

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

**B2 – Evaluation des méthodes d'instrumentation
R2 – Recommandations pour un suivi adapté des glissements lents**



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE RHÔNE ALPES



RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR



l'Europe
s'engage
le Massif Alpin

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



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Opérations cofinancées par l'Etat

FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE

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

LIVRABLES N°L-B2 & R2

Date : Mars 2023

MLA3 – Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Évaluation des méthodes d'instrumentation pour le suivi des glissements lents

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 :	L-B2 : Evaluation des méthodes d'instrumentation pour le suivi des glissements lents L-R2 : Recommandations pour un suivi adapté des glissements de terrain lents	
Date d'édition :	Mars 2023	
Nombre de pages :	36	
Coordinateur :	Yohan PERU (Cerema)	
Rédacteurs du rapport :	Grégory BIEVRE (ISTerre) & Yohan PERU (Cerema)	
Avec la participation de :	-	
Relecteurs :	Fabrice ROJAT, Geneviève RUL (Cerema)	
Valideur :	Cédric GIRARDY (Directeur)	Le directeur du département Risques Infrastructures Matériaux  Cédric Girardy Signature numérique de Cedric Girardy

Résumé du livrable

Le présent document regroupe deux livrables de l'axe B du projet FEDER POIA « MLA3 » Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager.

Il présente tout d'abord un retour d'expérience sur les résultats de l'instrumentation mise en œuvre ou expérimentée dans le cadre du projet et dont l'ensemble des résultats étaient présentés dans le livret B1. A partir des résultats recueillis, il est proposé de comparer les méthodes de suivi adaptées à des glissements lents et d'identifier les avantages et limites de ces méthodes (livret B2). Ensuite, dans le livret R2, des recommandations sont proposées d'une part pour un usage approprié des différents types d'instrumentations, et d'autre part pour la conception d'un programme instrumental pertinent techniquement et financièrement, et pouvant permettre de dériver des solutions durables de traitement des glissements.

Mots clés

MLA3	RN85
Glissements lents	LiDAR terrestre et aéroporté
Instrumentation	Sismique, Bruit de fond
Inclinométrie	GPS
Piézométrie	

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/) : <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 Med¹, 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

Livrable B2 :	9
Evaluation de l'apport des méthodes d'instrumentation pour le suivi des glissements lents	9
1.1 Objectifs et enjeux du livrable	9
1.2 Inclinométrie	9
1.2.1 Rappels – Méthodologie et instrumentation en place	9
1.2.2 Analyse comparée des méthodes de mesure	10
1.2.3 Synthèse	14
1.3 Piézométrie et hydrogéologie	15
1.3.1 Rappels – Méthodologie et instrumentation en place	15
1.3.2 Analyse comparée des méthodes de mesure	15
1.3.3 Synthèse	17
1.4 Suivi géodésique ponctuel	18
1.4.1 Rappels – Méthodologie et instrumentation en place	18
1.4.2 Analyse des résultats et conclusions	19
1.5 Déplacements de surface par positionnement satellite	19
1.5.1 Rappels – Méthodologie	19
1.5.2 Analyse et résultats	20
1.6 Mesures sismiques	21
1.6.1 Rappels – méthodologie	21
1.6.2 Analyse et résultats	21
1.7 Scanner laser terrestre	23
1.7.1 Rappels – Méthodologie et moyens mis en œuvre	23
1.7.2 Analyse et résultats des mesures	23
1.8 LiDAR ou scanner laser aéroporté	25
1.8.1 Rappels – Méthodologie	25
1.8.2 Analyse des résultats	25
1.9 Télédétection satellite – Interférométrie radar	26
1.9.1 Rappels – Méthodologie et moyens mis en œuvre	26
1.9.2 Analyse et résultats des mesures	27

Livrable R2 :	29
Recommandations pour un suivi adapté des glissements de terrain lents	29
2.1 Objectifs et enjeux du livrable	29
2.2 Typologie de l'instrumentation et des résultats de mesures	29
2.3 Recommandations propres à chaque méthode de suivi	29
2.4 Adapter son programme d'instrumentation au site d'étude	33
2.4.1 Généralités	33
2.4.2 Recommandations pour un système d'instrumentation approprié	34
2.4.3 Instrumentation manuelle ou autonome ?	34
2.4.4 Synthèse	35

LIVRABLE B2 :

EVALUATION DE L'APPORT DES METHODES D'INSTRUMENTATION POUR LE SUIVI DES GLISSEMENTS LENTS

1.1 Objectifs et enjeux du livrable

Ce livrable a pour objectif d'évaluer l'ensemble des instrumentations mises en œuvre ou expérimentées dans le cadre du projet MLA3 afin de suivre les glissements lents, qu'il s'agisse des déplacements des masses de sol, des variations piézométriques, de l'évolution des propriétés des constituants (propriétés sismiques des terrains), etc. Par rapport au livrable L-B1 qui présentait les résultats des instrumentations par site d'étude, l'approche est ici transversale et vise à juger de la pertinence technique et scientifique des appareillages employés (fiabilité, précision, etc.) et de leur pertinence vis-à-vis des attentes des gestionnaires du territoire (complexité, coût, etc.).

1.2 Inclinométrie

1.2.1 Rappels – Méthodologie et instrumentation en place

1.2.1.1 Méthodologie

Les mesures inclinométriques 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 (fond du tube en général).

L'exploitation des mesures a été effectuée suivant les principes généraux définis par la norme NF EN ISO 18674-3 et par l'ancienne norme NF P 94-056 (pour l'analyse statistique), avec le logiciel Capitoul 2000 du Cerema qui permet la détection et la correction des éventuelles mesures aberrantes.

1.2.1.2 Instrumentation en place

L'ensemble des cinq sites étudiés ont été équipés de tubes inclinométriques pour le suivi des déplacements. Deux types d'inclinomètres ont été utilisés :

- des inclinomètres traditionnels (à mesure manuelle par passage d'une sonde dans le tube) sur l'ensemble des sites, relevés lors des campagnes trimestrielles de mesures ;
- une chaîne inclinométrique (site de Charlaix) constituée d'accéléromètres MEMs mis en série et espacés tous les 0,5 m (segments) dans le terrain. La chaîne est connectée à un enregistreur autonome, le paramétrage est basé sur deux mesures quotidiennes qui sont transmises une fois par semaine sur un site FTP afin de pouvoir être téléchargées.

L'ensemble des inclinomètres sont répartis comme suit sur l'ensemble des sites :

- Charlaix, une chaîne inclinométrique (I4) + cinq inclinomètres (I5 à I9) ;
- Quet-en-Beaumont, trois inclinomètres (I1 à I3RTM) ;
- Les Touches, cinq inclinomètres (I1 à I5) ;
- Corps, six inclinomètres (I1 à I6) ;
- Le Motty / Saint-Firmin, onze inclinomètres (SC3-1 à SC3-11).

L'implantation et les résultats des mesures sont récapitulés dans le livret B1, ils ne seront pas repris ici.

1.2.1.3 Etat de l'instrumentation à la fin du projet (Décembre 2022)

L'ensemble de l'instrumentation a été installée sur l'ensemble des sites en Isère (38) au cours de l'été 2018 et les mesures de référence ont été effectuées entre juillet et octobre 2018, exceptés les inclinomètres I9 (Charlaix) et I5 (Les Touches) qui ont complété le dispositif à partir d'octobre 2021. Le site du Motty (05) a été instrumenté fin 2017 – début 2018 dans le cadre d'études de renforcement des terrains autour de la RN85 commandées par la DIR Med² auprès du Cerema Méditerranée.

Fin 2022, un grand nombre d'inclinomètres était cisailé donc non exploitable, le cisaillement du tube se caractérisant par une déformation localisée importante qui empêche le passage de la sonde de mesure. Cette évolution rapide montre la dynamique des glissements et la pertinence du choix des sites retenus pour ce projet. Une poursuite des mesures des inclinomètres non cisailés (deux campagnes / an) est prévue à l'issue du projet MLA3, pour les besoins des gestionnaires.

1.2.2 Analyse comparée des méthodes de mesure

Nous ne reviendrons pas ici en détails sur les **exigences de savoir-faire propres aux inclinomètres conventionnels**, qui sont relativement connues et bien documentées. Elles ne sont toutefois pas à négliger car une mesure mal réalisée ou mal exploitée peut conduire à des erreurs majeures d'interprétation. Pour mémoire, les points d'attention sont en particulier :

- la **qualité de pose** des tubes inclinométriques (dont scellement) et du manchonnage ;
- l'**entretien et l'étalonnage du matériel** de mesure (sondes) qui peut dériver dans le temps ;
- la **détection et la correction des « rejets »** de mesures (écarts trop importants entre les mesures à 0 et 180° à une profondeur donnée) par analyse statistique ;
- l'**évaluation statistique de la marge d'erreur** propre à la mesure, pour ne pas tirer des conclusions hâtives de relevés qui restent dans le domaine de précision de l'appareillage ;
- la réalisation d'une analyse en **déplacements** et en **rotation** des mesures ;
- l'identification des phénomènes de **flambement du tube** qui ne doivent pas être confondus avec des indices de surfaces de rupture ;
- la nécessité d'un **nombre de mesures suffisant** pour interpréter la dynamique du glissement (souvent plusieurs années lorsque les mesures sont trimestrielles) ;
- le calage des **fréquences de mesures** sur les évolutions du terrain : souvent les glissements lents ont des comportements cycliques (accélération hivernale et ralentissement estival) comme observé dans le cadre de ce projet. Si les mesures sont effectuées à des moments clés comme les mois d'avril et d'octobre, ces cycles seront bien visibles. Si elles sont effectuées à des dates décorrélées de ce comportement, l'évolution sera lissée et pourrait même apparaître linéaire.

À noter que les **analyses statistiques** ne sont plus abordées dans la nouvelle norme européenne NF EN ISO 18674-3, ce qui risque de les faire disparaître des pratiques des bureaux d'études alors qu'elles permettent une approche critique très profitable sur la qualité de la mesure. Il est donc particulièrement recommandé de maintenir ces procédures (décrites par exemple dans l'ancienne norme française NF P 94-156) pour une fiabilité optimale des dispositifs.

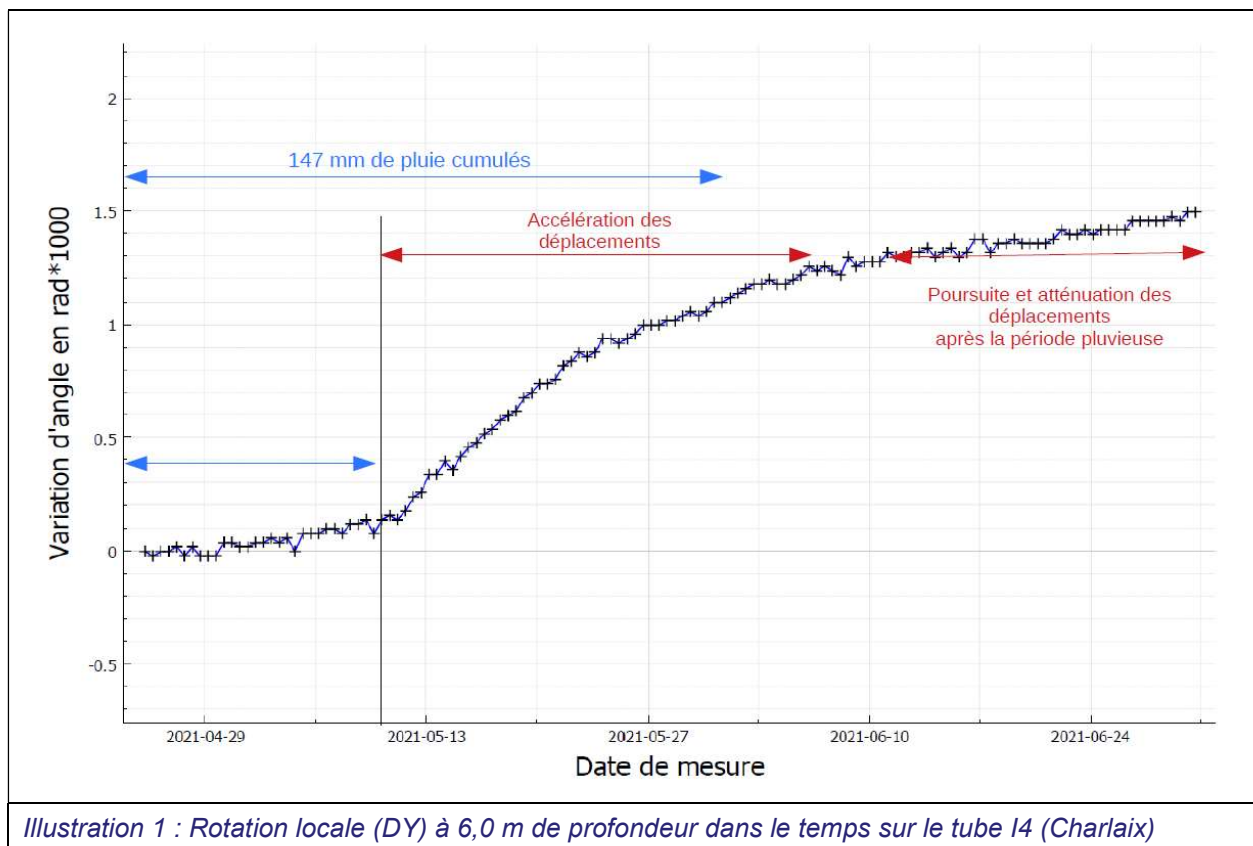
L'analyse comparée entre les mesures relevées avec la chaîne inclinométrique autonome I4 et avec le tube inclinométrique I8 sur le site du glissement de Charlaix a permis de mettre en évidence une **bonne corrélation entre les deux instrumentations**. Comme présenté dans le livret B1 (§3.3 *Résultats des mesures inclinométriques*), les deux types d'inclinomètres ont déterminé la même profondeur de la surface de glissement, vers 6,0 et 6,5 m de profondeur, ainsi que les mêmes vitesses de déplacement, de l'ordre de 1,5 à 2,0 cm/an. La corrélation des mesures et du comportement des deux types d'inclinomètres est également caractérisée par leur cisaillement intervenu en octobre 2021

pour I4 et au printemps 2022 pour I8, sachant qu'ils ont été mis en place en même temps, en juillet 2018.

La fréquence des mesures de la chaîne inclinométrique (deux mesures journalières) et la fréquence hebdomadaire de relevé des mesures depuis un site FTP permettent de **pouvoir suivre à la semaine la cinématique du glissement**. Cela permet également de mettre en parallèle ou de corrélérer les mesures inclinométriques avec les données météorologiques (mesures disponibles avec une fréquence journalière) et les mesures piézométriques autonomes avec une fréquence horaire d'enregistrement.

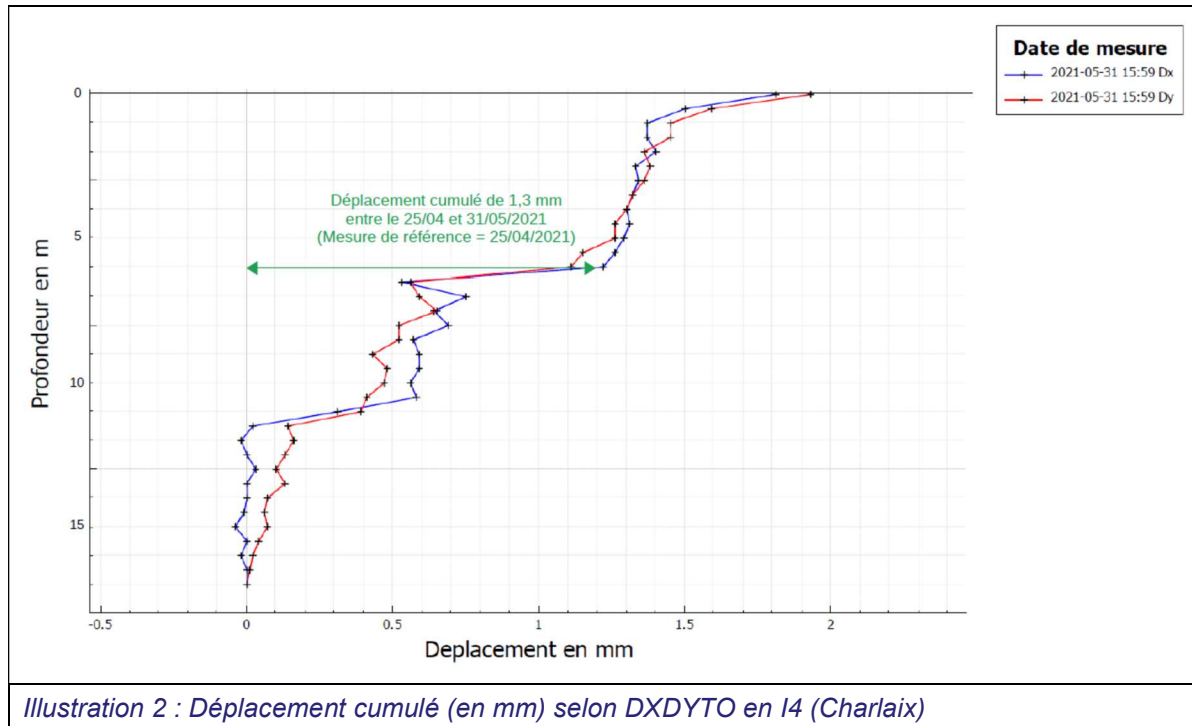
Les résultats présentés ci-après mettent en évidence la **bonne corrélation entre les données météorologiques (cumuls de précipitations) et la cinématique du glissement**.

Sur la période retenue, du 25 avril au 30 juin 2021, les données météorologiques (station Météo-France de La Mure) ont enregistré des cumuls de précipitations de 147 mm entre le 25 avril et le 21 mai, et de 31 mm cumulés entre les 21 et 24 juin. Sur cette période, les mesures inclinométriques au droit de la chaîne inclinométrique ont mesuré une accélération des déformations caractérisée par un pic de rotation de $1,4 \cdot 10^{-3}$ rad et un cumul de déplacement entre 1 et 1,5 mm en un mois.

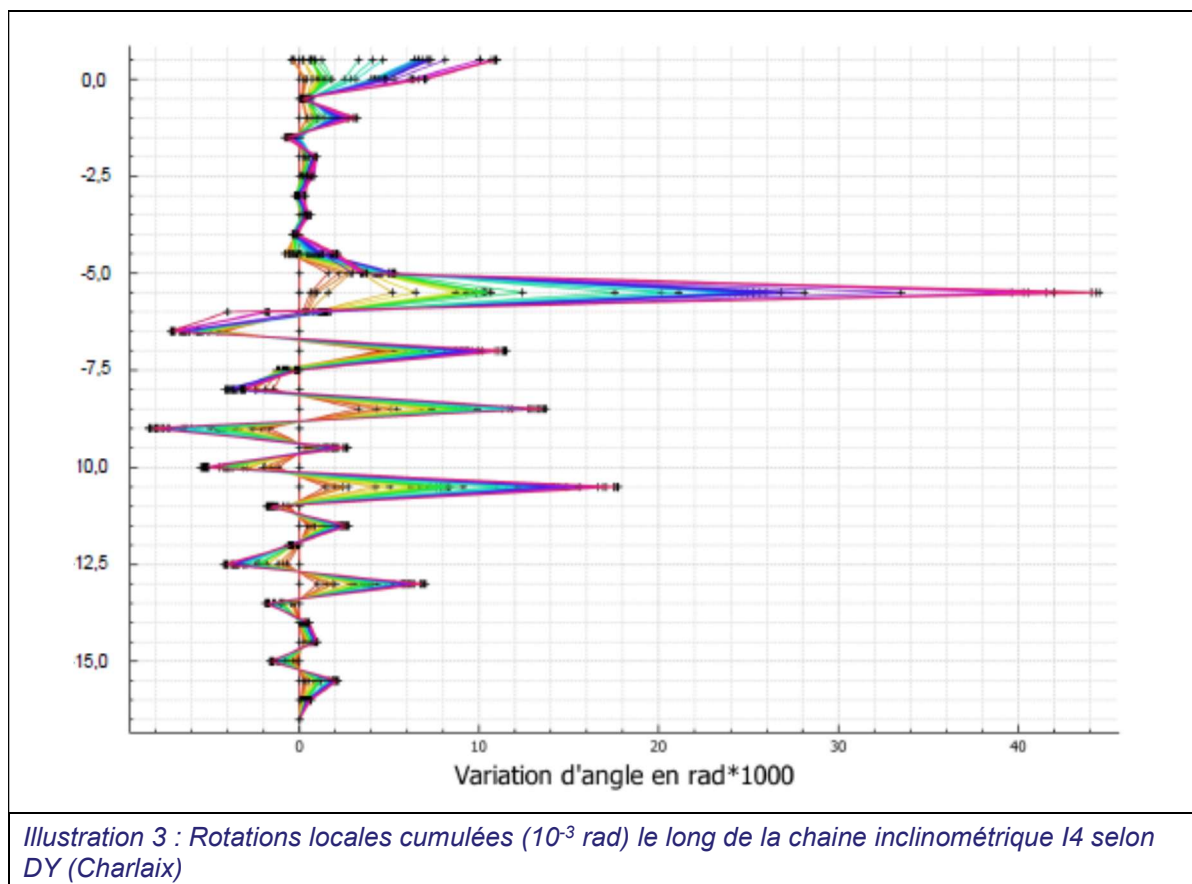


On peut observer sur l'illustration n°1 un décalage de l'accélération des déformations de la chaîne inclinométrique de l'ordre d'une semaine à une dizaine de jours après le début de la période de précipitations. Les mesures jusqu'au 30 juin montrent également la poursuite des déformations, avec une certaine atténuation, quelques jours après la fin des épisodes pluvieux.

L'illustration n°2 ci-après montre le cumul des déplacements de l'ordre de 1,3 à 1,5 mm entre le 24 avril et le 31 mai 2021. Elle indique également que les deux zones de cisaillement principales (vers 6,0 et 11,0 m de profondeur) ont été mobilisées lors de ce court événement.



L'illustration n°3 indique un pic de rotation principal de $1,4 \cdot 10^{-3}$ rad à 6,0 m de profondeur sur la période du 24 avril au 31 mai 2021 caractérisant l'accélération des déplacements au niveau de la surface de glissement la plus active.



Ces analyses détaillées, autour d'un événement particulier, ne sont pas possibles pour les inclinomètres "traditionnels" dont la finesse de résolution temporelle dépend du nombre de relevés sur le terrain.

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

B2 – Evaluation des méthodes d'instrumentation

R2 – Recommandations pour un suivi adapté des glissements lents

Date : Mars 2023

Ces relevés sont en outre difficilement synchronisables avec l'occurrence des fortes pluies. Il peut être envisageable de suivre quotidiennement les évolutions, dans le cadre d'interventions d'urgence sur un site très instable ou d'une accélération sensible des pathologies de surface, mais cela n'est pas gérable pour le suivi de glissements lents dans des terrains argileux dont les déformations s'étalent sur le long terme. Malgré tout, dans le cadre du suivi des glissements lents, une **mesure trimestrielle** permet quand même de bien mettre en valeur les rythmes discontinus des déplacements selon les variations climatiques saisonnières en corrélation en particulier avec les conditions météorologiques (cf. effets saisonniers sur le site des Touches par exemple).

La **technologie des capteurs MEMs** est également un atout grâce à leur homogénéité qui permet de pouvoir comparer les mesures de manière certaine. Une fois positionnés, les capteurs ont une **position fixe** et les mesures sont toujours réalisées à la même cote, contrairement aux mesures manuelles dans le tube inclinométrique, où la position de la sonde peut varier de quelques millimètres à centimètres entre deux mesures selon l'opérateur. Cela peut facilement induire des valeurs non représentatives si une irrégularité du tube (défaut de manchonnage par exemple) est présente dans cette zone. De plus, les capteurs MEMs ont une **dérive métrologique très faible** dans le temps.

Certains inconvénients ont toutefois été rencontrés avec ce dispositif de chaîne inclinométrique. L'interface en ligne pour l'analyse des mesures proposée par le fournisseur de la chaîne était peu conviviale et surtout ne permettait pas une exploitation satisfaisante des données au regard des objectifs d'analyse géotechnique du site. Au-delà de la simple visualisation des déplacements, les représentations des rotations en fonction de la profondeur, d'évolutions temporelles par pas de temps variables, etc. sont en effet des éléments essentiels au géotechnicien souhaitant exploiter pleinement le potentiel de l'appareillage. Il a donc fallu **mettre au point en interne, au Cerema, un logiciel d'exploitation des données** à partir des fichiers bruts récupérés sur le site FTP. Cela engendre un coût et un temps de développement en interne supplémentaires.

Le coût de ce type d'instrumentation n'est donc pas négligeable par rapport à un tube inclinométrique traditionnel, avec un prix du segment de mesure (capteur) de 50 cm compris entre 300 et 350 € (hors centrale d'acquisition). Le coût total pour une chaîne inclinométrique autonome de 20 m placée dans le terrain, forage compris et hors abonnement FTP, atteint environ 15000 €. À titre de comparaison, un inclinomètre conventionnel de 20 m peut être estimé à environ 4000 € forage compris, auxquels il faut ajouter l'appareillage de mesure (sonde + valise = env. 15 k€) mais qui est réutilisable sur tous les inclinomètres conventionnels suivis par le service.

Une chaîne autonome peut néanmoins rester rentable si elle permet d'éviter de nombreux déplacements sur site et/ou si elle peut être récupérée et réimplantée dans un autre forage, sur le même site ou sur un autre glissement. Toutefois, si la chaîne est cisailée, elle n'est généralement plus récupérable. Or, il n'y a **pas d'alerte au niveau des capteurs ou de la centrale d'acquisition** qui permette d'anticiper le cisaillement. Sur le site de Charlaix, le cisaillement a été identifié le jour où les fichiers de données n'étaient plus exploitables. Dans le cas d'un tube inclinométrique traditionnel, l'appareillage de mesure (y compris la sonde) sert pour l'ensemble des tubes inclinométriques en place et seul le tube PVC est perdu.

L'accès aux données est également à prendre en compte dans le montant du dispositif avec des abonnements concernant la mise à disposition d'une carte SIM pour l'envoi des mesures entre la centrale (data logger) et le site FTP, l'accès à une plateforme internet de visualisation des données.

Le tableau n°1 ci-dessous récapitule les avantages et les limites de l'instrumentation mise en place sur l'ensemble des sites du projet pour le suivi inclinométrique.

Tableau n°1 : Avantages / Limites des inclinomètres testés

	Avantages	Limites
Chaîne inclinométrique	. Technologique = homogénéité des capteurs . Précision de la mesure . Mesures autonomes, réduit les déplacements de personnel sur site . Fréquence des mesures paramétrable, suivi continu	. Pas de logiciel performant fourni avec l'instrumentation = à développer en interne . Coût : - prix des capteurs selon la profondeur investiguée, notamment si la chaîne ne peut pas être récupérée ; - temps alloué au développement interne d'un logiciel d'exploitation ; - abonnement à la plateforme de visualisation des données + mise à disposition carte SIM pour data logger. . Pas d'alerte sur le cisaillement du tube . Vigilance sur les sur-interprétations des mesures (flambement ou tassement du tube, recul suffisant sur le temps de suivi, etc.)
Inclinomètre traditionnel	. Coût : l'appareillage (sonde) sert pour plusieurs tubes (hors sondage). La mise en place d'un tube dans le terrain représente un coût faible . Logiciel Capitoul (interne Cerema) : maîtrise du logiciel d'exploitation, analyse statistique, correction des rejets, interprétation des mesures . Précision des mesures : en général suffisante pour des diagnostics courants	. Précision des mesures à vérifier par analyse statistique, ce que ne permettent pas tous les logiciels du commerce, suivi du matériel à bien respecter (étalonnage sonde, entretien roulettes, etc.) . Fréquence des mesures selon la nature du glissement, déplacements des agents sur site . Vigilance sur les sur-interprétations des mesures (flambement ou tassement du tube, recul suffisant sur le temps de suivi, etc.)

1.2.3 Synthèse

Les deux instrumentations ont montré une **bonne corrélation des mesures obtenues** dans le cadre du suivi du glissement de Charlaix.

Dans le cadre des suivis des glissements lents, la méthode traditionnelle donne des résultats satisfaisants avec une **fréquence de mesures basée sur la temporalité des saisons**.

La chaîne inclinométrique avec des fréquences de mesures plus resserrées et qui peuvent être programmées permet de **suivre plus précisément la cinématique** des déformations et du glissement, avec des résultats de qualité pourvu que l'on soit en mesure de bien les exploiter. Cela peut être intéressant pour des glissements rapides qui nécessitent des mesures temporelles plus rapprochées, ou sur des glissements lents pour mettre en évidence des corrélations pluviométrie – piézométrie – déplacements, ou encore pour des analyses détaillées dans le cadre de programmes de recherche (comparaison avec des modélisations numériques par exemple).

Les deux types de matériels s'avèrent donc adaptés aux glissements lents, et le choix est à apprécier en fonction des **objectifs recherchés** (simple diagnostic / modélisation plus approfondie), des fréquences de mesure envisagées et des critères de coût.

1.3 Piézométrie et hydrogéologie

1.3.1 Rappels – Méthodologie et instrumentation en place

1.3.1.1 Méthodologie

La connaissance des conditions hydro-météorologiques des sites instables a pour objectif de caractériser l'évolution des niveaux piézométriques du sol (voire de la dynamique des nappes) en lien avec les événements météorologiques (en particulier les précipitations). La connaissance de ces variations permet d'essayer de les corrélérer avec les déplacements mesurés par les autres instrumentations.

1.3.1.2 Instrumentation en place

Afin de suivre les conditions hydro-météorologiques, l'ensemble des sites a été équipé de plusieurs types d'instrumentations permettant de mesurer les niveaux d'eau, les pressions interstitielles, les caractéristiques physico-chimiques, etc.

Le récapitulatif de l'instrumentation mise en œuvre sur l'ensemble des sites est le suivant :

- des **piézomètres ouverts à mesure manuelle** (Pz) ;
- des **sondes piézométriques (SD) connectées à des enregistreurs autonomes** (data logger), dans des tubes ouverts également ;
- des **cellules de pression interstitielles** (CPI) autonomes connectées à une interface d'acquisition à mémoire, enterrées au cœur du terrain.

Des **mesures chimiques** permettant d'identifier le degré de minéralisation des eaux ont aussi été réalisées ponctuellement sur certains sites.

Les données météorologiques proviennent d'une station météo installée sur le site de Charlaix et de la station Météo France La Mure-Radome (38).

L'implantation et les résultats des mesures sont récapitulés dans le livret B1 et ne sont pas repris dans ce rapport.

1.3.1.3 Etat de l'instrumentation à la fin du projet (décembre 2022)

Fin 2022, l'ensemble de l'instrumentation était toujours en état de fonctionnement et une poursuite des mesures (deux campagnes / an) est programmée en 2023 dans le cadre du suivi des sites instables pour le compte de la DIR Med. Cela montre une **robustesse appropriée de ces équipements de mesure au suivi des glissements lents**.

1.3.2 Analyse comparée des méthodes de mesure

1.3.2.1 Piézomètres ouverts à mesure manuelle

Sur la base d'une fréquence de relevés trimestrielle, les piézomètres ouverts mettent en évidence sur la majorité des sites une **véritable saisonnalité des variations piézométriques**, avec des niveaux bas mesurés à la fin de la période estivale et des niveaux hauts plutôt en hiver et en fin de printemps. Toutefois, cette fréquence, calée sur la fréquence des relevés inclinométriques, est trop espacée pour évaluer la cinématique des niveaux d'eau des sites de glissement et la réactivité à des épisodes pluviométriques particuliers.

Par ailleurs, certains piézomètres ouverts ont été difficiles à exploiter. Le piézomètre Pz1 (site de Charlaix), crépiné entre 22 et 25 m, montre une évolution à la baisse au cours des quatre années de suivi. Etant en présence de matériaux peu perméables (argiles litées), il convient de considérer les mesures avec prudence. Les argiles peuvent induire des phénomènes de rééquilibrage lents ou des effets différés difficilement quantifiables qui rendent les mesures pas toujours représentatives de l'état réel des niveaux d'eau ou de pressions interstitielles au sein de ces matériaux. En général, **les**

piézomètres ouverts sont davantage recommandés dans des contextes de matériaux plus perméables.

De même, le piézomètre Pz2 à Quet-en-Beaumont montre un régime hydraulique différent des autres piézomètres à proximité. Il convient donc de tenir compte de l'implantation du piézomètre dans son contexte hydrogéologique pour interpréter les données recueillies.

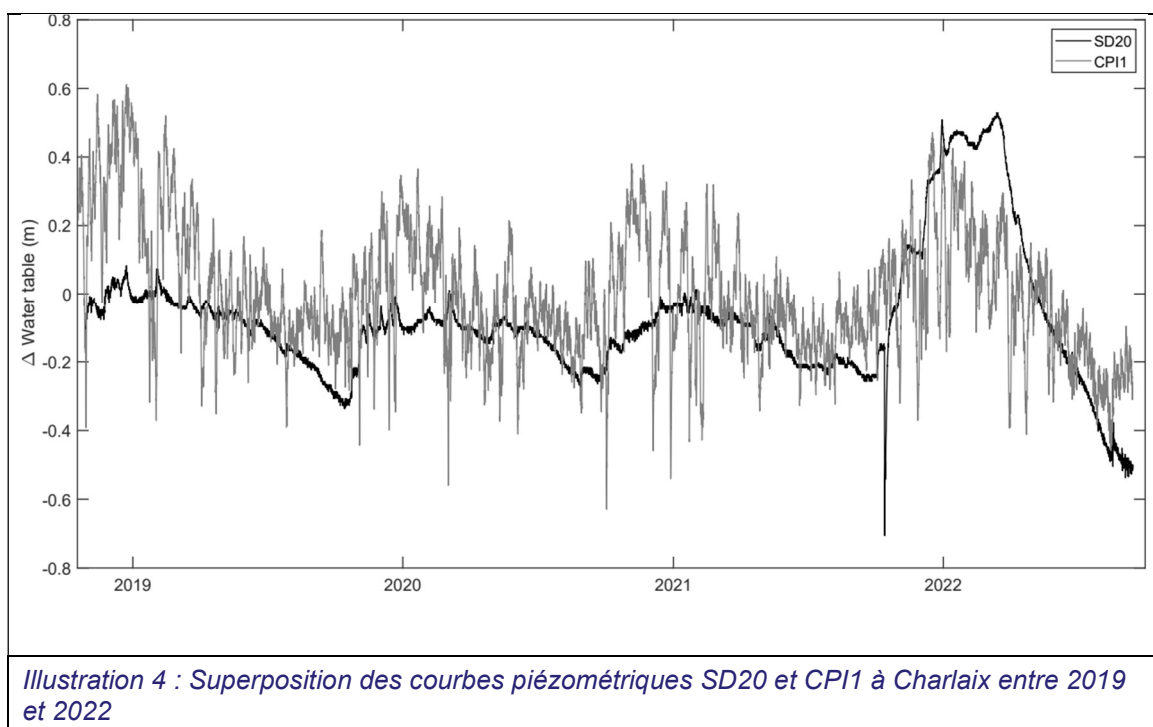
1.3.2.2 Piézomètres autonomes et sondes CPI

Des piézomètres et sondes CPI autonomes ont été installés sur les sites de Charlaix, de Quet-en-Beaumont et du Motty.

Comme pour la chaîne inclinométrique, **les fréquences de mesures sont programmables**, ce qui permet d'avoir des mesures rapprochées ; soit une mesure toutes les heures dans notre cas. Cette fréquence de mesures permet d'avoir un très bon suivi des évolutions des conditions hydrologiques des terrains. Pour autant, le **coût reste raisonnable**, de l'ordre de 600 € HT par capteur, à mettre en regard du coût de multiples déplacements sur le terrain pour un suivi à la sonde manuelle. Les capteurs autonomes pour tubes crépinés sont en outre récupérables (mais pas les CPI qui sont noyées dans une lanterne de sable au cœur du terrain).

L'analyse des données recueillies montre **une bonne corrélation des évolutions des niveaux d'eau dans les sols avec les données météorologiques**. Les périodes pluvieuses correspondent bien aux niveaux hauts mesurés par les sondes autonomes et les CPI. L'analyse plus fine des données permet d'observer un décalage de quelques jours entre l'évènement climatique et la mesure par ces sondes. Le décalage, de l'ordre de 5 à 8 jours, dépend de la profondeur du capteur et de la perméabilité des matériaux dans lequel il est implanté.

Toutefois, les résultats des mesures montrent des particularités à la lecture des graphiques. L'illustration n°4 ci-dessous représente la superposition des mesures enregistrées avec les cellules de pression interstitielle SD20 et CPI1 sur le site de Charlaix, respectivement implantées à proximité à 12,5 et 9,5 m de profondeur dans les argiles grises litées.



Malgré une certaine similarité de tendance des deux courbes, on remarque des **mesures très bruitées pour la courbe de CPI1 (grise)** équipée d'un capteur à corde vibrante par rapport à la courbe de SD20 (noire) équipée d'un capteur piézo-résistif.

Après consultation auprès des fabricants des sondes, cette différence pourrait avoir plusieurs explications :

- un **échantillonnage** différent des mesures selon le type d'appareil ;
- une différence de la **vitesse du pas d'acquisition**, plus le pas de mesure est lent, plus les données sont lissées ;
- l'effet de la **correction de la température et/ou de la pression atmosphérique** sur le capteur, cette dernière se répercutant quasi-immédiatement sur les pressions d'eau du sol.

De plus, le principe même d'implantation de SD20, qui mesure des niveaux d'eau dans un tube ouvert, conduit à une réactivité moindre que celle de CPI1 qui mesure directement une pression interstitielle au cœur du terrain. En effet, le **temps de rééquilibrage d'un tube ouvert** est nettement plus long, dans des terrains de faible perméabilité.

Une autre singularité dans l'analyse des mesures des pressions interstitielles est apparue : la sonde CPI2, à 28 m de profondeur dans les moraines sablo-graveleuses à matrice argileuse, indique 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 la cote du capteur. Ces niveaux d'eau mesurés sous le niveau du capteur caractériseraient des matériaux désaturés ce qui ne semble pas être le cas sur ce site d'après les prélèvements effectués.

Une piste d'explication mène vers la **correction ou la compensation de pression en profondeur par rapport à la pression atmosphérique**. Cette compensation est-elle bien effectuée par le capteur à 28 m de profondeur ? Cette correction a une véritable influence sur les résultats des mesures : en effet, si l'on considère une plage de pression atmosphérique min-max allant de 985 à 1035 hPa par exemple, cela représente une erreur potentielle jusqu'à 50 cm sur les niveaux d'eau mesurés. Ce qui est l'ordre de grandeur des variations relevées par ces appareillages.

On peut donc conclure sur le cas de la figure 4 que l'on a des niveaux de pression interstitielle relativement stables en moyenne, que les tendances saisonnières sont représentatives et cohérentes avec les données météorologiques, mais que les variations ponctuelles le sont vraisemblablement moins, en fonction du capteur, de sa sensibilité, de son implantation, etc. Ce problème a également été rencontré sur les CPI du site du Motty pour lesquelles les corrections barométriques n'étant pas disponibles, les mesures ne sont pas corrigées ; les niveaux réels peuvent donc être légèrement différents des niveaux mesurés.

1.3.3 Synthèse

L'analyse du suivi piézométrique et météorologique sur l'ensemble des sites met en évidence :

- l'**intérêt de l'instrumentation data loggée ou autonome** pour le suivi des évolutions des conditions hydrologiques et plus spécifiquement des CPI dans les terrains de faible perméabilité comme les argiles ;
- la **bonne corrélation** entre les données météorologiques et les mesures piézométriques, avec parfois des décalages liés au rôle de tampon du terrain sur les écoulements, ou à la part « efficace » de la pluie (c'est-à-dire celle rentrant véritablement dans le sol) en fonction des saisons ;
- la **limite des piézomètres ouverts** dans ce type de terrains de faible perméabilité même s'ils permettent de mettre en évidence la saisonnalité des variations piézométriques ;
- les **difficultés matérielles** qui peuvent perturber l'interprétation des mesures, en particulier sur de faibles variations : lissage des données, **fiabilité des corrections** barométriques ;
- l'importance de réaliser un **contrôle de la profondeur des sondes** lors de leur mise en place sur in situ, afin de pouvoir les exploiter sans avoir de doutes sur leur implantation (mesures manifestement aberrantes sur le site du Motty par exemple).

et surtout, montre bien :

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

B2 – Evaluation des méthodes d'instrumentation

R2 – Recommandations pour un suivi adapté des glissements lents

Date : Mars 2023

- l'importance de **coupler inclinométrie et piézométrie** pour le suivi des glissements lents, avec de très bonnes corrélations entre les mesures inclinométriques, piézométriques et météorologiques sur les sites entièrement équipés.

Le tableau n°2 ci-dessous récapitule les avantages et les limites de l'instrumentation mise en place sur l'ensemble des sites du projet pour le suivi piézométrique.

Tableau n°2 : Avantages / Limites de l'instrumentation pour le suivi piézométrique

	Avantages	Limites
Piézomètres ouverts à mesures manuelles	. Simplicité des mesures . Coût de mise en place faible . Mise en évidence de la saisonnalité des variations piézométriques (sur la base de mesures trimestrielles) = compatible avec la cinématique des glissements lents	. Fréquence d'acquisition = liée aux déplacements sur site. La fréquence des mesures doit être conditionnée à la cinématique du glissement . Implantation, hauteur crépinée = prise en compte du contexte hydro-géologique pour l'interprétation des mesures . Temps d'équilibrage du tube piézométrique peu adapté à la dynamique des pressions interstitielles dans des terrains peu perméables
Piézomètres ouverts avec capteurs autonomes	. Coût de l'appareillage restant intéressant pour des fréquences de mesure élevées, pas de logiciel de traitement supplémentaire à acheter . Bonne corrélation des mesures avec les données météorologiques . Fréquence des mesures paramétrable (selon programmation) = permet de bien corréler la cinématique des déplacements relevée par inclinométrie avec les conditions hydrogéologiques . Autonomie des enregistreurs de données (durée des batteries, capacité de stockage des données > 6 mois)	. Idem mesures manuelles (sauf fréquence d'acquisition) . Surveiller régulièrement le niveau des batteries et de la mémoire car en cas de défaut on peut perdre plusieurs mois de mesures d'un coup . Différences sur les données recueillies en fonction de la technologie du capteur (courbes bruitées, échantillonnage des mesures, etc.) . Calibrage des sondes autonomes = correction de la pression barométrique en fonction de la profondeur de la sonde. Cela peut avoir un impact de plusieurs dizaines de centimètres sur la mesure.
Sondes CPI	. Idem capteurs autonomes . Les CPI sont les seuls appareils véritablement recommandés dans les terrains peu perméables.	. Idem piézomètres ouverts pour le niveau des batteries, les technologies de capteurs, le calibrage des sondes . Mise en œuvre = respect de la profondeur prévue, pose suivant les normes en vigueur et contrôle à la pose pour des résultats fiables

1.4 Suivi géodésique ponctuel

1.4.1 Rappels – Méthodologie et instrumentation en place

1.4.1.1 Objet

Dans le cadre du projet et du suivi des déformations sur la RN85, un suivi topographique a été mis en place sur trois des sites d'études : Charlaix, Quet-en-Beaumont et Les Touches. Il a été réalisé par un bureau d'étude spécialisé en topographie.

Ce suivi n'ayant pas donné de résultat exploitable (voir ci-après), il n'était pas présenté dans le livret L-B1, mais il est abordé ici au titre du retour d'expérience.

1.4.1.2 Méthodologie et dispositif de suivi

Le dispositif de suivi comprenait :

- Site de Charlaix : 26 bornes, 3 stations et des repères sur les cadres de deux ouvrages ;
- Site de Quet-en-Beaumont : 36 clous d'arpentage et 3 stations ;
- Site des Touches : 72 clous d'arpentage.

Mode opératoire :

1. Relevé à la station totale de précision, permettant une cohérence relative du chantier.
2. Géoréférencement du relevé par la mise en place d'un triplet d'antennes GPS en post-traitement (Cinématique temps réel). Cette méthode permet de contrôler à la fois la cohérence relative du chantier et de valider les coordonnées absolues recalculées à partir des stations du RGP de l'IGN à chaque passage.

La détermination initiale (ou point zéro) a été réalisée le 4 décembre 2019 pour les trois sites. Le suivi a été ensuite mené au rythme d'une mesure tous les trois mois. Au total, cinq campagnes de mesures ont été réalisées jusqu'en mars 2021.

1.4.2 Analyse des résultats et conclusions

Les mesures ont été interrompues à partir de la campagne de mars 2021 en raison des résultats incohérents du suivi topographique par rapport aux autres instrumentations en place. Une des raisons invoquées par le prestataire en charge des levés est que l'ensemble des cibles est sur des zones instables et qu'il **manque de repères fixes** pour assurer le recalage des mesures.

Il s'agit d'une **limite forte de ce type d'instrumentation**. En l'absence de possibilité de raccordement à des points fixes, comme cela peut être le cas dans les zones en mouvement étendues instrumentées au sein du projet MLA3, la fiabilité des résultats de suivis géodésiques ponctuels est faible.

1.5 Déplacements de surface par positionnement satellite

1.5.1 Rappels – Méthodologie

1.5.1.1 Méthodologie

L'implantation de bornes GPS sur les sites de glissements de terrain est une méthode classiquement employée pour le suivi des déplacements par satellite. La méthode consiste à **disposer ces bornes sur le site et à les relever périodiquement**. Les mesures se font à l'aide d'une station mobile (quelques secondes de mesure par borne) dont la position est connue relativement à une station de base « fixe » (installée à chaque campagne de mesures) à quelques mm près. La position absolue de chaque point de mesure est ensuite calculée une fois que l'on connaît la position absolue de la station de base. Ce calcul s'effectue soit en se positionnant sur un point connu et fixe, ce qui est rare dans le cas des glissements de terrain, soit en calculant a posteriori et pour chaque campagne la position de la station de base. Cette dernière approche a été utilisée dans le cadre de ce projet.

Le dispositif est complété avec **3 stations autonomes** et permanentes qui permettent de disposer d'une bonne résolution temporelle (une mesure par jour) avec une précision spatiale de l'ordre du cm.

1.5.1.2 Instrumentation en place

Dans le cadre du projet MLA3, le dispositif de suivi des déplacements de surface comprend 60 points de mesures (bornes installées sur le site de Charlaix, plaques d'égout, etc.) complété de 2 stations permanentes et autonomes. Par ailleurs, une station permanente a également été installée sur les sites de Quet-en-Beaumont, des Touches et de Corps.

L'implantation et les résultats des mesures sont récapitulés dans le livret B1 et ne sont pas repris dans ce livret.

1.5.2 Analyse et résultats

Les relevés périodiques par système GPS différentiel permettent de définir une position précise de l'ordre du cm pour chaque campagne. Comme aucun point fixe n'est disponible sur le site, il est nécessaire de **calculer a posteriori la position de la station de base** lors de chaque journée de mesures. Toutefois, dans le but de déterminer avec une bonne précision la position de la station de base, il est nécessaire de rester en position pendant quelques heures. La mesure d'une soixantaine de points répartis sur l'ensemble du site permet également d'obtenir un champ de déplacement à l'échelle du site, dont la résolution spatiale dépend du nombre de points de mesures et de leur répartition. Les résultats ont montré une très bonne cohérence des mesures entre elles.

Pour ce qui concerne les 3 stations GPS permanentes du site de Charlaix (marque Geomon), les données brutes sont collectées par la station de base au moyen d'une liaison radio. Un calcul de position quotidienne par la technique de double-différence est également réalisé ; succinctement, la position des stations GPS2 et GPS3 est calculée par rapport à la station de référence GPS1 supposée fixe. L'ensemble des données sont télétransmises au laboratoire.

Compte-tenu de la large zone de glissement sur le site de Charlaix, une approche alternative au calcul de la position quotidienne par rapport à GPS1 a été testée, en prenant comme référence la station permanente « AVR » située sur la commune de Sinard, à environ 15 km à l'ouest du site d'étude. Les résultats ont montré des tendances comparables mais une dispersion beaucoup plus forte avec ce second mode de calcul, soulignant le fort **intérêt de disposer d'une station de référence proche**.

Tableau n°3 : Avantages / Limites du suivi des déplacements de surface par GPS

	Avantages	Limites
Bornes GPS (Relevés périodiques)	. Grand nombre de mesures possible durant une courte période de temps . Bornes repères peu onéreuses à l'unité, permettant de multiplier les points de mesure (effectuée ensuite par station mobile) . Pas de point fixe nécessaire pour recalculer les mesures (sous réserve de recalculer la position de la station de base avec un temps d'exposition long)	. Il doit y avoir un nombre suffisant de satellites pour calculer précisément la position de la station de base (ce qui a toujours été le cas sur le site de Charlaix) . La résolution temporelle dépend de l'espacement entre les campagnes de mesures, donc de la fréquence des venues d'opérateurs sur site .
Stations GPS permanentes Geomon	. Stations permanentes (suivi en quasi-continu) et autonomes énergétiquement . Peu de déplacements sur le terrain après la pose (mesures télétransmises) . Solution de position calculée automatiquement par le système et télétransmise	. Dimensionnement énergétique pour une mesure/jour. Si plus de mesures sont nécessaires, il faut un système d'alimentation externe (panneau solaire). . Nécessite de milieux ouverts : fonctionne très bien à Charlaix, beaucoup moins bien sur les autres sites. . Nécessite une station de référence proche pour obtenir des mesures fiables

1.6 Mesures sismiques

1.6.1 Rappels – méthodologie

1.6.1.1 Méthodologie

Dans le cadre du projet, une expérimentation destinée à suivre temporellement l'activité du glissement de Charlaix a été menée avec la pose de **capteurs mesurant le 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. Ces ondes de surfaces étant dispersives (leur vitesse dépendant de leur fréquence et la fréquence étant 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.

1.6.1.2 Instrumentation en place

Trois capteurs sismiques ont été installés sur le site de Charlaix. Les stations sont autonomes en énergie et enregistrent les vibrations en continu (fréquence d'échantillonnage de 200 Hz).

L'implantation et les résultats des mesures sont récapitulés dans le livret B1 et ne sont pas abordés à nouveau ici.

1.6.2 Analyse et résultats

Les résultats se sont montrés d'une très **grande richesse** car il est possible de dériver de nombreux paramètres de ces mesures (énergie dans le domaine temporel et spectral, activité sismique, variation de vitesse des ondes de surface, etc.).

Toutefois, leur interprétation nécessite de **disposer de nombreux paramètres environnementaux** (météorologie, hydrologie) et de déformation (déplacements en surface et en profondeur). Et, même dans ce cas, l'interprétation peut s'avérer complexe. La figure 5 présente les séries temporelles de dV/V (bande de fréquence 15-20 Hz, sensible entre 0 et 5 m de profondeur), pluviométrie, pression interstitielle (CPI1) et déplacements mesurés dans I4 à 6 m de profondeur pour la même période que celle présentée dans la figure 1. Les bandes verticales bleue et verte montrent deux comportements similaires du dV/V , c'est-à-dire une diminution d'environ 2 % puis une augmentation de la même valeur pour revenir à une valeur de base. Mi-mai 2021 (bande bleue), la variation de dV/V s'explique simplement par une augmentation puis une diminution du toit de la nappe qui induit la même variation de masse volumique de la tranche de sol investiguée, en accord avec la théorie.

Fin avril 2021, la même variation de dV/V est observée mais elle correspond à une baisse puis une augmentation du toit de la nappe (environ 30 cm) ce qui est contraire à la théorie. Cet événement demeure à ce jour difficile à expliquer.

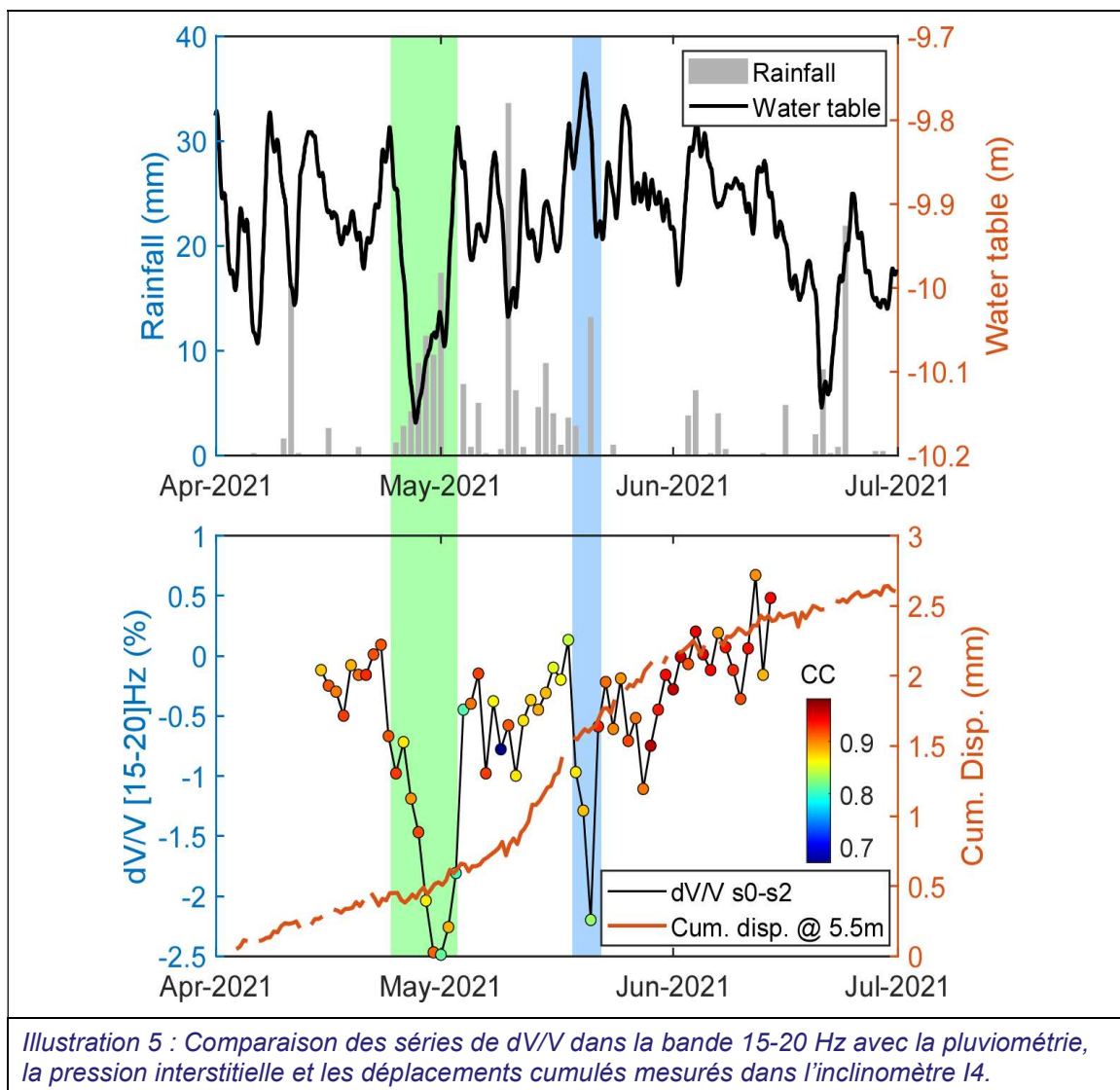


Tableau n°4 : Avantages / Limites du suivi des déplacements par capteurs sismiques

	Avantages	Limites
Mesures sismiques	. Stations permanentes et autonomes énergétiquement . Données télétransmises . Données continues dans le temps . Grande richesse des données récupérées, pour rechercher des corrélations avec d'autres appareillages et caractériser l'évolution des terrains.	. Mauvaise qualité des données si un capteur bascule de quelques degrés (perte du plan de polarisation) . Pas de données en cas de coupure énergétique . Besoin de serveurs pour effectuer les calculs (pas possible sur un PC de bureautique) . L'interprétation nécessite des mesures externes (météorologie, hydrologie, déformation, etc.) pour être calibrée . L'interprétation peut parfois être complexe

1.7 Scanner laser terrestre

1.7.1 Rappels – Méthodologie et moyens mis en œuvre

1.7.1.1 Principe

Une expérimentation de suivi des déplacements de surface sur le site du glissement de Charlaix a été menée avec un scanner laser 3D terrestre. 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 modèles numériques de terrain 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 des surfaces ou des volumes déplacés.

1.7.1.2 Acquisition des nuages de points

Deux levés ont été effectués à quatorze mois d'intervalle (les 12 août 2021 et 3 octobre 2022) avec un scan-laser « longue portée » de type Riegl VZ-2000i®. Ces levés ont permis d'acquérir les deux nuages de points 3D. Le scan-laser a été implanté sur le versant opposé, en rive droite de la Bonne (cf. *Livret B1 - §3.6.2 Acquisition des nuages de points*) dans une zone raisonnablement stable, à une distance comprise entre 850 à 900 m de la zone de glissement.

1.7.1.3 Méthodologie d'analyse

La méthodologie pour 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* (Girardeau-Montaut, 2019).

1.7.2 Analyse et résultats des mesures

1.7.2.1 Analyse des mesures

Le contexte particulier du site de Charlaix, zone de glissement très étendue et enherbée, a conduit à ne pas effectuer la première étape (nettoyage de la végétation) 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 du traitement.

La deuxième phase, le recalage des deux nuages de points, a également été complexe à affiner en raison de la **difficulté à localiser des zones ou des repères stables** sur la surface scannée (voir commentaires antérieurs sur la géodésie ponctuelle).

La méthode retenue pour la troisième étape, calcul de distance entre les deux nuages, est la méthode de la **distance nuage-maillage** (dC2M). Cette méthode a été choisie car elle est indépendante de la résolution d'acquisition et que le calcul est plus rapide. De plus, pour le niveau de déplacements attendu, la distance dC2M est suffisante.

1.7.2.2 Résultats et suites à donner

Les résultats obtenus (cf. *Livret B1 - §3.6.4 Analyse et interprétation*) montrent que l'on arrive à mesurer des déformations locales, en surface, de l'ordre du décimètre (entre -12 et +12 cm) sur l'ensemble du site, sans possibilité de distinction des zones les plus actives. Malgré la pertinence du recalage

(distribution des valeurs de distances calculées centrée sur 0), **les valeurs de déformations mesurées ne sont toutefois pas à l'échelle des déformations de surface mesurées par les inclinomètres ou les données GPS**, de l'ordre de 2 à 5 cm/an.

En conclusion, l'analyse des deux nuages n'a pas permis de mesurer des déplacements en surface en corrélation avec ceux mesurés par inclinométrie ou par GPS. Plusieurs explications peuvent être avancées :

- l'étape de **dévégétalisation** des deux nuages n'a pas pu être menée afin d'avoir suffisamment de points. Dans un contexte de prairie, localement épaisse, si les nuages sont dévégétalisés, il n'y a plus suffisamment de points pour le recalage et le calcul des distances ;
- les **difficultés de recalage** des nuages. La zone de glissement étant très large, il a été difficile de trouver des zones ou des repères stables ;
- la **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 dans notre cas, conduit à obtenir une définition des nuages de points de l'ordre des déplacements recherchés.

Ce cas d'étude montre donc les difficultés qui peuvent se manifester dans l'application d'une méthode de mesure par ailleurs fiable à des conditions réelles de glissements de terrain, qui peuvent comporter un sol végétalisé, peu de points de repères fixes et une distance de balayage élevée.

Toutefois, cette expérimentation mérite d'être poursuivie pour le suivi des glissements lents. Les résultats obtenus ne sont pas tous non représentatifs. En se recentrant uniquement sur une zone moins enherbée, proche des inclinomètres I4 et I8, la répartition des distances dC2M (*Livret B1 - §3.6.5 Conclusions*) donne une répartition des déformations (histogramme) de l'ordre de 5 cm, proches de ce qui peut être mesuré sur le site.

Ces résultats sont encourageant et permettent d'**envisager une poursuite des expérimentations** sur l'utilisation des scanners laser 3D pour l'étude des glissements lents enherbés pour lesquels la configuration permettrait de réduire la distance de scanner, où l'herbe serait moins dense selon la période de l'année et si des repères ou des zones stables peuvent être localisées avec certitude dans le nuage de points. Une répétition des mesures sur **des temps longs** (plusieurs années) pourrait par ailleurs permettre d'améliorer l'interprétation, les zones les plus actives du glissement générant de plus forts déplacements.

Il pourrait également s'avérer utile de **réaliser des benchmarks** entre plusieurs appareillages, et plusieurs approches de mesure et d'exploitation des nuages de points pour examiner la reproductibilité de cette méthode et dégager des bonnes pratiques.

Le tableau n°5 ci-dessous récapitule les avantages et les limites des levés scan-laser terrestre.

Tableau n°5 : Avantages / Limites des levés scan-laser terrestre 3D

	Avantages	Limites
Scanner laser terrestre	. Informations en 3 Dimensions . Rapidité des mesures (plusieurs millions de points en quelques minutes – site scanné en 15 à 20 minutes) . Résolution spatiale et exactitude du dispositif de mesures (suivant distance de prise de vue) . Souplesse du dispositif de mesures (poids et dimensions réduites de l'appareil)	. Besoin de visibilité directe = limitations liées aux conditions météorologiques, à la présence de végétation, etc. . Nécessité d'identifier des points stables pour réduire les incertitudes . Les variations de hauteur de la végétation peuvent influencer significativement les mesures . Données volumineuses et complexes = besoins de matériels informatiques performants et de compétences pour le traitement des données . Coût initial de l'appareil ou de la prestation extérieure

1.8 LiDAR ou scanner laser aéroporté

1.8.1 Rappels – Méthodologie

Dans le cadre du projet MLA3, un **relevé LiDAR aéroporté a été réalisé sur l'ensemble des sites instables** le long de la RN85. Il a été confié à un prestataire spécialisé.

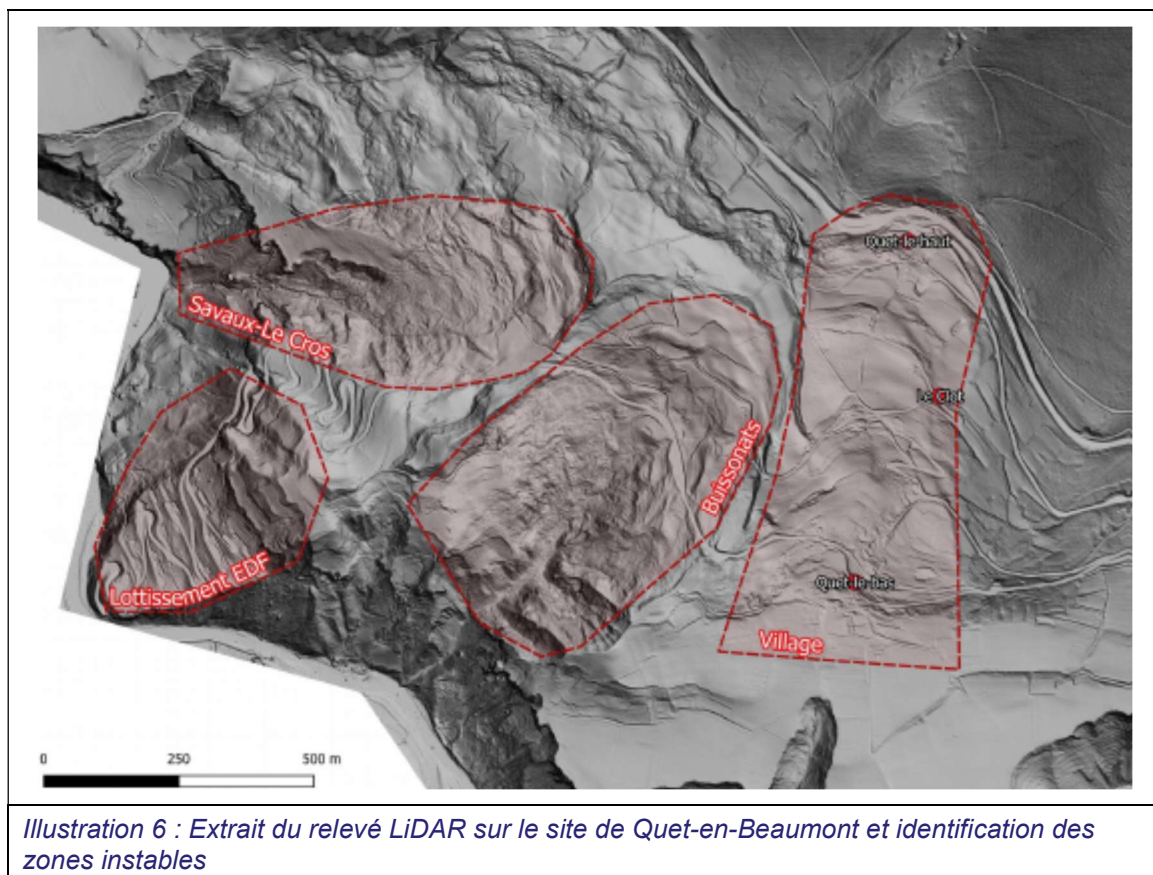
La technique LiDAR (Light Detection And Ranging) consiste en un scanner laser infrarouge embarqué dans un avion ou un drone géolocalisé par GNSS, qui balaie une bande de terrain. On obtient ainsi un nuage de points 3D représentatif de la topographie locale. Cela permet d'avoir une vision précise des morphologies en place tout en réduisant l'impact de la végétation sur les observations.

1.8.2 Analyse des résultats

Les résultats des relevés LiDAR et l'analyse des images permettent de **très bien visualiser la géomorphologie des terrains** affectés par les glissements et d'en déduire l'expansion des zones glissées comme décrit ci-après dans l'illustration n°6 et les signes d'instabilités.

Dans les zones de glissements, les terrains apparaissent chahutés, avec une topographie irrégulière marquée par des moutonnements et des ruptures de pentes.

Le LiDAR peut permettre aussi **d'identifier des zones concernées par les glissements qui n'ont pas été vues sur le terrain**, soit par difficulté d'accès soit parce que les signes morphologiques les plus typiques y étaient difficilement observables. Il convient cependant de rester prudent dans l'interprétation des images LiDAR et de les croiser avec une connaissance géologique approfondie des sites (toute irrégularité de terrain n'est pas un signe de glissement !). Cependant, l'interaction entre l'étude géologique de terrain, l'analyse historique et les images LiDAR est apparue comme particulièrement riche en informations dans le cadre du projet MLA3 (voir livrable L-A1 par exemple).



Le tableau n°6 ci-dessous récapitule les avantages et les limites des levés Lidar.

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

B2 – Evaluation des méthodes d'instrumentation

R2 – Recommandations pour un suivi adapté des glissements lents

Date : Mars 2023

Tableau n°6 : Avantages / Limites des levés scan-laser aéroporté ou Lidar

	Avantages	Limites
Lidar ou Scanner laser aéroporté	. Informations en 3 Dimensions . Rapidité des mesures (plusieurs millions de points en quelques minutes – site scanné en quelques minutes selon la vitesse de l'avion ou du drone) . Visibilité de l'ensemble du glissement . Transparence partielle de la végétation . Permet de bien visualiser les éléments géomorphologiques . Permet d'extraire facilement des profils topographiques d'étude	. Besoin de visibilité directe = limitations liées aux conditions atmosphériques . Fréquence d'acquisition, compte tenu du coût élevé = campagnes espacées sur plusieurs mois ou années . Coût de l'intervention aéroportée (22800 € TTC pour l'ensemble des sites d'études du projet) . Données volumineuses et complexes = besoins de matériels informatiques performants et de compétences pour le traitement des données

En conclusion, l'usage d'un LiDAR aéroporté, avec une précision appropriée, apparaît comme un **excellent outil pour l'analyse géomorphologique des sites**. L'opportunité d'un tel relevé est à apprécier au cas par cas en fonction des coûts d'acquisition, et des enjeux de l'étude. Sur un territoire large comme celui étudié dans le cadre du projet MLA3, avec de multiples glissements répartis sur des surfaces importantes, la pertinence est au final avérée.

Enfin, sur un temps long (à 10 ans d'écart par exemple), on pourrait imaginer de renouveler le relevé LiDAR ; la comparaison des deux nuages de points pourrait alors permettre d'identifier des zones actives à une échelle large sur le territoire concerné.

1.9 Télédétection satellite – Interférométrie radar

1.9.1 Rappels – Méthodologie et moyens mis en œuvre

1.9.1.1 Principe

Une expérimentation de suivi des déplacements à long terme du glissement de Charlaix a été menée à partir de **traitement par interférométrie radar 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. L'objet de cette expérimentation est **de transposer cette méthodologie au suivi des zones naturelles**, qui s'avère cependant plus complexe en l'absence de réflecteurs ou en présence d'un moins grand nombre de réflecteurs sur site.

L'objectif initial était de confronter les résultats fournis par l'interférométrie radar avec des mesures de déformation / déplacements *in situ* ou à distance, comme l'inclinométrie, le suivi de points topométriques ou le suivi GPS.

1.9.1.2 Méthodologie

Deux méthodes ou approches ont été expérimentées pour le traitement des images satellites du site de Charlaix : les **approches DinSAR et PSinSAR**. Les deux approches sont décrites en détail dans le **livret B1 - §3.7.1 et 3.7.2**.

L'approche DinSAR consiste en un traitement interférométrique par différence de phase sur deux images espacées du temps de revisite du satellite soit 12 jours.

L'approche PSinSAR consiste, quant à elle, à réaliser une étude de certains points de l'image appelés diffuseurs permanents (PS ou *persistent scatter*).

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

B2 – Evaluation des méthodes d'instrumentation

R2 – Recommandations pour un suivi adapté des glissements lents

Date : Mars 2023

1.9.2 Analyse et résultats des mesures

1.9.2.1 Analyse des mesures

Concernant l'approche D-inSAR, les résultats sont très bruités entre les deux images. Les zones stables ne se distinguent pas des zones instables. Cela est principalement dû aux variations de l'état naturel des surfaces visibles et à l'évolution des zones végétalisées entre les deux acquisitions.

Un traitement sur une série de six images espacées chacune de 12 jours montre que les zones urbaines sont stables mais le caractère instable du site du glissement de Charlaix n'est pas détectable, le niveau de bruit sur les zones naturelles restant trop élevé. Ceci peut s'expliquer par le 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.

Pour l'approche PS-inSAR, il convient de choisir une méthode de sélection des points de l'image selon différents critères comme l'amplitude ou la phase. Dans le cadre de ce travail, c'est la méthode SARPROZ qui a été retenue (cf. *Livret B1 - § 3.7.2 L'approche PSinSAR*). Le traitement interférométrique est réalisé sur une série de 16 images à raison d'une image tous les 12 jours. Les résultats obtenus montrent une très faible densité de points au niveau des zones naturelles et aucun point n'a été détecté au niveau du site de Charlaix.

1.9.2.2 Résultats et suite à donner

Les traitements par interférométrie radar selon les méthodes DinSAR ou SARPROZ (approche PSinSAR) n'ont donc pas permis d'identifier des zones en mouvement dans les zones naturelles comme le glissement de Charlaix. Toutefois, ces résultats ont permis d'en retirer des enseignements qui permettent d'envisager de poursuivre le développement de ces méthodes pour le suivi des zones naturelles.

Des pistes de recherches pourraient être envisagées comme le déploiement d'outils spécifiques (pose de réflecteurs sur les sites étudiés) ou l'élaboration d'algorithmes plus élaborés. Il pourrait être également envisagé de travailler sur un plus grand nombre d'images et sur des temps plus longs, associés à des mouvements de terrain plus importants. Toutefois cela nécessiterait une puissance élevée de calcul et engendrerait des temps de traitement pas toujours compatibles avec les ordinateurs disponibles de manière courante pour des bureaux d'études.

Le dernier point de développement à envisager serait le critère de sélection des points nécessaires au traitement. À ce stade de développement, l'interférométrie radar ne permet pas la localisation des points au sein des zones d'études contrairement à l'instrumentation in situ qui est implantée spécifiquement dans les zones instables. Il conviendrait donc de travailler sur les algorithmes de sélection des points.

Le tableau n°5 ci-dessous récapitule les avantages et les limites de la télédétection radar pour le suivi des glissements de terrains en zone non naturelles.

Tableau n°7 : Avantages / Limites de la télédétection radar pour le suivi
des glissements en zones naturelles

	Avantages	Limites
Télédétection radar	. Précision théorique des mesures = infra-millimétriques grâce aux radars en bande X . Nombre de points mesurés (ou réflecteurs) . Mesures sur de grandes échelles géographiques permettant un suivi de l'ensemble du glissement . Disponibilité des mesures historiques = analyse rétro-active des déplacements	. Coût = données satellites . Surveillance des glissements en zones naturelles sans pose de réflecteurs artificiels . Difficultés de surveillance pour des glissements orientés Nord-Sud ou présentant des pentes très irrégulières . Besoin d'un MNT pour le traitement des effets liés à la topographie du site . Besoin de développer des algorithmes plus élaborés et adaptés aux zones naturelles

En conclusion, cette technique n'apparaît pas à ce jour suffisamment mature pour envisager de manière opérationnelle un diagnostic fiable de mouvements de terrains par analyse sur zone naturelle. Elle pourra néanmoins faire l'objet de développements ultérieurs (réflecteurs, nombre d'images, algorithmes...) visant à la rendre davantage applicable dans certains cas.

LIVRABLE R2 :

RECOMMANDATIONS POUR UN SUIVI ADAPTE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN LENTS

2.1 Objectifs et enjeux du livrable

Ce livrable a pour objectif d'énoncer des recommandations afin de proposer un système d'instrumentation optimal pour le suivi des glissements lents, à partir de l'analyse des données recueillies sur les quatre années du projet MLA3 et présentées dans les livrets B1 et B2.

2.2 Typologie de l'instrumentation et des résultats de mesures

Dans le cadre du projet MLA3, deux types d'instrumentation ont été mis en œuvre ou expérimentés pour le suivi des glissements lents dans les argiles :

- une **instrumentation *in situ***, tels inclinomètres, piézomètres, station météorologique, capteurs sismiques, bornes géodésiques ou repères topographiques ;
- une **instrumentation à distance**, tels scanners laser, LiDAR et images satellites.

Par ailleurs, deux types de mesures ont été effectuées :

- des **mesures ponctuelles**, avec une fréquence trimestrielle basée sur la temporalité des saisons (relevés des tubes inclinométriques et piézomètres ouverts), ou diachroniques (levés scan-laser, LiDAR) ;
- des **mesures en continu**, avec une fréquence horaire ou bi-hebdomadaire ou autre (selon le paramétrage voulu), à partir de l'instrumentation autonome data-loggée (chaîne inclinométrique, capteurs sismiques, cellules CPI et sondes piézométriques autonomes).

Sur la base de cette instrumentation, l'ensemble des mesures a donc permis de mesurer, d'estimer et de recueillir :

- des **déformations** ou **des déplacements en surface** (scan-laser, LiDAR, GPS) ;
- des **déplacements en profondeur** (inclinométrie, bruit de fond sismique) ;
- des **données hydrogéologiques** (piézométrie) et **météorologiques**.

Les résultats de l'instrumentation ont permis dans l'ensemble de bien comprendre la cinétique des glissements lents retenus pour le projet, de reconnaître leurs profondeurs et leurs vitesses de déplacement. Le projet a montré l'intérêt de coupler les différents types d'approches pour obtenir une compréhension suffisante du mouvement de terrain et identifier des corrélations qui éclairent les mécanismes déclencheurs. Une première recommandation consistera donc, lorsque cela est possible, à ne pas limiter l'instrumentation à un système unique mais à **diversifier les approches**.

2.3 Recommandations propres à chaque méthode de suivi

Le livrable L-B2 a permis de dresser un bilan de l'usage de chaque instrumentation sur les sites étudiés, qui s'est avéré riche en enseignements sur les avantages et les limites (récapitulés dans des tableaux de synthèse) propres aux différents systèmes. Les recommandations pour une instrumentation donnée viseront à maximiser les avantages et à minimiser ou gommer les limites. Si les limites sont trop fortes, l'instrumentation n'est vraisemblablement pas adaptée au site étudié.

Les **principales recommandations pour chaque type d'instrumentation** testé dans le projet MLA3 sont rassemblées dans le tableau ci-dessous. Ces recommandations ne sont pas exclusives ni forcément exhaustives. Elles reflètent uniquement les retours d'expérience du projet et **n'excluent pas tous les autres savoir-faire spécialisés liés à ces appareillages**, qui restent totalement nécessaires.

Tableau n°8 : Quelques recommandations pour le bon usage des instrumentations testées dans le cadre du projet MLA3 dans le cadre des glissements lents

Méthode d'instrumentation / de suivi	Recommandations pour le suivi des glissements lents
Inclinométrie conventionnelle (tubes et sonde mobile)	. Prévoir un nombre de tubes suffisant pour cerner les différentes zones de glissement. Plusieurs tubes sur un même profil permettent aussi d'apprécier la continuité des surfaces de rupture . Prévoir une profondeur de forage suffisante pour avoir au moins 2 à 3 mètres de tube au-delà de la surface de rupture . Prévoir des têtes de tubes qui ne sont pas endommageables par l'environnement local (trafic routier en bord de voirie, animaux en zones de pâturage, etc.) . Réaliser une pose soignée des tubes (manchonnages, scellement, etc.) pour éviter les déformations parasites, respecter la norme NF EN ISO 18674-3 . Utiliser une sonde étalonnée et en bon état. Ne pas changer de sonde en cours de suivi (ou faire une double mesure de recalage si un remplacement est prévu) . Caler les fréquences de mesure en fonction de la dynamique du site, et a minima sur les comportements cycliques saisonniers (une mesure en fin de période sèche, une en fin de période humide) . Etre exigeant sur l'exploitation : prévoir une exploitation en déplacements et en rotation, réaliser une analyse statistique des mesures pour écarter les valeurs aberrantes et déterminer des plages de confiance . Prévoir une durée de suivi suffisante : les accélérations et ralentissements sont à apprécier sur le long terme et non sur quelques semaines ou mois de mesures pour les glissements lents
Chaîne inclinométrique autonome en station fixe	. Apprécier le coût au regard des objectifs : coût initial élevé mais suivi en continu très riche en informations, et moins de déplacements de personnels sur site. Intégrer au calcul les coûts logiciels (abonnement fournisseur ou développement, voir ci-dessous) . Vérifier que le logiciel du fournisseur fournit bien toutes les données nécessaires : déplacements dans le temps à une profondeur donnée, déplacements et rotation en fonction de la profondeur, possibilité d'utiliser n'importe quelle mesure comme référence, etc. Sinon prévoir le développement d'une interface d'exploitation des données. . Vérifier les profondeurs de pose des capteurs MEMs sur le terrain . Surveiller le risque de cisaillement de la chaîne inclinométrique pour pouvoir la récupérer avant qu'elle soit bloquée dans le tube.
Piézomètres manuels (tubes ouverts)	. Multiplier le nombre de piézomètres pour disposer d'une vision spatialisée des variations de niveau d'eau, en fonction du contexte hydrogéologique local . Adapter la profondeur d'implantation et la hauteur crépinée à l'hydrogéologie locale. Prévoir systématiquement une hauteur non crépinée en tête et un bouchon pour éviter le remplissage par le haut. . Prévoir des têtes de tubes qui ne sont pas endommageables par l'environnement local (trafic routier en bord de voirie, animaux en zones de pâturage, etc.)

	. Résultats peu représentatifs dans les terrains peu perméables (mais pouvant permettre de voir les évolutions saisonnières) → privilégier des CPI dans ce cas.
Sondes piézométriques autonomes en tubes ouverts	. Idem piézomètres manuels en tubes ouvert ci-avant . Coût souvent intéressant, à apprécier en fonction des objectifs : fréquence des relevés, phénomènes à observer . S'assurer de la compatibilité géométrique du dispositif d'enregistrement des mesures avec la tête de forage . Adapter la fréquence des relevés automatisés aux besoins du site et à la capacité de l'enregistreur . Corriger l'influence de la pression atmosphérique. Si ce n'est pas fait ou pas possible, ne pas considérer comme représentatives des variations de niveau d'eau < 50 cm (ou de pression < 5 kPa). . Surveiller régulièrement l'état des batteries et le niveau de remplissage de la mémoire pour éviter des pertes massives de données . Prévoir une correction de l'influence de la pression atmosphérique. Si ce n'est pas fait ou pas possible, ne pas considérer comme représentatives des variations de niveau d'eau < 50 cm.
Cellules de pression interstitielles	. Multiplier le nombre de piézomètres et les profondeurs de pose pour disposer d'une vision spatialisée des variations de niveau d'eau, en fonction du contexte hydrogéologique local . Bien vérifier la profondeur de pose in situ avant rebouchage des trous . Eviter la pose de plusieurs CPI dans un même forage : c'est techniquement faisable mais les risques de malfaçons (mauvaise étanchéité entre les différents niveaux instrumentés) sont accrus . Adapter la fréquence des relevés automatisés aux besoins du site et à la capacité de l'enregistreur . Surveiller régulièrement l'état des batteries et le niveau de remplissage de la mémoire pour éviter des pertes massives de données . Prévoir une correction de l'influence de la pression atmosphérique. Si ce n'est pas fait ou pas possible, ne pas considérer comme représentatives des variations de niveau d'eau < 50 cm (ou de pression < 5 kPa).
Suivi géodésique ponctuel (relevé de clous d'arpentage à la station totale de précision)	. Faire appel à un topographe spécialisé et autant que possible sensibilisé à la problématique des glissements de terrain . S'assurer de la présence de plusieurs points fixes au voisinage du site de mesure. Dans le cas contraire, ne pas retenir cette méthode d'instrumentation . Documenter et sécuriser la position des points fixes.
Déplacements de surface par positionnement satellite (GNSS / GPS)	. Pour les relevés périodiques de bornes GPS : - Adapter la fréquence des relevés à la dynamique du site - Le site d'étude doit permettre d'accéder à un nombre suffisant de satellites pour le calcul de position de la station de base permettant le recalage précis des points relevés - Prévoir une mise en station longue sur la station de base à chaque campagne. . Pour les stations permanentes de type Geomon : - Adapter la fréquence des relevés à la dynamique du site - Vérifier le dimensionnement énergétique (autonomie) des stations en fonction des fréquences de mesure prévues

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

B2 – Evaluation des méthodes d'instrumentation

R2 – Recommandations pour un suivi adapté des glissements lents

Date : Mars 2023

	- Prévoir une station de référence proche du site pour limiter les incertitudes - Nécessite un milieu suffisamment ouvert pour une bonne détection des satellites et une précision de mesure satisfaisante - Réfléchir au meilleur système d'accroche pour les stations : les montages sur poteaux peuvent générer des mouvements parasites (bascule d'un poteau, balancements saisonniers liés aux gonflements retraités en surface, etc.)
Suivi du bruit de fond sismique	. Une méthode en développement, qui n'est pas encore à un stade « opérationnel » pour le suivi des glissements lents mais qui peut permettre de dériver de nombreux paramètres du terrain . Prévoir un dimensionnement énergétique adapté (pas de données en cas de coupure) . Prévenir les risques de bascule des capteurs au cours du suivi . Suivre en parallèle des paramètres environnementaux (météorologie, hydrologie) et de déformations (déplacements en surface et en profondeur) pour calibrer l'interprétation . Prévoir un temps d'interprétation significatif et des stations de calcul performantes.
Suivi par nuages de points au scanner laser terrestre sur terrain naturel	. Méthode prometteuse mais encore en développement pour les applications sur terrain naturel végétalisé (le seuil de détection des mouvements avec de la végétation est nettement dégradé) . Privilégier une acquisition la plus normale possible à la surface modélisée . Limiter la distance de visée en fonction des capacités de l'appareil . Lors de la première acquisition, réaliser deux acquisitions pour estimer le niveau de bruit et le seuil de détection des mouvements . Fréquence des relevés à adapter en fonction des vitesses de déplacements et du bruit de mesure sur le site. Effectuer une dévégétalisation virtuelle si possible (si toute la scène n'est pas enherbée) . Recaler les nuages acquis à des dates différentes. Si possible s'appuyer sur des points fixes au sein du relevé pour aider au recalage . Favoriser la méthode de la distance nuage-maillage (dC2M) dans la comparaison entre nuages de points . Favoriser le suivi de zones simplement enherbées par rapport aux zones arborées, effectuer si possible les mesures en période de végétation basse.
Réalisation de LiDAR (scanner laser aéroporté)	. Apprécier le coût de la prestation au regard des objectifs recherchés (connaissance de la géomorphologie, besoins de MNT ou de profils topographiques, etc.). Vérifier si le MNT Lidar HR acquis par l'IGN n'est pas suffisant. . Faire appel à un prestataire spécialisé dans les relevés LiDAR . Prévoir notamment dans le cahier des charges : - Des relevés en conditions météorologiques favorables (sol sec, sans brouillard ni couverture neigeuse) et en période de végétation basse (octobre-novembre par ex.) - Un système de coordonnées approprié au traitement prévu (ici WGS-84/Lambert 93) - Une mission au sol pour le recalage sur des points au sol, avec une densité d'au moins 1 point / 50 Ha situés dans des zones réputées stables. Les points au sol sont à raccorder au système

	NGF, par antennes GNSS - Des surfaces unitaires sans point LiDAR au sol n'excédant pas 1 m² et en cumulé < 5 % de l'emprise levée - Une empreinte au sol du faisceau LiDAR inférieure à 10 cm, une précision en X-Y-Z inférieure à 10 cm - La fourniture de données brutes avec catégories de terrain (sol, sursol/végétation, ouvrages par ex.) et d'un nuage de points nettoyé correspondant aux points de la catégorie « sol » . Disposer d'un matériel informatique suffisamment performant pour pouvoir traiter les données, volumineuses et complexes.
Interférométrie Radar	. Méthode adaptée aux zones urbanisées, mais encore insuffisamment opérationnelle pour des applications sur terrain naturel nu sans réflecteurs artificiels. À considérer comme expérimentale dans ces cas . Nécessite de nombreuses images pour obtenir un résultat exploitable . Eviter les versants orientés Nord-Sud ou présentant des pentres très raides . Coupler à un MNT pour la topographie du site

2.4 Adapter son programme d'instrumentation au site d'étude

2.4.1 Généralités

Aucun programme d'instrumentation adapté ne peut être conçu sans un minimum de **connaissance préalable du site d'étude**. La conception nécessite donc les préliminaires usuels à toute étude géotechnique (bibliographie, géologie, historique, morphologie, visite de terrain, etc.), qui permettront d'établir une première proposition d'instrumentation. Celle-ci se base sur une **évaluation** des causes probables du mouvement de terrain et de son étendue, mais peut souffrir d'imprécisions, du fait par exemple de la méconnaissance initiale des terrains en profondeur (épaisseur de sol en glissement, position du substratum, etc.). Ce premier programme instrumenté, souvent couplé à des sondages de reconnaissance géotechnique ou à des mesures géophysiques, devra être interprété à la lumière d'un modèle de terrain (structure des couches, morphologie, propriétés physiques des matériaux, etc.). Il ne permettra toutefois par systématiquement d'obtenir des conclusions définitives.

En fonction de la complexité du site, le programme d'instrumentation peut alors **s'avérer progressif, et s'affiner** au fur et à mesure de la connaissance acquise afin de répondre à des questions de plus en plus pointues. Après l'observation des premiers résultats, de nouveaux appareillages peuvent être déployés dans le cadre d'autres campagnes qui permettront de combler les incertitudes résiduelles. Ces incertitudes peuvent concerner la nature même du mouvement, les facteurs externes l'influençant, son étendue spatiale, etc.

Le **degré de précision attendu in fine** dépend de multiples facteurs, en particulier de l'objectif poursuivi. Les renseignements nécessaires pour dimensionner une solution de confortement opérationnelle sont souvent, par exemple, moins exhaustifs que (ou de nature différente de) ceux nécessaires pour alimenter un programme de recherche approfondi sur la dynamique d'un glissement. En cas de risque imminent par ailleurs, le suivi instrumenté peut être fortement réduit en durée, du fait des prises des décisions rapides nécessaires à la sauvegarde des ouvrages ou des populations. Le géotechnicien s'orientera alors vers des appareillages lui permettant de disposer au plus vite des renseignements les plus critiques pour son étude.

Sur le cas spécifique des glissements lents observés dans le cadre du projet MLA3, on peut toutefois **identifier des éléments essentiels à un système d'instrumentation pertinent**. Ils sont détaillés dans la section suivante.

2.4.2 Recommandations pour un système d'instrumentation approprié

À la lumière de l'expérience acquise dans le projet MLA3, il s'avère indispensable de **coupler inclinométrie, piézométrie et données météorologiques** pour la bonne compréhension de la cinématique des glissements lents. L'analyse des mesures montre bien la corrélation entre les conditions météorologiques, les conditions hydrogéologiques et la cinématique des mouvements (mesures inclinométriques). De plus, l'instrumentation autonome permet de mieux visualiser les phases d'accélération ou de ralentissement du glissement grâce à une fréquence de mesures plus resserrée que les mesures ponctuelles trimestrielles qui permettent de reconnaître uniquement les tendances saisonnières. Cette connaissance des liens entre la dynamique du glissement et les paramètres environnementaux peut permettre de travailler sur des solutions moins lourdes ou de dimensionner efficacement un système de drainage par exemple.

Il convient également de souligner **l'importance critique de l'inclinométrie** pour déterminer les déplacements en profondeur (identification de la surface de cisaillement), que ne permet pas l'instrumentation de surface. Cette instrumentation est régulièrement ignorée dans les études « ponctuelles » (manque de temps, de moyens, etc.), comme on peut l'observer dans certains rapports d'analyse « au coup par coup » antérieurs au projet MLA3. Dans ce cas les épaisseurs en mouvement ne peuvent être qu'estimées, et il est possible de confondre des mouvements superficiels avec des mouvements profonds, voire de proposer des solutions mal adaptées.

Les **méthodes à distance**, comme le relevé LiDAR ou les levés scanners laser terrestres, apportent des informations sur le champ de déplacement à la surface du glissement et sur sa morphologie. Le relevé LiDAR permet en outre de bien visualiser à grande échelle la géomorphologie du glissement et l'expansion des zones glissées. L'apport est apparu ici très significatif pour appréhender les phénomènes à une échelle régionale ou pour préciser les morphologies locales. L'IGN ayant désormais mis à disposition sur certaines régions un modèle numérique de terrain LiDAR HR, ces analyses pourraient être facilitées à l'avenir si la précision s'en avère suffisante. En termes de suivi des déplacements, le **suivi GPS**, notamment par relevé régulier de bornes raccordées à une station de base dont la position est recalculée à chaque campagne, est également apparu pertinent. Il a permis une visualisation cohérente des mouvements du site de Charlaix, même en l'absence de point fixe (qui handicape les relevés géodésiques conventionnels à la station totale de précision). La possibilité de détecter suffisamment de satellites peut toutefois s'avérer critique en territoire de montagne.

2.4.3 Instrumentation manuelle ou autonome ?

Le choix entre une instrumentation manuelle ou autonome dépend principalement des **objectifs recherchés** et des **éléments financiers**.

Il s'agira de comparer une instrumentation avec des mesures ponctuelles, imposant des déplacements récurrents sur un site plus ou moins éloigné, avec une instrumentation autonome intégrant une récupération des données plus espacée dans le temps ou même à distance. L'investissement initial sur de l'instrumentation autonome, plus onéreuse, est alors à étudier par rapport au **coût** des déplacements, au nombre de mesures envisagées, et à l'accès au site.

Dans le cas d'une instrumentation autonome, il convient également d'être **attentif aux moyens d'alimentation des appareillages**, à leur **capacité de stockage des données** ainsi qu'aux **moyens de communication** (réseau) depuis le site du glissement. Si les données de l'instrumentation autonome ne peuvent être télétransmises, selon les informations que l'on recherche et les objectifs envisagés, cette option reste-t-elle suffisamment intéressante ?

Dans le cas de l'étude des glissements lents du projet MLA3, la cinématique modérée des déplacements permettait de récupérer des données stockées et non télétransmises lors des campagnes de mesures sur site : par exemple les mesures des sondes piézométriques et des cellules de pression interstitielle autonomes étaient récupérées lors des campagnes de mesures inclinométriques trimestrielles. Cela n'aurait pas été envisageable pour un suivi au jour le jour à cause d'une rupture imminente par exemple.

L'exploitation des mesures autonomes doit également être prise en compte dans le choix du prestataire et de l'appareillage. Soit le prestataire de l'appareillage traite les données, ce qui ne permet généralement pas de connaître le détail des calculs effectués, soit les données sont transmises brutes et le bureau d'études doit alors développer en interne l'exploitation. Cela est à évaluer lors de la conception du plan d'instrumentation en fonction du coût et des capacités de développement internes.

2.4.4 Synthèse

Afin de proposer un système d'instrumentation optimal techniquement et financièrement pour le suivi des glissements lents, à partir de l'analyse des données recueillies sur les quatre années du projet MLA3, il ressort au final l'intérêt :

- d'identifier le contexte régional, local, et la morphologie des zones de glissements par une étude géologique pouvant être utilement assortie d'un relevé LiDAR aéroporté ;
- de diversifier les méthodes d'instrumentation sur un même site ;
- de corréler les déplacements observés en surface (topographie, scan-laser terrestre) avec des déplacements en profondeur (inclinométrie), voire avec l'évolution de paramètres du terrain (bruit de fond sismique, méthode encore en développement) ;
- de coupler les mesures inclinométriques avec des mesures piézométriques et des données météorologiques pour comprendre l'interdépendance entre ces paramètres et viser des solutions pertinentes techniquement et durables.



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

UGA

Université
Grenoble Alpes



ENTPE

L'école de l'aménagement durable des territoires



UNION EUROPÉENNE

Fonds Européen de
Développement Régional

**RÉGION
SUD**
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR



l'Europe
s'engage
sur
le Massif Alpin

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