

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

**Modèles géotechniques et géomécaniques :
exemples des sites de Charlaix et des
Touches**



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR



l'Europe
s'engage
sur
le Massif des Alpes

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE RHÔNE-ALPES

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 soutenues 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

LIVRABLE N° L-A5

Date : Mars 2023

MLA3 – Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Modèles géotechniques et géomécaniques : exemples des sites de Charlaix et des Touches

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 :	Modèles géotechniques et géomécaniques : exemples des sites de Charlaix et des Touches
Date d'édition :	Mars 2023
Nombre de pages :	47 p.
Coordinateur :	F.Rojat (Cerema)
Rédacteurs du rapport :	G.Bièvre (UGA-ISTerre), F.Rojat (Cerema)
Avec la participation de :	-
Relecteur :	Y.Péru (Cerema)
Valideur :	F.Rojat (Cerema – Chef de projet MLA3)

Résumé du livrable

Le présent document est l'un des livrables de l'axe A du projet FEDER POIA « MLA3 » (Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager). Il présente deux approches différentes de modélisation sur les cas des sites de Charlaix et des Touches.

Le site de Charlaix, qui dispose d'un nombre important de données de reconnaissances de terrain (mécaniques, géophysiques, etc.) et de suivis instrumentés, a permis dès le début du projet MLA3, à travers un travail de synthèse présenté dans (Bièvre, et al., 2018), d'établir une analyse approfondie des terrains en place et des processus de transit de l'eau. Cette analyse a ensuite été élargie dans ce rapport pour constituer un modèle tridimensionnel croisant les informations des sondages mécaniques et les données géophysiques. Les résultats montrent une meilleure représentation de la géométrie des couches et soulignent l'importance potentielle de certaines couches plus perméable que les argiles dans l'alimentation en eau du glissement. De tels modèles pourraient également être utilisés ultérieurement en association avec les propriétés mécaniques des terrains pour conduire des simulations mécaniques et hydrauliques au plus proche de la réalité de l'agencement des couches.

Sur le site des Touches, l'ensemble des données rassemblées historiquement et au cours du projet MLA3 a été synthétisé, et employé pour alimenter un modèle très simplifié de pente infini, certes moins précis que celui de Charlaix mais permettant de dégager rapidement des informations pertinentes pour de l'ingénierie de niveau diagnostic ou avant-projet. Notamment, l'influence des niveaux d'eau ou de divers paramètres comme l'épaisseur de matériaux en mouvement et la variabilité des résistances des terrains en place ont pu ainsi être étudiés facilement.

Il ressort de ce livrable que les glissements lents se prêtent à une importante diversité de choix de modèles géotechniques et géomécaniques, avec des niveaux de complexité et de précision variables. La pertinence de telle ou telle approche est, *in fine*, à apprécier en fonction des objectifs recherchés et des sources d'incertitude résiduelles pesant sur le modèle.

Mots clés

MLA3	Charlaix
Essais de laboratoire	Quet-en-Beaumont
Identification des sols	Le Motty
Corps	Argiles glacio-lacustres
Les Touches	Propriétés mécaniques

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'origine géologique, 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) et 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

1	Contexte général	8
1.1	Rappels sur le contexte géologique	8
1.2	Contenu du présent rapport	8
2	Un modèle avancé : le site de Charlaix.....	10
2.1	Hypothèses de travail	10
2.2	Matériels et méthodes.....	13
2.2.1	Sondages mécaniques	13
2.2.2	Tomographies de résistivité électrique.....	14
2.2.3	Profilage électromagnétique par induction	15
2.2.4	Modélisation géologique 3D	15
2.3	Résultats	15
2.3.1	Valorisation des sondages destructifs	15
2.3.2	Tomographies de résistivité électrique 2D	16
2.3.3	Tomographie de résistivité 3D	17
2.3.4	Profil électromagnétique par induction.....	18
2.3.5	Modélisation géologique	19
2.4	Conclusions et perspectives sur le site de Charlaix.....	20
3	Un modèle simplifié : le cas des Touches	21
3.1	Données disponibles	21
3.1.1	Contexte géologique local	21
3.1.2	Contexte hydrogéologique	22
3.1.3	Indices morphologiques.....	24
3.1.4	Structure des terrains en place	26
3.1.5	Propriétés des sols	29
3.1.6	Résultats d'instrumentation	30
3.1.7	Autres éléments	34
3.2	Modèle de terrain simplifié	35
3.2.1	Synthèse des données disponibles et pertinence des modèles	35
3.2.2	Modèle de pente infinie pour l'analyse de l'influence des niveaux d'eau	36
3.2.3	Etude de sensibilité sommaire (zone 1 de glissement)	38
3.3	Conclusion sur le site des Touches	40
4	Synthèse - Conclusion.....	41
5	Références.....	42

5.1	Bibliographie	42
5.2	Table des figures.....	44

1 CONTEXTE GENERAL

1.1 Rappels sur le contexte géologique

L'ensemble du contexte géologique des sites étudiés dans le cadre du projet MLA3 a été présenté dans les livrables L-A1 (géologie et géomorphologie régionales) et LA-2 (synthèse des identifications géotechniques des matériaux) et ne sera pas re-détaillé ici.

Pour mémoire, les travaux du projet MLA3 s'articulent autour de 5 sites pilotes dans la zone géologique du Beaumont (proche Trièves), le long de la RN85 entre La Mure (38) et Saint-Firmin (05). Les matériaux affectés par les mouvements de terrain dans cette aire d'étude sont principalement des argiles litées « glacio-lacustres » quaternaires (époque würmienne), déposées sur la frange de l'ancien lac de barrage cataglaciaire du Beaumont.

La localisation des 5 sites d'étude le long de la RN85, sur fond de plan IGN et (après recalage) sur la carte schématique des glaciers würmiens, est rappelée sur la Figure 1.

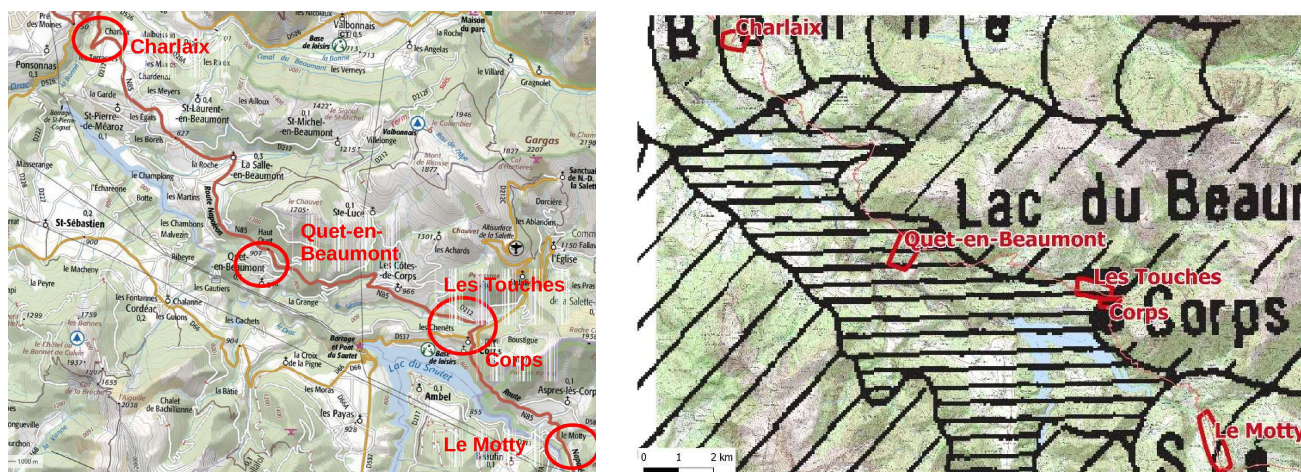


Figure 1 : Localisation des sites d'étude du projet MLA3 sur fond de plan IGN (à gauche) et après recalage sur la carte schématique des glaciers würmiens (à droite, source (Monjuvent, 1978))

On se reportera au livrable L-A2 pour le détail des sondages de reconnaissance menés en 2018 et 2021 sur chaque site, qui ont permis de disposer des échantillons de sols étudiés par la suite, et aux livrables L-A2 à L-A4 pour le détail des essais de caractérisation menés sur les argiles glacio-lacustres et leur interprétation.

1.2 Contenu du présent rapport

Le présent rapport s'intéresse à la **question de la modélisation géotechnique** (modèle de terrain) et **géomécanique** (modèle mathématique de comportement des matériaux et modèle de calcul) des sites d'étude. Ces sites étant soumis à des glissements de terrain, leur modélisation peut avoir de multiples objectifs comme par exemple :

- comprendre l'origine du mouvement de terrain, voire de manière plus académique les mécanismes à l'œuvre dans un glissement lent (du Beaumont) ;
- déterminer le mode de rupture et / ou expliquer certains comportements recensés sur le terrain ;
- identifier, confirmer ou quantifier des corrélations entre diverses observations (pluviométrie, piézométrie, déplacements par exemple) ;
- éclairer des mécanismes de transfert hydrique influant sur l'instabilité ;

- caler une cinétique du mouvement sur les événements passés ou sur les résultats d'instrumentation pour tenter de prédire son avenir ;
- déterminer un « facteur de sécurité » initial du glissement et étudier son amélioration en fonction de diverses configurations de travaux ;
- dimensionner une solution de confortement ou de drainage ;
- évaluer les effets envisageables du glissement de terrain sur une structure ;
- etc.

La modélisation peut ainsi revêtir des niveaux de complexité très variables, en fonction de l'objectif recherché et des moyens disponibles, ceux-ci couvrant aussi bien la « matière première » constituée des données de terrain, de sondages, d'essais de laboratoire, etc. que les outils de calcul ou les modèles de comportement mécanique et hydraulique à disposition.

Il convient également de rappeler que **l'étape de modélisation se situe au bout de la chaîne d'étude du phénomène** de glissement de terrain, qui commence par des recherches géologiques, hydrogéologiques et documentaires générales, passe par des reconnaissances de terrain et de laboratoire (potentiellement itératives) avant d'arriver à une représentation du site et à d'éventuels calculs. Elle est donc **tributaire de l'ensemble des erreurs** qui auront pu être cumulées dans les étapes précédentes : connaissance imparfaite du terrain entre les zones de prélèvement, incertitudes sur les résultats d'essais et d'instrumentations, hétérogénéité des sols, erreurs éventuelles d'interprétation, hypothèses simplificatrices, etc. La précision du modèle tend toutefois en général à augmenter avec le volume des connaissances disponibles, mais aussi souvent sa complexité.

Deux exemples en particulier sont développés ici :

- celui du **site de Charlaix**, dont la densité de reconnaissances et d'instrumentations disponibles a permis le développement d'un modèle avancé avec une géométrie tridimensionnelle, améliorant les synthèses établies au début du projet ;
- celui du **site des Touches**, qui a fait aussi l'objet de reconnaissances significatives mais moins poussées (voir livrable L-A2). Sur ce cas, un modèle géotechnique plus simple a été établi, qui permet toutefois de disposer d'éléments appropriés pour les calculs d'ingénierie de niveau diagnostic et/ou avant-projet.

Ce rapport est à relier aux autres livrables de l'axe A du projet pour disposer d'une vue complète du contexte géotechnique :

- L-A1 précisant le référentiel géologique régional,
- L-A2 rassemblant les essais d'identification géotechnique,
- L-A3 rassemblant les essais mécaniques,
- L-A4 analysant l'ensemble des données sur les argiles litées glacio-lacustres des différents sites pour tenter d'identifier un « modèle » moyen des propriétés de ces terrains.

2 UN MODELE AVANCE : LE SITE DE CHARLAIX

Le site de Charlaix est investigué depuis de nombreuses décennies. Notamment, de multiples reconnaissances géophysiques ont été conduites depuis 2012. Ces reconnaissances permettent d'étendre la spatialisation de la géométrie des couches déduite des reconnaissances mécaniques. Une **première synthèse a été proposée au début du projet et est disponible dans (Bièvre, et al., 2018)** ; elle ne sera pas re-détaillée ici mais fournit de nombreux détails et explications auxquels il sera utile de se référer. Les travaux présentés par la suite utilisent les résultats de cet article comme hypothèse de travail et visent à étendre la reconstruction géologique à un modèle 3D.

Pour cela, les données des **reconnaissances mécaniques ont été analysées à nouveau**, des **profils géophysiques complémentaires** ont été acquis et l'ensemble des résultats ont été intégrés dans un **géomodelleur** pour élaborer un modèle d'organisation 3D de la disposition des couches.

2.1 Hypothèses de travail

La Figure 2 présente des coupes géologiques synthétiques de la région d'étude. La coupe de Ponsonnas provient de (Antoine, et al., 1981) et celle du ravin des Garguettes de (Montjuvent, 1973). La coupe de Charlaix est une synthèse des sondages carottés conduits sur le site. La succession verticale observée à Charlaix **suggère que la série sédimentaire est continue depuis les alluvions de base (Würm I) jusqu'aux moraines terminales du Würm III**, et avec des ordres de grandeur d'épaisseurs comparables. Cette coupe synthétique servira de référence pour la suite.

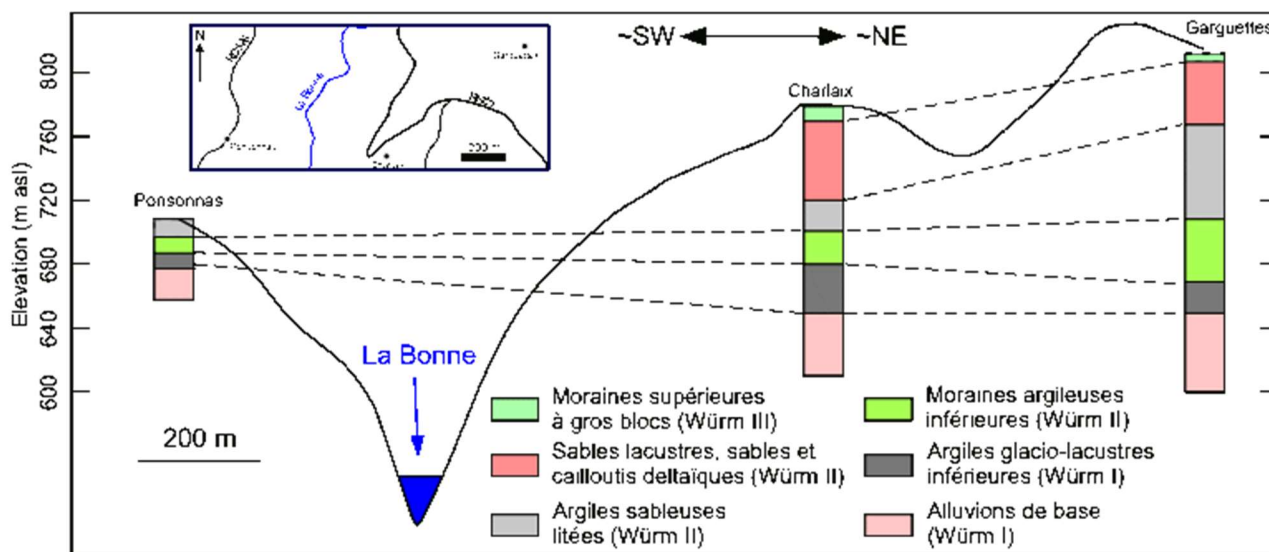


Figure 2 : Coupes géologiques synthétiques de la région d'étude.

La Figure 3 présente la localisation du glissement de terrain étudié sur le site de Charlaix et la localisation de la coupe géologique construite au début de ce projet. Celle-ci est présentée sur la Figure 4.

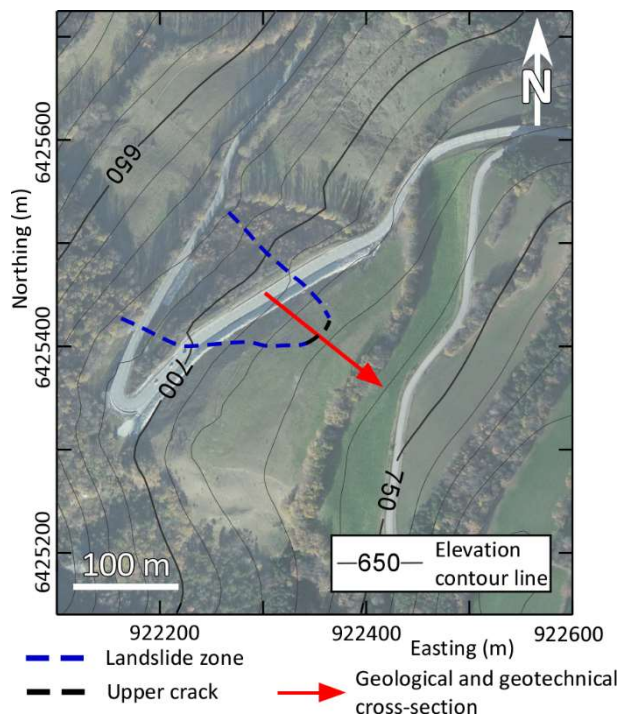


Figure 3 : Localisation du site de Charlaix. Le trait rouge matérialise la coupe géologique et géotechnique présentée dans la figure 4.

Le profil 2D construit présente l'agencement des couches déduit de reconnaissances géophysiques calibrées par les sondages mécaniques et d'analyses de séries temporelles piézométriques. Ces travaux ont notamment montré **que les surfaces de rupture, en surface, servent de drain pour alimenter en eau ces mêmes surfaces de cisaillement en profondeur**. Les résultats de ce travail ont également montré une augmentation d'épaisseur des couches de sables et cailloutis lacustres et deltaïques ainsi que des moraines terminales vers le sud. Ceci suggère que ces couches, de perméabilité plus élevée que les argiles glacio-lacustres sous-jacentes et dont l'écoulement est dirigé vers le sommet du glissement du lacet de Charlaix, constituent un réservoir important pour alimenter ce **glissement à contrôle hydraulique**.

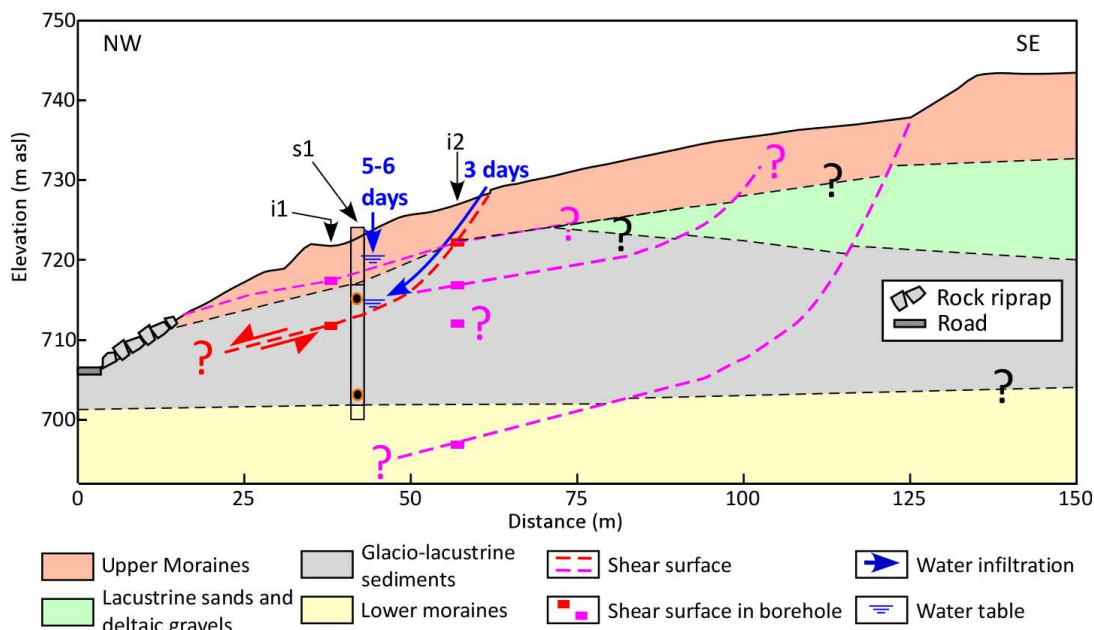


Figure 4 : Coupe géologique et géotechnique du site de Charlaix (Bièvre et al., 2018) . La localisation de la coupe est présentée dans la figure 3. Les deux points noir/orange dans le sondage S1 correspondent à des échantillons prélevés pour datation 14C, et dont les résultats sont présentés dans la figure 5.

Deux datations 14C ont été conduites sur des échantillons d'argiles glacio-lacustres en provenance du sondage carotté S1 (Figure 4). Aucun reste végétal n'ayant été retrouvé, les dates ont été conduites sur la matière organique présente dans le sédiment. Les résultats fournissent un âge calibré à 2 écarts-types (probabilité de 95%) de :

- $34\,200 \pm 725$ ans BCE pour l'échantillon à l'altitude de 702 m ;
- $38\,090 \pm 1\,675$ ans BCE pour l'échantillon à 715.7 m d'altitude.

Ces résultats montrent que, malgré les barres d'erreur *a priori* faibles, l'échantillon plus haut en altitude semble le plus ancien. Ceci indique que les datations sur la matière organique contenue dans le sédiment restent peu fiables mais permettent d'obtenir un **ordre de grandeur des âges des couches**. Ces résultats sont toutefois **cohérents avec ceux obtenus sur les Argiles du Trièves** (Bièvre & Crouzet, 2021). Ils confirment que la couche d'argiles datée ici correspond bien aux **argiles du Würm II** et est l'équivalent chronostratigraphique des Argiles du Trièves.

2.2 Matériels et méthodes

L'implantation des reconnaissances complémentaires est présentée sur la Figure 5.

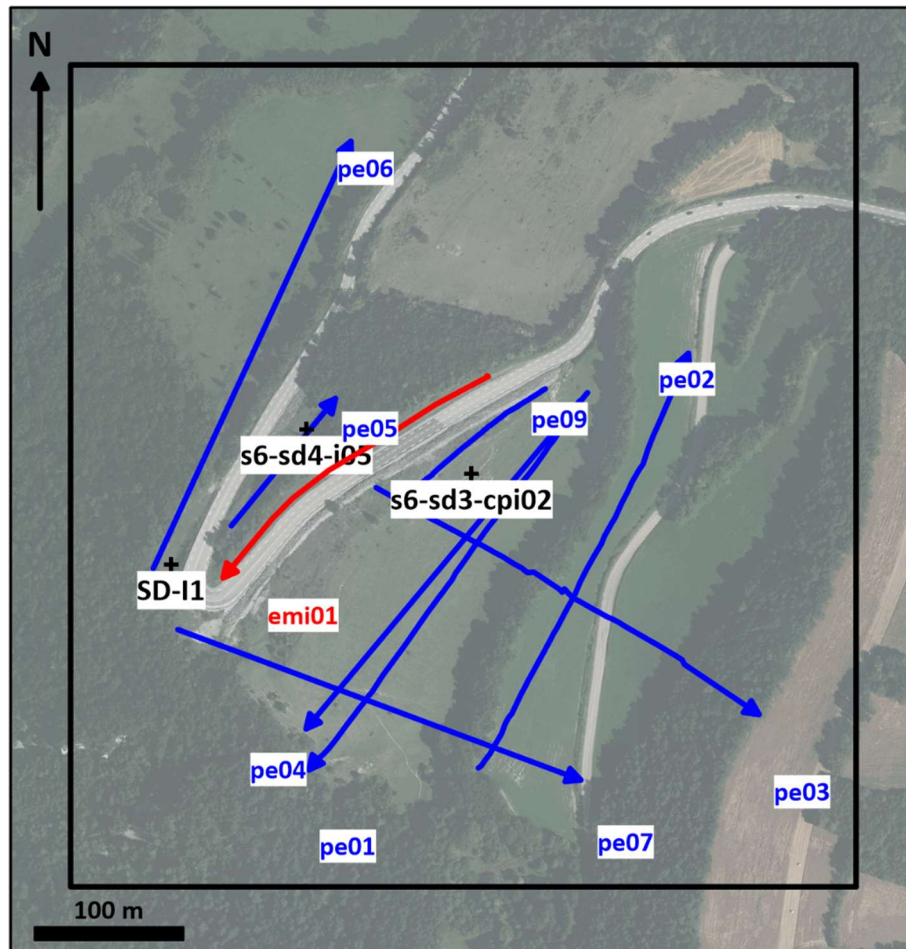


Figure 5 : Implantation des reconnaissances géophysiques et géotechniques. Le carré noir correspond à l'emprise utilisée pour la modélisation géologique finale.

2.2.1 Sondages mécaniques

Les coupes des sondages carottés ont servi pour calibrer l'ensemble des résultats. Les sondages destructifs ont été analysés et, quand cela était possible, les données des paramètres de forage ont été combinées pour en déduire un paramètre de résistance mécanique, **l'indice de Somerton S_d** (Somerton, 1959), (Laudanski, et al., 2013), (Reiffsteck, et al., 2018)). Des résultats récents, à Avignonet, ont montré la possibilité de définir la lithologie des principales unités (moraines, argiles litées, alluvions) sur la base de l'analyse des paramètres de forage (Bièvre & Crouzet, 2021)). De plus, cette étude a également montré qu'il était possible de **distinguer les niveaux peu ou pas remaniés des couches fortement remaniées à partir de l'analyse de l'évolution de la résistance mécanique** : dans le cas de couches peu ou pas remaniées, il existe un gradient de résistance mécanique qui augmente régulièrement avec la profondeur (environ 1 kPa/m). Ce gradient traduit l'augmentation de la compaction sédimentaire avec la profondeur. Dans le cas de couches fortement remaniées, ce gradient est détruit. Il est possible d'obtenir cette mesure de résistance mécanique (l'indice de Somerton, S_d , en kPa) à partir de la combinaison des paramètres de forages, notamment la vitesse d'avancement, VA en m/h, et la pression sur l'outil, PO en bar, à l'aide de la relation $S_d = PO/\sqrt{VA}$. Cette mesure de résistance peut également être obtenue à l'aide d'un essai de pénétration.

La Figure 6 présente un profil de résistance de pointe obtenu à Harmalière avec un pénétromètre dynamique lourd. Il s'agit des mêmes formations lithologiques qu'à Charlaix, il est donc possible de transposer ces observations. La figure montre que, dans le cas de couches non glissées, il existe un gradient de résistance mécanique (visible entre 734 m et le fond du profil). Cette observation suggère que, dans le cas de couches peu ou pas remaniées, l'histoire de la compaction sédimentaire est préservée. Par contre, il ne semble pas possible de distinguer les niveaux d'argiles litées des niveaux qui mélangent moraines et argiles litées. Finalement, il convient de noter que cette méthode ne permet pas de distinguer des niveaux qui n'auraient jamais glissé. En effet, dans le cas de glissement à grande profondeur (par exemple à 45 m à Avignonet) mais avec des vitesses très faibles (de l'ordre de quelques mm/an), le glissement se fait en masse, et le gradient de compaction sédimentaire est conservé.

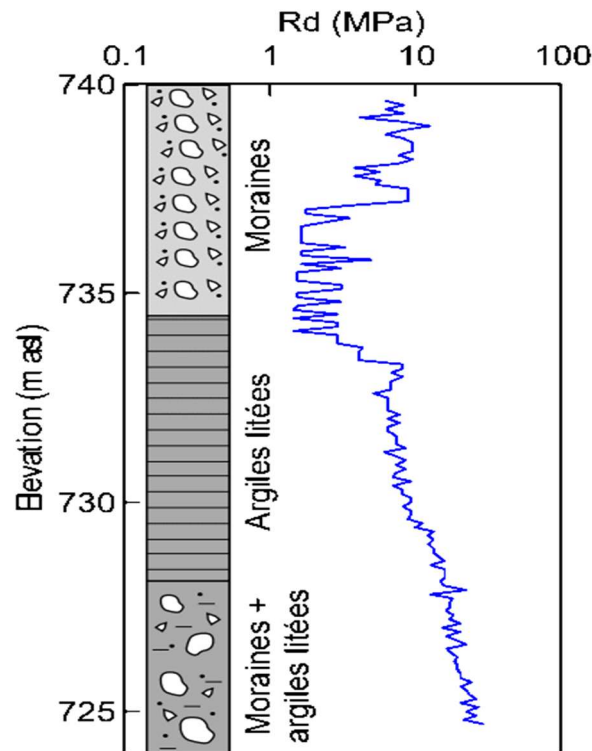


Figure 6 : Comparaison de la résistance de pointe et de la lithologie à Harmalière.

2.2.2 Tomographies de résistivité électrique

Huit tomographies de résistivité électrique ont été utilisées dans ce travail (Figure 5). Les mesures sont conduites au moyen de plusieurs dizaines d'électrodes (typiquement 64) implantées de façon régulière le long d'un profil linéaire. Le principe consiste à injecter un courant électrique au moyen de 2 électrodes et à mesurer la différence de potentiel induite au moyen de deux autres électrodes. La résistivité apparente est ensuite déterminée en multipliant la résistance électrique mesurée par un facteur géométrique qui dépend de la configuration des électrodes et de la topographie. Les mesures sont automatisées et **plusieurs centaines de points de résistivité apparente sont mesurés pour chaque profil**.

Les données ont ensuite été inversées à l'aide du code PyGIMLi (Rücker, et al., 2017). La qualité statistique des résultats est évaluée à l'aide des paramètres χ^2 et RRMSE (erreur relative au sens des moindres carrés) dont les détails sont précisés dans (Bièvre, et al., 2021). L'ensemble des résultats ont fourni des valeurs de χ^2 et de RRMSE d'environ 1 et inférieures à 10 %, respectivement, ce qui témoigne d'une **bonne qualité numérique des inversions**. Les résultats de l'inversion sont ensuite interprétés en utilisant des données externes, typiquement des sondages mécaniques.

2.2.3 Profilage électromagnétique par induction

Un profil électromagnétique par induction (EMI) a été testé sur le site (emi01 sur la Figure 5). L'appareil utilisé, le CMD-Duo, permet d'effectuer des mesures 1D à l'aide de 2 boucles qui sont espacées de 10, 20 et 40 m et avec 2 orientations de champ électromagnétique (horizontal et vertical). Cette méthode permet d'acquérir des mesures de résistivité apparente selon 6 voies, qui correspondent à différentes profondeurs d'investigation et dont la plus profonde est d'environ une soixantaine de m.

Les données ont été inversées à l'aide du codeEMagPy (McLachlan, et al., 2021) et ont fourni des erreurs RRMSE inférieures à 10 %.

2.2.4 Modélisation géologique 3D

L'ensemble des données issues des reconnaissances précédentes ont été utilisées pour **construire des modèles stratigraphiques 3D à l'aide du géomodeleur Rockworks**. Des données de reconnaissances mécaniques ont été ajoutées, notamment des coupes de sondages carottés. L'emprise spatiale du modèle est présentée sur la Figure 5.

Le milieu a été discrétisé en 3 dimensions puis les coupes géologiques 1D ont été ajoutées au modèle. Ensuite, à partir de la sélection d'un certain nombre de sondages 1D, le logiciel a établi des corrélations lithologiques et/ou stratigraphiques. Dans ce travail, c'est la géométrie des différents horizons qui est cherchée, et les corrélations ont été construites sur la base de leur âge et de leur succession verticale (la stratigraphie).

2.3 Résultats

2.3.1 Valorisation des sondages destructifs

Un exemple d'application au site de Charlaix est présenté par la suite. Les sondages utilisés sont localisés sur la Figure 5. Pour SD-I1, il a été possible d'obtenir directement les paramètres de forage. Il s'agit d'un sondage destructif qui a été conduit pour équipement avec un tube inclinométrique. Pour les sondages S6-SD4-I5 et S6-SD3-cpi02, les paramètres de forage ont été numérisés manuellement à partir des graphes disponibles sur les coupes de forage.

Le profil vertical de l'indice de Somerton du sondage SD-I1 est présenté sur la Figure 7. Il montre, du sommet jusqu'à environ 670 m, une forte variabilité de S_d , qui peut correspondre à la présence de formations morainiques qui sont caractérisées par une granulométrie étalée : des blocs et des argiles avec des valeurs de S_d respectivement fortes et faibles. Une surface de rupture a été identifiée par inclinomètre à environ 668 m d'altitude. En-dessous de cette interface, S_d augmente progressivement jusqu'à environ 645 m d'altitude, mis à part la forme en cloche entre 660 et 665 m d'altitude. En-dessous de 645 m, S_d semble constant mais la faible hauteur disponible rend l'analyse difficile. L'augmentation progressive de S_d entre 668 et 645 m se fait avec un gradient d'environ 1 kPa/m, comme ce qui a été observé à Avignonet. **Cette observation suggère que, en-dessous de 668 m, les formations ont été peu ou pas remaniées et peuvent correspondre à des argiles et/ou des moraines.** Les valeurs constantes de S_d en-dessous de 645 m pourraient correspondre à des alluvions. Cette observation est **cohérente avec la coupe synthétique de la Figure 2** qui montre l'interface entre les alluvions de base (Würm I) et les argiles glacio-lacustres inférieures (Würm I) vers cette altitude.

Pour les deux autres sondages, les analyses sont plus complexes (Figure 7). Succinctement, les deux sondages présentent une interface marquée entre les formations glissées et celles en place, vers 7 à 8 m de profondeur. En-dessous, il est plus difficile d'observer sans ambiguïté une augmentation progressive de résistance mécanique, notamment dans le cas de S6-SD3-cpi02, où cette augmentation semble se matérialiser sous la forme de tronçons de quelques mètres. Dans ces deux cas, l'interprétation apparaît plus délicate.

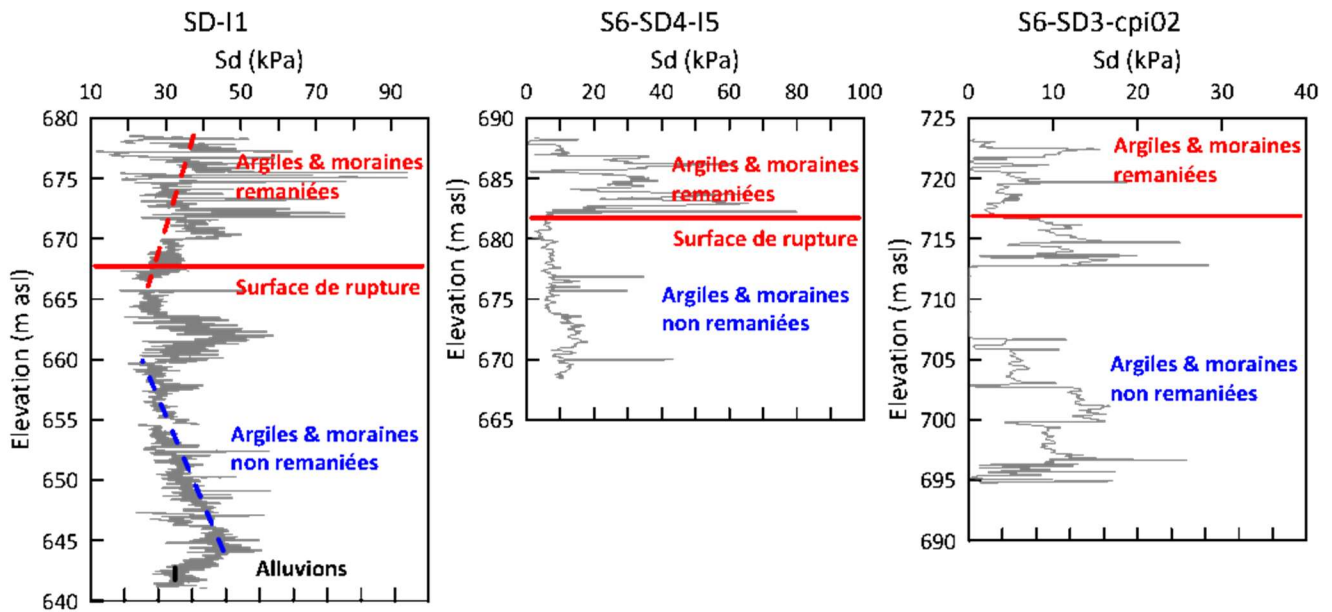


Figure 7 : Indice de Somerton des sondages SD-I1, S6-SD4-I5 et S6-SD3-cpi02 et interprétation géotechnique. Les sondages sont localisés sur la figure 5. La ligne pleine rouge marque la surface de rupture détectée par inclinomètre.

2.3.2 Tomographies de résistivité électrique 2D

La comparaison de la résistance mécanique S_d du sondage SD-I1 et de la tomographie de résistivité pe06 est présentée sur la Figure 8. De bas en haut, il est possible de distinguer plusieurs unités sur la base de la distribution de résistivité et de S_d . En-dessous de 640 m d'altitude, les résistivités sont élevées ($> 400 \Omega.m$), ce qui est cohérent avec la présence d'alluvions avec peu ou pas d'argiles. Cette observation est également cohérente avec des valeurs de S_d constantes. Au-dessus de 640 m, les résistivités deviennent d'abord plus faibles ($< 50 \Omega.m$) en-dessous de 650 m, ce qui correspond à des argiles, puis plus élevées (environ 100 à 400 $\Omega.m$) entre 650 et 660 m, ce qui correspond à des formations de granulométrie plus élevées. Cette succession peut correspondre à la première unité glacio-lacustre composée d'argiles litées, en bas, puis à une sédimentation plus grossière (sables par exemple) à mesure que le lac se comble. Finalement, au-dessus de cette interface, les formations sont moins résistives ($< 100 \Omega.m$). Les valeurs de S_d suggèrent des formations remaniées comme, par exemple, des argiles, éventuellement mélangées à de la moraine. **L'ensemble de ces observations présente une bonne corrélation entre résistivité et S_d .**

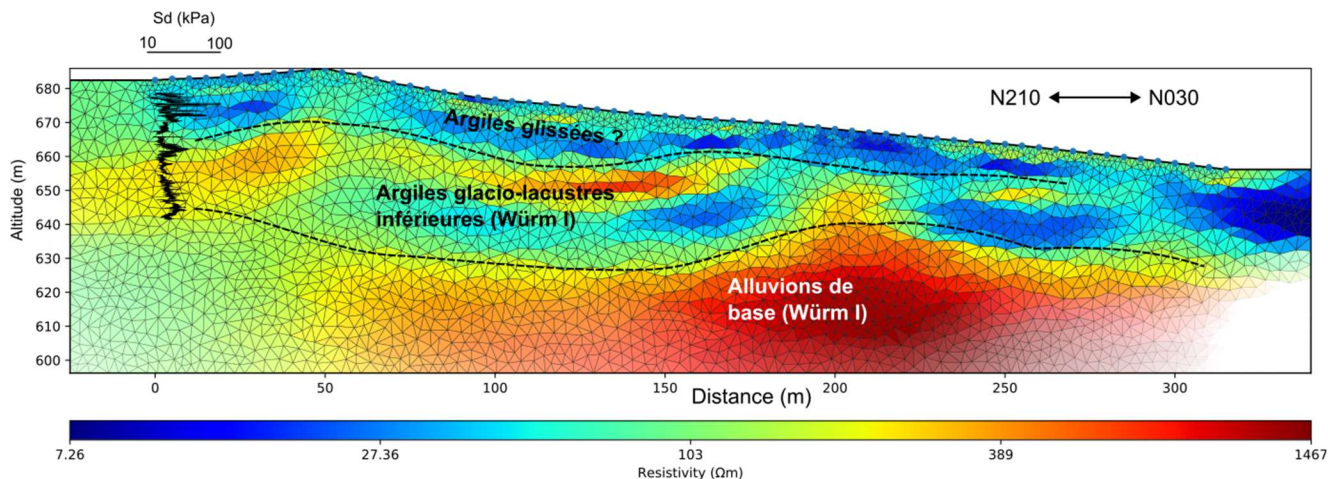


Figure 8 : Interprétation de la tomographie électrique du profil pe06 et de l'indice de Somerton (Sd) du sondage SD-I1. La localisation est précisée sur la figure 5.

2.3.3 Tomographie de résistivité 3D

Huit profils 2D de résistivité électrique ont été rassemblés pour conduire une inversion 3D. L'implantation de ces 8 profils est présentée sur la Figure 5 et le résultat est présenté sur la Figure 9. L'échelle de couleur a volontairement été limitée à 25-250 $\Omega \cdot m$ dans le but de pouvoir distinguer les unités de résistivité médiane. Globalement, **la majorité des unités stratigraphiques sont observées mais certaines sont difficiles à distinguer**. Les alluvions de base (Würm I) et les unités terminales de moraines (Würm III) et sables et cailloutis (Würm II) sont clairement identifiées. Toutefois, il n'est pas possible de distinguer les sables et cailloutis des moraines puisqu'elles présentent des résistivités comparables. Une observation similaire a été faite sur le glissement d'Avignonet ((Bièvre, et al., 2016)). De même, il semble très difficile de distinguer les trois unités d'argiles glacio-lacustres inférieures (Würm I), moraines argileuses inférieures (Würm II) et d'argiles sableuses glacio-lacustres (Würm II). Ceci provient de ce que : 1) ces trois unités ont des résistivités comparables et 2) les interfaces entre ces unités sont situées à proximité de la route où il est très difficile d'implanter des électrodes sur une distance suffisamment longue pour conduire des tomographies et obtenir des observations en profondeur.

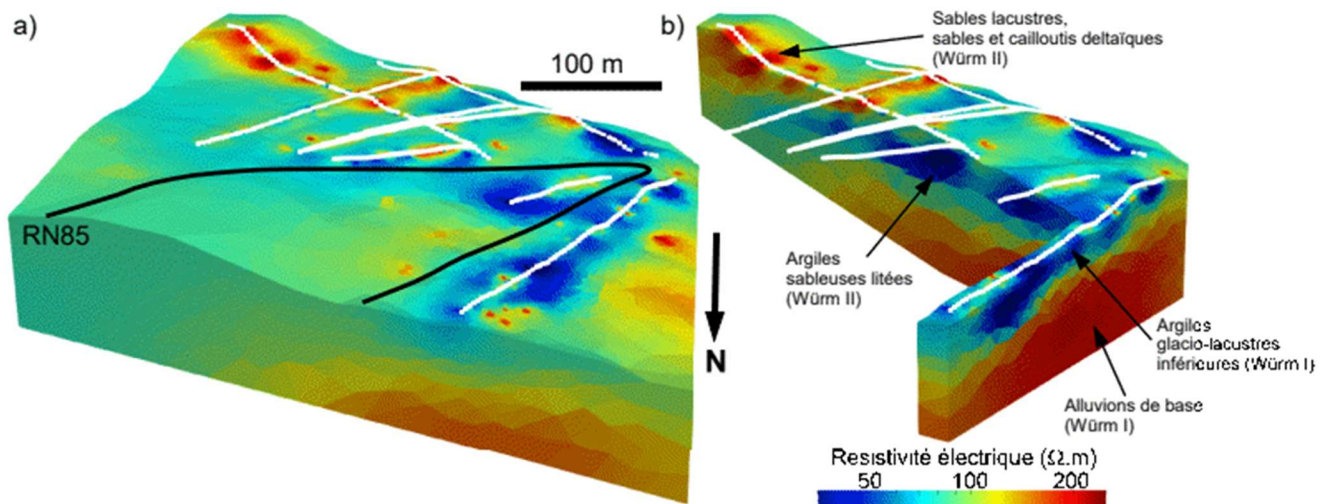


Figure 9 : Tomographie électrique 3D. Les lignes blanches correspondent aux profils électriques. a) Bloc 3D. b) vue en coupe.

2.3.4 Profil électromagnétique par induction

Dans le but de surmonter le problème de pouvoir conduire des reconnaissances électriques dans des endroits non adaptés, des acquisitions par méthode électromagnétique par induction (EMI) ont été testées sur le site. L'implantation du profil test, nommé emi01, est présenté sur la Figure 5. Les données ont été inversées et le résultat est présenté sur la Figure 10. La figure montre la succession latérale de 12 profils 1D qui ont été acquis tous les 10 m. La juxtaposition des profils 1D fournit une image pseudo-2D qui présente l'évolution latérale de la résistivité. La première observation est que les profils 1D, individuels, présentent une évolution progressive de la résistivité le long du profil. Ceci suggère que les données sont peu bruitées.

La figure montre **la présence, sous une couverture résistive de quelques m, d'une couche très faiblement résistive** ($< 20 \Omega.m$) qui correspond à des argiles très probablement glissées. Cet horizon argileux est présent jusqu'à une profondeur d'environ 15 à 25 m et surmonte une unité plus résistive (35 à $100 \Omega.m$). La limite inférieure de cette unité est très irrégulière et située à au moins 45 m de profondeur. Par analogie avec la tomographie électrique 3D, elle pourrait correspondre à l'unité d'argiles glacio-lacustres inférieures (Würm I). En-dessous, les résistivités sont supérieures à $200 \Omega.m$, ce qui pourrait correspondre aux alluvions de base (Würm I). Ces résultats sont en **très bon accord avec la méthode de résistivité**. Des sondages ou profils complémentaires permettraient de compléter la couverture spatiale des mesures acquises jusqu'ici et de fournir une meilleure résolution pour ce qui concerne la potentielle distinction des deux unités d'argiles glacio-lacustres (Würm I et Würm II) et de celle des moraines argileuses inférieures (Würm II).

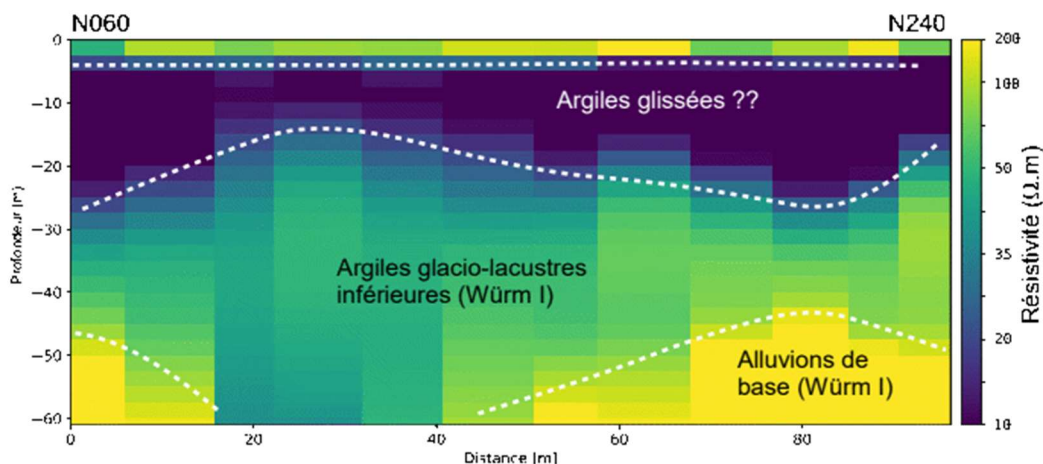


Figure 10 : Profil emi01 (localisation sur la figure 5).

2.3.5 Modélisation géologique

Dans le but de présenter une **reconstruction géométrique 3D des unités stratigraphiques en place**, un géomodeleur a été utilisé. Le logiciel, Rockworks, utilise des sondages de reconnaissances mécaniques pour construire des corrélations lithologiques ou stratigraphiques en 3 dimensions. Dans ce travail, il a été choisi de construire des corrélations stratigraphiques afin de distinguer les différentes unités. L'extension spatiale utilisée pour la modélisation est matérialisée dans la Figure 5 et les résultats dans la Figure 11. **Le résultat, en utilisant uniquement les sondages mécaniques est présenté sur la Figure 11a.** Les cylindres verticaux correspondent aux sondages utilisés, et les bandes verticales de couleur aux corrélations stratigraphiques latérales effectuées par le géomodeleur. Globalement, la figure montre que les sondages, concentrés au droit de l'infrastructure de génie civil, ne permettent pas d'appréhender l'évolution latérale des couches, qui présentent toutes plus ou moins une épaisseur constante, au contraire de ce qui a été observé à l'aide des premières reconnaissances géophysiques (Bièvre *et al.*, 2018).

La **Figure 11b présente le modèle conduit en intégrant les données géophysiques.** Pour cela, des profils lithostratigraphiques 1D ont été construits à partir des données géophysiques calibrées. Les résultats montrent une **meilleure prise en compte des variations latérales d'épaisseurs des couches et une reconstruction générale en meilleur accord avec la connaissance du site**, notamment l'augmentation d'épaisseur des unités glacio-lacustres et deltaïques Würm II et des moraines Würm III dans la partie sud. Ces résultats confirment les observations présentées dans (Bièvre, *et al.*, 2018) et soulignent l'importance potentielle des sables et cailloutis deltaïques (Würm II) et des moraines (Würm III) dans l'alimentation en eau du glissement du lacet de Charlaix, puisque ces couches sont plus perméables que les argiles glacio-lacustres sous-jacentes.

Toutefois, le résultat n'est **pas exempt de défauts**. Ceux-ci sont numérotés sur la Figure 11b. Premièrement, il y a parfois contradiction entre les données de sondages et les couches corrélées (voir le n° 1). Il conviendra de vérifier les interprétations stratigraphiques des sondages. Ceci pourrait notamment être effectué en pouvant disposer des paramètres de forages des sondages mécaniques, si ceux-ci ont été acquis. Deuxièmement, des unités stratigraphiques sont présentes à des endroits peu probables (voir n° 2). Notamment, les moraines Würm II et argiles glacio-lacustres Würm II sont représentées au nord du modèle, ce qui est peu probable étant donné leur position stratigraphique. Il pourrait toutefois s'agir de couches glissées (voir Figure 8) qui ont été mises en place de façon tardive, voire récente, à la faveur de l'activité gravitaire. Troisièmement, et dans la continuité du point précédent, des successions verticales présentent des redoublements de série (voir point n° 3). Encore une fois, il conviendra de vérifier les interprétations stratigraphiques conduites sur les sondages. Par ailleurs, il est envisageable que de tels redoublements existent, à la faveur de l'activité des glissements de terrain. Finalement, et puisque ces unités glissées existent réellement, il conviendrait de les distinguer des

unités stratigraphiques en place en introduisant une nouvelle unité stratigraphique, plus jeune, qui permettrait de prendre en compte ces horizons glissés. Il pourrait alors être envisageable de représenter en 3D les couches glissées détectées et d'en estimer le volume. Finalement, **une fois le modèle géométrique un peu plus raffiné, il sera possible de l'utiliser pour conduire des simulations d'écoulement sous-terrain.**

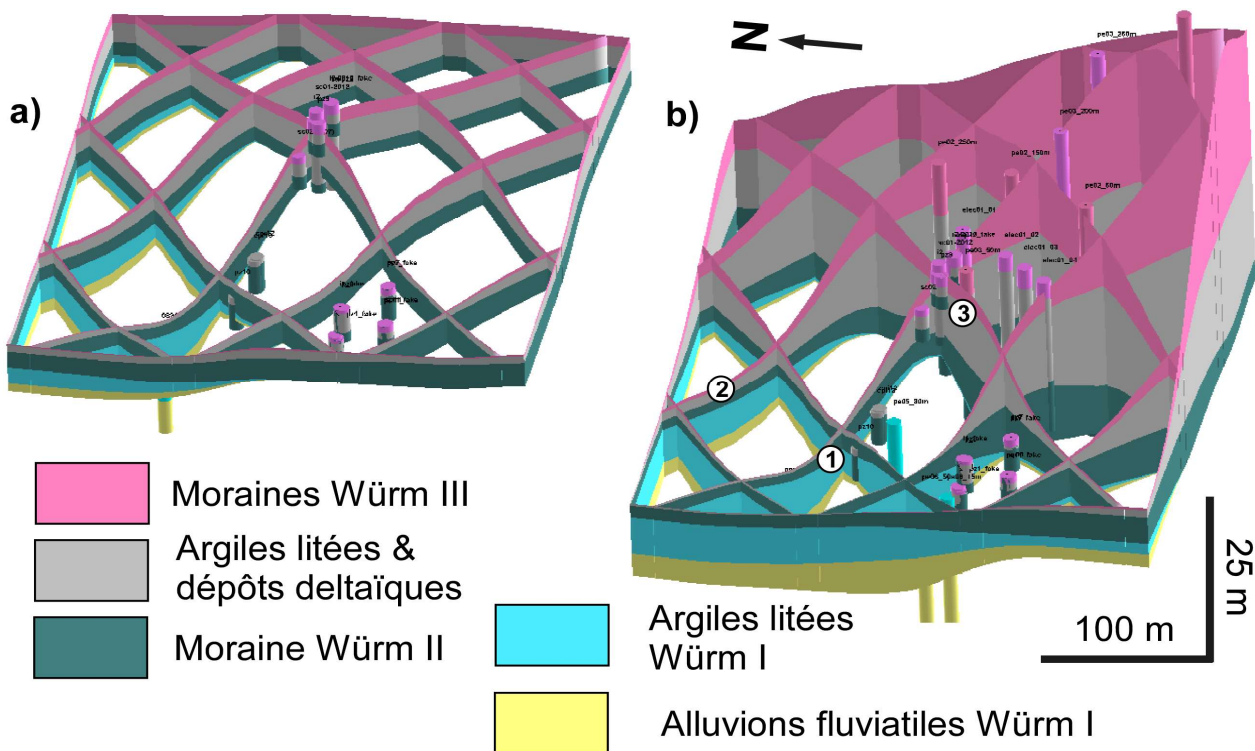


Figure 11 : Modèle géologique 3D. a) Avec les données issues des sondages mécaniques. b) En intégrant la géophysique.

2.4 Conclusions et perspectives sur le site de Charlaix

Le modèle géologique 2D établi au début de ce projet a été **étendu à un modèle 3D** à l'aide de la combinaison de données de reconnaissances mécaniques et de profils géophysiques 2D et/ou 3D, qui ont été intégrés dans un géomodelleur. Les résultats montrent une **meilleure représentation de la géométrie des couches**, notamment l'épaississement de la couche de sables et cailloutis deltaïques (Würm II) et des moraines (Würm III) vers le sud et soulignent l'importance potentielle de ces couches, plus perméable que les argiles, dans l'alimentation en eau du glissement du lacet de Charlaix.

Ce travail **montre aussi des limites dans les constructions géométriques**. Notamment, certaines interprétations des sondages mécaniques sont à reprendre. De même, il doit être possible d'améliorer la qualité du modèle géologique, en individualisant les couches glissées afin de les représenter dans le modèle. Finalement, les profils EMI ont montré l'intérêt de cette méthode pour obtenir des informations en profondeur là où il n'est pas possible de conduire des tomographies électriques.

De tels modèles pourront être encore davantage approfondis à l'avenir pour pouvoir conduire *in fine* des simulations mécaniques et hydrauliques au plus proche de la réalité de l'agencement des couches.

3 UN MODELE SIMPLIFIE : LE CAS DES TOUCHES

3.1 Données disponibles

Les données disponibles sur le site des Touches ont été établies au cours de diverses campagnes de reconnaissances ou d'études qui ont commencé dès 1963 (sondages Sondaralp, exploités dans le rapport (ADRGT, 1971)) et qui se sont poursuivies de manière irrégulière jusqu'au projet MLA3. L'ensemble des rapports d'études s'étalant sur plus de 50 ans est disponible sur demande dans les données bibliographiques du projet MLA3. Les principaux éléments sont synthétisés ici et se retrouvent en partie dans le rapport (Cerema, 2022) et les livrables L-A2 à L-A4 du projet.

3.1.1 Contexte géologique local

La **configuration géologique locale** constitue déjà en elle-même un modèle dans la mesure où elle se base notamment sur les cartes géologiques, qui sont des documents interprétatifs issus de relevés de terrain de densité variable et d'une extrapolation raisonnée entre ces relevés. Ces informations sont toutefois corroborées et complétées dans le cas présent par les observations faites *in situ* ; elles sont donc présentées comme des données d'entrée puisque leur constitution n'est pas l'objet du présent rapport.

Le site des Touches se découpe **en deux zones de glissement de 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 (voir Figure 12).

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

- les marno-calcaires du Bajocien (notés j1 a ou b, -164 à -170 Ma),
- les marno-calcaires de l'Aalénien (notées l9 a ou b, -170 à -175 Ma),
- les marno-calcaires du Lias (sur la période -190 à -195 Ma), calcaires gris (l5a) à rubannés (l5b) du Carixien et marndes du Domérien (l6a).

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 GI-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 type 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).

On notera enfin qu'à l'est de la zone d'étude les pentes autour de la Sézia sont recouvertes d'éboulis remaniés par ruissellement (EJ), avec des nombreuses marques d'écoulements (petites combes, ruisseaux temporaires...).

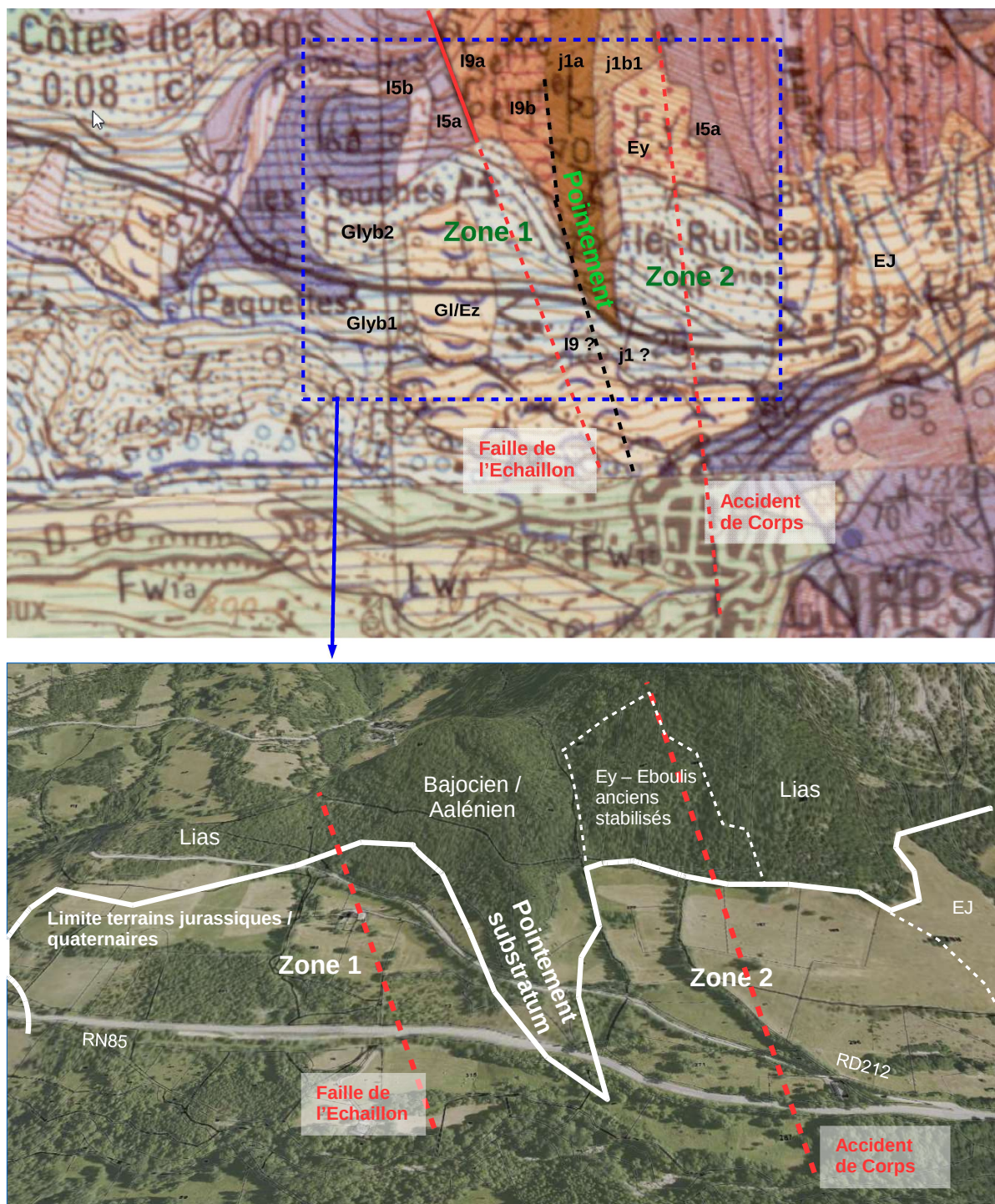


Figure 12 : (en haut) Extrait annoté des cartes géologiques de La Mure et de Saint-Bonnet dans la zone d'étude (source BRGM), et (en bas) Figuration des principaux ensembles sur vue satellite 3D (source Cerema sur fond Google Earth)

3.1.2 Contexte hydrogéologique

Bien que l'hydrogéologie régionale n'identifie pas d'aquifère majeur (d'après les notices des cartes géologiques), dans la zone d'étude, **l'hydrogéologie et l'hydrographie apparaissent tout à fait significatives au regard des mouvements de terrains recensés**. Dès les premières reconnaissances de 1971, (ADRGT, 1971) signalait sur le site des Touches d'importantes venues d'eau en forages dans les couches hétérogènes d'argiles à blocs de schistes, entre le substratum (profond) et les couches superficielles argileuses. Ces couches superficielles (épaisseur variable de 10 à 20 m) étaient également qualifiées d'hétérogènes, avec des passées silto-limoneuses, parfois à galets, plus

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

Modèles géotechniques et géomécaniques : exemples des sites de Charlaix et des Touches

Date : Mars 2023

perméables. De même, dans le rapport (Courtieu, 2014), l'étude du bassin versant de la Sézia (environ 47 km²) montre que **les alluvions quaternaires présentent le plus fort potentiel aquifère**. Par exemple, la quasi-totalité des captages d'eau potable concernent des sources au sein de cette formation.

Le ruisseau de la Sézia, au pied des zones de glissement, présente un lit mineur de quelques mètres (3 à 5 m) et un lit majeur de l'ordre de 10 à 20 m suivant les secteurs. Le cours est relativement rectiligne sur la partie est de la zone d'étude (« Zone 2 » sur la figure 3) mais montre de plus forts méandres à partir du pointement rocheux, et dans la Zone 1 au voisinage du lieu-dit « Les Moulins ». Historiquement, ces méandres ont pu conduire à des **érosions de berges significatives** et à des travaux ponctuels de renforcement. Les plus forts débits sont usuellement rencontrés en fin de printemps, avec des crues susceptibles d'occuper une grande partie du lit majeur. Une crue en 1886 avait par exemple mis en mouvement environ 500 m de berges à l'aval du pont (voir (ADRGT, 1971)), conduisant à la construction d'une digue en pierre dont il ne reste aujourd'hui que des fragments. Au final, il est probable que la Sézia change régulièrement d'emplacement au sein de son lit majeur.

La zone d'étude est également marquée par de **multiples sources et zones humides superficielles**. Celles-ci ont fait l'objet d'un relevé au voisinage de la RN85 en 1978 dans la note (ADRGT, 1978), dont la cartographie reprise en Figure 13 souligne l'importance des circulations d'eau. Les zones humides et sources actuelles ne sont plus nécessairement similaires, les cheminements souterrains ayant évolué et divers travaux de drainage et d'assainissement ayant été réalisés depuis.

Enfin, à l'aval immédiat du site des Touches (dans la zone des sondages S11-S12-S7 sur la Figure 13), à la faveur d'une dépression, apparaissent des stagnations d'eau en période pluviale et / ou hivernale. Ces stagnations que les habitants surnomment « Les lacs » (voir Figure 14) sont récurrentes et concernent une surface de l'ordre de 500 à 1000 m². Elles s'évacuent par la suite naturellement, probablement par écoulement et infiltration dans les terrains fluvioglaciers.

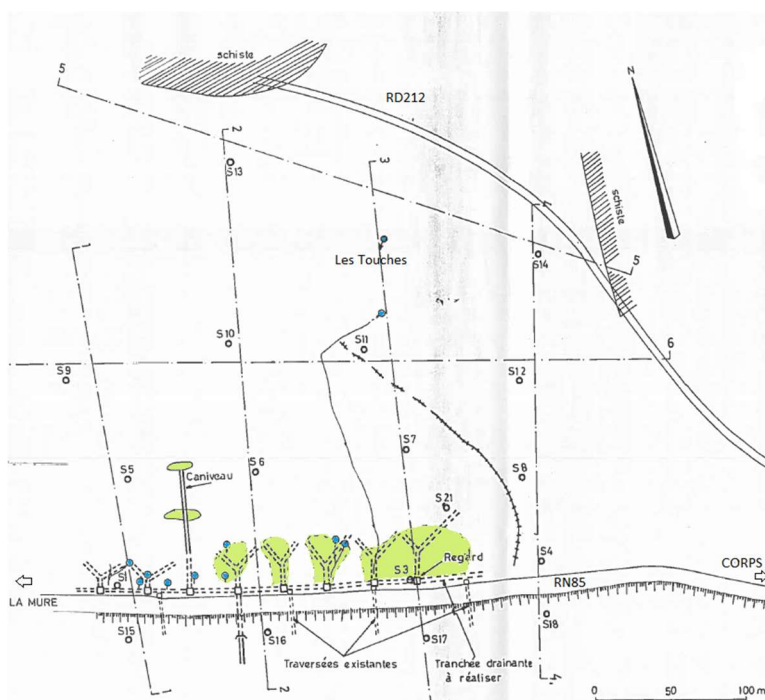


Figure 13 : Relevé des sources (points bleus) et zones humides (tâches vertes) à l'aval du hameau des Touches, en 1978. Le plan indiquait également une prévision de travaux de drainage (en pointillés) et des implantations de sondages. Adapté de (ADRGT, 1978)



Figure 14 : Les "lacs" temporaires à l'aval immédiat du site des Touches, photographiés en 2018 par les habitants (photo communiquée dans le cadre du projet MLA3)

3.1.3 Indices morphologiques

Les indices morphologiques relevés sur le terrain permettent **d'identifier les manifestations du glissement et souvent de délimiter son périmètre**, éléments particulièrement utiles à un modèle de site.

Les indices 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



Figure 15 : Photographies aériennes 2021 (source Geoportail) : (à gauche) reprises de chaussée visibles en plusieurs endroits de la zone d'étude ; (à droite) reprises successives sur la partie la plus active de la zone 1.

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

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

Modèles géotechniques et géomécaniques : exemples des sites de Charlaix et des Touches

Date : Mars 2023

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**.

Un **relevé (non exhaustif) des principaux indices morphologiques** observables sur la zone d'étude avait été effectué par le Cerema en 2017 et est reproduit sur la Figure 16.

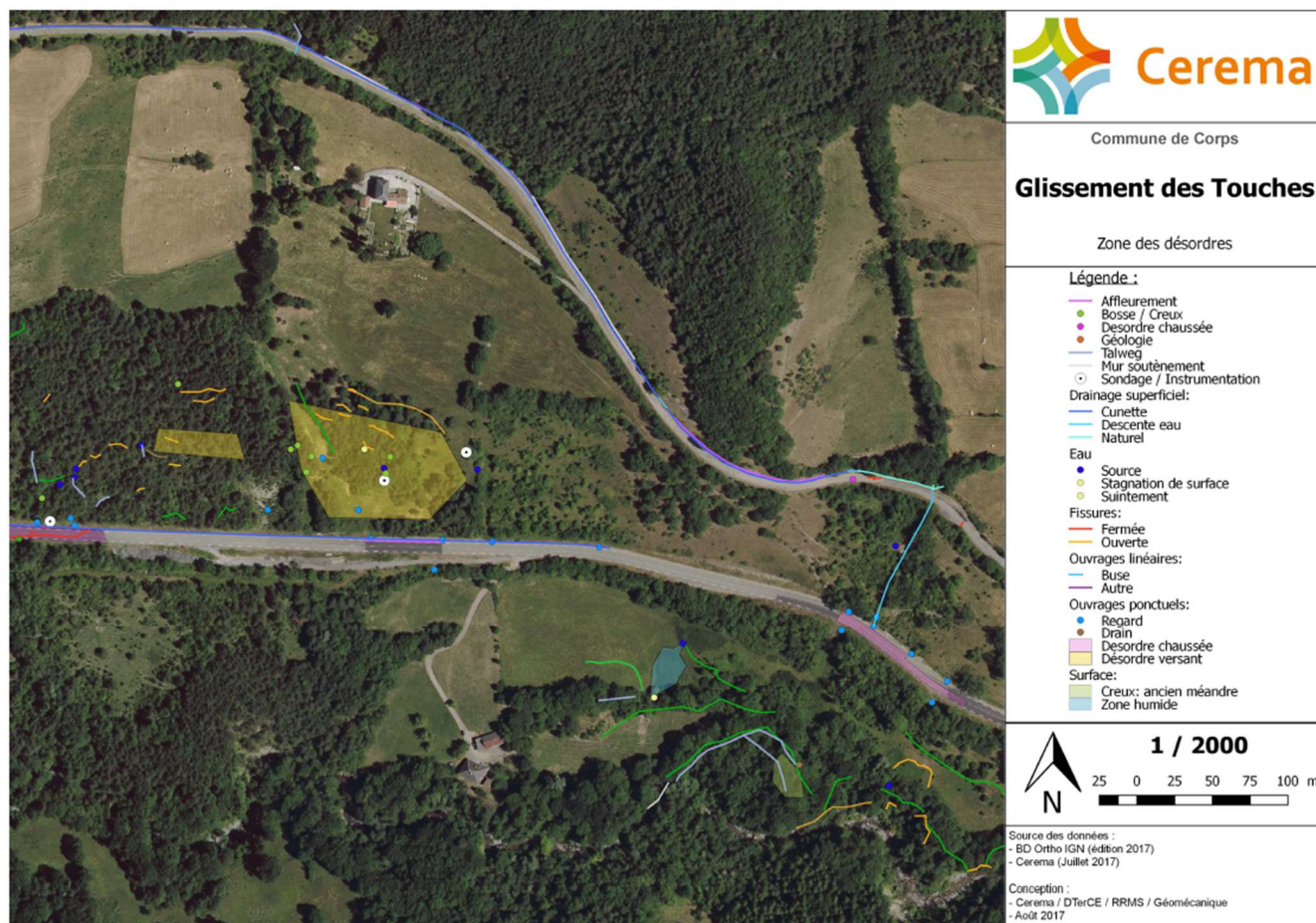


Figure 16 : Relevé géoréférencé des principaux indices morphologiques observables sur la zone 1 du site des Touches au voisinage de la RN85, reporté sur fond cartographique BD Ortho IGN (2017)

Par ailleurs, le **relevé LIDAR aéroporté** effectué dans le cadre du projet MLA3 (fin octobre 2020) permet de disposer d'une vision d'ensemble des morphologies en place. Une exploitation détaillée en a été faite dans le cadre du livrable L-A1 du projet. Il est ici réemployé pour identifier divers traits morphologiques à large échelle. Le relevé centré sur le site des Touches et assorti de tracés interprétatifs est présenté sur la Figure 17.

Entre la RN85 et la Sezia, les terrains apparaissent globalement chahutés, avec une topographie irrégulière marquée par des moutonnements, voire des ruptures de pentes pouvant évoquer des érosions par le ruisseau ou des glissements locaux antérieurs. **En amont de la RN85, les deux zones de glissement apparaissent là aussi nettement**. Il est particulièrement intéressant d'observer leur conjonction avec l'exutoire de couloirs probables d'écoulements dans le versant amont. La zone 2 notamment semble se développer dans l'alignement des écoulements intermittents de la combe du Frêne. Le relevé LiDAR permet aussi d'appréhender plus finement l'extension probable de la zone 1. À noter que l'amont immédiat du hameau des Touches semble relativement épargné, ce qui pourrait

correspondre à des terrains plus stables de l'époque du Riss et serait cohérent avec certaines observations de terrain (peu de désordres sur les bâtiments d'habitation).

Des zones de mouvements probables ont également été représentées sur la Figure 17 (avec un point d'interrogation) : ces zones n'ont pas fait l'objet de reconnaissances de terrain spécifiques dans le cadre de cette étude, mais le cliché LiDAR semble indiquer des signes de déformations.

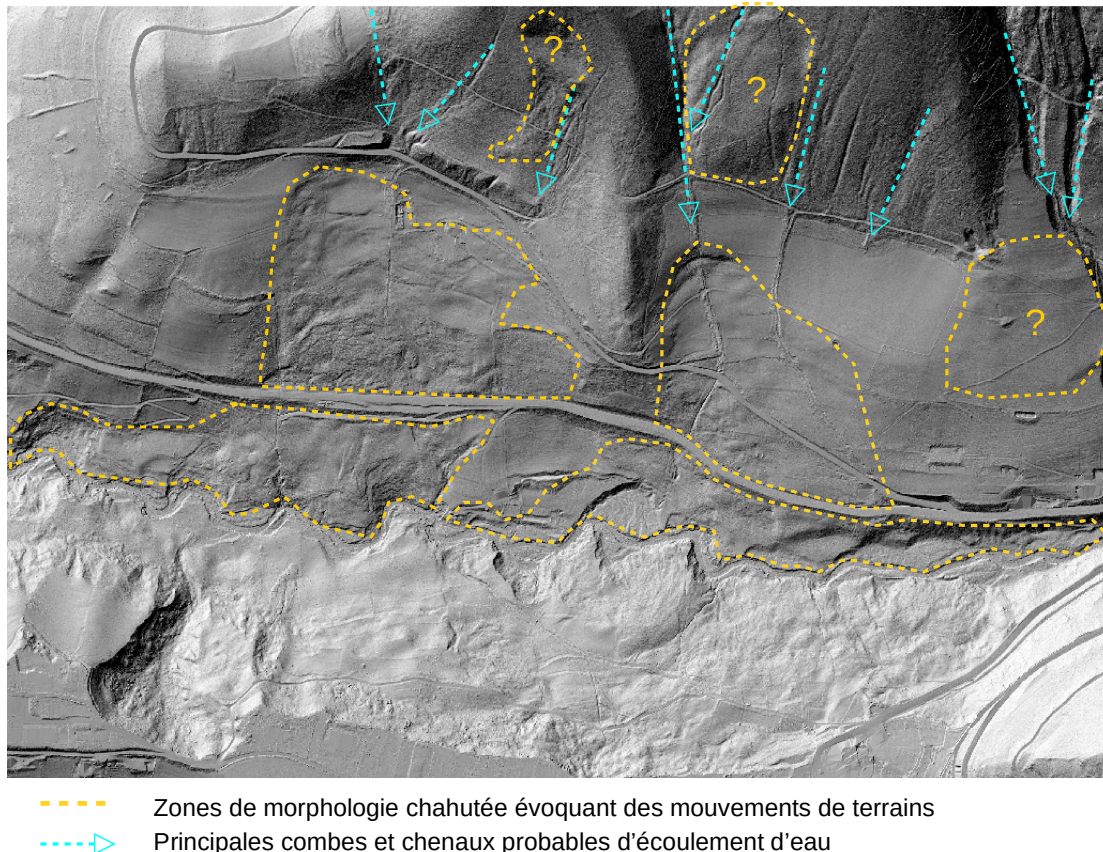


Figure 17 : Diverses observations morphologiques issues des relevés LiDAR aéroportés sur le site des Touches : zones de mouvements de terrain et d'écoulements probables

3.1.4 Structure des terrains en place

Les différentes études réalisées sur le site des Touches ont permis de rassembler **un nombre important d'informations, issues de coupes de sondages mais aussi de reconnaissances géophysiques**. On relèvera notamment :

- de multiples sondages destructifs et sismiques assortis de diverses coupes de synthèse dans l'étude (ADRGT, 1971), voir Figure 18 par exemple ;
- plusieurs études de 1994 ((SAGE, 1994), (Hydro-Géo, 1994), (Hydro-Géo, 1994)) comprenant des sondages mécaniques, des profils sismiques et électriques, etc. qui permettent des focus sur diverses zones localisées de désordres autour de la RN85 (voir Figure 19 par exemple). Elles sont dans l'ensemble en cohérence avec les analyses de l'ADRGT (1971) ;
- les sondages et instrumentations de 2018 et 2021 qui permettent de disposer d'éléments complémentaires sur les terrains en place, en particulier sur la zone 2 de glissement qui avait été peu étudiée auparavant, et d'identifier les profondeurs des surfaces de rupture (voir « Résultats d'instrumentation » plus loin).

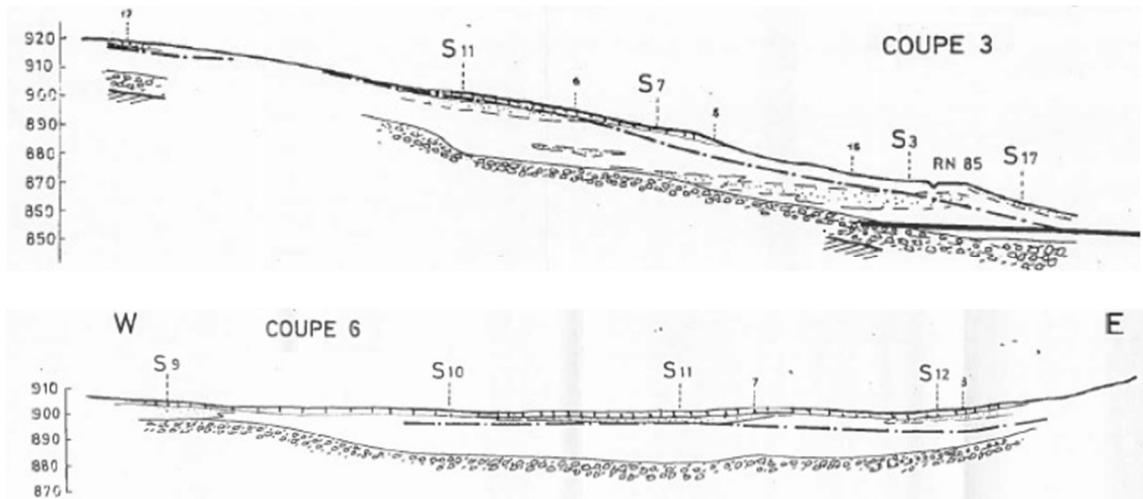


Figure 18 : Exemples de coupes de terrain proposées par l'ADRG (1971) montrant en partie haute des intercalations de silts argileux et limons peu argileux, puis des blocs de "schiste" avec argile, et enfin le substratum schisteux² (coupe 3). La coupe 6 reprend la même structure et souligne la forme de « gouttière » des formations de la zone 1 de glissement suivant l'axe Est-Ouest.

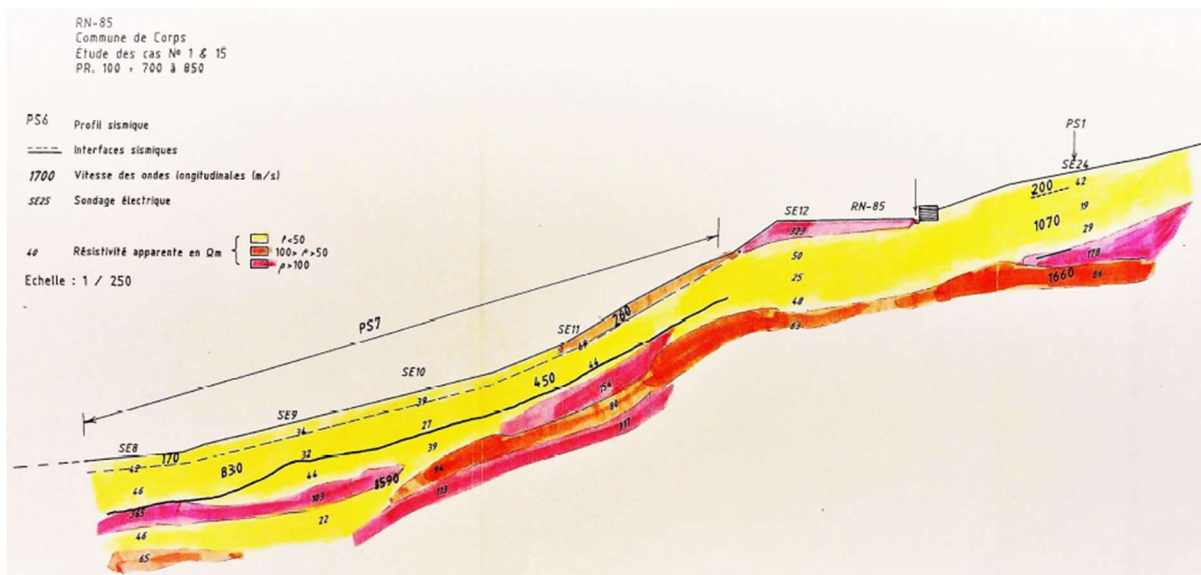


Figure 19 : Exemple de coupe de terrain de synthèse (informations sismiques, électriques et sondages) dans la zone 2 de glissement, au voisinage du PR 100+800 de la RN85, d'après le rapport Sage (1994). La coupe distingue les remblais de la RN85, des terrains de couverture (en jaune et rose essentiellement) composés de colluvions de pente, argiles silteuses et passages silto-sableux à graveuleux, puis des terrains argilo-graveleux compacts au-delà ($v > 1660$ m/s)

Ces différentes reconnaissances sont synthétisées dans (Cerema, 2022) et en partie rappelées dans le livrable L-A2. Elles ne seront pas davantage détaillées ici. *In fine*, elles montrent essentiellement que **les terrains sont caractérisés par la superposition de 4 couches** (de bas en haut) :

- le substratum marno-calcaire profond F4 (toit entre 30 et 50 m, peu rencontré dans les sondages),
- une couche blocailleuse et perméable emballée dans une matrice argilo-sableuse (F3),
- une couche d'argiles sableuses glacio-lacustres litées bleu-grises (F2),

² À noter que la dénomination de « schiste » dans cette étude peut être trompeuse puisqu'il s'agit en réalité de marno-calcaires à débit schisteux composant le substratum et non de véritables schistes d'origine métamorphique.

- un limon argileux brun-vert à gris-jaune (F1) en surface.

Les **épaisseurs des couches sont très variables** (de quelques mètres à plus de 15 m) d'un sondage à l'autre. Les illustrations de synthèse réalisées dans le cadre de l'axe D du projet MLA3 sur la base des sondages de 2018, présentées en Figure 20 et en Figure 21, permettent de disposer d'un aperçu de cette variabilité.

Enfin, des profils de sismique-réfraction réalisés sur la zone 2 en 2019 ont **également montré une forme en gouttière du substratum sur cette partie du glissement**, forme antérieurement identifiée sur la zone 1 dans l'étude de l'ADRGT (1971).

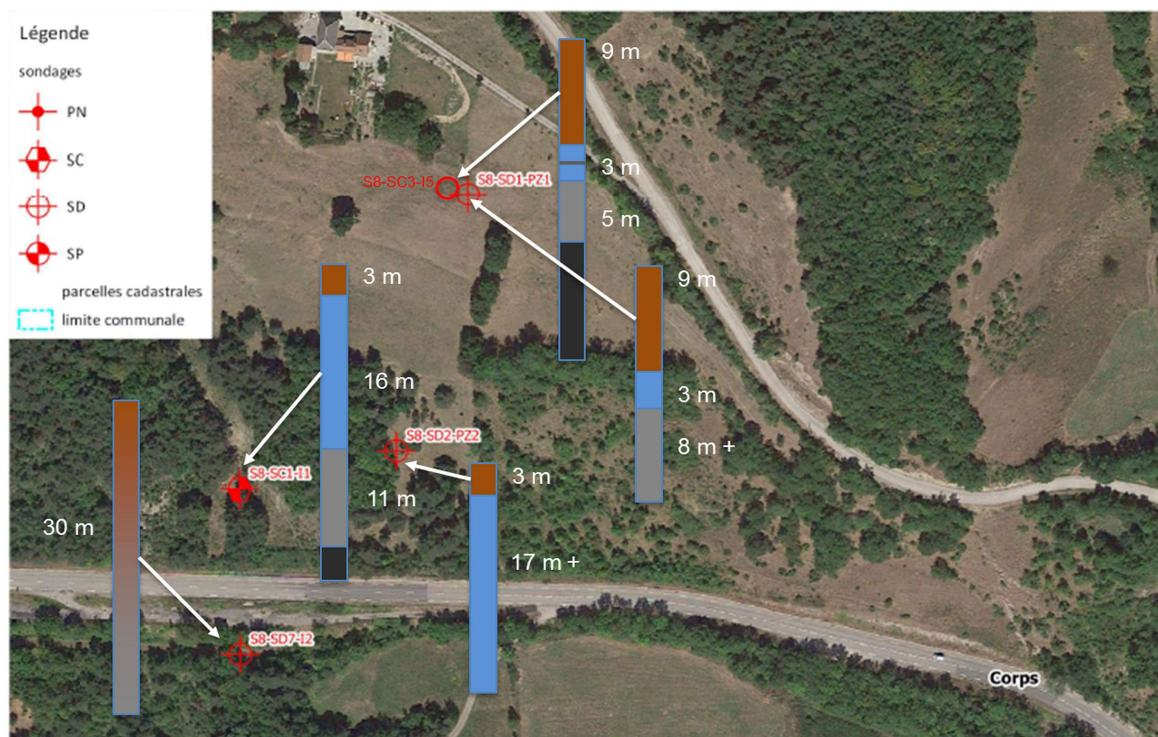


Figure 20 : Représentation synthétique des couches rencontrées dans les sondages de 2018 et 2021 sur la zone 1 de glissement du site des Touches. Échelle de profondeur arbitraire. Code couleur : marron = F1, bleu = F2, gris = F3, noir = F4.

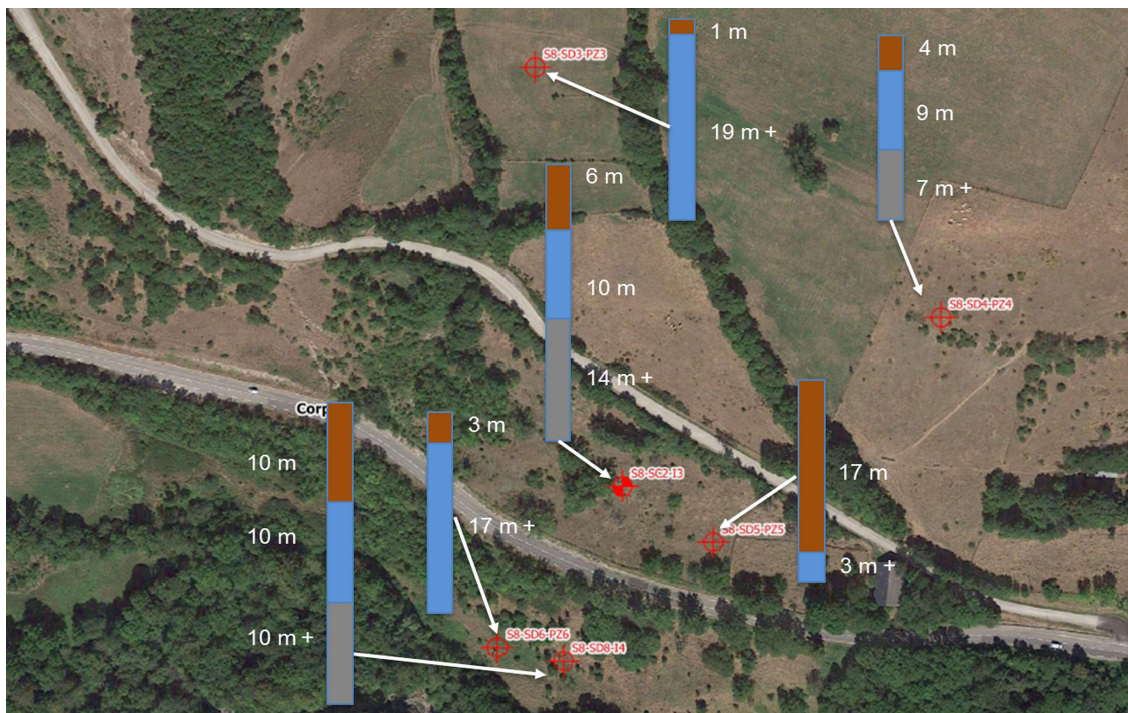


Figure 21 : Représentation synthétique des couches rencontrées dans les sondages de 2018 et 2021 sur la zone 2 de glissement du site des Touches. Échelle de profondeur arbitraire. Code couleur : marron = F1, bleu = F2, gris = F3, noir = F4.

3.1.5 Propriétés des sols

Les propriétés géotechniques des sols ont été détaillées de manière approfondie dans les livrables L-A2, L-A3 et L-A4 du projet auxquels on se reportera. Seul un résumé est rappelé ici.

➤ **Identifications géotechniques**

De manière générale, en terme d'identification géotechnique, **les couches F1 et F2 présentent des caractéristiques relativement proches**. Les formations litées glacio-lacustres typiques, correspondant à la couche F2, apparaissent assez homogènes en termes de classification. Les terrains sont essentiellement argilo-limoneux, avec des **classifications A1 / A2** dans la classification GTR ou **Ap / Lp (argiles et limons peu plastiques)** dans la classification internationale USCS.

Les **proportions d'argile (assimilées à la fraction < 2 µm, C2) sont dans l'ensemble élevées**, la plupart du temps entre 30 et 45 %, avec des **indices d'activité faibles**, suggérant que la fraction < 2 µm n'est peut-être pas constituée uniquement d'argile minéralogique mais aussi d'autres particules de très petit diamètre. Les sols apparaissent faiblement marneux, à marneux, avec des teneurs en carbonates de l'ordre de 30 %.

Ces formations présentent par ailleurs des **masses volumiques sèches peu élevées** ($\rho_d = 1.6$ à 1.7 t/m³) et se trouvent à l'état saturé en place (avec des masses volumiques humides de l'ordre de 2 t/m³).

La couche F3 apparaît plus sablo-graveleuse, mais n'est couverte que par un petit nombre d'essais de laboratoire.

➤ **Propriétés mécaniques**

Les propriétés mécaniques ont été déterminées à partir **d'essais de cisaillement** (triaxial et boîte de Casagrande), dont la synthèse présentée dans le livrable L-A3 est reproduite ci-dessous.

Sondage	Prof. (m)	Couche	γ_d (kN/m ³)	c'_{pic} (kPa)	ϕ'_{pic} (°)	c'_{ult} (kPa)	ϕ'_{ult} (°)	Observations
S8-SC1 (2018)	7.80	F2	16.1 à 16.9	6	23	-	-	Triaxial
	7.80	F2	16.2	0	18	-	-	Triaxial – Point TOU01 avec une rupture // lits
	8.20	F2	18.0	11	28	4	27	Boîte de Casagrande – Argile sableuse compacte, ferme
S8-SC2 (2018)	3.90	F1	15.7 à 15.9	16	24	-	-	Triaxial
	5.20	F1	16.8	40	23	9	23	Boîte de Casagrande – Cohésion surévaluée
	8.30	F2	16.7 à 17.4	9	23	-	-	Triaxial

Tableau 1 : Synthèse des résultats d'essais de cisaillement disponibles sur le site des Touches

Les **formations F1 et F2 montrent des caractéristiques mécaniques assez proches** (ce qui est cohérent avec les identifications géotechniques citées précédemment). Les cohésions en place se situent essentiellement entre 5 et 15 kPa, avec des matériaux peu surconsolidés. L'angle de frottement de pic se situe en général autour de 23°, proche de la moyenne des différents sites d'étude du projet. Une **variabilité importante** ressort néanmoins : sur des zones plus compactes (S8-SC1 8.20 m) par exemple, l'angle de frottement peut s'accroître significativement et, à l'opposé, des ruptures parallèles aux litages peuvent conduire à des angles de frottement nettement plus faibles (S8-SC1 7.80 m).

Ces plages de variation de l'angle de frottement s'avèrent assez conformes à celles recensées sur l'ensemble des sites du projet MLA3 et sont donc **a priori raisonnablement représentatives de la variabilité naturelle des argiles litées glacio-lacustres**. En revanche, les cohésions mesurées ici s'avèrent en moyenne plus fortes. Il peut s'agir d'une réalité géotechnique, mais aussi de biais liés aux zones de prélèvement, ou du cumul de divers défauts d'essais comme la surévaluation des cohésions par la boîte de Casagrande détaillée dans le livrable L-A4.

À la lumière des informations du Tableau 1 et de l'analyse transversale menée dans le livrable L-A4, un **choix raisonnable pour représenter le critère de rupture des couches d'argile glacio-lacustres du site des Touches** pourra donc être :

$$\phi'_{moy, pic} \approx 23^\circ \quad c'_{moy, pic} \approx 5 \text{ kPa}$$

avec des **plages de variation possibles de 18 à 28° pour ϕ' et de 0 à 10 kPa pour c'** (avec une prééminence des valeurs basses, en particulier $c' = 0$ kPa en valeurs ultimes ou résiduelles).

Il est choisi de rester sur un modèle de comportement élasto-plastique simple de Mohr-Coulomb, proche des choix de l'ingénierie conventionnelle (voir discussion en partie 4 du livrable L-A4).

3.1.6 Résultats d'instrumentation

Le programme d'instrumentation du site des Touches, composé essentiellement de tubes inclinométriques et piézométriques installés en 2018, est détaillé dans le livrable L-B1. Les figures ci-après montrent l'implantation des différents dispositifs ainsi que les résultats de mesures obtenus sur la période 2018-2022.

➤ Piézométrie (voir Figure 22)

La **zone 1** de glissement montre des niveaux d'eau hétérogènes, déjà observés antérieurement par l'ADRGT, avec **des effets saisonniers marqués et relativement bien coordonnés entre piézomètres**. En période sèche (été) les niveaux d'eau relativement similaires indiquent 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 S8-SD2-PZ2 connaît des remontées d'eau beaucoup plus importantes, avec des niveaux sub-affleurants (0,5 à 1 m sous la surface).

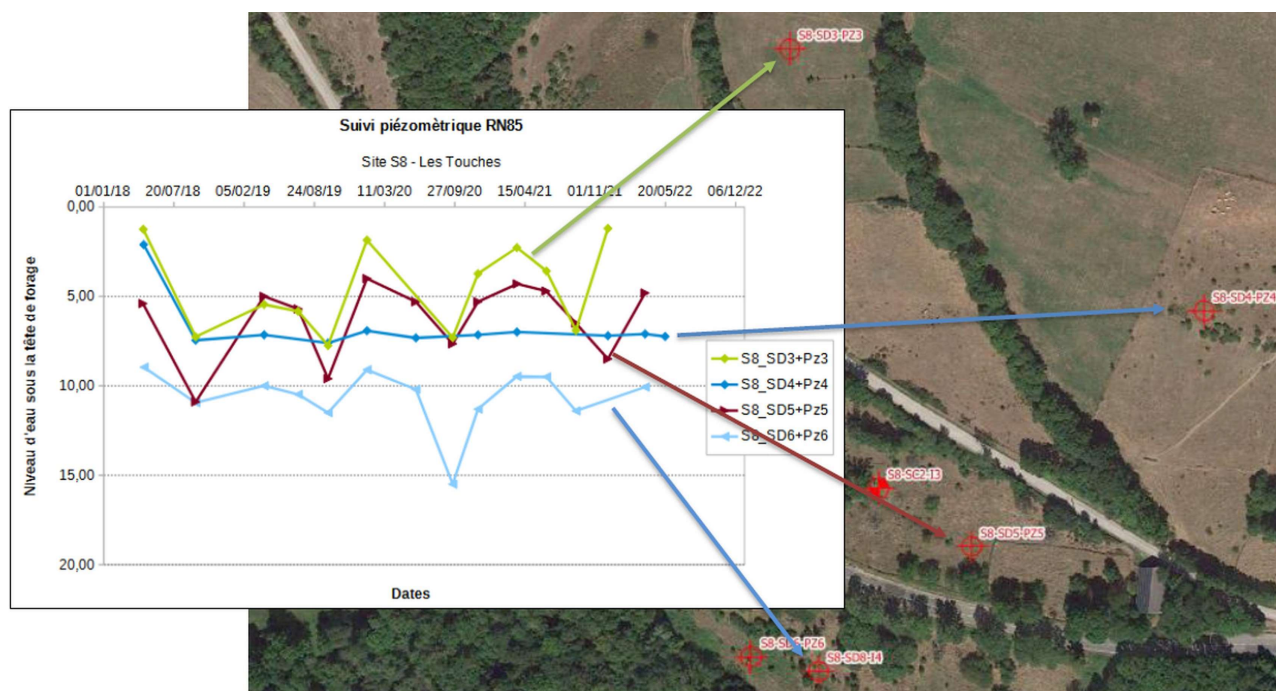
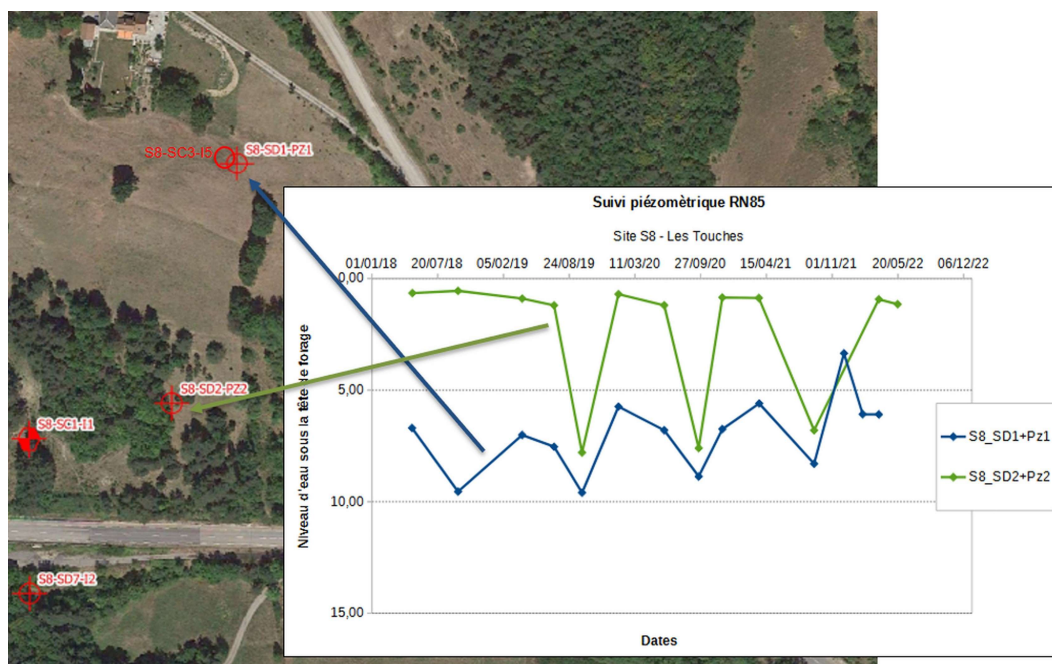


Figure 22 : Résultats des relevés piézométriques sur la zone 1 (en haut) et sur la zone 2 (en bas) du glissement des Touches (période 2018-2022)

Les niveaux piézométriques sont systématiquement situés au-dessus du toit de la 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 couches F1 et F2 (passées sableuses ou graveleuses).

On notera que le piézomètre S8-SD2-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, hors piézomètre S8-SD4-PZ4, on trouve également des **tendances saisonnières marquées** avec des niveaux d'eau élevés en période hivernale (jusqu'à -1 m sur S8-SD3-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 Sezia (S8-SD6-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 se trouvent systématiquement au sein des couches F1 et F2.

Le piézomètre S8-SD4-PZ4 présente un comportement très différent des autres. Le niveau d'eau relevé y est quasi-constant au cours du temps, vers 7,50 m de profondeur. Sauf obturation du tube, il semble indiquer que des différences significatives de régime hydraulique peuvent exister au sein du versant. À noter que cette zone présente peu ou pas de déformations.

➤ **Inclinométrie (voir Figure 23)**

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 d'une passée sableuse probablement aquifère identifiée dans le sondage.

On observe des **comportements cycliques nets, avec une quasi-absence de mouvements en période sèche (été – automne) et une accélération en période humide (hiver-printemps)**, en bonne corrélation avec les niveaux piézométriques.

Le tube S8-SC3-I5 de 2021 ne montre aucun mouvement significatif : cela semble confirmer qu'il se situe au-delà de la limite haute du glissement, en bonne adéquation avec les morphologies relevées au LIDAR et avec les moindres déformations observées dans cette zone.

Dans la zone 2, les deux tubes montrent des comportements correspondant à des phénomènes de glissement. Le tube I3 présente une surface de rupture vers -7 m, 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.

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. Il n'y a pas d'explication claire de ce phénomène à l'heure actuelle, cette profondeur (en-dessous du lit de la Sézia) ne semblant pas compatible avec la géométrie des terrains. Il pourrait s'agir d'artefacts de mesure.

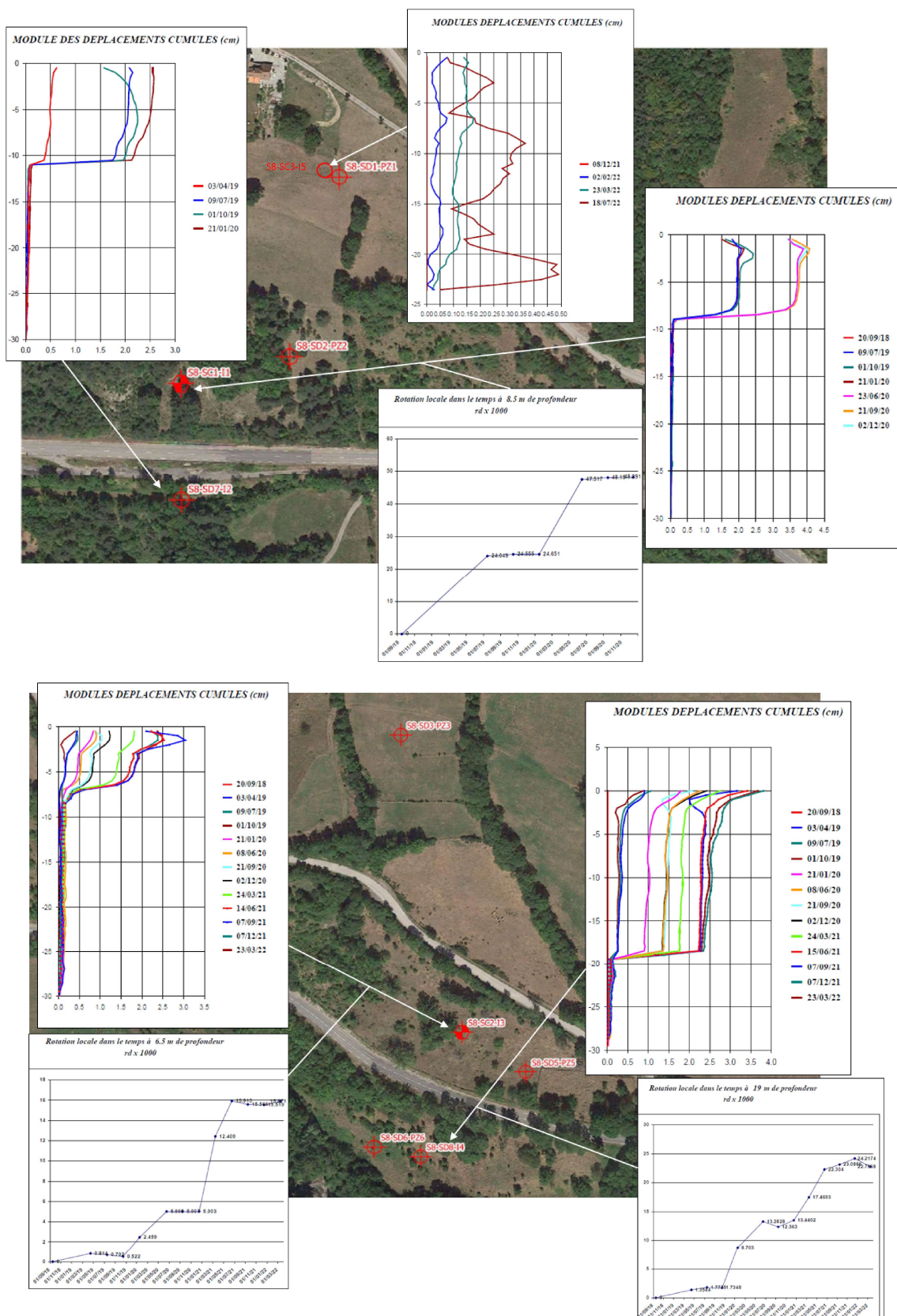


Figure 23 : Synthèse des mesures inclinométriques (module des déplacements en fonction de la profondeur et évolution des rotations au niveau des surfaces de cisaillement) sur les zones 1 (en haut) et 2 (en bas) de glissement

3.1.7 Autres éléments

Il est intéressant dans le cadre de ce modèle de site de s'intéresser également aux ouvrages anthropiques présents sur le terrain. Ceux-ci peuvent en effet être **révélateurs de certains indices morphologiques** (déformations, fissures, etc.) mais aussi, pour ce qui concerne les réseaux de drainage et d'assainissement, **influer sur l'hydrogéologie locale** (niveaux de nappe, etc.).

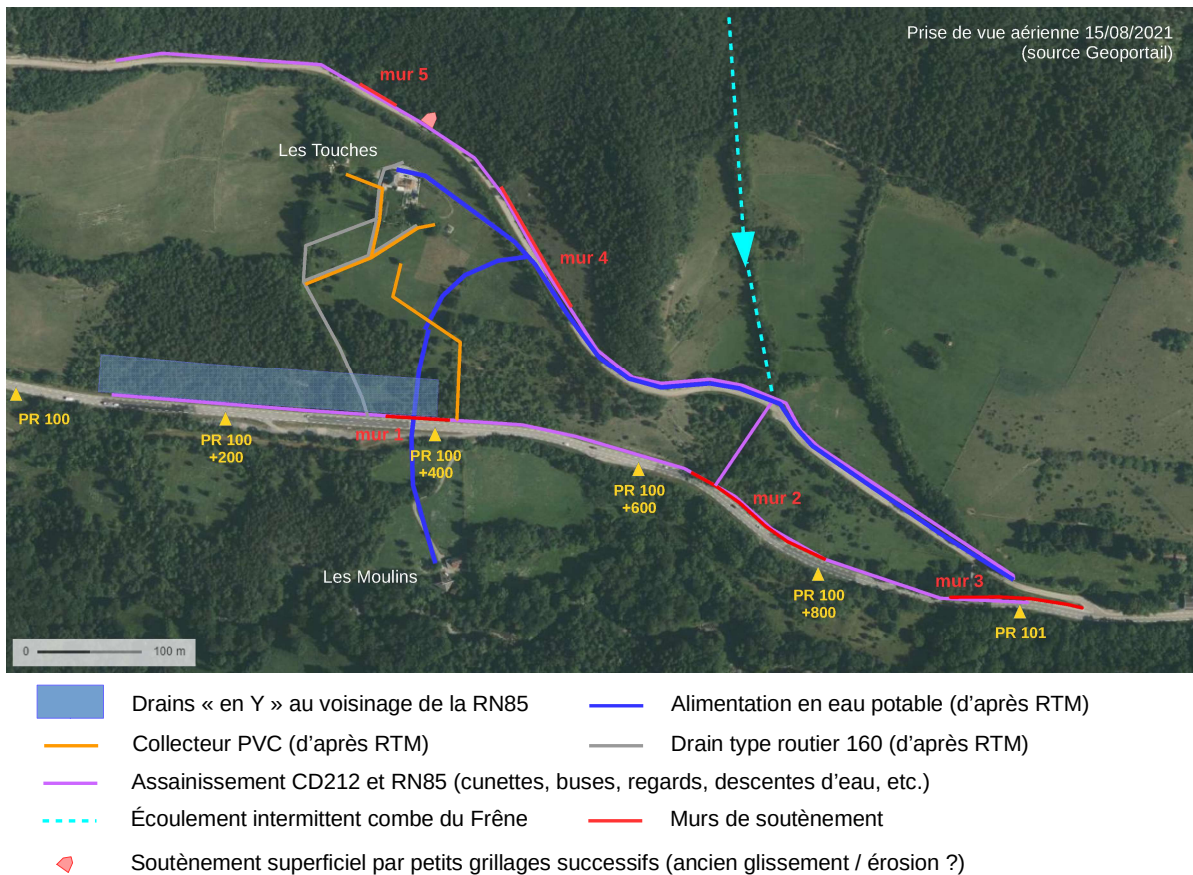


Figure 24 : Principaux ouvrages de drainage / assainissement et de soutènement recensés dans la zone des Touches au cours du projet MLA3 (les informations « RTM » proviennent de la fiche diagnostic « Commune de Corps – Lieu-dit Les Touches » de 2018)

Plusieurs points sont plus particulièrement notables :

- la présence d'un **réseau conséquent de drainage et d'assainissement** destiné aux voiries mais aussi à la stabilisation du glissement. Ce réseau avait toutefois été diagnostiqué en « mauvais état » en 1996 suite à des inspections caméra (CETE de Lyon, 1996) et n'a pas été repris depuis. Il est donc **probablement en partie inopérant** ;
- la présence d'une conduite d'eau potable à travers le glissement pour l'alimentation de la maison des Moulins. Sa rupture en 2018 avait provoqué une aggravation locale des déformations, et une accentuation du phénomène des « Lacs » cité antérieurement. La réparation avait permis de revenir à la situation initiale ;
- la présence de déformations sur divers ouvrages, notamment des affaissements marqués sur le mur n°1, témoignant de l'activité du site.



*Figure 25 : Déformation longitudinale du mur n°1
(photographie Cerema du 22/01/2016)*

3.2 Modèle de terrain simplifié

3.2.1 Synthèse des données disponibles et pertinence des modèles

L'ensemble des données rassemblées dans la partie précédente (3.1) permet d'avoir d'une part une vision relativement claire des phénomènes à l'œuvre, d'autre part d'identifier quels seraient les éléments constitutifs d'un modèle de site.

Le site d'étude se décompose donc **en deux zones affectées par des mouvements de terrains**, séparées par une zone stable correspondant à un pointement du substratum rocheux. Ces deux zones **pourraient être modélisées séparément, leurs interactions étant limitées**.

Les terrains sont caractérisés par la **superposition de 4 couches** (de bas en haut). Le substratum marno-calcaire profond F4 (toit entre 30 et 50 m, peu rencontré dans les sondages), présente une forme de gouttière E-W dans chacune des zones de glissement, qui tend à canaliser les eaux souterraines. Au-dessus, on distingue une couche blocailleuse et perméable emballée dans une matrice argilo-sableuse (F3), une couche d'argiles sableuses glacio-lacustres litées bleu-grises (F2), et enfin un limon argileux brun-vert à gris-jaune (F1) en surface. Les **épaisseurs des couches sont très variables** (de quelques mètres à plus de 15 m) d'un sondage à l'autre.

Les évidentes contraintes hydrauliques du site sont confirmées par les mesures piézométriques qui indiquent des **niveaux d'eau pouvant être très élevés** (subaffleurants) dans les zones en mouvement, avec des **variations saisonnières** (niveaux hauts en période humide, niveaux bas en période sèche) dont l'amplitude peut atteindre 7 m. Ces eaux circulent probablement principalement dans la couche F3 plus perméable, avec des configurations en charge, mais aussi à la faveur d'hétérogénéités sablo-graveleuses des couches F1 et F2. Sur la zone 2 de glissement (moins active), la nappe semble se rabattre vers la Sézia en pied de versant, alors que sur la zone 1 les niveaux piézométriques sont élevés à l'aval, pouvant témoigner d'une obturation des écoulements.

Enfin, les relevés inclinométriques indiquent des **surfaces de rupture se situant à des profondeurs de 7 à 11 m, systématiquement au sein des argiles glacio-lacustres F2**, dont les évolutions semblent directement corrélées aux niveaux piézométriques. Les mouvements disparaissent quasiment en période sèche et se réactivent fortement en période humide. L'épaisseur de terrain en mouvement montre un **comportement relativement monolithique**, sur lequel se superpose parfois une reptation superficielle.

En termes de géométrie, comme sur le site de Charlaix, il serait possible à partir de ces données d'établir un grand modèle tridimensionnel de site prenant en compte toutes les observations répertoriées ci-avant, y compris la forme de gouttière du substratum et la superposition des différentes épaisseurs de

couches, etc. La délimitation du périmètre du glissement pourrait être calée sur les relevés LiDAR. Concernant la mécanique des matériaux, le glissement de terrain pourrait être modélisé essentiellement à partir du comportement de la couche d'argile glacio-lacustre F2 dans laquelle se trouvent les surfaces de rupture. Des modèles avancés pourraient alors être utilisés pour tenter de décrire précisément l'ensemble des comportements élasto-plastiques observés, la dépendance des déformations au temps, etc.

Cependant, pour des besoins d'ingénierie conventionnelle, compte-tenu de la régularité de la topographie, de la profondeur des surfaces de rupture, du déplacement « en bloc » des terrains glissés, etc. **des approches plus sommaires en 2 dimensions peuvent être également pertinentes sur ce cas**. Mécaniquement, comme précisé dans le livrable L-A4, au regard des incertitudes et hétérogénéités en présence, un **modèle conventionnel de Mohr-Coulomb** avec des cohésions et angles de frottement tels que présentés en section 3.1.5 est, de même, susceptible d'apporter les éléments nécessaires et suffisants pour l'analyse.

3.2.2 Modèle de pente infinie pour l'analyse de l'influence des niveaux d'eau

L'ingénierie conventionnelle des glissements de terrain s'appuie très fréquemment sur des modèles à l'analyse limite, pour lesquels sont distingués, sur des surfaces de rupture prédéfinies, les efforts moteurs et les efforts résistants maximaux (correspondant au critère de rupture). Cela permet de définir **un facteur de sécurité global** qui est essentiellement un rapport de ces deux grandeurs. Le facteur de sécurité permet donc d'estimer quel est l'écart entre la configuration actuelle et la rupture théorique, et d'étudier facilement de multiples situations (géométrie, position des surfaces de rupture, position de la nappe, etc.). Ces modèles permettent aussi de caractériser de manière chiffrée l'influence de travaux de stabilisation, en mesurant l'accroissement du coefficient de sécurité ainsi obtenu.

Ces modèles sont généralement employés en deux dimensions, avec l'usage de logiciels spécialisés tels que Talren ® ou Geostab ® (ou autres) qui utilisent des variantes diverses de la méthode de calcul « des tranches » ou « des perturbations ». Dans le cas présent, compte-tenu de la grande dimension du glissement, de la régularité du terrain et de la surface de rupture, **un modèle encore plus simple, de pente infinie**, peut aussi être employé pour des besoins d'ingénierie de niveau diagnostic ou avant-projet.

Ce modèle peut être décrit de la manière suivante :

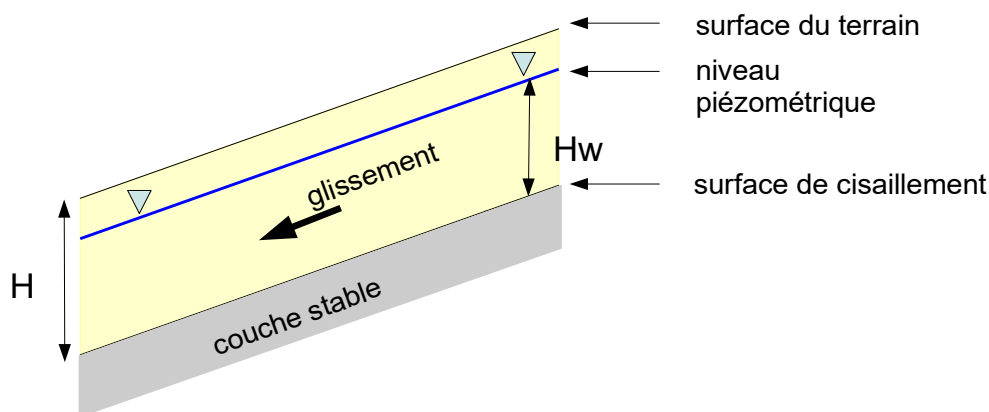


Figure 26 : Configuration de pente infinie pour le calcul de coefficients de sécurité au glissement (écoulement de l'eau parallèle au glissement)

- la pente est considérée infinie dans le sens du déplacement : c'est une approximation significative au voisinage des limites du glissement mais raisonnable dans les parties centrales. Elle suppose également l'absence de blocage du glissement à l'aval, ce qui est cohérent avec l'action érosive de la Sézia ;

- la surface de cisaillement est de pente constante, de profondeur constante, et parallèle à la surface du terrain. Cette approximation paraît raisonnable ici, en dehors des extrémités du glissement ;
- le niveau d'eau est considéré constant par rapport à la surface de cisaillement et l'écoulement est parallèle à la pente : à nouveau il s'agit d'une approximation puisque, comme cela a été observé sur le terrain, des rabattements de niveau vers la Sézia ou des obturations du drainage peuvent exister. On pourra en revanche facilement faire varier H_w sur le modèle pour étudier l'influence du niveau d'eau sur la stabilité ;
- les caractéristiques mécaniques du matériau sont constantes le long de la surface de rupture : cela est cohérent avec la localisation systématique de cette surface dans la couche F2 mais peut ignorer des variations locales des propriétés mécaniques.

L'avantage principal de ce modèle est qu'il **admet une solution analytique**, ce qui permet facilement de faire varier les différents paramètres. Le facteur de sécurité global au glissement s'exprime par :

$$F = \frac{(\gamma H - \gamma_w H_w) \cos^2(\alpha) \tan(\varphi') + c'}{\gamma H \cos(\alpha) \sin(\alpha)}$$

avec :

γ	pois volumique des terrains en mouvement (kN/m^3)
γ_w	pois volumique de l'eau (10 kN/m^3)
H	épaisseur de sol en mouvement (m)
H_w	hauteur d'eau au-dessus de la surface de ruptures (m)
c, φ	cohésion et angle de frottement au niveau de la surface de rupture (kPa, degrés)
α	pente moyenne du terrain (degrés).

Les **paramètres moyens** suivants peuvent être définis pour un premier calcul de facteur de sécurité sur la zone 1 de glissement :

- $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ compte-tenu des mesures de masse volumique humides en laboratoire (matériau saturé) ;
- $H \approx 10 \text{ m}$ au regard des mesures inclinométriques ;
- $H_w \approx 7 \text{ m}$ mais très variable (voir mesures piézométriques) ;
- $\alpha \approx 13,5^\circ$ sur la base de profils topographiques du site ;
- $c'_{\text{moy,pic}} \approx 5 \text{ kPa}$ et $\varphi'_{\text{moy,pic}} \approx 23^\circ$ sur matériau intact d'après les essais de laboratoire.

Ce qui permet **d'obtenir dans le cas moyen un facteur de sécurité global** :

$$F \approx 1.26$$

En termes d'interprétation, un coefficient de sécurité $F < 1$ indique une stabilité impossible (efforts moteurs supérieurs aux efforts résistants mobilisables). Par ailleurs, $F = 1.3$ est un minimum communément admis pour que les terrains restent dans de petites déformations, sachant qu'aucun coefficient de sécurité partiel sur les propriétés du terrain n'a été appliqué au modèle.

Ce premier calcul met en évidence la **bonne cohérence du modèle et de son paramétrage « moyen » avec les observations de terrain**. Il indique une situation en limite de stabilité conventionnelle, avec de possibles évolutions dès lors que des conditions plus défavorables seront rencontrées.

Plus spécifiquement, à situation constante sur l'ensemble des autres paramètres, les relevés de terrain ont montré que les niveaux d'eau variaient de façon saisonnière de manière très importante, avec des niveaux bas jusqu'à 10 m sous le T.N. ($H-H_w = 10 \text{ m}$) et des niveaux hauts pouvant atteindre 0.5 m sous le T.N. ($H-H_w = 0.5 \text{ m}$). **L'influence de la variation de nappe dans ce modèle du site** a été examinée et est présentée sur la Figure 27.

Le graphique montre que le **facteur de sécurité chute rapidement avec la remontée de nappe**, jusqu'à atteindre $F \approx 1$ (instabilité quasi-assurée) pour les niveaux les plus hauts recensés en période hivernale. Cela est parfaitement cohérent avec les observations de terrain et confirme le pilotage du glissement par les niveaux piézométriques.

De plus, dans les situations estivales de nappe basse ($H-H_w \approx 7$ à 10 m) on obtient $F > 1.5$ ce qui est usuellement considéré comme une situation stable et se trouve cohérent avec l'absence de mouvement relevée sur les inclinomètres dans cette période.

Cela indique aussi que des travaux de drainage ou de maîtrise des eaux permettant de conserver des toits de nappe au plus bas pourraient permettre de stabiliser en tout ou partie le glissement.

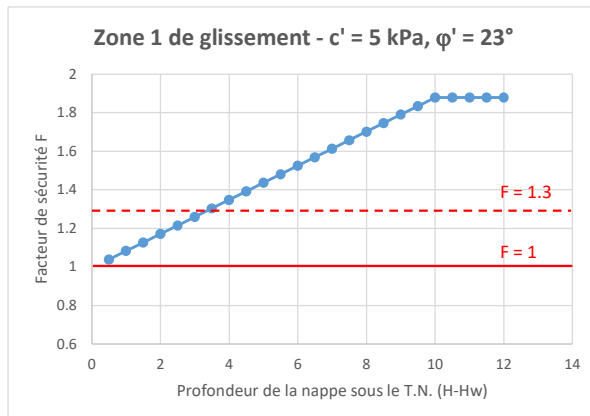


Figure 27 : Variation du facteur de sécurité global F , dans le cas moyen, en fonction du niveau de nappe sous le terrain naturel ($H-H_w$)

3.2.3 Etude de sensibilité sommaire (zone 1 de glissement)

La section précédente a montré comment le modèle simple de la pente infinie pouvait être utilisé pour tirer rapidement des informations importantes sur le rôle de l'eau pour la stabilité du site des Touches. **Le modèle peut également être employé pour réaliser des études de sensibilité sur différents paramètres** présentant des incertitudes ou des hétérogénéités. En particulier, on examine ci-après l'évolution du graphique de la Figure 27 en fonction de la cohésion du matériau, de son angle de frottement, et de l'épaisseur H de matériaux en glissement.

➤ Etude de sensibilité sur l'angle de frottement ϕ'

La Figure 28 montre l'évolution du facteur de sécurité F en fonction de la variation du niveau de la nappe, **pour différentes valeurs de l'angle de frottement ϕ'** (entre 18° et 28° comme établi antérieurement), tous les autres paramètres restant égaux à ceux du cas moyen.

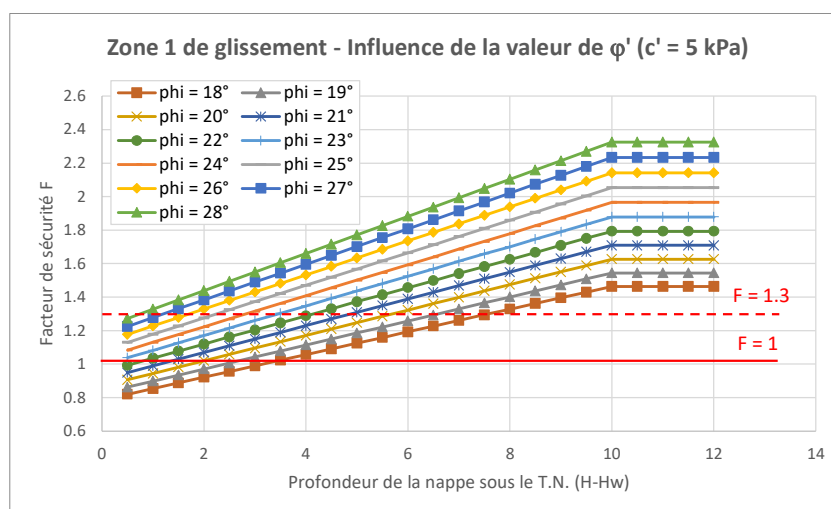


Figure 28 : Variation du facteur de sécurité F en fonction de la profondeur de la nappe pour différentes valeurs de l'angle de frottement ϕ'

On relève que pour des angles de frottement inférieurs à 23° , des situations d'instabilité certaine ($F < 1$) sont systématiquement rencontrées sur les situations de nappe haute les plus défavorables observés *in situ*. Pour $\varphi' = 18^\circ$, qui pourrait correspondre à des caractéristiques résiduelles le long d'une surface de rupture ayant déjà subi des déplacements significatifs, cette situation d'instabilité se poursuit tant que le toit de la nappe est à moins de 4 m du T.N.

Il est intéressant de remarquer aussi que même dans le cas le plus favorable $\varphi' = 28^\circ$ (qui n'a toutefois été rencontré que sur des passages indurés et plus silteux, peu propices à la localisation d'une surface de rupture), le facteur de sécurité F reste inférieur à 1.3 pour la situation de nappe la plus haute.

➤ Etude de sensibilité sur la cohésion c'

La Figure 29 montre l'évolution du facteur de sécurité F en fonction de la variation du niveau de la nappe, **pour différentes valeurs de la cohésion c'** (entre 0 et 10 kPa comme établi antérieurement), tous les autres paramètres restant égaux à ceux du cas moyen.

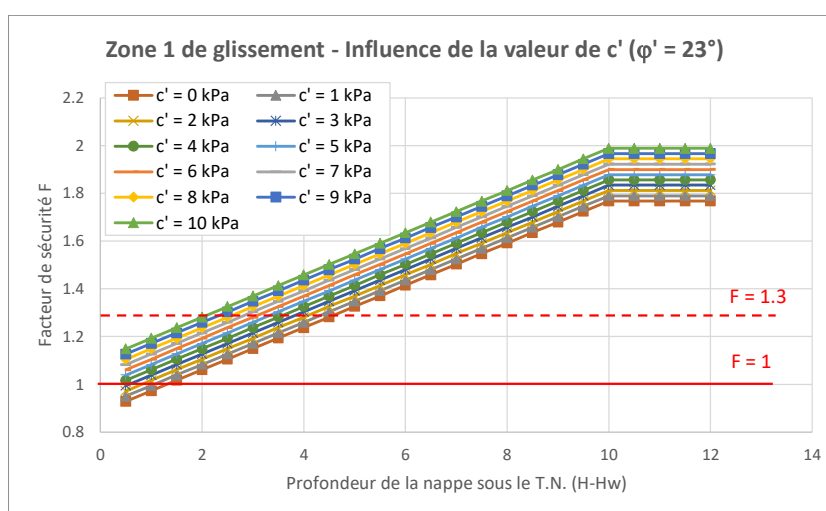


Figure 29 : Variation du facteur de sécurité F en fonction de la profondeur de la nappe pour différentes valeurs de la cohésion c'

Les variations de cohésion dans la gamme analysée entraînent globalement des modifications moins fortes du facteur de sécurité F que les variations d'angle de frottement. On relève toutefois à nouveau que tous les cas étudiés conduisent à des valeurs $F < 1.3$ pour les niveaux de nappe les plus hauts rencontrés en période hivernale. **L'instabilité devient certaine ($F < 1$) pour les valeurs de c' inférieures à 4 kPa en situation de nappe subaffleurante.**

➤ Cas défavorable : $c' = 0$ kPa et $\varphi' = 18^\circ$

En complément de l'analyse précédente, une représentation de la relation entre F et le niveau de la nappe a également été établie pour **le cas mécanique le plus défavorable, soit $c' = 0$ kPa et $\varphi' = 18^\circ$** . Bien que conservatrice, cette représentation a néanmoins du sens car les cohésions nulles ont été rencontrées fréquemment dans les essais, avec des situations de matériau à faible niveau de consolidation. L'angle de frottement très faible a également été rencontré dans les essais, sur des ruptures conformes aux litages ; il pourrait aussi correspondre à une résistance résiduelle sur de grands déplacements du glissement de terrain.

La Figure 30 montre que dans cette situation, qui peut être présente localement au niveau de la surface de glissement qui remanie le matériau, **l'instabilité est inévitable pour des niveaux d'eau compris entre 0 et -5 m/TN** ce qui est le cas quasiment en permanence dans le bas du glissement de la zone 1. En partie haute, où les niveaux piézométriques mesurés sont plus profonds, des déformations significatives seraient encore observés ($F < 1.3$), en particulier en période humide. Cette analyse est probablement excessivement défavorable par rapport au comportement d'ensemble du glissement mais

démontre bien que des déformations fortes (associées des facteurs de sécurité très bas) peuvent survenir localement à la faveur de matériaux de faible résistance.

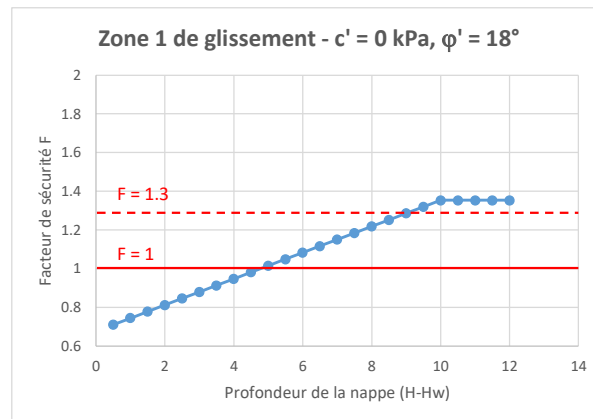


Figure 30 : Variation du facteur de sécurité F en fonction de la profondeur de la nappe dans le cas de résistance mécanique la plus défavorable (résistance résiduelle ?)

➤ Etude de sensibilité sur l'épaisseur H de matériaux en mouvement

La Figure 31 montre l'évolution du facteur de sécurité F en fonction de la variation du niveau de la nappe, **pour différentes valeurs de l'épaisseur H de matériaux en mouvement** (entre 7 et 11 m comme établi antérieurement), tous les autres paramètres restant égaux à ceux du cas moyen.

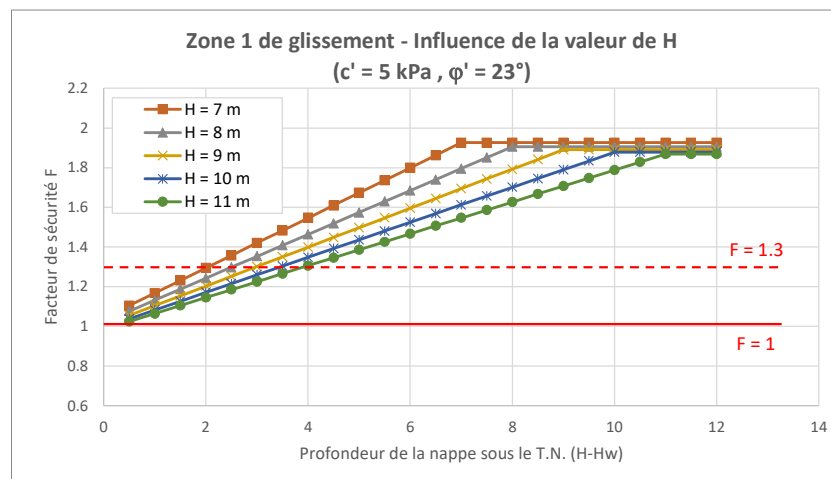


Figure 31 : Variation du facteur de sécurité F en fonction de la profondeur de la nappe pour différentes valeurs d'épaisseur de matériaux en glissement

La figure montre une influence moindre de l'épaisseur de matériaux en glissement sur les conditions de stabilité par rapport aux autres paramètres étudiés. On observe cependant que **le facteur de sécurité tend à diminuer lorsque l'épaisseur concernée augmente**. Des valeurs $F < 1.3$ sont obtenues pour des niveaux de nappe compris entre le T.N. et 2 à 4 m de profondeur. Ce graphique laisse par ailleurs supposer que plusieurs situations d'instabilité potentielle superposées pourraient se manifester si les conditions de résistance mécanique des terrains et de hauteurs d'eau s'y prêtent, ce qui autoriserait plusieurs niveaux de glissement (non observés sur les relevés inclinométriques toutefois).

3.3 Conclusion sur le site des Touches

L'historique d'études du site des Touches et les investigations réalisées au cours de la période du projet MLA3 ont permis de **rassembler un nombre conséquent de données** afin de dresser une vision d'ensemble de la géométrie du glissement et de l'agencement des couches. Contrairement au site de

Charlaix toutefois, pour lequel un modèle géométrique 3D avancé a pu être établi, une approche de modélisation simplifiée du site plus proche de l'« ingénierie conventionnelle » de niveau diagnostic ou avant-projet a été proposée.

S'appuyant sur les données de terrain, cette approche est traduite dans **un modèle très simple de stabilité de pente infinie associé à un critère de rupture de Mohr-Coulomb**. Ce modèle présente des limitations au regard de la réalité du phénomène observé *in situ*, mais une représentativité suffisante pour pouvoir effectuer certaines analyses pertinentes. Il permet notamment d'éclairer le rôle moteur de l'eau et l'excellente concordance entre les niveaux de nappe hauts relevés en période hivernale et la chute des coefficients de sécurité, associée à l'occurrence de mouvements. Le modèle, du fait de sa résolution par un calcul analytique (formule explicite du facteur de sécurité F), permet en outre **d'étudier très facilement la sensibilité du site à divers paramètres** tels que l'épaisseur de matériaux glissés ou les valeurs de cohésion et d'angle de frottement.

Cela permet de disposer d'informations éclairantes sur les mécanismes à l'œuvre et sur les solutions pouvant être apportées dans la gestion du phénomène de mouvement de terrain (à un stade d'avant-projet typiquement). Ici, des solutions de rabattement de nappe paraîtraient particulièrement pertinentes, ce qui interroge également sur le manque d'entretien des systèmes de drainage en place.

4 SYNTHÈSE - CONCLUSION

Le présent livrable a conduit à examiner **deux approches différentes de modélisation** sur les cas des sites de Charlaix et des Touches.

Le **site de Charlaix**, qui dispose d'un nombre important de données de reconnaissances de terrain (mécaniques, géophysiques, etc.) et de suivis instrumentés, a permis dès le début du projet MLA3, à travers un travail de synthèse présenté dans (Bièvre, et al., 2018), d'établir une analyse approfondie des terrains en place. Un modèle de transit de l'eau à partir d'un réservoir semi-perméable supérieur et d'infiltrations superficielles, éclairant la dynamique du glissement (en lien avec les instrumentations) a ainsi été proposé. Dans le présent rapport cette analyse a été élargie pour **constituer un modèle tridimensionnel** croisant les informations des sondages mécaniques et de données géophysiques complémentaires. Les résultats montrent une meilleure représentation de la géométrie des couches, notamment l'épaississement de la couche de sables et cailloutis deltaïques (Würm II) et des moraines (Würm III) vers le sud et soulignent l'importance potentielle de ces couches, plus perméables que les argiles, dans l'alimentation en eau du glissement du lacet de Charlaix. **Quelques défauts de modélisation** ont également été soulignés. De tels modèles pourraient être utilisables *in fine* pour permettre des simulations mécaniques et hydrauliques au plus proche de la réalité de l'agencement des couches.

Sur le **site des Touches**, l'ensemble des données rassemblées historiquement et au cours du projet MLA3 a conduit à une vision relativement bien étayée de la géométrie du glissement ainsi que de la structure et de l'épaisseur (variable) des couches en place. Contrairement au site de Charlaix, ces données ont été utilisées pour alimenter un **modèle très simplifié de pente infinie**, certes moins précis mais permettant de **dégager des informations pertinentes pour de l'ingénierie de niveau diagnostic ou avant-projet**. Notamment, l'influence des niveaux d'eau ou de divers paramètres comme l'épaisseur de matériaux en mouvement ou la variabilité des résistances des terrains en place ont pu ainsi être étudiés facilement.

Il ressort de ce livrable que les glissements lents se prêtent à une **importante diversité de choix de modèles géotechniques et géomécaniques**, avec des niveaux de complexité et de précision variables. La pertinence de telle ou telle approche est, *in fine*, à apprécier **en fonction des objectifs recherchés et des sources d'incertitude résiduelles** pesant sur le modèle.

5 REFERENCES

5.1 Bibliographie

- ADRGT, 1971. CD212 et RN85 près de Corps - Etude du glissement. *Rapport établi par C.Azimi, B.Boucek, P.Desvarreux*, p. 38.
- ADRGT, 1978. RN85 - Les Touches. *Note à l'attention de M.Drouot - Direction de l'équipement*.
- Antoine, P., Giraud, A. & Monjuvent, G., 1981. Les argiles litées du Trièves (Isère); Conditions de gisement et exemples de propriétés géotechniques. *Bulletin de la Société Géologique de France*, S7-XXXIII(2), pp. 117-127.
- Bièvre, G. & Crouzet, C., 2021. Multi-proxy analysis of boreholes in remolded Quaternary paraglacial deposits (Avignonet landslide, French Western Alps). *Engineering Geology*, Issue 286.
- Bièvre, G., Jongmans, D., Goutaland, D. & et al., 2016. Geophysical characterization of the lithological control on the kinematic pattern in a large clayey landslide (Avignonet, French Alps). *Landslides*, Issue 13, pp. 423-426.
- Bièvre, G., Jongmans, D., T., L. & et al., 2021. Electrical resistivity monitoring of an earthslide with electrodes located outside the unstable zone (Pont-Bourquin landslide, Swiss Alps). *Near Surface Geophysics*, Issue 19, pp. 225-239.
- Bièvre, G., Joseph, A. & Bertrand, C., 2018. Preferential water infiltration path in a slow-moving clayey earthslide evidenced by cross-correlation of hydrometeorological time series (Charlaix Landslide, French Western Alps). *Geofluids*, Volume 2018, p. 21 p..
- Cerema, 2022. Glissement de terrain des Touches (Corps, 38) - Etude de diagnostic G5 au voisinage de la RN85. p. 153 p..
- CETE de Lyon, 1996. R.N. 85 – Lieu-dit : Les Touches – Commune de Corps – Travaux de drainage et d'assainissement. *Rapport pour la DDE de l'Isère*.
- Courtieu, T., 2014. Centrale de la Sézia : Renouvellement du droit d'eau – Etude d'impact. *Rapport pour SAS Isis ingénierie dans le cadre du dossier de renouvellement d'autorisation pour la centrale hydroélectrique sur le ruisseau de la Sézia (février 2020)*.
- Hydro-Géo, 1994. Affaissement sur la RN85 – PR 100+400 – Rapport d'étude géotechnique. *Rapport pour la DDE de l'Isère*.
- Hydro-Géo, 1994. Affaissement sur la RN85 – PR 100+600 – Rapport d'étude géotechnique. *Rapport pour la DDE de l'Isère*.
- Laudanski, G. et al., 2013. *Experimental study of drilling parameters using a test embankment*. London, England, Taylor & Francis.
- McLachlan, P., Blanchy, G. & Binley, A., 2021. EMagPy: Open-source standalone software for processing, forward modeling and inversion of electromagnetic induction data.. *Computers & Geosciences*, Issue 146.
- Monjuvent, G., 1978. *Le Drac – Morphologie, stratigraphie et chronologie quaternaires d'un bassin alpin - Thèse de doctorat*. Grenoble: Univ. J.Fourier.
- Monjuvent, G., 1973. La transfluence Durance-Isère. Essai de synthèse du Quaternaire du bassin du Drac (Alpes françaises). *Géologie Alpine*, Issue 49, pp. 57-118.
- Reiffsteck, P., Günther, T., Bourdeau, C. & et al., 2018. Enhancing Geotechnical Investigations Using Drilling Parameters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Issue 144.
- Rücker, C., Günther, T. & Wagner, F., 2017. pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics. *Computers & Geosciences*, Issue 109, pp. 106-123.
- SAGE, 1994. R.N.85 Commune de Corps – Etude des cas n°1 et 15 – PR 100 + 700 à 850.

Somerton, W., 1959. A laboratory study of rock breakage by rotary drilling. *Petroleum Transaction, AIME*, Issue 216, pp. 92-97.

5.2 Table des figures

Figure 1 : Localisation des sites d'étude du projet MLA3 sur fond de plan IGN (à gauche) et après recalage sur la carte schématique des glaciers würmiens (à droite, source (Monjuvent, 1978))	8
Figure 2 : Coupes géologiques synthétiques de la région d'étude.	10
Figure 3 : Localisation du site de Charlaix. Le trait rouge matérialise la coupe géologique et géotechnique présentée dans la figure 4.	11
Figure 4 : Coupe géologique et géotechnique du site de Charlaix (Bièvre et al., 2018) . La localisation de la coupe est présentée dans la figure 3. Les deux points noir/orange dans le sondage S1 correspondent à des échantillons prélevés pour datation 14C, et dont les résultats sont présentés dans la figure 5.	12
Figure 5 : Implantation des reconnaissances géophysiques et géotechniques. Le carré noir correspond à l'emprise utilisée pour la modélisation géologique.	13
Figure 6 : Comparaison de la résistance de pointe et de la lithologie à Harmalière.	14
Figure 7 : Indice de Somerton des sondages SD-I1, S6-SD4-I5 et S6-SD3-cpi02 et interprétation géotechnique. Les sondages sont localisés sur le figure 5. La ligne pleine rouge marque la surface de rupture détectée par inclinomètre.	16
Figure 8 : Interprétation de la tomographie électrique du profil pe06 et de l'indice de Somerton (Sd) du sondage SD-I1. La localisation est précisée sur la figure 5.	17
Figure 9 : Tomographie électrique 3D. Les lignes blanches correspondent aux profils électriques. a) Bloc 3D. b) vue en coupe.	18
Figure 10 : Profil emi01 (localisation sur la figure 5).	19
Figure 11 : Modèle géologique 3D. a) Avec les données issues des sondages mécaniques. b) En intégrant la géophysique.	20
Figure 12 : (en haut) Extrait annoté des cartes géologiques de La Mure et de Saint-Bonnet dans la zone d'étude (source BRGM), et (en bas) Figuration des principaux ensembles sur vue satellite 3D (source Cerema sur fond Google Earth)	22
Figure 13 : Relevé des sources (points bleus) et zones humides (tâches vertes) à l'aval du hameau des Touches, en 1978. Le plan indiquait également une prévision de travaux de drainage (en pointillés) et des implantations de sondages. Adapté de (ADRGT, RN85 - Les Touches, 1978).	23
Figure 14 : Les "lacs" temporaires à l'aval immédiat du site des Touches, photographiés en 2018 par les habitants (photo communiquée dans le cadre du projet MLA3)	24
Figure 15 : Photographies aériennes 2021 (source Geoportail) : (à gauche) reprises de chaussée visibles en plusieurs endroits de la zone d'étude ; (à droite) reprises successives sur la partie la plus active de la zone 1.	24
Figure 16 : Relevé géoréférencé des principaux indices morphologiques observables sur la zone 1 du site des Touches au voisinage de la RN85, reporté sur fond cartographique BD Ortho IGN (2017).	25
Figure 17 : Diverses observations morphologiques issues des relevés LiDAR aéroportés sur le site des Touches : zones de mouvements de terrain et d'écoulements probables	26
Figure 18 : Exemples de coupes de terrain proposées par l'ADRGT (1971) montrant en partie haute des intercalations de silts argileux et limons peu argileux, puis des blocs de "schiste" avec argile, et enfin le substratum schisteux (coupe 3). La coupe 6 reprend la même structure et souligne la forme de « gouttière » des formations de la zone 1 de glissement suivant l'axe Est-Ouest.	27
Figure 19 : Exemple de coupe de terrain de synthèse (informations sismiques, électriques et sondages) dans la zone 2 de glissement, au voisinage du PR 100+800 de la RN85, d'après le rapport Sage (1994). La coupe distingue les remblais de la RN85, des terrains de couverture (en jaune et rose	

essentiellement) composés de colluvions de pente, argiles silteuses et passages silto-sableux à graveleux, puis des terrains argilo-graveleux compacts au-delà ($v > 1660$ m/s)	27
Figure 20 : Représentation synthétique des couches rencontrées dans les sondages de 2018 et 2021 sur la zone 1 de glissement du site des Touches. Échelle de profondeur arbitraire. Code couleur : marron = F1, bleu = F2, gris = F3, noir = F4.	28
Figure 21 : Représentation synthétique des couches rencontrées dans les sondages de 2018 et 2021 sur la zone 2 de glissement du site des Touches. Échelle de profondeur arbitraire. Code couleur : marron = F1, bleu = F2, gris = F3, noir = F4.	29
Figure 22 : Résultats des relevés piézométriques sur la zone 1 (en haut) et sur la zone 2 (en bas) du glissement des Touches (période 2018-2022)	31
Figure 23 : Synthèse des mesures inclinométriques (module des déplacements en fonction de la profondeur et évolution des rotations au niveau des surfaces de cisaillement) sur les zones 1 (en haut) et 2 (en bas) de glissement.....	33
Figure 24 : Principaux ouvrages de drainage / assainissement et de soutènement recensés dans la zone des Touches au cours du projet MLA3 (les informations « RTM » proviennent de la fiche diagnostic « Commune de Corps – Lieu-dit Les Touches » de 2018	34
Figure 25 : Déformation longitudinale du mur n°1 (photographie Cerema du 22/01/2016).....	35
Figure 26 : Configuration de pente infinie pour le calcul de coefficients de sécurité au glissement (écoulement de l'eau parallèle au glissement)	36
Figure 27 : Variation du facteur de sécurité global F, dans le cas moyen, en fonction du niveau de nappe sous le terrain naturel ($H-H_w$)	38
Figure 28 : Variation du facteur de sécurité F en fonction de la profondeur de la nappe pour différentes valeurs de l'angle de frottement φ'	38
Figure 29 : Variation du facteur de sécurité F en fonction de la profondeur de la nappe pour différentes valeurs de la cohésion c'	39
Figure 30 : Variation du facteur de sécurité F en fonction de la profondeur de la nappe dans le cas de résistance mécanique le plus défavorable (résistance résiduelle ?).....	40
Figure 31 : Variation du facteur de sécurité F en fonction de la profondeur de la nappe pour différentes valeurs d'épaisseur de matériaux en glissement.....	40



**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



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES