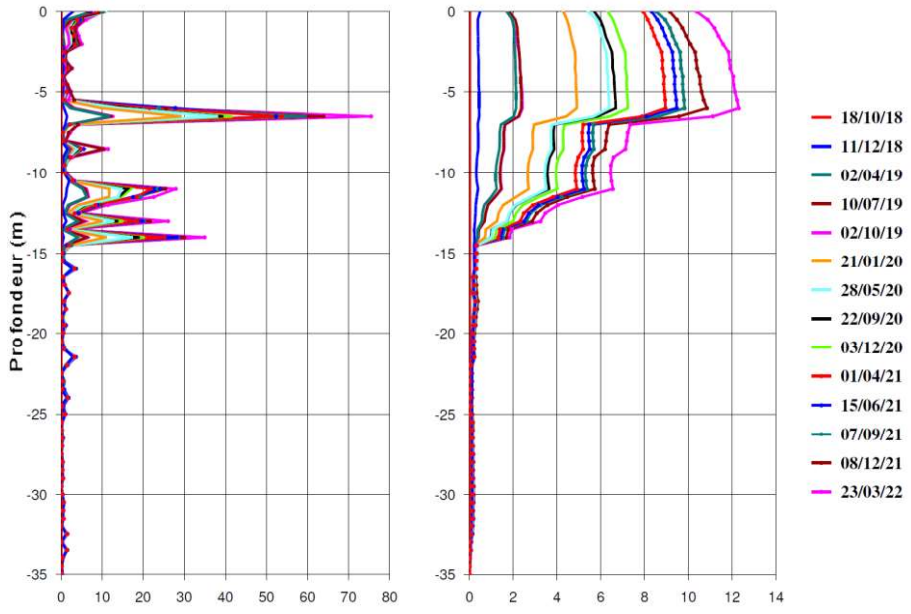


17a. Rotations observées en I8 (mars 2022)



	18/10/18	11/12/18	02/04/19	10/07/19	02/10/19	21/01/20	28/05/20	22/09/20	03/12/20	01/04/21	15/06/21	07/09/21	08/12/21	23/03/22
Rotations	0	1.47	11.8	12.47	13.01	29.33	38.15	39.52	41.71	53.79	52.35	59.36	63.88	75.48

17b. Rotation locale dans le temps à 6,5 m de prof. ($rd.10^{-3}$)



17c. Rotations locales ($rad.10^{-3}$) et modules de déplacements cumulés (cm) en I8

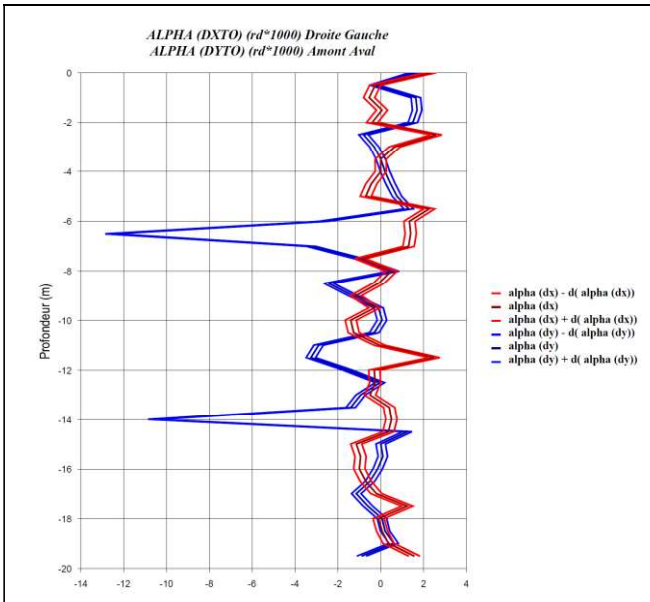
Illustration 17 : Résultats des mesures inclinométriques en I8

Source : Cerema

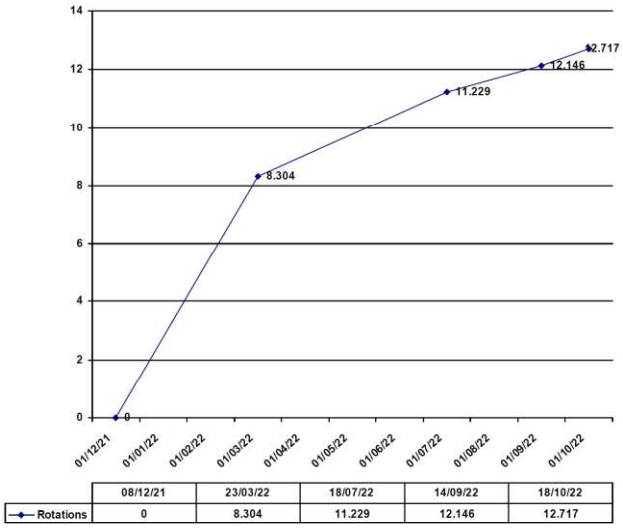
Les mesures montrent un pic de rotation maximal à 6,0 m de profondeur, évoquant fortement une surface de glissement, avec une valeur de 76.10^{-3} rad et un module de déplacement cumulé de 12 cm avant cisaillement, en mars 2022. Les mesures indiquent également des rotations significatives entre 10 et 15 m de profondeur. Elles pourraient correspondre à la déformation lente par cisaillement réparti d'une couche épaisse de 3 à 4 m.

Le mouvement est discontinu avec des vitesses élevées en fin d'automne et en hiver principalement.

3.3.1.4 *Inclinomètre I9*

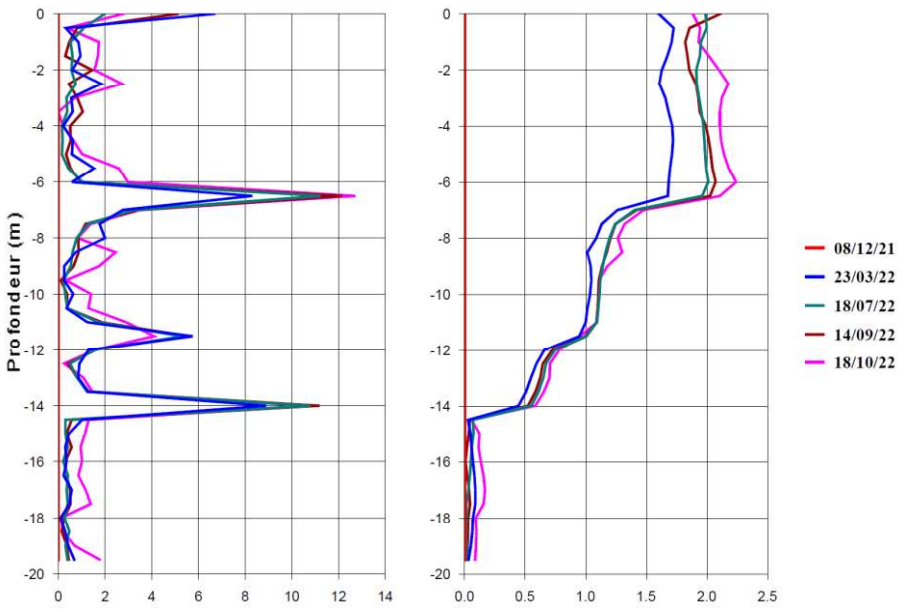


18a. Rotations observées en I9 (octobre 2022)



18b. Rotation locale dans le temps à 6,5 m de prof. ($rd.10^{-3}$)

Source : Cerema



18c. Rotations locales ($rad.10^{-3}$) et modules de déplacements cumulés (cm) en I9

Illustration 18 : Résultats des mesures inclinométriques en I9

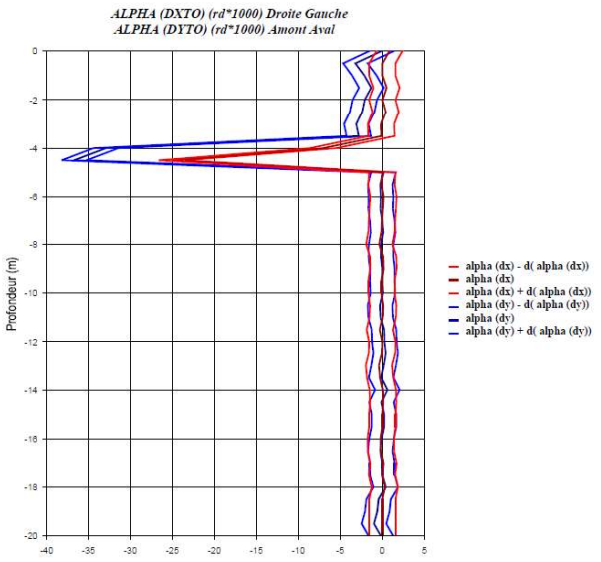
Les inclinomètres I9 et I10, respectivement de 35 et 20 m de profondeur, ont été mis en place en octobre 2021 dans l'objectif de remplacer l'inclinomètre I8 proche du cisaillement à cette période (cisaillé depuis). Seuls les résultats de I9 sont présentés dans le document car suite à un problème de scellement du tube I10, les mesures pour ce tube ne sont pas exploitables.

Sur les douze mois de suivi, les mesures en I9 montrent deux pics de rotations, à 6,5 et 14 m de profondeur et des valeurs respectives de rotations locales de 12,5 et 11.10^{-3} rad et des déplacements respectifs de 2,2 et 0,6 cm. Un pic probable est également présent vers -11 m, mais il sera à confirmer avec davantage de recul sur ce tube profond.

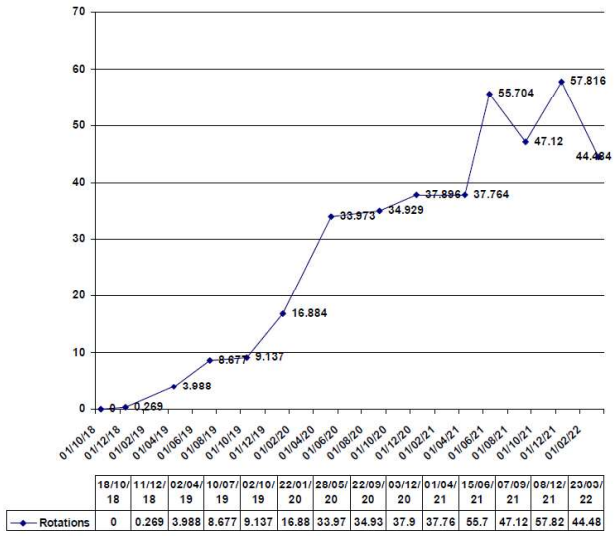
Les relevés évoquent des surfaces de ruptures successives ou imbriquées en fonction de la profondeur.

3.3.2 Branche aval du lacet

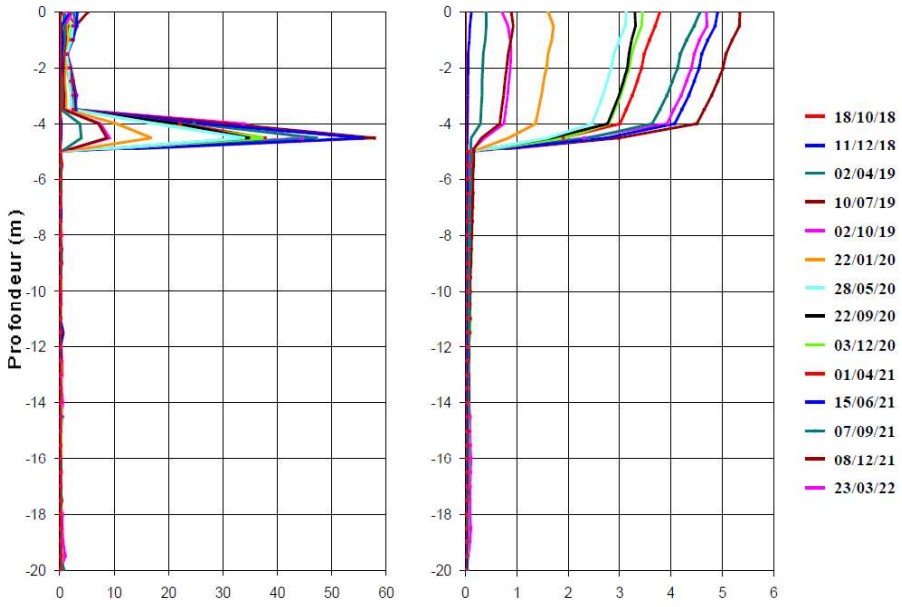
3.3.2.1 *Inclinomètre I5*



19a. Rotations observées en I5 (mars 2022)



19b. Rotation locale dans le temps à 4,5 m de prof.(rd.10^{-3})



19c. Rotations locales (rd x 10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I5

Source : Cerema

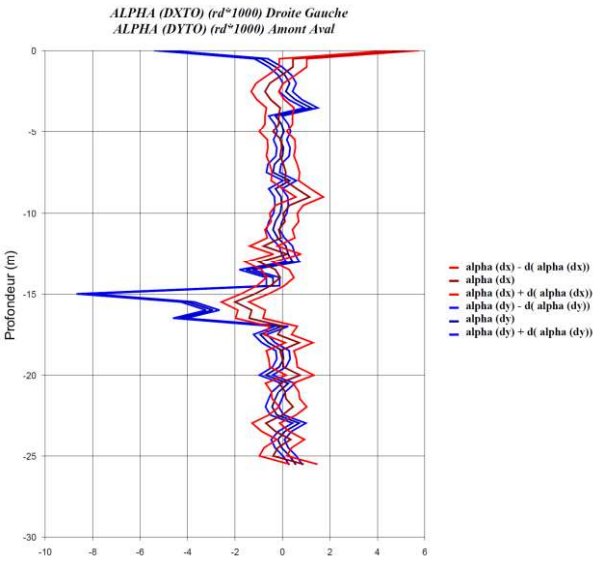
Illustration 19 : Résultats des mesures inclinométriques en I5

L'inclinomètre I5 est localisé entre les deux branches du lacet de la RN85.

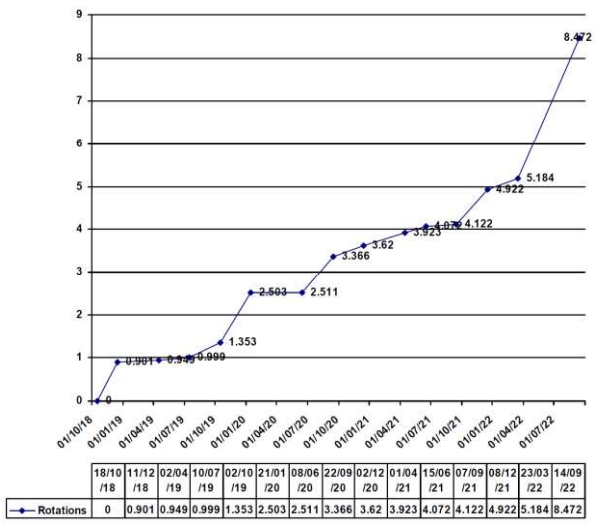
Les mesures montrent un pic de rotation maximal à 4,5 m de profondeur, avec une valeur de 58.10^{-3} rad et un module de déplacement cumulé de 4,5 cm avant cisaillement, entre mars et septembre 2022. Ce pic est quasiment la seule zone d'évolution significative du tube. Cela évoque un mécanisme

de glissement caractérisé par un « bloc » supérieur en mouvement relativement homogène et un bloc inférieur stable, séparés par une surface de rupture bien individualisée.

3.3.2.2 *Inclinomètre I6*

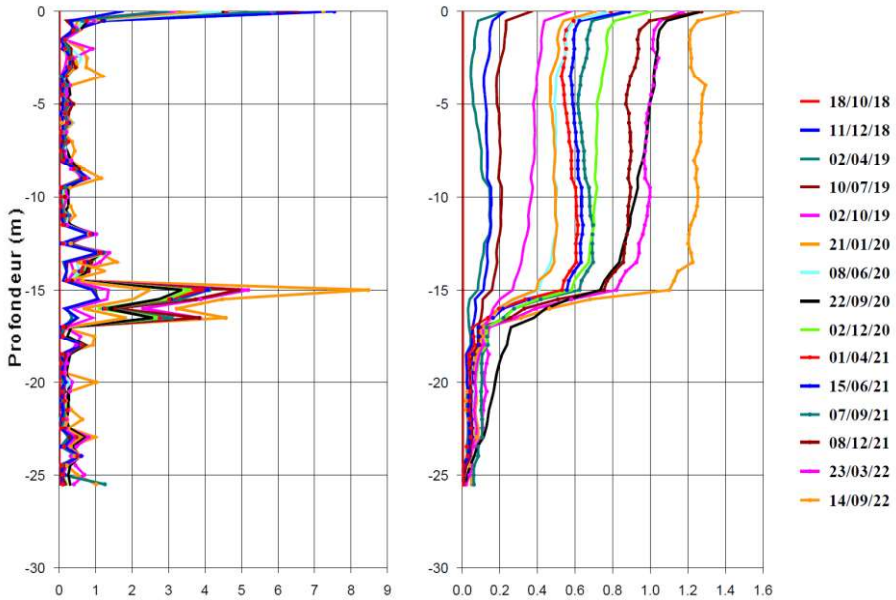


20a. Rotations observées en I6 (septembre 2022)



	18/10/18	11/12/18	02/04/19	10/07/19	02/10/19	21/01/20	08/06/20	22/09/20	02/12/20	01/04/21	15/06/21	07/09/21	08/12/21	23/03/22	14/09/22
Rotations	0	0.901	0.949	0.999	1.353	2.503	2.511	3.366	3.62	3.923	4.072	4.122	4.922	5.184	8.472

20b. Rotation locale dans le temps à 15 m de prof. (rad.10^{-3})



20c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I6

Source : Cerema

Illustration 20 : Résultats des mesures inclinométriques en I6

Les mesures montrent un pic de rotation maximal à 15,0 m de profondeur, avec une valeur de 8,5.10^{-3} rad et un module de déplacement cumulé de 1,1 cm avant cisaillement.

À nouveau, les mesures évoquent le glissement d'un bloc supérieur sur une couche inférieure stable, avec cette fois une zone de cisaillement plus épaisse (de l'ordre de 2 m).

Le mouvement est relativement faible et discontinu, avec des périodes d'accélération plutôt à l'automne (2019 et 2020).

3.3.3 Synthèse des mesures inclinométriques

Dans la zone supérieure du glissement affectant les deux branches de la RN85, les inclinomètres I4, I8 et I10 montrent un mouvement de glissement très net, peu profond, avec des surfaces de cisaillement localisées respectivement à 6,0 - 6,5 et 6,5 m de profondeur/TN. Ces profondeurs correspondent à la zone de transition entre les moraines supérieures (sables beiges argilo-limoneux à graviers et galets) et les argiles grises litées à inter-lits sableux du Beaumont selon les coupes de sondages associées à la mise en place des inclinomètres.

Les trois inclinomètres montrent également des zones chahutées, respectivement entre 8,5 et 10,5 m de profondeur en I4, 10,5 et 14,5 m en I8 et 11 et 14,5 m en I10 au sein des argiles litées sous la surface de cisaillement principale, pouvant constituer des indices de glissements secondaires ou de fluage lent de couches plus épaisses.

Les dispositifs inclinométriques I4 (chaine inclinométrique) et I8 (tube inclinométrique classique), implantés en juillet 2018, ont cisaillé respectivement en octobre 2021 et au cours du printemps 2022 (dernière mesure le 23 mars 2022).

Le long de la surface de cisaillement la plus active, entre 6,0 et 6,5 m de profondeur, les vitesses moyennes de déplacement sont de l'ordre de 15 à 20 mm/an. Mais les déplacements sont discontinus avec des vitesses élevées lors des périodes hivernales (début novembre à fin mars) et plus lentes sur les périodes estivales (début avril à fin octobre). Ces variations sont très certainement liées aux périodes d'apport d'eau efficace majeures, fonte de neige et fortes précipitations en période de faible évapotranspiration.

Par ailleurs, les deux inclinomètres I4 et I8, de technologie différente, ont montré une très bonne corrélation dans les mesures obtenues. Espacés de quelques mètres, en partie haute du glissement, ils ont déterminé une profondeur identique de la surface de glissement entre 6,0 et 6,5 m de profondeur. Ils ont également mesuré les mêmes vitesses de déplacement, de 15 à 20 mm/an, confirmé par un cisaillement du tube à quelques mois d'intervalle (octobre 2021 pour I4 et printemps 2022 pour I8) alors qu'ils ont été installés tous les deux en juillet 2018.

En partie basse du glissement, I5, localisé entre les deux branches de la RN85, caractérise une surface de cisaillement vers 4,5 m de profondeur proche également de l'interface moraines / argiles reconnue vers 5,5 m de profondeur au droit du sondage S6-SD4-I5.

L'inclinomètre I7, localisé à l'aplomb du lacet donc dans la partie active au sud, caractérise une surface de cisaillement plus en profondeur, entre 16 et 16,5 m de profondeur au sein des argiles grises litées du Beaumont (coupe de sondage S6-SD7-I7). Le cisaillement du tube a été obtenu très rapidement, en 18 mois pour une rotation locale du tube de 30.10^{-3} rad et un déplacement cumulé de l'ordre de 2,5 cm. Le cisaillement a été atteint après une période d'accélération du mouvement à partir d'octobre 2019 et lors de l'hiver 2020.

Sous la zone d'élargissement du lacet, l'inclinomètre I6 caractérise un glissement profond, avec une surface de cisaillement reconnue vers 15 m de profondeur et une zone chahutée entre 15 et 16 m de profondeur (zone cisaillée). Les mouvements sont discontinus avec l'alternance de périodes de ralentissement et de périodes d'accélération, toujours selon l'alternance des saisons et des conditions climatiques. Toutefois, dans cette zone le glissement est plus lent, avec une vitesse moyenne des déplacements de l'ordre de 3 mm/an.

3.4 Résultats des mesures GPS

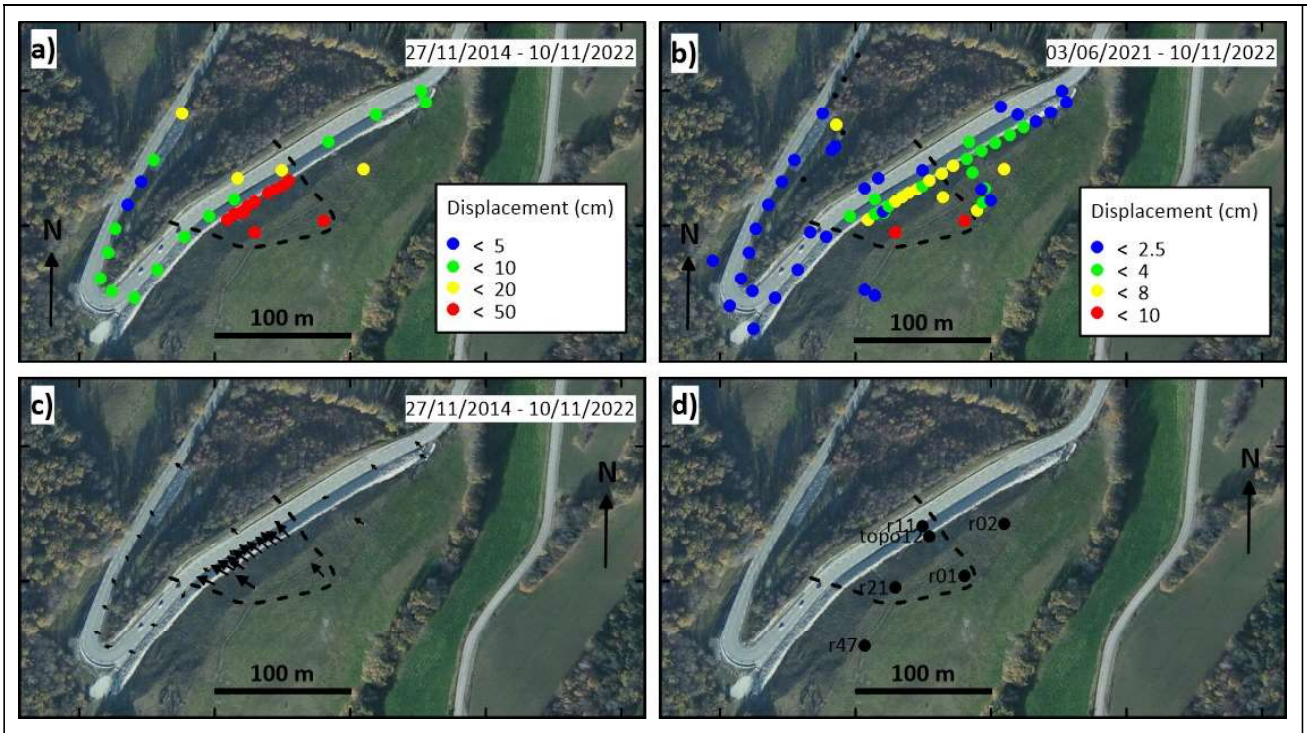
3.4.1 Relevés périodiques

L'illustration 21a présente les déplacements totaux mesurés par GPS entre le 27 novembre 2014 et le 10 novembre 2022.

Elle montre que la majeure partie des déplacements se produisent entre le haut du glissement et le sommet de l'enrochement. Les déplacements mesurés durant 8 ans atteignent presque 0,5 m. A la base de l'enrochement, les déplacements sont faibles. Ceci suggère que l'enrochement accommode la plus grande partie de la déformation. Cette hypothèse est appuyée par l'observation de blocs qui se détachent de l'enrochement, tombent et se trouvent bloqués à l'aval par la glissière.

À l'extérieur de cette zone de déformation rapide, les déplacements sont plus modérés mais montrent que l'ensemble du secteur se déplace et est donc soumis à un glissement de terrain, probablement profond de quelques dizaines de mètres (ce que confirment les mesures inclinométriques précédentes). L'illustration 21b présente le même type de données mais entre juin 2021 (début de l'instrumentation dans le cadre du projet MLA3) et novembre 2022. Le zonage reste le même et est mieux contraint spatialement suite à l'ajout de bornes de mesure.

L'illustration 21c présente l'azimut des déplacements. Ceux-ci sont principalement dirigés vers le nord-ouest. Finalement, l'illustration 21d montre la localisation des stations qui sont détaillées sur l'illustration 22.

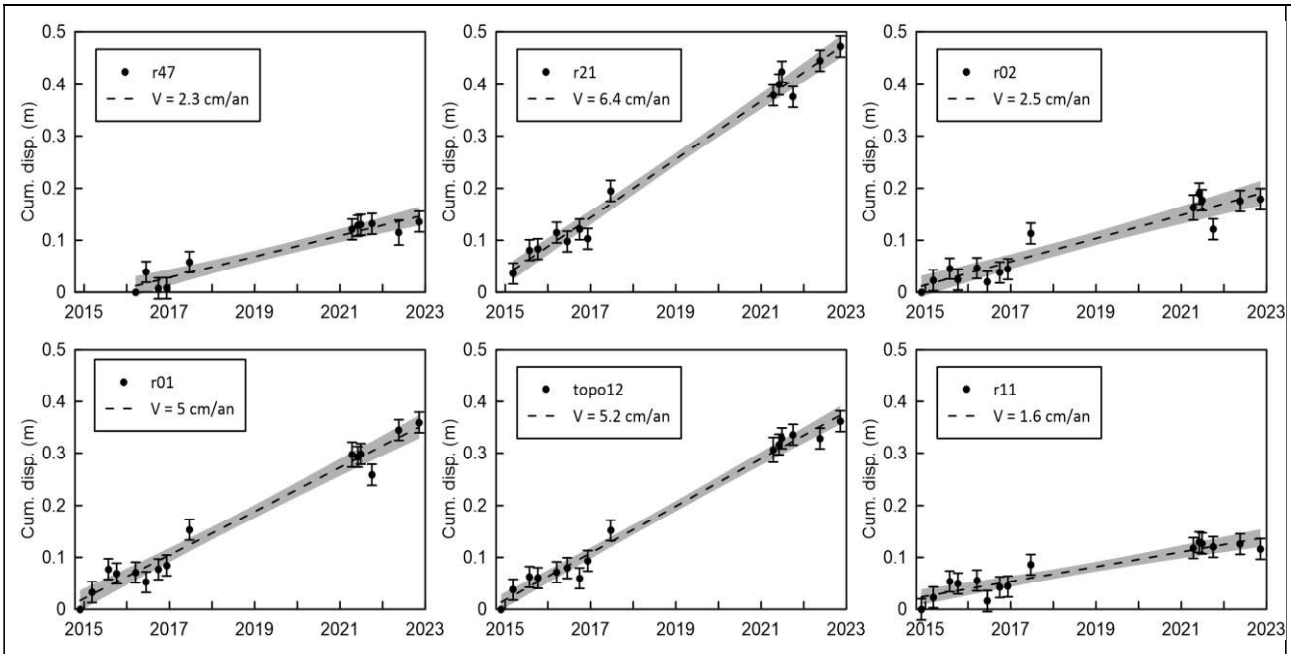


Source : Isterre

Illustration 21 : Déplacements mesurés par relevés GNSS périodiques sur le site de Charlaix. a) Entre le 27/11/2014 et le 10/11/2022. b) Entre le 06/06/2021 et le 10/11/2022. c) Azimut des déplacements. La taille des flèches est proportionnelle aux déplacements. d) Localisation des stations présentées sur la figure 12 suivante.

L'illustration 22 présente les déplacements mesurés sur plusieurs repères entre avril 2014 et novembre 2022. Globalement, les vitesses mesurées durant ce projet (2021 - fin 2022) sont en continuité avec celles mesurées durant la période 2015 - été 2017. La première ligne présente les déplacements cumulés selon un axe sud-ouest vers nord-ouest. Les vitesses de déplacement sont modérées en dehors de la zone la plus active (2,3 et 2,5 cm/an pour r47 et r02, respectivement) et plus importantes à l'intérieur (6,4 cm/an pour r21). La deuxième ligne présente les déplacements cumulés selon un axe sud-est vers nord-est et à l'intérieur de la zone la plus active. Les vitesses sont de 5 et 5,2 cm/an

à l'amont de l'enrochement (stations r01 et topo12) et diminuent jusqu'à 1,6 cm/an au pied de l'enrochement (station r11). Ces résultats indiquent que la masse argileuse glisse et que les déplacements sont atténués par l'enrochement. Cette observation est confirmée par une inspection visuelle qui montre que l'enrochement subi une déformation significative.



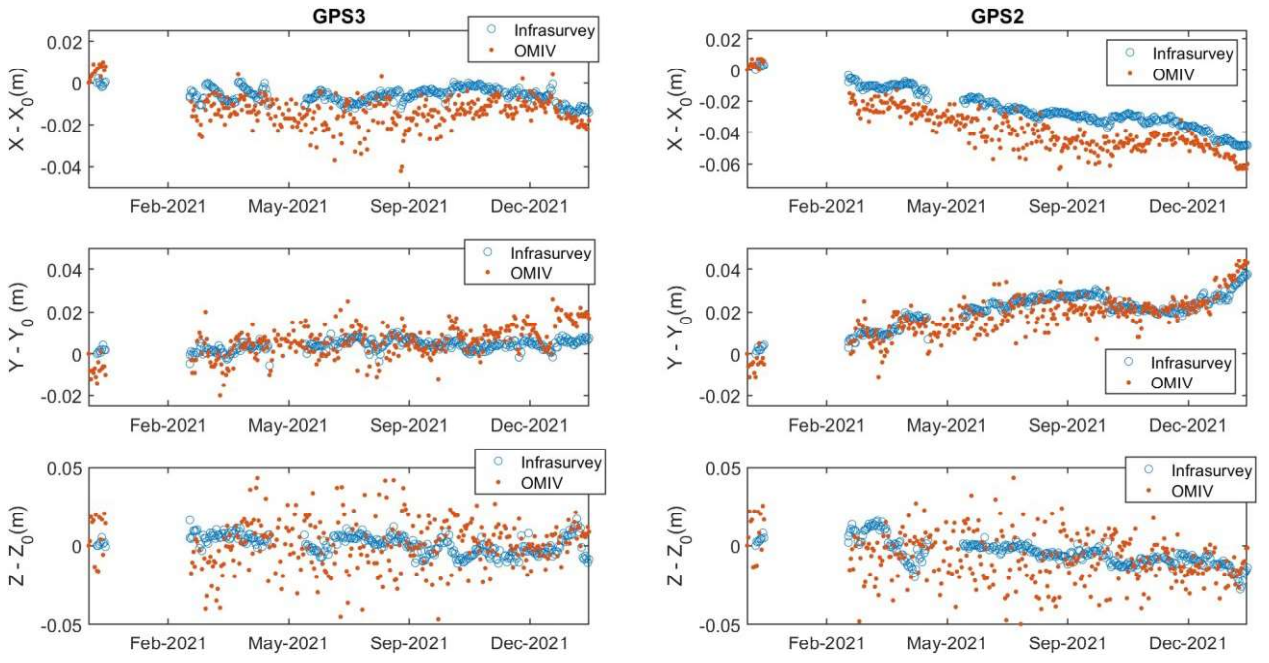
Source : Isterre

Illustration 22 : Déplacements mesurés par relevés GNSS périodiques sur le site de Charlaix entre 2015 et 2022. Les noms des différentes stations sont précisés dans la légende et leur position est matérialisée sur la figure 11d. Pour chaque station, la vitesse linéaire moyenne annuelle est estimée et l'intervalle de confiance à 95 % est précisé.

3.4.2 Mesures continues

3.4.2.1 *Comparaison de différents traitements*

L'illustration 23 présente les déplacements mesurés à Charlaix à l'aide des stations permanentes GPS2 et GPS3 (localisation sur la figure 6) entre le 9 décembre 2020 et le 28 janvier 2022. Pour chaque station, les mêmes données ont été traitées de deux façons. Les deux traitements ont été conduits à l'aide de la méthode de double différence par rapport à une station de référence. Dans le premier cas, noté « *Infrasurvey* » dans les figures, la station de référence est la station GPS1 située au nord du site de Charlaix, à quelques dizaines de mètres des stations GPS2 et GPS3 (voir figure 23). Les données ont été traitées de façon automatique par un ordinateur embarqué dans la station de base (notée GPS1[réf.] sur la figure 6). Dans le deuxième cas, noté « OMIV », la station de référence est la station permanente AVR située sur la commune de Sinard, à environ 15 km à l'ouest du site d'étude. Les données ont été traitées par l'observatoire OMIV. Finalement, pour chaque composante (X, Y et Z), les mesures sont exprimées en termes de différence par rapport à la première mesure. Ainsi, les figures présentent le déplacement relatif de chaque composante depuis la mesure d'origine.



Source : Isterre

Illustration 23 : Stations GPS3 et GPS2, comparaison des solutions de positionnement obtenues par calcul autonome Infrasurvey et par calcul OMIV.

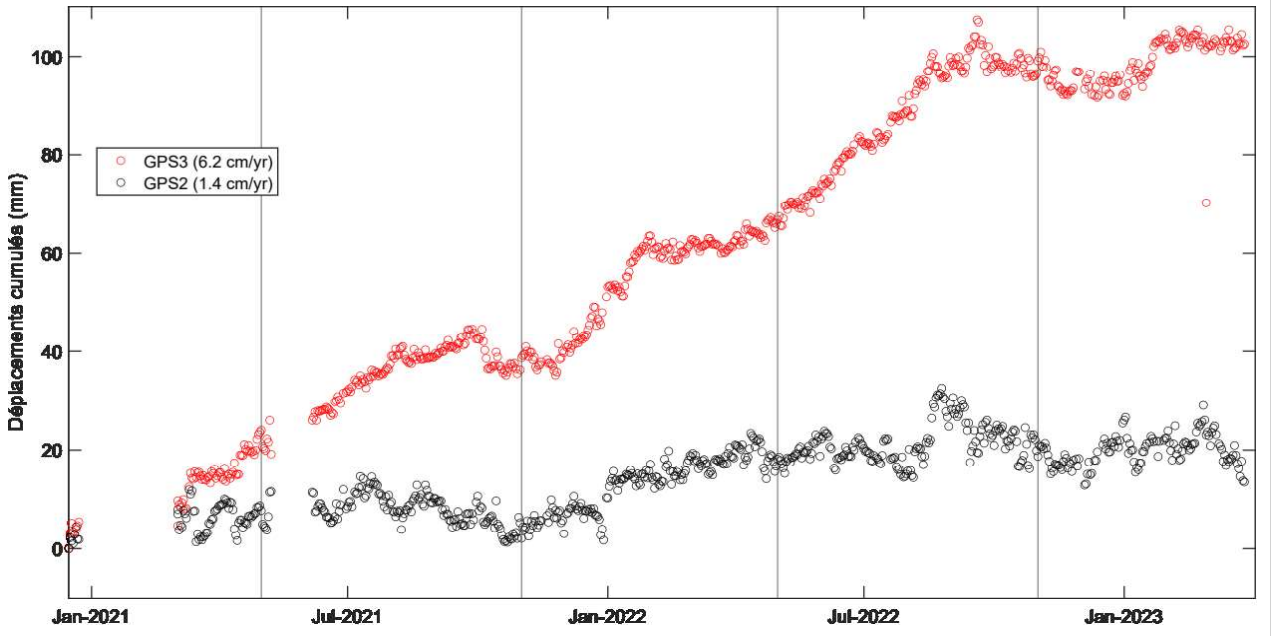
De manière globale, les résultats sont comparables entre les deux traitements en termes de quantité de déplacement. Toutefois, les traitements « OMIV » présentent une plus grande dispersion. Ceci est causé par la distance à la station de référence (≈ 15 km) comparée au traitement « *Infrasurvey* » (quelques dizaines de mètres). Ceci montre l'intérêt de disposer d'une station de référence proche dans le cas de traitements de type double-différence. Finalement, il convient de préciser que si le système *Infrasurvey* permettait de mesurer les données dans deux longueurs d'ondes, il serait possible de conduire des traitements de type *Precise Point Positioning* (PPP) sans besoin d'une station de référence à proximité.

3.4.2.2 *Suivi des déplacements*

L'illustration 24 présente les déplacements totaux (3 composantes) cumulés mesurés sur le site de Charlaix entre le 16 décembre 2020 et le 24 février 2023. Bien que séparés d'une distance faible (30 m), ils présentent des comportements différents. Le GPS2 est situé immédiatement en dehors de la zone la plus rapide et présente un déplacement total de 1,35 cm (vitesse moyenne d'environ 1,4 cm/an). Le GPS3 présente un déplacement total de 10,25 cm, ce qui correspond à une vitesse moyenne de 6,2 cm/an.

Les lignes verticales sur la figure indiquent les dates approximatives de transition entre saisons « sèche » et « humide », soit le 1er mai et le 1er novembre de chaque année. Des changements de pente (qui correspondent à des changements de vitesse) sont discernables pour la station GPS2 en fonction des saisons. Ce phénomène n'est pas clairement identifié pour GPS3.

Toutefois, les deux courbes montrent que des vitesses négatives sont mesurées, ce qui indique des mouvements qui remonteraient la pente. Les stations sont fixées à environ 1 m de hauteur sur des poteaux de bois enfoncés d'environ 20 cm dans le sol. Une cause probable de ces mouvements serait que les fixations sont influencées par la variation des conditions hydriques saisonnières en surface (retrait-gonflement). Elles pourraient engendrer des mouvements de bascule périodique des poteaux en surface, qui ne sont pas observés par les mesures inclinométriques.



Source : Isterre

Illustration 24 : Déplacements cumulés mesurés sur le site de Charlaix entre le 16 décembre 2020 et le 24 février 2023 pour les stations GPS2 et GPS3. Les vitesses indiquées sont les moyennes sur toute la durée présentée. Les barres verticales correspondent aux limites de saisons « sèche » et « humide » (1er avril et 1er novembre).

3.5 Résultats des mesures sismiques

3.5.1 Variations de vitesse des ondes de surface

Les données sismologiques continues ont été découpées en bandes de 1 h de durée et les traces de moins de 1 h ont été écartées des traitements. Elles ont ensuite été centrées-réduites, filtrées dans une bande de fréquence 1-49 Hz (valeur large-bande qui pourra être restreinte par la suite) puis blanchies afin de donner le même poids à toutes les fréquences. Les stations s1 et s2 ont ensuite été inter-corrélées par rapport à la station de référence s0. Les résultats sont présentés sur l'illustration 25 sous la forme de corrélogrammes horaires depuis le 15 avril 2021 jusqu'au 03 février 2023, avec une échelle de couleur qui correspond au coefficient de corrélation et qui est commune aux deux graphiques. Les graphiques montrent l'évolution du coefficient de corrélation *CC* en fonction du délai (*lag*) pour chaque corrélation horaire, c'est-à-dire pour quelle valeur de *lag* les signaux sismiques entre stations se ressemblent le plus (*i.e.* un *CC* de 1 indique des signaux identiques). Les deux graphiques montrent des phases globalement stables dans la durée (les bandes de couleur verticales) pour des valeurs de *lag* négatives. Les stations s1 et s2 étant corrélées à la station s0, plus à l'est, ceci indique que les trains d'ondes avec des *CC* élevés proviennent préférentiellement de l'ouest. Ces trains d'ondes pourraient trouver leur origine dans le trafic routier en pied du glissement.

Les corrélogrammes moyens sont représentés sous la forme de courbes noires sur la figure. Ils représentent la fonction de corrélation de référence qui sera utilisée pour le calcul des variations relatives de vitesse des ondes de surface.

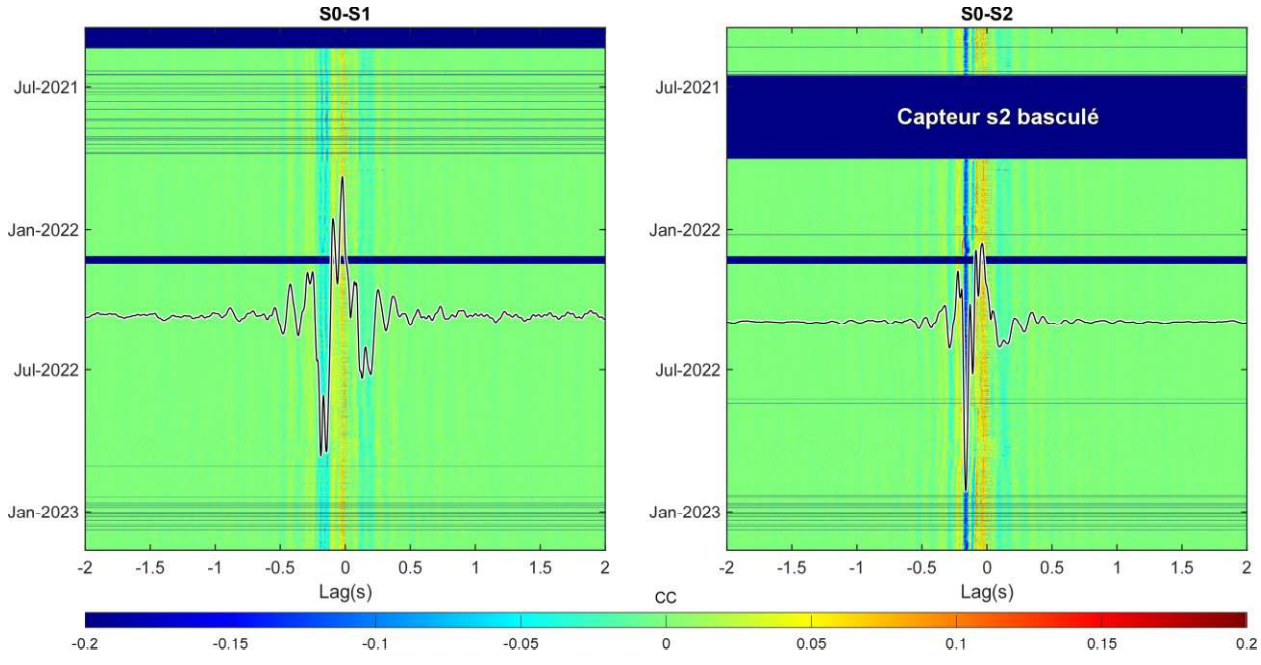
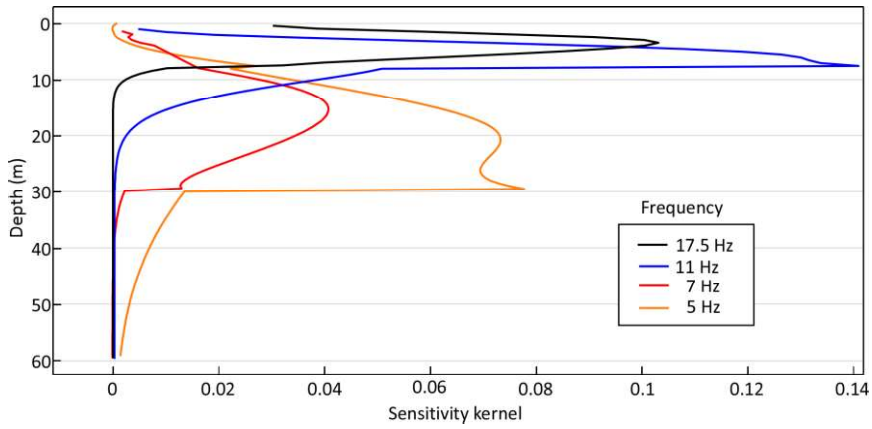


Illustration 25 : Corrélogrammes horaires (composante verticale) entre les stations s0-s1 (à gauche) et s0-s2 (à droite). L'échelle de couleur représente le coefficient de corrélation CC et est commune entre les deux corrélogrammes. Les bandes bleues horizontales indiquent une absence de données. Les courbes noires correspondent au corrélogramme moyen.

Les corrélations horaires ont ensuite été traitées en termes de variation de vitesse relative des ondes de surface. Ce traitement consiste à **1)** calculer un corrélogramme de référence (par exemple, la moyenne de tous les corrélogrammes horaires), puis à **2)** étirer chaque corrélogramme horaire et à chercher quelle valeur d'étirement (*stretching*) temporel maximise le coefficient de corrélation avec le corrélogramme de référence. Comme les potentielles variations de distance entre capteurs sont négligeables par rapport aux vitesses de propagation des ondes sismiques (plusieurs dizaines à quelques centaines de m/s), les variations de temps d'arrivée sont directement reliées aux changements de vitesse. Les résultats se présentent sous la forme de séries temporelles qui montrent, pour chaque corrélogramme, la variation de vitesse relative (*dV/V*, exprimée en pourcentage) par rapport au corrélogramme de référence.

La profondeur d'investigation/sensibilité des ondes de surface est reliée à leur fréquence. Ainsi, en sélectionnant une bande fréquence particulière, il est possible d'augmenter la sensibilité des ondes de surface pour une bande de profondeur particulière. La connaissance de la bande de fréquence d'intérêt s'obtient au moyen de données *a priori* telles que des reconnaissances géologiques et géophysiques. Celles-ci ont été conduites dans le cadre de ce projet mais également de reconnaissances précédentes (voir Bièvre *et al*. 2018). La relation bande de fréquence/profondeur a été calculée au moyen de kernels de sensibilité (ou nœuds résolvants) avec le code ***disba*** (*pypi.org/project/disba/*) et les résultats pour quelques fréquences sont présentés dans la figure 26 sous la forme de la sensibilité des ondes de surface en fonction de la profondeur. Succinctement, le graphique montre que plus la fréquence est basse et plus les ondes de surface sont sensibles en profondeur. Par la suite, 4 bandes de fréquence ont été retenues :

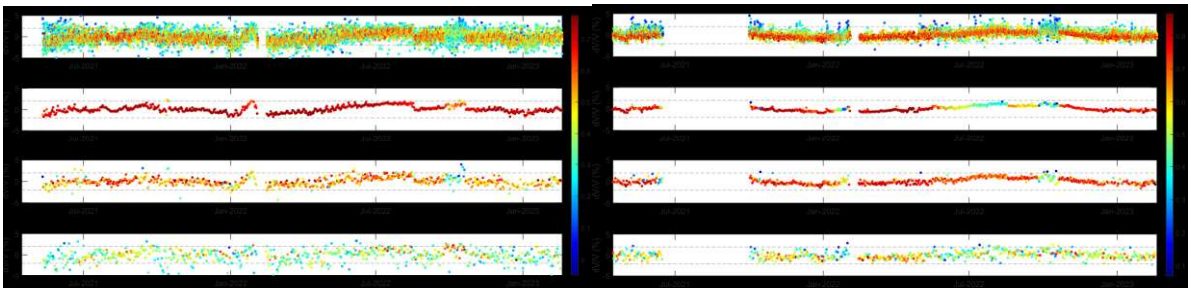
- 05-20 Hz : sensibilité intégrée entre la surface et ~ 30 m de profondeur (investigation globale) ;
- 06-08 Hz : forte sensibilité entre ~ 10 et ~ 18 m de profondeur ;
- 10-12 Hz : forte sensibilité entre ~ 7 et ~ 9 m de profondeur ;
- 15-20 Hz : forte sensibilité entre la surface et ~ 5 m de profondeur.



Source : Isterre

Illustration 26 : Kernels de sensibilité de la vitesse des ondes S en fonction de la profondeur et pour différentes fréquences.

Outre la bande de fréquence, des tests ont été conduits pour évaluer la qualité des corrélations en fonction de la durée de corrélation. Globalement, les sources d'ondes sismiques de fréquences supérieures à 1 Hz sont attribuées au bruit anthropique. Comme l'investigation sur le site est conduite pour des fréquences minimales de 5 Hz, il apparaît que les heures de la journée avec du trafic routier sont probablement les plus intéressantes pour obtenir de l'énergie dans la bande 05-20 Hz. Les résultats de ces tests sont présentés sur la figure 27 sous la forme de séries temporelles de *dV/V* pour la composante verticale des couples de stations s0-s1 (à gauche) et s0-s2 (à droite). Pour chaque couple, les corrélations horaires ont été calculées. La figure présente, de haut en bas, les corrélations horaires pour chaque heure de la journée, toutes les heures de la journée moyennées (*i.e.* moyenne des 24 corrélations d'une journée), la corrélation entre 13:00 et 14:00 (en temps universel) et, finalement entre 01:00 et 02:00 (en temps universel). La première ligne montre une ligne de base avec de bons coefficients de corrélation (*CC*) et des valeurs plus dispersées avec des *CC* plus faibles. La deuxième ligne montre des *dV/V* très stables avec de *CC* élevés. Finalement, les deux dernières lignes montrent que les *dV/V* sont plus stables et présentent de plus forts *CC* pour les corrélations conduites vers midi plutôt qu'en pleine nuit. Dans l'optique d'utiliser les corrélations les plus robustes, la moyenne quotidienne sera utilisée par la suite.



Source : Isterre

Illustration 27 : Séries temporelles horaires de *dV/V* dans la bande de fréquence 05-20 Hz pour les couples de stations s0-s1 (à gauche) et s0-s2 (à droite).

Toutefois, dans le but de vérifier la stabilité des sources pour le suivi temporel de *dV/V*, différents paramètres sismiques ont été analysés à une échelle horaire : l'énergie totale enregistrée par les stations, l'énergie spectrale (au moyen d'une transformée de Fourier de chaque sismogramme horaire) et l'activité sismique (au moyen d'une analyse de type STA/LTA, classique en sismologie pour détecter des événements impulsionnels dont l'énergie dépasse un certain seuil).

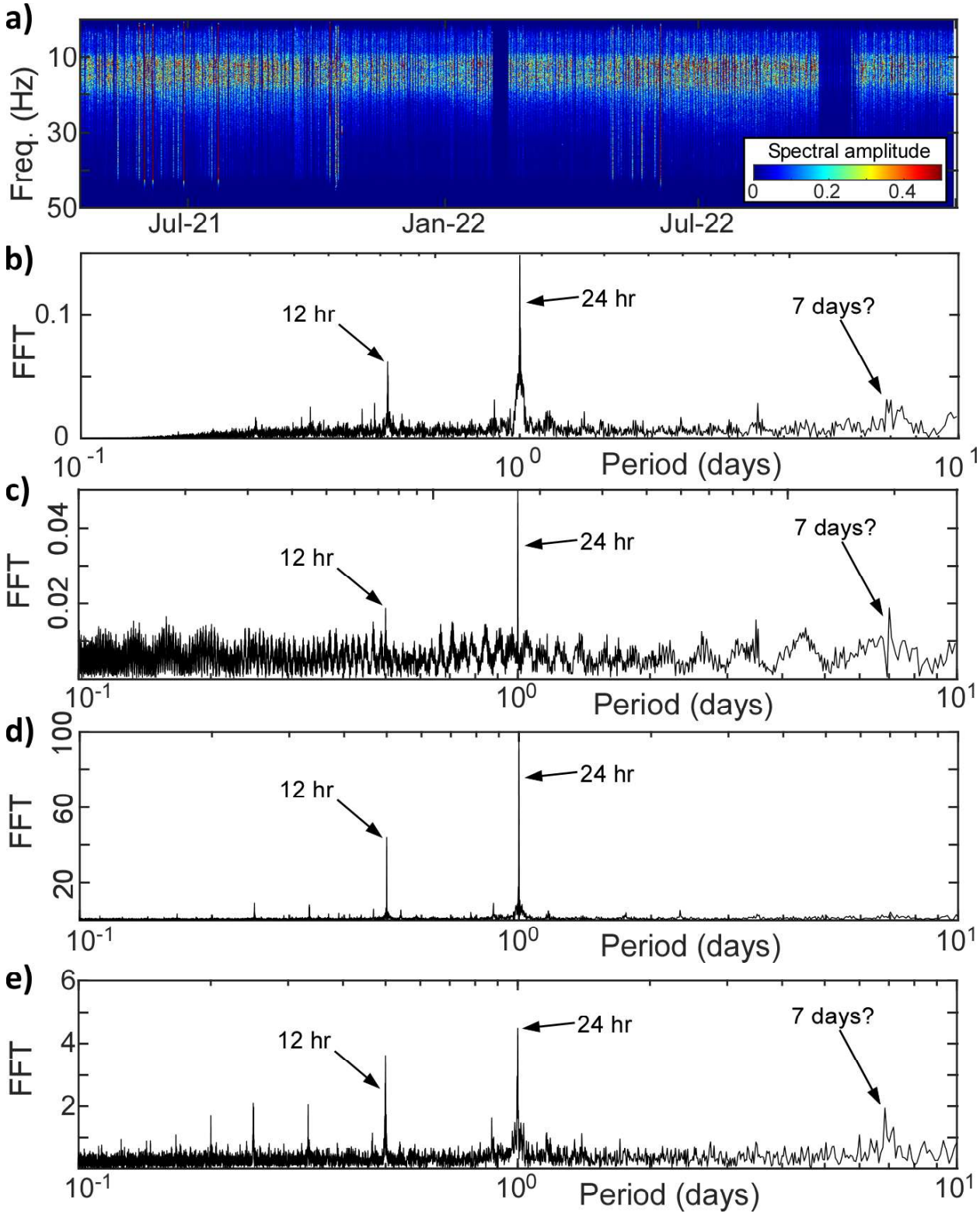
Les résultats sont présentés sur l'illustration 28 pour la composante verticale de la station s0. L'illustration 28a présente le spectro-gramme dans la bande de fréquence 1-49 Hz. Il montre que l'énergie est principalement présente dans la bande 10-20 Hz. La transformée de Fourier de l'intégrale

de l'énergie sismique (illustration 28b) montre deux pics principaux pour des périodes de 12 et 24 hr. Ces pics trouvent en partie leur origine dans des phénomènes naturels (marées atmosphériques ; ce point sera détaillé dans la section suivante) mais également dans l'activité anthropique : périodicité du trafic routier et/ou de l'activité humaine avec l'alternance jour/nuit (période de 24 hr) et la pause méridienne (période de 12 hr). Un pic assez mal défini (large et de faible amplitude) semble visible pour une période 7 jr. Il pourrait éventuellement correspondre à un cycle hebdomadaire, et serait donc lié à l'activité anthropique.

Le périodogramme sur l'illustration 28c présente la transformée de Fourier de l'amplitude spectrale dans la bande 05-20 Hz. Il montre également les deux cycles à 12 et 24 hr et, dans une moindre mesure, un cycle à 7 jr.

L'analyse de la périodicité des événements impulsionnels est présentée dans l'illustration 28d (seuil de 50) et 28e (seuil de 500). Dans le premier cas, les événements peuvent être naturels (vent) ou anthropique. Dans le deuxième cas, ils sont principalement anthropiques. Une fois encore, il est possible de voir les deux cycles à 12 et 24 hr. Il est également possible de voir leurs harmoniques de période plus courte (8 hr, 6 hr, *etc.*). Sur cette dernière figure, en ne conservant que les événements impulsionnels de forte énergie (trafic routier), le cycle à 7 jr semble plus visible. Il pourrait confirmer la présence d'un cycle qui montrerait l'alternance des semaines par l'activité humaine.

En conclusion, cette analyse montre que les sismogrammes contiennent des enregistrements de l'activité naturelle mais également anthropique. Dans l'analyse des variations de vitesse des ondes de surface, il conviendra de prendre en compte ces phénomènes car ils montrent que les sources sismiques ne sont pas stables dans le temps. Ainsi, des variations périodiques de *dV/V* pourraient correspondre à une variation dans le sous-sol (rigidité, densité) causée par des facteurs environnementaux, mais également à une variation de la source sismique induite par la périodicité de l'activité anthropique.



Source : Isterre

Illustration 28 : Analyse de différents paramètres des sismogrammes horaires de la composante verticale de la station s0 dans la bande 1-49 Hz. ***a)*** *Amplitude spectrale.* ***b)*** *Périodogramme de l'énergie sismique.* ***c)*** *Périodogramme de l'amplitude spectrale dans la bande 5-20 Hz.* ***d)*** *Périodogramme de l'activité sismique pour des événements de seuil STA/LTA de 50 et* ***e)*** *500.*

L'illustration 29 présente les séries temporelles quotidiennes (moyenne des 24 corrélations horaires d'une journée) de *dV/V* pour les deux couples de station (s0-s1 et s0-s2) et pour des bandes de fréquence (et donc de profondeur) différentes. L'ensemble des courbes présente une périodicité annuelle qui est reliée aux saisons (Bièvre *et al*. 2018). Ensuite, les courbes montrent globalement une bonne stabilité ainsi que de bons coefficients de corrélation pour toutes les bandes de fréquence, à l'exception de s0-s1 dans la bande 15-20 Hz. Cette observation demeure toutefois difficile à expliquer.

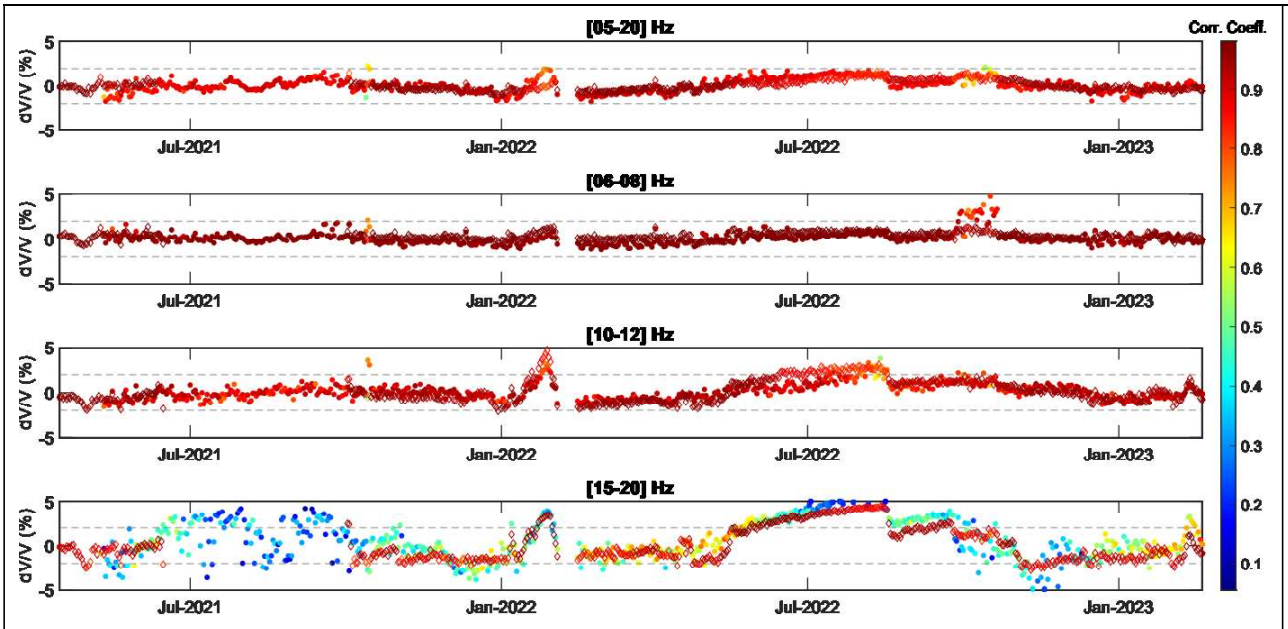


Illustration 29 : Séries temporelles de dV/V des coupes de capteurs s0-s1 (disques pleins) et s0-s2 (losanges) pour différentes bandes de fréquences.

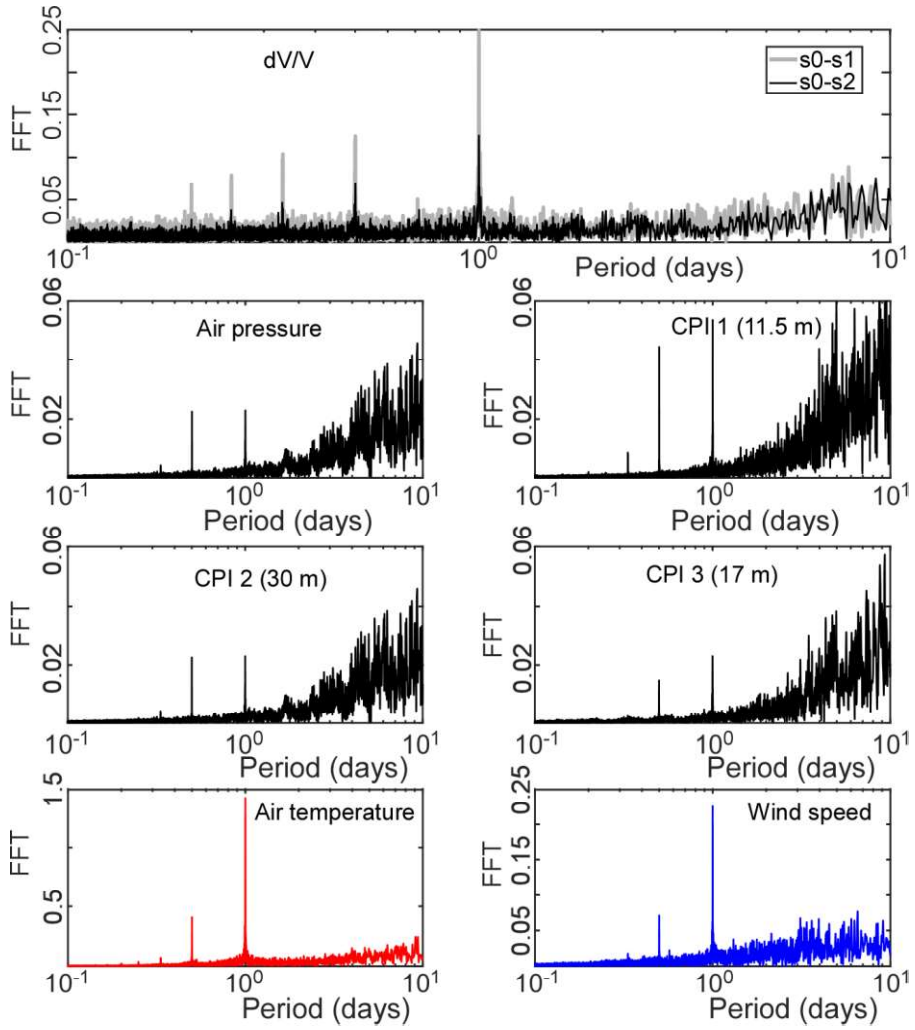
3.5.2 Relation entre dV/V et paramètres environnementaux

Plusieurs instrumentations sur le site de Charlaix permettent de disposer de mesures chaque heure :

- sismologie (*dV/V* des couples s0-s1 et s0-s2) ;
- piézométrie (CPI1 à CPI3, SD20) ;
- météorologie (pression atmosphérique, température et vitesse du vent).

L'illustration 30 présente l'analyse de la périodicité de ces différentes séries temporelles. Elles montrent systématiquement deux cycles de période 12 et 24 hr (et, éventuellement, leurs harmoniques de plus courte période) et, dans une moindre mesure, un cycle de 8 hr, mais de façon non systématique. Ces trois cycles correspondent à des marées atmosphériques[4] (McMillan *et al*. 2019) qui sont causées par des variations d'insolation et qui se répercutent sur les paramètres météorologiques (température, pression atmosphérique et vitesse du vent sur l'illustration 30).

[4] La marée atmosphérique est un phénomène de marée qui résulte de l'effet des réchauffements diurnes cycliques des masses d'air par le Soleil, et aussi de la double attraction de l'air par la Lune et par le Soleil.



Source : Isterre

Illustration 30 : Périodogrammes de différents paramètres sismologiques, piézométriques et météorologiques sur le site de Charlaix.

Ces cycles se retrouvent également sur les périodogrammes de mesures piézométriques et de *dV/V*. L'illustration 31a présente le résultat des inter-corrélations entre la pression interstitielle mesurée à différentes profondeurs et la pression atmosphérique, pour une série temporelle comprise entre le 15 avril 2021 et le 13 septembre 2022 (516 jours soit ~ 12 384 heures).

Les capteurs CPI1 à CPI3 sont des piézomètres à corde vibrante tandis que SD20 est un capteur plus couramment utilisé en géotechnique. Le seuil de significativité statistique *r* vaut $2/\sqrt{n}$, où *n* est la longueur de la série temporelle corrélée. Il vaut ici 0,018. Il est marqué par des lignes horizontales grises dans la figure. Les résultats montrent une forte corrélation entre la pression atmosphérique et les piézomètres à corde vibrante pour un délai (*lag)* nul. Ceci indique que les variations de pression atmosphérique se transmettent immédiatement aux différentes nappes du site, en accord avec de nombreuses études hydrogéologiques publiées dans la littérature internationale (voir les références dans McMillan *et al.* 2019).

Le capteur SD20 ne montre aucune corrélation avec la pression atmosphérique, ce qui est à mettre en relation avec la plus faible résolution de ce type de capteur par rapport aux piézomètres à corde vibrante. Afin de mieux le détecter, les séries temporelles ont été filtrées afin de conserver uniquement les périodes plus courtes que 12 hr et les résultats sont présentés dans l'illustration 31b. Ils montrent toujours une forte corrélation entre les capteurs CPI et la pression atmosphérique pour un *lag* nul. Toutefois, les *CC* sont différents par rapport à la figure précédente. Ici, en se focalisant sur les périodes plus courtes que 12 hr, les résultats montrent que c'est la CPI1 qui réagit plus fortement aux variations

de pression atmosphérique (*CC* ~ 0,75), et la corrélation est mieux détectée (et significative) pour le capteur SD20.

L'inter-corrélation des séries temporelles de *dV/V* (bande 05-20 Hz) avec la pression atmosphérique montre une corrélation positive avec les cycles à 12 et 24 h et avec des coefficients de corrélations élevés, notamment dans le cas du couple s0-s1. Les délais sont compris entre 0 et -1 h (*i.e.* les enregistrements sismiques apparaissent « en avance » par rapport à la pression interstitielle, ce qui n'a pas de sens physique). Ceci est attribué **1)** à l'horodatage des séries temporelles de dV/V (chaque valeur de *dV/V* correspond à 1 h d'enregistrement sismique et est horodatée au début de cette heure), ce qui crée ce décalage, et **2)** au manque de résolution temporelle des mesures (1 mesure par heure) qui ne permet pas d'obtenir une résolution temporelle d'1 h. Néanmoins, ces résultats montrent une réaction quasi synchrone des paramètres mécaniques aux variations de pression interstitielle. Les cycles à 8 h sont également visibles mais avec une interprétation plus délicate. Finalement, les coefficients de corrélation sont plus élevés dans le cas du couple s0-s1 (investigation dans la zone qui glisse le plus vite). Ceci pourrait être attribué à la présence de niveaux plus fortement déformés/fissurés, et qui montreraient une variation de *dV/V* plus forte en réaction à ce forçage environnemental.

Ces résultats sont à rapprocher de ceux de Schulz *et al.* (2009) qui avaient montré une alternance d'accélérations et décélérations du glissement de Slumgullion (Colorado, USA) causée par les marées atmosphériques, sans toutefois pouvoir mettre en évidence l'impact des variations de pression atmosphérique en profondeur. Le travail conduit dans ce projet permet alors de confirmer ces résultats et de montrer que la variation d'insolation est un des nombreux paramètres de forçage environnemental de l'activité des glissements de terrain dans les sols fins.

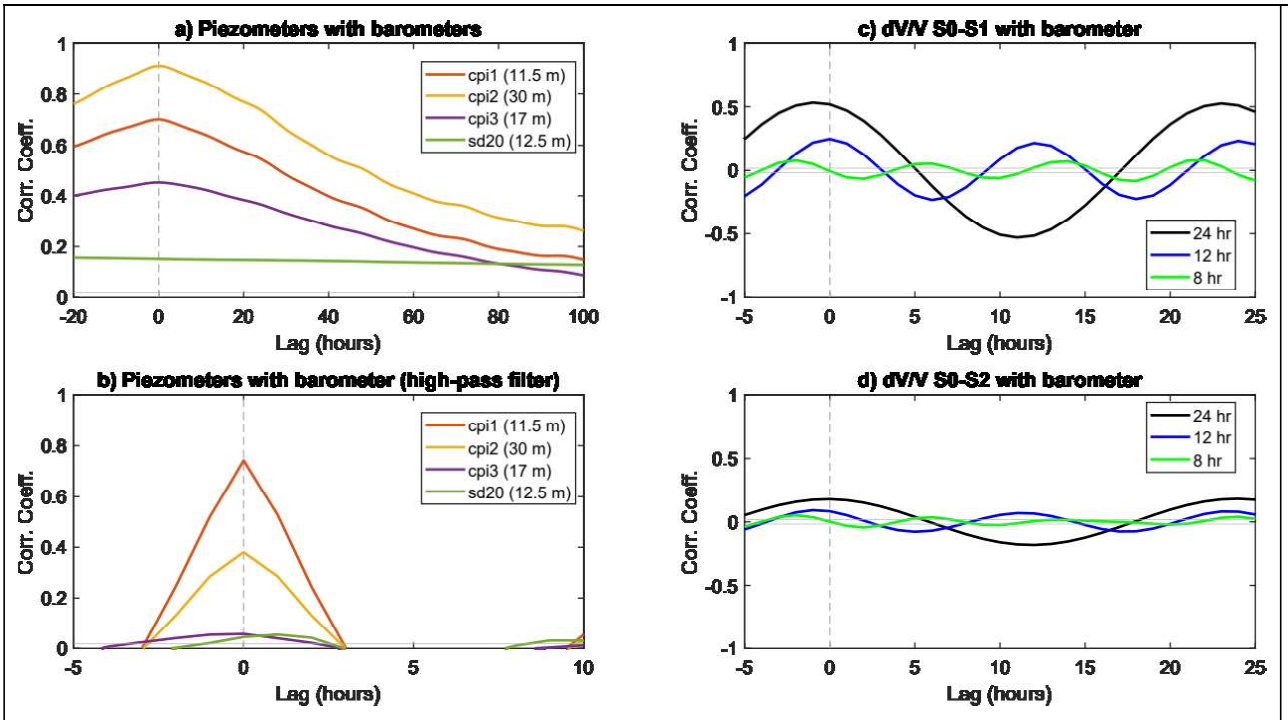


Illustration 31 : Inter-corrélations entre la pression atmosphérique et, à gauche, la pression interstitielle, au centre, le dV/V S0-S1 et, à droite, le dV/V S0-S2. Le dV/V présenté est dans la bande 5-20 Hz.

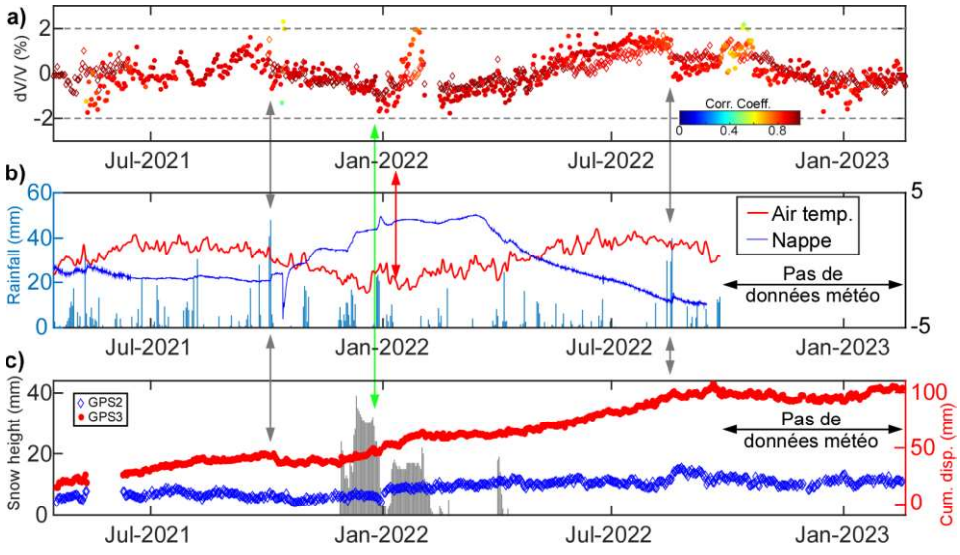
L'illustration 32 synthétise la relation entre, d'une part, les séries temporelles de *dV/V* pour les deux couples de stations (32a) et, d'autre part, les paramètres environnementaux (pluie, température, neige, pression interstitielle à 12,5 m de profondeur - Illustrations 32b et 32c) et les déplacements de surface (32c). Dans une optique de comparaison des tendances, les courbes de température et de pression interstitielle ont été centrées puis réduites et n'ont donc pas d'unité (elles sont bornées entre -5 et 5 sur l'illustration). Il existe une variation annuelle du *dV/V* qui correspond aux cycles saisonniers.

Cette variation de *dV/V* pourrait être contrôlée par la variation de la température de l'air qui entraîne une propagation de la vague thermique dans le sous-sol avec une action sur la densité et la rigidité du matériau *via* l'action thermique sur la teneur en eau du milieu. Le *dV/V* montre une corrélation positive avec la température et un *lag* de quelques dizaines de jours, ce qui correspond à des observations déjà effectuées sur de nombreux glissements de terrain. Ces mêmes courbes de *dV/V* apparaissent également corrélées négativement avec la pression interstitielle à l'échelle annuelle, ce qui suggère qu'une baisse du toit de la nappe entraîne une augmentation du *dV/V* (et vice versa). Ces variations s'expliquent par des variations de densité du matériau ausculté en fonction des changements de teneur en eau reliés au battement de la nappe.

Des observations similaires ont déjà été faites, sur des glissements de terrain (Voisin *et al*. 2016) ou bien pour des études hydrogéologiques comme sur le champ captant de Lyon (Gaubert-Bastide *et al*. 2022). Toutefois, il n'existe pas encore de travaux qui ont cherché à déconvoluer les courbes de *dV/V* des forçages thermiques et de teneur en eau. Les données disponibles dans le cadre de ce projet sont importantes puisqu'elles permettent de disposer de ces deux paramètres, ce qui reste rare pour les glissements de terrain. Elles permettront d'envisager des travaux à venir pour tenter de séparer ces deux effets de la réponse sismologique.

À plus courte échelle de temps, la figure montre également l'effet de différents forçages sur la réponse sismologique. Les flèches grises montrent l'effet de précipitations marquées, notamment mi-août 2022 (100 mm de pluie en 5 jours) avec une baisse du *dV/V* (-1,7 % et -1 %, pour s0-s2 et s0-s1 respectivement) survenue le dernier jour de forte pluie (40 mm). Une accélération des stations GPS est également visible et plus marquée sur GPS2.

La flèche verte montre l'effet d'un réchauffement rapide en hiver (de 6,6 °C à 1,6 °C entre le 22 et 23 décembre 2021) accompagné d'une fonte rapide du manteau neigeux (30 cm). L'infiltration rapide d'eau dans le sous-sol a entraîné une diminution concomitante du *dV/V* (-1%) de même qu'une légère accélération des déplacements. Très rapidement après cet événement, les températures sont devenues négatives à partir du 05 janvier 2022 (de 8 à 5 °C en quelques jours) et ont entraîné une augmentation de la rigidité des couches les plus superficielles. Ceci est illustré par l'augmentation importante du *dV/V* des deux couples de stations (1.5 % pour s0-s2 et 3,5 % pour s0-s1). L'augmentation plus importante pour s0-s1 est probablement à rapprocher d'un milieu plus fissuré, à plus grande porosité et perméabilité, et où la quantité de glace est plus importante.



Source : Isterre

*Illustration 32 : Comparaison des séries temporelles quotidiennes de **a)** dV/V dans la bande 05-20 Hz des stations s0-s1 (disques) et s0-s2 (losanges) avec **b)** les précipitations, la température (centrée-réduite), la pression interstitielle (centrée réduite) dans sd20 et **c)** la hauteur de neige et les déplacements cumulés des stations GPS2 et GPS3. Les données météorologiques sont quotidiennes et proviennent de Météo France (station de La Mure radome). La signification des flèches de couleur est détaillée dans le corps du texte.*

3.6 Résultats des levés scan laser

3.6.1 Description du matériel

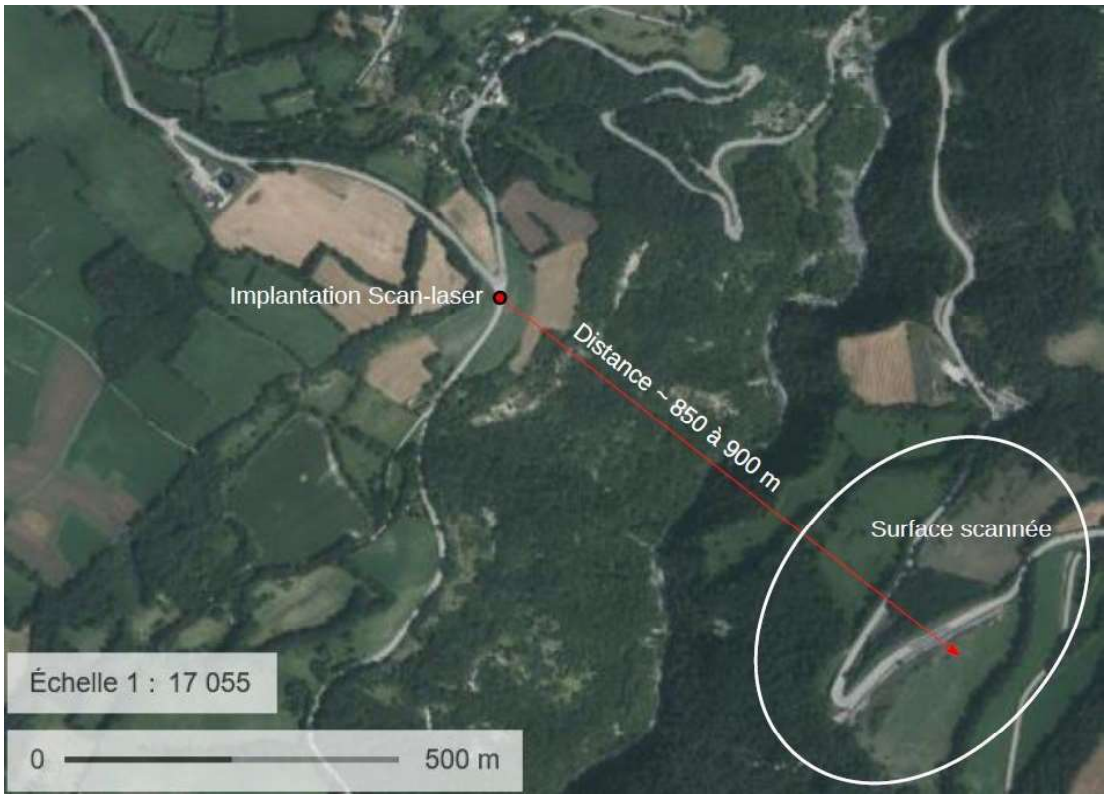
Une expérimentation du suivi du glissement de Charlaix au moyen de nuages de points a été menée à partir de deux acquisitions de modèles 3D réalisées à un an d'intervalle afin d'essayer de détecter des mouvements dans la zone de glissement connue de l'ordre du centimètre. Les levés ont été effectués en août 2021 et en octobre 2022 avec un scan-laser "longue portée" de type Riegl VZ-2000i®.

Tableau n°4 : Caractéristiques du scan-laser

Appareil	*Taille du faisceau laser*	*Précision*	*Fréquence d'acquisition*	*Résolution angulaire*
RIEGL VZ-2000I	27 mm à 100 m	3 mm à 100 m	50, 100, 300, 600 ou 1200 kHz	0,0007° à 0,6° en vertical 0,0015° à 0,62° en horizontal

L'appareil utilisé pour cette expérimentation permet d'acquérir des points jusqu'à 2500 mètres en fonction du pouvoir réfléchissant de la surface visée et propose des capacités multi-échos, c'est-à-dire que plusieurs échos peuvent être enregistrés pour une impulsion laser.

3.6.2 Acquisition des nuages de points



Source : Cerema

Illustration 33 : Localisation et implantation du point d'acquisition

Le scan-laser a été implanté sur le versant opposé, en rive droite de la Bonne, à l'intersection de la RN85 et de la RD526. Le point de mesure est à une distance de 850 à 900 m de la zone de glissement et à une altitude de 740 m NGF afin d'avoir une vue d'ensemble du site et sans végétation (rangées d'arbres) qui pourrait occulter le balayage de la zone d'étude.

Tableau n°5 : Caractéristiques des nuages de points

Date	***12 août 2021***	***3 octobre 2022***
Nom du nuage	N1a	N1b
Nombre de points	10,3 M	6,8 M

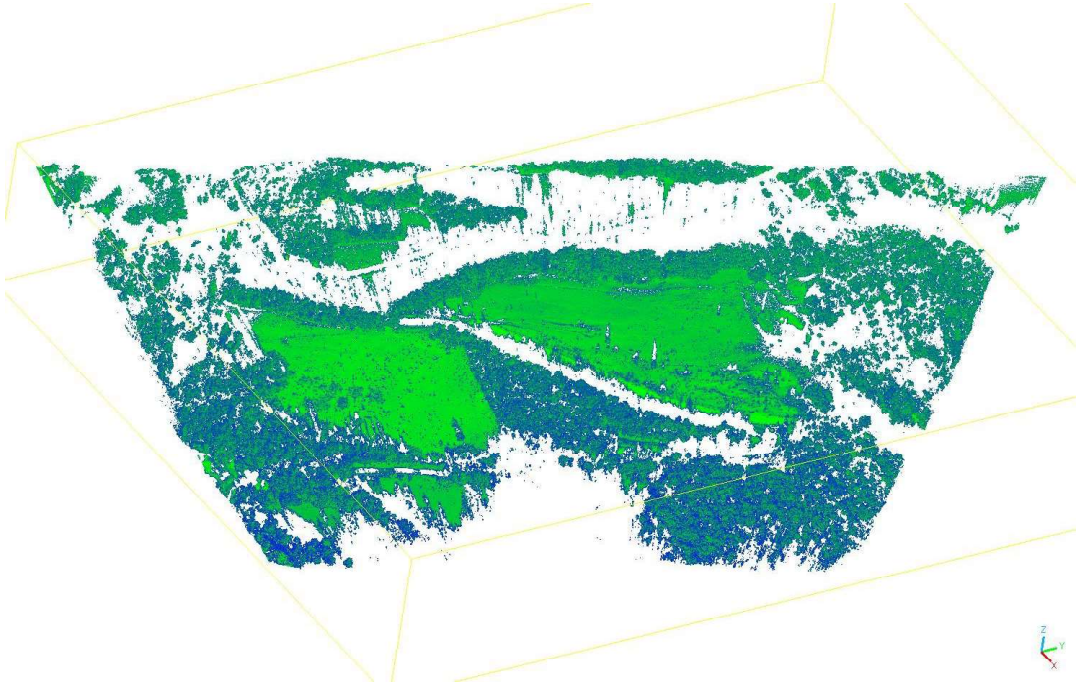


Illustration 34a : Nuage de points N1a réalisé le 12 août 2021

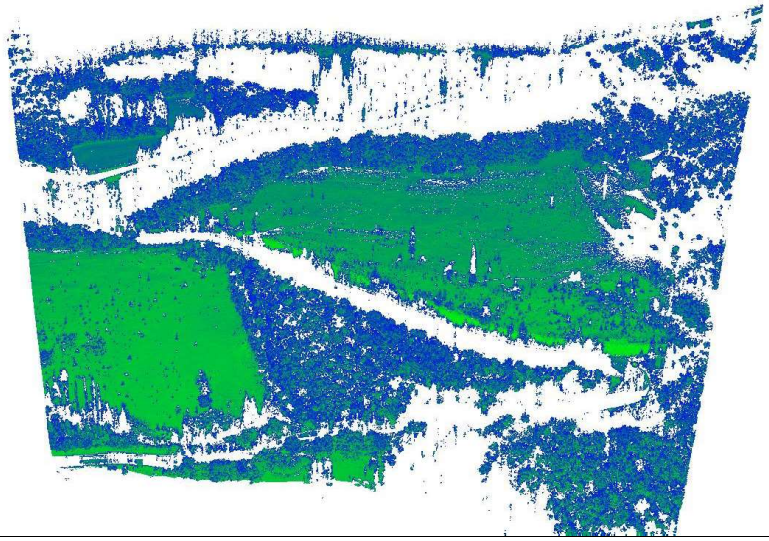


Illustration 34b : Nuage de points N1b réalisé le 3 octobre 2022

Illustration 34 : Nuages de points bruts N1a et N1b

Source : Cerema

3.6.3 Méthode générale d'analyse diachronique

D'une façon générale, le traitement des nuages de points à partir de modèles 3D pour la réalisation d'une étude diachronique d'un site requiert trois étapes :

- le nettoyage de la végétation également appelé déforestation virtuelle ;
- le recalage des modèles entre les deux dates à partir de points ou zones supposées fixes ;
- la comparaison des modèles 3D recalés pour détecter et quantifier les modifications entre les deux nuages de points.

L'analyse, le traitement et l'interprétation des résultats ont été menés avec le logiciel *CloudCompare* (Giradeau-Montaut, 2019).

Pour cette expérimentation, la première étape (nettoyage de la végétation) n'a pas été effectuée par choix car le site du glissement est essentiellement un site de prairie. Le nettoyage de la végétation aurait conduit à la suppression des points sur la zone d'étude (zone supposée stable et zone du glissement) et n'aurait pas permis la réalisation des autres étapes de traitement.

3.6.3.1 *Recalage des nuages de points*

Le recalage des deux nuages de points vise à replacer ces nuages dans la même géométrie afin que les zones stables (donc inchangées) se superposent et qu'il soit possible d'identifier les zones modifiées (instables dans notre cas). Dans notre contexte, le recalage des scènes doit se faire sur les parties du site supposées stables.

Le recalage est une transformation rigide entre les deux nuages et est la composée d'une rotation et d'une translation. Un nuage est pris comme référence (N1a) et le deuxième (N1b) est celui que l'on recale.

La démarche de recalage se base sur deux étapes après sélection dans les deux nuages des zones stables :

- un recalage grossier en sélectionnant des points manuellement qui sont les mêmes entre nuages (au moins 3) ;
- un recalage fin automatique à partir des positions proches des nuages obtenues après le recalage grossier. La méthode de recalage retenue dans notre cas est la méthode ICP (Besl and McKay, 1992) qui permet de minimiser la distance entre les deux nuages.

La transformation géométrique déduite grâce à la superposition des zones stables est ensuite appliquée à l'ensemble du nuage recalé.

3.6.3.2 *Comparaison des nuages de points : détection et quantification des modifications*

La comparaison entre les deux nuages de points recalés est réalisée à l'aide du calcul d'une distance entre les nuages. Trois définitions de distance entre nuages sont implémentées dans *CloudCompare* :

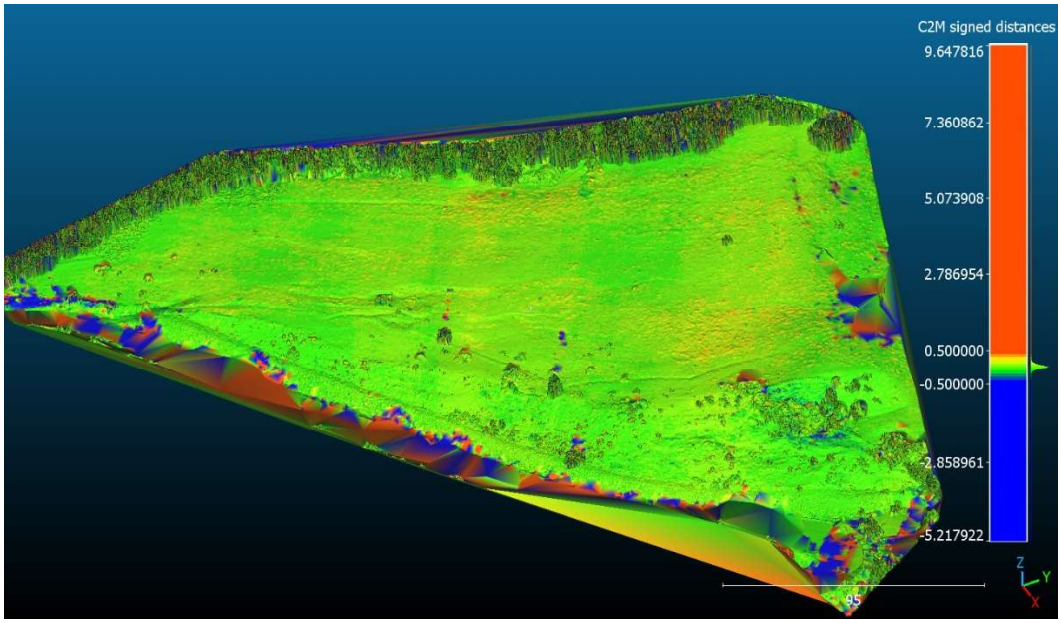
- ***distance nuage-nuage*** (dC2C – Cloud to Cloud) : pour chaque point du nuage comparé, le point du nuage de référence est recherché et la distance euclidienne est calculée entre les deux points ;
- ***distance nuage-maillage*** (dC2M – Cloud to Mesh) : pour chaque point du nuage comparé, la plus petite distance entre ce point et les facettes du maillage du nuage de référence est calculée (la distance est calculée selon la direction de la normale à la facette) ;
- ***distance M3C2*** (dM3C2, Lague *et al*, 2013) dans le plug-in M3C2 de Cloud-Compare. La logique de cet algorithme est de lisser le calcul des normales des facettes sur un voisinage autour de chaque facette de façon à obtenir des valeurs de distances entre nuages plus continues. La distance M3C2 est alors calculée entre le point du nuage comparé et la facette la plus proche selon la direction de la normale lissée.

Dans le cadre de notre expérimentation, c'est la méthode de la distance nuage-maillage (dC2M) qui a été retenue puisqu'elle est indépendante de la résolution d'acquisition (contrairement à dC2C) et que le

calcul est plus rapide qu'avec la dM3C2. Par ailleurs, la définition de distance dC2M est suffisante pour le niveau de déformation attendu.

3.6.4 Analyse et interprétation

La distance C2M est la distance utilisée pour la comparaison des deux nuages recalés. La distance calculée entre les deux nuages N1a et N1b recalés est représentée en tous les points du nuage N1b (illustration 35). Les valeurs obtenues sont comprises entre -5,2 et +9,6 m. Le centre de la distribution des distances permet de montrer une distribution centrée sur 0 (illustration 36) ce qui permet de vérifier la pertinence du recalage effectué. Des valeurs extrêmes de distances sont obtenues en limite de notre zone scannée et au niveau de la végétation c'est pourquoi nous filtrons les points avec des distances élevées.



Source : Cerema

Illustration 35 : Résultats des calculs de la distance nuage-maillage (dC2M)

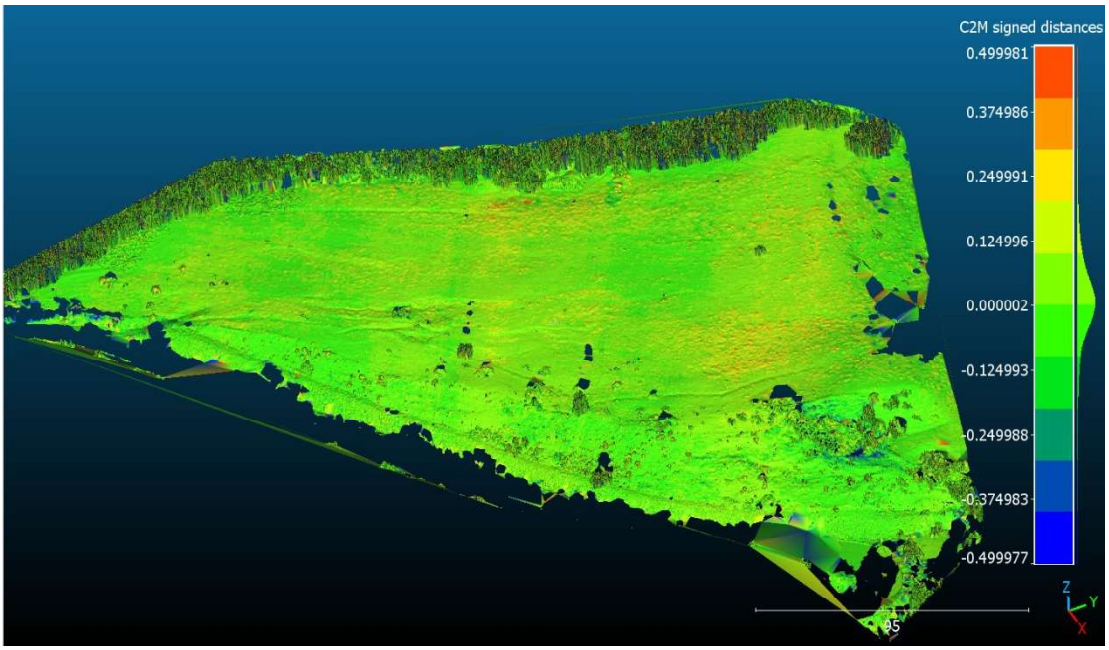


Source : Cerema

Illustration 36 : Zoom sur le centre de distribution des distances C2M

Pour la suite de l'analyse, on recentre la distribution des points ayant une distance C2M comprise entre -0,5 et +0,5 m. Le résultat est représenté sur l'illustration 37 Le résultat montre que l'on mesure en surface des déformations locales comprises entre -12 et +12 cm (en vert), sur l'ensemble du site. Ces valeurs de déformations ne sont pas à l'échelle des déplacements en surface mesurés sur les inclinomètres ou les données GPS, plutôt de l'ordre de 2 à 5 cm/an.

Certaines zones apparaissent dans les teintes jaunes à rouge-orangées, caractérisant des déplacements compris entre 12 et 50 cm. Ces valeurs ne sont pas caractéristiques de déplacements ou de mouvements en surface. Toutefois, pour la zone en partie haute et centrée de la figure 20, cette zone est constituée en 2022 d'une végétation plus dense et plus haute que sur l'ensemble du site, soumise à une arrivée d'eau continue provenant de l'alimentation d'un abreuvoir qui coule en quasi permanence sur la période 2022.



Source : Cerema

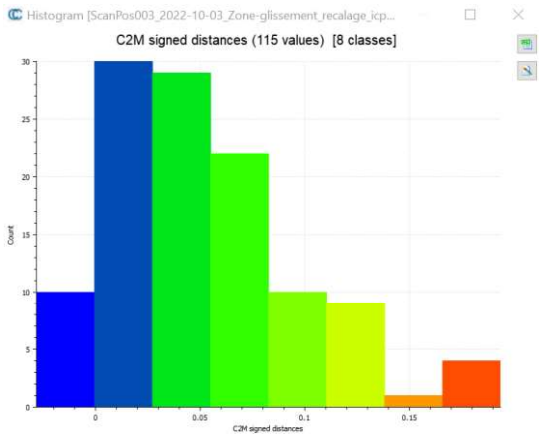
Illustration 37 : Résultats des calculs de la distance nuage-maillage (dC2M)

3.6.5 Conclusions

L'analyse des deux nuages réalisés à 14 mois d'intervalle, après recalage, ne permet pas de mesurer des déplacements de surface en corrélation avec ceux mesurés par inclinométrie ou GPS. Plusieurs explications peuvent être avancées :

- pas de dévégétalisation des deux nuages afin d'avoir suffisamment de points. Étant dans un contexte de prairie, si les nuages sont dévégétalisés, il n'y a plus assez de points pour les autres étapes de l'analyse (recalage et calcul des distances) ;
- difficultés de recalage des nuages en raison de la difficulté à trouver dans la partie scannée une zone stable ;
- une distance de balayage de 850 à 900 m. La précision donnée par le constructeur du scanner est de 3 mm à 100 m, soit pour des distances supérieures à 250 m, une précision de l'ordre du centimètre au niveau de la définition du nuage de points. Ce qui fait dans notre cas, avec une distance de mesure entre 850 et 900 m, une définition des nuages de points de l'ordre des déplacements recherchés. Un essai depuis la RN85, branche amont du lacet a été réalisé mais qui n'a pas été concluant ; la position de mesure en contre-bas du versant ne permettait pas de balayer l'ensemble du versant instable.

Toutefois, en zoomant sur la zone où sont implantés les inclinomètres I4 et I8 (voir implantation au §3.1.4), l'histogramme de répartition des distances C2M (Illustration 38) montre une répartition des déplacements autour de 5 cm (0,05 m) proche de ce qui est observé sur site où la végétation est moins marquée (zone piétinée). Cela permet d'envisager une poursuite des expérimentations sur l'utilisation des scanners laser 3D pour l'étude des glissements lents enherbés. Sur ce site, une poursuite de ces mesures sur un plus grand nombre d'années pourrait d'ailleurs permettre d'obtenir des résultats plus probants du fait de la plus grande amplitude des mouvements de terrain cumulés.



Source : Cerema

Illustration 38 : Histogramme de répartition des distances C2M zoomé sur la zone de I4 et I8

3.7 Analyses d'images satellites

Les traitements par interférométrie radar permettent de rendre compte de mouvements de tassement de l'ordre de quelques mm par an en zone urbanisée comme par exemple, le suivi de la construction de réseau de transport souterrain ou la subsidence de grandes villes. L'objet de cette expérimentation est de transposer cette méthodologie au suivi des zones naturelles, qui s'avère cependant plus complexe en l'absence (ou en présence d'un moins grand nombre) de réflecteurs sur site.

Dans ce contexte et pour une application pour le suivi à long terme du glissement de Charlaix, nous avons essayé d'évaluer les conditions d'applicabilité de ces traitements d'interférométrie radar. La topographie, l'orientation et le niveau de végétalisation du site affecté par un mouvement, l'orbite, la résolution et la bande du satellite sont des paramètres à analyser. Le travail vise alors à définir dans quelles conditions l'approche par interférométrie est une ressource pertinente et, à l'inverse, quand cette approche n'est pas appropriée vis-à-vis d'un suivi de mouvement de terrain.

L'enjeu est de confronter les résultats fournis par l'interférométrie radar avec des mesures de déformations / déplacements in-situ ou à distance : inclinométrie, suivi de points topométriques ou GPS.

Deux approches successives ont été menées.

3.7.1 L'approche DinSAR

Une première méthode ou approche a été expérimentée, il s'agit de la technique ou approche SAR interférométrique différentielle conventionnelle (appelée DinSAR).

Les images satellites radar fournissent deux informations pour chaque pixel :

- l'amplitude ;
- la phase.

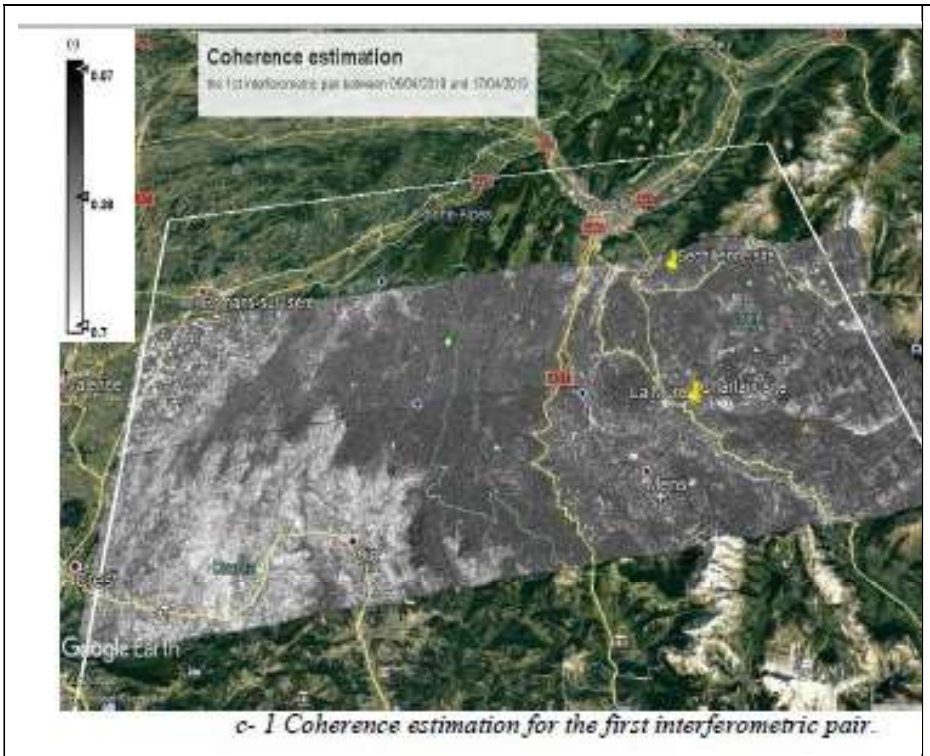
L'interférométrie radar s'intéresse à la phase afin d'obtenir des résultats quantifiés et précis de mouvement. Plus particulièrement, par cette approche, on effectue une différence entre les phases des deux images qui, en l'absence de bruit, pourrait être directement convertie en variation de distance dans la direction de visée. Cependant, il existe différentes sources de bruit :

- la variation de position du satellite entre les deux acquisitions ;
- les variations atmosphériques ;
- la variation de l'état de surface ;
- et le bruit de mesure.

Le traitement vise donc à quantifier et filtrer ces différentes composantes pour accéder à la composante liée à la déformation dans la direction de visée. L'outil utilisé est SNAP, la chaîne de traitement mise à disposition par l'agence européenne (https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/).

Le traitement interférométrique par différence de phase a été réalisé sur deux images espacées du temps de revisite du satellite soit 12 jours. L'image sur laquelle le traitement est effectué est beaucoup plus large que la seule zone du site de Charlaix. L'effet d'échelle peut donc avoir un impact sur les résultats du traitement des images.

Les résultats obtenus sont très bruités (Illustration 39) : on ne distingue pas les zones stables des zones instables. Ceci est principalement dû aux variations de l'état naturel des surfaces visibles sur ces images, phénomène de décorrélation de phase. Les zones couvertes de végétation (herbes ou arbres) évoluent entre les deux acquisitions. Le même travail a alors été réalisé sur une série de 6 images espacées chacune de 12 jours. Les images de différence de phase ont été moyennées entre elles et une partie du bruit est retirée. Les zones urbaines sont stables mais le caractère instable du site d'étude n'est pas détectable ; le niveau de bruit sur les zones naturelles restant trop élevé. Ceci est dû au fait qu'il y a toujours une perte de cohérence suite aux variations d'état de surface. Cette approche générale par interférométrie radar ne permet donc pas d'identifier les zones instables en milieu naturel et de les suivre dans le temps.



Source : Cerema

Illustration 39 : Estimation de la cohérence sur la première paire d'images

3.7.2 L'approche PSInSAR

Dans un second temps, suite aux résultats obtenus par interférométrie radar, une deuxième approche de traitement de séries chronologiques d'images a été investiguée : l'approche PSInSAR. Cela consiste à réaliser une étude de certains points de l'image appelés diffuseurs permanents (PS, persistent scatter).

Plusieurs méthodes existent dans la littérature et diffèrent les unes des autres par les critères de sélection des points, en particulier, différents critères basés sur l'amplitude ou la phase. Il a donc été retenu dans le cadre de cette expérimentation, la méthode SARPROZ. Cette méthode a été choisie par le fait qu'elle est implémentée avec une interface ergonomique sous Windows. D'autres méthodes,

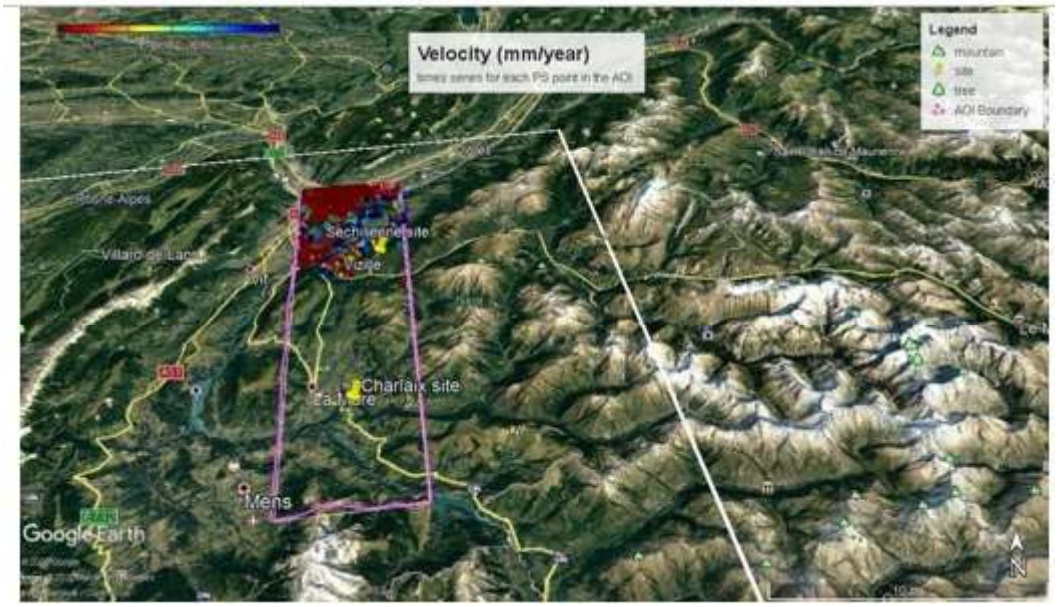
comme STAMPS ou SBAS, nécessitent une installation sous Linux d'outils gratuits mais plus complexes et le temps alloué à cette partie de l'étude ne permettait pas d'utiliser ces outils.

Le traitement par la méthode SARPROZ a été réalisé sur une série de 16 images à raison d'une image tous les 12 jours. Le critère de sélection des points implémenté dans SARPROZ est un critère de valeur élevée et de stabilité de l'amplitude. Les corrections atmosphériques et de position de satellite sont réalisées à partir d'un point défini comme stable dans le temps. Les résultats obtenus (Illustration 30) montrent une densité forte de points au niveau des zones urbanisées et très faible au niveau des zones naturelles. Aucun point au niveau du glissement de Charlaix n'a été détecté.

3.7.3 Résultats et conclusion

Les résultats obtenus avec les traitements par interférométrie radar DinSAR et avec la méthode SARPROZ (approche PSInSAR) ne permettent pas d'identifier les zones en mouvement dans les zones naturelles comme le glissement de Charlaix. Ils sont toutefois riches en enseignements et permettent d'envisager d'autres études de cas. Cette expérimentation a permis d'en retirer les enseignements suivants :

- les algorithmes de base de l'interférométrie radar ne fournissent pas de résultats pertinents sur des zones naturelles et de montagne. Il faudrait, par exemple, déployer des outils plus spécifiques (réflecteurs sur le terrain étudié) et plus complexes (algorithmes plus élaborés) ;
- il faut travailler avec un nombre conséquent d'images (20-25 images au minimum), ce qui nécessite une certaine puissance de calcul de l'ordinateur utilisé et un temps de traitement conséquent ;
- les algorithmes de sélection des points font que l'on ne maîtrise pas la localisation des points au sein des zones, mais qu'on la subit. Contrairement à l'instrumentation in-situ où on cible les zones les plus pertinentes à instrumenter, dans les approches PSInSAR, on ne connait pas les points de suivi. On en a connaissance à la fin du traitement.



Source : Cerema

Illustration 40 : Points obtenus sur la zone d'étude par la méthode SARPROZ

4 SITE N°2 – QUET-EN-BEAUMONT

4.1 Présentation du site

4.1.1 Historique et connaissances préalables

Les glissements de terrains à Quet-en-Beaumont concernent une grande partie de la superficie de la commune. Ces glissements sont connus de façon historique, en particulier dans la partie ouest de la commune, non habitée actuellement. On répertorie à ce jour quatre zones distinctes principales :

- la Combe de Savaux – Le Cros, zone la plus active avec une succession de glissements régressifs historiques au sein des formations quaternaires, ayant causé la destruction du hameau du Cros (vers 1650 et 1890) ;
- les Buissonnats avec un glissement régressif au sein des formations quaternaires ;
- le lotissement EDF qui concerne des glissements à l'interface substratum/argile ;
- le village impacté par des glissements lents au sein des formations quaternaires qui se traduisent par des dommages mineurs sur le bâti. Certaines constructions sont pluri-centenaires (fin du 18e siècle pour certaines habitations de Quet-le-Haut).

Dans l'historique récent, la commune a particulièrement été touchée en 1994-1995 suite aux conditions météorologiques très défavorables qui ont affectées la région et qui ont réactivé ou accéléré l'ensemble des zones de glissement créant de nouveaux dommages.

Le glissement au sein du village est suivi de façon régulière par le service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM) depuis 1995, date des derniers mouvements de grande ampleur. Les services du RTM réalisent un suivi des mouvements (observation des déplacements par inclinométrie et GPS) ainsi qu'un appui et un suivi des travaux (drainages particulièrement) réalisés par la commune.

La RN85 est également impactée, au sommet du glissement, entre les PR 93+500 et 93+800. Les désordres au niveau de la RN85 sont également connus de longue date : ils sont particulièrement constants, l'enrobé devant être refait tous les ans. Le CETE de Lyon, puis le Cerema, sont intervenus plusieurs fois sur ce site depuis septembre 2013.

4.1.2 Contexte géologique et hydrogéologique

Le site de Quet-en-Beaumont est situé sur le flanc sud-ouest du Mont Chauvet qui est constitué de formations jurassiques calcaires plissées dans deux directions successives. Ces plissements résultent en une forme en dôme de la montagne. Les pendages des couches sont relativement conformes à la pente, avec des valeurs variant de 35 à 60 degrés vers le sud-ouest.

Au niveau de la commune, le Drac a creusé plusieurs lits dans le substratum calcaire, avant le lit actuel. L'axe d'un des plus anciens lits se situe sous le hameau du « Bas-Quet ».

La profondeur précise du substratum sous les zones habitées de la commune n'est pas reconnue et peut être très importante. Au sud de Quet-en-Beaumont, au niveau du Drac, le substratum affleure aux environs de 680 m NGF. Il affleure également à l'est du hameau.

D'un point de vue hydrologique, la forme en combe de Quet-en-Beaumont constitue un axe Nord-Sud concentrant les venues d'eau.

Des mesures de résistivité réalisées sur différentes sources dans l'étude de la SAGE de 1992 ont permis d'identifier l'origine des différentes venues d'eau sur le site :

- des sources présentes à l'amont de la RN85, au sein de formations de pente (signature de résistivité de 35-40 ohm.m^{-1}) ;
- des sources permanentes, plus diffuses, reconnues à partir de 850 m NGF (signature de résistivité de 15-20 ohm.m^{-1}). Aucune source permanente n'a été relevée entre la RN et cette altitude soit entre 905 et 850 m NGF.

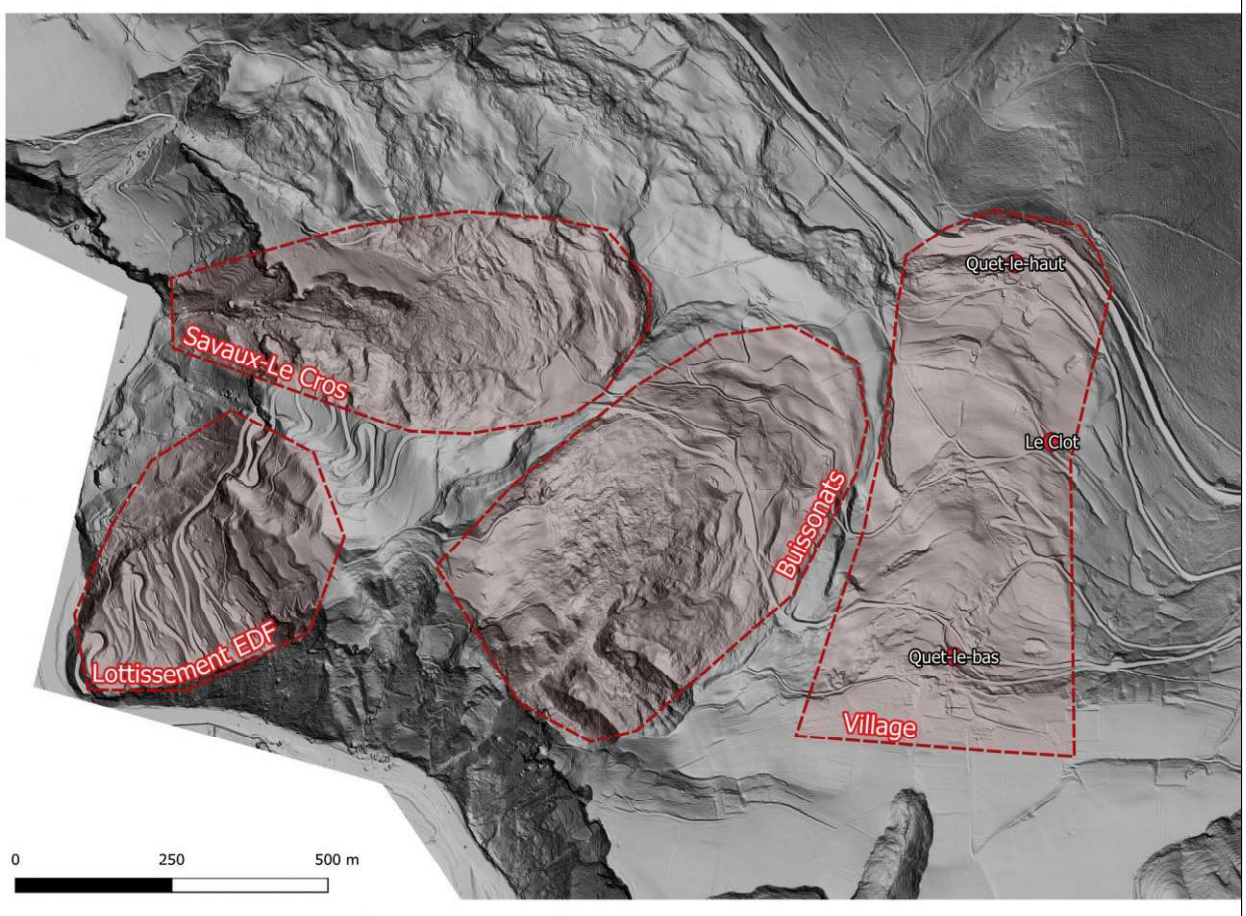
4.1.3 Géomorphologie et mouvements de terrain

Les terrains concernés par les différents glissements affectant la commune sont des terrains déposés au quaternaire, en particulier au cours de la période du Würm II (de 71 000 à 57 000 ans AP). Au-dessus du substratum, les alluvions du Drac forment la terrasse du Bas-Quet (Plaine du Plat) jusque vers l'altitude 725 m NGF. Lors du Würm II, Quet, comme l'ensemble du Beaumont, était un lac glaciaire dont le niveau maximal de remplissage était compris entre 870 et 920 m NGF.

Les dépôts correspondants sont composés d'une succession d'argiles litées sableuses et de niveaux plus grossiers, particulièrement au sommet. La position du site, en bord de pente, peut également se traduire par des perturbations de la séquence de dépôt glacio-lacustre qui se caractérisent par des apports plus grossiers (éboulis, colluvions).

Les terrains quaternaires ont été fortement modifiés par l'érosion (cours actuel du Drac), par des glissements de terrain, ainsi que par des apports d'éboulis depuis le Mont Chauvet, remaniant et ravinant parfois les dépôts glaciaires. Le bas du village (Quet-le-bas) est ainsi construit sur un cône de déjection d'une surface d'environ 10 ha. Les dépôts actuellement en place peuvent donc présenter des épaisseurs et des faciès variables.

Les trois zones les plus actives sont situées au niveau de la RN85 et de Quet-le-Haut, d'une zone centrale vers Le Clot, et au sein de Quet-le-Bas. Un extrait du relevé Lidar réalisé en octobre 2020 dans le cadre du projet est présenté ci-dessous.



Source : Sintégra / Cerema

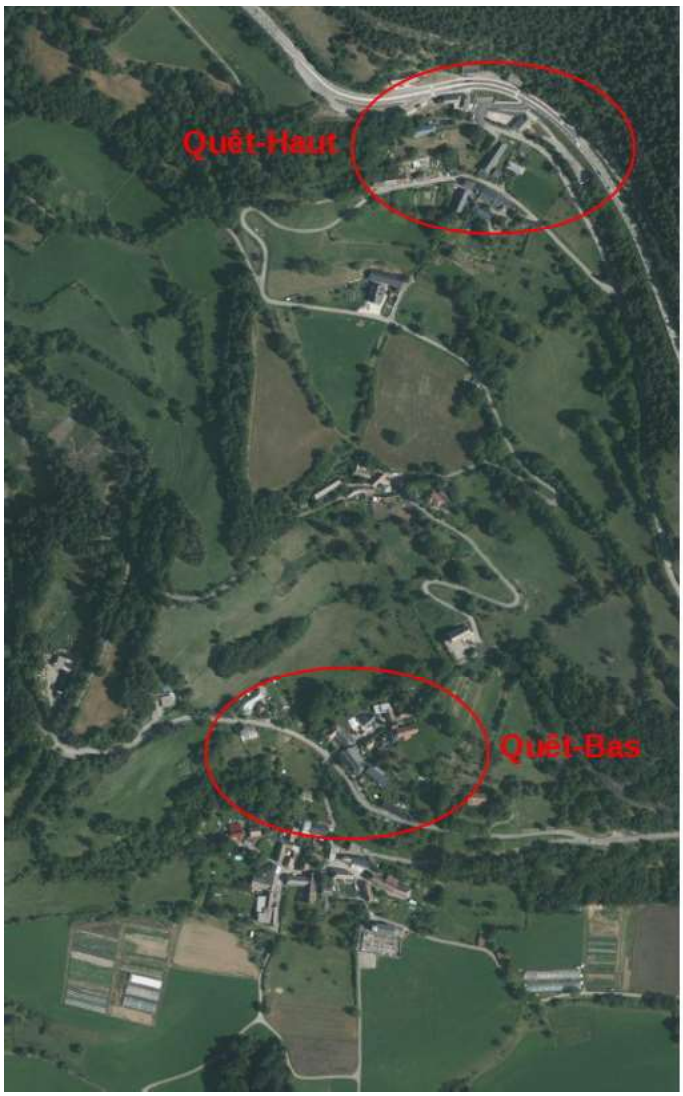
Illustration 41 : Extrait du relevé Lidar sur la commune de Quet-en-Beaumont

Au niveau de la RN85, les dégradations sont observées continuellement. Leur localisation varie très peu, mais leur amplitude est variable chaque année, a priori en fonction de la pluviométrie ; la couche d'enrobé étant reprise généralement tous les ans à cet endroit (5 cm d'affaissement). À l'amont, aucun

glissement de terrain majeur n'est observé et la pente est relativement raide. C'est ce dernier glissement qui fait l'objet de l'instrumentation présentée dans les paragraphes suivants.

4.1.4 Dispositif d'instrumentation

L'instrumentation en place sur la commune de Quet-en-Beaumont se répartit comme suit :







Source : www.géoportail.fr

Illustration 42 : Implantation du dispositif d'instrumentation de Quet-en-Beaumont

Tableau n°4 : Récapitulatif du dispositif d'instrumentation

Nom	Localisation	Type d'instrumentation	Profondeur	Date
I1	RN85 Quet-le-Haut	Inclinomètre	30,0 m	2018
Pz1	RN85 Quet-le-Haut	Piézomètre ouvert	25,5 m	2018
I2	Canal du Beaumont - Quet-le-Haut	Inclinomètre	35,0 m	2018
Pz2	Bordure route communale - Quet-le-Haut	Piézomètre ouvert	25,0 m	2018
CPI1	Canal du Beaumont - Quet-le-Haut	Piézomètre fermé (CPI)	21,5 m	2018
$I3_{RTM}$	Quet-le-Bas	Inclinomètre	45,0 m	2001
Pz_{RTM}	Canal du Beaumont - Quet-le-Haut	Piézomètre ouvert	20,0 m	1995

4.2 Résultats des mesures de niveaux d'eau

4.2.1 Présentation des mesures

4.2.1.1 *Quet-le-Haut – RN85*

Les niveaux d'eau (N.E.) mesurés manuellement (sonde à eau) dans le piézomètre PZ1 sont compris entre 21,2 et 25,5 m de profondeur (884,7 à 880,4 m NGF), ce qui correspond aux terrains limono-sableux glaciaires. Depuis septembre 2020, plusieurs relevés ont montré un piézomètre sec (N.E. = 880,4 NGF).

Tableau n°5 : Récapitulatif des relevés piézométriques Pz1

Date	Niveau d'eau (N.E.)	
	Profondeur (m)	Cote NGF
21/06/2018	21,5	884,4
24/07/2018	22,8	883,1
13/12/2018	22,6	883,3
02/04/2019	21,7	884,2
10/07/2019	23,1	882,8
02/10/2019	23,1	882,8
21/01/2020	21,9	884
08/06/2020	21,2	884,7
22/09/2020	25,5	880,4 (sec)
14/01/2021	22,8	883,1
24/03/2021	22,6	883,3
15/06/2021	22,4	883,5
07/09/2021	22,8	883,1
23/03/2022	25,5	880,4 (sec)
14/09/2022	25,5	880,4 (sec)

4.2.1.2 *Zone du canal du Beaumont*

La cellule de pression interstitielle (CPI1) a été positionnée juste au-dessus de la couche d'argile grise lacustre à 21,5 m de profondeur. L'analyse des données horaires relevées par la CPI permet d'avoir une vision précise des variations de niveau (voir graphiques en annexe).

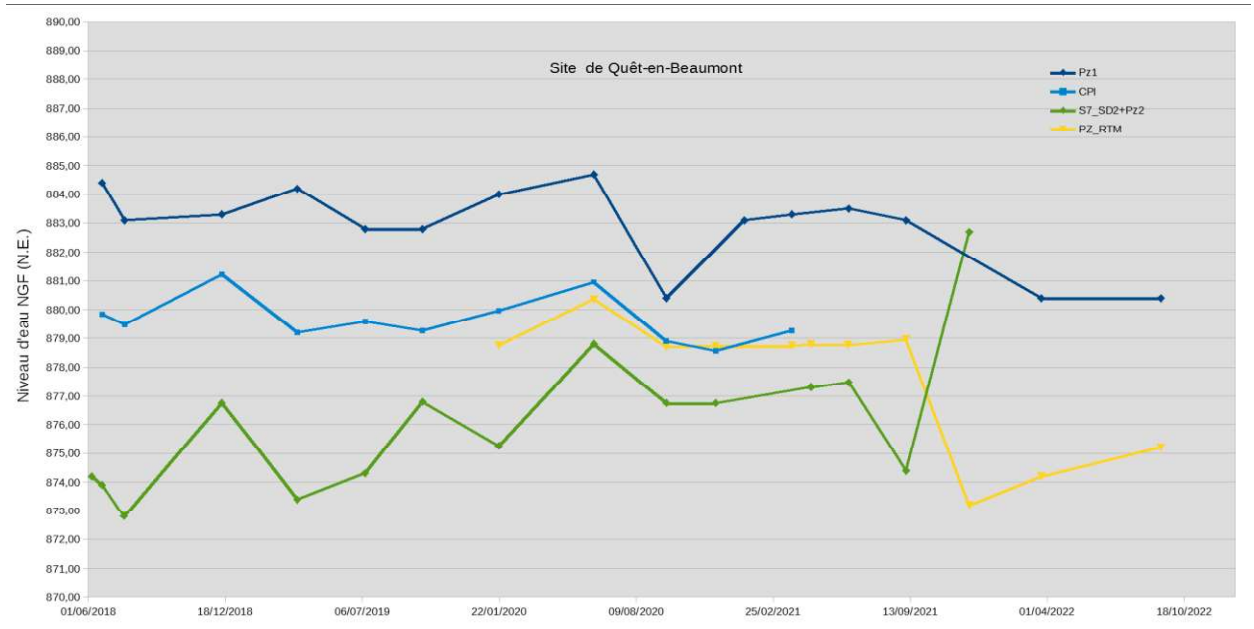
Le niveau maximal observé (fin octobre 2020) est à 11,5 m de profondeur (883,5 m NGF) et le minimum autour de 16,2 m (878,8 m NGF). Cela correspond aux terrains glaciaires graveleux à matrice limoneuse ou sableuse.

Les niveaux d'eau relevés manuellement dans Pz2 évoluent entre 18,5 m (juin 2020) et 24.5 m de profondeur (piézomètre sec en juillet 2018), soit entre 878,8 et 872,8 m NGF, sous une couche argileuse. Les variations ne sont pas toujours cohérentes avec les saisons, ou avec les variations observées sur les autres piézomètres. D'autre part, le niveau global moyen semble augmenter avec le temps.

Tableau n°6 : Récapitulatif des relevés piézométriques Pz2, PzRTM et CPI

Date	Pz2 - Niveau d'eau (N.E.)		PzRTM - Niveau d'eau (N.E.)		CPI1 - Niveau d'eau (N.E.)	
	Profondeur (m)	Cote NGF	Profondeur (m)	Cote NGF	Profondeur (m)	Cote NGF
06/06/2018	23,10	874,20	-	-	-	-
21/0620/18	23,40	873,90	-	-	15,03	879,83
23/07/2018	sec	872,80	-	-	15,39	879,47
13/12/2018	20,55	876,75	-	-	13,64	881,22
02/04/2019	23,90	873,40	-	-	15,66	879,20
10/07/2019	22,99	874,31	-	-	15,28	879,58
02/10/2019	20,50	876,80	-	-	15,60	879,26
21/01/2020	22,05	875,25	16,20	878,75	14,90	879,96
08/06/2020	18,50	878,80	14,60	880,35	13,90	880,96
22/09/2020	20,55	876,75	16,25	878,70	15,95	878,91
03/12/2020	20,55	876,75	16,22	878,73	16,30	878,56
24/03/2021	-	-	16,21	878,74	15,60	879,20
21/04/2021	19,98	877,32	16,17	878,78	Sec	870,2
21/04/2021	20,00	877,30	16,19	878,76	Sec	870,2
15/06/2021	19,82	877,48	16,00	878,95	-	-
07/09/2021	22,90	874,40	21,30	873,20	-	-
08/12/2021	14,60	882,70	16,25	874,20	-	-
23/03/2022	-	-	16,25	875,20	-	-
14/09/2022	-	-	16,20	878,75	-	-

Les mesures dans le piézomètre PzRTM ont démarré à partir de janvier 2020.



Source : Cerema

Illustration 43 : Courbes piézométriques sur la commune de Quet-en-Beaumont

4.2.2 Synthèse des mesures piézométriques

Au niveau de Quet-le-Haut (Pz1), le niveau piézométrique varie relativement conformément aux saisons, avec un niveau plus haut au printemps et parfois en hiver.

Dans la zone du canal du Beaumont (CPI1 et PzRTM), le niveau reste toujours au-dessus d'une couche d'argile sableuse peu épaisse (878.1 à 877.8 m NGF), et bien au-dessus du niveau des argiles grises lacustres.

Les données de Pz2 sont difficiles à exploiter, d'autant que le niveau maximal atteint reste sous la cote du niveau minimal observé plus bas vers le canal. Ce piézomètre est peut-être situé plus dans l'axe de la combe de Quet-en-Beaumont. Il pourrait alors correspondre à un régime hydraulique différent des autres piézomètres ou à des circulations d'eau plus ponctuelles.

Comparés aux niveaux mesurés dans le piézomètre PzRTM à proximité, les niveaux d'eau mesurés par la CPI (voir annexe) sont cohérents. Cependant, la CPI montre des variations plus importantes et rapides, non détectées par les mesures manuelles instantanées. Ce type de mesure manuelle avec une fréquence trimestrielle ne permet donc pas d'avoir une vision complète des niveaux d'eau moyens et saisonniers à Quet-en-Beaumont. Cela est probablement valable aussi pour les autres piézomètres (Pz1 et Pz2).

Ainsi, suite à des épisodes pluvieux importants, on observe que le niveau d'eau augmente fortement (+3,8 m pour 55 mm de précipitations le 2 janvier 2020) et brusquement (pic atteint en 24 à 36 h).

Le drainage est moins rapide (de l'ordre de 1 m par 24 h sans nouvelle précipitation). La fonte des neiges du Mont Chauvet alimente également la nappe ce qui a pour effet de maintenir un niveau haut pendant plusieurs semaines. De manière générale, la corrélation entre les niveaux piézométriques relevés et les apports d'eau externes (pluviométrie, fonte des neiges) apparaît excellente.

La nappe est donc alimentée en permanence par le rocher, et les épisodes pluvieux viennent l'alimenter rapidement en percolant dans les formations d'éboulis et glaciaires recouvrant le versant sud du Mont Chauvet, avec des déphasages relativement courts (1 à 2 jours).

4.3 Résultats des mesures inclinométriques

La mesure zéro date de juillet 2018. Treize autres mesures ont été effectuées depuis, la dernière en septembre 2022. Les mesures sont effectuées tous les trois mois afin d'illustrer les saisonnalités. Cependant en 2020 les mesures ont été perturbées en raison du confinement sanitaire (pas de mesure au début du printemps). La mesure de décembre 2021 n'a également pu être réalisée en raison de l'enneigement de la RN85 et de l'impossibilité d'avoir une protection de la DIR Med pour intervenir sur la chaussée.

Le suivi inclinométrique du RTM (I3) à Quet-le-Bas a été repris en septembre 2021 par le Cerema dans le cadre du projet MLA3. La mesure zéro date de septembre 2001, et le suivi a été interrompu entre 2015 et 2021.

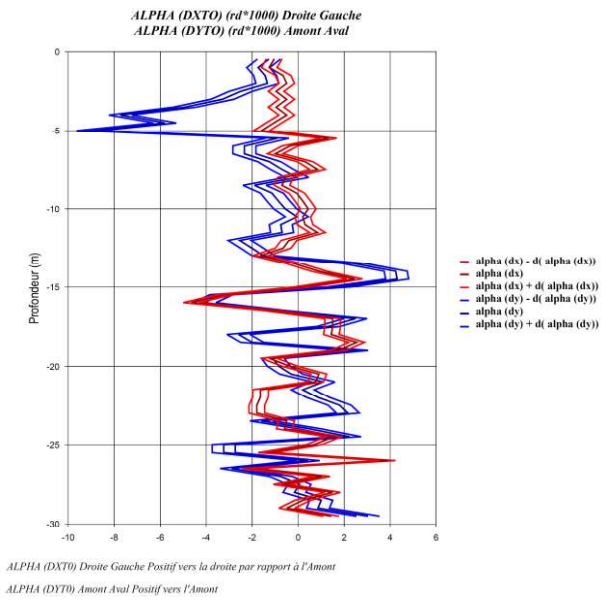
4.3.1 Présentation des mesures

4.3.1.1 *Quet-le-Haut – RN85 : Inclinomètre I1*

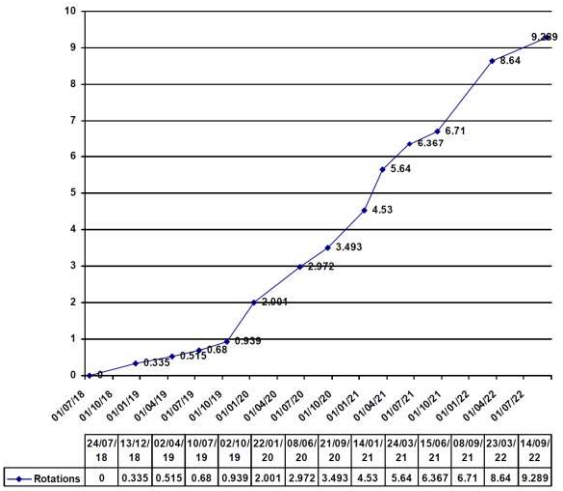
Les mesures au droit de I1 montrent une surface de cisaillement à 5 m de profondeur avec des rotations significatives entre 3,5 et 5,0 ; soit une rotation locale de 9.10^{-3} rad et un module de déplacements cumulés de 1 à 1,5 cm à 5,0 m de profondeur.

Les mesures montrent également des rotations significatives entre 14 et 16 m de profondeur mais qui pourraient être liées à des déformations parasites du tube.

Le mouvement est continu dans le temps, relativement faible la première année (de juillet 2018 à juillet 2019). La vitesse moyenne reste relativement faible de l'ordre de 5 mm/an.



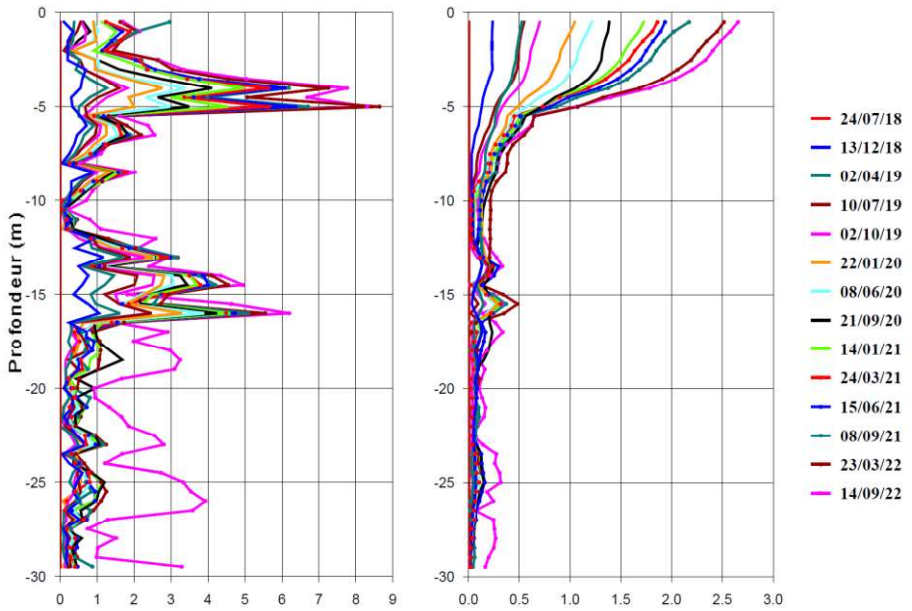
44a. Rotations observées en I1 (septembre 2022)



	24/07/18	13/12/18	02/04/19	10/07/19	02/10/19	22/01/20	08/06/20	21/09/20	14/01/21	24/03/21	15/06/21	08/09/21	23/03/22	14/09/22
Rotations	0	0.335	0.515	0.68	0.939	2.001	2.972	3.493	4.53	5.64	6.367	6.71	8.64	9.289

44b. Rotation locale dans le temps à 5 m de prof. (rad.10^{-3})

Source : Cerema



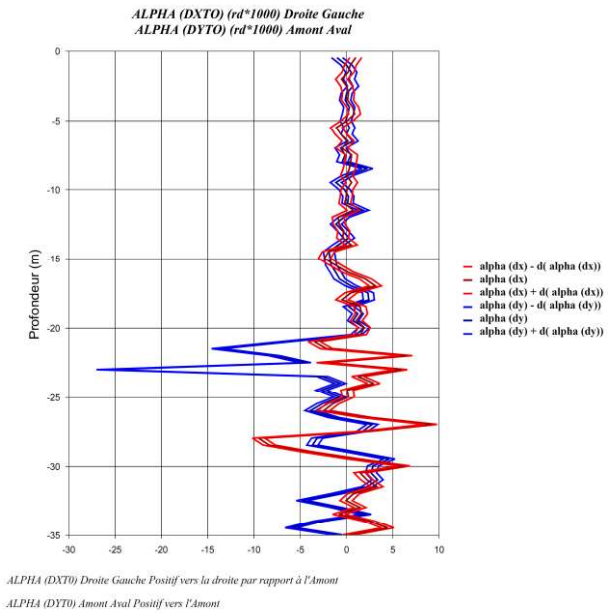
44c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I1

Illustration 44 : Résultats des mesures inclinométriques en I7

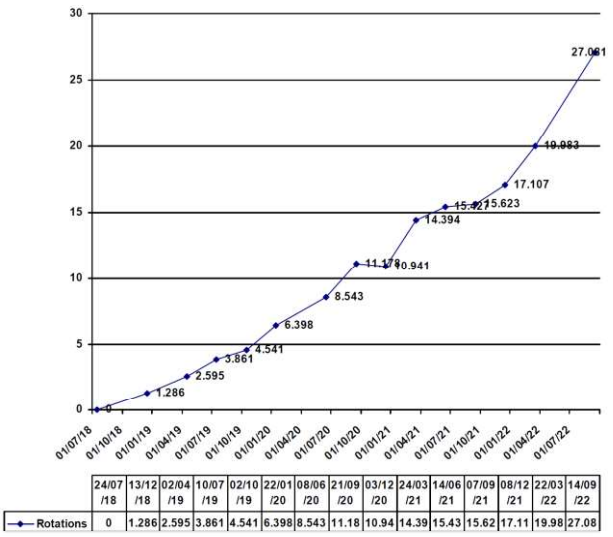
Le pic principal des rotations vers l'aval est mesuré à 5,0 m de profondeur.

4.3.1.2 *Zone du canal du Beaumont – Inclinomètre I2*

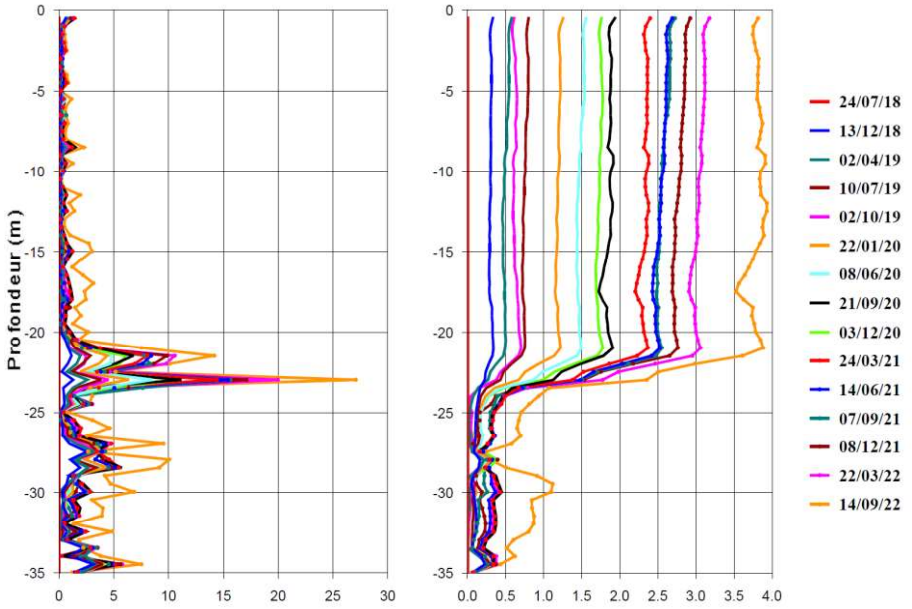
Les résultats des mesures montrent des rotations significatives sur trois zones distinctes, entre 21,5 et 23,0 m, entre 27,0 et 29,0 m et entre 33,0 et 35,0 m de profondeur.



45a. Rotations observées en I2 (septembre 2022)



45b. Rotation locale dans le temps à 23 m de prof. (rad.10^{-3})



45c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I2

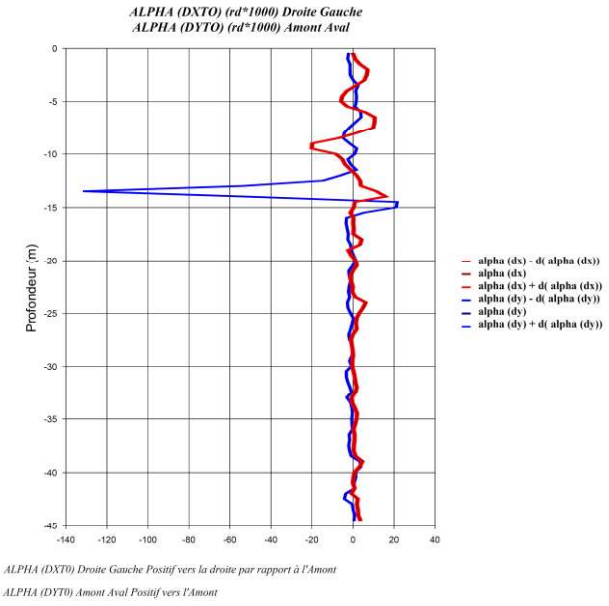
Illustration 45 : Résultats des mesures inclinométriques en I2

Source : Cerema

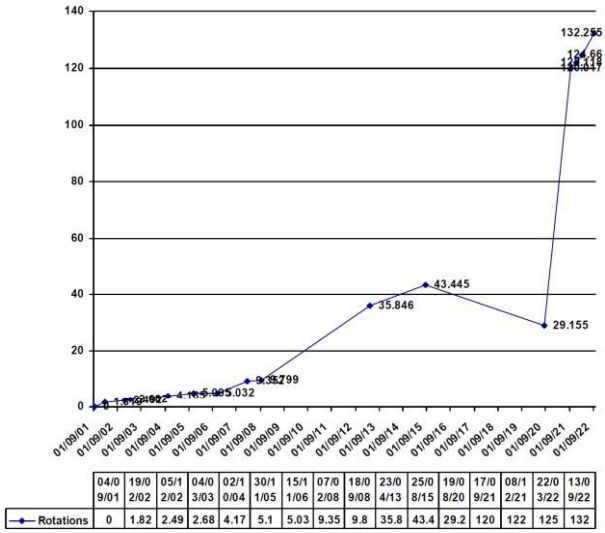
La surface de cisaillement est reconnue à 23 m de profondeur. Les deux autres zones de rotations significatives montrent des alternances de valeurs positives et négatives qui évoquent plutôt des déformations parasites du tube (type flambage).

4.3.1.3 *Quet-le-Bas – Inclinomètre I3RTM*

Les résultats des mesures montrent une surface de cisaillement à 13,5 m de profondeur, avec une rotation significative du tube inclinométrique entre 12,5 et 13,5 m et un pic principal à 13,5 m (variation angulaire $\alpha = -130.10^{-3}$ rad).



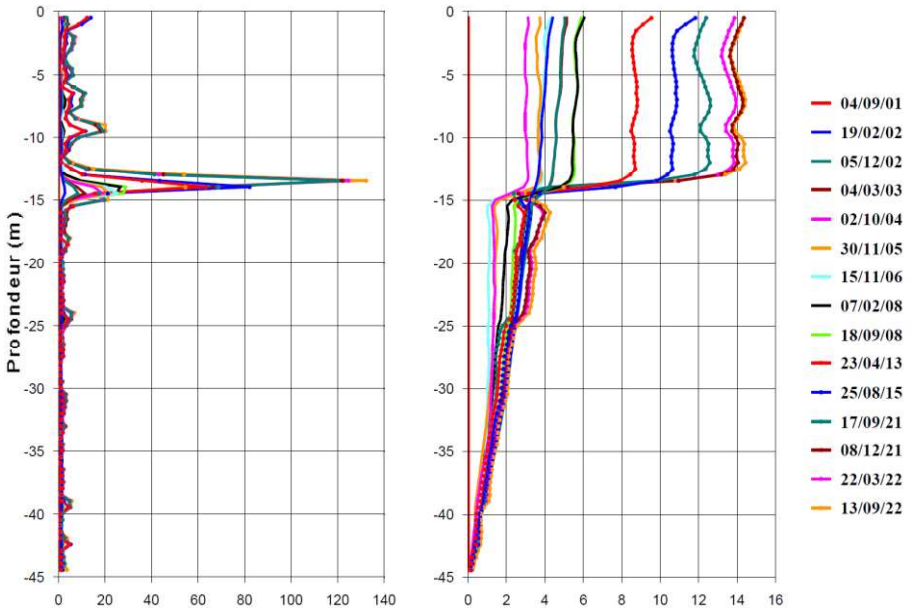
46a. Rotations observées en I3 (septembre 2022)

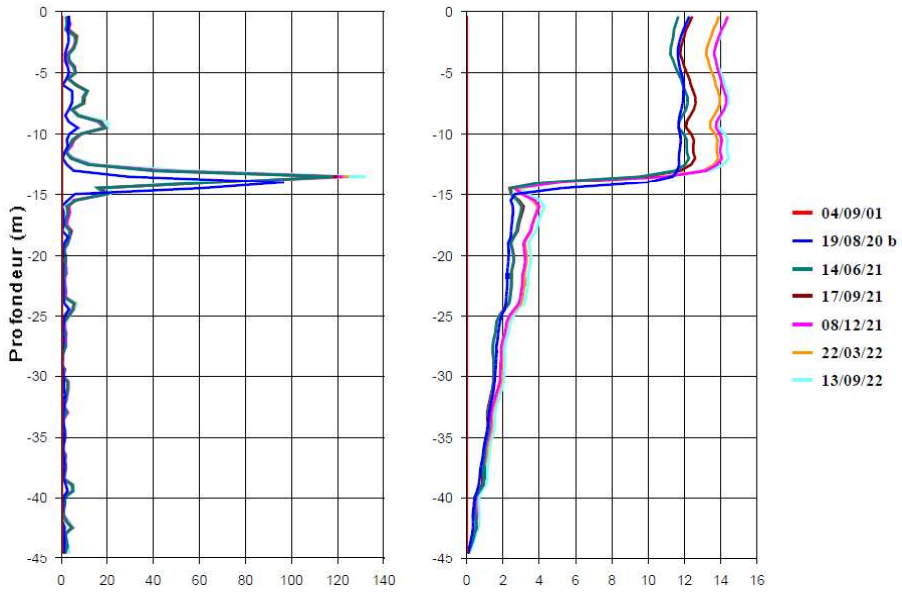


	04/09/01	19/02/02	05/12/02	04/03/03	02/10/04	30/11/05	15/11/06	07/02/08	18/09/08	23/04/13	25/08/15	17/09/21	08/12/21	22/03/22	13/09/22
Rotations	0	1.82	2.49	2.68	4.17	5.1	5.03	9.35	9.8	35.8	43.4	29.2	120	122	125	132

46b. Rotation locale dans le temps à 16 m de prof. (rad.10^{-3})

Source : Cerema





46c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I3

Illustration 46 : Résultats des mesures inclinométriques en I3RTM

4.3.2 Synthèse des mesures inclinométriques

Au droit de I1, entre 3,5 et 5 m de profondeur les rotations sont significatives uniquement selon l'axe amont-aval sur toute l'épaisseur. Ce type de rotation traduit généralement un mouvement de type fluage déviatorique (ou des cisaillements répartis sur une épaisseur importante).

Le fluage a lieu au sein d'une couche d'éboulis argileux saturés. Le déplacement total atteint une valeur maximale de 15 mm à 5,0 m de profondeur et de 27 mm sur toute la hauteur du tube inclinométrique.

Ce fluage a une vitesse relativement lente, en moyenne de 5 à 6 mm par an.

Malgré une tendance moyenne très linéaire, l'évolution des rotations semble dépendre des saisons, elles sont les plus importantes en automne-hiver, et un ralentissement a été relevé au cours du printemps (avril) et du début d'été (juillet) 2019 ainsi qu'à l'automne 2020 (septembre) et à l'hiver 2021 (mars). Cette dépendance n'est toutefois pas systématique : les vitesses maximales ont été mesurées en hiver 2018-2019 mais aussi au cours de l'été 2020 et de l'été 2022.

Entre 14,0 et 16,0 m de profondeur, les rotations sont également significatives. Leur amplitude est équivalente entre les deux axes amont-aval et droite-gauche et alternent (+/-) avec la profondeur. Ce type de rotation traduit plutôt un flambement du tube, généralement associé à un mouvement vertical dont la valeur équivalente en déplacement ne peut être mesurée par inclinométrie.

Les rotations évoluent régulièrement depuis la pose, ce qui semble exclure que le flambement soit lié à un problème lors de la mise en œuvre. D'autre part, une saisonnalité est probable avec des rotations qui n'ont pas, par exemple, augmenté au cours des différents étés.

Entre 14,0 et 17,5 m de profondeur, la coupe du sondage SC1 dans lequel est implanté le tube inclinométrique I1 présente un niveau composé d'une grave caillouteuse avec une matrice sablo-limoneuse, très peu argileuse (VBS = 0,24), au sein d'un ensemble de terrains compact et au-dessus du niveau de nappe le plus haut. Ce niveau présente également des traces d'oxydation et une forte anomalie de radioactivité naturelle.

Il est donc possible que cette déformation du tube soit liée au passage d'une surface de cisaillement quasi verticale (haut du glissement) ou à un tassement.

Au droit de I2, les rotations principales sont observées entre 21,5 et 23,0 m, avec un pic principal à 23,0 m de profondeur. Ce type de rotation traduit un mouvement de type cisaillement à 23,0 m de

profondeur, accompagné d'un fluage déviatorique entre 21,5 et 23,0 m. Le cisaillement a lieu à l'interface entre le niveau d'argiles litées et le niveau des argiles sableuses désorganisées sus-jacentes qui tend à fluer. Les déplacements sont dans l'axe amont-aval et d'une amplitude totale de 37 mm à 21,5 m de profondeur depuis juillet 2018, soit une vitesse moyenne de 9 mm/an.

Les rotations entre 27,0 et 29,0 m et entre 33,0 et 35,0 m existent, mais il s'agit de rotations qui traduisent un flambement du tube (rotations dans les deux axes) et qui n'ont quasiment pas évolué depuis la deuxième mesure. Il s'agit probablement de déformations liées à la mise en place du tube et au séchage du scellement.

Au droit de I3TRM, il est difficile d'interpréter les mesures avec une quelconque saisonnalité suite l'arrêt des mesures entre 2015 et 2020 ainsi que l'irrégularité des mesures entre 2001 et 2015. Toutefois, à partir de la reprise des mesures depuis août 2020, on peut observer une accélération du cisaillement entre septembre et décembre 2021 puis une stagnation depuis et jusqu'à septembre 2022 (dernière campagne de mesures).

4.4 Synthèse

Les déformations observées à Quet-en-Beaumont au niveau de la RN ont vraisemblablement plusieurs origines :

- un fluage des couches d'éboulis argileux (4 à 8 m de profondeur), hétérogènes et présentant des anomalies mécaniques, probablement causé par des arrivées d'eau météoriques ;
- un glissement lent sur une couche « savon » argileuse entre 15 et 25 m de profondeur, dont la surface de cisaillement pourrait remonter à la RN85.

Le risque de rupture brutale au niveau de ces mouvements semble faible.

L'existence d'un glissement plus profond ne peut cependant pas être exclue, le substratum n'ayant pas été atteint par les forages. Il est possible également que plusieurs glissements enchâssés soient présents sur l'ensemble de la pente de Quet-en-Beaumont, les mouvements lents des glissements aval diminuant la butée des glissements amont et accentuant ainsi leur évolution.

Le moteur des déplacements est principalement l'apport d'eau météorique :

- par lubrification des éboulis sous la RN85 ;
- par la pression d'eau au-dessus du niveau des argiles lacustres.

5 SITE N°3 – LES TOUCHES

5.1 Présentation du site

5.1.1 Historique et connaissances préalables

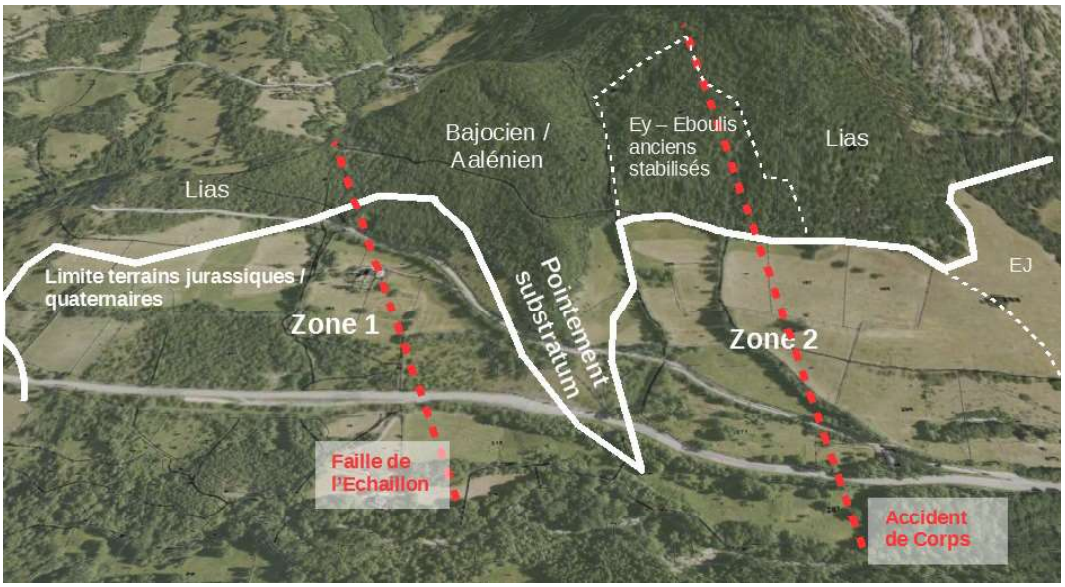
Le site, dit des Touches, est localisé au voisinage du PR100 + 500 de la route nationale, à l'approche de Corps (38). Dans cette zone, la route longe en rive droite le lit du ruisseau de La Sézia, avec une configuration en remblai ou en profil mixte s'appuyant sur une pente naturelle d'environ 15° dans l'axe Nord-Sud. Les désordres affectent un linéaire d'environ 1 km entre le hameau des Touches et la jonction avec la RD212. Ils se manifestent principalement sur la chaussée par des déformations (affaissements, ondulations, etc.) et par des fissurations, courbes ou rectilignes, avec ou sans rejets. Des désordres sont également visibles sur les avoisinants (terrain naturel, ouvrages de soutènement, rupture d'alimentation en eau potable, etc.).

5.1.2 Contexte géologique et hydrogéologique

La géologie du site se caractérise par des dépôts quaternaires (zone 1 autour du lieu-dit "Les Touches" et zone 2 autour du lieu-dit "Le Ruisseau"), séparées par un pointement du substratum.

Le substratum géologique résistant est constitué des terrains sédimentaires du Jurassique suivants, des plus jeunes aux plus anciens :

- les marno-calcaires du Bajocien (notés $j_{1a\ ou\ b}$, -164 à -170 Ma) ;
- les marno-calcaires de l'Aalénien (notées $l_{9a\ ou\ b}$, -170 à -175 Ma) ;
- les marno-calcaires du Lias (sur la période -190 à -195 Ma),
    - les marnes du Domérien comprenant des bancs calcaires ocreux roux à la base marquant la transition progressive avec le Carixien Supérieur (notées I6a) ;
    - les calcaires rubanés du Carixien Supérieur (notés I5b), constituant des alternances de calcaires bleus fins et de calcaires ocres plus détritiques et plus argileux ;
    - les calcaires gris du Carixien (notés I5a).



/Source : Cerema

Illustration 47 : Figuration des principaux ensembles sensibles suite à l'interprétation des données géologiques extraites de la carte 1/50 000e de La Mure (BRGM)

En amont de la zone 1 de glissement, la faille de l'Echaillon met en contact les marno-calcaires de l'Aalénien avec les calcaires du Carixien (Lias). Plus à l'Est, à l'aplomb de la zone 2, un autre accident tectonique (supposé), appelé « accident de Corps », met en contact les calcaires du Carixien et les

marno-calcaires du Dogger (Bajocien). Ces derniers ont pu être surcreusés par l'érosion glaciaire par rapport aux calcaires plus résistants du Domérien et Carixien.

Les dépôts quaternaires sont constitués principalement d'alluvions glacio-lacustres würmiennes (notées Gly), avec deux faciès recensés, plus argileux au voisinage de la RN85 et de La Sézia (Glyb1), plus sableux au nord de la RD212 et autour du hameau des Touches (Glyb2). À noter que la notice de la carte géologique de La Mure indique également la présence d'affleurements ténus d'argiles litées et sables de l'époque rissienne jusque vers la cote 920 aux Touches.

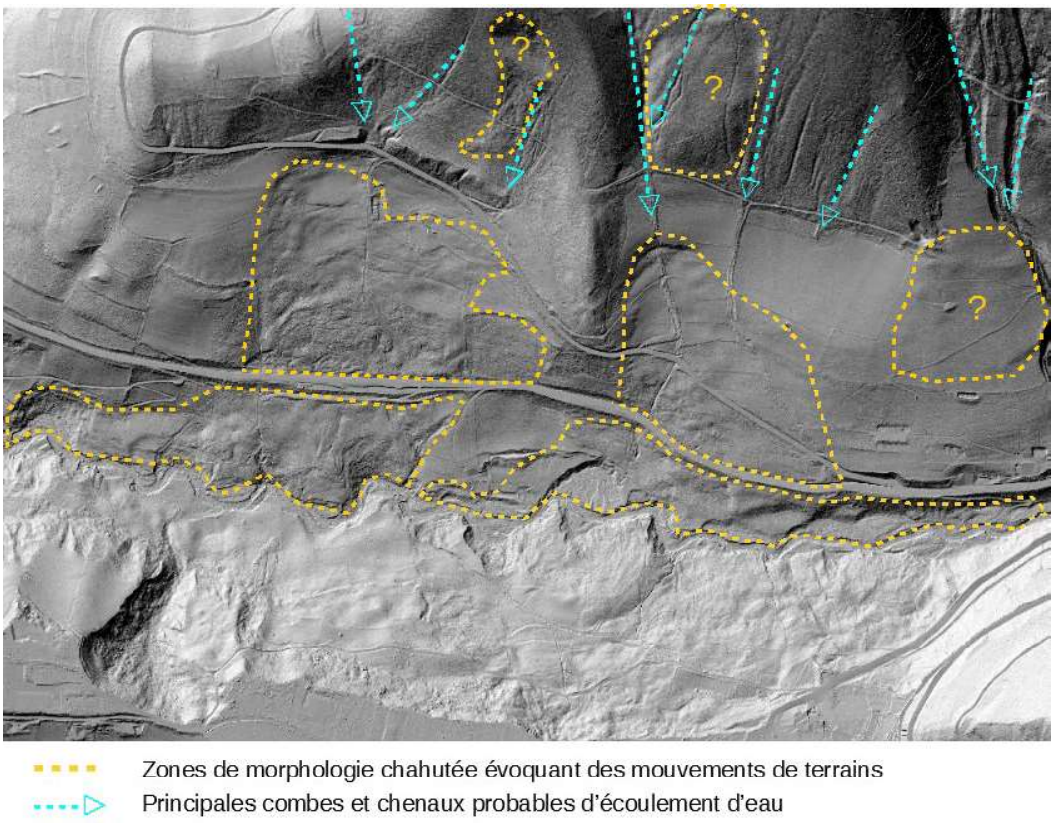
Dans la zone 1, un glissement de terrain actif est recensé (noté Gl-Ez), qui correspond approximativement aux plus forts désordres relevés sur l'axe routier.

Le pointement entre les zones 1 et 2 est constitué des terrains du Bajocien, de types calcaires argileux en gros bancs gris-noirs et marno-calcaires noirs. Un affleurement est bien visible sur le talus amont de la RD212.

La zone 2 présente les mêmes terrains quaternaires que la zone 1 ; elle est surplombée au nord par les terrains marno-calcaires du Jurassique inférieur, et par une zone d'éboulis würmiens anciens stabilisés (Ey).

5.1.3 Géomorphologie et mouvements de terrain

La zone d'étude comporte de multiples indices morphologiques de mouvements de terrains. Les plus évidents concernent la RN85 qui présente des affaissements marqués et / ou des ondulations verticales en de multiples points. Des fissurations, avec ou sans rejet, sont également observables, avec par endroits (au voisinage des talus) des formes en arc-de-cercle évocatrices de glissements localisés. La route fait l'objet de travaux de reprise de chaussée réguliers, qui soulignent les parties les plus actives.



Source : Sintégra / Cerema

Illustration 48 : Observations morphologiques issues des relevés Lidar sur le site des Touches

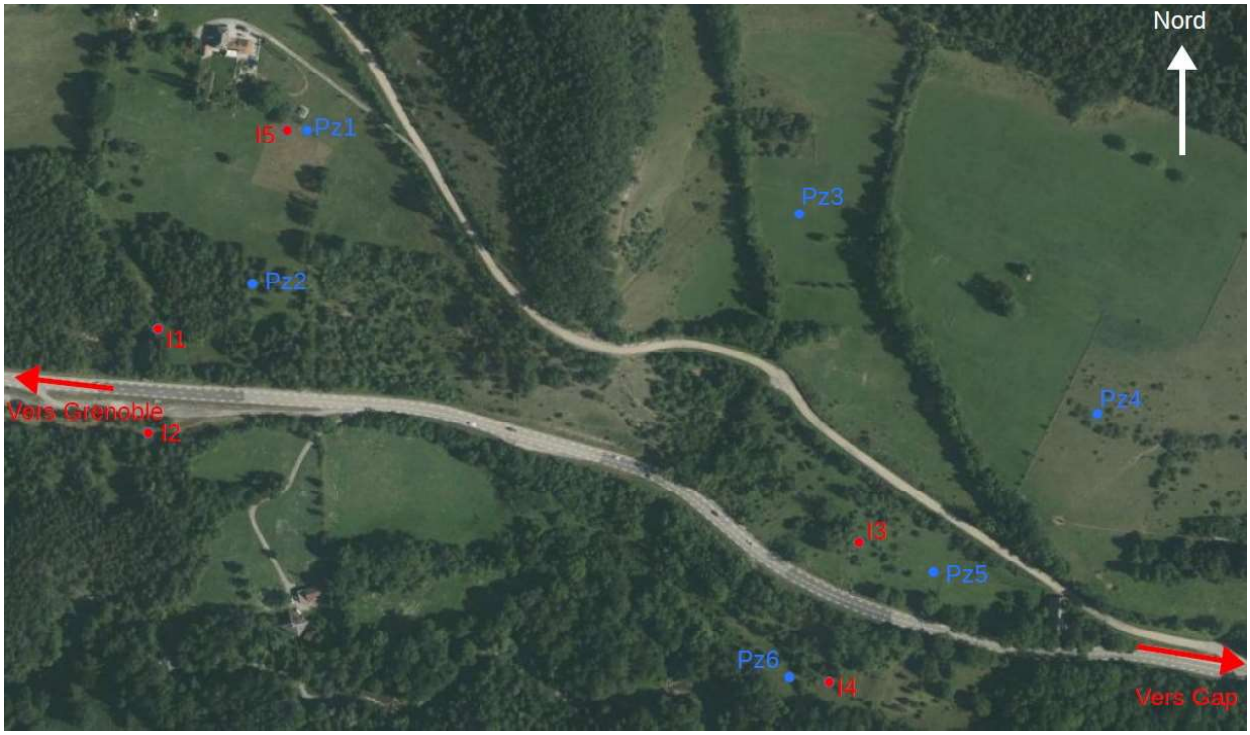
Les indices de mouvements de terrain sont également très visibles hors route, notamment dans les parties arborées à l'aval du hameau des Touches. On relève, outre des stagnations d'eau et zones humides fréquentes, des décrochements localisés, des affaissements, des ondulations, des arbres basculés. En de multiples endroits la végétation n'a pas repris ses droits sur ces déformations, soulignant des évolutions récentes et continues. Des déformations sont également visibles en aval de la RN85, jusqu'à la Sézia

Bien que présents, les indices de mouvements de terrain sont moins manifestes sur les terrains naturels de la zone 2, en dehors de la partie aval entre la RN85 et la Sézia dont l'activité reste marquée.

À noter que, paradoxalement, la maison habitée du hameau des Touches présente peu de désordres au regard des irrégularités du terrain aval ; elle pourrait constituer une limite amont du glissement.

5.1.4 Dispositif d'instrumentation

L'instrumentation en place sur le site des Touches, commune de Corps, se répartit comme suit :



Source : Cerema

Illustration 49 : Implantation du dispositif d'instrumentation sur le site des Touches

Tableau n°7 : Récapitulatif du dispositif d'instrumentation

Nom	Type d'instrumentation	Observations	Profondeur	Date
I1	Inclinomètre	Cisaillé fin 2020	30,0 m	2018
I2	Inclinomètre	Cisaillé au premier trimestre 2020	30,0 m	2018
I3	Inclinomètre		30,0 m	2018
I4	Inclinomètre		30,0 m	2018
I5	Inclinomètre		23,0 m	2021
Pz1	Piézomètre ouvert		20,0 m	2018
Pz2	Piézomètre ouvert		20,0 m	2018
Pz3	Piézomètre ouvert		20,0 m	2018

Pz4	Piézomètre ouvert		20,0 m	2018
Pz5	Piézomètre ouvert		20,0 m	2018
Pz6	Piézomètre ouvert		20,0 m	2018

5.2 Résultats des mesures de niveaux d'eau

Les relevés piézométriques sur les forages de 2018 ont été effectués à la sonde manuelle, avec des périodicités de 2 à 3 mois. Les relevés sont donc trop espacés pour permettre une évaluation de la réactivité à un événement pluvieux particulier, mais ils permettent de percevoir la tendance générale de variation des niveaux d'eau au cours du temps.

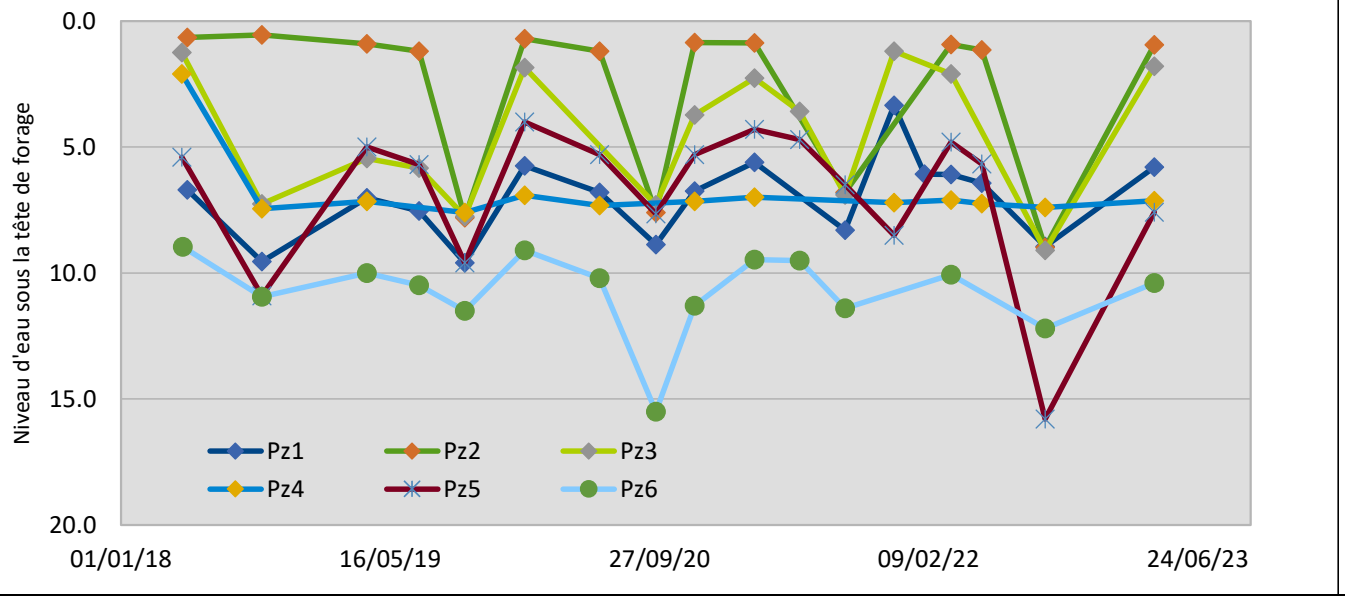
5.2.1 Présentation des mesures

Tableaux n°8 et 9 : Récapitulatif des relevés piézométriques sur le site des Touches

Date	Niveau piézométrique (m/T.N)						Source Cerema
	Pz1	Pz2	Pz3	Pz4	Pz5	Pz6	
24/04/2018	-	-	1,25	2,1	5,4	8,96	
04/05/2018	6,7	0,65	-	-	-	-	
20/09/2018	9,55	0,55	7,26	7,45	10,9	10,94	
03/04/2019	7,01	0,90	5,45	7,15	5,00	10,00	
09/07/2019	7,54	1,20	5,83	-	5,70	10,48	
02/10/2019	9,60	7,80	7,75	7,60	9,60	11,50	
21/01/2020	5,74	0,70	1,85	6,92	4,00	9,10	
08/06/2020	9,60	1,20	-	7,32	5,30	10,20	
21/09/2020	8,87	7,60	7,30	-	7,65	15,50	
02/12/2020	6,75	0,85	3,73	7,15	5,30	11,30	
23/03/2021	5,60	0,87	2,27	6,99	4,30	9,47	
15/06/2021	-	-	3,58	-	4,70	9,50	
07/09/2021	8,30	6,80	6,90	-	6,50	11,40	
07/12/2021	3,35	-	1,20	7,20	8,50	-	
02/02/2022	6,08	-	-	-	-	-	
23/03/2022	6,09	0,93	2,10	7,10	4,81	10,07	
19/05/2022	6,43	1,15	-	7,40	5,67	-	
14/09/2022	8.95	8,98	9,10	7,40	15,80	12,20	

Date	Niveau piézométrique (NGF)						Source Cerema
	Pz1	Pz2	Pz3	Pz4	Pz5	Pz6	
24/04/2018	-	-	920.25	916.08	879.48	852.49	
04/05/2018	896.71	883.50	-	-	-	-	
20/09/2018	893.86	883.60	914.24	910.73	873.98	850.51	
03/04/2019	896.4	883.25	916.05	911.03	879.88	851.45	
09/07/2019	895.84	882.95	915.67	-	879.18	850.97	
02/10/2019	893.81	876.35	913.75	910.58	875.28	849.95	

21/01/2020	897.64	883.45	919.65	911.26	880.88	852.35	
08/06/2020	896.61	882.95	-	910.86	879.58	851.25	
21/09/2020	894.54	876.55	914.20	-	877.23	845.95	
02/12/2020	896.66	883.30	917.77	911.03	879.58	850.15	
23/03/2021	897.81	883.28	919.23	911.19	880.58	851.98	
15/06/2021	-	-	917.92	-	880.18	851.95	
07/09/2021	895.11	877.35	914.60	-	878.38	850.05	
07/12/2021	900.06	-	920.30	910.98	876.38	-	
02/02/2022	897.33	-	-	-	-	-	
23/03/2022	897.32	883.22	919.40	911.08	880.07	851.38	
19/05/2022	896.98	883.00	-	910.94	879.21	-	
14/09/2022	894.46	875.17	912.40	910.78	869.08	849.25	



Source : Cerema

Illustration 50 : Courbes piézométriques du site des Touches

5.2.2 Synthèse des mesures piézométriques

Dans la zone 1 de glissement (Pz1 et Pz2), on retrouve les hétérogénéités de niveaux d'eau identifiées antérieurement par l'ADRGT (1971), avec des effets saisonniers marqués et relativement bien coordonnés entre piézomètres. En période sèche (été) les niveaux d'eau relativement similaires peuvent indiquer un toit de nappe grossièrement parallèle à la pente moyenne du terrain (avec une tendance haussière à l'aval). En période hivernale en revanche, le piézomètre Pz2 connaît des remontées d'eau beaucoup plus importantes, avec des niveaux sub-affleurants (0,5 à 1 m sous la surface). Cela semble compatible avec l'hypothèse d'une obturation partielle des drainages (naturels ou anthropiques) à l'aval (*cf.* Etude de diagnostic G5 du Cerema – Rapport C18LL0069 de septembre 2022).

À noter également que :

- quelle que soit la saison, les niveaux piézométriques sont systématiquement situés au-dessus du toit de la frange altérée du substratum, blocs et débris rocheux dans une matrice sableuse à argileuse noire (couche F3), plus perméable. Cela indique soit une nappe en charge dans cette

formation, soit des régimes hydrauliques se développant au sein des hétérogénéités des terrains supérieurs, limons argileux et argile gris sombre (couches F1 et F2) à passées sableuses ou graveleuses ;

- le piézomètre Pz2 n'est pas redescendu lors de l'été 2018. Cela correspond à la période de rupture de la canalisation d'eau potable, à l'amont du piézomètre, qui avait alimenté pendant plusieurs mois le glissement de terrain. Cette observation confirme de manière quantifiée l'impact de cette rupture sur le contexte hydraulique local.

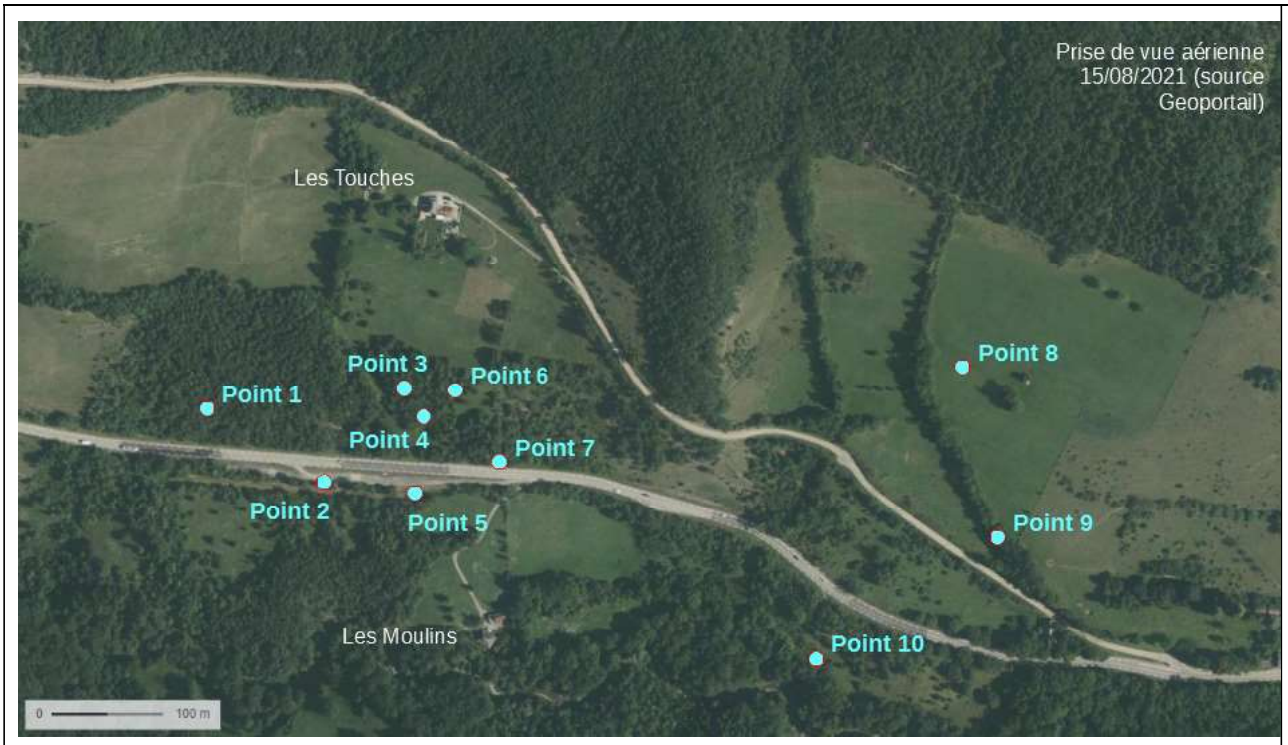
Dans la zone 2 de glissement (Pz3 à Pz6), hors piézomètre Pz4, on trouve également des tendances saisonnières marquées avec des niveaux d'eau élevés en période hivernale (jusqu'à -1 m sur Pz3) et des niveaux plus bas en période estivale. Les amplitudes de ces variations cycliques peuvent atteindre 5 à 6 m.

Sur l'ensemble des piézomètres, se manifeste en moyenne un abaissement de la nappe par rapport au terrain naturel au fur et à mesure que l'on descend vers l'aval, ce qui diffère de la zone 1. Le piézomètre le plus proche de La Sézia (Pz6) présente en outre des oscillations saisonnières moins marquées. Ces observations semblent indiquer une circulation des eaux en direction de la rivière, qui d'une part rabat progressivement la nappe, d'autre part facilite les purges et limite les pics sur Pz6. Les niveaux d'eau sont systématiquement relevés dans les couches F1 et F2 des forages (voir livrable L-A2).

Le piézomètre Pz4 présente un comportement très différent des autres. Le niveau d'eau relevé y est quasi-constant au cours du temps, vers 7,5 m de profondeur. Cela n'exclut pas que des remontées se produisent ponctuellement lors d'événements pluvieux particuliers, mais dans ce cas elles sont purgées rapidement et le niveau d'eau est systématiquement revenu à l'équilibre lors des mesures manuelles. Ce piézomètre est situé dans une zone peu affectée par les mouvements (d'après les indices morphologiques). Sauf obturation du tube, il montre que des différences de régime hydraulique existent au sein du versant et laisse suspecter un lien entre les déformations et les variations de niveau d'eau (les déplacements étant généralement accélérés par les remontées de nappe).

Sur l'ensemble des piézomètres, on notera également que les valeurs les plus basses ont été relevées en septembre 2022, à l'issue d'un été marqué par une sécheresse importante.

En complément des relevés piézométriques, quelques mesures de chimie des eaux, essentiellement sur des exutoires de drains ou de sources, ont été effectués en mars-avril 2021 dans le cadre du projet MLA3 au moyen d'une sonde multi-paramètres *Hach Lange Sension+ MM150©*. Les résultats sont présentés sur l'illustration n°51 (points d'implantation) et le tableau n°10 (mesures) ci-après.



Source : Cerema

Illustration 51 : Implantation des points de mesures de chimie des eaux effectuées en mars-avril 2021

Les valeurs relevées sont relativement cohérentes avec celles mesurées dans le versant opposé, côté Corps. Les points 2-7-8-9 présentent des minéralisations moyennes (tranche haute) et les autres points indiquent des eaux fortement minéralisées. Ces valeurs sont compatibles avec des circulations dans les terrains marno-calcaires identifiés sur le site et évoquent dans l'ensemble des eaux profondes.

Tableau n°10 : Résultats des mesures de chimie des eaux effectuées en mars-avril 2021

Point	Date	CE (S/cm)	TDS (mg/L)	T (°C)	Précisions
1	21/04/21	1094	-	8,6	Source dans la forêt. Débit très faible, circulation en surface probable
2	23/03/21	725	464	9,2	Exutoire drainage
3	23/03/21	843	540	8,3	Source diffuse dans la forêt
4	23/03/21	993	635	10,3	Eau semi-stagnante autour d'un ancien piézomètre
5	23/03/21	803	514	7,7	Exutoire drainage
6	23/03/21	855	547	10,6	Piézomètre PZ2 (eau à 0,87 m)
7	23/03/21	731	468	10,7	Tuyau de trop-plein de drainage (à l'air libre sur environ 50 m)
8	23/03/21	567	363	18,9	Source dans le champ (eau stagnante)
9	23/03/21	599	383	9	Drain agricole
10	23/03/21	791	506	11,8	Sources diffuses sur niche d'arrachement

Nota : CE : conductivité électrique, TDS : total des solides dissous, T : température

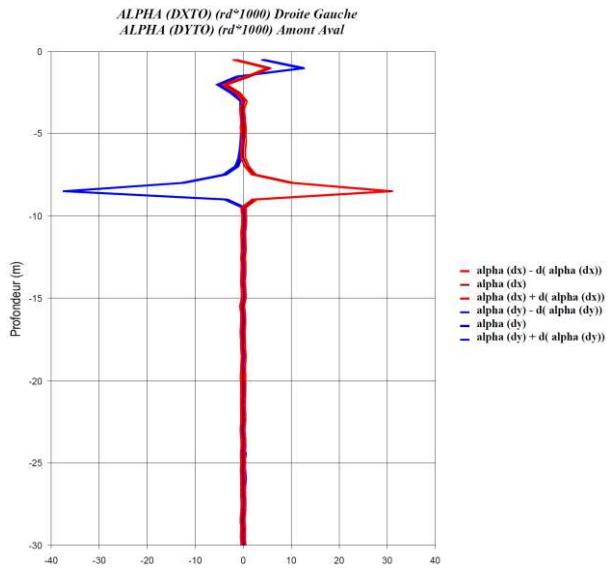
Seuls les points 8 et 9 pourraient correspondre à des eaux superficielles plus ou moins mélangées.

5.3 Résultats des mesures inclinométriques

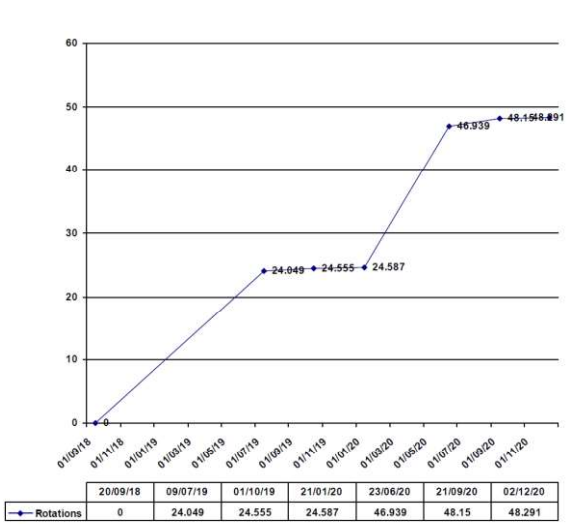
5.3.1 Présentation des mesures

La mesure zéro date de juillet 2018 sur la plupart des tubes. Treize autres mesures ont été effectuées, la dernière en septembre 2022. Les mesures sont effectuées tous les trois mois afin d'illustrer les saisonnalités. Cependant en 2020 les mesures ont été perturbées en raison du confinement sanitaire (pas de mesure au début du printemps). Les résultats des relevés inclinométriques sont présentés ci-après.

5.3.1.1 *Inclinomètre I1*

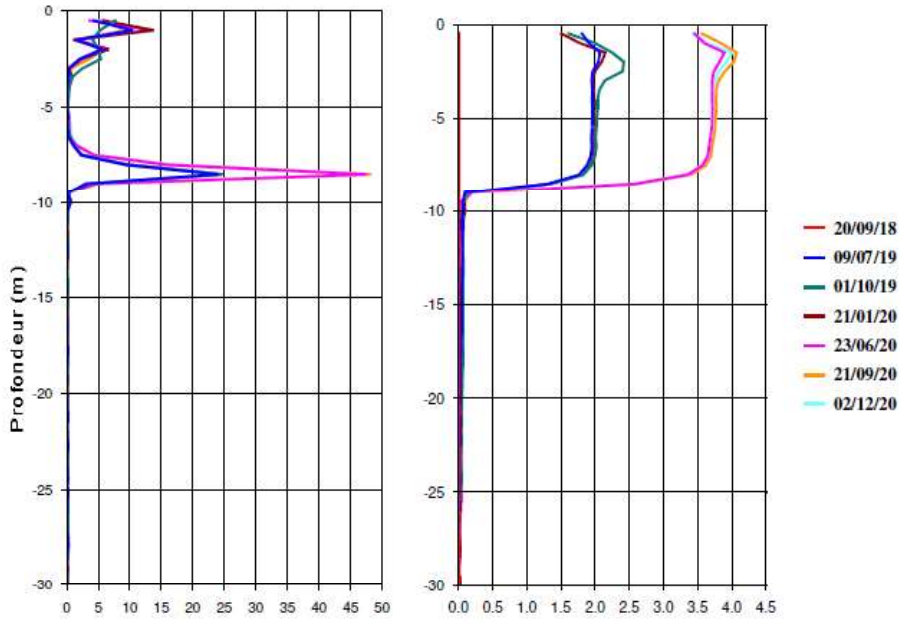


52a. Rotations observées en I1 (décembre 2020)



52b. Rotation locale dans le temps à 8,5 m de prof. (rad.10^{-3})

Source : Cerema



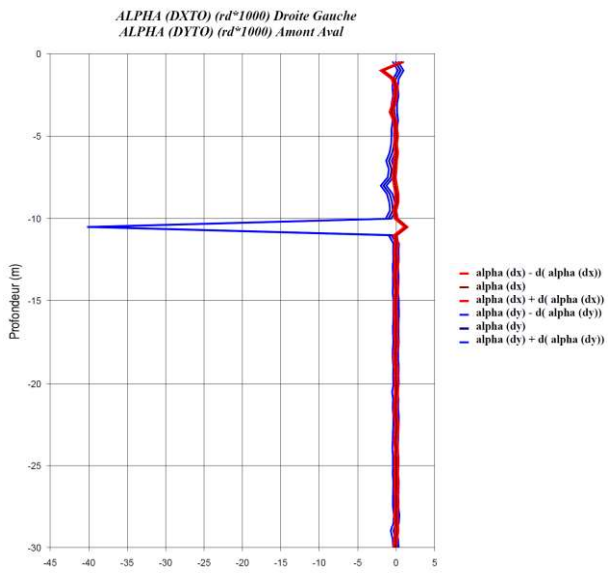
52c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I1

Illustration 52 : Résultats des mesures inclinométriques en I1

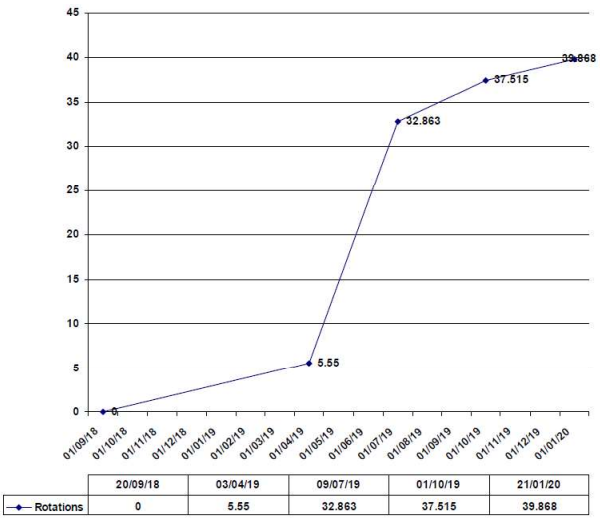
L'inclinomètre I1 indique une surface de glissement bien individualisée à 8,5 m de profondeur, avec une rotation maximale à 48.10^{-3} rd et un déplacement cumulé entre 3,5 et 4 cm (décembre 2020).

L'inclinomètre a cisaillé au cours de l'hiver 2020-2021 et les mesures n'ont pas pu être poursuivies. Malgré la période de mesures réduite, des effets saisonniers semblent être présents.

5.3.1.2 *Inclinomètre I2*

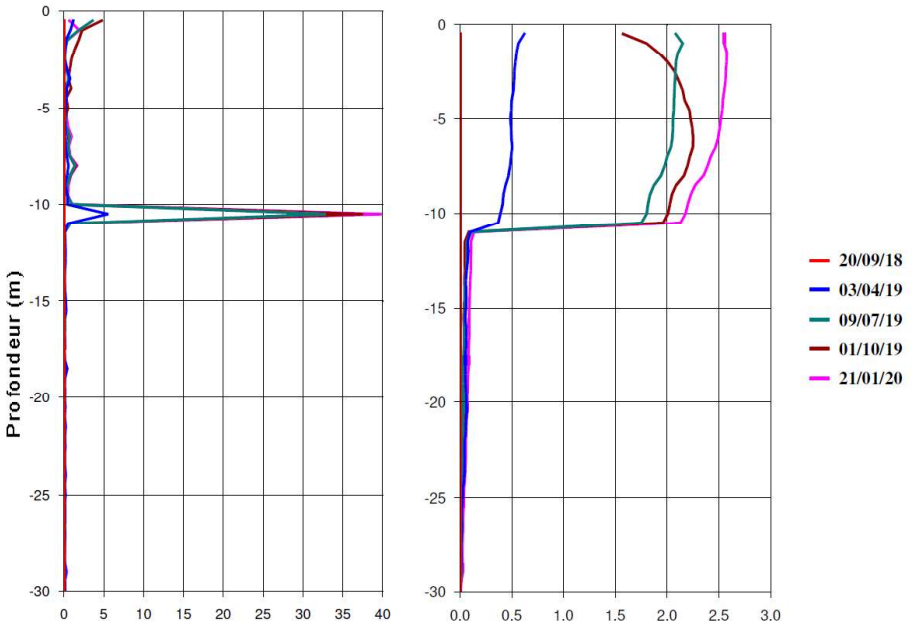


53a. Rotations observées en I2 (janvier 2020)



53b. Rotation locale dans le temps à 6,5 m de prof. (rad.10^{-3})

Source : Cerema

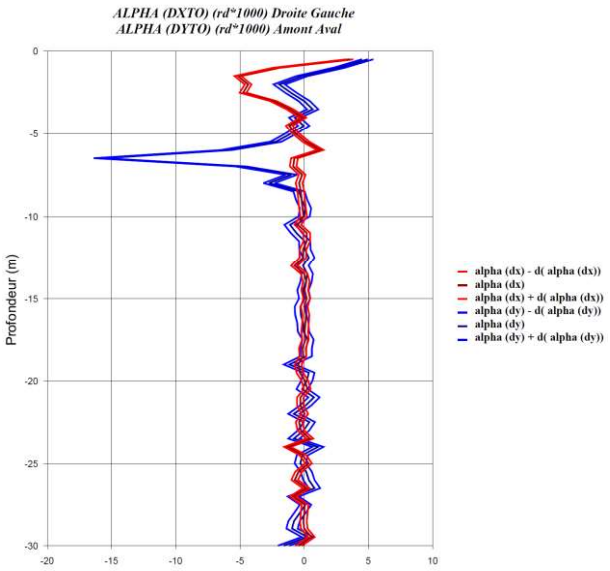


53c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I2

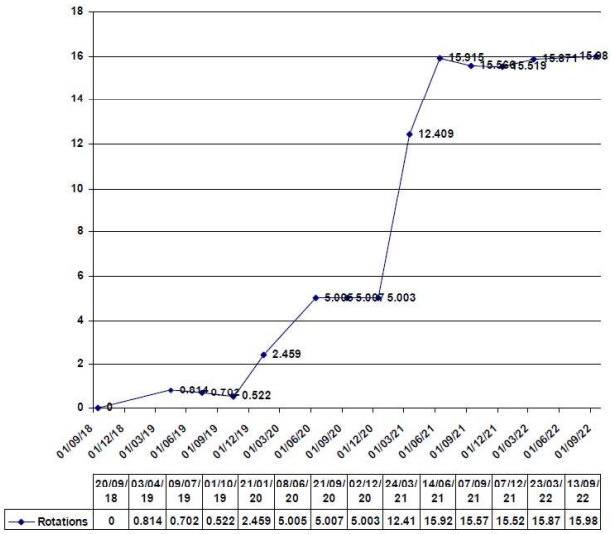
Illustration 53 : Résultats des mesures inclinométriques en I2

L'inclinomètre I2 donne une surface de glissement à 10,5 m de profondeur, avec une rotation maximale 39.10^{-3} rd et un déplacement cumulé, au 21 janvier 2020 avant cisaillement, de l'ordre de 2 cm. L'analyse des mesures montre un mouvement discontinu avec des accélérations au printemps 2019 et 2020, entre janvier et juin 2020 (date à laquelle il a été observé le cisaillement du tube et l'impossibilité d'y introduire la sonde de mesure).

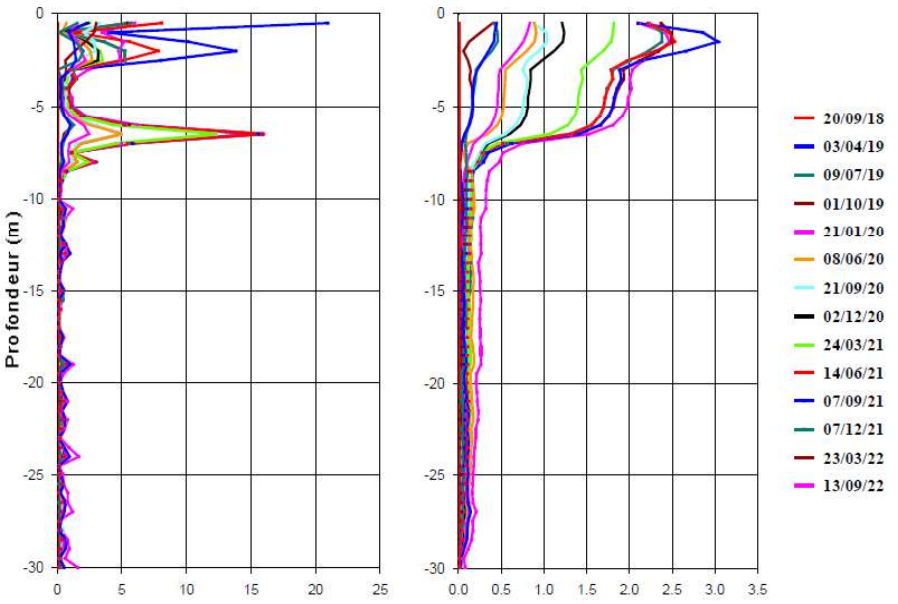
5.3.1.3 *Inclinomètre I3*



54a. Rotations observées en I3 (septembre 2022)



54b. Rotation locale dans le temps à 8,5 m de prof.(rad.10^{-3})



54c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I3

Illustration 54 : Résultats des mesures inclinométriques en I3

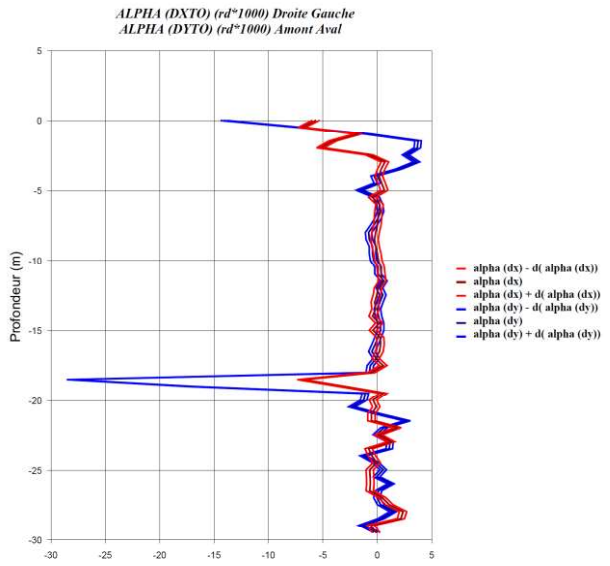
Source : Cerema

Les mesures effectuées avec l'inclinomètre I3 montrent une surface de glissement vers 6,5 m de profondeur, avec une rotation maximale de 16.10^{-3} rd et un déplacement cumulé de l'ordre de 1,5 à 2 cm (en septembre 2022).

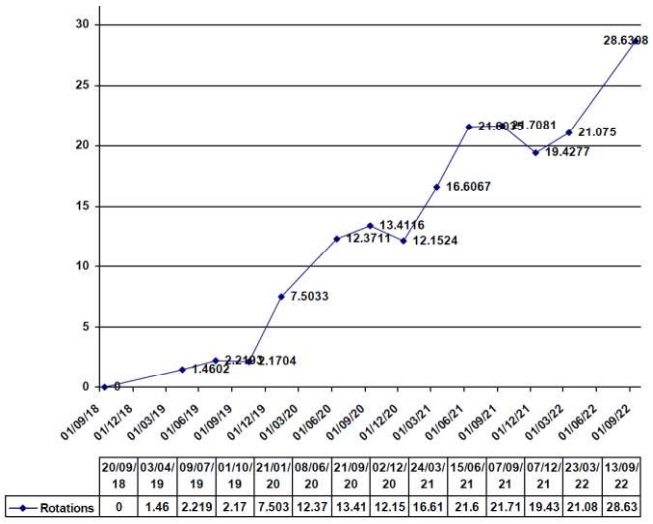
Les mesures sont perturbées en surface, entre 0 et 3 m (mouvements de reptation ?).

Le déplacement est discontinu, avec des vitesses élevées en hiver principalement. À noter qu'en 2021-2022 il y a eu très peu d'évolutions sur ce tube, montrant une certaine stabilité de cette partie du glissement (en lien avec les faibles apports d'eau de 2022 ?),

5.3.1.4 *Inclinomètre I4*



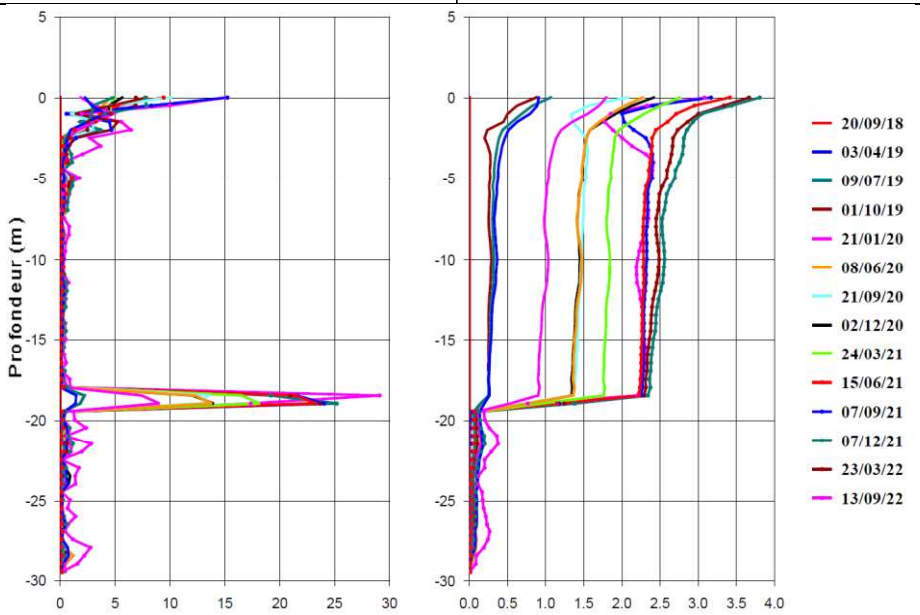
55a. Rotations observées en I4 (septembre 2022)



	20/09/18	03/04/19	09/07/19	01/10/19	21/01/20	08/06/20	21/09/20	02/12/20	24/03/21	15/06/21	07/09/21	07/12/21	23/03/22	13/09/22
Rotations	0	1.46	2.219	2.17	7.503	12.37	13.41	12.15	16.61	21.6	21.71	19.43	21.08	28.63

55b. Rotation locale dans le temps à 18,5 m de prof.(rad.10^{-3})

Source : Cerema



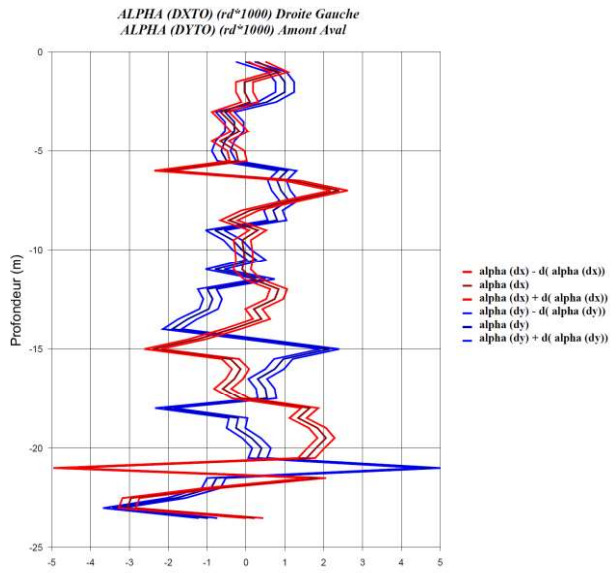
55c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I4

Illustration 55 : Résultats des mesures inclinométriques en I4

L'inclinomètre I4 montre une surface de cisaillement entre 18,5 et 19 m de profondeur, avec une rotation maximale du tube de l'ordre de 28.10^{-3} rd et un déplacement cumulé compris entre 2 et 2,5 cm. Comme I3, le tube présente des perturbations entre 0 et 3 m, caractérisant un mouvement de reptation superficiel.

Le déplacement est discontinu, cyclique, avec des accélérations au printemps et à l'automne, périodes de précipitations plus intenses.

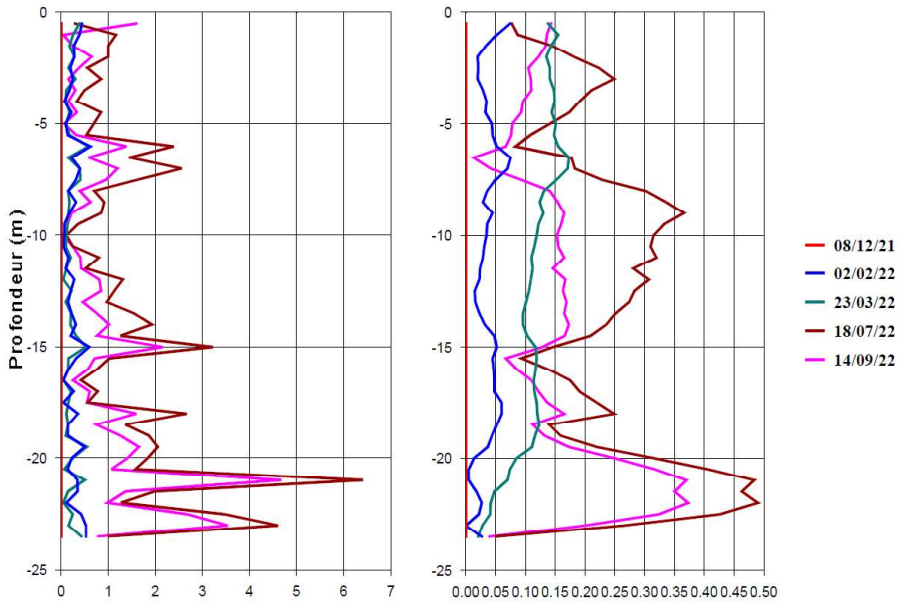
5.3.1.5 *Inclinomètre I5*



Graphique d'évolution dans le temps non significatif

Source : Cerema

56a. Rotations observées en I5 (septembre 2022)



56b. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I5

Illustration 56 : Résultats des mesures inclinométriques en I5

L'inclinomètre I5 a été installé en octobre 2021, en partie sommitale de la zone 1 de glissement. Après quatre mesures sur une année, il ne fait pas ressortir de signe particulier de glissement. Les mouvements s'apparentent principalement à des déformations parasites du tube, de faible amplitude et peu significatives.

5.3.2 Synthèse des mesures inclinométriques

5.3.2.1 *Zone 1 de glissement*

Dans la zone 1, les deux inclinomètres I1 et I2 montrent un net mouvement de glissement profond, avec des surfaces de cisaillement situées respectivement à 9 m et 11 m sous la tête de tube. Le « bloc

glissé » supérieur se déplace avec peu de déformations propres ; de même le « bloc stable » inférieur ne présente aucun autre signe de cisaillement jusqu'à -30 m. À noter que sur I1 le mouvement se situe au toit de la passée sableuse probablement aquifère identifiée dans le sondage.

Les relevés sur ces tubes n'ont pu être effectués que de 2018 à 2020 à cause de leur rupture prématurée au niveau de la surface de cisaillement. Ces deux années de mesure ont néanmoins permis l'observation de comportements cycliques nets, avec une quasi-absence de mouvements en période sèche (été – automne) et une accélération en période humide (hiver-printemps). Le croisement de ces résultats avec les mesures de niveau d'eau semble indiquer un forçage principal du glissement par la piézométrie.

Un troisième tube a été installé fin 2021 (sondage S8-SC3-I5) dans le cadre du projet MLA3. Il n'a fait à ce jour l'objet que de quatre mesures assez resserrées. Il ne présente aucun signe de cisaillement, les déformations relevées restant faibles et évoquant des effets parasites pouvant être liés à des tassements. Cela pourrait indiquer que ce tube est actuellement au-delà de la limite haute du glissement. Ce constat serait en bonne adéquation avec les morphologies relevées au LIDAR et avec les moindres déformations observées dans cette zone.

5.3.2.2 *Zone 2 de glissement*

Les deux tubes présents sur cette zone montrent également des surfaces de cisaillement correspondant à des phénomènes de glissement. Le tube I3 présente une surface de rupture vers 6,5 m de profondeur, probablement couplée avec un léger mouvement de surface (reptation ?). Des effets cycliques sont à nouveau relevés, les mouvements se produisant essentiellement à l'hiver et au printemps, en lien avec la piézométrie. En moyenne ce tube se déforme plus lentement que ceux de la zone 1 (0,7 à 0,8 cm/an en surface sur I3, pour 1,9 cm/an sur I1), ce qui a permis de poursuivre les mesures jusqu'en 2022.

Le tube I4 présente des comportements assez similaires, avec un mouvement de reptation superficielle et une surface de cisaillement individualisant deux « blocs » nets. Cette surface de cisaillement est cependant très profonde, à -19 m. Nous n'avons pas d'explication claire de ce phénomène à l'heure actuelle. En effet, une telle profondeur ne semble pas compatible avec la géométrie des terrains et correspondrait à des mouvements nettement en-dessous du lit de la Sézia. Il pourrait s'agir d'artefacts de mesure (mais ils se confirment à chaque relevé et montrent des comportements cycliques cohérents avec les autres tubes…) ou peut-être d'effets parasites liés à la mise en butée du glissement en fond de vallon, se manifestant au contact des couches F2 et F3 (voir géométrie dans le livrable L-A2).

6 SITE N°4 – CORPS

6.1 Présentation du site

6.1.1 Historique et connaissances préalables

La RN85 entre les PR101+720 et 102+000 sur le territoire de la commune de Corps est affectée depuis de nombreuses années par un glissement de terrain actif concernant le versant sud de la vallée de la Sézia (ruisseau de la Salette) entre les cotes NGF 850 et 940.

Ce glissement de terrain se manifeste par le développement d'un réseau de fractures avec rejet vertical et ouverture de plusieurs centimètres et une zone d'affaissement sur la chaussée, nécessitant des travaux d'entretien réguliers (recharges en enrobé). Une seconde zone instable est connue au niveau du virage à l'entrée de Corps. Des désordres sont également présents sur les avoisinants de la route, en particulier des zones chahutées dans le terrain naturel par exemple.

6.1.2 Contexte géologique et hydrogéologique

Le substratum géologique est constitué des terrains sédimentaires du Jurassique suivants, des plus jeunes aux plus anciens :

- les marno-calcaires du Bajocien (notés J_1) ;
- les marno-calcaires de l'Aalénien (notées I_{9b}) ;
- les marno-calcaires du Lias,
    - les marnes du Domérien comprenant des bancs calcaires ocreux roux à la base marquant la transition progressive avec le Carixien Supérieur (notées I_{6a}) ;
    - les calcaires rubanés du Carixien Supérieur (notés I_{5b}), constituant des alternances de calcaires bleus fins et de calcaires ocres plus détritiques et plus argileux ;
    - les calcaires gris du Carixien (notés I_{5a}).

Un accident tectonique supposé, appelé « accident de Corps », met en contact à l'aplomb de la zone du glissement les calcaires du Pliensbachien (Domérien et Carixien appartenant au Lias) au niveau du compartiment oriental surélevé et les marno-calcaires du Dogger (Aalénien et Bajocien), voire les « *Terres Noires* » de l'Oxfordien (notées tN), au niveau du compartiment occidental surbaissé. Ces derniers ont pu être surcreusés par l'érosion glaciaire par rapport aux calcaires plus résistants du Pliensbachien.

Les calcaires du Pliensbachien font partie du flanc occidental du pli anticlinal de Peyrague de direction nord-sud (pendage vers l'ouest égal à environ 70°). Ce pli fait partie du faisceau de plis du Beaumont constituant l'extrémité sud du chaînon du Laton. Les flancs orientaux de ces plis sont généralement affectés par des failles normales, dont la faille de Peyrague.

Les formations glacio-lacustres d'âge Würmien (Quaternaire), résultant du comblement de l'ancien lac glaciaire du Beaumont, constituent la terrasse de Pellafol (ou plateau de Corps), dont la surface est quasi-plane et horizontale, entaillée par la Sézia, affluent du Drac. Il s'agit des argiles sableuses litées du Trièves-Beaumont (argiles varvées), généralement peu à moyennement plastiques. D'anciennes alluvions grossières du Würm (cailloutis) et des dépôts de la glaciation précédente du Riss pourraient être intercalés entre le substratum rocheux et les formations glacio-lacustres. L'épaisseur maximale de ces formations würmiennes atteint près de 120 m à Corps.

Les formations glacio-lacustres sont recouvertes, à l'altitude de Corps, d'une épaisseur variable de galets à matrice silto-sableuse (alluvions plus récentes du Drac et éboulis de pente).

Le contexte hydrogéologique est caractérisé par de petites nappes piégées ou isolées et des circulations d'eau ponctuelles par le jeu de la fracturation dans les terrains rocheux. Ces circulations sont localement importantes avec un débit qui varie en fonction des périodes climatiques. Le substratum rocheux constitue donc un aquifère discontinu de type milieu fissuré. Il n'existe pas de véritable nappe

dans la frange d'altération du substratum rocheux ; des circulations d'eau localisées, de faible importance, y sont toutefois possibles.

Des circulations préférentielles, localement importantes, peuvent être rencontrées dans les niveaux les plus perméables des formations glacio-lacustres très hétérogènes, notamment dans les alluvions anciennes grossières et les lits sableux des argiles grises litées.

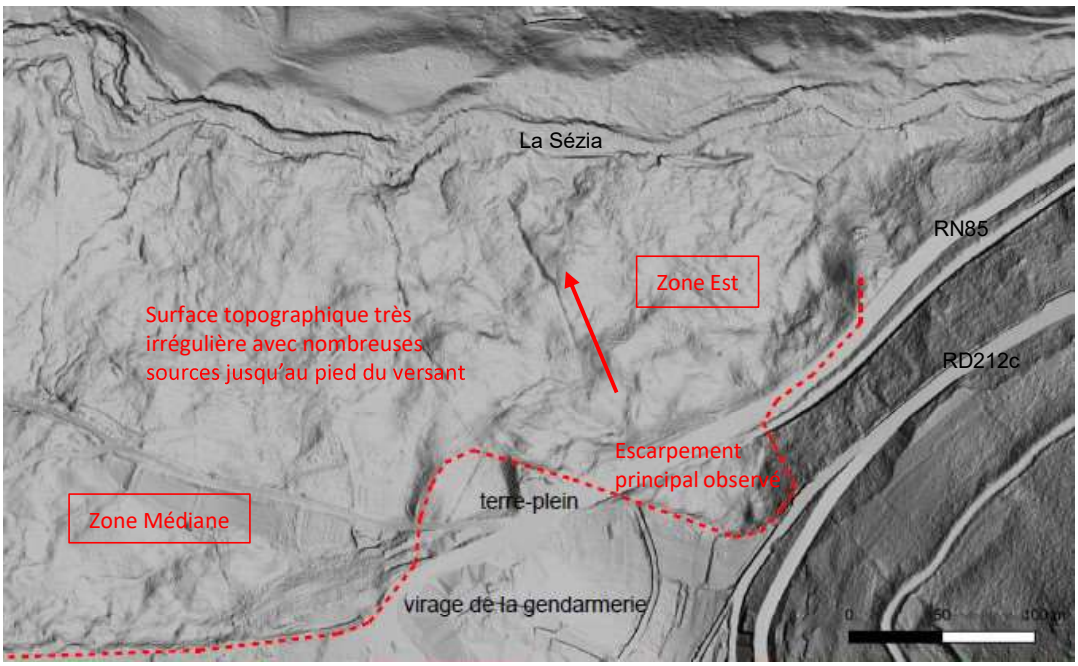
Il existait en amont dans le versant, environ à la cote NGF 980 (soit environ 35 m en contrehaut de la RD212c), un canal d'arrosage reliant une source captée au fond de la vallée de la Sézia à environ 2300 m en amont et le bourg de Corps. Ce canal, construit au début du XIX^{e} siècle, était en service, uniquement pendant les mois d'été et du début d'automne pour l'arrosage des jardins. Il n'était pas étanche : un tiers du débit total était perdu par infiltrations entre le captage et Corps (ADRGT, 1980). Il existait un certain nombre de branchements de particuliers sur ce canal.

Ce canal a été remplacé par une conduite forcée métallique de diamètre 600 mm, enterrée sur toute sa longueur sous le chemin rural de l'ancien canal : cette conduite est un aménagement de la micro-centrale électrique de la Sézia, autorisée en 1984 et toujours en service.

Il n'existe a priori aujourd'hui plus de branchement de particuliers sur cette conduite (regards obturés pour en interdire l'accès). Il n'y a pas de fuite connue au niveau de cette conduite.

6.1.3 Géomorphologie et mouvements de terrain

Le glissement affectant notamment la RN85 est localisé sur l'extrémité orientale d'une large zone instable avérée affectant l'ensemble du versant sud de la vallée de la Sézia, en bordure du plateau de Corps. Cette zone instable s'étend sur un linéaire de plusieurs centaines de mètres. L'extrémité orientale de la zone de glissement semble moins active que le reste du glissement.



Source : Sintégra / Cerema

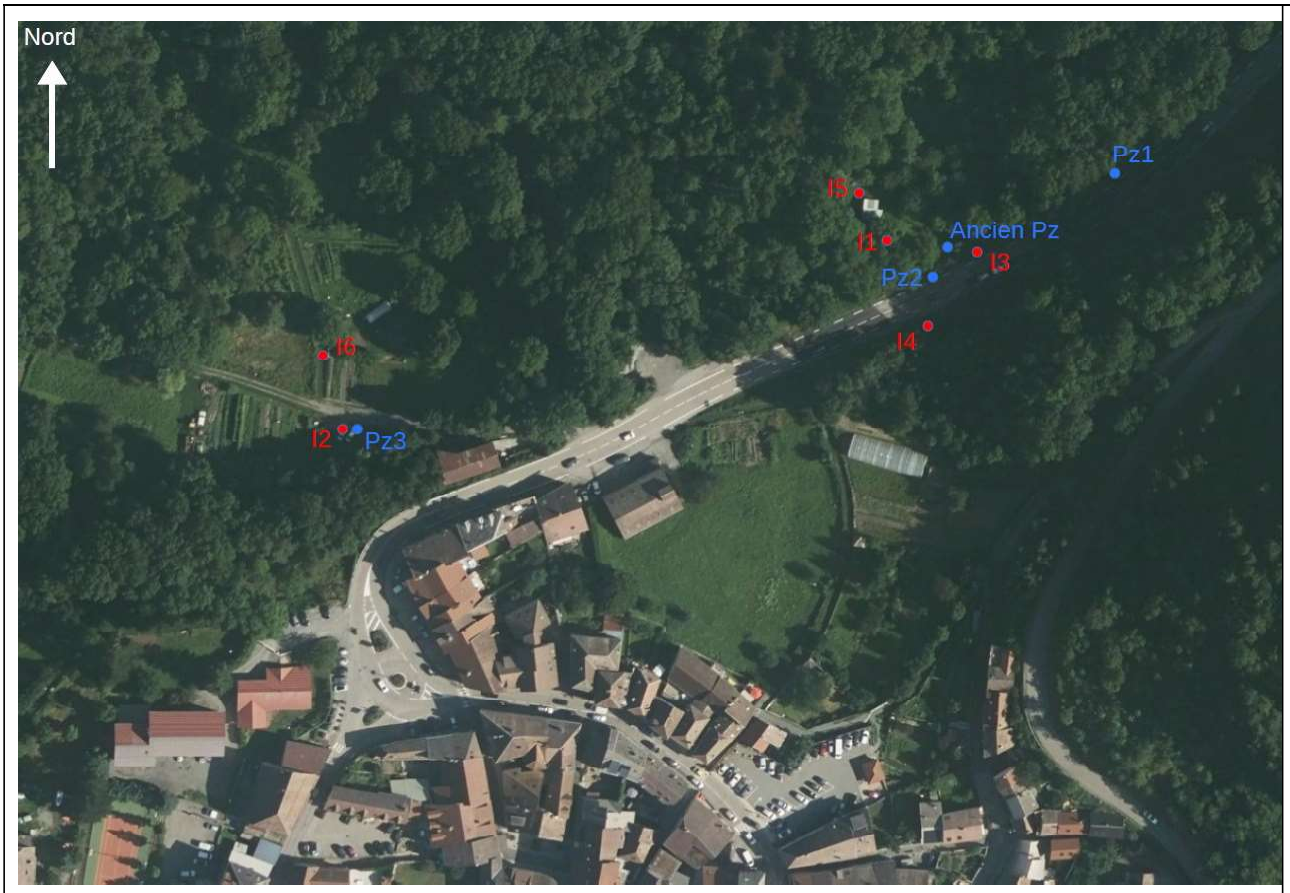
Illustration 57 : Extrait du relevé LiDAR avec localisation (en rouge) de l'escarpement principal

Le versant naturel entre la RN85 et la Sézia présente un dénivelé de l'ordre d'une soixantaine de mètres et modérément penté (16 à 18°). La surface topographique est très irrégulière, présentant des escarpements secondaires, des boursouflures de contre-pente (avec stagnation d'eau) et de nombreuses sources étagées. Les eaux des sources se réinfiltrent rapidement au bout de quelques mètres dans le versant. Au pied de l'escarpement principal affleurent localement des argiles plastiques de couleur grise, très humides.

Le bourrelet de pied se situe dans ou en bordure du lit mineur de la Sézia où il a tendance à éroder progressivement l'ancienne digue construite au 19e siècle. Le cours de la Sézia semble très mobile, avec une migration progressive des méandres et une forte divagation du lit mineur.

6.1.4 Dispositif d'instrumentation

L'instrumentation en place sur le glissement de Corps se répartit comme suit :



Source : Cerema

Illustration 58 : Implantation du dispositif d'instrumentation sur le site de Corps

Tableau n°11 : Récapitulatif du dispositif d'instrumentation

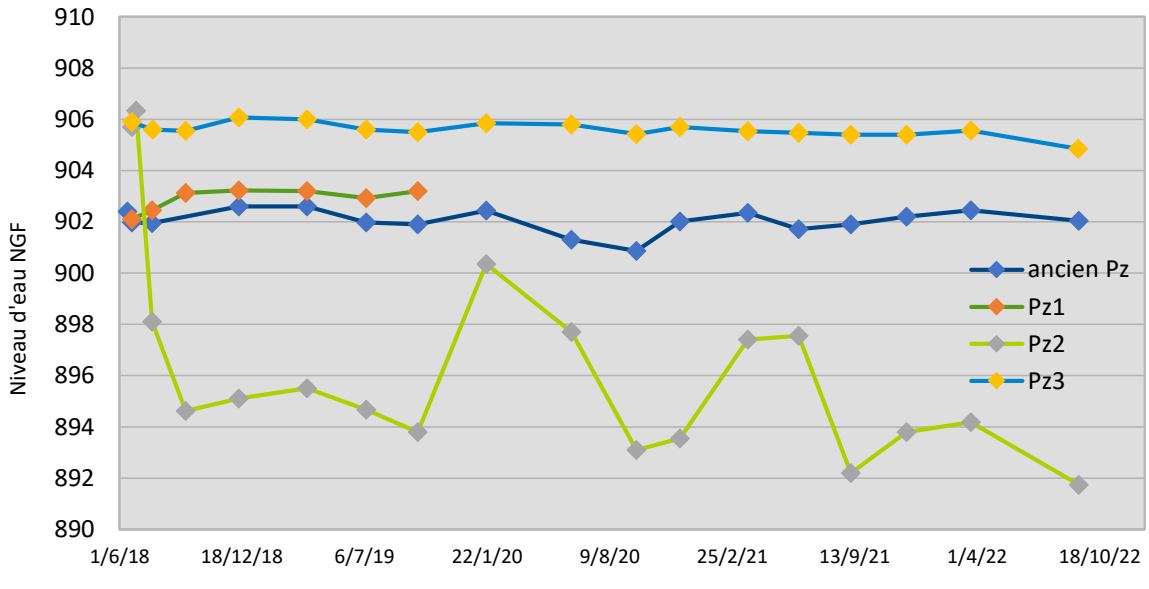
Nom	Type d'instrumentation	Observations	Profondeur	Date
I1	Inclinomètre		29,5 m	2018
I2	Inclinomètre		24,4 m	2018
I3	Inclinomètre	Cisaillé à 10 m en 2020	17, 5m	2018
I4	Inclinomètre		25,5 m	2018
I5	Inclinomètre		18,5 m	2018
I6	Inclinomètre		26,0 m	2018
Ancien Pz	Piézomètre ouvert	Crépiné entre 3 et 12 m/TN		
Pz1	Piézomètre ouvert	Crépiné entre 3 et 12 m/TN	12,0 m	2018
Pz2	Piézomètre ouvert	Crépiné entre 13 et 25 m/TN	25,0 m	2018
Pz3	Piézomètre ouvert	Crépiné entre 15 et 25 m/TN	25,0 m	2018

6.2 Résultats des mesures de niveaux d'eau

6.2.1 Présentation des mesures

Tableau n°12 : Récapitulatif des relevés piézométriques

Date	Ancien Pz		Pz1		Pz2		Pz3		Source Cerema
	N.E (m)	N.E (NGF	N.E (m)	N.E (NGF	N.E (m)	N.E (NGF	N.E (m)	N.E (NGF	
14/06/2018	6,60	902.4	Pas de mesure		Pas de mesure		Pas de mesure		
21/062018	7,03	901.97	6,90	902.10	7,70	905.70	5,00	905.90	
28/06/2018	Pas de mesure		Pas de mesure		7,07	906.33	Pas de mesure		
24/07/2018	7,05	901.95	6,55	902.45	15,30	898.10	5,30	905.60	
17/09/2018	-	-	5,87	903.13	18,78	894.62	5,35	905.55	
13/12/2018	6,40	902.60	5,78	903.22	18,30	895.10	4,83	906.07	
03/04/2019	6,40	902.60	5,80	903.20	17,90	895.50	4,90	906.00	
09/07/2019	7,03	901.97	6,08	902.92	18,73	894.67	5,30	905.60	
01/10/2019	7,10	901.9	5,80	903.20	19,60	893.80	5,40	905.50	
21/01/2020	6,56	902.44	HS		13,05	900.35	5,05	905.85	
08/06/2020	7.70	901.30	-	-	15.70	897.70	5.10	905.80	
22/09/2020	8.14	900.86	-	-	20.30	893.10	5.48	905.42	
02/12/2020	6.99	902.01	-	-	19.85	893.55	5.20	905.70	
23/03/2021	6.65	902.35	-	-	16.00	897.40	5.37	905.53	
14/06/2021	7.29	901.71	-	-	15.85	897.55	5.43	905.47	
07/09/2021	7.10	901.90	-	-	21.20	892.20	5.50	905.40	
07/12/2021	6.80	902.20	-	-	19.60	893.80	5.50	905.40	
22/03/2022	6.55	902.45	-	-	19.22	894.18	5.34	905.56	
14/09/2022	6.96	902.04	-	-	21.66	891.74	6.05	904.85	



Source : Cerema

Illustration 59 : Courbes piézométriques du site de Corps

Le piézomètre Pz1 est hors service depuis l'automne 2019 suite à des travaux de réfection de la RN85 ; le piézomètre implanté sur l'emprise de la chaussée a été recouvert d'enrobé et n'est plus accessible.

La mesure en Pz2 du 28 juin 2018 était une mesure pour vérifier si la mesure effectuée le 21 juin correspondait à un niveau d'eau de forage (terminé quelques jours auparavant) ou à un niveau d'eau stabilisé de la nappe. Ces deux premières mesures, en incohérence avec les niveaux relevés ultérieurement, ne sont vraisemblablement pas à considérer comme représentatives.

6.2.2 Synthèse des mesures piézométriques

➢ *Zone Est du glissement*

Pour les piézomètres Ancien Pz et Pz1 (crépiné entre 3 m et 12 m de profondeur dans les sables graveleux de surface et le substratum calcaire), les niveaux d'eau s'équilibrent au sein des sables graveleux de surface, jusqu'au toit du substratum calcaire moins perméable pour les niveaux minimaux.

Pour le piézomètre Pz2 (crépiné entre 13 et de 25 m de profondeur uniquement dans les formations glacio-lacustres), le niveau d'eau mesuré est situé au sein des argiles grises litées. Le pied du tube crépiné se situe au sein d'un passage plus graveleux et plus perméable entre 23 et 25 m de profondeur. Le niveau d'eau mesuré dans ce tube n'est probablement pas représentatif du niveau piézométrique dans les terrains superficiels (une chute brutale du niveau d'eau d'environ 8 m à la fin du premier mois de service a ainsi été mesurée, due à un probable décolmatage).

L'évolution temporelle des niveaux d'eau dans les trois piézomètres montre des cycles saisonniers (fortement marqués sur Pz2, mais légers dans les autres forages), avec :

- des niveaux les plus hauts en hiver et au printemps,
- des niveaux les plus bas en automne.

Il ne semble pas y avoir de décalage temporel notable entre les dates des précipitations annuelles et des niveaux d'eau les plus hauts dans les trois piézomètres, mais la fréquence des mesures manuelles ne permet pas une vision précise de la réactivité de la piézométrie aux contraintes climatiques.

La conductivité électrique à 25°C des eaux collectées au voisinage de la zone de glissement varie entre 725 µS/cm et 959 µS/cm, ce qui traduit une minéralisation importante. Cette minéralisation peut être acquise lors de longs trajets et/ou lors de longs temps de parcours dans les discontinuités du massif calcaire.

➢ *Zone médiane du glissement :*

Pour le piézomètre Pz3 (crépiné entre 15 m et de 25 m de profondeur, uniquement dans les argiles grises litées), le niveau d'eau s'équilibre dans les sables graveleux de surface, environ 1,0 à 1,7 m au-dessus de l'interface entre ces sables graveleux et les argiles grises litées.

L'évolution temporelle du niveau d'eau dans le piézomètre Pz3 montre des cycles saisonniers, avec :

- des niveaux les plus hauts en hiver (niveau maximal mesuré : 4,8 m / TN) ;
- des niveaux les plus bas à la fin de l'été et au début de l'automne (niveau minimal mesurée : 5,5 m / TN).

Il ne semble pas y avoir de décalage temporel notable entre les dates des précipitations annuelles et des niveaux d'eau les plus hauts dans le piézomètre Pz3. L'intervalle de variation du niveau d'eau dans le piézomètre Pz3, situé en aval de la tranchée drainante, est relativement faible (de l'ordre de 0,7 m) et inférieur à ceux mesurés au niveau du glissement Est.

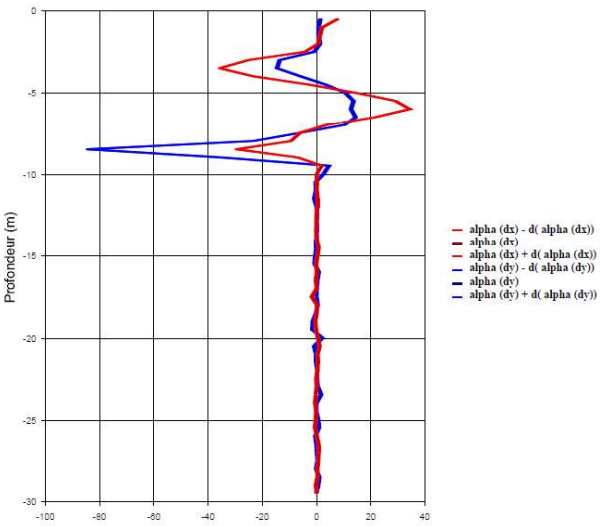
6.3 Résultats des mesures inclinométriques

6.3.1 Présentation des mesures

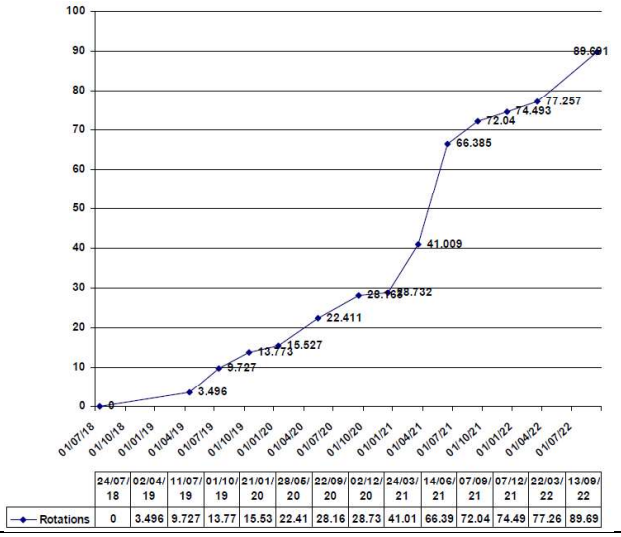
La mesure zéro date de juillet 2018. Treize autres mesures ont été effectuées, la dernière en septembre 2022. Les mesures sont effectuées tous les trois mois afin d'illustrer les saisonnalités. Cependant en

2020 les mesures ont été perturbées en raison du confinement sanitaire (pas de mesure au début du printemps). Les résultats des mesures inclinométriques sont présentés ci-après.

6.3.1.1 *Inclinomètre 1*

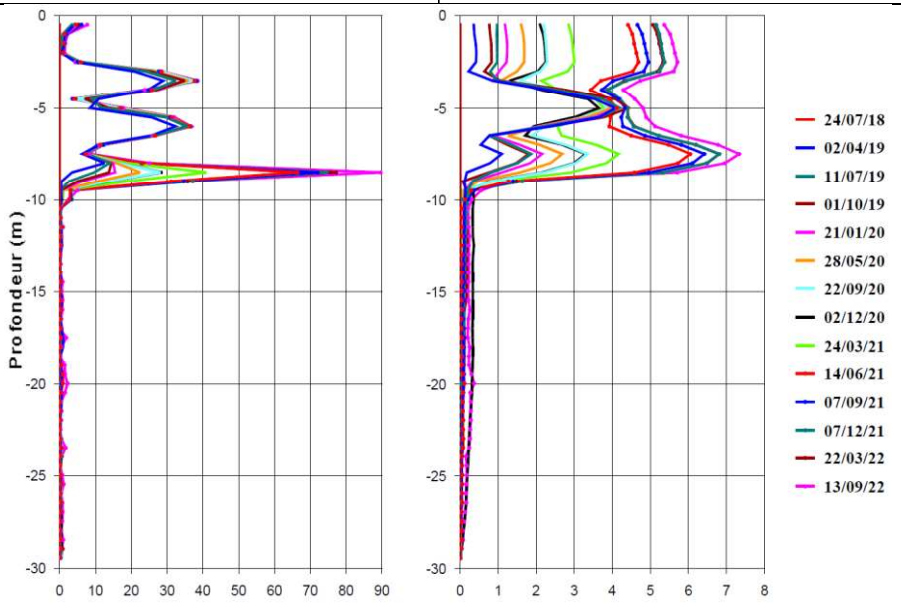


60a. Rotations observées en I1 (septembre 2022)



	24/07/18	02/04/19	11/07/19	01/10/19	21/01/20	28/05/20	22/09/20	02/12/20	24/03/21	14/06/21	07/09/21	07/12/21	22/03/22	13/09/22
Rotations	0	3.496	9.727	13.77	15.53	22.41	28.16	28.73	41.01	66.39	72.04	74.49	77.26	89.69

60b. Rotation locale dans le temps à 8,5 m de prof.(rad.10^{-3})



60c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I1

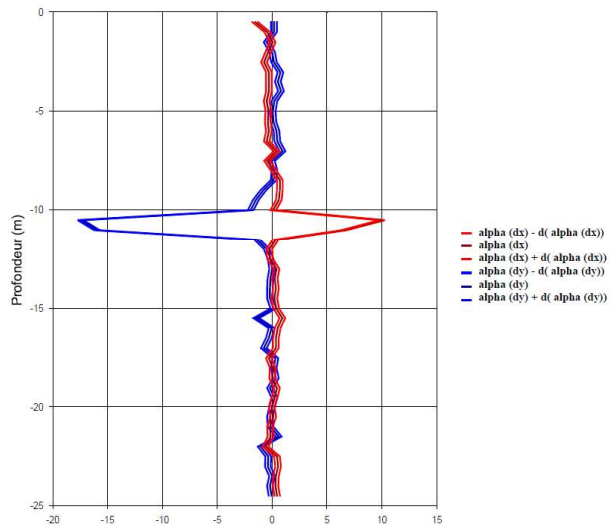
Illustration 60 : Résultats des mesures inclinométriques en I1

Source : Cerema

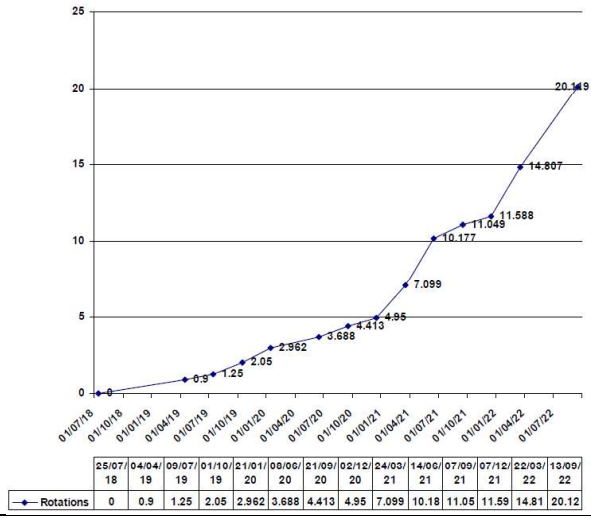
L'inclinomètre I1 donne une surface de glissement à 8,5 m de profondeur, avec un pic de rotation de 90.10^{-3} rd lors de la dernière mesure en septembre 2022. Le mouvement est relativement discontinu depuis l'origine des mesures avec des accélérations aux printemps et des ralentissements à l'automne.

Il est supposé qu'il y ait un défaut de scellement du tube entre 3 et 7 m de profondeur lors de la mesure initiale du 24/07/2018, induisant une déformation apparente non évolutive du tube lors des mesures suivantes. Ce défaut de scellement se caractérise par un défaut récurrent à 4,5 m de profondeur.

6.3.1.2 *Inclinomètre 2*

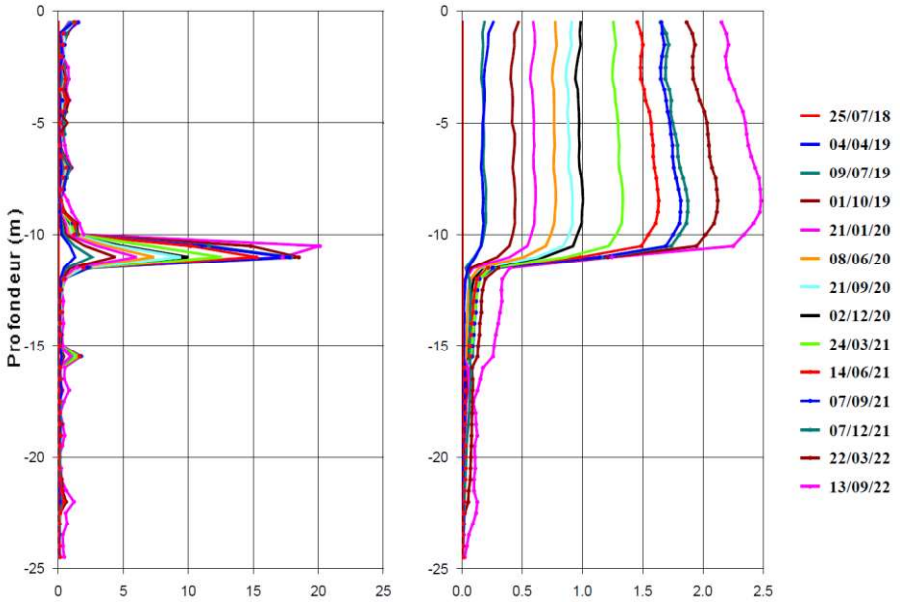


61a. Rotations observées en I2 (septembre 2022)



61b. Rotation locale dans le temps à 6,5 m de prof.(rad.10^{-3})

Source : Cerema

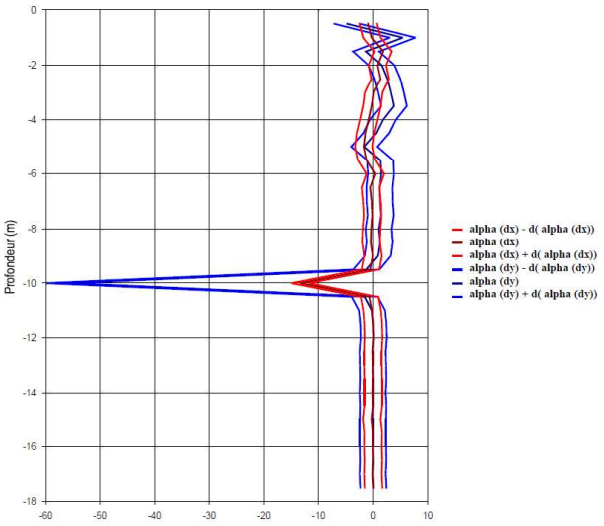


61c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I2

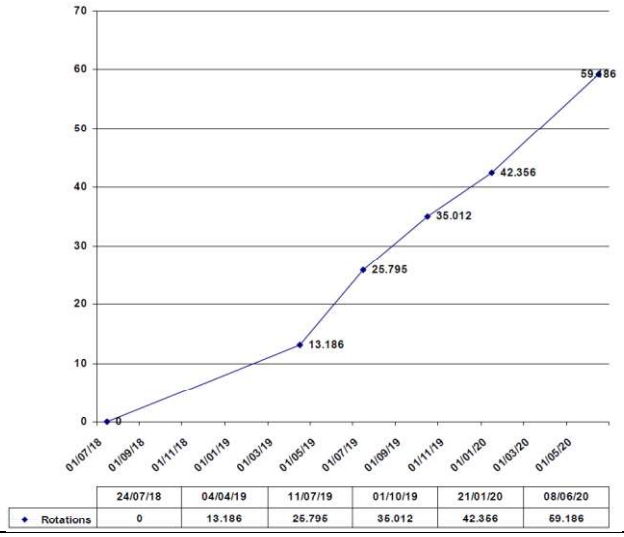
Illustration 61 : Résultats des mesures inclinométriques en I2

La surface de glissement a été reconnue à 11 m de profondeur, avec une rotation maximale de 20.10^{-3} rad et un déplacement cumulé de 2 à 2,5 cm (septembre 2022). Le mouvement est relativement continu depuis l'origine des mesures : seule l'année 2021 semble montrer un effet saisonnier, mais il n'est pas clairement confirmé sur les autres années.

6.3.1.3 *Inclinomètre 3*

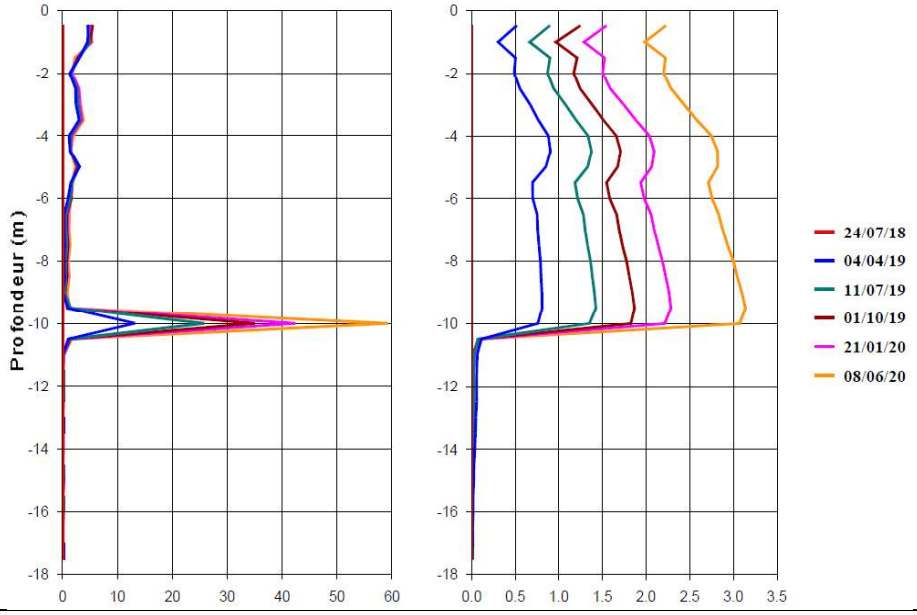


62a. Rotations observées en I3 (juin 2020)



	24/07/18	04/04/19	11/07/19	01/10/19	21/01/20	08/06/20
Rotations	0	13.186	26.795	35.012	42.356	59.186

62b. Rotation locale dans le temps à,5 m de prof. (rad.10^{-3})



62c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I3

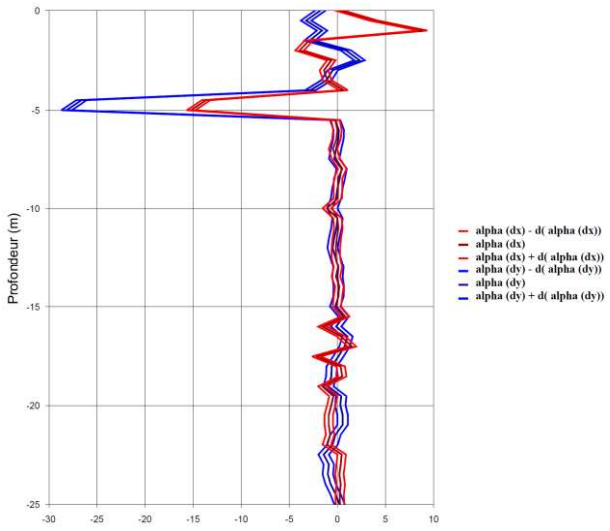
Illustration 62 : Résultats des mesures inclinométriques en I3

Source : Cerema

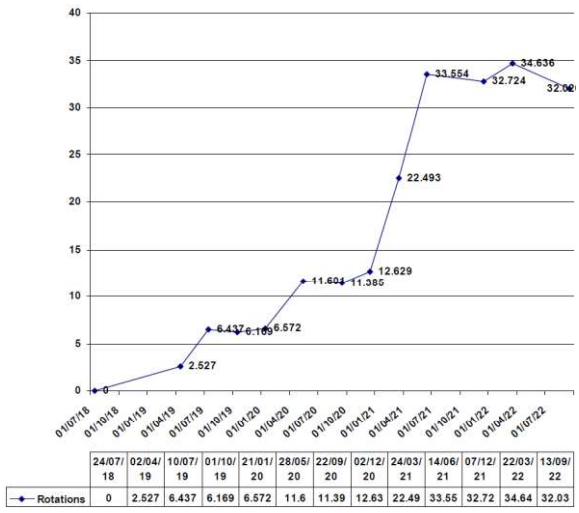
L'inclinomètre I3 indique une surface de glissement à 10 m de profondeur, avec une rotation maximale de l'ordre de 60.10^{-3} rad et un déplacement cumulé de 3,2 cm en juin 2020 (dernière mesure). Le tube a ensuite cisaillé car trop déformé et il a été impossible de poursuivre les mesures.

L'analyse des courbes montre un léger basculement du massif en cours de glissement vers l'amont. Le déplacement est relativement continu depuis l'origine des mesures jusqu'au cisaillement avec une légère accélération aux printemps 2019 et 2020.

6.3.1.4 *Inclinomètre 4*

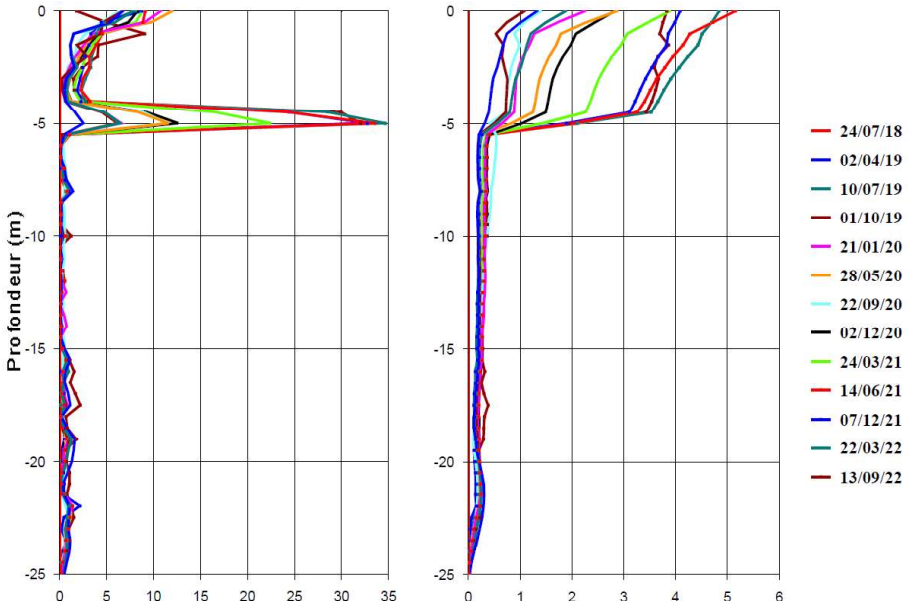


63a. Rotations observées en I4 (septembre 2022)



63b. Rotation locale dans le temps à 5 m de prof. (rad.10^{-3})

Source : Cerema

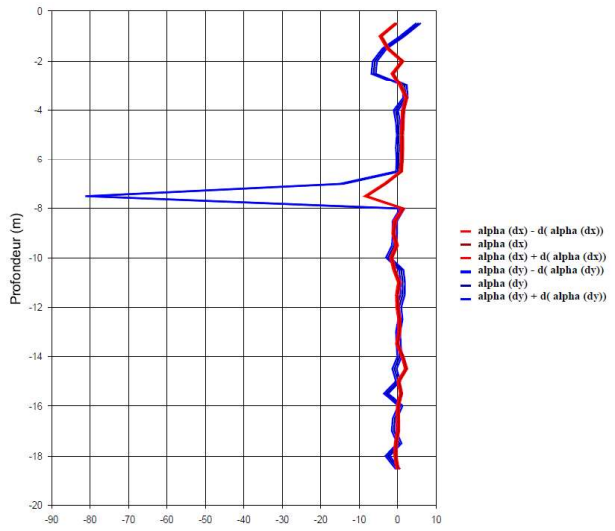


63c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I4

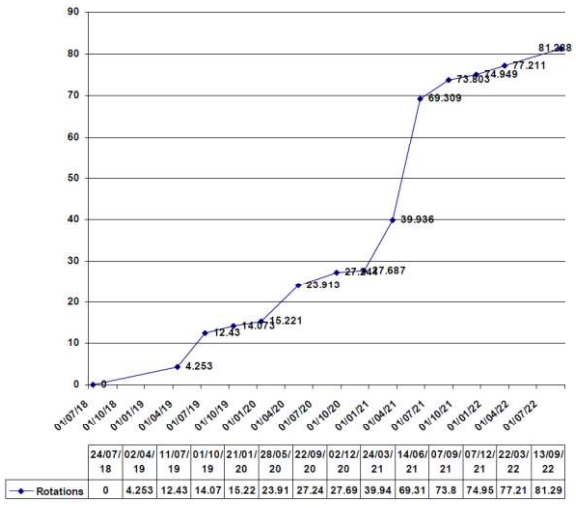
Illustration 63 : Résultats des mesures inclinométriques en I4

L'inclinomètre I4 donne une surface de glissement vers 5,0 m de profondeur, avec une rotation maximale d'environ 32.10^{-3} rad et un déplacement cumulé de 3,5 cm (septembre 2022). On observe un mouvement de translation relativement discontinu depuis l'origine des mesures avec des accélérations lors des printemps et des ralentissements à l'automne et en hiver. Les effets saisonniers sont nets, contrairement aux tubes 1 à 3, mais ils n'ont pas été confirmés en 2022 (année particulièrement sèche) qui a marqué une certaine stabilité des mouvements relevés.

6.3.1.5 *Inclinomètre 5*

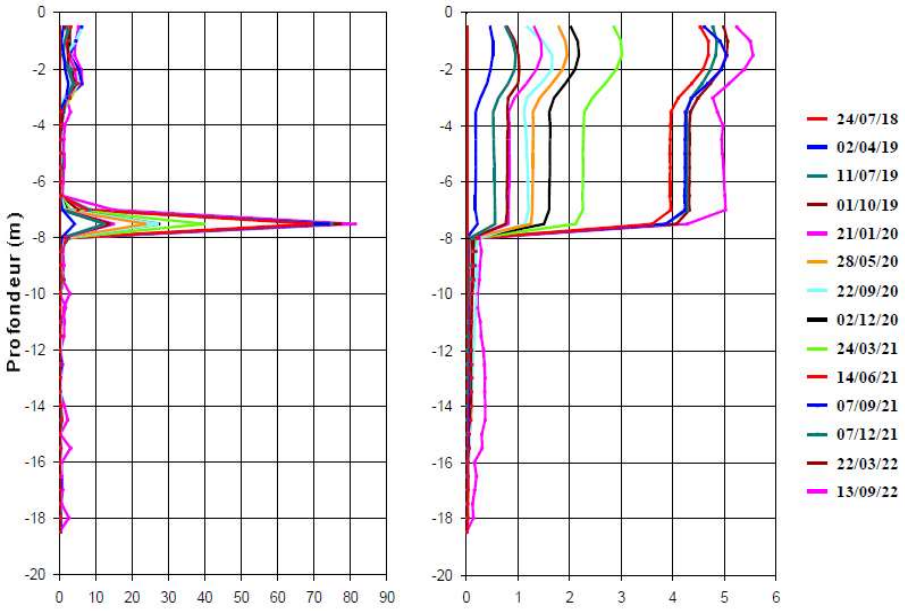


64a. Rotations observées en I5 (septembre 2022)



	24/07/18	02/04/19	11/07/19	01/10/19	21/01/20	28/05/20	22/09/20	02/12/20	24/03/21	14/06/21	07/09/21	07/12/21	22/03/22	13/09/22
Rotations	0	4.253	12.43	14.07	15.22	23.91	27.24	27.69	39.94	69.31	73.8	74.95	77.21	81.29

64b. Rotation locale dans le temps à 7,5 m de prof. (rad.10^{-3})



64c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I5

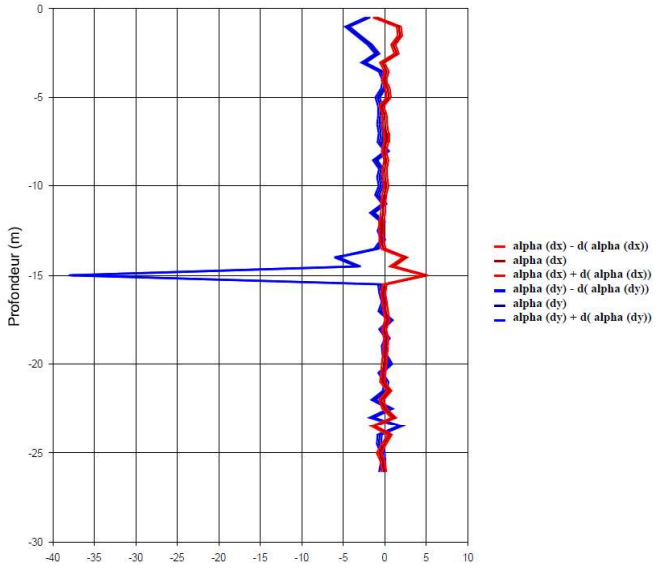
Illustration 64 : Résultats des mesures inclinométriques en I5

Source : Cerema

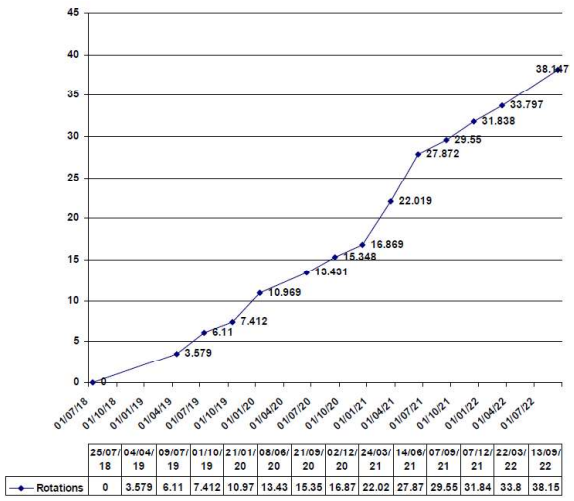
La surface de glissement est relevée à 7,5 m de profondeur, avec des mouvements de reptation légers entre 0 et 3,5 m. On observe également un mouvement de translation relativement discontinu depuis l'origine des mesures avec des accélérations au printemps et des ralentissements à l'automne.

6.3.1.6 *Inclinomètre 6*

L'inclinomètre I6 indique une surface de rupture à 15 m de profondeur avec une rotation maximale de 38.10^{-3} rad et un déplacement cumulé de l'ordre de 3 cm. Le déplacement est relativement continu depuis le début des mesures.



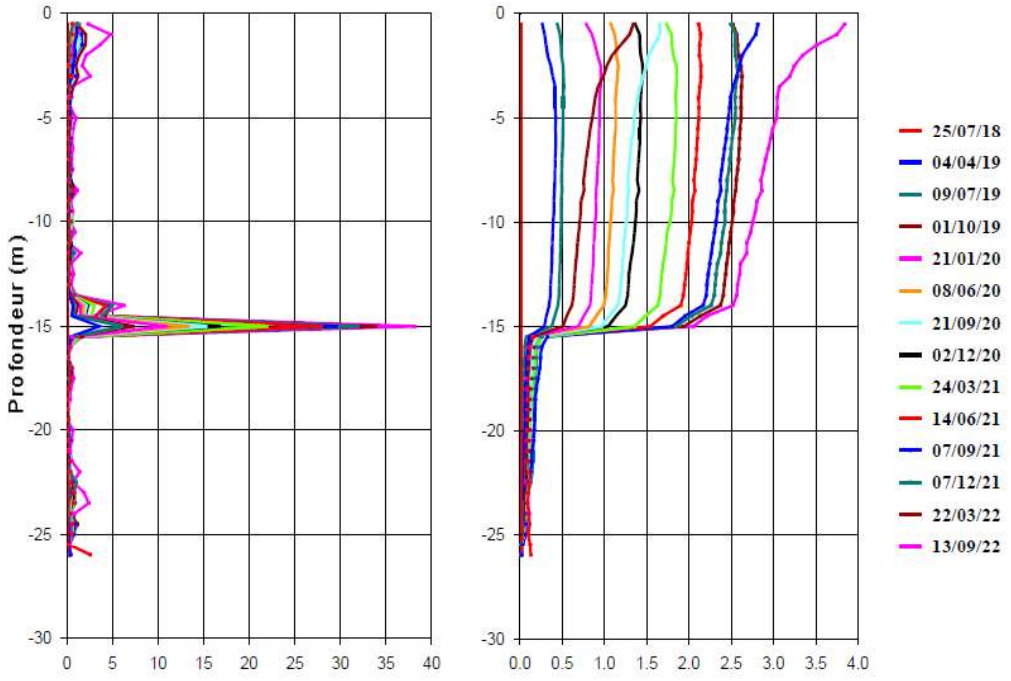
65a. Rotations observées en I6 (septembre 2022)



	25/07/18	04/04/19	09/07/19	01/10/19	21/01/20	08/06/20	21/09/20	02/12/20	24/03/21	14/06/21	07/09/21	07/12/21	22/03/22	13/09/22
Rotations	0	3.579	6.11	7.412	10.97	13.43	15.35	16.87	22.02	27.87	29.55	31.84	33.8	38.15

65b. Rotation loc. dans le temps à 15 m de prof.(rad.10^{-3})

Source : Cerema



65c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en I6

Illustration 65 : Résultats des mesures inclinométriques en I6

6.3.2 Synthèse des mesures inclinométriques

Les mesures inclinométriques mettent en évidence une surface de glissement située dans la frange supérieure, plus altérée, des argiles grises litées. Les déplacements au niveau du glissement Est (I1, I4 et I5) sont relativement discontinus (alternance de phases de stabilisation temporaire lors des périodes de niveaux d'eau bas et d'accélération lors des périodes de niveaux d'eau hauts), alors que les déplacements au niveau de la partie médiane (I2 et I6) sont plus continus.

La zone la plus active est la partie supérieure du glissement est (inclinomètres I1, I3 et I4) avec des vitesses de l'ordre de 10 à 15 mm/an. Les vitesses de la partie inférieure du glissement Est (I5) sont plus proches de celles de la partie médiane (I2 et I6) et sont très certainement représentatives de l'ensemble du glissement de terrain (4 à 8 mm/an). Les vitesses moyennes du glissement de terrain sur

la période du 24/07/2018 au 14/09/2022 sont en nette augmentation (environ 15 à 20 %) par rapport à celles sur la période du 24/07/2018 au 08/06/2020. Cette augmentation semble être uniforme pour l'ensemble du glissement de terrain, sauf au niveau de la partie supérieure du glissement Est (augmentation modérée, voire localement ralentissement). La surface de glissement au niveau de la partie médiane semble être plus profonde qu'au niveau du glissement Est.

L'ensemble du glissement de terrain ne se comporte pas comme un seul bloc rigide et indéformable (présence probable de glissements emboîtés, reptations superficielles, etc.) ; la partie supérieure du glissement Est semble en particulier présenter dans certaines zones des déformations qui lui sont propres.

6.4 Synthèse

Les désordres observés sur la chaussée de la RN85 et dans les zones attenantes sont les manifestations d'un vaste glissement de terrain naturel, bien délimité en surface et en profondeur, dont la surface de glissement est située dans la frange supérieure, plus altérée, des argiles grises litées.

Les intervalles de variation des niveaux d'eau semblent être légèrement plus élevés au niveau du glissement Est que dans la partie médiane du glissement de terrain. En dehors du piézomètre Pz2, qui présente un comportement particulier, les amplitudes des variations saisonnières restent toutefois modérées. La surface de cisaillement, aussi bien au niveau du glissement Est que de la partie médiane, est donc alimentée en permanence par des circulations d'eau, ce qui se manifeste par une activité relativement constante du glissement dans certains inclinomètres. Pour d'autres, il semble exister un seuil piézométrique au-dessus duquel se produisent les phases principales d'accélération, généralement en période hivernale.

En plus de l'érosion torrentielle documentée du pied de versant par la Sézia, l'instrumentation met donc en évidence une contribution de l'élévation des niveaux des circulations d'eau dans les sables graveleux de surface et les argiles grises litées parmi les facteurs déclencheurs.

7 SITE N°5 – LE MOTTY

7.1 Présentation du site

7.1.1 Historique et connaissances préalables

Le site du Motty est localisé sur la commune de Saint-Firmin (05). Sur ce secteur, la RN85 se situe en rive droite du Drac et est orientée dans une direction nord-sud. Le Drac est également orienté selon la même direction. Son lit change régulièrement de tracé venant parfois saper ses berges en rive droite, parfois ses berges en rive gauche (tracé en tresse).

Le site du Motty présente des pathologies significatives, affectant la route, mais aussi fortement les maisons et les terrains naturels situés dans l'emprise du glissement. Il est suivi et étudié par le Cerema Méditerranée dans le cadre d'études de renforcement des terrains autour de la RN85. Il a fait l'objet d'une importante campagne de reconnaissances géotechniques en 2017, environ un an avant le début du projet MLA3, suivie d'essais de laboratoire, de suivis instrumentés et de rapports d'études ou de calculs successifs.

Sont présentés ici les résultats de l'instrumentation mise en place en 2017 et suivie jusqu'en 2020 dans le cadre d'études de diagnostic géotechnique G5 et d'estimation de la faisabilité et du coût de renforcement pour la stabilisation des glissements affectant la RN85 sur ce secteur. Les relevés correspondants n'ont donc pas été effectués dans le cadre du projet MLA3, seule une exploitation des résultats est détaillée ici au titre de retour d'expérience (et mise à disposition des valeurs) de l'instrumentation mise en œuvre sur ce glissement lent.

7.1.2 Contexte géologique

Le contexte géologique sur ce secteur d'étude se caractérise par des dépôts quaternaires, principalement des moraines et des dépôts fluviatiles avec vraisemblablement des dépôts lacustres. Des affleurements rocheux sont également observables en amont de la RN85, constitués de calcaires de l'Aalénien (I_9).

L'histoire géologique du site est complexe, se caractérisant par une stratigraphie irrégulière. Les glaciations successives du Würm, les divagations du cours du Drac et les glissements ont modelé de manière plus ou moins enchevêtrée les différentes formations, que l'on retrouve ou non dans les forages. Les formations litées glacio-lacustres notamment sont moins constantes que sur les autres sites du projet MLA3, ce qui est cohérent avec l'implantation du site du Motty plus proche des ensembles glaciaires de la Séveraisse et du Drac que du lac d'obturation.

Le Drac reste à ce jour un élément majeur de la morphologie du site ; il présente un lit large, en tresse, dont le tracé change régulièrement et peut venir saper les berges, parfois en rive droite, parfois en rive gauche.

7.1.3 Géomorphologie et mouvements de terrain

L'instabilité de cette zone est bien connue et identifiée sur la carte géologique du BRGM, à travers diverses formations actives (voir les autres livrets du projet) :

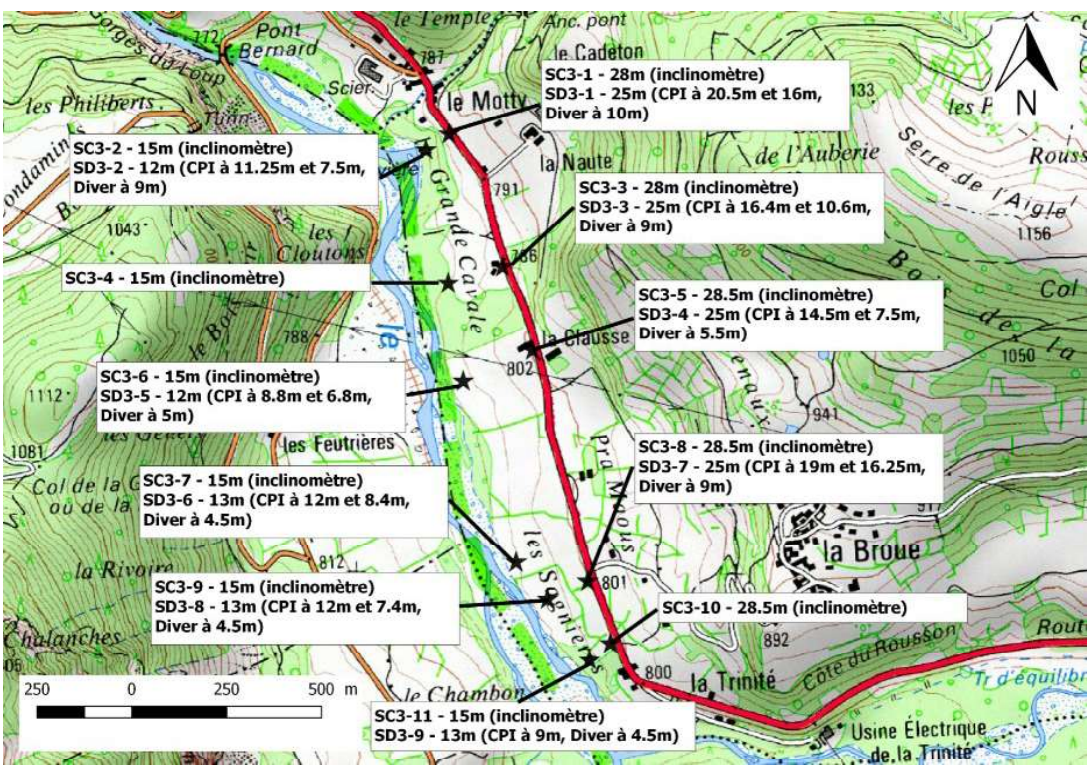
- gl/Gw : glissements en masse d'alluvions glaciaires et moraines du Würm ancien (Würm II) ;
- Lw1 : argiles lacustres du début du Würm II ;
- gl/Fw1b : glissements en masse d'alluvions fluviatiles et terrasse du Würm ancien (Würm II) (stade I b) ;
- gl/Gx : glissements en masse d'alluvions glaciaires et moraines du Würm récent (Würm III) ;
- Fw1a : terrasse inférieure würmienne ancienne du Drac (en profondeur, n'affleure pas sur la zone d'étude)

Au Nord, la zone est traversée par la faille orientale d'Aspres-les-Corps (FAe), accident régional sub-vertical de grande extension (plusieurs dizaines de km) orienté ici principalement NE-SW.

Dans l'ensemble, les glissements observés concernent des épaisseurs variables, avec des surfaces de cisaillement généralement comprises entre 7 et 15 m, mais pouvant atteindre ponctuellement une profondeur de 25 m. Contrairement aux autres sites étudiés ici, les surfaces de cisaillement (mises en évidence par les inclinomètres, voir plus loin) ne se situent pas systématiques au sein des formations d'argiles glacio-lacustres (ou de leur contact). On retrouve également des zones de rupture au sein des formations alluvionnaires du Drac Fw1a/b, qui peuvent contenir des passages argileux (d'aspect proche).

7.1.4 Dispositif d'instrumentation

Le dispositif d'instrumentation sur le site du Motty est récapitulé sur le plan ci-après.



Source : Cerema Méditerranée

Illustration 66 : Implantation du dispositif d'instrumentation sur le site du Motty

L'analyse des relevés inclinométriques et piézométriques est établie selon six profils (1 à 6) tels que définis dans le cadre du rapport de synthèse et de suivi du Cerema Méditerranée (Réf. D20MX0093-1 – Avril 2020) et récapitulés dans le tableau ci-dessous.

7.2 Résultats des mesures de niveaux d'eau

7.2.1 Présentation des mesures

Le suivi hydrogéologique du site du Motty a été effectué à partir de dix-sept cellules de pression interstitielle (CPI) enterrées et de huit sondes piézométriques autonomes de type *Diver* placées dans des tubes ouverts. Les mesures ont été menées entre décembre 2017 et décembre 2019. L'instrumentation est répartie comme suit :

- Profil 1,
  - Sondage SD3-1, CPI à 16 et 20,5 m + Diver à 10 m de profondeur ;
  - Sondage SD3-2, CPI à 7,25 et 11,25 m + Diver à 9 m de profondeur ;
- Profil 2,
  - Sondage SD3-3, CPI à 10,6 et 16,4 m + Diver à 9 m de profondeur ;

- Profil 3,
  - Sondage SD3-4, CPI à 7,5 et 14,5 l + Diver à 5,5 m de profondeur ;
  - Sondage SD3-5, CPI à 6,8 et 8,8 m + Diver à 5 m de profondeur ;
- Profil 4,
  - Sondage SD3-6, CPI à 8,4 et 12,0 m + Diver à 4,5 m de profondeur ;
- Profil 5,
  - SD3-7, CPI à 16,25 et 19,0 m + Diver à 9,0 m de profondeur ;
  - SD3-8, CPI à 7,4 et 12,0 m + Diver à 4,5 m de profondeur ;
- Profil 6,
  - SD3-9, CPI à 9,0 + Diver à 4,5 m de profondeur.

En préambule de la présentation des résultats des mesures de suivi piézométrique, il convient de préciser que sur les neuf sondages piézométriques réalisés, SD3-5 n'a jamais fourni de données, SD3-7 n'en fournit plus depuis mars 2020 et SD3-9 n'en fournit plus depuis décembre 2019. Par ailleurs, les cotes de pose des sondes autonomes *Diver* et de certaines cellules de pression interstitielle sont manifestement erronées (niveau piézométrique en piézomètre ouvert au-dessus du terrain naturel) et n'ont pas pu être corrigées par défaut d'intervention de l'entreprise en charge de la mise en œuvre de l'instrumentation. En effet, la sonde autonome *Diver*, permettant de corriger (par la pression atmosphérique) les valeurs relevées, n'a jamais été calibrée par l'entreprise en charge de l'équipement des sondages.

Le suivi du niveau piézométrique au niveau des huit sondages exploitables est présenté ci-après. La pluviométrie journalière, mesurée au niveau de la station Météo France de Gap, est mise en parallèle afin d'évaluer le comportement des sondages piézométriques.

Nota : les corrections barométriques n'étant pas disponibles, les mesures issues des cellules de pression interstitielle ne sont donc pas corrigées ; les niveaux réels peuvent donc être légèrement différents de ceux mesurés (incertitude de l'ordre de 50 cm).

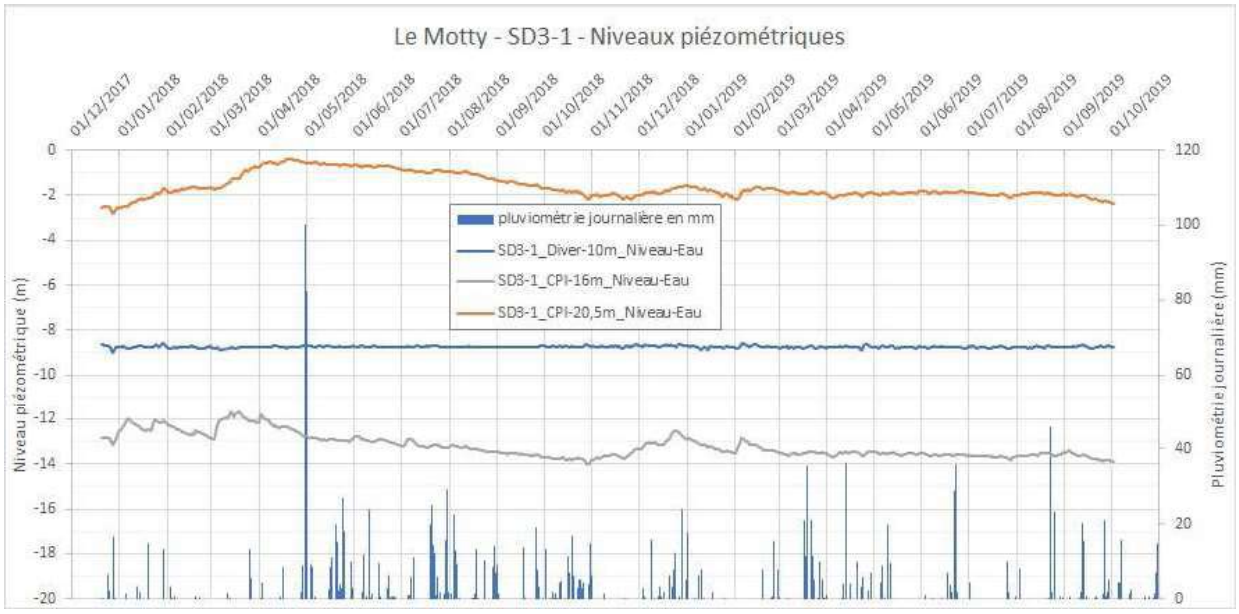
7.2.1.1 *Profil 1 – Piézomètres SD3-1 et SD3-2*

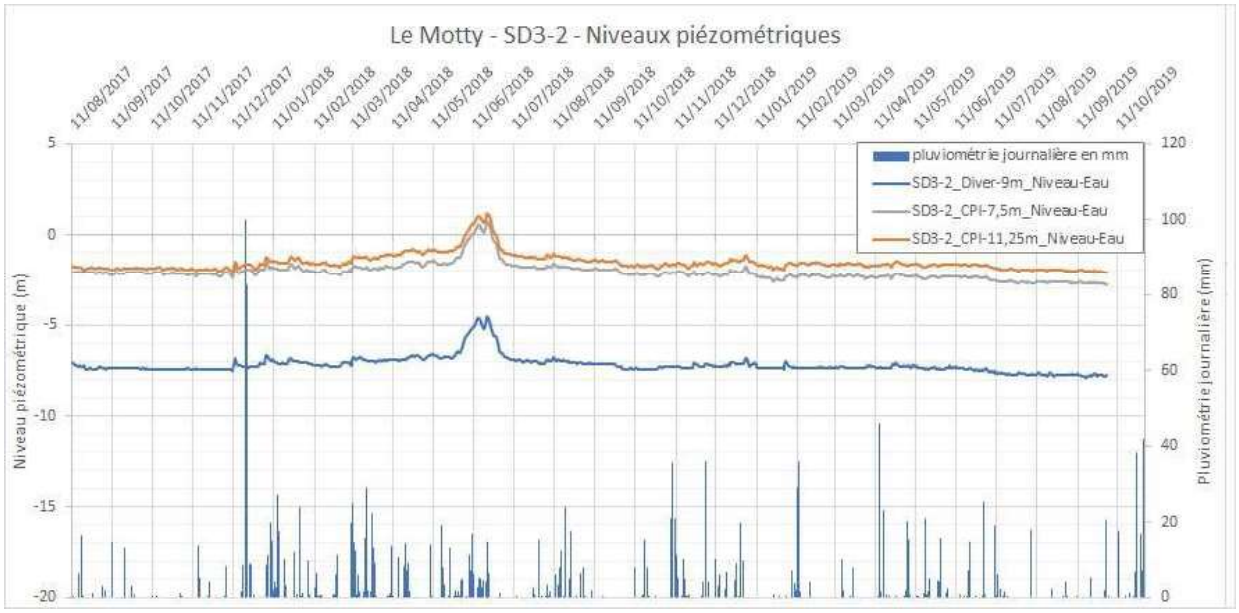
L'analyse des mesures des différents dispositifs montre la différence de comportement entre les sondes autonomes DIVER et les CPI équipant le sondage SD3-1 et celles équipant le sondage SD3-2.

En effet, la sonde DIVER de SD3-1, situé à 10 m de profondeur indique une surface piézométrique stable, située globalement à 8,5 m de profondeur, alors que les CPI situées à 16 et 20,5 m de profondeur indiquent des fluctuations consécutives aux précipitations et donc à la recharge.

Les équipements piézométriques du sondage SD3-2 sont, quant à eux, en phase et probablement affectés par les variations de niveau du Drac compte-tenu de la position du sondage.

La CPI positionnée à 20,5 m de profondeur sur SD3-1 et celles situées à 7,5 m (cote de pose manifestement erronée) et 11,25 m de profondeur sur SD3-2 indiquent la présence d'une nappe captive avec des surpressions interstitielles importantes et un éventuel artésianisme pour le sondage SD3-2.



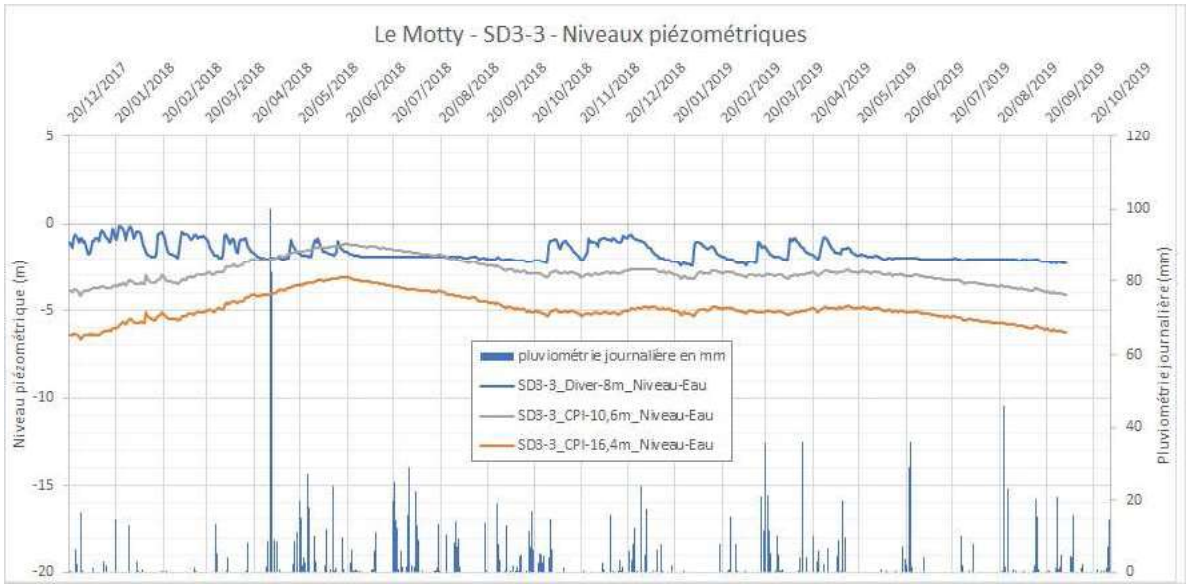


Source : Cerema

Illustration 67 : suivi piézométrique au droit du profil 1 entre décembre 2017 et décembre 2019

7.2.1.2 *Profil 2 – Piézomètre SD3-3*

Les CPI mises en œuvre et les sondes autonomes Diver montrent des comportements différents. Les CPI, plus profondes, indiquent un amortissement, avec un effet de recharge et de décharge à période annuelle (nappe captive ?). La sonde autonome Diver montre en revanche une réactivité aux précipitations avec des décharges et recharges courtes autour d'un niveau moyen relativement constant. Cette sensibilité n'est présente que sur la période hivernale et est quasi-inexistante durant la période estivale, ce qui se corrèle avec les comportements saisonniers observés sur les nappes hautes dans les piézomètres des profils suivants. La nappe est sub-affleurante au niveau de la RN 85 avec une variation annuelle de l'ordre de 2 m.



Source : Cerema

Illustration 68 : suivi piézométrique au droit du profil 2 entre décembre 2017 et décembre 2019

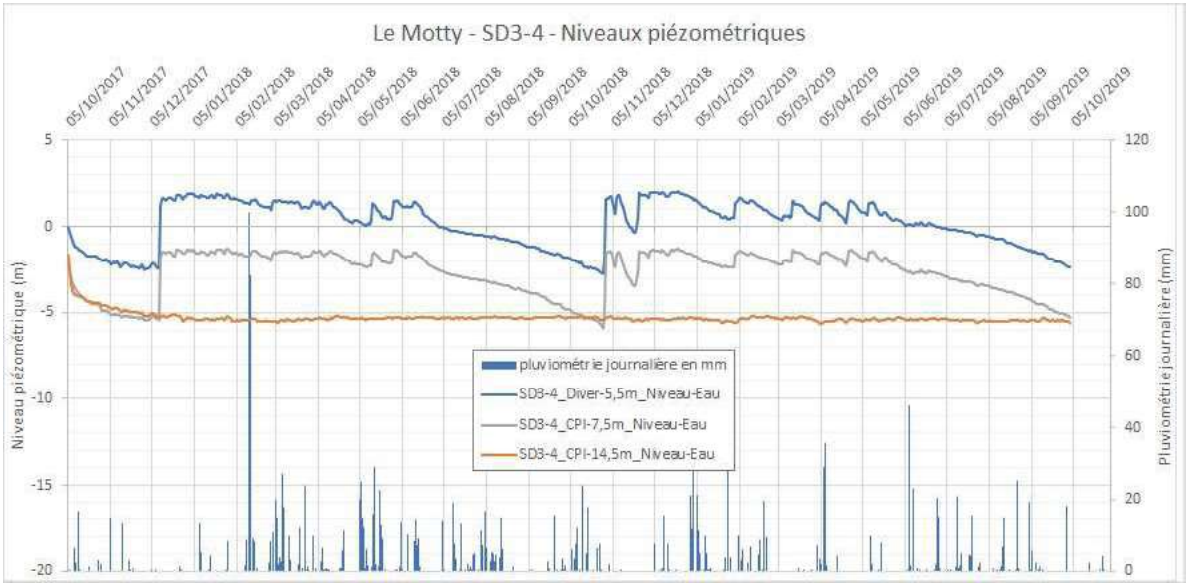
Profil 3 – Piézomètres SD3-4 et SD3-5

Les équipements du sondage SD3-5 n'ont jamais fonctionné.

Pour SD3-4, la CPI mise en œuvre à 14,5 m de profondeur ne montre pas de fluctuation de la nappe au cours de l'année, comme le font la sonde autonome située à 5,5 m et la CPI située à 7,5 m de profondeur. La cote de pose de la sonde autonome est manifestement erronée (nappe au-dessus du terrain naturel).

Nous avons donc deux systèmes totalement indépendants avec vraisemblablement une nappe captive au niveau de la CPI située à 14,5 m de profondeur.

Sur les sondes à 5.5 m et 7.5 m des comportements saisonniers sont par ailleurs observés. Sur les deux années de mesures, une hausse soudaine de la piézométrie s'est produite en début de période hivernale (autour d'octobre-novembre), qui s'est maintenue ensuite (avec des variations moindres) pendant toute la saison, avec d'entamer une purge progressive durant la période estivale.



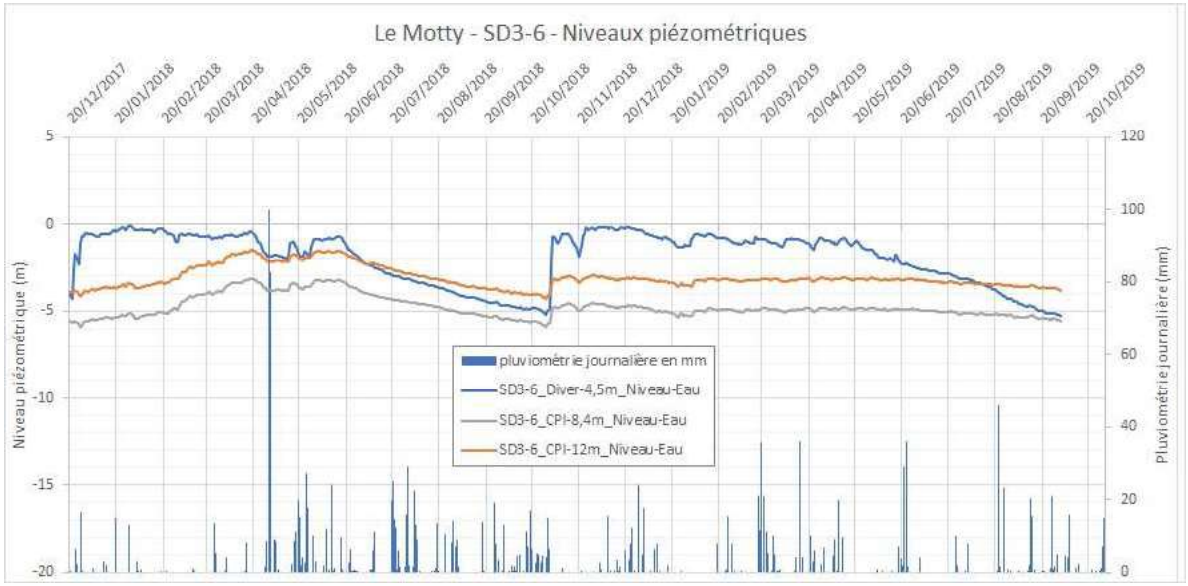
Source : Cerema

Illustration 69 : suivi piézométrique au droit du profil 3 entre décembre 2017 et décembre 2019

7.2.1.3 *Profil 4 – Piézomètre SD3-6*

Par rapport à la sonde Diver, les CPI (plus profondes) traduisent un comportement davantage amorti de la nappe dû à la perméabilité du milieu. La nappe présente des fluctuations relativement importantes au cours de l'année avec un niveau haut sub-affleurant et un niveau d'étiage jusqu'à 5 m de profondeur.

Un comportement saisonnier est relevé, bien corrélé avec ceux observées sur les sondages SD3-8 et SD3-9 suivants. Il est possible qu'une influence des variations du niveau du Drac, proche de ces sondages, soit présente.



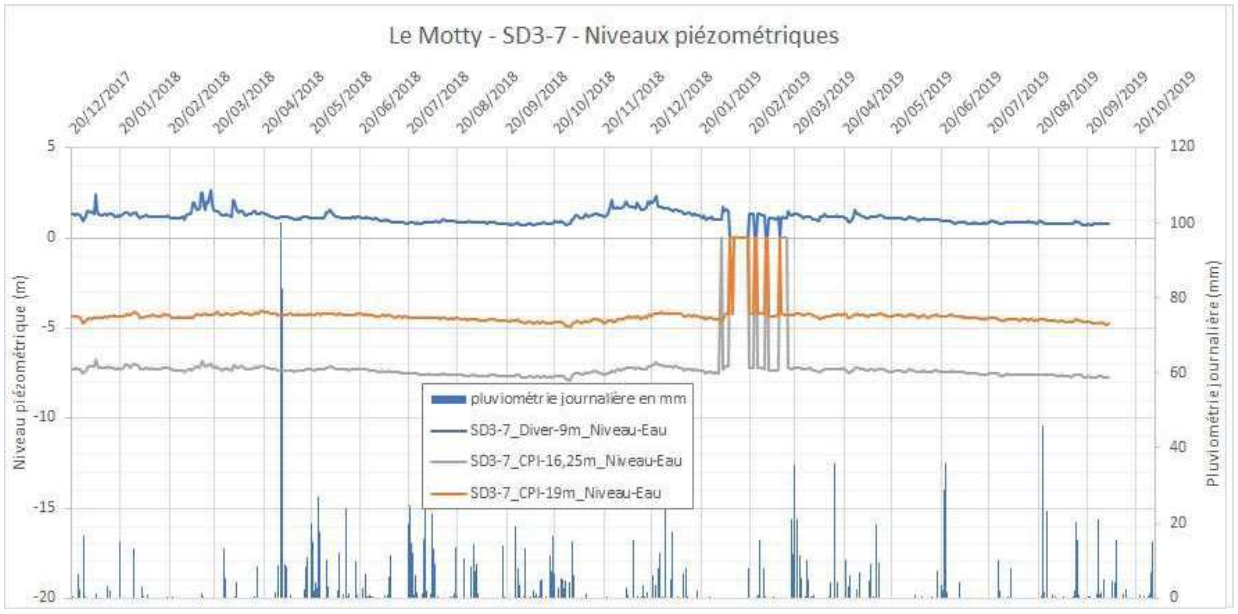
Source : Cerema

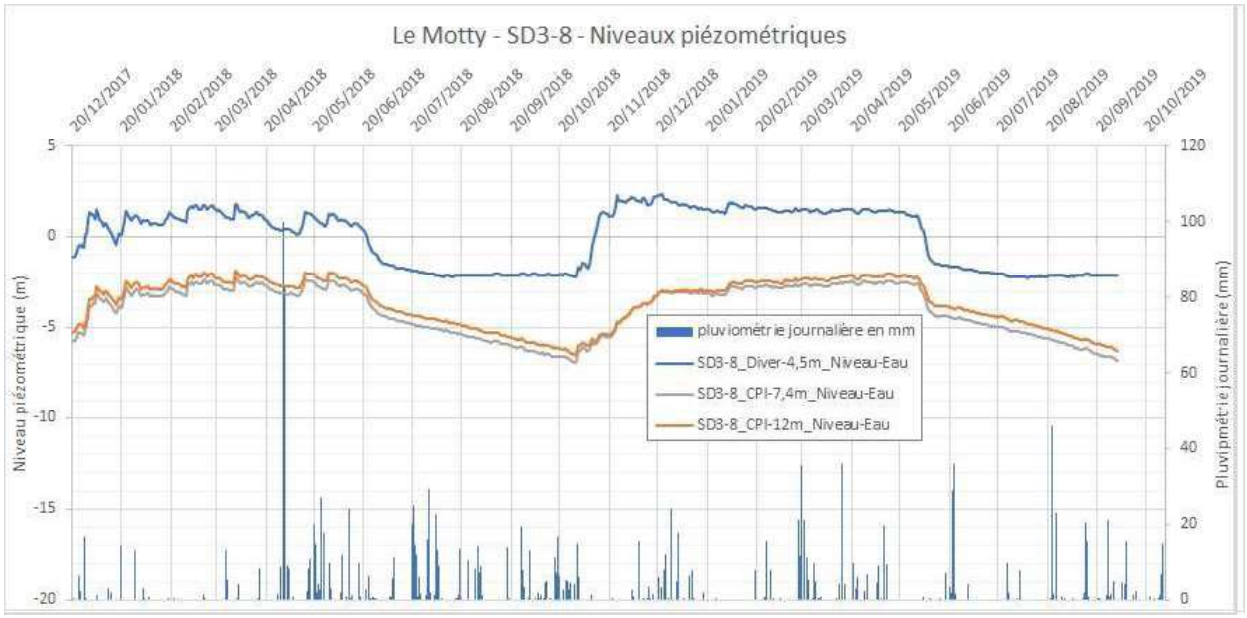
Illustration 70 : suivi piézométrique au droit du profil 4 entre décembre 2017 et décembre 2019

7.2.1.4 *Profil 5 – Piézomètres SD3-7 et SD3-8*

Les mesures faites par les CPI sur SD3-7 sont légèrement amorties par rapport à celles de la sonde autonome. Les cotes de pose des sondes piézométriques *Diver* sur SD3-7 & SD3-8 sont manifestement erronées (niveau de nappe au-dessus du terrain naturel) ce qui ne permet pas de conclure sur le niveau précis de la nappe. Globalement toutefois, ce niveau est vraisemblablement sub-affleurant au niveau de la RN 85, comme sur les autres profils.

En termes de dynamique, les relevés de SD3-7 sont globalement stables, avec de petites variations dont la corrélation éventuelle avec la pluviométrie reste peu prédictible. Sur SD3-8, on observe un comportement saisonnier cyclique des piézomètres, avec des niveaux d'eau hauts en saison humide (novembre à juin) et bas en saison sèche (juin à novembre). Une réactivité à certains événements pluviométriques, marquée par des « sauts » de plus faible amplitude et à purge plus rapide semble se superposer par ailleurs à ces cycles.





Source : Cerema

Illustration 71 : suivi piézométrique au droit du profil 5 entre décembre 2017 et décembre 2019

7.2.1.5 *Profil 6 – Piézomètre SD3-9*

La CPI traduit un léger amortissement vis-à-vis de la sonde *Diver*. La sonde *Diver* étant positionnée à 4,5 m de profondeur, il est possible que le niveau de la nappe descende en réalité plus bas que ce qui est indiqué sur le graphe (4,5 m de profondeur sur les relevés d'étiage).

La nappe présente des fluctuations relativement importantes au cours de l'année avec un niveau haut sub-affleurant et un niveau d'étiage jusqu'à 4,5 m de profondeur au moins. Il est difficile d'établir des corrélations entre les variations relevées et la pluviométrie sur ce profil. La hausse piézométrique entre novembre 2018 et juin 2019 est raisonnablement corrélée aux mouvements saisonniers observés sur SD3-8.



Source : Cerema

Illustration 72 : suivi piézométrique au droit du profil 6 entre décembre 2017 et décembre 2019

7.2.2 Synthèse des mesures piézométriques

Globalement, le niveau de la nappe est subaffleurant sur l'ensemble des sondages piézométriques, excepté au droit du sondage SD3-1 (profil 1) pour lequel la nappe est située plus en profondeur (aux alentours de 9,0 m de profondeur). La variation annuelle du niveau de la nappe peut être estimée à environ 2 à 3 m.

La riche instrumentation piézométrique mise en œuvre ne permet malheureusement pas de développer une compréhension approfondie de la dynamique du site, du fait du dysfonctionnement d'une grande partie du dispositif et d'incertitudes sur la pose des sondes. Cela constitue un retour d'expérience intéressant en termes d'instrumentation, au regard des limites d'usage d'un réseau de capteurs piézométriques. En effet, les cotes de pose manifestement erronées, l'absence de correction atmosphérique, le comportement similaire entre certaines sondes autonomes *Diver* et certaines CPI traduisant probablement l'absence de lanterne étanche autour de la CPI, ne permettent pas d'apprécier de manière fiable le comportement des différentes nappes ainsi que les surpressions interstitielles soupçonnées dans ce secteur (compte tenu de la présence de glissements actifs au regard des pentes extrêmement faibles).

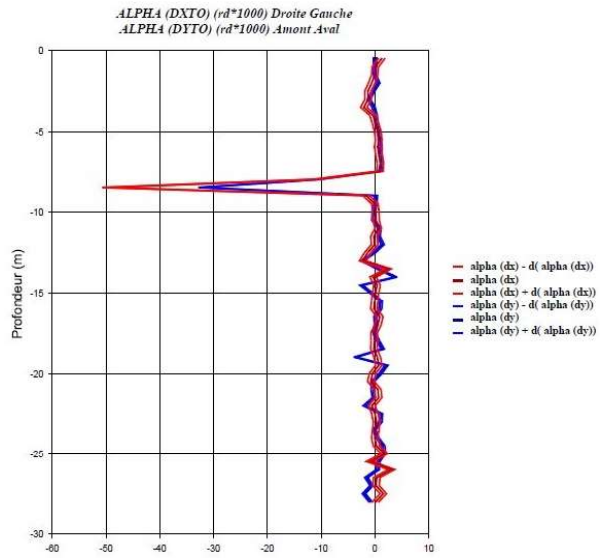
L'instrumentation permet toutefois d'observer des comportements saisonniers de nappes hautes et basses dans certaines zones, qui peuvent constituer des pistes de mitigation des glissements par la maîtrise des eaux. Certaines cellules de pression interstitielle laissent par ailleurs présager l'existence de nappes captives avec des pressions interstitielles relativement importantes.

7.3 Résultats des mesures inclinométriques

La mesure zéro date de février 2018. Les relevés ont été effectués jusqu'en juin 2020 dans le cadre de suivis destinés à la DIR Méditerranée, au rythme de deux mesures annuelles. Ils sont retranscrits et exploités ici.

7.3.1 Profil 1 – Inclinomètres SC3-1 et SC3-2

7.3.1.1 *Inclinomètre SC3-1*

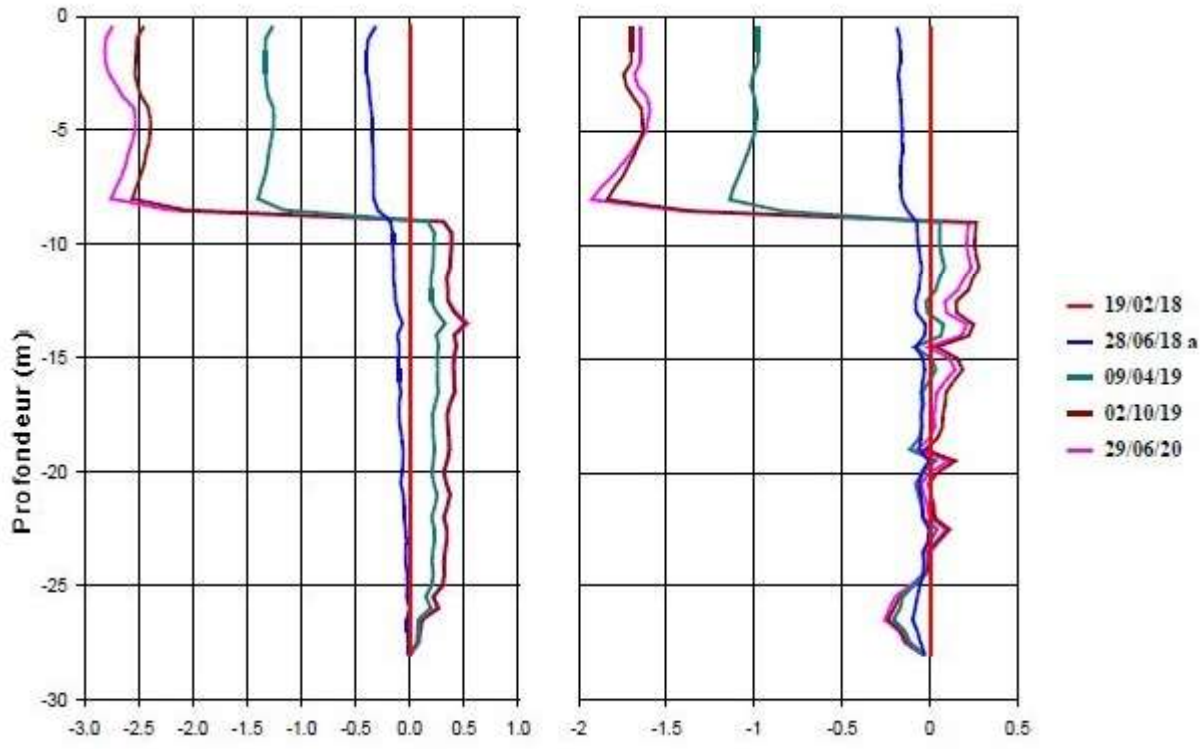


73a. Rotations observées en SC3-1 (juin 2020)



73b. Déplacements (cm) dans le temps entre 8 et 8,5 m de prof.

Source : Cerema

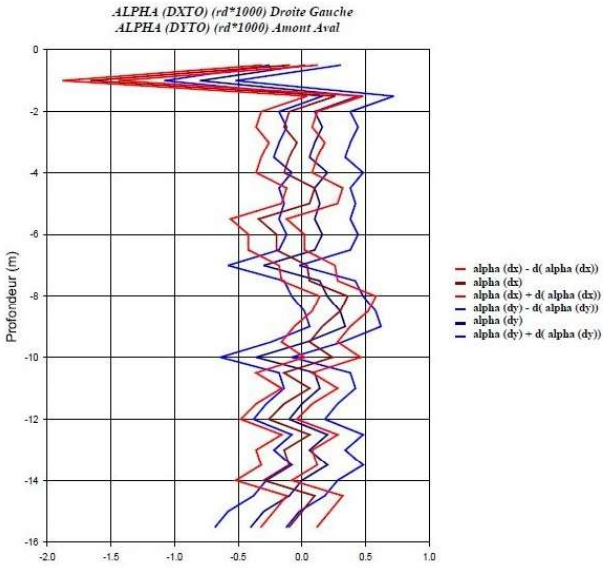


73c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en SC3-1

Illustration 73 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-1

L'inclinomètre SC3-1 indique une zone de cisaillement entre 8 et 9 m de profondeur, avec une valeur de rotation maximale de l'ordre de -50.10^{-3} rad (juin 2020). Aucune autre surface de rupture n'est détectée.

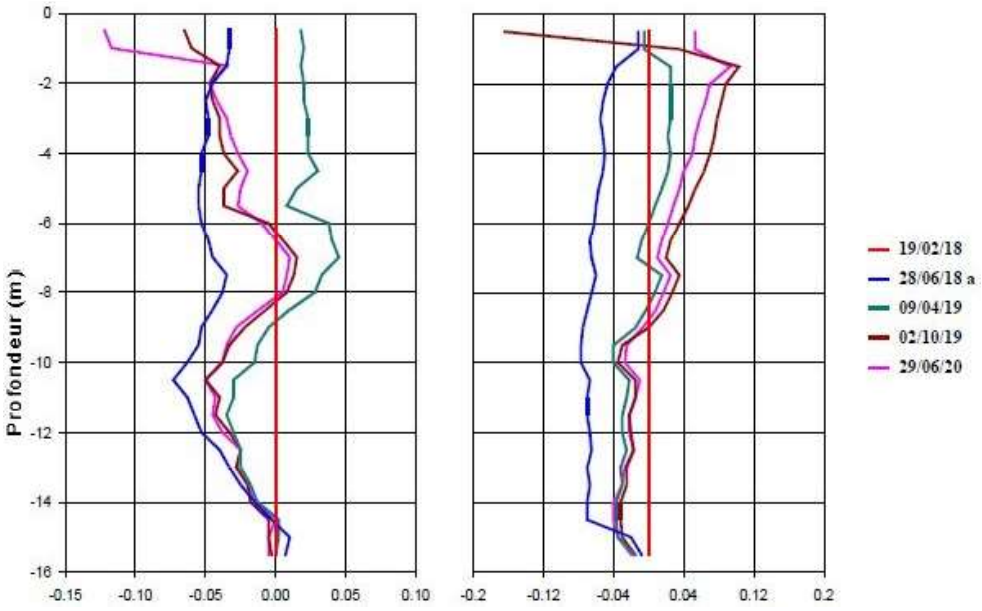
7.3.1.2 *Inclinomètre SC3-2*



Graphique d'évolution dans le temps non significatif

Source : Cerema

74a. Rotations observées en SC3-2 (juin 2020)



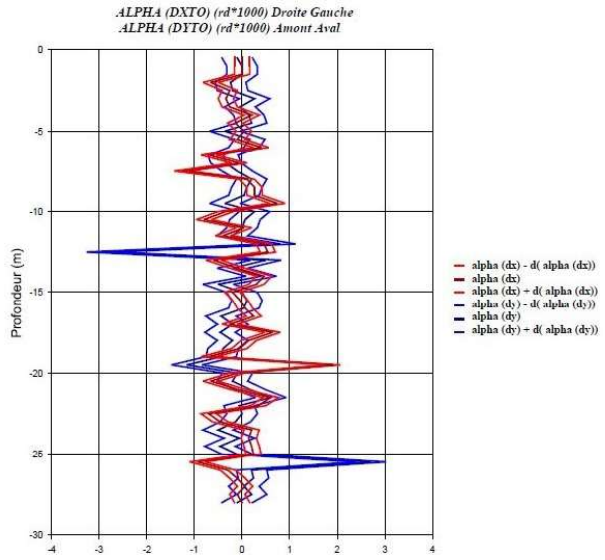
74b. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en SC3-2

Illustration 74 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-2

Aucune zone de cisaillement n'apparait clairement sur ce tube. Les déplacements présentés correspondent à des variations angulaires qui sont dans l'incertitude de la mesure et qui indiquent l'absence de mouvements significatifs. Des mouvements plus profonds que la base du tube pourraient toutefois être présents.

7.3.2 Profil 2 – Inclinomètres SC3-5 et SC3-6

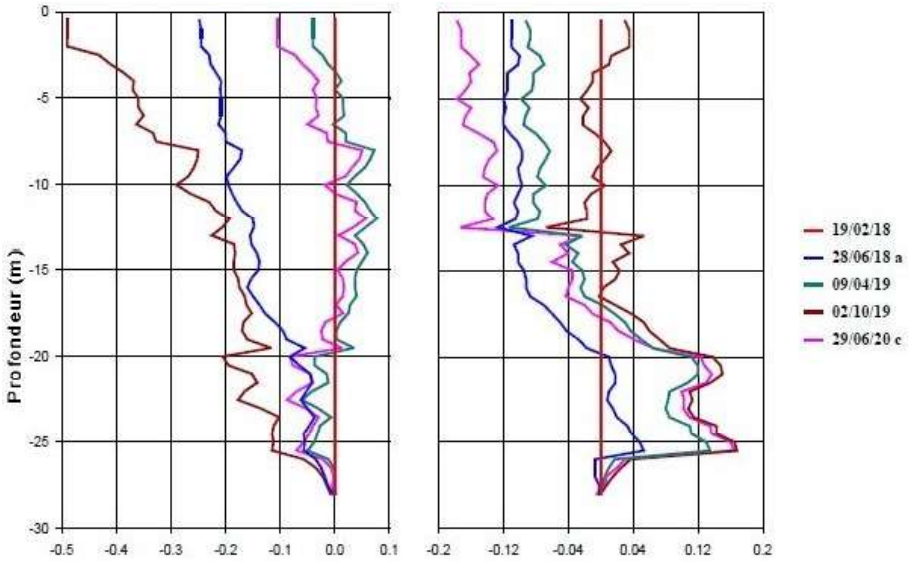
7.3.2.1 *Inclinomètre SC3-3*



Graphique d'évolution dans le temps non significatif

Source : Cerema

75a. Rotations observées en SC3-3 (juin 2020)



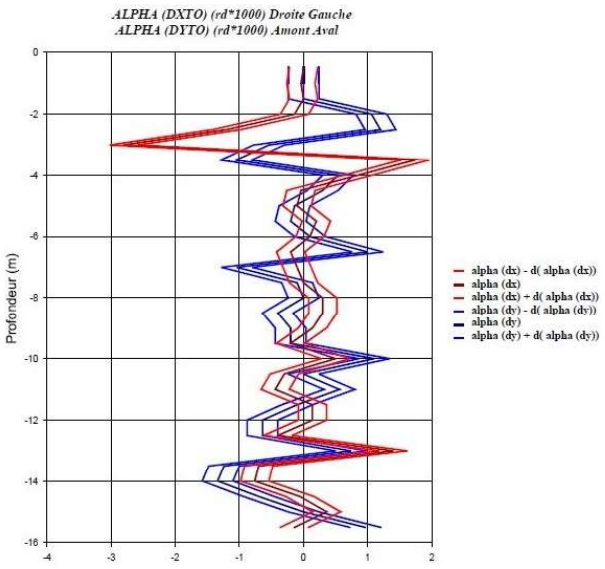
75b. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en SC3-3

Illustration 75 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-3

Une zone de cisaillement est vraisemblablement localisée à 12,5 m de profondeur, avec un pic de rotation de -3.2.10-3 rad et un déplacement cumulé relativement faible, de l'ordre de 3 mm entre février 2019 et juin 2020.

7.3.2.2 *Inclinomètre SC3-4*

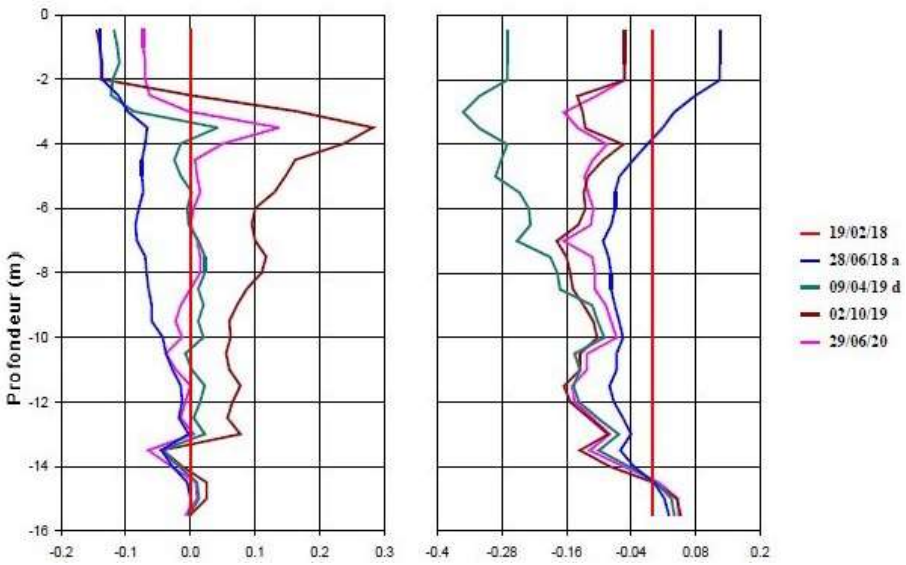
L'analyse des mesures et des graphiques de l'inclinomètre SC3-4 indique que le pied du tube inclinométrique présente un problème de scellement ou d'encastrement. Une surface de glissement vers 14,5 m de profondeur est possible, mais elle est difficile à confirmer compte-tenu de l'encastrement très limité au-delà de cette profondeur. Les déplacements sont très faibles et peu représentatifs, de l'ordre de 1 à 2 mm sur l'ensemble de la période de mesure.



Graphique d'évolution dans le temps non significatif

Source : Cerema

76a. Rotations observées en SC3-4 (juin 2020)



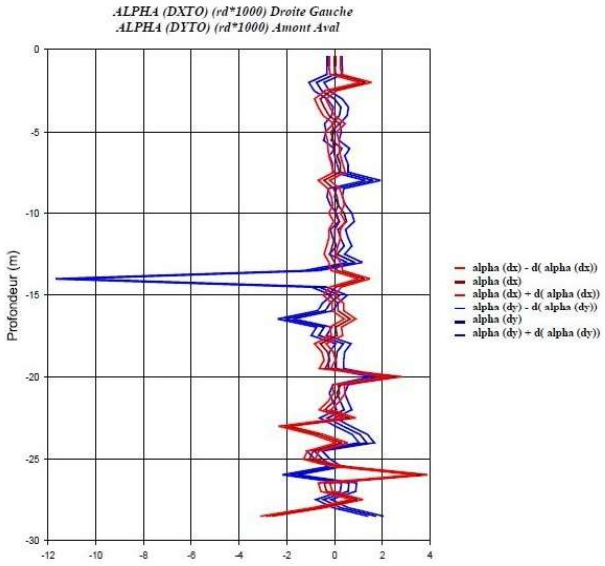
76b. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en SC3-4

Illustration 76 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-4

7.3.3 Profil 3 – Inclinomètres SC3-5 et SC3-6

7.3.3.1 *Inclinomètre SC3-5*

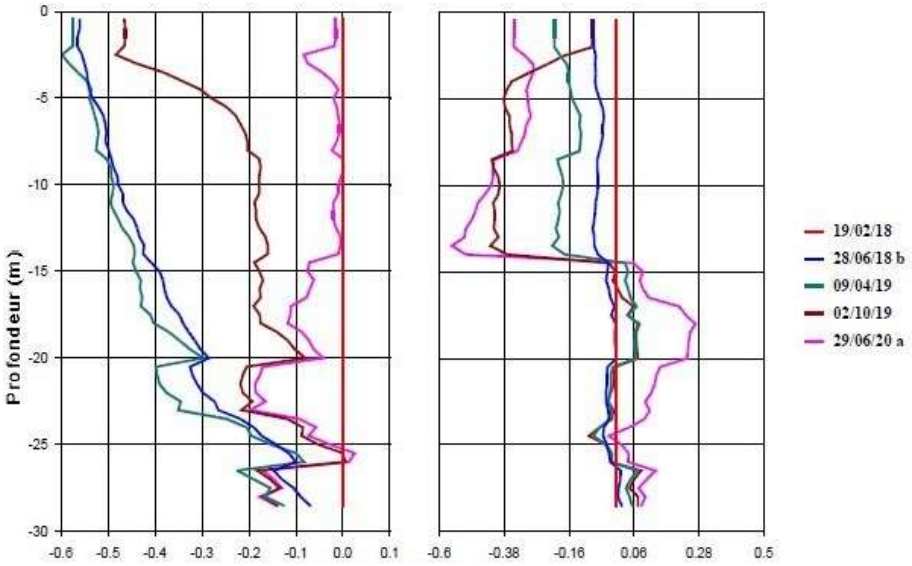
L'inclinomètre SC3-5 montre une surface de cisaillement très nette vers 14,0 m de profondeur, avec une rotation maximale de l'ordre de -12.10-3 rad (juin 2020). Aucune autre surface de cisaillement n'est observable le long du tube inclinométrique.



Graphique d'évolution dans le temps non disponible

Source : Cerema

77a. Rotations observées en SC3-5 (juin 2020)

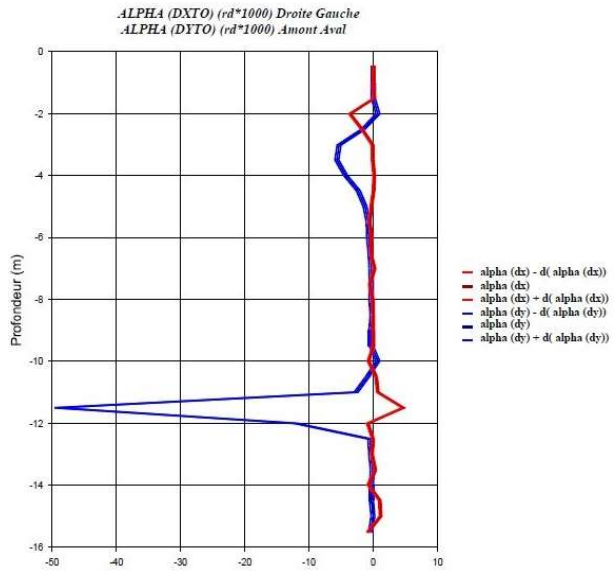


77b. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en SC3-5

Illustration 77 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-5

7.3.3.2 *Inclinomètre SC3-6*

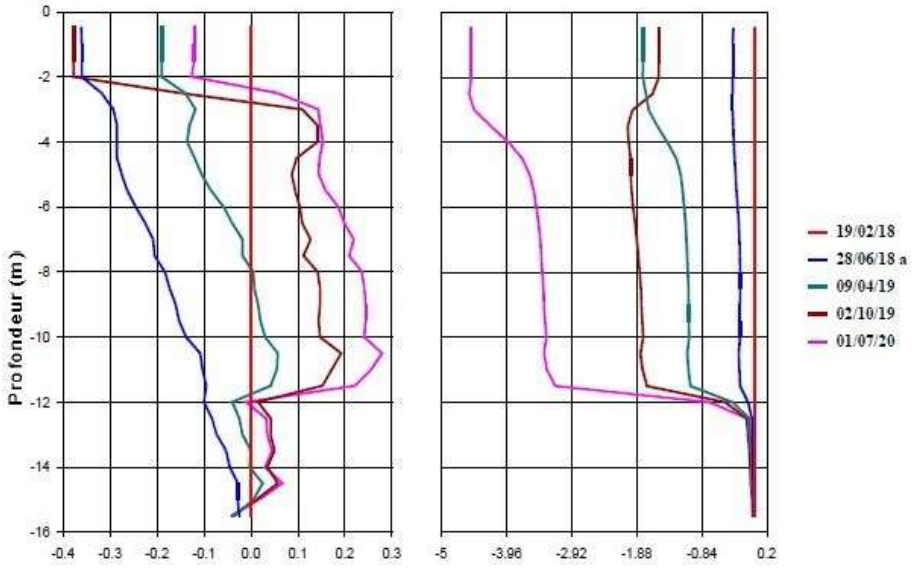
L'inclinomètre SC3-6 indique une surface de cisaillement à 11,5 m de profondeur, avec une rotation maximale de l'ordre de -50.10-3 rad et un module de déplacements cumulés de 3 cm (juillet 2020). Les mesures montrent une accélération des mouvements entre les mesures d'octobre 2019 et du 1er juillet 2020, avec un déplacement de 1,3 cm en 8 mois. Une seconde zone de glissement, plus épaisse, semble s'amorcer entre 3,0 et 4,0 m de profondeur.



78a. Rotations observées en SC3-6 (juin 2020)



78b. Déplacements (cm) dans le temps entre 11 et 12 m de prof.



78c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en SC3-6

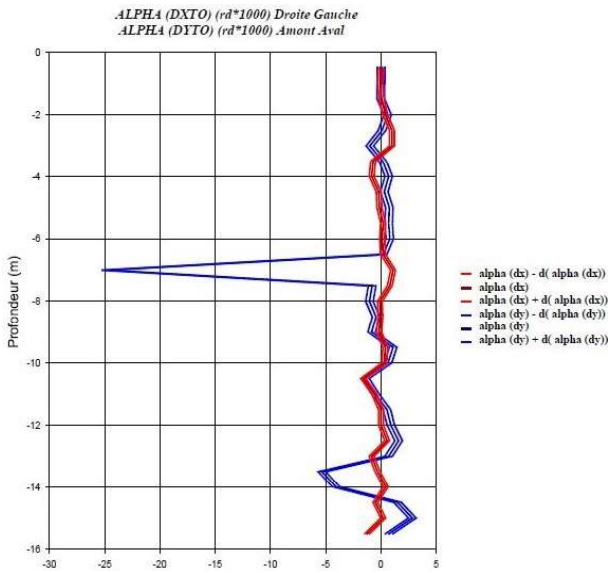
Illustration 78 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-6

Source : Cerema

7.3.4 Profil 4 – Inclinomètre SC3-7

Une surface de cisaillement est identifiée à 7 m de profondeur, avec une rotation locale de l'ordre de -25.10^{-3} rad au 1er juillet 2020 et un module de déplacements cumulés de 1,5 cm en 2,5 ans.

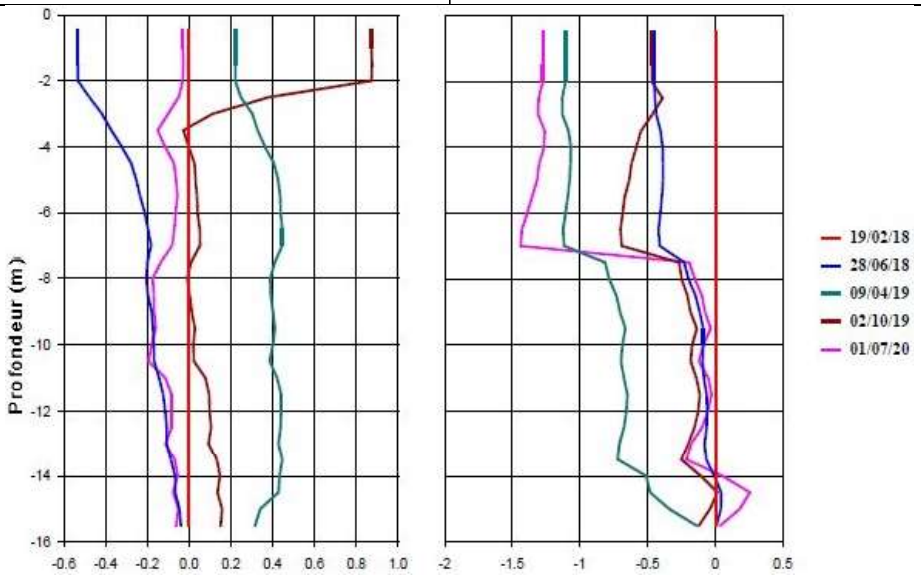
Le pied de l'inclinomètre n'est pas stable, caractérisé par des alternances positives/négatives des rotations locales en profondeur (de 15,5 à 13,0 m). Cela peut provenir d'un mauvais scellement du tube ou de l'absence d'ancrage de la base du tube dans le substratum.



Graphique d'évolution dans le temps non disponible

Source : Cerema

79a. Rotations observées en SC3-7 (juillet 2020)



79b. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en SC3-7

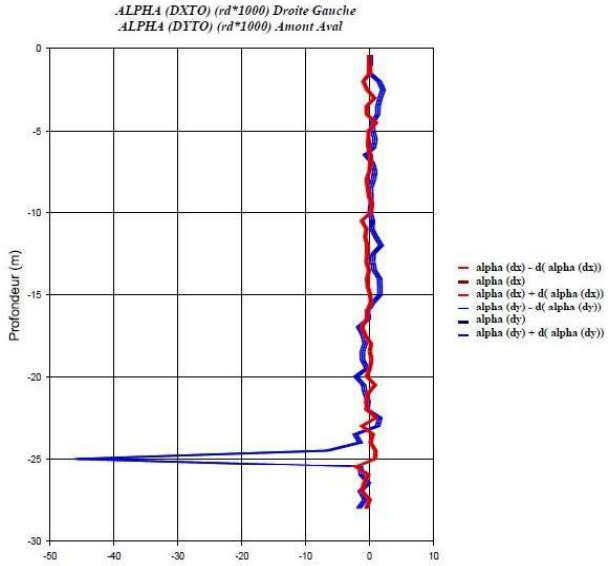
Illustration 79 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-7

7.3.5 Profil 5 – Inclinomètres SC3-8 et SC3-9

7.3.5.1 *Inclinomètre SC3-8*

L'inclinomètre SC3-8 a cisaillé entre l'intervention d'octobre 2019 et celle de juin-juillet 2020.

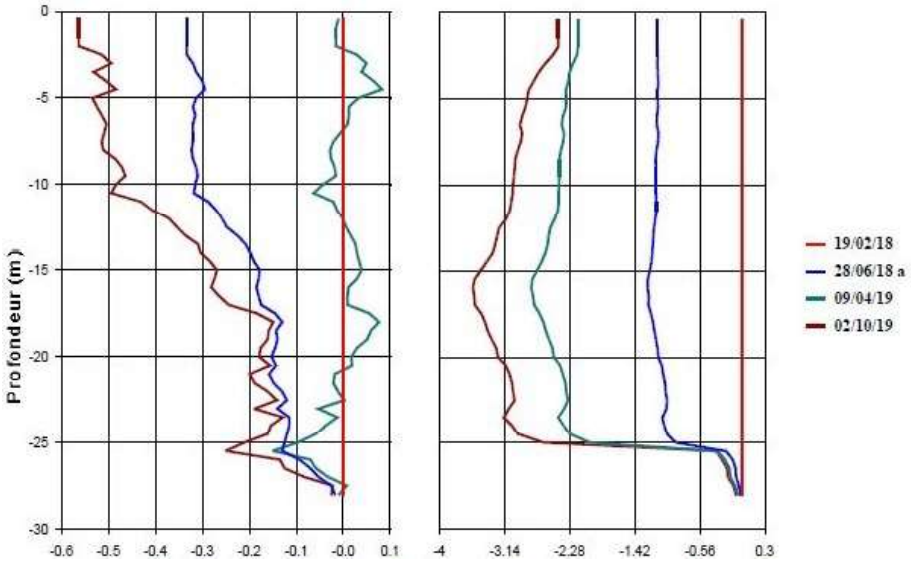
Les mesures indiquent une surface de cisaillement très nette à 25,0 m de profondeur, avec une rotation maximale de -14.10^{-3} rad et un déplacement cumulé de 3 cm entre février 2018 et octobre 2019, soit une vitesse moyenne de déplacement de 1,5 mm/mois.



Graphique d'évolution dans le temps non disponible

Source : Cerema

80a. Rotations observées en SC3-8 (octobre 2019)



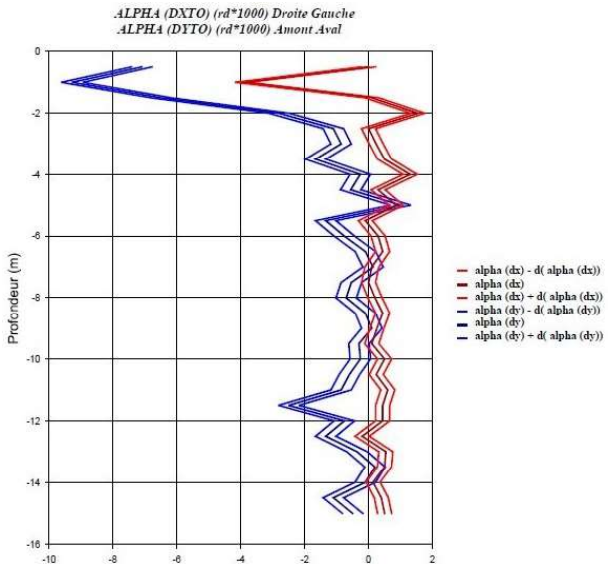
80b. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en SC3-8

Illustration 80 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-8

7.3.5.2 *Inclinomètre SC3-9*

Les mesures ne permettent pas de dégager une surface de cisaillement nette sur cet inclinomètre, sauf peut-être à 11,5 m de profondeur mais avec une activité très faible. Cela serait cohérent avec les relevés des inclinomètres SC3-7 ET SC3-11 situés globalement dans le même contexte.

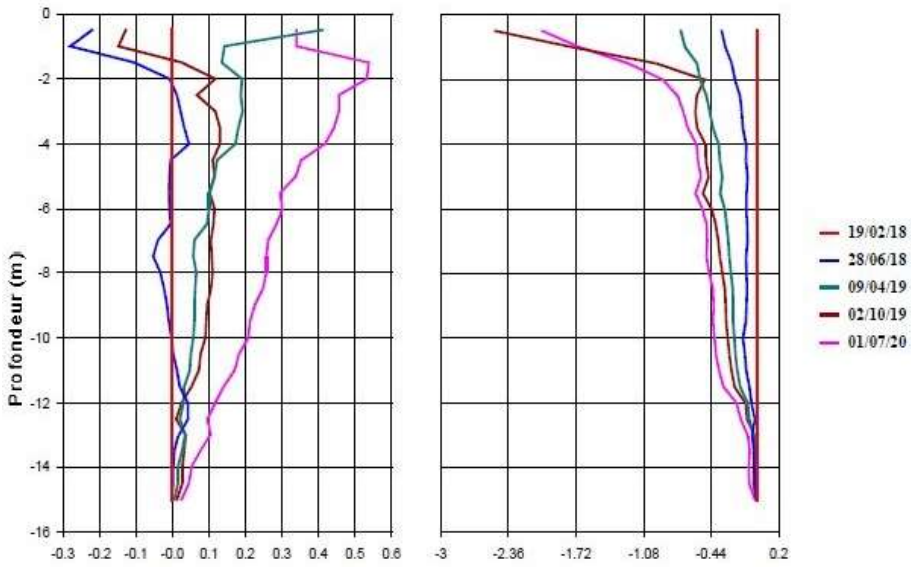
Les forts déplacements en tête d'inclinomètre peuvent être dus à des chocs, mais il pourrait également s'agir d'une lente reptation des couches superficielles, sur une épaisseur de 2 à 3 m.



Graphique d'évolution dans le temps non disponible

Source : Cerema

81a. Rotations observées en SC3-9 (juillet 2020)

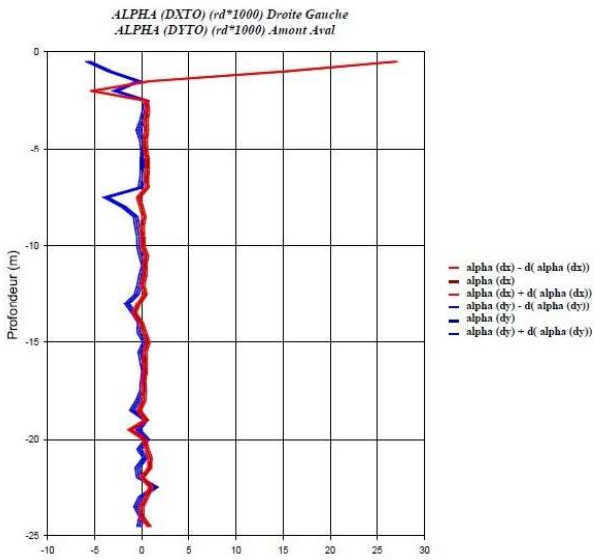


81b. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en SC3-9

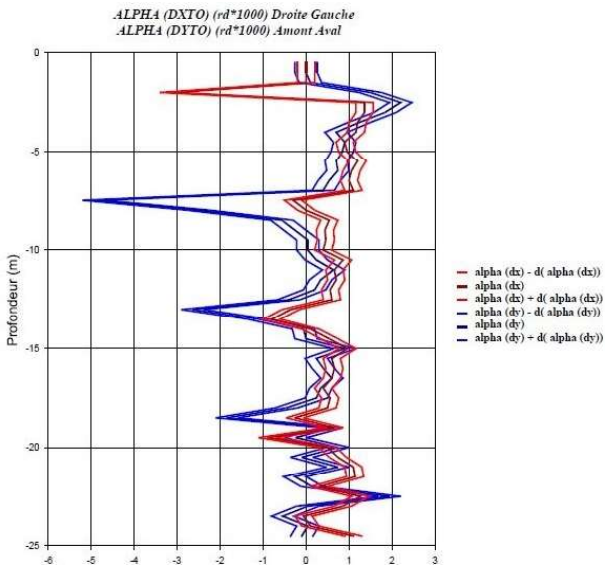
Illustration 81 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-9

7.3.6 Profil 6 – Inclinomètres SC3-10 et SC3-11

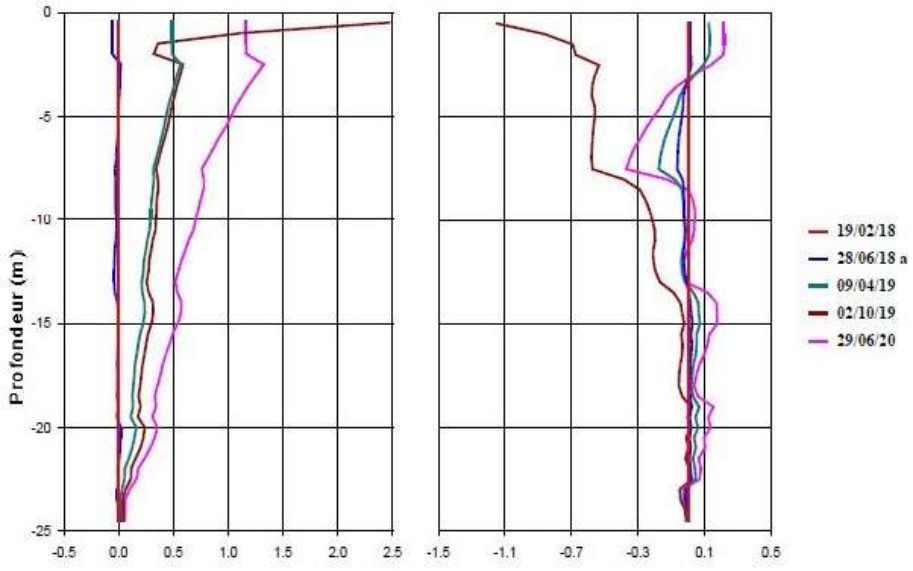
7.3.6.1 *Inclinomètre SC3-10*



82a. Rotations observées en SC3-10 (octobre 2019)



82b. Rotations observées en SC3-10 (juin 2020)



82c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en SC3-10

Illustration 82 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-10

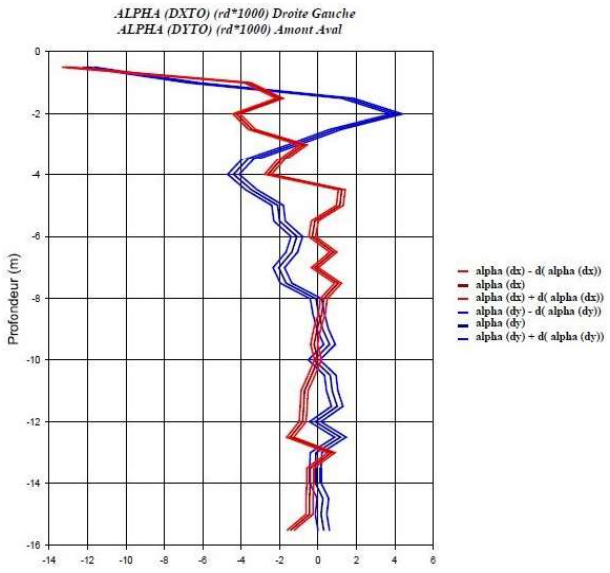
Source : Cerema

Les relevés mettent en évidence une surface de cisaillement principale très nette à 7,5 m de profondeur, avec un pic de rotation maximal de -5.10^{-3} rad. L'évolution est relativement lente mais les déplacements cumulés commencent à être significatifs. Toutefois, Une légère dérive de la sonde est peut-être à envisager, ce qui aurait pour conséquence des déplacements encore plus importants à 7,5 m de profondeur. Les mesures semblent également mettre en évidence l'amorce de deux surfaces de glissement secondaires à 13,0 et 18,0 m de profondeur, et une possible reptation des terrains superficiels sur 2 à 3 m.

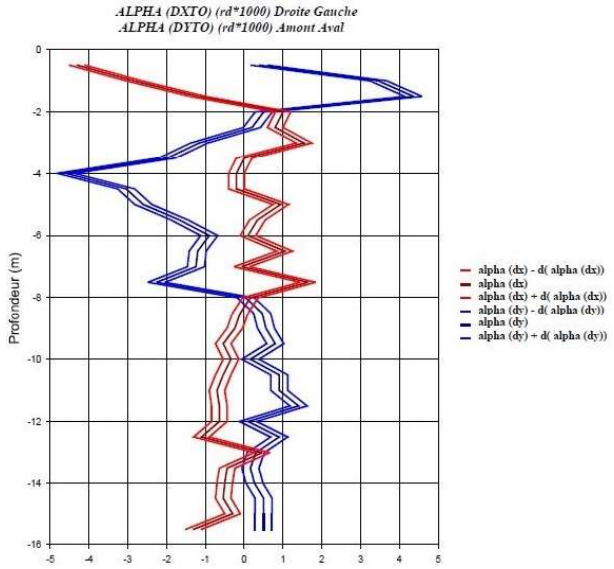
7.3.6.2 *Inclinomètre SC3-11*

Les mesures indiquent des pics de rotation à 4 et 7,5 m de profondeur avec une accentuation entre les deux dernières campagnes de mesures. Toutefois, les amplitudes sont faibles, et se superposent

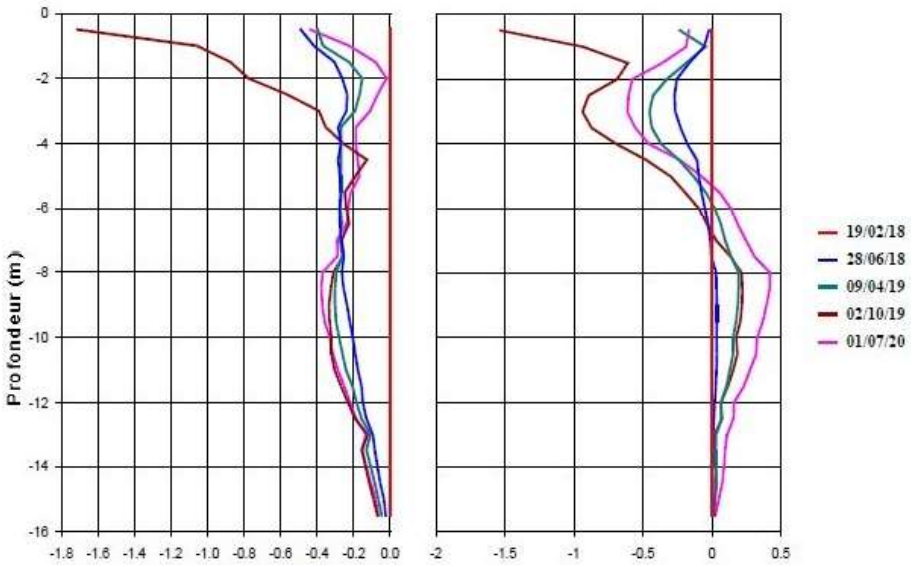
manifestement à des déformations parasites du tube (de type flambement). L'interprétation des mesures reste donc délicate et ne montre pas de tendance particulière.



83a. Rotations observées en SC3-11 (octobre 2019)



83b. Rotations observées en SC3-11 (juillet 2020)



83c. Rotations locales (rad.10^{-3}) et modules de déplacements cumulés (cm) en SC3-11

Illustration 83 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-11

Source : Cerema

7.3.7 Synthèse des mesures inclinométriques

Les mesures inclinométriques permettent de disposer d'une connaissance de la position des surfaces de glissement en profondeur et, grâce à l'instrumentation de plusieurs profils, d'identifier des différences notables de comportement ou de configurations entre différentes zones.

Au droit du **profil 1**, le cisaillement est détecté entre 8,0 et 9,0 m de profondeur au niveau de la RN85 (SC3-1). Il est très actif avec une vitesse de l'ordre de 3 mm/mois. On ne retrouve pas en revanche, au niveau de SC3-2 en pied de versant (à proximité du Drac), cette surface de glissement. L'inclinomètre SC3-2 ne montre d'ailleurs quasiment aucune déformation significative. Cela peut traduire le fait que la

surface de glissement « ressorte » entre ces deux inclinomètres ou que le glissement soit dans une phase d'accommodation (de ré-équilibrage) sur sa partie amont sans mouvement notable sur la partie aval.

Sur ce profil, le Drac présente un coude dont la concavité est orientée vers la RN85, ce qui aurait plutôt tendance à saper la base du versant et à provoquer la régression du glissement vers l'amont.

L'absence d'indice de glissement sur SC3-2 peut s'expliquer par le fait qu'il soit implanté très proche du Drac, à proximité d'une gravière qui semble relativement stable. L'apparente stabilité de cette gravière est dues à la présence d'un seuil à l'aval de la gravière, qui limite force érosive du Drac à cet endroit, compte tenu des pentes plus faibles sur son profil en long.

L'inclinomètre SC3-1 se retrouverait ainsi positionné légèrement à l'amont du bourrelet de pied du glissement qui peut se traduire par les pentes plus fortes à l'aval de la RN85 dans des matériaux légèrement plus charpentés retrouvés dans le sondage SC3-1 (dépôts plus grossiers retrouvés au-delà de 20 m de profondeur).

Pour le **profil 2**, un cisaillement est détecté à 12,5 m de profondeur sur l'inclinomètre SC3-3 et possiblement à 14,0 m de profondeur sur l'inclinomètre SC3-4. Les déplacements mesurés sont faibles sur 2 années de mesures et atteignent localement 1 mm.

Ce profil est situé en sortie d'une zone de plus forte canalisation du Drac (enrochements pour protéger l'exploitation d'une gravière), il perd ainsi de sa capacité érosive en retrouvant un cours moins contraint.

Ces deux inclinomètres permettent d'envisager une profondeur de glissement relativement importante aussi bien au niveau de la RN85 qu'en proximité du Drac, mais avec une activité très modérée de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre par an.

Sur le haut du **profil 3**, l'inclinomètre SC3-5 détecte une surface de cisaillement nette, relativement profonde à 14,0 m de profondeur. Localement, les déplacements sont estimés à environ 0,5 cm.

L'inclinomètre SC3-6, pour sa part, indique un cisaillement, également très net, à 11,5 m de profondeur avec une activité plus soutenue de l'ordre de 1,7 cm de déplacement en deux années.

Ce profil est situé perpendiculairement au Drac, dans une zone de son tracé relativement contrainte par des enrochements qui créent un « entonnoir » et accélèrent son cours. La fin du profil 3, au niveau du Drac, présente des arrachements significatifs d'une érosion relativement intense.

Sur ce profil, l'instrumentation indique donc un glissement actif, relativement profond (12 - 14 m). En complément à ces interprétations, il convient de constater que la maison abandonnée située en rive gauche de la RN85 (dans le sens des PR croissants) présente des désordres très importants qui ont mené à sa ruine

Au **profil 4**, l'inclinomètre SC3-7 détecte une surface de cisaillement nette à 7,0 m de profondeur. Les déplacements locaux sont estimés à environ 0,5 cm. Le pied de cet inclinomètre n'est pas ancré dans le substratum et indique des signes de mouvement.

Cet inclinomètre est situé en pied de versant, à proximité d'une zone en érosion des berges du Drac.

Sur ce profil, l'instrumentation révèle donc un glissement moyennement actif, situé à 7,0 m de profondeur légèrement en amont des berges du Drac.

Au **profil 5,** l'inclinomètre SC3-8, situé à proximité de la RN85, indique un cisaillement très profond à 25,0 m de profondeur et très actif (2,7 cm de déplacement en deux années). L'inclinomètre SC3-9, quant à lui, ne détecte aucune surface de glissement franche, sauf éventuellement à 12,0 m de profondeur mais avec une très faible activité. Cet inclinomètre présente, également, des indices de glissement en surface (2,0 m de profondeur) mais pour lesquels il n'est pas possible de faire la distinction entre un réel glissement ou un artéfact lié à un problème de descellement de la tête de l'inclinomètre (suite à un choc ou autre).

Ce profil est situé peu après la confluence du Drac et de la Séveraisse, à l'endroit où des aménagements de protection des berges du Drac ont été réalisés. Ces aménagements ont tendance à « renvoyer » la rivière sur l'autre versant qui a, lui aussi, été aménagé. La rivière, au gré des crues, présente ainsi assez fréquemment un changement de lit et en période de crue peut venir éroder l'une ou l'autre des berges du Drac. L'aval du profil 5 présente, au niveau du Drac, de fortes traces d'érosion.

Les inclinomètres situés à proximité de SC3-9 (SC3-7 & SC3-11) présentent, quant à eux, des cisaillements nets à 7 m de profondeur. Il est fort peu probable que le cisaillement détecté à 25 m de profondeur sur SC3-8 « ressorte » à l'amont de SC3-9, les glissements étant globalement pilotés par l'aval (Drac). On peut donc suspecter soit un passage de la surface de rupture sous le fond du tube, soit un rééquilibrage du glissement sur ce profil : après une période d'activité en pied de versant (avant la mise en place de l'instrumentation) celui-ci opèrerait un ajustement de sa partie amont avec des déplacements détectés au niveau de SC3-8. Pour être cohérent avec les inclinomètres SC3-7 et SC3-11, il conviendrait dès lors de considérer une surface de cisaillement relativement profonde (entre 7 et 12,0 m au niveau de SC3-9, non détectée à ce jour).

Sur ce profil, l'instrumentation oriente donc vers un glissement très actif et très profond au niveau de la RN85 (25 m de profondeur) et relativement profond (7 à 12 m) à l'approche du Drac.

En bordure de RN85, au **profil 6**, le suivi inclinométrique réalisé détecte une superposition de trois surfaces de cisaillement (tube SC3-10) : un cisaillement principal net est présent à 7,5 m de profondeur avec une activité moyenne (de l'ordre de 0,5 cm en deux années). Les deux autres surfaces probables, plus profondes et d'activité faible, se situent à -13,0 et -18,0 m. L'inclinomètre SC3-11 est, quant à lui, plus difficile à analyser dans la mesure où il montre une déformation d'ensemble parasite (type flambement) qui masque les signes usuels de cisaillement. Une surface de glissement est toutefois possible entre 6.0 et 7,5 m de profondeur, ainsi qu'un mouvement de surface.

Ce profil est situé légèrement en amont (vis-à-vis de l'écoulement du Drac) du profil 5, avec globalement le même environnement.

Ces deux inclinomètres permettent donc d'envisager un glissement principal d'une profondeur de l'ordre de 8 m en bordure de la RN85 avec une activité modérée, et potentiellement comprise entre 6,0 et 7,5 m de profondeur en bordure du Drac. Des cisaillements plus profonds sont aussi identifiés, moins actifs..

En conclusion sur ce site, globalement, les surfaces de cisaillement nettes sont profondes (7 à 15 m) à très profondes (25,0 m – SC3-8). Certains inclinomètres semblent indiquer plusieurs surfaces de cisaillement, pas toujours très marquées.

8 SYNTHESE - CONCLUSION

Le présent livrable a permis de présenter l'ensemble des instrumentations mises en œuvre sur les cinq sites pilotes du projet MLA3 (Charlaix, Quet-en-Beaumont, Les Touches, Corps, Le Motty / Saint-Firmin) et de dresser un panorama de toutes les mesures réalisées sur ces appareillages durant le projet. Les résultats ont été exploités, en lien avec la géologie locale (voir livrables de l'axe A du projet) et permettent de disposer d'une connaissance approfondie des mouvements de terrain examinés (profondeur des surfaces de rupture, variations de la piézométrie), mais aussi de tirer des enseignements sur l'apport potentiel de techniques plus innovantes (bruit de fond sismique, interférométrie radar, etc.).

Ce livrable est complété par le livrable L-B2 qui évalue les différentes méthodes employées en pointant leurs avantages mais aussi leurs limites. Le livrable L-R2 enfin propose des recommandations pour un suivi adapté des glissements lents.

9 ANNEXES

9.1 Bibliographie

ADRGT CD212 et RN85 près de Corps – Étude du glissement [Rapport]. Grenoble, 1971.

ADGRT RN85 Lieu-dit de Charlaix, Etude de glissement de Charlaix [Rapport]. St-Egrève, Rapport de l'ADRGT pour la Direction Départementale de l'Equipement de l'Isère,1980.

ADRGT Etude de la stabilité des versants du torrent de La Sézia, près de Corps [Rapport]. St-Egrève. Rapport de l'ADRGT pour le SIVOM du canton de Corps, nov. 1980.

AFNOR NF P 94-156 Sols : reconnaissance et essais – Mesures à l'inclinomètre. AFNOR, 1995.

AFNOR NF P 94-157-1 Sols : reconnaissances et essais – Mesures piézométriques, Partie 1 : tube ouvert. AFNOR, Mars 1996.

AFNOR NF P 94-157-2 Sols : reconnaissances et essais – Mesures piézométriques, Partie 2 : sonde de mesure de pression interstitielle. AFNOR, Mars 1996.

Besl P.J. & McKay N.D. A method for registration of 3-D shapes. IFEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 1992, 14 (2), 239-256

Bièvre G., Franz, M.; Larose, E.; Jongmans, D.; Jaboyedoff, M. & Carrière, S. Influence of environmental parameters on seismic velocity variations in a clayey mudflow (Pont-Bourquin, Switzerland). *Engineering Geology,* 2018a*, 245*, 248-257. doi :10.1016/j.enggeo.2018.08.013

Bièvre, G.; Joseph, A. & Bertrand, C. Preferential water infiltration paths in a clayey earthslide evidenced by cross-correlation of hydrometeorological time series (Charlaix, French Western Alps). *Geofluids,* 2018b*,* 20. doi :10.1155/2018/9593267

Bièvre G. Caractérisation des versants argileux instables dans des conditions hydrogéologiques hétérogènes : Approche géophysique [Thèse] – Ecole doctorale des Sciences de la Terre et de l'Environnement et des Planètes (Grenoble), 2010.

Cerema RN85 Suivi du glissement de Charlaix et état des connaissances [Rapport] – Bron : Rapport du Cerema pour la DREAL Rhône-Alpes, Février 2015.

Cerema RN 85 Glissement de Corps - Diagnostic géotechnique G5 [Rapport]. - Bron : Rapport du Cerema pour la DIR Med, 2021.

Cerema RN85 - Site de Quet-en-Beaumont - Etude de diagnostic géotechnique (G5) [Rapport]. - Bron : Rapport du Cerema pour la DIR Med, 2021.

Cerema Glissement de terrain des Touches (Corps, 38) - Etude de diagnostic G5 au voisinage de la RN85 [Rapport]. - Bron : Rapport du Cerema pour la DIR Med, 2022.

Cerema Suivi des mouvements de terrain par interférométrie radar : Potentiel et limite de la méthode [Rapport] – Bron, 2020.

Chkeir S. Long-term Monitoring of Landslides with radar Interferometry : Advantages and Limits of the Approach [project Graduation] – Lebanese University, 2020.

Colombero, C.; Fiolleau, S.; Jongmans, D.; Valentin, J.; Baillet, L.; Larose, E. & Bièvre, G. Seismic noise parameters as indicators of reversible modifications in slope stability: a review. *Surveys in Geophysics,* 2021*, 42*, 339-375. doi :10.1007/s10712-021-09632-w

Fiolleau, S.; Jongmans, D.; Bièvre, G.; Chambon, G.; Baillet, L. & Vial, B. Seismic characterization of a clay-block rupture in Harmalière landslide, French Western Alps. *Geophysical Journal International,* 2020*, 221*, 1777-1788. doi :10.1093/gji/ggaa050

Fiolleau, S.; Jongmans, D.; Bièvre, G.; Chambon, G.; Lacroix, P.; Helmstetter, A.; Wathelet, M. & Demierre, M. Multi-method investigation of mass transfer mechanisms in a retrogressive clayey

landslide (Harmalière, French Alps). *Landslides,* 2021*, 18*, 1981-2000. doi:10.1007/s10346-021-01639-z

Gaubert-Bastide, T.; Garambois, S.; Bordes, C.; Voisin, C.; Oxarango, L.; Brito, D. & Roux, P. High-Resolution Monitoring of Controlled Water Table Variations From Dense Seismic-Noise Acquisitions. *Water Resources Research,* 2022*, 58*, e2021WR030680. doi :10.1029/2021WR030680

GEOTEC RN85 Investigations et instrumentations géotechniques, Secteur Isère, Vizille à Corps [Rapport]. Lyon : Dossier des Ouvrages Exécutés (n°16/07261) pour la DIR Med, 2018.

Girardeau-Montaut, D., Cloud Compare Version 2.6.1 User Manual. Available online : https://www.danielgm.net/cc/, 2019.

Jaboyedoff M. *et al*., Use LIDAR in landslide investigation : a review – Natural hazards 61, 5-28. 2012.

Joseph A., Bièvre G. et Dauphin S., RN 85 Glissement de Charlaix - Caractérisation, instrumentation et surveillance [Conférence]. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur (JNGG). - Beauvais : [s.n.], 2014.

Lague D, Brodu N, Leroux J. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner : application to the Rangitikei canyon (NZ). ISPRS J Photogramm Remote Sens 82 : 10–26. 2013.

Le Breton, M.; Bontemps, N.; Guillemot, A.; Baillet, L. & Larose, É. Landslide monitoring using seismic ambient noise correlation: challenges and applications. *Earth-Science Reviews,* 2021*, 216*, 103518. doi :10.1016/j.earscirev.2021.103518

LRPC de Toulouse-LCPC CAPITOUL 2000 Logiciel pour l'exploitation et la représentation des mesures inclinométriques, v3 [Notice].

McMillan, T. C.; Rau, G. C.; Timms, W. A. & Andersen, M. S. Utilizing the Impact of Earth and Atmospheric Tides on Groundwater Systems: A Review Reveals the Future Potential. *Reviews of Geophysics,* 2019*, 57*, 281-315. doi:10.1029/2018RG000630

Mainsant, G.; Larose, E.; Brönnimann, C.; Jongmans, D.; Michoud, C. & Jaboyedoff, M. Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: Toward failure prediction. *Journal of geophysical research,* 2012*, 117*, F01030. doi :10.1029/2011JF002159

Rojat F. Analyse par inclinométrie : Matériels, théorie, incertitudes et difficultés [Conférence]. AGOC sur la Roya, 15 & 16 mars 2022.

Schulz, W. H.; Kean, J. W. & Wang, G. Landslide movement in southwest Colorado triggered by atmospheric tides. *Nature Geoscience,* 2009*, 2*, 863-866. doi:10.1038/ngeo659

Voisin, C.; Garambois, S.; Massey, C. & Brossier, R. Seismic noise monitoring of the water table in a deep-seated, slow-moving landslide. *Interpretation,* 2016*, 4*, SJ67-SJ76. doi:10.1190/INT-2016-0010.1

9.2 Table des illustrations

Illustration 1 : Localisation des sites pilotes 9

Illustration 2 : À gauche : équipement inclinométrique (sonde, câble et centrale d'acquisition) – À droite : passage de la sonde dans un tube de mesure rainuré 10

Illustration 3 : Chaîne inclinométrique (enrouleur et pose sur site) 11

Illustration 4 : Piézomètre ouvert (capot métallique à gauche et sonde de mesure à droite) 12

Illustration 5 : Cellules de pression interstitielle et schéma de fonctionnement 13

Illustration 6 : Implantation des stations GPS Geomon et des capteurs sismiques (s0 à s2) sur le site de Charlaix. 14

Illustration 7 : Installation et fonctionnement du système GPS Geomon sur le site de Charlaix. 15

Illustration 8 : Installation du système de suivi temporel sismique sur le site de Charlaix. a) Système énergétique et numériseur. b) Mise en place du capteur s0 dans une buse semi-enterrée. c) Détail d'un capteur sismique (vélocimètre). La bulle permet d'assurer l'horizontalité du capteur et la flèche de l'orienter vers le nord. 16

Illustration 9 : Scan laser 3D Riegl VZ-2000i sur le site de Charlaix 17

Illustration 10 : Géométrie d'un radar à ouverture latérale avec trajectoire de la position initiale A à la position finale D 17

Illustration 11 : Limites approximatives des glissements affectant le lacet de Charlaix 20

Illustration 12 : Implantation du dispositif d'instrumentation en inclinométrie et piézométrie sur le site de Charlaix 21

Illustration 13 : Courbe piézométrique au droit de Pz1 – Site de Charlaix 23

Illustration 14 : Bouche d'alimentation du canal de dérivation du Beaumont et zone humide aval 27

Illustration 15 : Résultats des mesures inclinométriques en I4 (chaîne inclinométrique) 29

Illustration 16 : Résultats des mesures inclinométriques en I7 30

Illustration 17 : Résultats des mesures inclinométriques en I8 31

Illustration 18 : Résultats des mesures inclinométriques en I9 32

Illustration 19 : Résultats des mesures inclinométriques en I5 33

Illustration 20 : Résultats des mesures inclinométriques en I6 34

Illustration 21 : Déplacements mesurés par relevés GNSS périodiques sur le site de Charlaix. a) Entre le 27/11/2014 et le 10/11/2022. b) Entre le 06/06/2021 et le 10/11/2022. c) Azimut des déplacements. La taille des flèches est proportionnelle aux déplacements. d) Localisation des stations présentées sur la figure 12 suivante 36

Illustration 22 : Déplacements mesurés par relevés GNSS périodiques sur le site de Charlaix entre 2015 et 2022. Les noms des différentes stations sont précisés dans la légende et leur position est matérialisée sur la figure 11d. Pour chaque station, la vitesse linéaire moyenne annuelle est estimée et l'intervalle de confiance à 95 % est précisé. 37

Illustration 23 : Stations GPS3 et GPS2, comparaison des solutions de positionnement obtenues par calcul autonome Infrasurvey et par calcul OMIV. 38

Illustration 24 : Déplacements cumulés mesurés sur le site de Charlaix entre le 16 décembre 2020 et le 24 février 2023 pour les stations GPS2 et GPS3. Les vitesses indiquées sont les moyennes sur toute la durée présentée. Les barres verticales correspondent aux limites de saisons « sèche » et « humide » (1er avril et 1er novembre). 39

Illustration 25 : Corrélogrammes horaires (composante verticale) entre les stations s0-s1 (à gauche) et s0-s2 (à droite). L'échelle de couleur représente le coefficient de corrélation CC et est commune entre les deux corrélogrammes. Les bandes bleues horizontales indiquent une absence de données. Les courbes noires correspondent au corrélogramme moyen. 40

Illustration 26 : Kernels de sensibilité de la vitesse des ondes S en fonction de la profondeur et pour différentes fréquences. 41

Illustration 27 : Séries temporelles horaires de dV/V dans la bande de fréquence 05-20 Hz pour les couples de stations s0-s1 (à gauche) et s0-s2 (à droite). 41

Illustration 28 : Analyse de différents paramètres des sismogrammes horaires de la composante verticale de la station s0 dans la bande 1-49 Hz. **a)** Amplitude spectrale. **b)** Périodogramme de l'énergie sismique. **c)** Périodogramme de l'amplitude spectrale dans la bande 5-20 Hz. **d)** Périodogramme de l'activité sismique pour des événements de seuil STA/LTA de 50 et **e)** 500. 43

Illustration 29 : Séries temporelles de dV/V des coupes de capteurs s0-s1 (disques pleins) et s0-s2 (losanges) pour différentes bandes de fréquences. 44

Illustration 30 : Périodogrammes de différents paramètres sismologiques, piézométriques et météorologiques sur le site de Charlaix. 45

Illustration 31 : Inter-corrélations entre la pression atmosphérique et, à gauche, la pression interstitielle, au centre, le dV/V S0-S1 et, à droite, le dV/V S0-S2. Le dV/V présenté est dans la bande 5-20 Hz. ..46

Illustration 32 : Comparaison des séries temporelles quotidiennes de **a)** dV/V dans la bande 05-20 Hz des stations s0-s1 (disques) et s0-s2 (losanges) avec **b)** les précipitations, la température (centrée-réduite), la pression interstitielle (centrée réduite) dans sd20 et **c)** la hauteur de neige et les déplacements cumulés des stations GPS2 et GPS3. Les données météorologiques sont quotidiennes et proviennent de Météo France (station de La Mure radome). La signification des flèches de couleur est détaillée dans le corps du texte. 47

Illustration 33 : Localisation et implantation du point d'acquisition 48

Illustration 34 : Nuages de points bruts N1a et N1b 49

Illustration 35 : Résultats des calculs de la distance nuage-maillage (dC2M) 51

Illustration 36 : Zoom sur le centre de distribution des distances C2M 51

Illustration 37 : Résultats des calculs de la distance nuage-maillage (dC2M) 52

Illustration 38 : Histogramme de répartition des distances C2M zoomé sur la zone de I4 et I8 53

Illustration 39 : Estimation de la cohérence sur la première paire d'images 54

Illustration 40 : Points obtenus sur la zone d'étude par la méthode SARPROZ 55

Illustration 41 : Extrait du relevé Lidar sur la commune de Quet-en-Beaumont 57

Illustration 42 : Implantation du dispositif d'instrumentation de Quet-en-Beaumont 58

Illustration 43 : Courbes piézométriques sur la commune de Quet-en-Beaumont 60

Illustration 44 : Résultats des mesures inclinométriques en I7 62

Illustration 45 : Résultats des mesures inclinométriques en I2 63

Illustration 46 : Résultats des mesures inclinométriques en I3RTM 65

Illustration 47 : Figuration des principaux ensembles sensibles suite à l'interprétation des données géologiques extraites de la carte 1/50 000e de La Mure (BRGM) 67

Illustration 48 : Observations morphologiques issues des relevés Lidar sur le site des Touches 68

Illustration 49 : Implantation du dispositif d'instrumentation sur le site des Touches 69

Illustration 50 : Courbes piézométriques du site des Touches 71

Illustration 51 : Implantation des points de mesures de chimie des eaux effectuées en mars-avril 2021 73
Illustration 52 : Résultats des mesures inclinométriques en I1 74
Illustration 53 : Résultats des mesures inclinométriques en I2 75
Illustration 54 : Résultats des mesures inclinométriques en I3 76
Illustration 55 : Résultats des mesures inclinométriques en I4 77
Illustration 56 : Résultats des mesures inclinométriques en I5 78
Illustration 57 : Extrait du relevé LiDAR avec localisation (en rouge) de l'escarpement principal 81
Illustration 58 : Implantation du dispositif d'instrumentation sur le site de Corps 82
Illustration 59 : Courbes piézométriques du site de Corps 83
Illustration 60 : Résultats des mesures inclinométriques en I1 85
Illustration 61 : Résultats des mesures inclinométriques en I2 86
Illustration 62 : Résultats des mesures inclinométriques en I3 87
Illustration 63 : Résultats des mesures inclinométriques en I4 88
Illustration 64 : Résultats des mesures inclinométriques en I5 89
Illustration 65 : Résultats des mesures inclinométriques en I6 90
Illustration 66 : Implantation du dispositif d'instrumentation sur le site du Motty 93
Illustration 67 : suivi piézométrique au droit du profil 1 entre décembre 2017 et décembre 2019 95
Illustration 68 : suivi piézométrique au droit du profil 2 entre décembre 2017 et décembre 2019 96
Illustration 69 : suivi piézométrique au droit du profil 3 entre décembre 2017 et décembre 2019 96
Illustration 70 : suivi piézométrique au droit du profil 4 entre décembre 2017 et décembre 2019 97
Illustration 71 : suivi piézométrique au droit du profil 5 entre décembre 2017 et décembre 2019 98
Illustration 72 : suivi piézométrique au droit du profil 6 entre décembre 2017 et décembre 2019 99
Illustration 73 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-1 100
Illustration 74 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-2 101
Illustration 75 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-3 102
Illustration 76 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-4 103
Illustration 77 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-5 104
Illustration 78 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-6 105
Illustration 79 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-7 106
Illustration 80 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-8 107
Illustration 81 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-9 108
Illustration 82 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-10 109
Illustration 83 : Résultats des mesures inclinométriques en SC3-11 110



RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité















EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

MLA3 – Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Cofinancé par le FEDER-POIA et le FNADT-CIMA

MLA 3 : Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Document annexe : Représentation graphiques référencées dans le livrable L-B1



Projet soutenu par l'Union Européenne au travers du Fonds Européen de Développement Régional – Programme Opérationnel Interrégional du Massif des Alpes et de la région Provence Alpes Côte d'Azur en partenariat avec la Région Auvergne Rhône Alpes

Projet soutenu par l'Etat – Fonds National d'Aménagement et de Développement du Territoire, Convention Interrégionale du Massif des Alpes

LIVRABLE N° B1 - Annexe

Date : Mars 2023

MLA3 – Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Document annexe : Représentation graphiques référencées dans le livrable L-B1

➔ **Site de Charlaix – Inclinomètre I4 :**

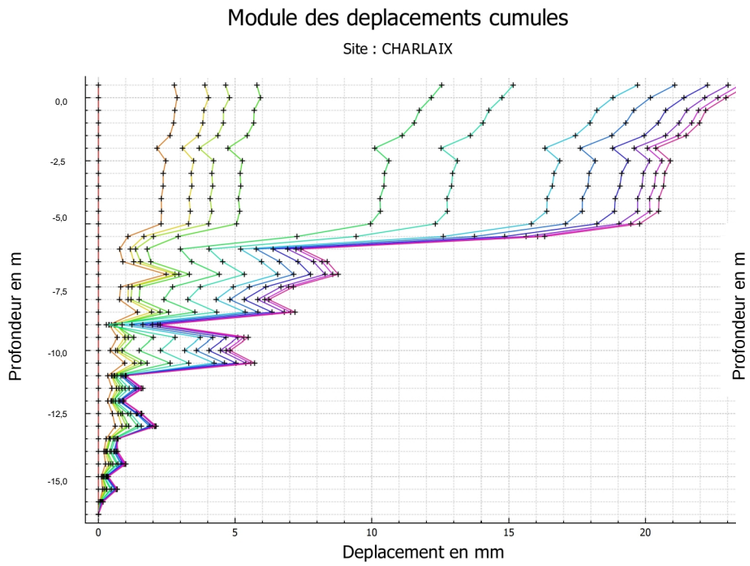
- Modules des déplacements cumulés
- Module des déplacements cumulés à -6 m
- Variations angulaires

➔ **Site de Charlaix – Pluviométrie / CPI :**

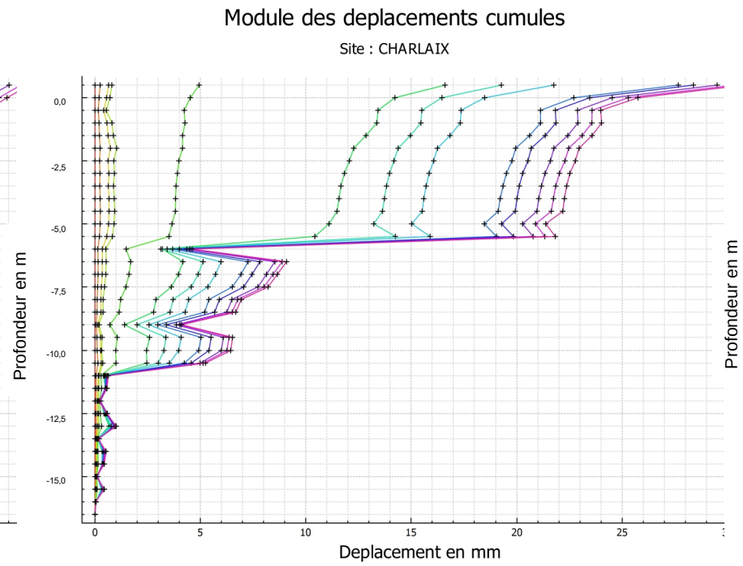
- Années 2018-2019
- Années 2019-2020
- Années 2020-2021
- Années 2021-2022

➔ **Site de Quet-en-Beaumont :**

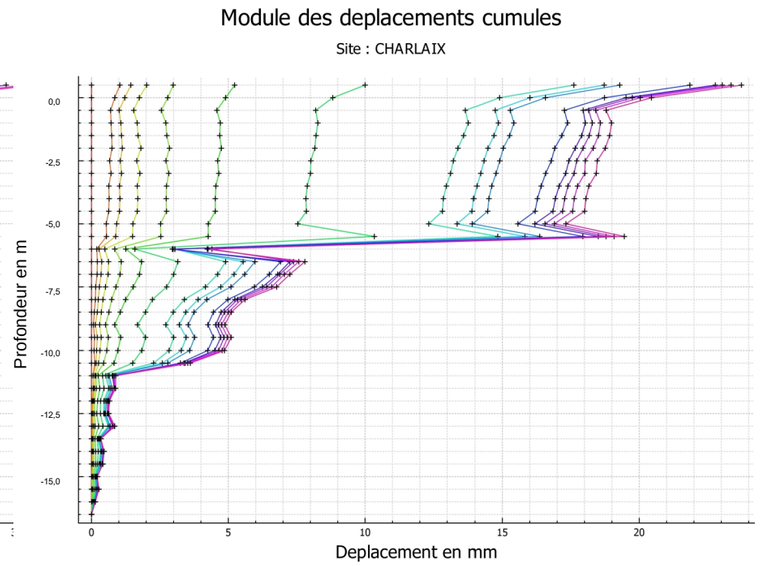
- CPI 1 – Juin 2018 à Septembre 2022



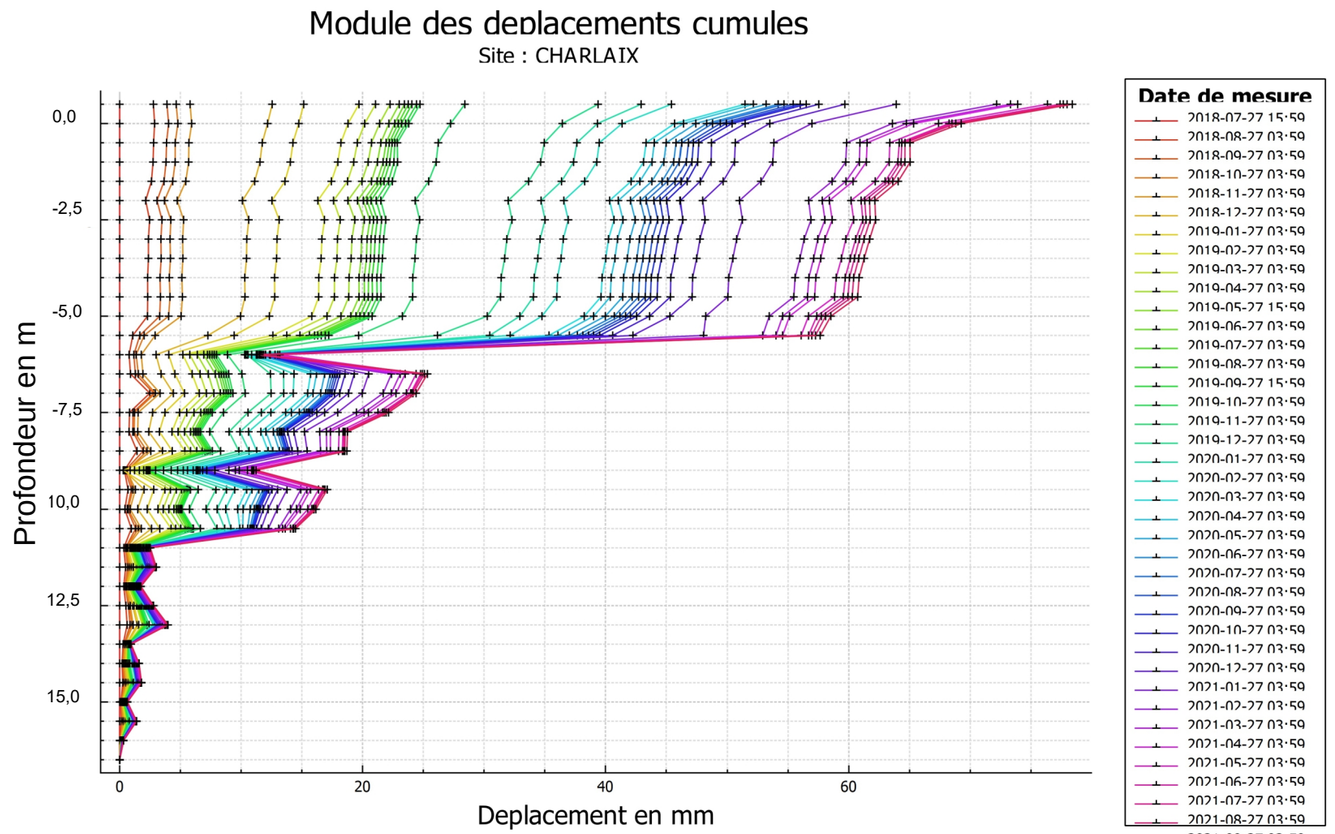
de juillet 2018 à juillet 2019
Périodicité mensuelle



de juillet 2019 à juillet 2020
Périodicité mensuelle

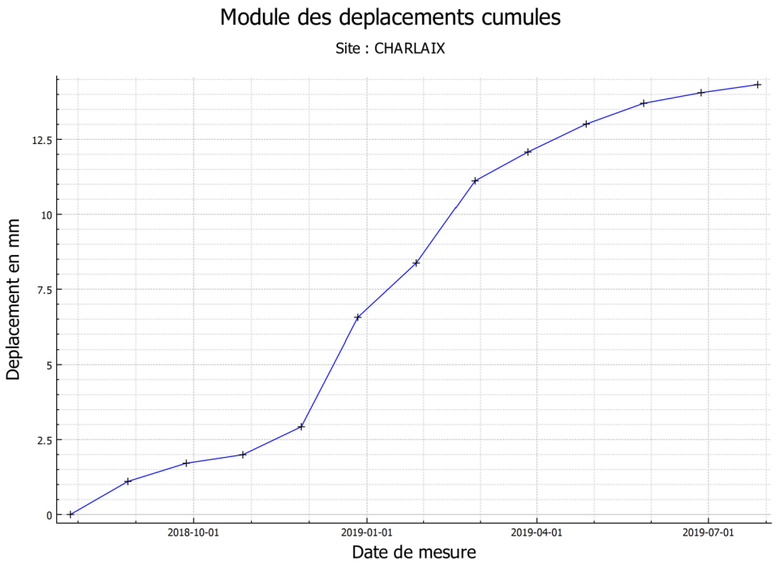


de juillet 2020 à octobre 2021
Périodicité mensuelle

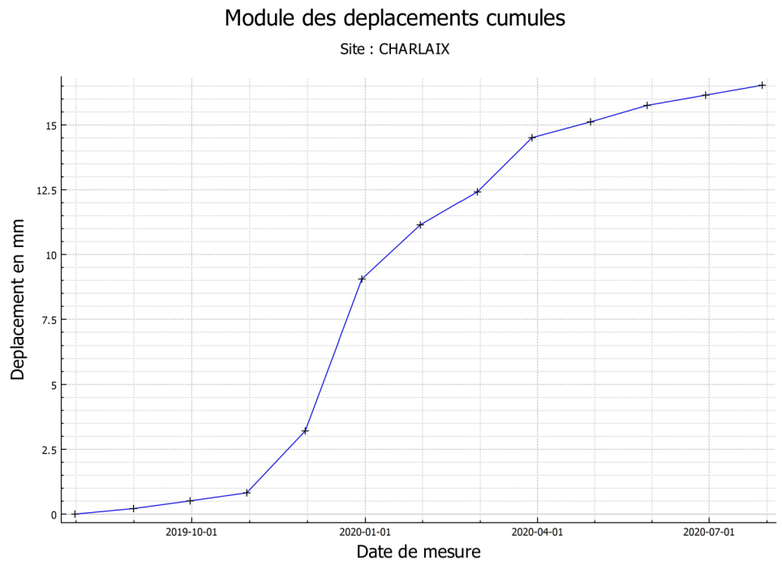


de juillet 2018 à octobre 2021
Périodicité mensuelle

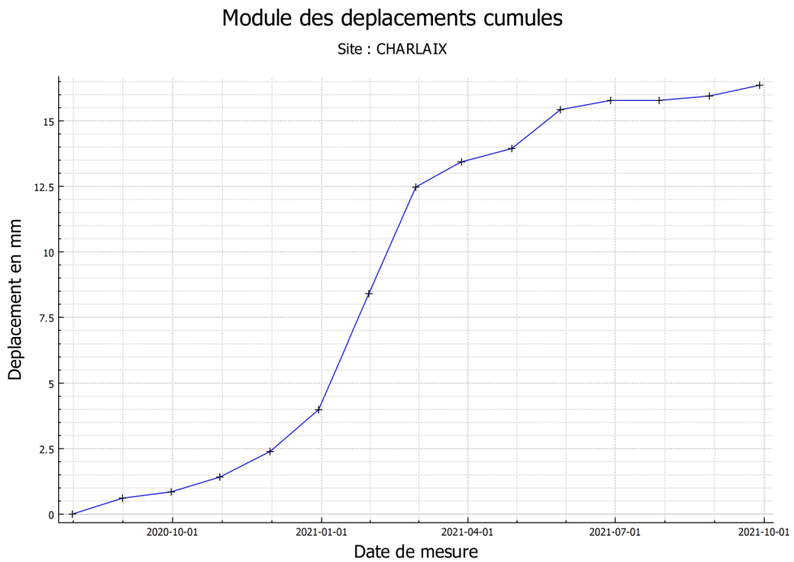
l'Europe s'engage sur le Massif Alpin
UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de Développement Régional
Région Provence Alpes Côte d'Azur



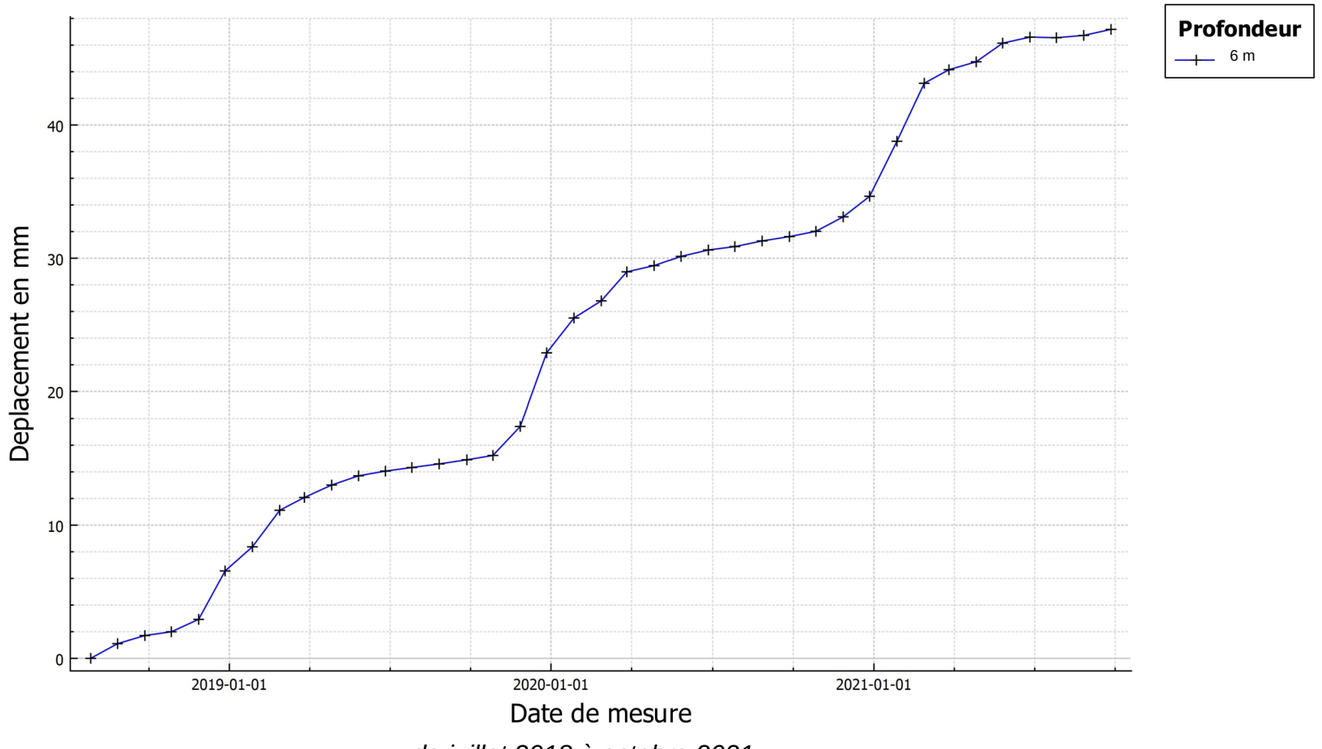
de juillet 2018 à juillet 2019
Périodicité mensuelle



de juillet 2019 à juillet 2020
Périodicité mensuelle

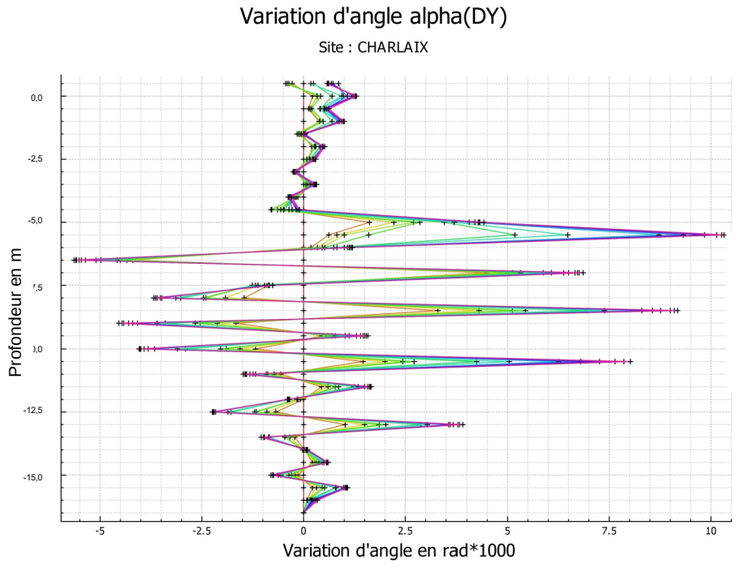


de juillet 2020 à octobre 2021
Périodicité mensuelle

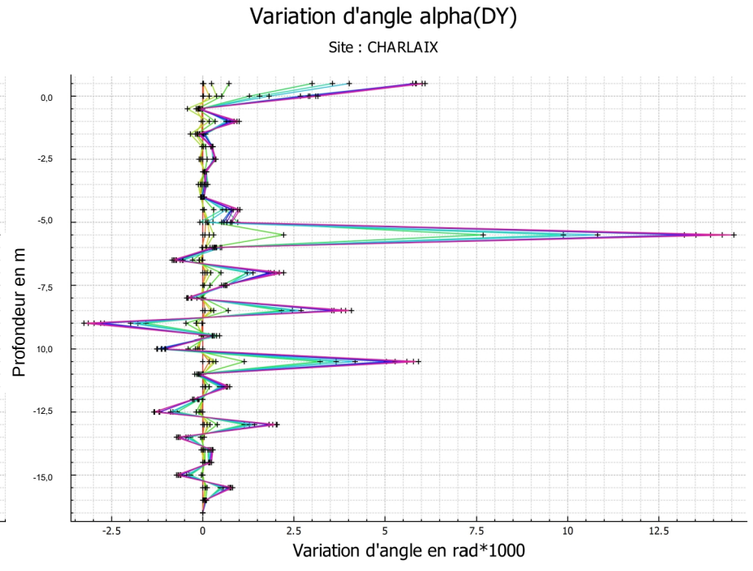


de juillet 2018 à octobre 2021
Périodicité mensuelle

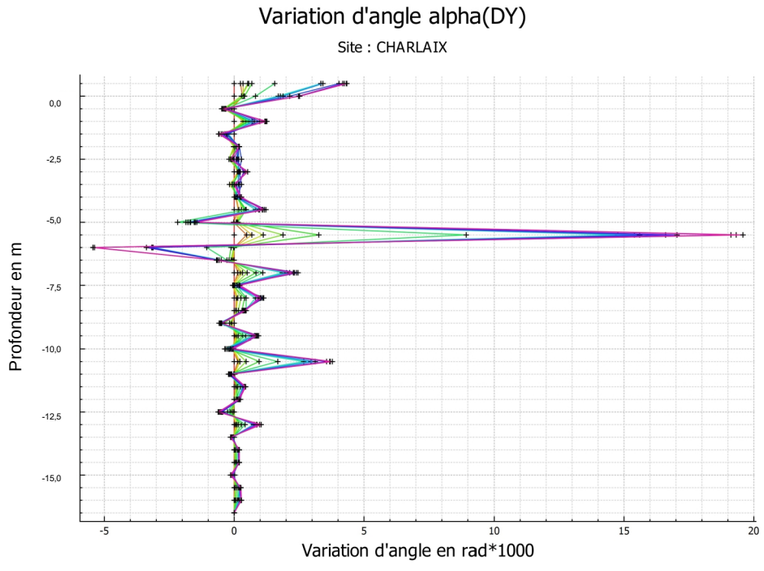
l'Europe s'engage sur le Massif Alpin
UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de Développement Régional
Région Provence Alpes Côte d'Azur



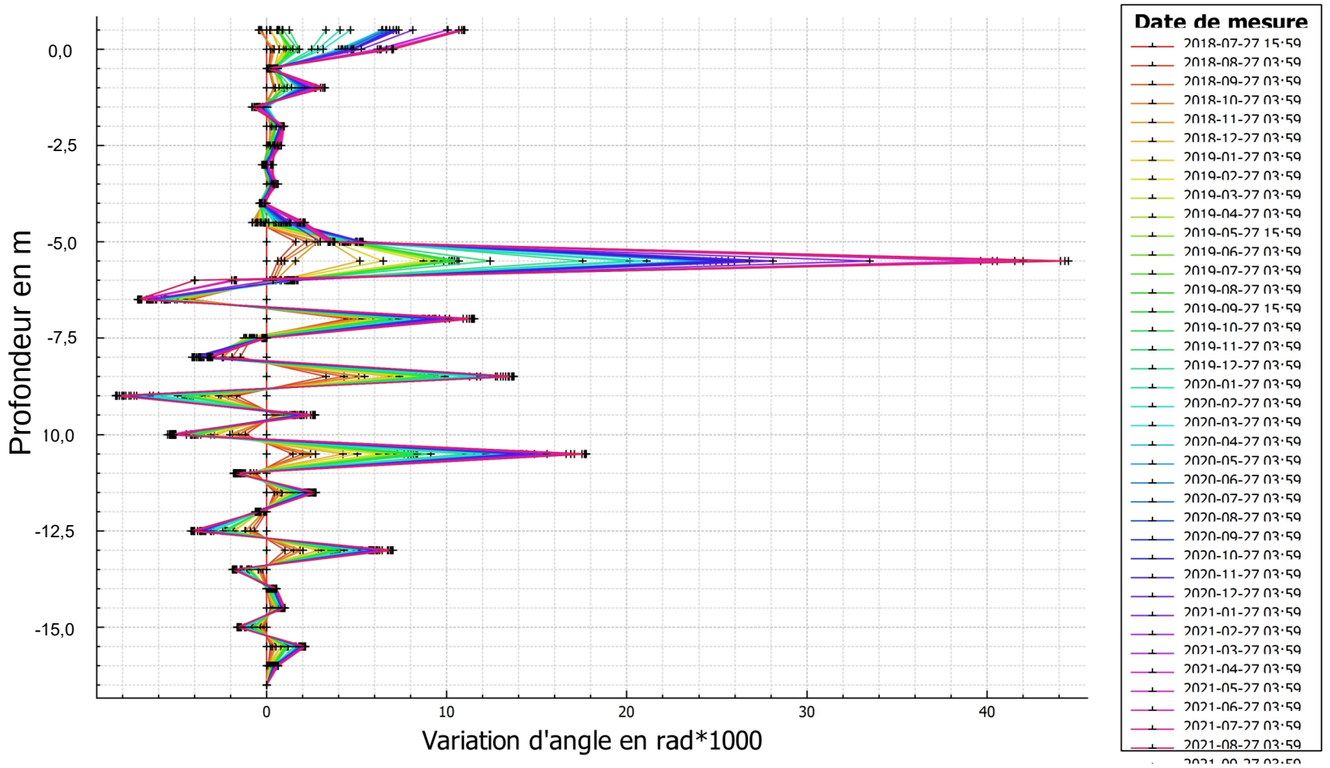
de juillet 2018 à juillet 2019
Périodicité mensuelle



de juillet 2019 à juillet 2020
Périodicité mensuelle

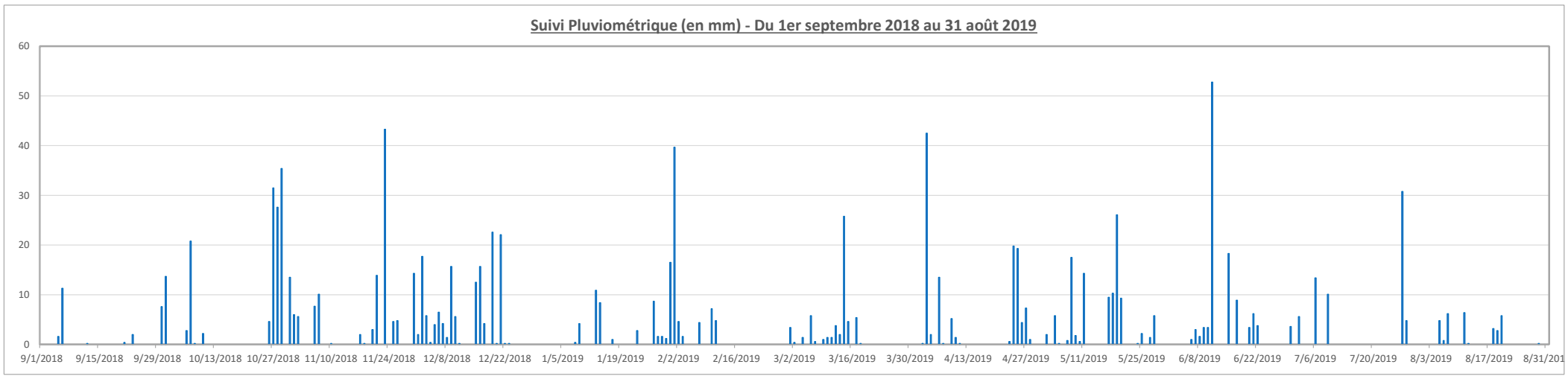


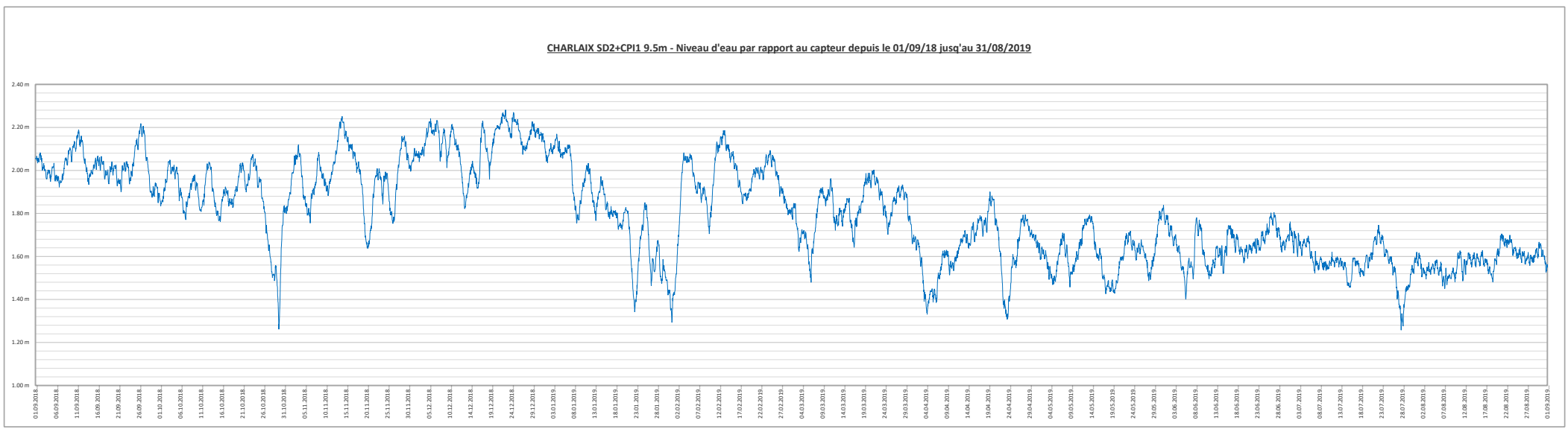
de juillet 2020 à octobre 2021
Périodicité mensuelle

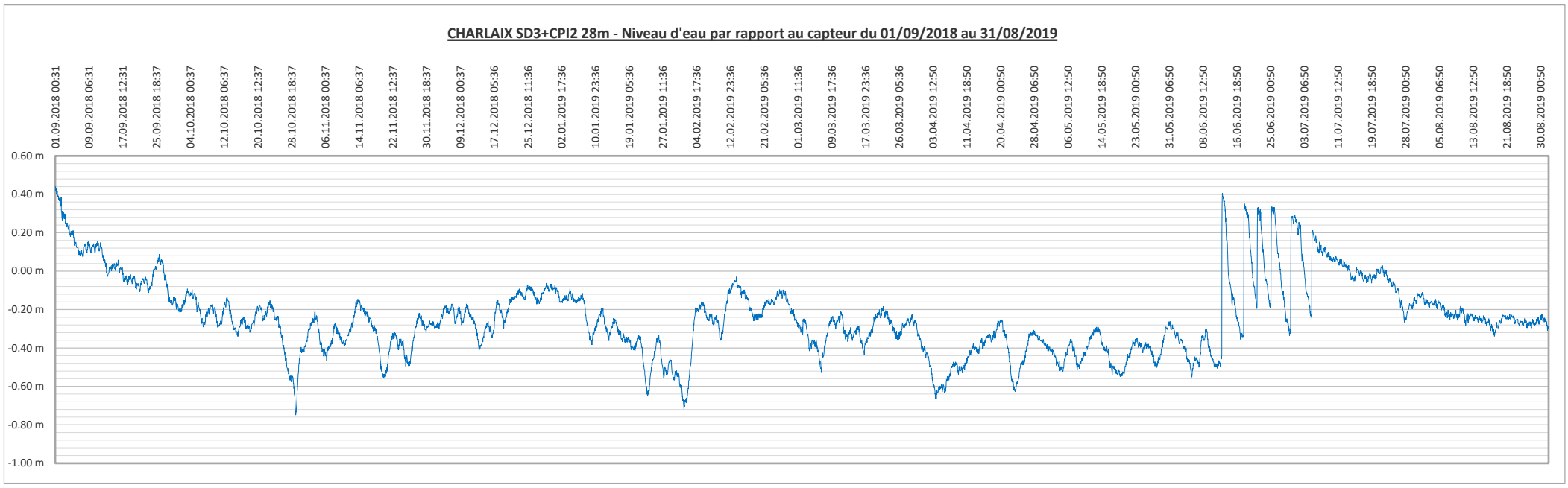


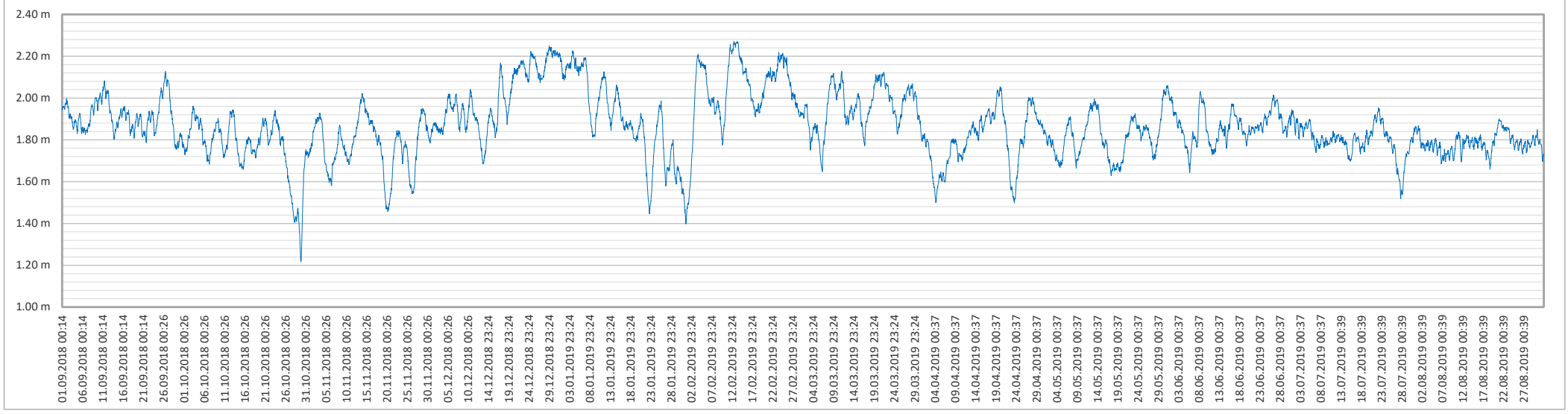
de juillet 2018 à octobre 2021
Périodicité mensuelle

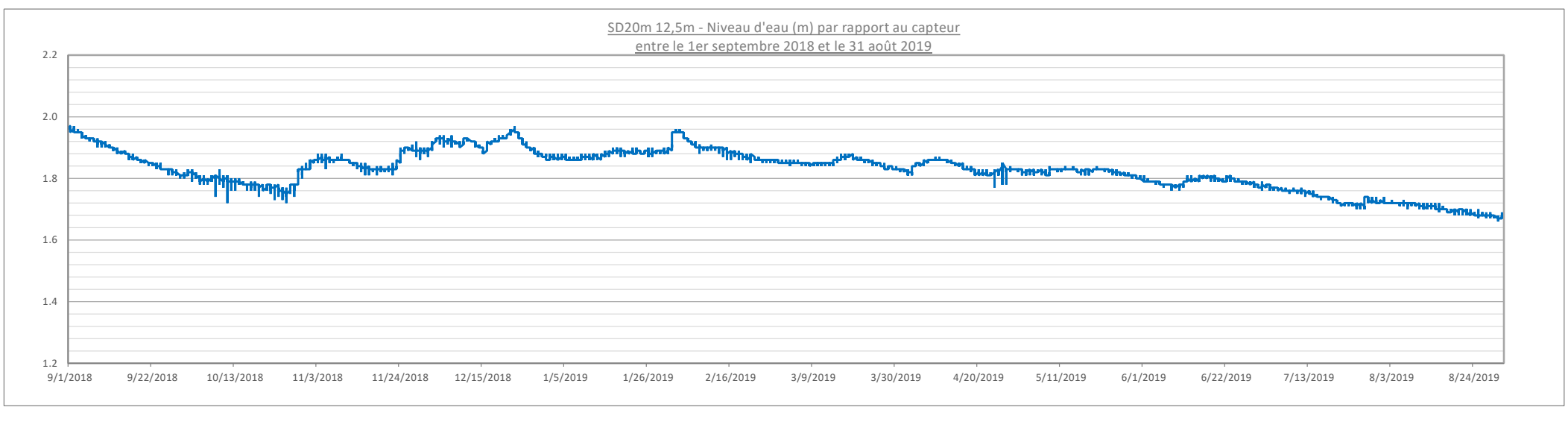
Site de Charlaix – Période du 1er septembre 2018 au 31 août 2019
Comparaison Pluviométrie / Niveaux piézométriques



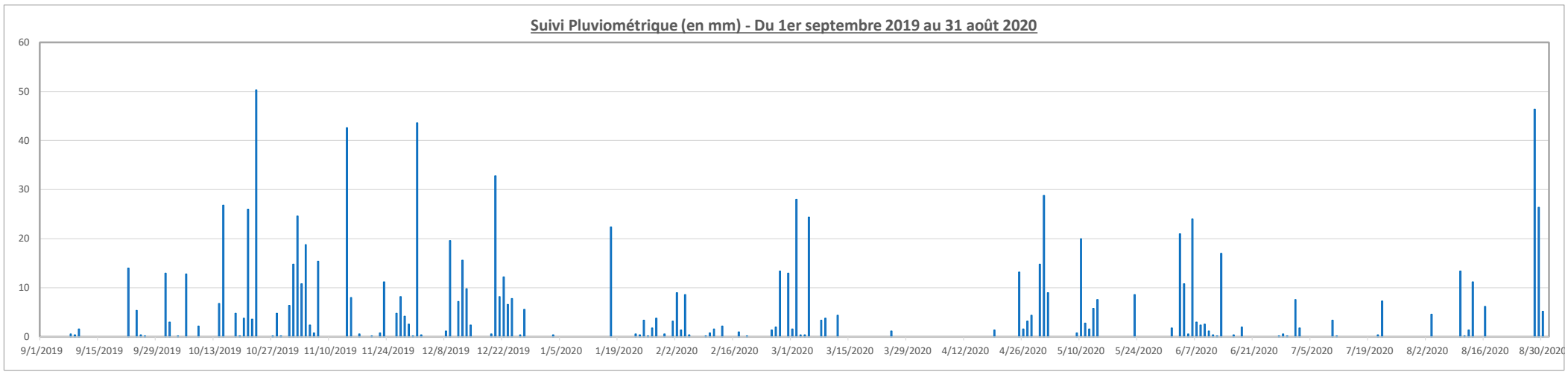


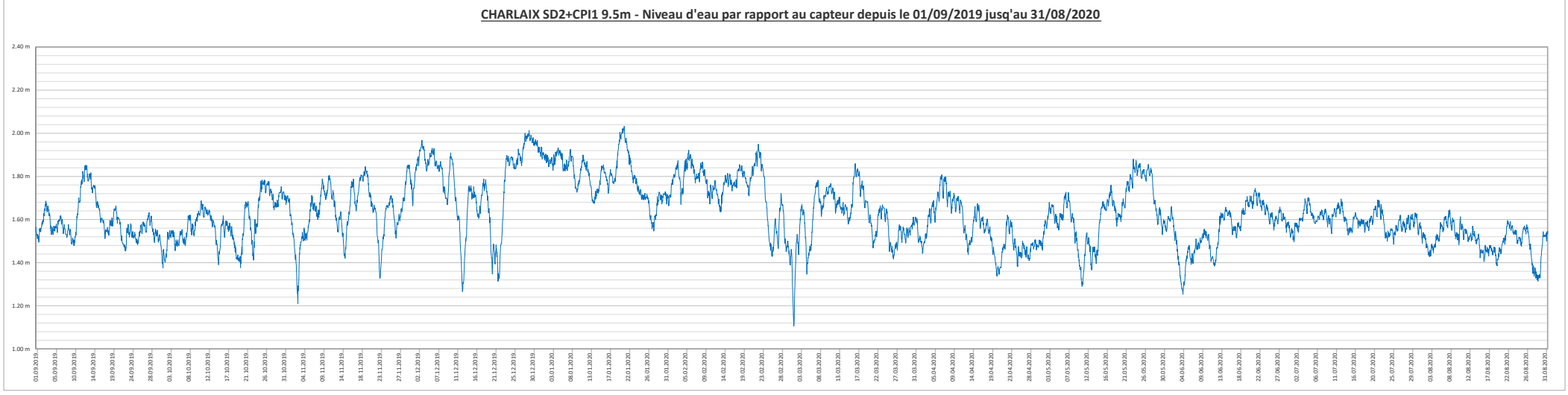


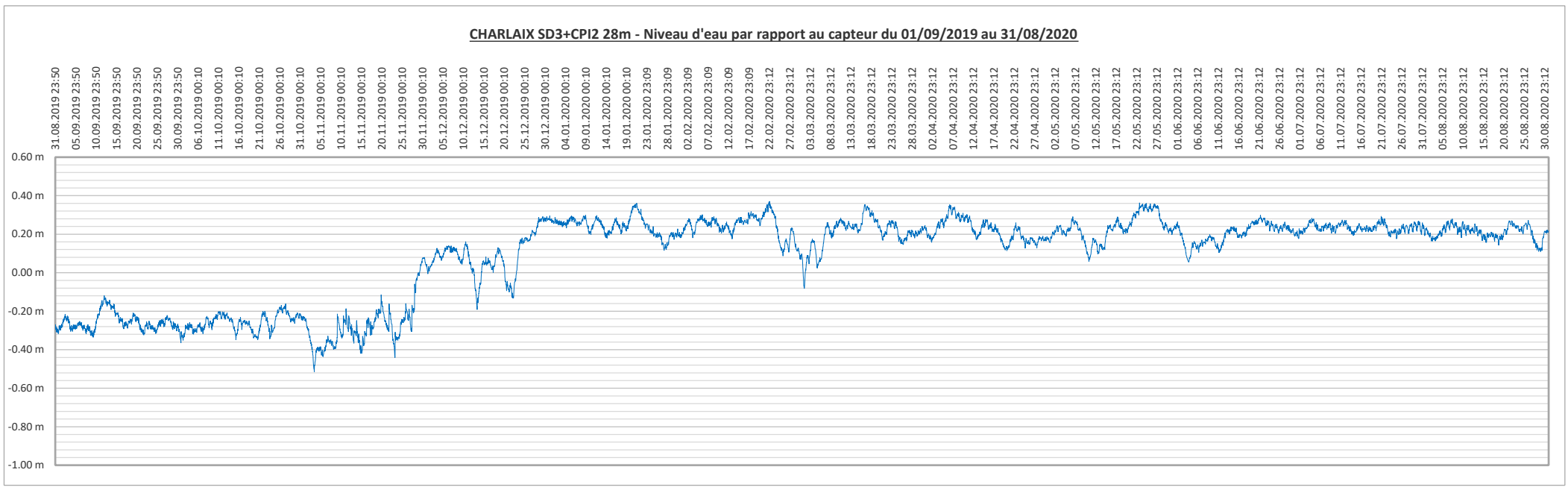


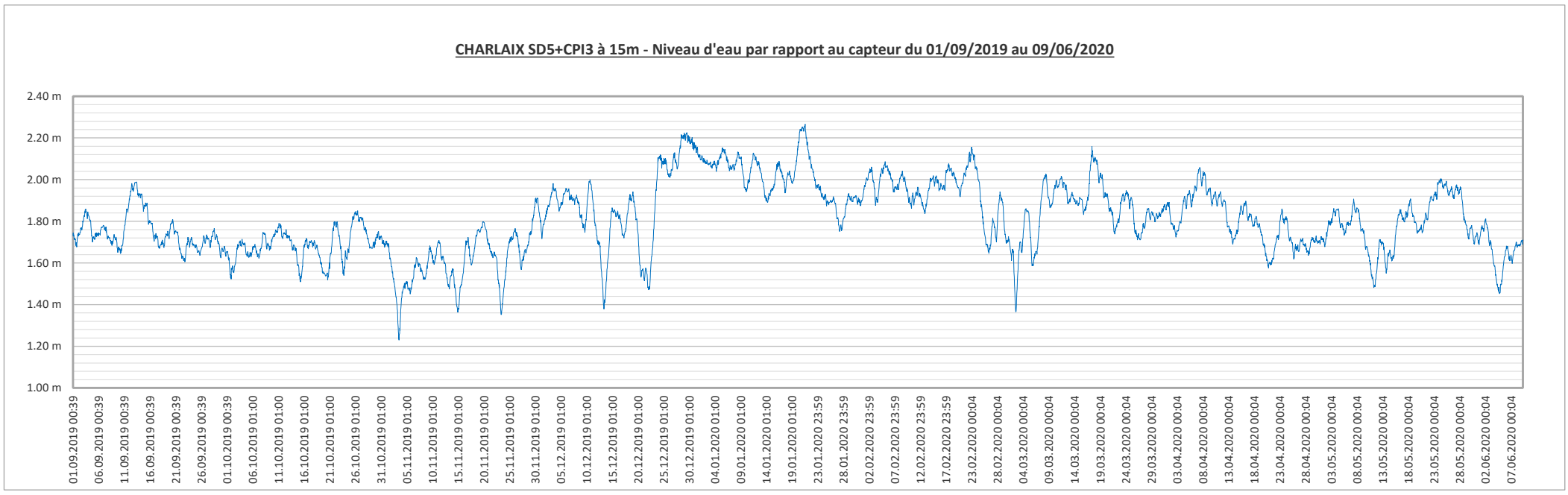


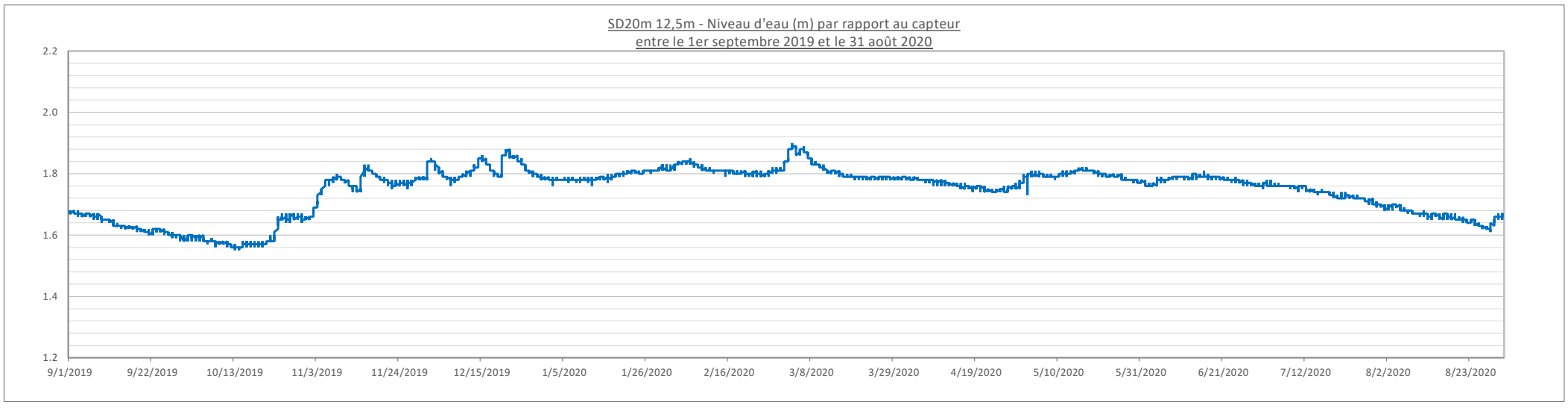
Site de Charlaix – Période du 1er septembre 2019 au 31 août 2020
Comparaison Pluviométrie / Niveaux piézométriques



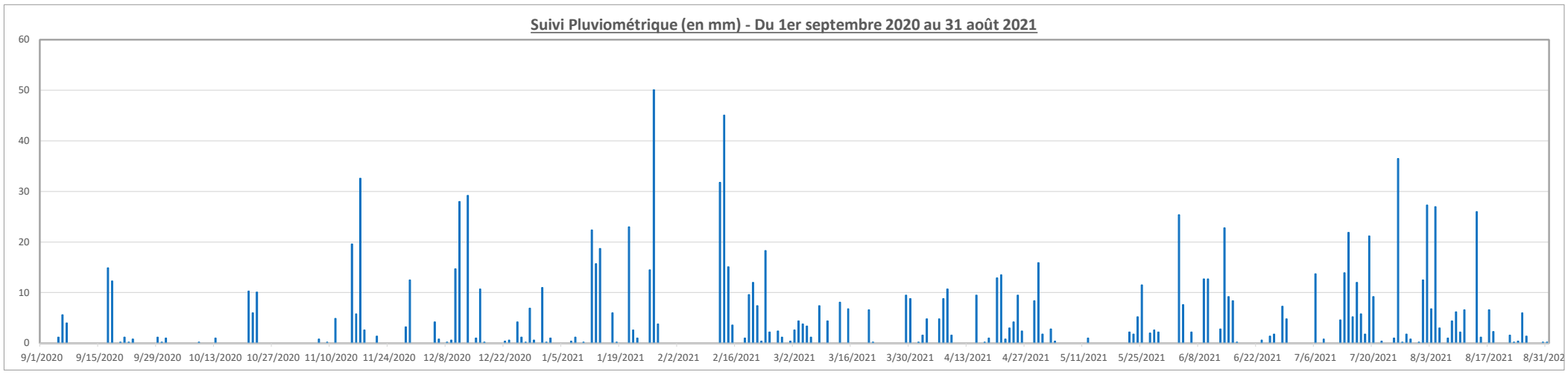


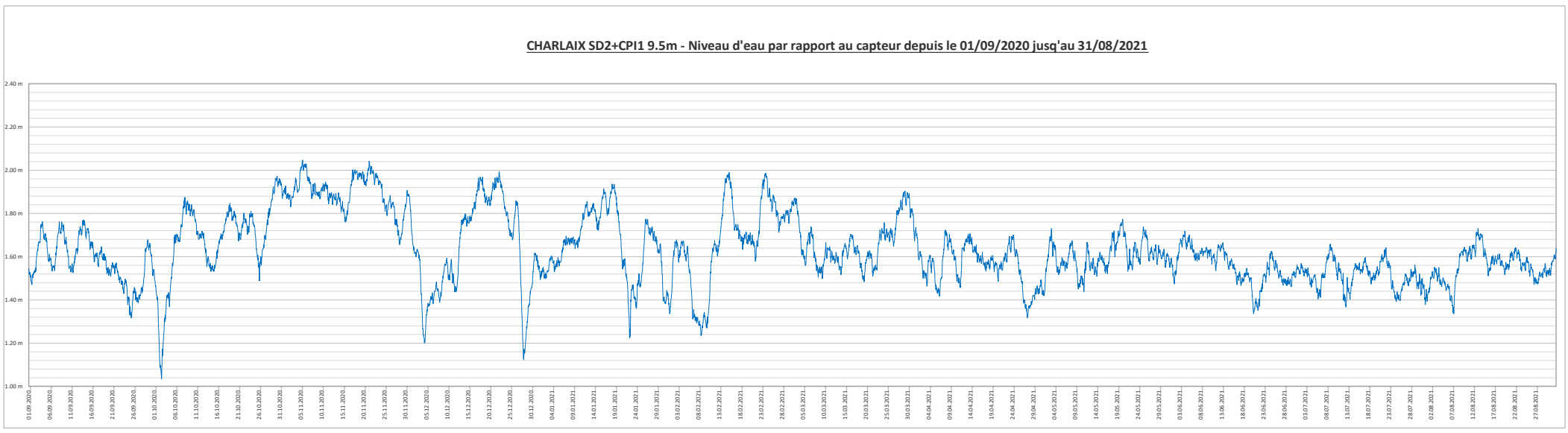


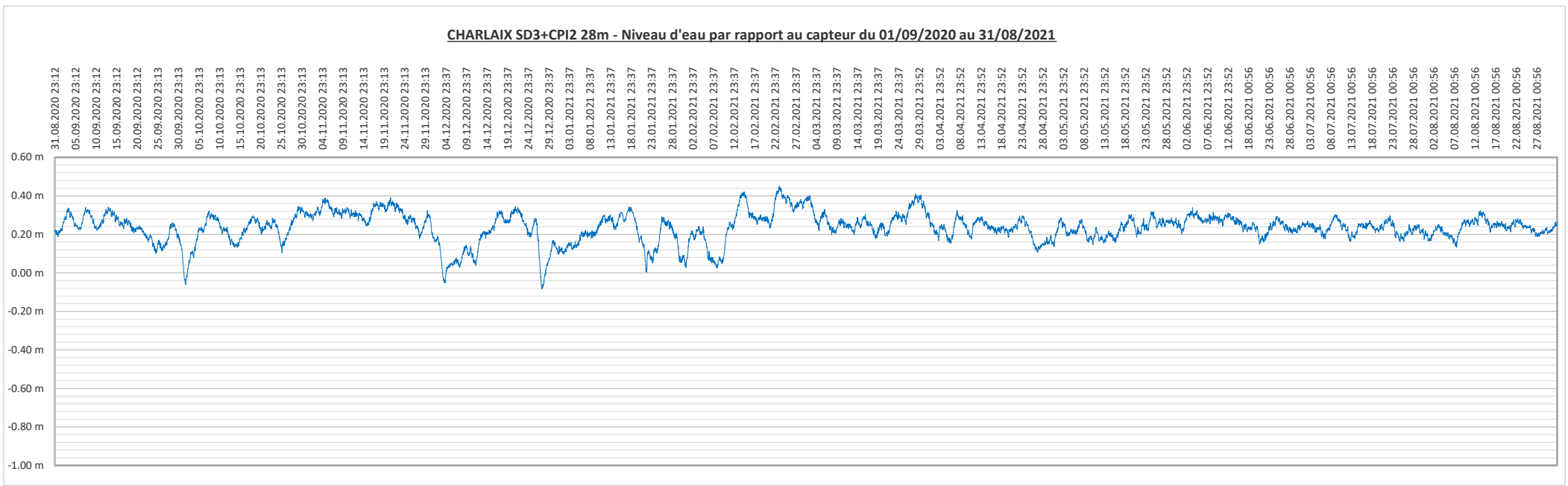


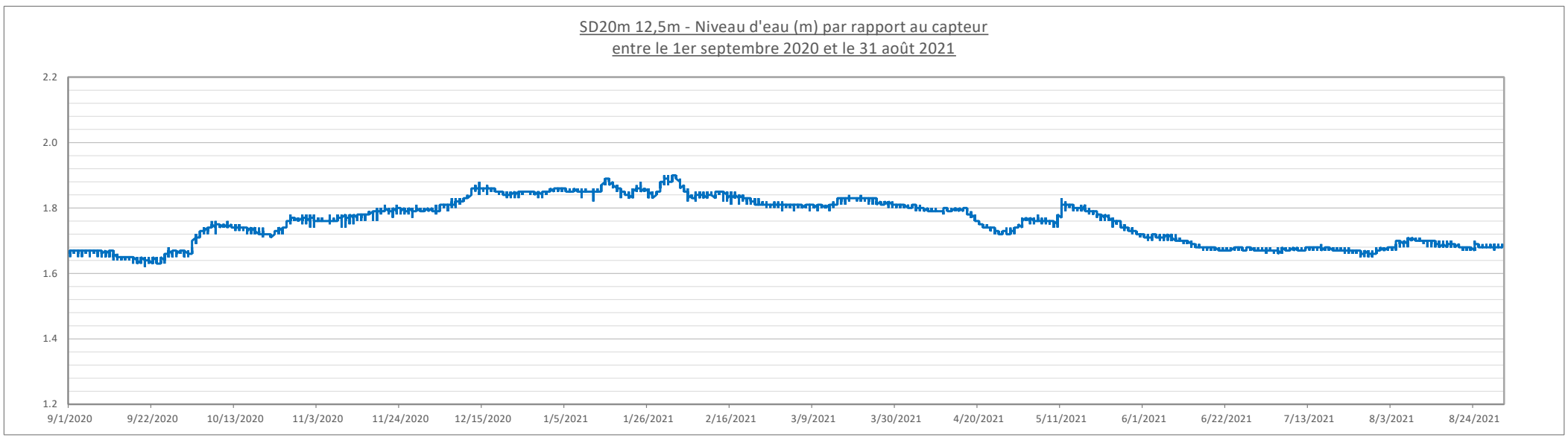


Site de Charlaix – Période du 1er septembre 2020 au 31 août 2021
Comparaison Pluviométrie / Niveaux piézométriques

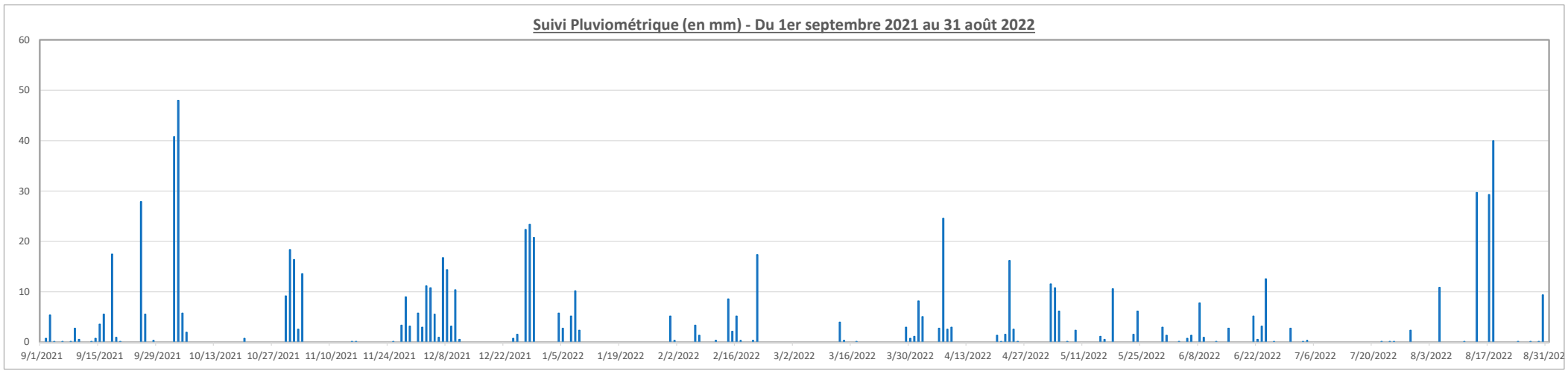


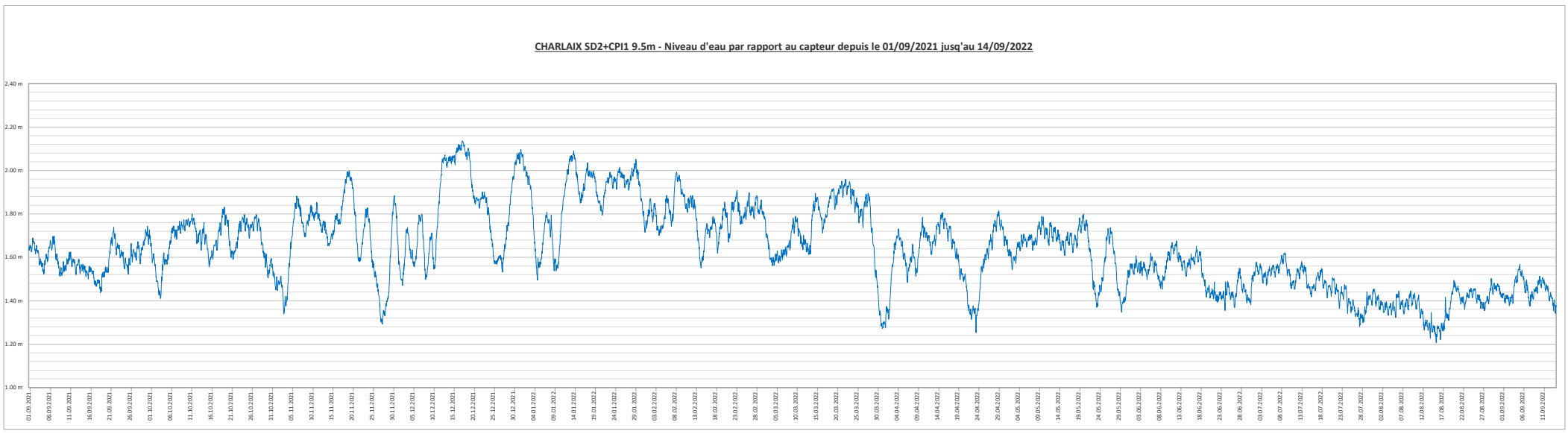


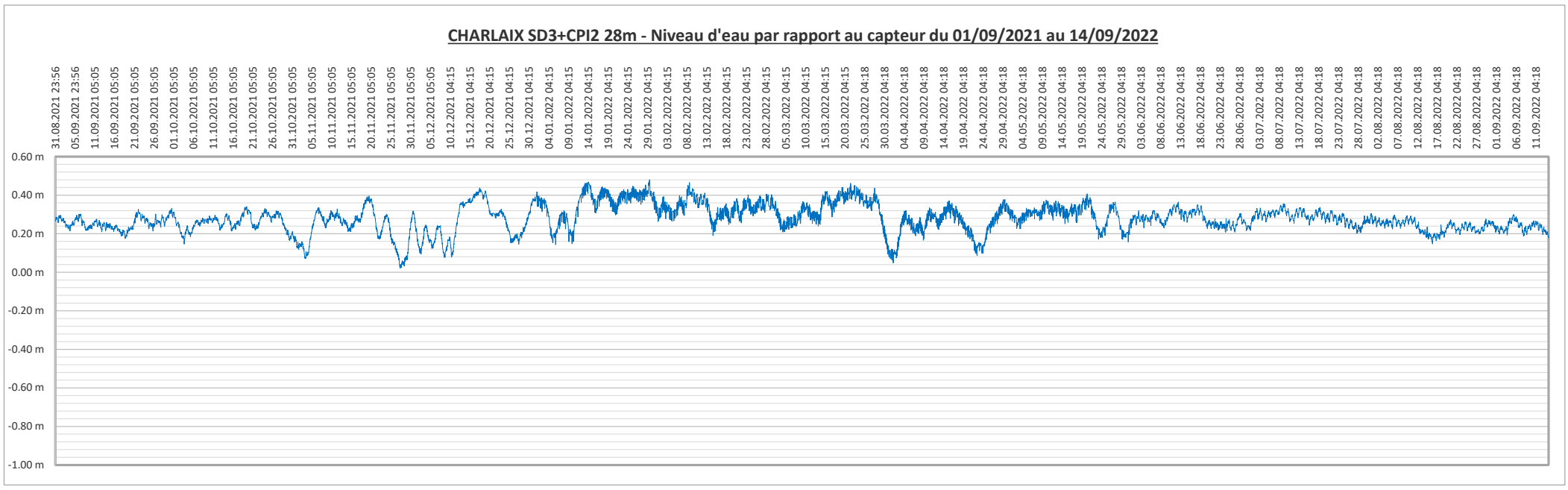


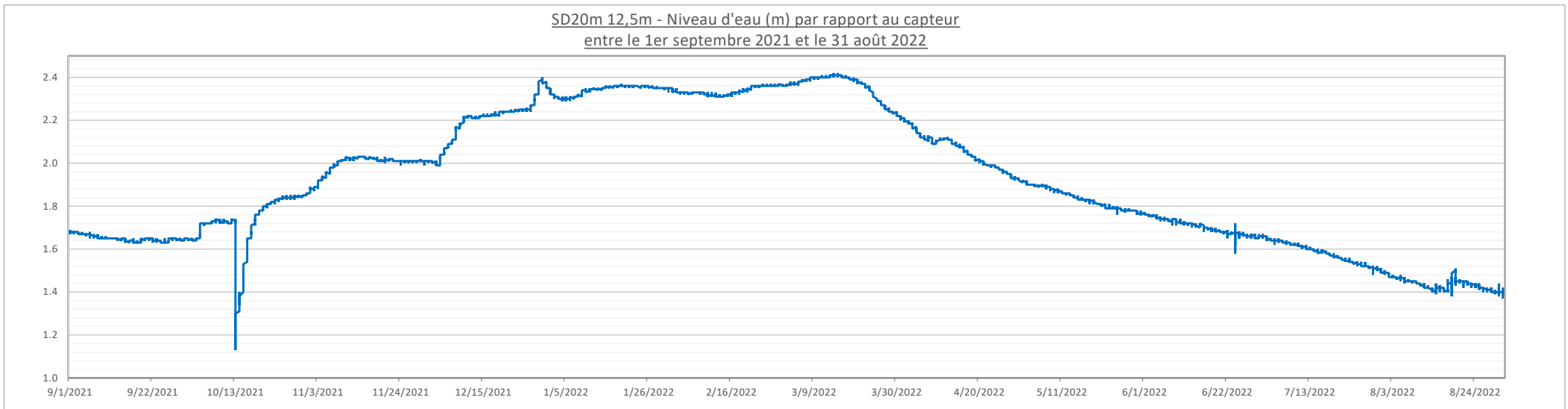


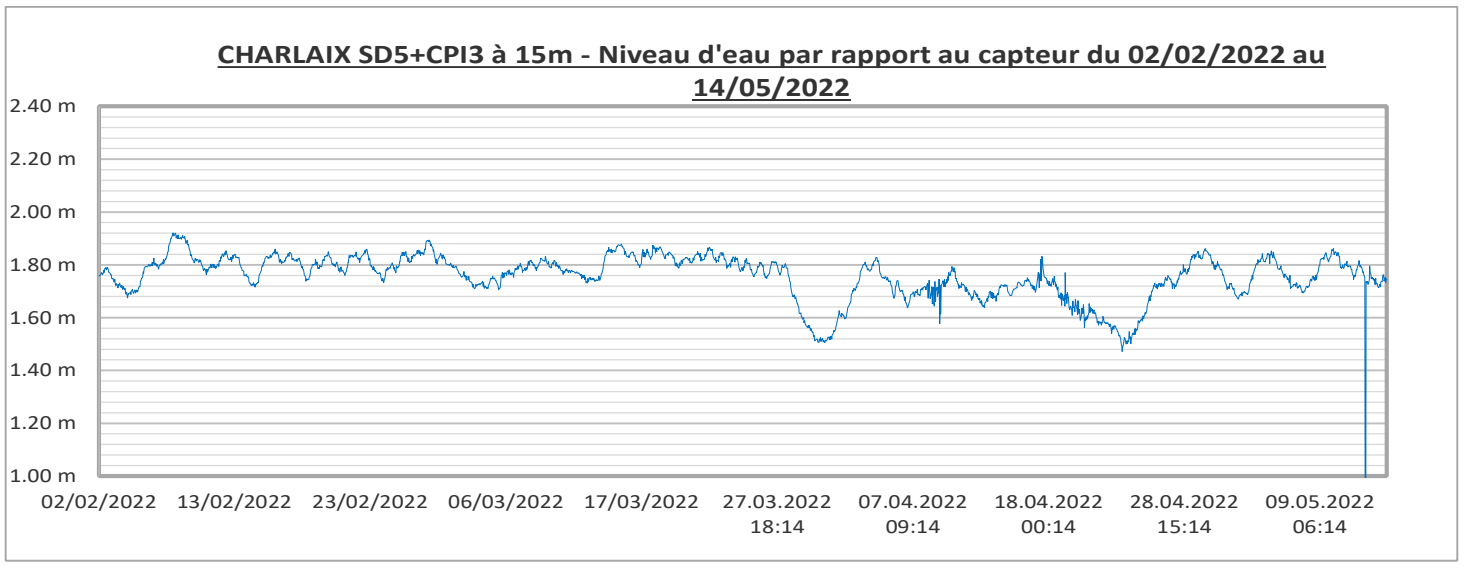
Site de Charlaix – Période du 1er septembre 2021 au 31 août 2022
Comparaison Pluviométrie / Niveaux piézométriques



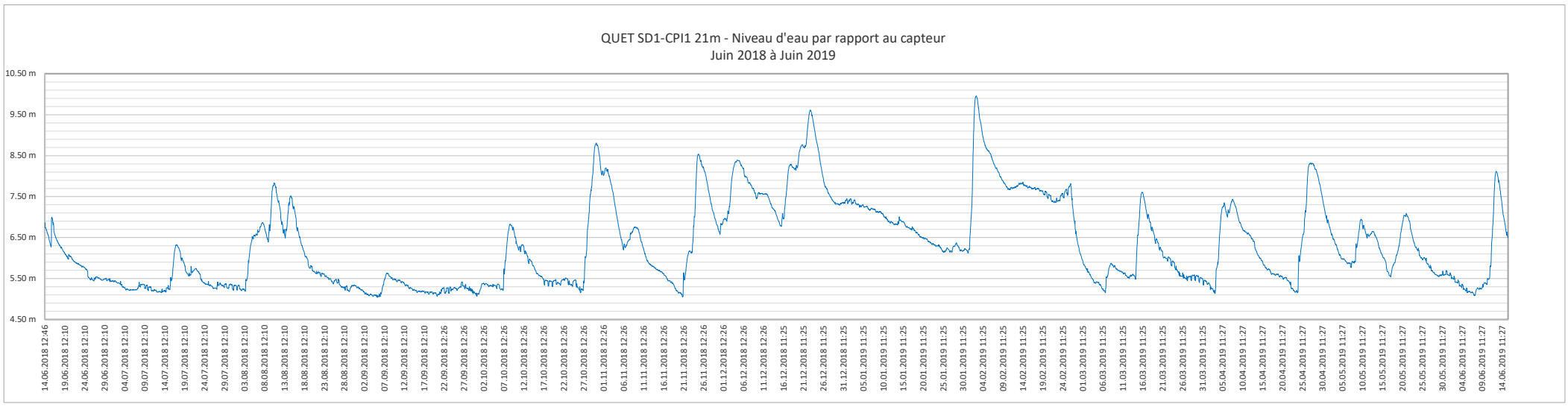


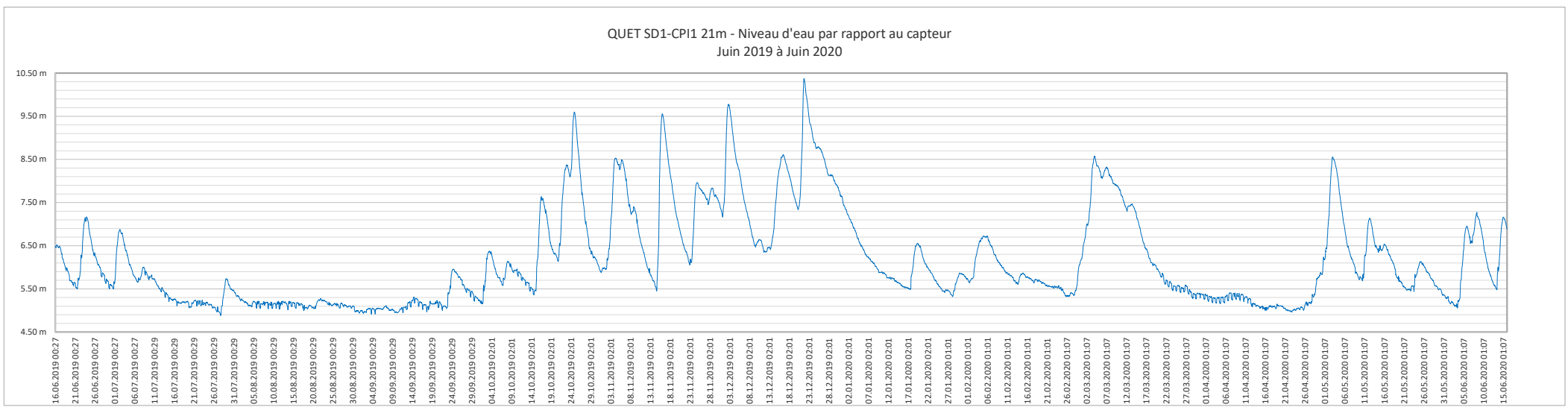


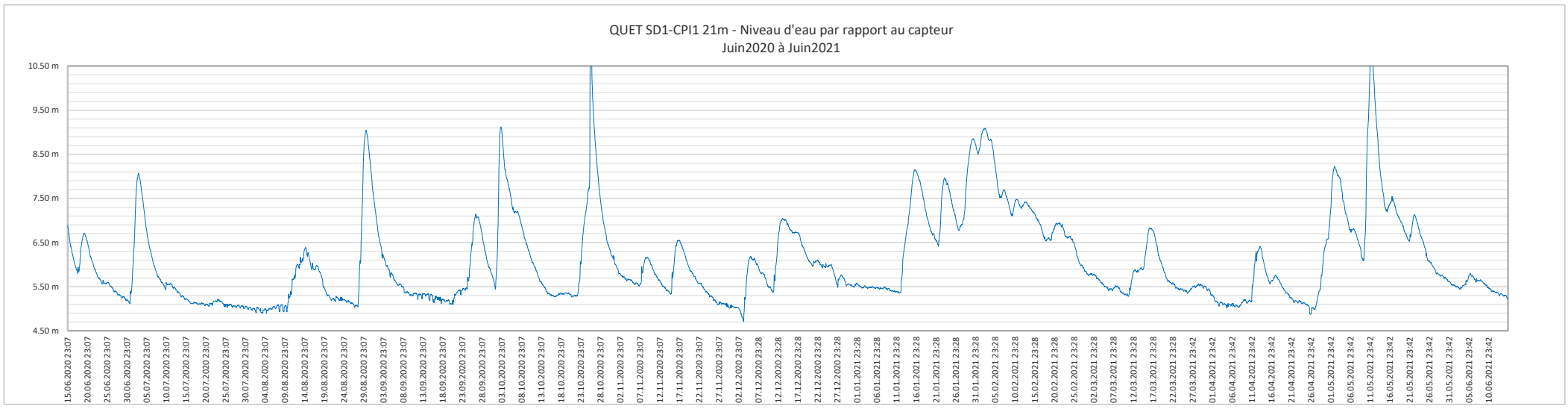


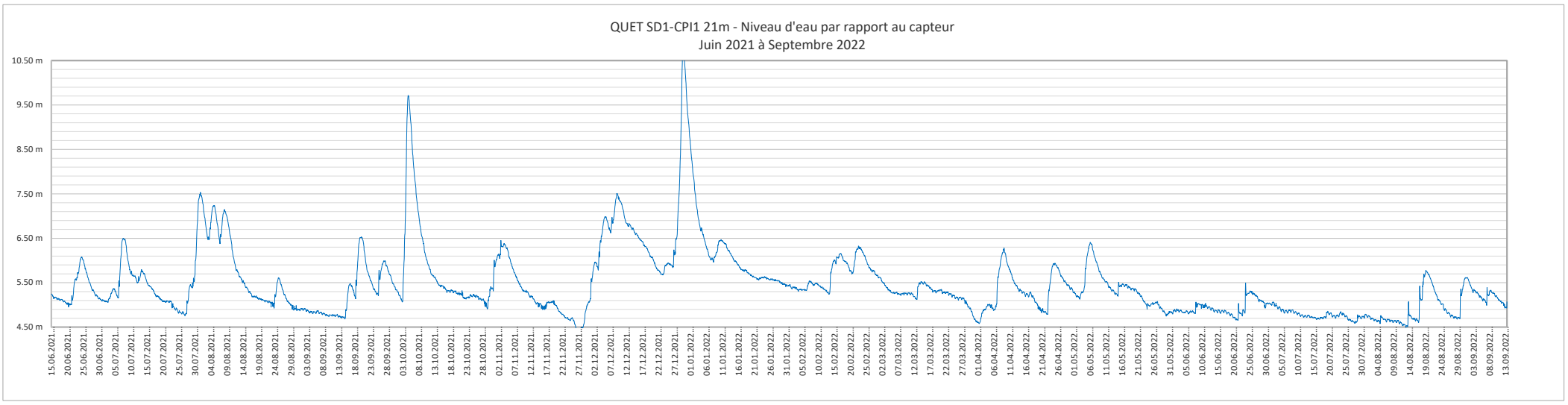


Site de Quêt-en-Beaumont
Résultats du suivi piézométrique CPI1 entre juin 2018 et septembre 2022











RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité















EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES

MLA3 – Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Cofinancé par le FEDER-POIA et le FNADT-CIMA