

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

Synthèse des essais de laboratoire n°1 : Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR



l'Europe
s'engage
le Massif Alpin

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° LA-2

Date : Décembre 2022

MLA3 – Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Synthèse des essais de laboratoire n 1 : Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

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 :	Synthèse des essais de laboratoire n°1 : Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont
Date d'édition :	Février 2023
Nombre de pages :	57
Coordinateur :	F.Rojat (Cerema)
Rédacteur du rapport :	F.Rojat (Cerema)
Avec la participation de :	L.Chagot, N.Vinot, J.Blache (Cerema)
Relecteur :	L.Dubois (Cerema)
Valideur :	Cédric Girardy (Cerema)

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 détaille et analyse les essais de laboratoire de type « identification des sols » rassemblés dans le cadre du projet sur les principaux sites d'étude. Ces essais sont pour partie issus de la bibliographie (prélèvements de matériaux antérieurs), et ont été complétés par les essais réalisés au cours du projet suite aux campagnes de reconnaissances géotechniques de 2018 et 2021. Le présent rapport constitue une base de données unique sur les propriétés géotechniques des matériaux du Beaumont (38). Il est à relier aux autres livrables de l'axe A (notamment L-A1 précisant le référentiel géologique, L-A3 rassemblant les essais mécaniques et L-A4 synthétisant les propriétés des argiles glacio-lacustres) pour disposer d'une vue complète du contexte géotechnique local.

Mots clés

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

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), l'École 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	9
1.1	Rappel : contexte géologique régional	9
1.2	Rappel : localisation des sites d'étude	10
1.3	Contenu du présent rapport	11
2	Essais et classifications	12
2.1	Principaux essais d'identification utilisés dans ce rapport	12
2.2	Principales classifications employées	12
3	Site de Charlaix	17
3.1	Contexte géologique	17
3.2	Essais de laboratoire	19
3.2.1	Données antérieures	19
3.2.2	Essais effectués sur la période du projet MLA3 (2018-2022)	22
4	Site de Quet-en-Beaumont	24
4.1	Contexte géologique et mécanismes à l'œuvre	24
4.1.1	Géologie locale	24
4.1.2	Structures en place et mécanismes de glissement	25
4.2	Essais de laboratoire	28
4.2.1	Données antérieures	28
4.2.2	Essais effectués sur la période du projet MLA3 (2018-2022)	28
5	Site des Touches	31
5.1	Contexte géologique et mécanismes à l'œuvre	31
5.1.1	Géologie locale	31
5.1.2	Structure des terrains et mécanismes de glissement	32
5.2	Essais de laboratoire	35
5.2.1	Données antérieures	35
5.2.2	Essais effectués sur la période du projet MLA3 (2018-2022)	35
6	Site de Corps	40
6.1	Contexte géologique	40
6.1.1	Géologie locale et délimitation du glissement	40
6.1.2	Structure des terrains et mécanismes de glissement	41
6.2	Essais de laboratoire	43
6.2.1	Données antérieures	43
6.2.2	Essais effectués sur la période du projet MLA3 (2018-2022)	43

7	Site du Motty / Saint-Firmin	46
7.1	Contexte géologique et mécanismes à l'œuvre	46
7.1.1	Géologie locale.....	46
7.1.2	Structure des terrains et mécanismes de glissement.....	47
7.2	Essais de laboratoire	49
8	Synthèse - Conclusion.....	52
9	Annexes	53
9.1	Bibliographie	53
9.2	Table des figures.....	55

1 CONTEXTE GENERAL

1.1 Rappel : contexte géologique régional

Les travaux du projet MLA3 s'articulent autour de 5 sites pilotes dans les zones géologiques du Beaumont (proche Trièves), le long de la RN85 entre La Mure (38) et Saint-Firmin (05). Une synthèse géomorphologique détaillée est présentée dans le livrable L-A1 du projet ; seuls des éléments généraux sont rappelés ici.

De manière générale, les matériaux affectés par les mouvements de terrain dans cette aire d'étude sont principalement des argiles litées « glacio-lacustres » quaternaires qui se sont déposées au sein de vastes lacs au maximum des épisodes glaciaires würmiens (-71 000 → -11 700 av. J.C.). Au sein du bassin Drac-Durance, trois lacs d'obturation principaux se sont créés du fait des barrages glaciaires : le Trièves, le Beaumont et la Matheysine. La Figure 1 donne une vision schématique du contexte géologique régional à l'époque de la formation des dépôts argileux et précise la zone actuellement traversée par la RN85 entre La Mure et Corps, sur la frange du lac du Beaumont.

Avant l'époque würmienne, la glaciation du Riss (-300 000 → -130 000 av. J.C.) avait produit également des dépôts morainiques, puis des argiles sableuses glacio-lacustres au moment du retrait glaciaire (lac de barrage cataglacière). Ces dépôts ont ensuite été majoritairement érodés par les écoulements de la période interglaciaire, et par les glaciers würmiens ultérieurs. Il en subsiste toutefois quelques traces, par exemple au niveau des Touches (voir localisation ci-après).

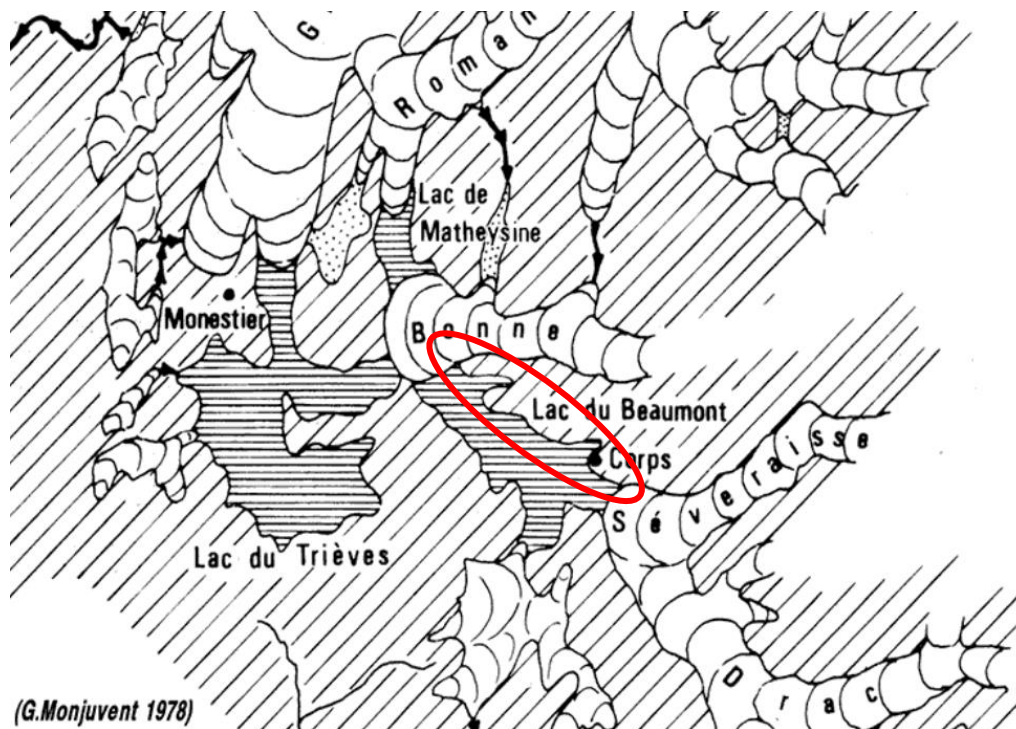


Figure 1 : Carte schématique des glaciers würmiens (au maximum WII) dans le bassin Drac-Durance, d'après (Monjuvent 1978). La zone regroupant les principaux mouvements le long de la RN85 et les 5 sites de référence du projet MLA3 est figurée en rouge.

Les épaisseurs d'argiles recensées dans la littérature sont très variables. Elles peuvent changer sur de courtes distances du fait du caractère accidenté du substratum. Des épaisseurs de plus de 200 m sont par exemple citées par (Antoine, Giraud et Monjuvent 1981), mais sur d'autres zones seuls quelques mètres sont concernés. On peut retrouver également dans les dépôts superficiels un certain nombre de formations morainiques ou alluvionnaires, soit superposées aux argiles, soit les entrecoupant ou les remaniant. Sous les argiles, le substratum est essentiellement constitué de séries sédimentaires schisteuses sombres, calcaires et marneuses, formées entre -150 et -200 MA (Jurassique). Elles

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

Synthèse des essais de laboratoire n 1 :

Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Décembre 2022

peuvent être traversées par des failles, d'orientation par exemple principalement Nord-Sud au voisinage de Corps par exemple.

1.2 Rappel : localisation des sites d'étude

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 2.

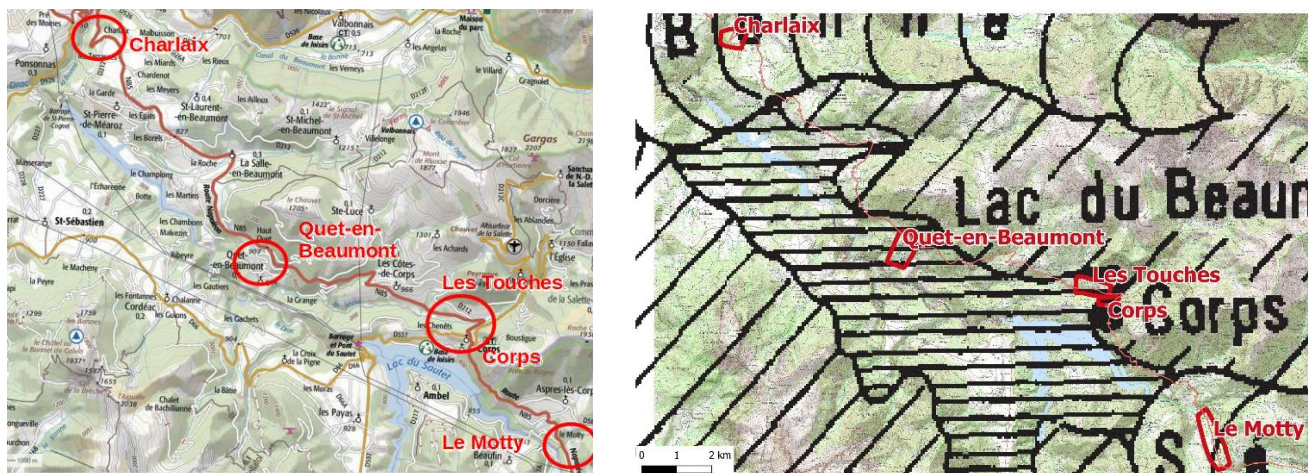


Figure 2 : Localisation des sites d'étude du projet MLA3 sur fond de plan IGN (à gauche) et après recalage sur la carte schématique des glaciers würmiens (à droite)

Pour mémoire, les sites d'étude ont fait l'objet en 2018 d'une campagne de reconnaissances géotechniques (sondages, profils sismiques, etc.), commandée par la Direction Interrégionale des Routes (DIR) Méditerranée, dont les prélèvements ont fortement alimenté les travaux du projet MLA3 présentés ici. La plupart des sondages ont fait l'objet d'instrumentation (voir livrables de l'axe B du projet MLA3), notamment en piézométrie et en inclinométrie. Des sondages complémentaires ont également été réalisés en 2021 dans le cadre du projet, afin de disposer de matériau additionnel et de compléter l'instrumentation en place : deux sondages carottés au voisinage du hameau des Touches d'une part et dans la montée de Corps (forage incliné à 45° sous l'ancienne voie ferrée) d'autre part, un sondage destructif dans la zone d'expérimentation de Charlaix.

La Figure 3 montre la répartition des différents sondages de 2018 sur fonds de photographie aérienne.

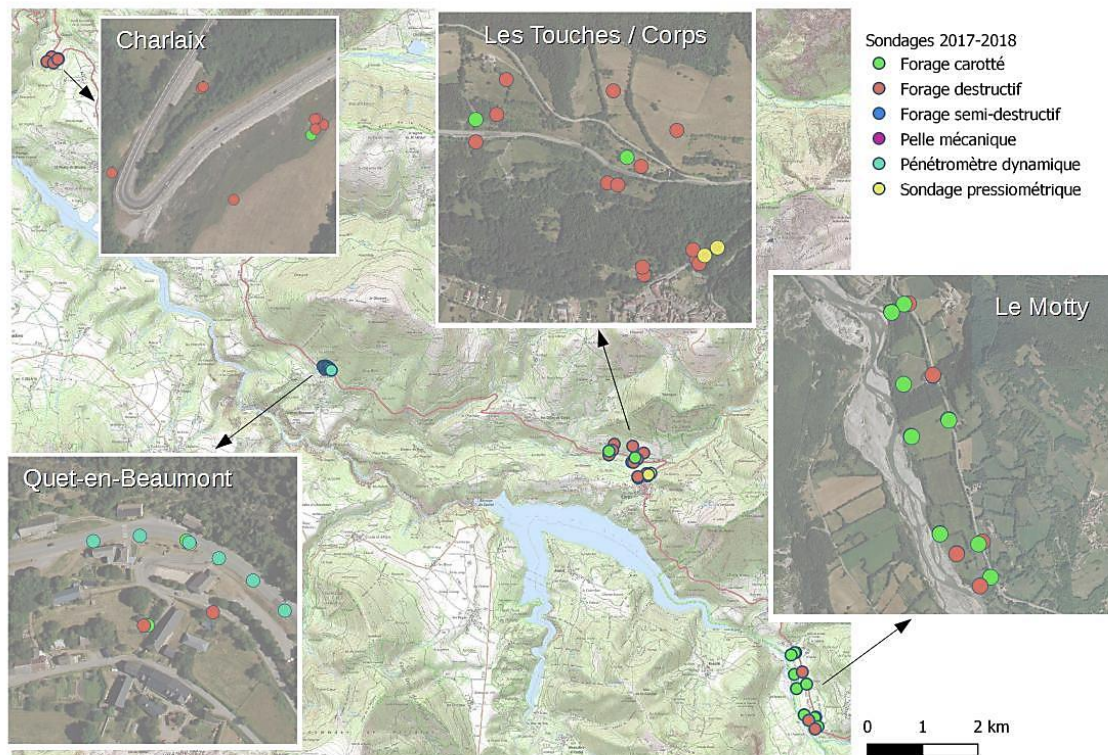


Figure 3 : Position des sondages réalisés en 2018, sur commande de la DIR Méditerranée, ayant permis de disposer de prélèvements pour le projet MLA3

1.3 Contenu du présent rapport

Le présent rapport présente une synthèse des essais de laboratoire de type « identification des sols » (granulométrie, argilosité, etc.) sur les principaux sites d'étude, dans les terrains d'origine glacio-lacustres rencontrés. Ces essais sont pour partie issus de la bibliographie (prélèvements de matériaux antérieurs) ; ils ont été complétés par les divers essais réalisés au cours du projet suite aux campagnes de reconnaissances géotechniques de 2018 et 2021.

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,
- L-A3 rassemblant les essais mécaniques,
- L-A4 analysant l'ensemble des données sur les argiles litées glacio-lacustres des différents sites pour en déduire un « modèle » moyen des propriétés de ces terrains,
- L-A5 synthétisant les modèles géomécaniques de chaque site.

Pour les essais de laboratoire, les livrables L-A2, L-A3 et L-A4 constituent un ensemble cohérent, à considérer conjointement.

2 ESSAIS ET CLASSIFICATIONS

2.1 Principaux essais d'identification utilisés dans ce rapport

Les essais d'identification géotechnique sont couramment employés pour décrire de manière quantitative la constitution des sols, sans rentrer dans une analyse microscopique ou chimique détaillée des constituants. Ils permettent une vue d'ensemble du matériau, en pointant des paramètres clés de son comportement.

Deux types de données d'essais sont rassemblés ici :

- des essais issus de la littérature (études et travaux antérieurs) : le projet MLA3 n'ayant pas contribué à leur réalisation, ces données sont restituées en l'état, conformément à leur formulation par leurs auteurs ;
- des essais réalisés durant la période du projet MLA3 : ils ont majoritairement été menés dans les laboratoires du Cerema de Bron, sous accréditation Cofrac / ISO 17-025 garantissant le parfait respect des normes employées.

Les normes suivantes ont été employées pour les essais d'identification des sols :

- Teneur en eau par étuvage d'un sol : NF P 94-050 :1995 ;
- Limites d'Atterberg : NF P 94-051 :1993 ;
- Analyse granulométrique par tamisage : NF P 94-056 :1996 ;
- Analyse granulométrique par sédimentation : NF P 94-057 :1992 ;
- Valeur au bleu de méthylène d'un sol : NF P 94-068 :1998 ;
- Masse volumique des sols fins : NF P 94-053 :1991 ;
- Masse volumique des grains au pycnomètre : NF P 94-054 :1991 ;
- Teneur en carbonates : NF P 94-048 :1996

Lorsque certaines normes ont été remplacées ou révisées durant le projet (passage aux normes européennes par exemple), les essais ont néanmoins été réalisés suivant le référentiel initial ci-avant par souci d'homogénéité.

Pour la fraction fine, l'analyse granulométrique par sédimentation a été autant que possible préférée à l'analyse par granulomètre laser dans les essais menés sur la période du projet, compte-tenu de la sous-estimation (parfois plus de 50 %) de la fraction 0-2 μm fréquemment constatée avec cette dernière technique (voir par exemple (McCave, et al. 1986), (Loizeau, et al. 1994) ou (Rojat et Gendre 2009)).

2.2 Principales classifications employées

Les essais d'identification géotechnique sont souvent rattachés à des classifications, qui permettent de situer les sols dans des « catégories » présentant des traits de composition ou de comportement communs. Ces catégories dépendent de l'objectif visé par les concepteurs de la classification concernée, une classification donnée ne traite donc pas tous les aspects de comportement d'un sol donné.

Dans le présent rapport, trois classifications principales sont citées :

➤ **La classification USCS / LCPC**

La classification « Unified Soil Classification System » (voir par exemple (ASTM 2020)) est principalement axée sur la dimension des particules et sur leur comportement à l'eau (d'après les limites

d'Atterberg). Elle est similaire à la classification LCPC développée en France dans les années 1960, la principale différence concernant la limite entre les sols fins et les sols grenus, fixée à 63 μm pour l'une et à 80 μm pour l'autre. En pratique, pour les sols étudiés ici, cette distinction n'amènera pas de différence de classification.

La classification USCS ne couvre pas les propriétés liées à la carbonatation du sol, ni à la surface spécifique des argiles minéralogiques mais elle a le principal mérite d'être internationale. Les deux entrées principales sont la courbe granulométrique et les limites d'Atterberg (liquidité w_L , plasticité w_P). La structure de cette classification est essentiellement arborescente, et pour les sols fins la dénomination s'effectue au moyen du diagramme de Casagrande (IP versus w_L). La classification est résumée dans la Figure 4.

Il est toutefois courant en géotechnique d'utiliser la valeur au bleu du sol (VBS) en lieu et place des limites d'Atterberg pour qualifier l'argilosité du sol. Cette valeur est en lien direct avec les possibilités d'interaction entre l'eau et les argiles minéralogiques, et est utilisable sur un grand nombre de sols (argileux, limoneux, sableux) alors que les limites d'Atterberg n'ont une représentativité réelle que pour les terrains les plus argileux. Afin de pouvoir classer de manière comparable à la méthode USCS / LCPC les sols fins ayant fait l'objet de mesures au bleu de méthylène, nous utiliserons également dans le présent rapport la proposition de correspondance de (Magnan et Youssefian 1989) dont le principe est résumé sur le diagramme de la Figure 5.

		Définition		Symbole LCPC	Conditions	Appellation
Sols grenus $d_{50} > 80 \mu\text{m}$	Graves	Plus de 50 % des éléments de taille supérieure à 80 μm ont un diamètre supérieur à 2 mm	Moins de 5 % d'éléments < 80 μm	Gb	$C_U > 4$ et $1 < C_C < 3$	Grave propre bien graduée
				Gm	Une des conditions de Gb non satisfaite	Grave propre mal graduée
		Plus de 12 % d'éléments < 80 μm	GL	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A	Grave limoneuse	
			GA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	Grave argileuse	
	Sables	Plus de 50 % des éléments de taille supérieure à 80 μm ont un diamètre inférieur à 2 mm	Moins de 5 % d'éléments < 80 μm	Sb	$C_U > 6$ et $1 < C_C < 3$	Sable propre bien gradué
				Sm	Une des conditions de Sb non satisfaite	Sable propre mal gradué
		Plus de 12 % d'éléments < 80 μm	SL	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A	Sable limoneux	
			SA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A	Sable argileux	

Si 5 % d'éléments < 80 μm < 12 %, double classement et double symbole

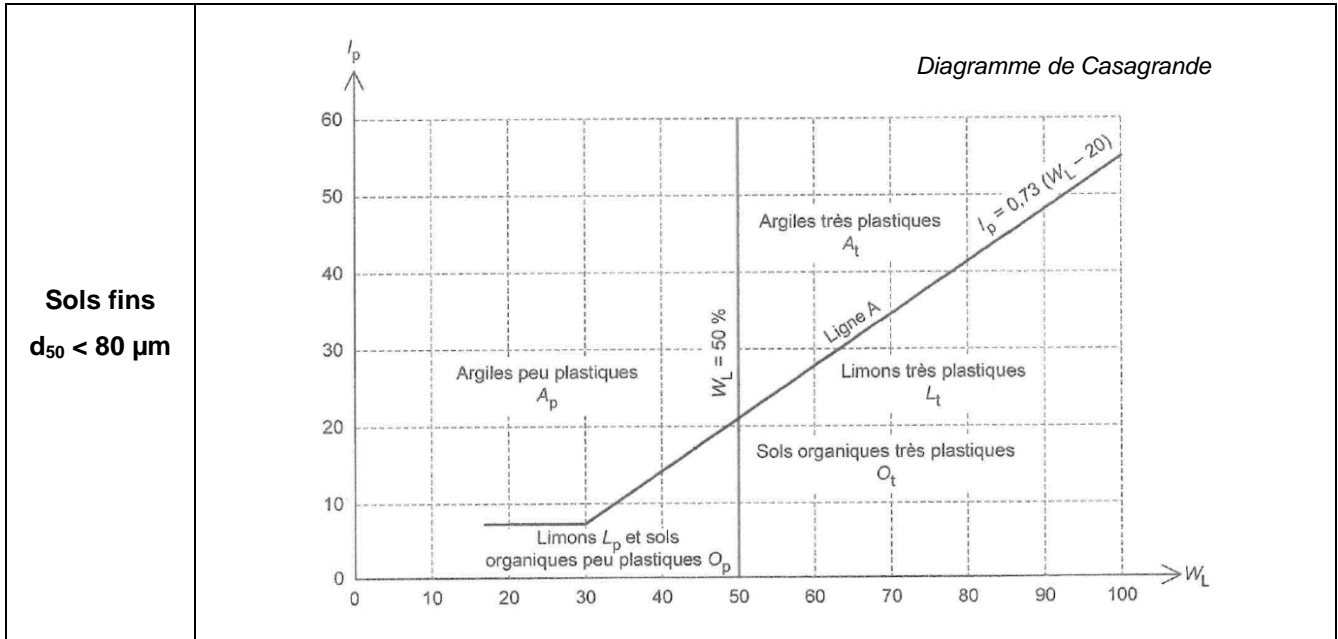


Figure 4 : Résumé de la classification USCS / LCPC, d'après (Plumelle, et al. 2013)

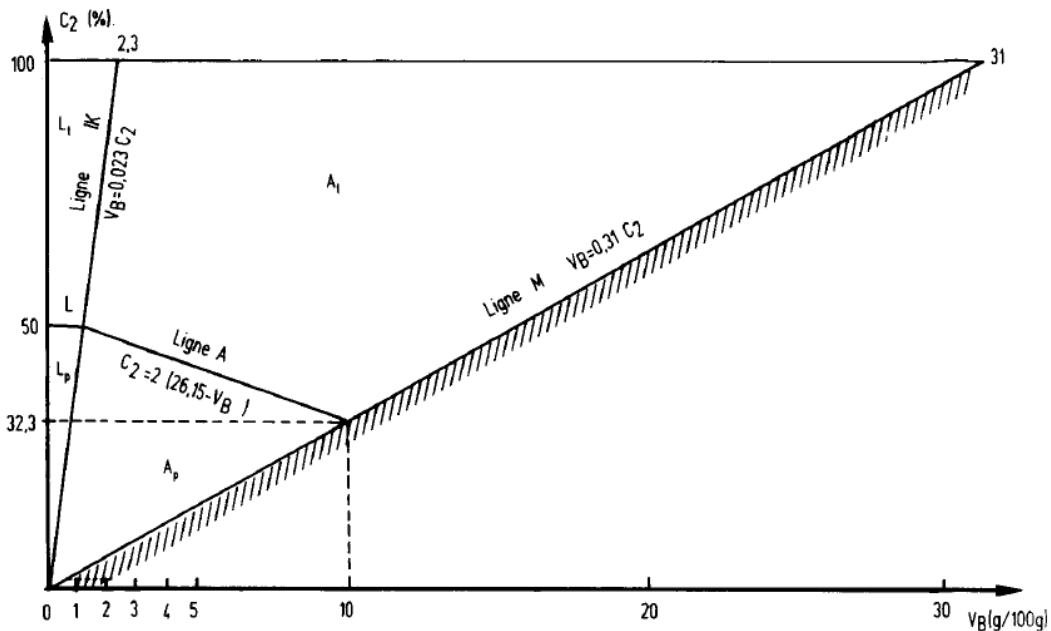


Figure 5 : Correspondance de la classification USCS/LCPC des sols à une qualification de l'argilosité par la valeur au bleu (en abscisse) d'après (Magnan et Youssefian 1989). C₂ désigne le passant à 2 µm.

➤ La classification GTR

La classification GTR (« Guide des Terrassements Routiers ») est destinée à l'optimisation des méthodes d'extraction et de mise en œuvre en remblai / couche de forme des terrains naturels. Cette classification, principalement utilisée en France et détaillée dans (LCPC-SETRA 1992) ou dans (AFNOR 1992), est particulièrement intéressante dans la mesure où elle est plus précise que la classification USCS/LCPC dans la discrimination des fractions argileuses, et où elle se rapporte à des comportements mécaniques des sols (aptitude au compactage notamment). Elle est donc souvent pertinente dans les problématiques de géotechnique.

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

Synthèse des essais de laboratoire n 1 :

Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Décembre 2022

La distinction entre sols grenus et sols fins se fait en fonction du diamètre maximal des particules ($D_{max} > 50 \text{ mm}$ pour les sols grenus). Les sols fins sont ensuite classés en fonction de leurs passants à $80 \mu\text{m}$ et à 2 mm , de leur indice de plasticité (classes A2 à A4) ou de leur valeur au bleu (autres classes), suivant le diagramme de la Figure 6.

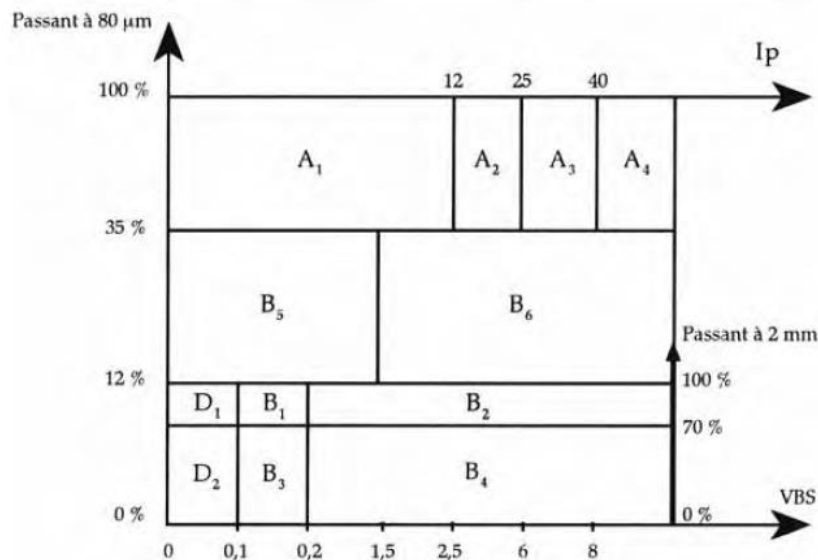


Figure 6 : Résumé de la classification GTR des sols fins ($D_{max} < 50 \text{ mm}$) d'après (LCPC-SETRA 1992)

➤ La classification triangulaire des sols

Les classifications triangulaires sont généralement bien adaptées à la représentation de la composition des sols entre les principales fractions granulaires. Elles sont fréquemment employées en pédologie par exemple. Il existe de très nombreux triangles de classification, comme le soulignent par exemple (Richer de Forges, et al. 2008) qui en dénombrent pas moins d'une trentaine.

La représentation triangulaire utilisée dans le présent rapport est celle du GEPPA (Groupe d'Etude pour les Problèmes de Pédologie Appliquée), très courante en France. À noter que dans cette classification, la distinction limon / sable est fixée à $50 \mu\text{m}$ (cette valeur variant couramment de 20 à $80 \mu\text{m}$ en fonction des publications). Par ailleurs, ce triangle est normalement employé sur des sols $< 2 \text{ mm}$: nous l'avons toutefois utilisé ici sur l'ensemble de la courbe granulométrique, sans la rapporter à la fraction $0-2 \text{ mm}$, afin de ne pas biaiser les pourcentages d'argiles et de limons réellement mesurés. En conséquence, **la fraction sableuse du triangle est plutôt à comprendre comme « sables et graves » dans le présent rapport.**

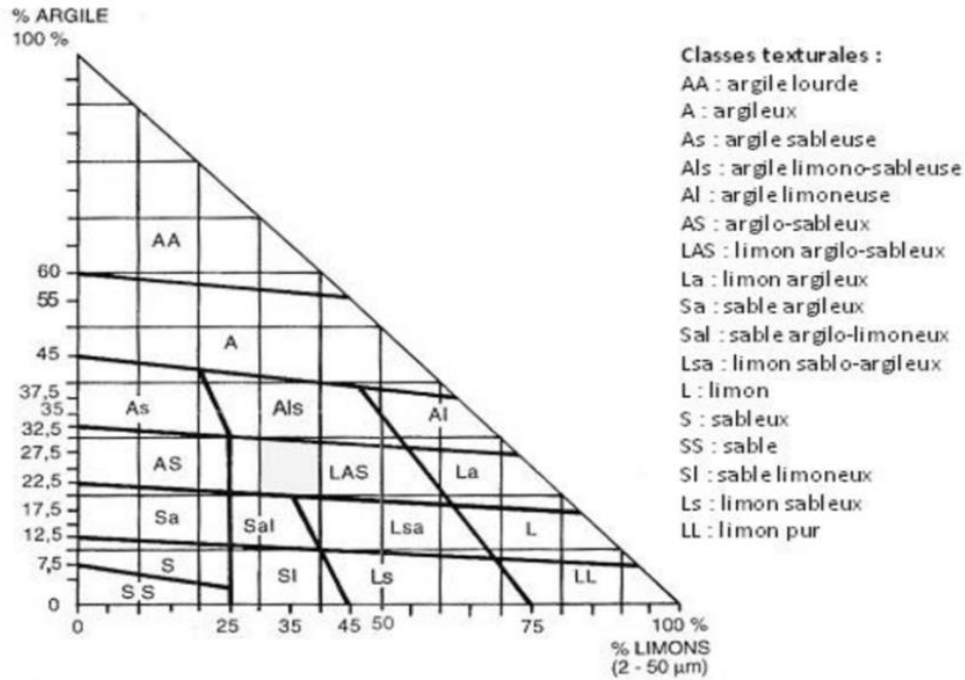


Figure 7 : Triangle de texture des sols proposé par le GEPPA, d'après (Baize 2000)

3 SITE DE CHARLAIX

3.1 Contexte géologique

Contrairement aux autres sites du projet MLA3 (voir sections suivantes), le site de Charlaix a été largement étudié par le passé, dans le cadre d'études géotechniques mais aussi de travaux de recherche. Il serait inutilement long de détailler ici l'ensemble des données disponibles, qui sont particulièrement riches et couvrent aussi bien la morphologie du site que sa géologie structurale, son hydrogéologie, sa dynamique, etc. C'est également un site pilote pour de multiples techniques d'instrumentation, dont certaines seront détaillées dans les livrables de l'Axe B du MLA3, auxquels on pourra utilement se référer en complément des divers documents « historiques » rassemblés dans le cadre du projet. Dans la littérature scientifique, les références (Joseph, Bièvre et Dauphin 2014) et (Bièvre, Joseph et Bertrand 2018) peuvent être plus particulièrement relevées.

Seules les grandes lignes du contexte géologique sont donc rappelées ici.

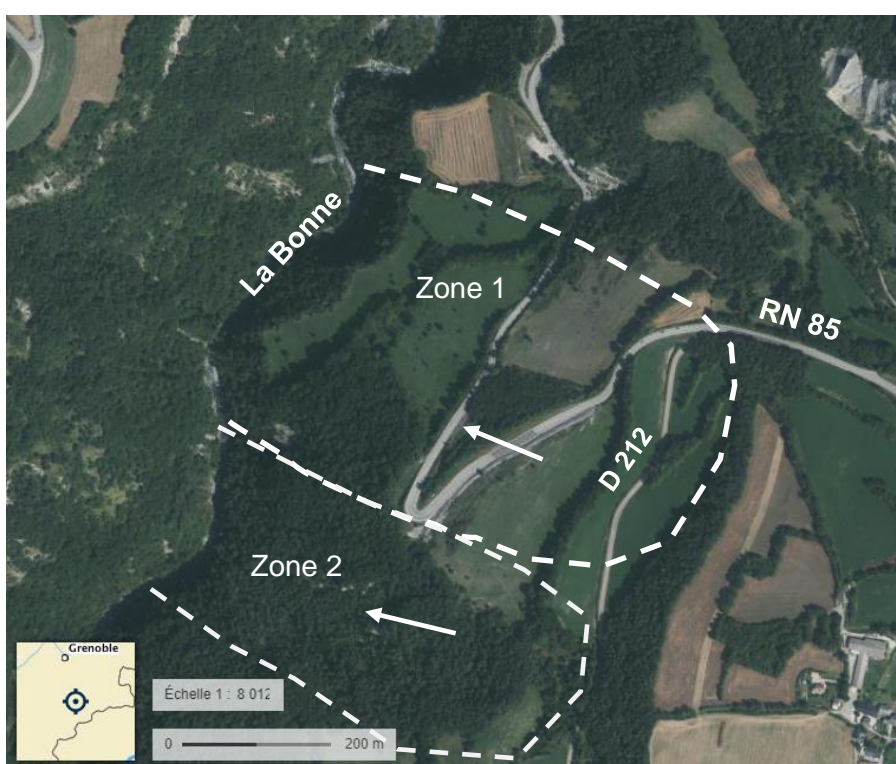


Figure 8 : Le lacet de Charlaix et (approximativement) les deux zones principales de glissement autour de la RN85 (sur fond de photo aérienne Geoportail, 2021)

Le glissement de Charlaix se situe dans des terrains quaternaires correspondant à des dépôts glaciaires et alluvions würmiennes, reposant sur un substratum jurassique profond (Aalénien). Le versant est situé en rive gauche de la rivière de la Bonne, c'est-à-dire sur le flanc Est de la vallée, orientée Nord-Nord-Est (voir Figure 8). Au cours de l'histoire wurmienne, les avancées et retraits successifs du glacier de la Bonne (Figure 2) ont conduit à des dépôts tantôt à faciès sablo-graveleux (morainiques), tantôt à faciès argileux lités (lacustres). La Figure 9 fournit à titre d'exemple une représentation typique de la structure du versant, proposée par (Lambert et Montjuvent 1968)). Le glissement de Charlaix se développe principalement au sein du niveau « d'argiles à varves » qui y est identifié.

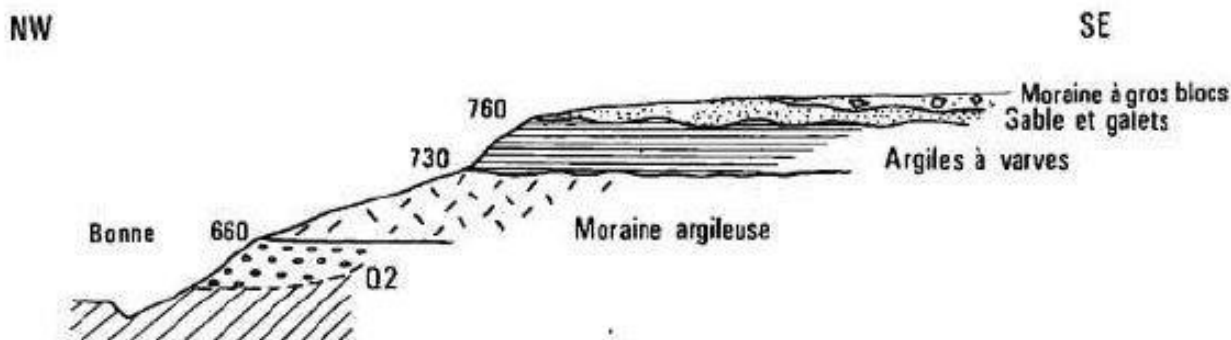


Fig. 17. — Vallée de la Bonne dans la région de Pont Haut.
Zone perturbée au débouché de la vallée de la Bonne sur les plateaux de La Mure Beaumont.

Figure 9 : Coupe géologique synthétique du versant de la Bonne telle que proposée par Lambert et Montjuvent (1968)

Sur le site, 3 couches principales sont identifiées dans les reconnaissances géotechniques (de haut en bas) :

- F1ch : des moraines supérieures, sur une épaisseur de 4 à 7 mètres, de granulométrie sableuse à graveleuse dans une matrice argileuse beige ;
- F2ch : des argiles litées glacio-lacustres, grises à noires, sur des épaisseurs pouvant aller de 15 m à plus de 30 m ;
- F3ch : des moraines argileuses à sablo-graveleuses inférieures, rarement rencontrées dans les sondages (pas suffisamment profonds en général).

En fonction des zones, certaines couches peuvent être absentes des sondages (par exemple F2ch peut affleurer directement).

Dans l'ensemble, les mouvements relevés sur le site de Charlaix se rattachent à deux zones de glissement (voir Figure 8), dont les contours plus ou moins étendus varient en fonction des études et des publications (la Figure 8 présente l'enveloppe globale des mouvements, mais certains documents ne délimitent que les zones de plus fortes déformations). Historiquement, la zone 1 a été principalement étudiée car elle impacte plus significativement la RN85 ; c'est également elle qui a fait l'objet de sondages et d'instrumentation dans le cadre du projet MLA3. On y identifie plusieurs surfaces de rupture successives en profondeur, de quelques mètres au voisinage de l'interface F1ch-F2ch à plus de 30 mètres de profondeur dans certains forages instrumentés. Une représentation schématique du modèle de terrain proposé par (Bièvre, Joseph et Bertrand 2018) pour le haut de la zone 1 (entre la RN 85 et la RD 212) est fournie à titre d'exemple en Figure 10.

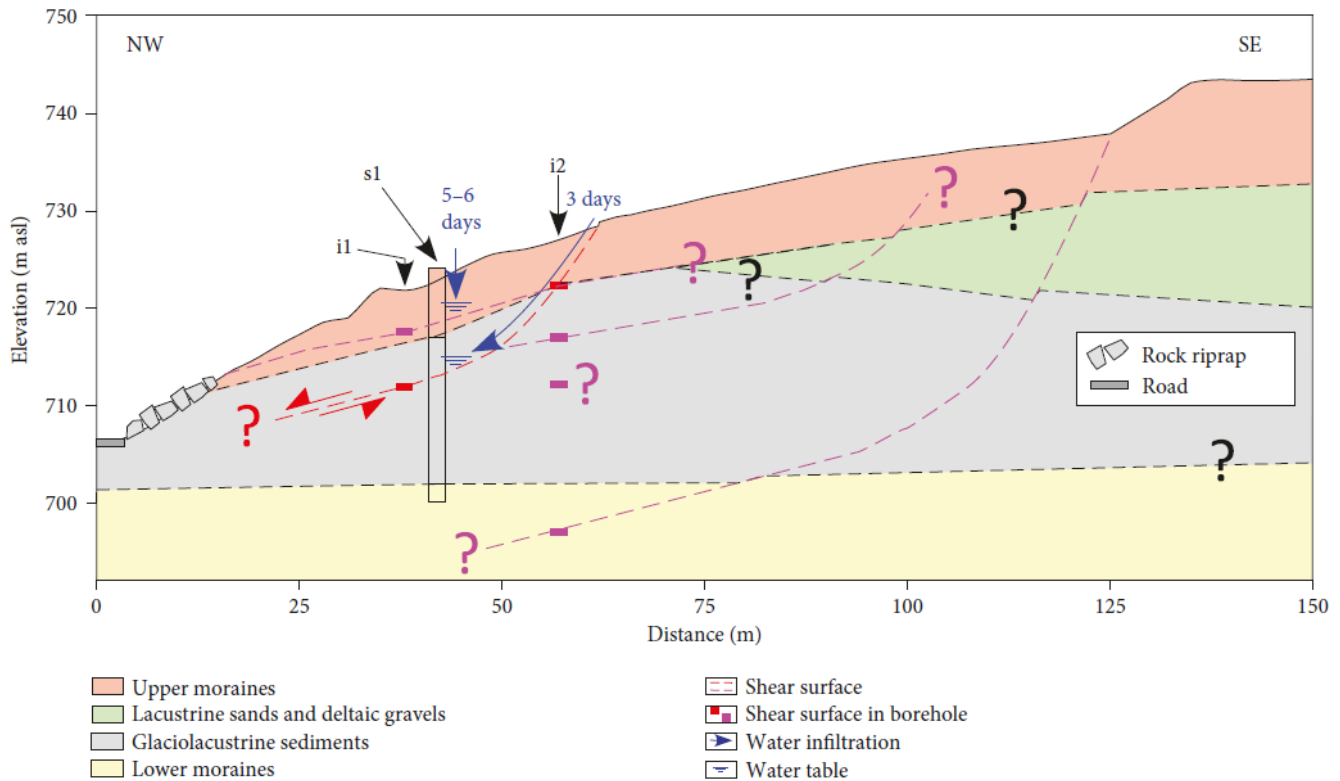


Figure 10 : Profil géologique et géotechnique de synthèse proposé par (Bièvre, Joseph et Bertrand 2018) pour le haut de la zone 1 de glissement de Charlaix (entre la RN 85 et la RD 212)

3.2 Essais de laboratoire

3.2.1 Données antérieures

De multiples données d'essais antérieures au projet sont disponibles sur le site de Charlaix. Elles ont pu être rassemblées dans le cadre du MLA3, et synthétisées ici.

Les sondages suivants ont notamment pu être exploités. En fonction de la précision des descriptions lithologiques et des localisations, les prélèvements ont pu être rattachés de manière plus ou moins certaine aux couches présentées dans la partie précédente.

- **Sondage carotté SI-2 (1979)** du CETE de Lyon : localisé environ 50 m à l'amont du lacet, dans la zone 1 de glissement. Echantillons prélevés à 4.6 m (E1'), 10.7 m (E2') et 22 m (E3') de profondeur. Les données sont malheureusement lacunaires (les PVs d'essais n'ont pas été retrouvés, les résultats de laboratoire sont seulement rappelées dans d'autres rapports).
- **Prélèvements E1, E2, E3 (1980)** : prélevés à 1 m de profondeur dans des zones d'arrachement ou de talus, restitués dans le rapport (ADRG 1980) :
 - E1 : zone 2 de glissement, proche du lacet, argile grise varvée, couche F2ch ;
 - E2 : zone 1 de glissement, proche du lacet dans la zone de l'actuel enrochement, couche F1ch ;
 - E3 : zone 1 de glissement, au-dessus de la RN85 dans la zone de plus forte déformation, couche F1ch ;
- **Sondages à la pelle mécanique TP2 et TP9 (2001)**, à diverses profondeurs, restitués dans le rapport (SAGE 2002). Localisation approximative (en l'absence de plan dans l'archive) :

- TP2 : zone 1 de glissement, entre les deux branches du lacet ;
- TP9 : zone 1 de glissement, à l'amont de la RN85.
- **Sondage carotté SC2 (2007)**, 19.5 m de profondeur, zone 1 de glissement, à l'amont de la RN85, sur le chemin d'accès en terre. Restitué dans le rapport (CETE 2008).
- **Sondage carotté SC1 (sept. 2012)**, 25 m de profondeur, zone 1 de glissement, environ 30 m à l'amont de la RN85, dans la zone la plus fortement instrumentée. Ce sondage avait été réalisé par le CETE dans le cadre de renouvellements d'instrumentation pour la DIR Med et d'une opération de recherche. Les résultats d'essais n'avaient pas été publiés jusqu'à présent.

Sondage	Prof. (m)	Passant à (%) :					Dmax (mm)	w _L (%)	w _p (%)	IP (%)	VBS	Couche	USCS M.&Y.	GTR
		2 μm	20 μm	50 μm	80 μm	2 mm								
SI-2 (1979)	4.6	-	-	-	56	-	-	-	-	-	-	F1ch ?	?	A1 ?
	10.7	-	-	-	66	-	-	27	17	10	-	F1ch ?	Ap	A1
	22.0	-	-	-	97	-	-	35	21	14	-	F2ch	Ap	A2
E1 (1980)	1.0	15	44	58	61	75	50	28	17	11	-	F2ch	Ap	A1
E2 (1980)	1.0	4	20	30	33	62	45	38	23	15	-	F1ch	SA	B6
E3 (1980)	1.0	2	12	24	29	64	70	Illisible			-	F1ch	SM	B5/6
TP2 (2001)	2.0	22	51	58	68	88	40	26	15	11	-	F1ch ?	Ap	A1
TP9 (2001)	2.0	22	51	60	68	90	40	29	17	12	-	F1ch ?	Ap	A1/2
	5.5	38	84	91	94	99	10	40	20	20	-	F2ch	Ap	A2
SC2 (2007)	0 à 5	-	-	-	32	58	50	-	-	-	0.11	F1ch	GL ?	B5
	7.7	50	97	100	100	100	0.08	39	22	17	-	F2ch	Ap	A2
	12.2	35	89	99	100	100	0.08	35	20	15	-	F2ch	Ap	A2
	16.7	27	84	96	100	100	0.08	31	20	11	-	F2ch	Ap	A1
SC1 (2012)	2.5	-	-	-	27	57	20	-	-	-	0.24	F1ch	GL ?	B5
	13.2	46	92	95	97	100	0.2	37	24	13	-	F2ch	Ap	A2
	20.7	38	92	98	99	100	0.2	30	20	10	-	F2ch	Ap	A1
	24.8	11	26	30	33	50	50	22	17	5	-	F3ch	GL	B5

Tableau 1 : Synthèse des essais d'identification des sols antérieurs à la période du projet MLA3, sur le site de Charlaix

Les essais disponibles apparaissent relativement nombreux et couvrent les différents types de sols rencontrés dans les forages. Les niveaux de moraines se distinguent nettement, avec une structure essentiellement sablo-graveleuse (classifications SA, SM, GL), pouvant contenir de gros éléments (50 mm voire ponctuellement plus) mais parfois entremêlée de passages plus argileux.

Le niveau **des argiles varvées F2ch** est lui aussi bien caractérisé. Les sols se classent de manière relativement homogène parmi les **argiles peu plastiques Ap, correspondant à des classifications GTR A1 ou A2**. Les pourcentages d'argiles minéralogiques (assimilées à la fraction C₂ < 2 μm) sont fréquemment importants (de 30 à 50 %), mais ne se traduisent pas nécessairement par des activités élevées. En effet, si l'on calcule les indices d'activité de Skempton ($A_c = IP / C_2$), on observe des valeurs plutôt faibles (autour de 0.4 en moyenne et une amplitude de 0.25 à 0.7), qui correspondent à des argiles « peu actives ».

Les hétérogénéités relatives de caractérisation de la couche F2ch sont à rapprocher des **différences de nature pouvant exister entre les différents lits** au sein des argiles varvées (voir Figure 11). En effet, les lits plus clairs (d'aspect gris-vert) sont globalement à tendance silteuse et correspondent vraisemblablement aux matériaux de faible indice de plasticité (et de classification A1) dans les caractérisations du Tableau 1. Les lits plus sombres (gris-noirs) ont en revanche une composante essentiellement argileuse. D'après les faibles valeurs d'indices d'activité, la fraction < 2 µm est probablement majoritairement composée d'argiles peu sensibles (illite, kaolinite), voire de débris fins de quartz, calcite et micas. Cela serait assez cohérent avec les observations de (Giraud, et al. 1981) par exemple sur le site de Monestier-du-Percy dans les argiles glacio-lacustres wurmiennes de la zone du Trièves, voisine du Beaumont (voir minéralogie du Tableau 2).



Figure 11 : Argiles litées de la couche F2ch, sur le sondage carotté SC1 de 2012 (photos Cerema, laboratoire d'essais). À gauche : aspect normal des varves avec alternances silteuses (gris-vert) et argileuses (gris-noir) au-dessus de la surface de rupture. À droite : lits désorganisés au niveau de la surface de rupture vers -16.0 m.

Nature des minéraux	Strate claire	Strate sombre
Calcite	50 %	25 %
Quartz	10 %	20 %
Feldspaths	—	5 %
Illite	15 %	10 %
Chlorite	6 %	10 %
Kaolinite	6 %	5 %
Montmorillonite + I. M. C.	12 %	5 %

Tableau 2 : Composition minéralogique des niveaux clairs et sombres des argiles varvées du Trièves sur le site de Monestier-du-Percy, d'après (Giraud, et al. 1981)

Les prélèvements des différentes couches peuvent également être positionnés dans le **triangle de textures du GEPPA** dès lors qu'ils ont fait l'objet de mesures de sédimentométrie permettant de connaître les passants à 2 µm et à 50 µm. La Figure 12 présente les résultats correspondants (et intègre également les essais peu nombreux de la section 3.2.2 subséquente). Les argiles litées se positionnent essentiellement dans les zones des « argiles » et des « argiles limoneuses » comme sur les autres sites du projet MLA3 (voir sections suivantes). Seul un point se rapproche des limons sableux, mais il s'agit de l'échantillon E1 de 1980 prélevé très proche de la surface. Les moraines se situent principalement dans la zone des sables (et graves).

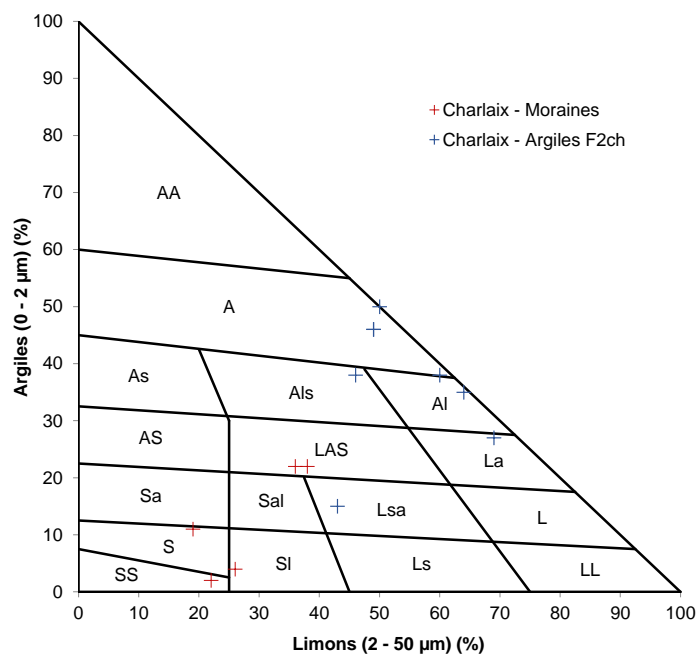


Figure 12 : Positionnement des prélèvements du site de Charlaix (antérieurs et contemporains au projet MLA3) dans le triangle de textures du GEPPA

3.2.2 Essais effectués sur la période du projet MLA3 (2018-2022)

Dix forages complémentaires ont été réalisés sur la période du projet MLA3 sur le site de Charlaix, principalement à des fins d'instrumentation. Leur implantation est présentée en Figure 13. Les forages notés S6-SDi étaient des forages destructifs, inexploitable pour des essais de laboratoire. Compte-tenu des données antérieures déjà disponibles, seul le sondage carotté S6-SC1 (2018) a fait l'objet d'essais d'identification géotechnique ponctuels. Dans ce forage, la limite F1ch / F2ch se trouve autour de 6.50 m de profondeur, puis la formation d'argiles litées glacio-lacustres se poursuit jusqu'en fond de forage (25 m).

Les résultats sont résumés dans le Tableau 3. Lorsque l'argilosité a été estimée par la valeur au bleu du sol au lieu de l'indice de plasticité, la classification USCS/LCPC a été remplacée par la correspondance de (Magnan et Youssefian 1989), prenant en compte cet essai. Les valeurs sont alors indiquées en italique dans la colonne « USCS / M.&Y. ».



Figure 13 : Vue d'ensemble de l'implantation des sondages de 2018 (sauf SD10 datant de 2021) sur la zone du glissement de Charlaix

Sondage	Prof. (m)	Passant à (%) :					Dmax (mm)	w _L (%)	w _P (%)	IP (%)	VBS	Couche	USCS M.&Y.	GTR
		2 µm	20 µm	50 µm	80 µm	2 mm								
S6-SC1	3.7	19	39	43	46	76	20	-	-	-	0.57	F1ch	Ap/Lp	A1
	18.5	46	89	95	97	99	5	-	-	-	1.41	F2ch	Ap	A1

Tableau 3 : Identifications géotechniques des sols sur le site de Charlaix, déterminées sur les prélèvements du sondage S6-SC1 de 2018.

Ces résultats apparaissent tout-à-fait cohérents avec ceux des sondages antérieurs présentés en section 3.2.1.

Enfin, un échantillon du sondage S6-SC1 a pu faire l'objet d'une mesure de teneur en carbonates. La valeur obtenue (voir Tableau 4) laisse envisager des teneurs en carbonates dans l'ensemble plus faibles que sur les argiles du Trièves voisines.

Sondage	Prof. (m)	Couche	Teneur en carbonates	Qualificatif
S6-SC1	15.6	F2ch	13 %	Faiblement marneux

Tableau 4 : Teneur en carbonates mesurée sur un échantillon du site de Charlaix

4 SITE DE QUET-EN-BEAUMONT

4.1 Contexte géologique et mécanismes à l'œuvre

4.1.1 Géologie locale

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

Au niveau de Quet-en-Beaumont, le Drac a creusé plusieurs lits dans le substratum calcaire, avant le lit actuel. L'axe d'un des plus anciens lits se situe sous le hameau du « Bas-Quet ». La profondeur précise du substratum sous les zones habitées de Quet-en-Beaumont est inconnue et peut être très importante. Au sud de Quet-en-Beaumont, au niveau du Drac, le substratum affleure aux environs de 680 m NGF. Il affleure également à l'est du hameau. Au-dessus du substratum, les alluvions du Drac forment la terrasse du Bas-Quet (Plaine du Plat) jusque vers l'altitude 725 m NGF.

D'après le rapport (Cerema 2021), les terrains en mouvement sont des terrains du quaternaire, issus particulièrement de la période du Würm II. Les dépôts correspondants sont constitués dans la zone de Quet d'une succession d'argiles litées, de sables et de niveaux plus grossiers en particulier au sommet. La position du site, en bord de pente, peut également se traduire par des perturbations de la séquence de dépôt glacio-lacustre par des apports plus grossiers (éboulis, colluvions). Des résidus de la glaciation précédente (du Riss) peuvent aussi être présents sur les hauteurs.

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

Le type de structure en place est bien traduit par la coupe transversale du Beaumont à Cordéac (zone voisine de Quet-en-Beaumont), proposée par (Monjuvent 1978) et présentée en Figure 14. La Figure 15 montre par ailleurs une interprétation de la carte géologique locale, proposée par (Cerema 2021) dans la zone d'étude. On peut noter des glissements actifs déjà bien référencés à proximité du village.

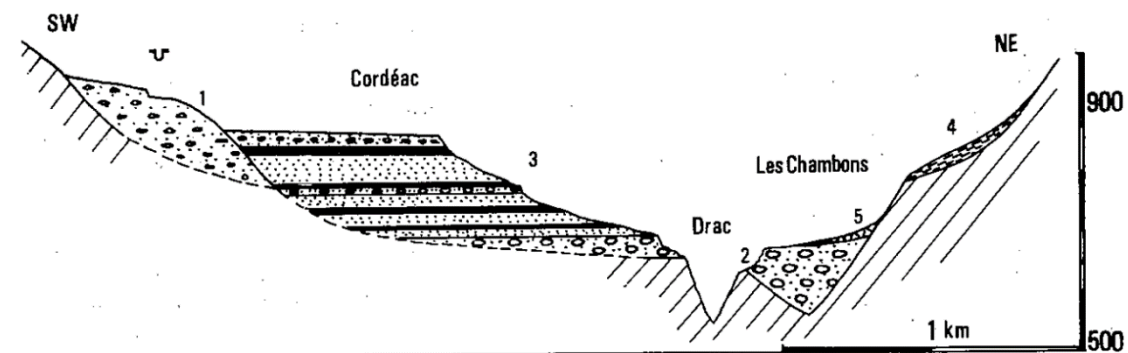


Fig.137. COUPE TRANSVERSALE DU BEAUMONT A CORDEAC.

1. alluvions calcaires supérieures (RI), 2. alluvions basales III du Drac (WI), 3. terrasse glacio-lacustre de Cordéac (maximum de Würm, W II), 4. grèzes (W III,IV), 5. cônes de déjection des Champons, ravinant (2), (cataglaciale W III).

Figure 14 : Coupe transversale du Beaumont au voisinage de Quet-en-Beaumont (Cordéac) d'après Montjuvent (1978)

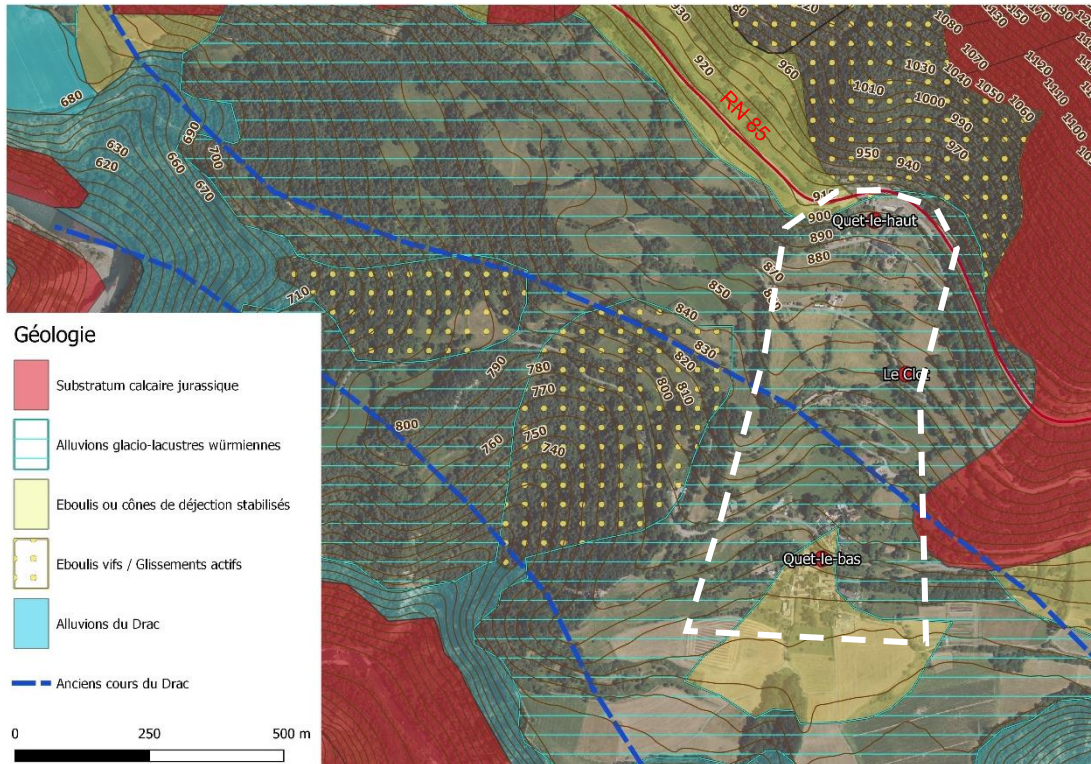


Figure 15 : Détail de la cartographie géologique locale (réinterprétée par le Cerema, sur base des données BRGM). La zone d'étude (« village ») est figurée en pointillés blancs.

Enfin, sur le plan hydrologique, la forme en combe de Quet-en-Beaumont constitue un axe Nord-Sud tendant à concentrer les venues d'eau. Des sources sont présentes essentiellement à l'amont de la RN85 et en-dessous de 850 m NGF.

4.1.2 Structures en place et mécanismes de glissement

Dans l'ensemble, les mouvements observés dans la zone d'étude (village) sont lents, au sein des formations quaternaires, et se traduisent généralement par des dommages mineurs aux constructions (certaines d'entre elles étant pluri-centenaires, fin XVIIIème siècle ponctuellement au niveau de Quet-le-Haut). Au niveau de la RN85 en revanche, les dégradations sont observées tous les ans avec des fissures et affaissements pouvant atteindre 5 cm, conduisant à des reprises d'enrobés fréquentes.

Les sondages réalisés en 2018, dont l'implantation est présentée en Figure 16 et qui ont alimenté les essais de laboratoire du projet MLA3, ont mis en évidence 4 formations principales :

- F0q : des remblais et autres terrains anthropiques, sablo-graveleux à limoneux ;
- F1q : des éboulis argilo-graveleux du Mont Chauvet, constitués de calcaire noir enrobé d'une matrice argileuse, parfois très humides ;
- F2q : des terrains glaciaires et glacio-lacustres de remplissage du Lac du Beaumont, essentiellement grossiers (graveleux) avec une alternance de niveaux à matrice sableuse et à matrice limoneuse.

Au sein de cette dernière formation, les faciès d'argiles litées glacio-lacustres, typiques des autres sites étudiés ici et du remplissage du Beaumont, ne sont rencontrés que ponctuellement sur environ 4 m dans le sondage S7-SC2. À des fins de comparaison avec les autres sites, ils sont individualisés ci-après comme une couche « F2qa ».

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

Synthèse des essais de laboratoire n 1 :

Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Décembre 2022



Figure 16 : Implantation des sondages de 2018 sur le site de Quet-en-Beaumont

Le Tableau 5 ci-après récapitule de manière simplifiée les épaisseurs des différentes formations recensées dans les forages.

Sondage	Type	F0q : Remblais et autres terrains anthropiques	F1q : Eboulis argilo-graveleux	F2q : terrains glaciaires et glacio-lacustres, gravelo-sableux à gravelo-limoneux	F2qa : Argiles litées glacio-lacustres
S7-SC1	Carotté	0 à 3.4 m	3.4 à 10.3 m	10.3 à 30.0 m (arrêt)	-
S7-SP1	Destructif + pressiomètre	0 à 3.5 m	3.5 à 10.3 m	10.3 à 25.0 m (arrêt)	-
S7-SC2	Carotté	-	0 à 13.0 m	13.0 à 21.4 m et 25.2 à 35.0 m (arrêt)	21.4 à 25.2 m
S7-SD1	Destructif	<i>Pas d'observation directe</i>	<i>Pas d'observation directe</i>	<i>Pas d'observation directe</i>	<i>Pas d'observation directe</i>
S7-SD2	Destructif	-	0 à 10.0 m (d'après mesures RAN)	10.0 à 25.0 m (arrêt) (d'après mesures RAN)	-
PN1 à PN7	Pénétromètres dynamiques	<i>Pas d'observation directe</i>	<i>Pas d'observation directe</i>	<i>Pas d'observation directe</i>	<i>Pas d'observation directe</i>

Tableau 5 : Résumé des structures de terrains rencontrées dans les sondages réalisés sur le site de Quet-en-Beaumont en 2018

L'interprétation des reconnaissances de terrain et des suivis instrumentés (voir (Cerema 2021)) montre que plusieurs mouvements se superposent vraisemblablement dans la partie haute du site de Quet-en-Beaumont. Au voisinage de la RN85, les déformations semblent liées principalement au fluage des éboulis peu compacts et hétérogènes, favorisé par l'imbibition permanente de leur matrice argileuse. Une surface de cisaillement probable est toutefois identifiable vers 15-16 m de profondeur, qui pourrait se raccorder à celle observée plus bas dans la zone « du canal » (sondage S7-SC2). Dans cette zone, les éboulis apparaissent stables, mais un mouvement de cisaillement d'une épaisseur d'environ 1.5 m est identifié au sein de la couche d'argiles litées glacio-lacustres (d'ailleurs ponctuellement

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

Synthèse des essais de laboratoire n 1 :

Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Décembre 2022

désorganisées dans le sondage), imbibées en permanence (sous le niveau de la « nappe »). Les vitesses de déformations tendent à se corrélérer aux variations des niveaux piézométriques.

Un profil interprétatif établi par le Cerema en 2021 pour la zone du Haut-Quet, est présenté à titre d'illustration en Figure 17. À noter que la couche d'argile glacio-lacustre qui semble piloter les mouvements profonds n'est en réalité probablement pas horizontale. En effet, les observations du RTM, (voir (ONF-RTM 2019) et Figure 18) sur la base d'inclinomètres couvrant l'ensemble du versant, tendent à montrer que la surface de cisaillement s'avère approximativement continue et parallèle à la pente lorsqu'on l'observe à une plus grande échelle. Celle-ci pourrait toutefois traverser plusieurs couches ou être en réalité la manifestation de glissements imbriqués.

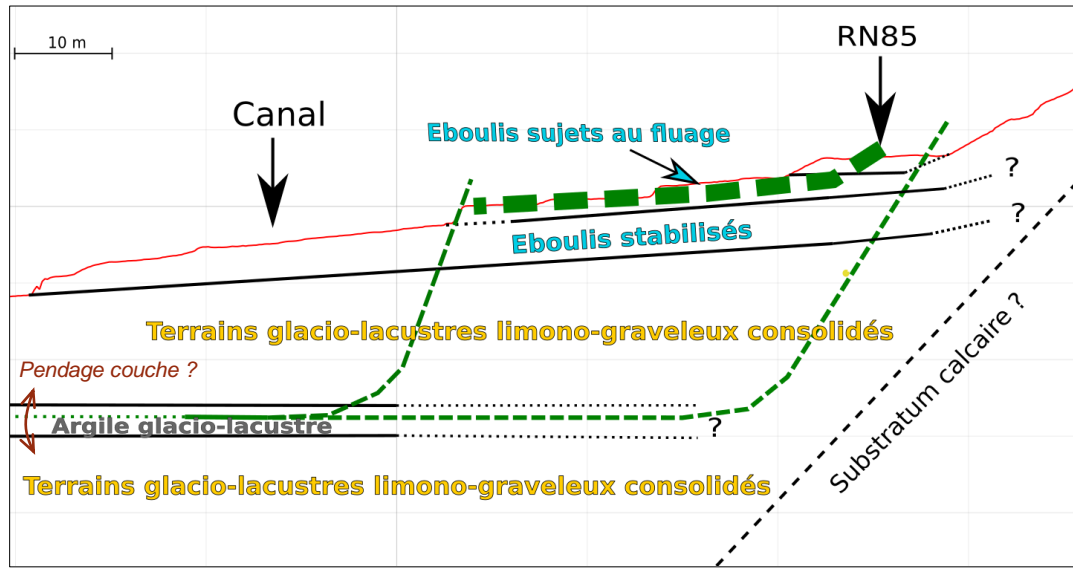


Figure 17 : Profil interprétatif d'ensemble des mouvements affectant le haut de la zone du village de Quet-en-Beaumont

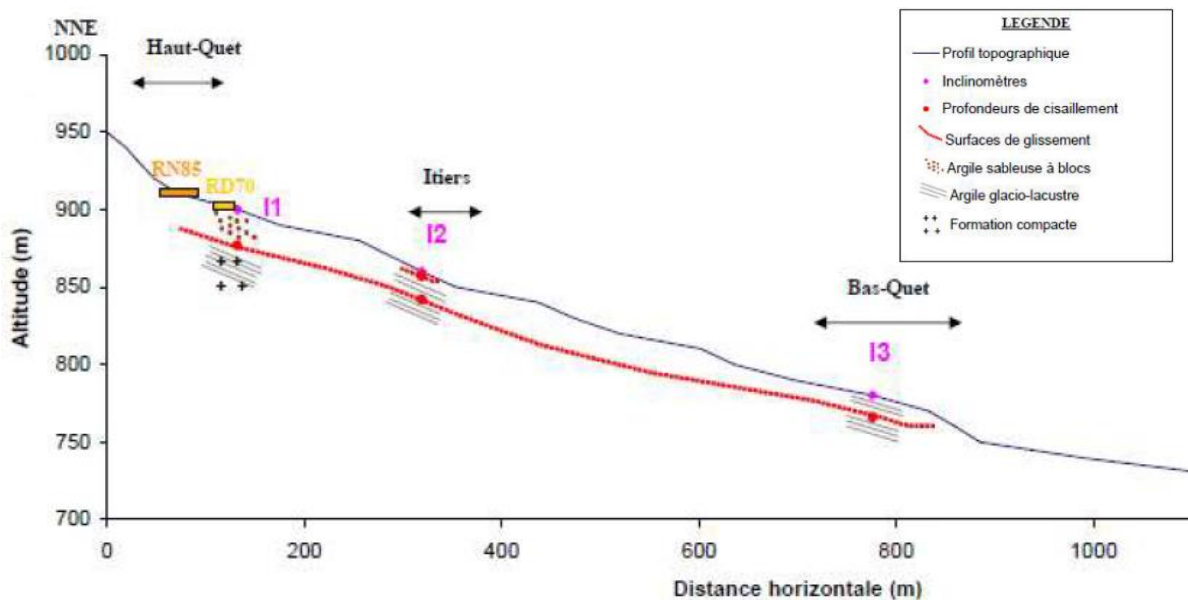


Figure 18 : Surfaces de cisaillement relevées sur les inclinomètres suivis par le RTM sur l'ensemble du versant de Quet-en-Beaumont, principalement au sein d'argiles glacio-lacustres (source : ONF-RTM, 2019)

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

Synthèse des essais de laboratoire n 1 :

Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Décembre 2022

4.2 Essais de laboratoire

4.2.1 Données antérieures

Aucune donnée d'essai antérieure au projet MLA3 n'a été identifiée pour les matériaux du glissement de Quet-en-Beaumont.

4.2.2 Essais effectués sur la période du projet MLA3 (2018-2022)

Les sondages carottés réalisés sur la période du projet ont permis d'acquérir des données géotechniques sur les sols en place. La Figure 19 permet d'observer l'hétérogénéité des prélèvements, à partir de quelques photographies de carottes.



Figure 19 : Quelques photographies des carottes prélevées sur le site de Quet-en-Beaumont : (en haut) S7-SC1 de 15.5 à 16.5 m – formation F2q, (au milieu) S7-SC2 de 18.5 à 20.0 m – formation F2q (en bas) S7-SC2 de 23.5 à 25.0 m – formation F2q

Les résultats des essais géotechniques sont rassemblés dans le Tableau 6 (implantations des sondages visibles sur la Figure 16, essais Cerema). Lorsque l'argilosité a été estimée par la valeur au bleu du sol au lieu de l'indice de plasticité, la classification USCS/LCPC a été remplacée par la correspondance de (Magnan et Youssefian 1989), prenant en compte cet essai. Les valeurs sont alors indiquées en italique dans la colonne « USCS / M.&Y. ».

Sondage	Prof. (m)	Passant à (%) :					Dmax (mm)	w _L (%)	w _p (%)	IP (%)	VBS	Couche	USCS M.&Y.	GTR
		2 μm	20 μm	50 μm	80 μm	2 mm								
S7-SC1	2,4	-	-	-	36	61	20	-	-	-	0.53	F0q	GL	A1
	5.2	24	51	55	59	67	20	-	-	-	1.21	F1q	Ap	A1
	9.7	24	50	51	52	58	20	-	-	-	0.63	F2q	Ap/Lp	A1
	15	-	-	-	20	41	20	-	-	-	0.24	F2q	GL	B5
	25	-	-	-	17	72	20	-	-	-	0.12	F2q	SL	B5
	26,5	-	-	-	25	43	40	-	-	-	0,29	F2q	GL	B5
S7-SC2	13.5	-	-	-	38	57	30	-	-	-	0.39	F2q	GL	A1

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

Synthèse des essais de laboratoire n 1 :

Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Décembre 2022

S7-SC2	18.5	-	-	-	26	42	20	-	-	-	0.25	F2q	GL	B5
	22.2	28	57	65	75	98	5	-	-	-	1.75	F2q	Ap	A1
	24.5	43	90	95	96	100	1	35	23	12	-	F2qa	Ap	A2
	24.8	36	93	98	99	100	0.5	45	27	18	-	F2qa	Ap/Lp	A2
	28.2	10	28	44	58	98	10	-	-	-	0.50	F2q	Ap	A1

Tableau 6 : Identifications géotechniques des sols sur le site de Quet-en-Beaumont, déterminées sur les prélèvements des sondages de 2018.

Par rapport aux autres sites étudiés dans le projet MLA3, seuls les deux prélèvements à 24.5 et 24.8 m dans le sondage S7-SC2 se rattachent réellement au **faciès d'argiles litées glacio-lacustres** mis en cause dans les glissements. On retrouve alors des identifications assez similaires aux autres sites, avec des classifications Ap/Lp (USCS) ou A2 (GTR). Les essais sur les autres prélèvements mettent clairement en évidence une **structure beaucoup plus sablo-graveleuse des échantillons**, avec des classifications fréquemment GL / SL (USCS) ou B5 (GTR). Les diamètres maximums D_{max} observés sont également plus élevés (20 à 50 mm). Cela est en bonne cohérence avec la coupe interprétative de la Figure 17.

Au niveau de la couche d'argiles litée F2qa, la fraction $< 2 \mu\text{m}$ (C_2) apparaît importante, entre 35 et 45 % en masse, pouvant indiquer une **forte proportion d'argiles** minéralogiques. Pour autant, si l'on calcule les indices d'activité de Skempton ($A_c = IP / C_2$), on observe des valeurs plutôt faibles, autour de 0.6-0.7, indiquant essentiellement des **argiles peu actives** (donc peu ou pas de montmorillonites / smectites par exemple).

Les 6 prélèvements des couches F1q, F2q et F2qa ayant fait l'objet de sédimentométries (fraction $< 80 \mu\text{m}$) peuvent également être positionnés dans le **triangle de textures du GEPPA** (Figure 20). On retrouve l'hétérogénéité des couches sablo-graveleuses F1q et F2q qui apparaissent essentiellement comme des limons sableux (LAS / Lsa), les dénominations de cette classification ne prenant pas en compte la fraction graveleuse. La couche glacio-lacustre F2qa se classe dans le domaine des sols argileux (A) à argilo-limoneux (Al), en cohérence avec les faciès équivalents trouvés sur les autres sites d'étude.

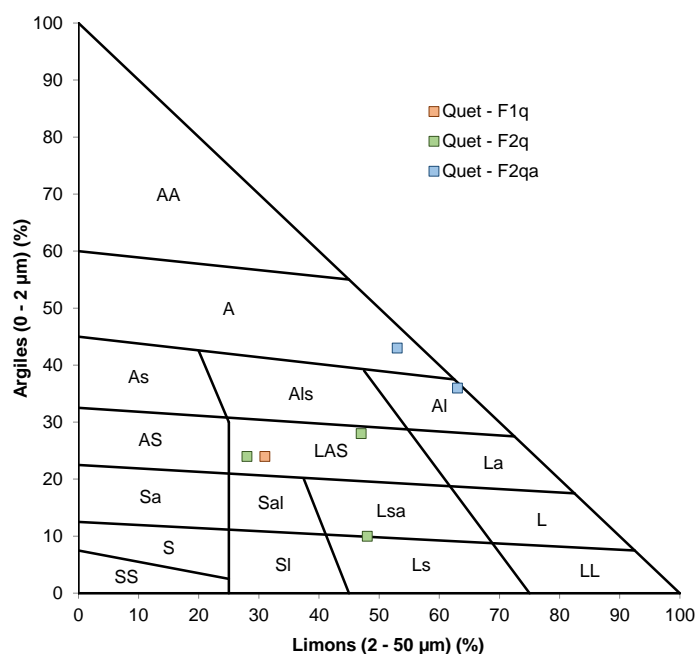


Figure 20 : Positionnement des prélèvements de 2018 du site de Quet-en-Beaumont dans le triangle de textures du GEPPA

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

Synthèse des essais de laboratoire n 1 :

Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Décembre 2022

Des **mesures de teneur en eau** ont également été réalisées par le Cerema sur les prélèvements du site de Quet-en-Beaumont. Bien qu'elles ne correspondent pas à des caractéristiques intrinsèques du matériau, puisqu'elles varient en fonction de la position de la nappe ou de l'impluvium, elles permettent de disposer d'une approximation de l'état hydrique des sols en place. Elles sont rassemblées ci-dessous à titre informatif.

On observe essentiellement une forte hétérogénéité des teneurs en eau relevées, en lien avec la diversité des matériaux, l'eau ayant tendance à s'adsorber principalement sur les fractions fines (en particulier argileuses). De manière cohérente, les plus fortes humidités sont mesurées dans la couche d'argiles litées glacio-lacustres F2qa, où des hétérogénéités locales restent toutefois présentes.

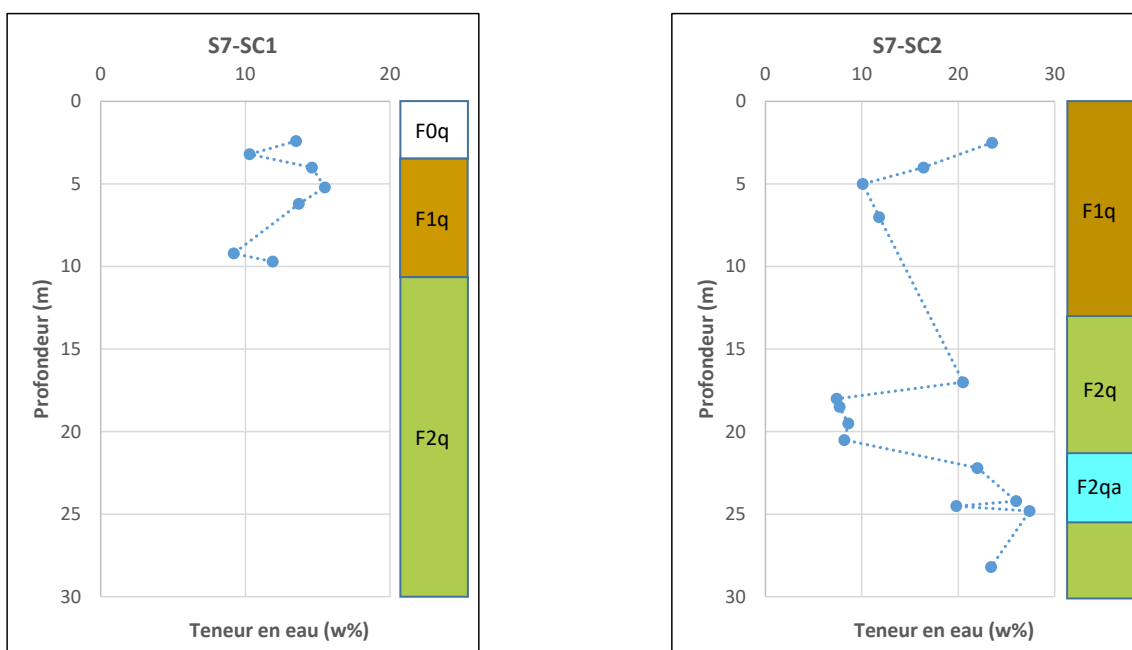


Figure 21 : Site de Quet-en-Beaumont : mesures de teneur en eau en fonction de la profondeur sur les deux sondages S7-SC1 et S7-SC2 (prélèvements du 30/05/2018 au 12/06/2018)

Enfin, deux prélèvements du site de Quet-en-Beaumont ont pu faire l'objet de mesures de **teneur en carbonates**. Les résultats sont présentés ci-après. Les échantillons, prélevés dans des zones à dominante silto-limoneuse du faciès F2q apparaissent « faiblement marneux » à « marneux ».

Sondage	Prof. (m)	Couche	Teneur en carbonates	Qualificatif
S7-SC1	20.5	F2q	34 %	Marneux
S7-SC2	21.5	F2q	21 %	Faiblement marneux

Tableau 7 : Teneurs en carbonates mesurées sur des échantillons du site de Quet-en-Beaumont

5 SITE DES TOUCHES

5.1 Contexte géologique et mécanismes à l'œuvre

5.1.1 Géologie locale

Le site 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 22).

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) :
 - les marnes du Domérien comprenant des bancs calcaires ocreux roux à la base marquant la transition progressive avec le Carixien Supérieur (notées l6a),
 - les calcaires rubannés du Carixien Supérieur (notés l5b), constituant des alternances de calcaires bleus fins et de calcaires ocres plus détritiques et plus argileux,
 - les calcaires gris du Carixien (notés l5a).

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).

Enfin, 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...).

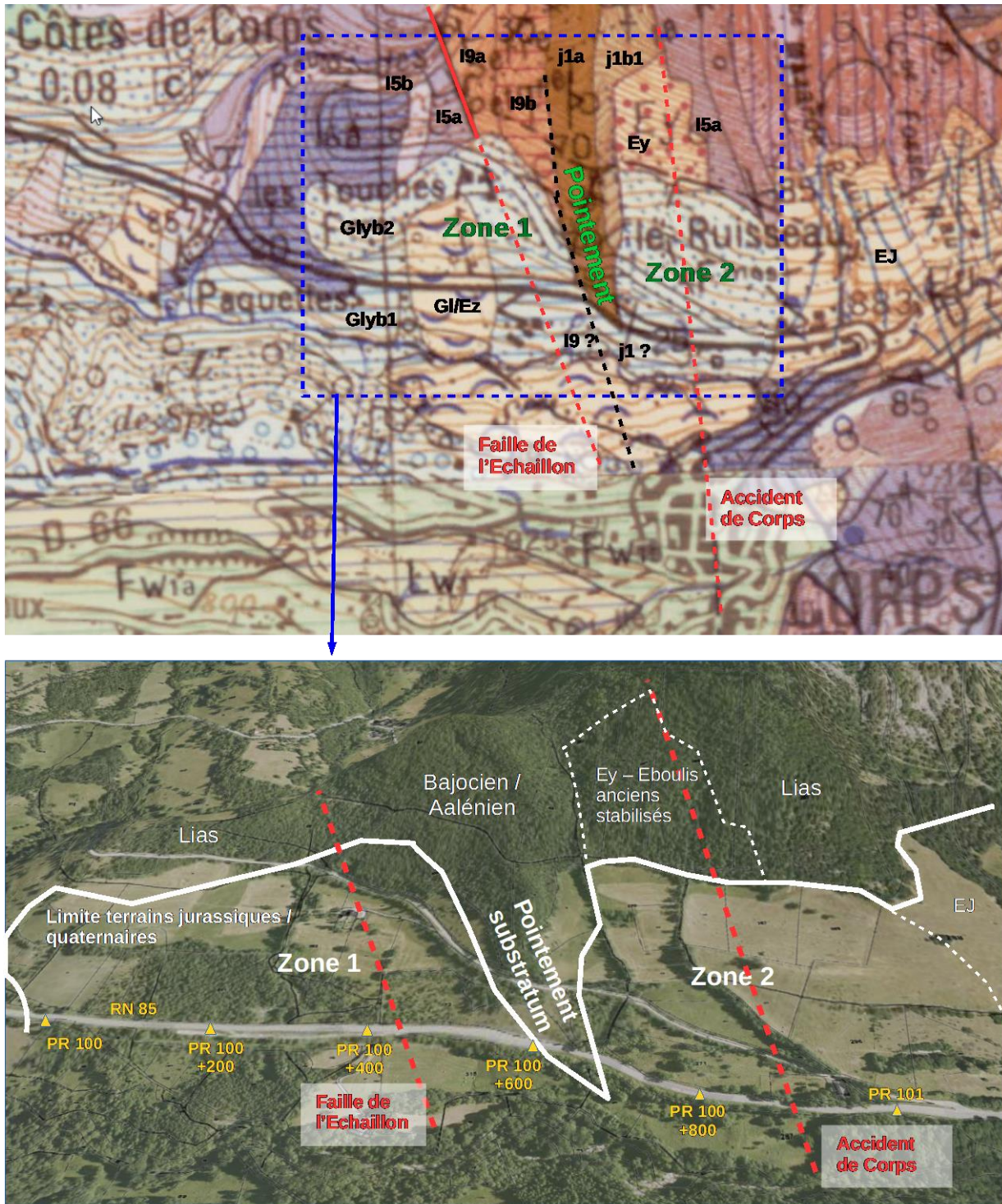


Figure 22 : (en haut) Extrait annoté des cartes géologiques de La Mure et de Saint-Bonnet dans la zone des Touches (source BRGM), et (en bas) Figuration des principaux ensembles sur vue satellite 3D (source Cerema sur fond Google Earth) (Cerema 2022)

5.1.2 Structure des terrains et mécanismes de glissement

Les différentes études réalisées sur ce site, synthétisées notamment dans (Cerema 2022), montrent 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),

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

Synthèse des essais de laboratoire n 1 :

Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Décembre 2022

- une couche blocailleuse et perméable emballée dans une matrice argilo-sableuse (F3),
- une couche d'argiles sableuses glacio-lacustres litées bleu-grises (F2, voir Figure 25),
- un limon argileux brun-vert à gris-jaune (F1) en surface (voir Figure 25).

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, présentées en Figure 23 et en Figure 24, permettent de disposer d'un aperçu de cette variabilité.

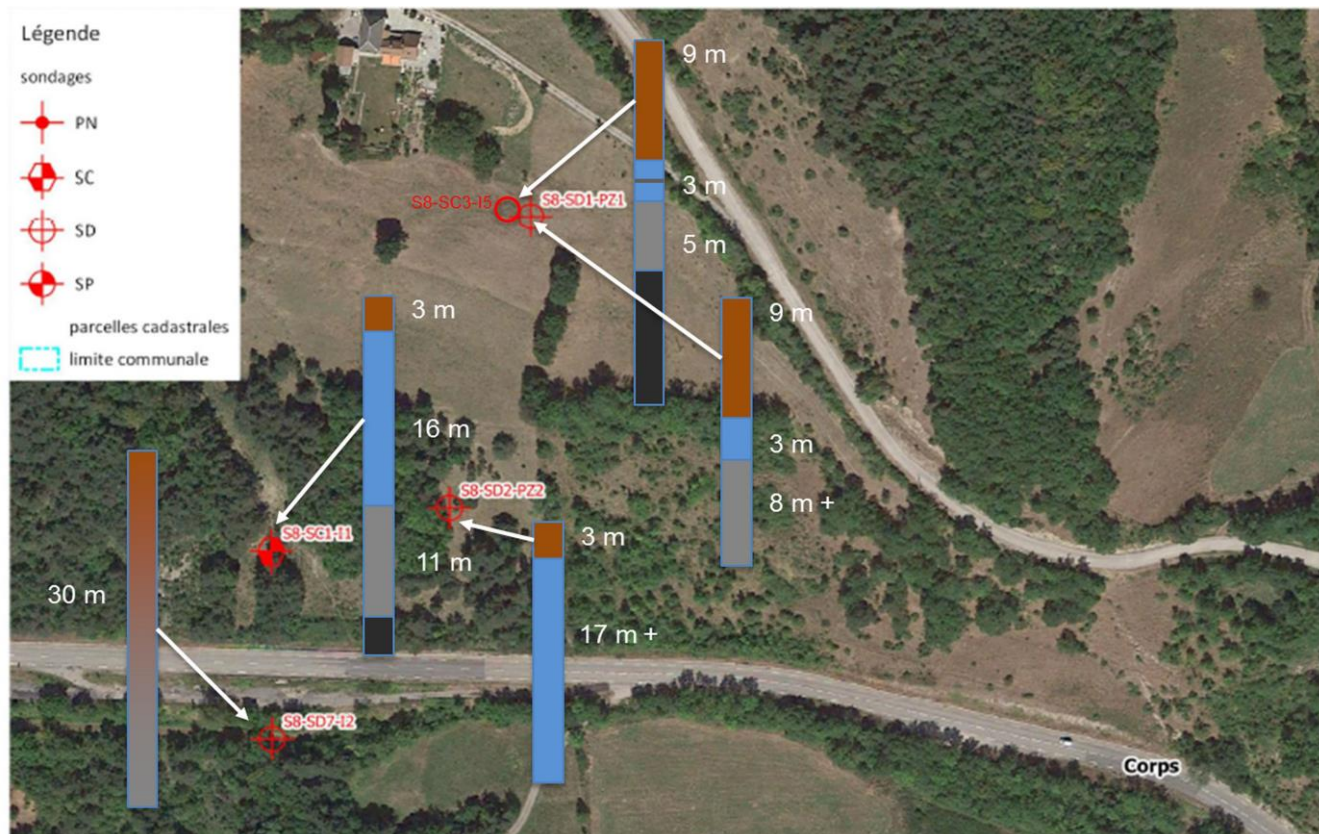


Figure 23 : Représentation synthétique des couches rencontrées dans les sondages de 2018 et 2021 sur la zone 1 de glissement du site des Touches. Échelle de profondeur arbitraire. Code couleur : marron = F1, bleu = F2, gris = F3, noir = F4.

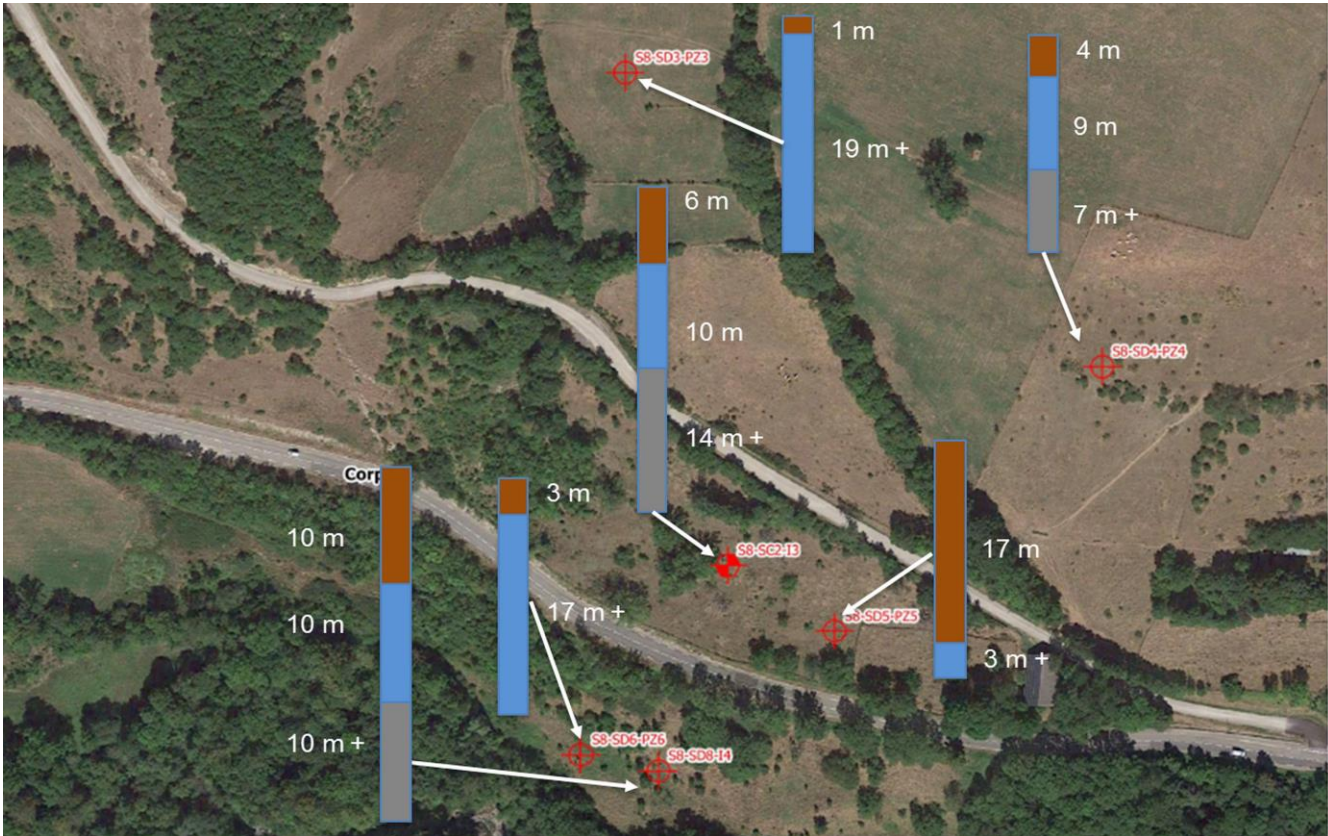


Figure 24 : Représentation synthétique des couches rencontrées dans les sondages de 2018 et 2021 sur la zone 2 de glissement du site des Touches. Échelle de profondeur arbitraire. Code couleur : marron = F1, bleu = F2, gris = F3, noir = F4.

Le site est également marqué par de **fortes contraintes hydrauliques**, qui sont visibles à travers les multiples sources présentes dans le versant et par le recours historique aux drainages. La morphologie des terrains montre des zones de glissement au carrefour des écoulements du versant amont, qui s'y concentrent. Cet effet est vraisemblablement favorisé par une forme « en gouttière » ou en creux du substratum dans les deux zones, qui canalise les eaux. Les mesures piézométriques démontrent 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. À noter que sur la zone 2 de glissement (moins active), la nappe semble se rabattre normalement 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 10 m**, systématiquement au sein des argiles glacio-lacustres F2, dont les évolutions sont directement corrélées aux niveaux piézométriques. Les mouvements disparaissent quasiment en période sèche et se réactivent fortement en période humide.

Les terrains ayant fait l'objet d'essais de laboratoire sur ce site sont ceux des couches F1 et F2. La Figure 25 en montre deux carottes typiques à titre d'illustration. La couche F2 est très similaire visuellement aux argiles litées glacio-lacustres rencontrées sur d'autres sites (Charlaix par exemple).



Figure 25 : Sondages de 2018 sur le site des Touches :
(en haut) Echantillon carotté de la couche F1 issu du sondage S8-SC2-I3, 4.50 à 5.80 m de profondeur
(en bas) Echantillon carotté de la couche F2 issu du sondage S8-SC2-I3 de 4.50 à 5.80 m de profondeur
(photos Cerema)

5.2 Essais de laboratoire

5.2.1 Données antérieures

Peu de données antérieures sur les propriétés des matériaux sont disponibles sur ce site.

Dans son étude de 1994 (SAGE 1994), le bureau d'études Sage avait toutefois réalisé des essais d'identification à environ 3 m de profondeur, dans les « colluvions de pente » de la zone 2 de glissement, au sein de deux sondages à la pelle mécanique TP-1 et TP-2. Ces essais avaient mis en évidence des argiles peu plastiques (Ap – classification GTR A2), avec des teneurs en eau supérieures à la limite de plasticité, dont les caractéristiques sont résumées dans le Tableau 8. Les descriptions géotechniques permettent par ailleurs de raccrocher ces prélèvements à la couche F2, bien qu'il puisse s'agir également de passées plus argileuses au sein de la couche F1.

Sondage	Prof. (m)	Passant à (%) :					Dmax (mm)	w _L (%)	w _P (%)	IP (%)	VBS	Couche	USCS M.&Y.	GTR
		2 μm	20 μm	50 μm	80 μm	2 mm								
TP-1	3.1	24	81	95	97	99	10	36.8	25.4	17.3	-	F2 / F1 ?	Ap	A2
TP-2	2.6	32	86	95	97	99	20	41.5	25.3	19.9	-	F2 / F1 ?	Ap	A2

Tableau 8 : Identifications géotechniques effectuées par le bureau d'études SAGE sur le site des Touches en 1994 (RN85 - PR 100+800 – Zone 2 de glissement)

5.2.2 Essais effectués sur la période du projet MLA3 (2018-2022)

Les sondages réalisés sur la période du projet ont permis d'acquérir des données complémentaires sur les sols en place. Celles-ci sont rassemblées dans le Tableau 9 et dans le Tableau 10 (implantations des sondages visibles sur la Figure 23 et la Figure 24, essais Cerema).

Lorsque l'argilosité a été estimée par la valeur au bleu du sol au lieu de l'indice de plasticité, la classification USCS/LCPC a été remplacée par la correspondance de (Magnan et Youssefian 1989), prenant en compte cet essai. Les valeurs sont alors indiquées en italique dans la colonne « USCS / M.&Y. ».

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

Synthèse des essais de laboratoire n 1 :

Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Décembre 2022

Sondage	Prof. (m)	Passant à (%) :					Dmax (mm)	w _L (%)	w _p (%)	IP (%)	VBS	Couche	USCS M.&Y.	GTR
		2 μm	20 μm	50 μm	80 μm	2 mm								
S8-SC1-11	2,2	37	78	89	95	99	1	-	-	-	1,51	F1	Ap	A1
	4,0	45	87	92	96	100	10	37	23	14	-	F2	Ap	A2
	8,7	30	65	84	93	99	5	-	-	-	1,35	F2	Ap	A1
	14,0	35	83	89	95	98	5	-	-	-	1,36	F2	Ap	A1
	20,0	-	-	-	34	60	40	-	-	-	0,48	F3	SA	B5
S8-SD1	3,0	26	55	60	62	79	20	-	-	-	1,20	F1	Ap	A1
S8-SD2	1,5	36	81	91	93	97	4	-	-	-	1,62	F1	Ap	A1
	4,5	36	77	81	85	99	4	-	-	-	1,61	F2	Ap	A1

Tableau 9 : Identifications géotechniques des sols sur la zone 1 de glissement du site des Touches, déterminées sur les prélèvements des sondages de 2018.

Sondage	Prof. (m)	Passant à (%) :					Dmax (mm)	w _L (%)	w _p (%)	IP (%)	VBS	Couche	USCS M.&Y.	GTR
		2 μm	20 μm	50 μm	80 μm	2 mm								
S8-SC2-13	2,3	33	70	77	81	93	10	-	-	-	1,59	F1	Ap	A1
	4,5	47	90	94	97	98	5	43	27	16	-	F1	Ap/Lp	A2
	7,7	41	87	94	98	99	5	34	23	11	-	F2	Ap/Lp	A1
	15,0	36	87	96	99	100	0,2	-	-	-	1,66	F2	Ap	A1
	21,0	-	-	-	20	49	20	-	-	-	0,15	F3	Ap	B5
	26,5	-	-	-	44	69	20	-	-	-	0,55	F3	Ap	A1
S8-SD3	2,5	45	88	93	97	99	5	44	29	15	-	F2	Lp	A2
	5,5	49	94	97	98	99	5	40	23	17	-	F2	Ap	A2
S8-SD4	2,5	42	93	95	97	98	10	-	-	-	1,82	F2	Ap	A1
	5,5	34	83	90	98	99	4	-	-	-	1,86	F2	Ap	A1
S8-SD5	2,5	32	71	77	81	93	5	-	-	-	1,20	F1	Ap	A1
	5,5	37	84	87	88	93	10	-	-	-	1,30	F1	Ap	A1

Tableau 10 : Identifications géotechniques des sols sur la zone 2 de glissement du site des Touches, déterminées sur les prélèvements des sondages de 2018.

Les **formations litées glacio-lacustres** typiques, correspondant à la couche F2, montrent une notable homogénéité dans les essais réalisés sur ce site. Les terrains sont essentiellement argilo-limoneux, avec des classifications A1 – A2 (GTR) ou Ap / Lp (USCS / M.&Y). À noter que les couches de couverture F1 présentent également des caractéristiques proches.

Les **proportions d'argile** (assimilées à la fraction < 2 μm, C₂) sont dans l'ensemble élevées, la plupart du temps entre 30 et 45 %. Ces fortes valeurs ne se traduisent toutefois pas par des indices de plasticité ou des valeurs au bleu fortes. L'indice d'activité de Skempton ($A_c = IP / C_2$) peut être calculé à -4,0 m dans S8-SC1 : on obtient $A_c \approx 0,3$ ce qui semble excessivement bas pour des argiles minéralogiques. De même, l'indice $A_{CB} = VBS / C_2 \times 100$, basé sur la valeur au bleu du sol, donne après calcul des résultats compris entre 3.7 et 5.5 caractéristiques d'argiles peu actives. Ces observations indiquent qu'une partie de la fraction < 2 μm n'est probablement pas constituée uniquement d'argile minéralogique mais d'autres particules de très petit diamètre, et/ou que l'argile en présence est peu active.

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

Synthèse des essais de laboratoire n 1 :

Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Décembre 2022

Les prélèvements des couches F1 et F2 peuvent également être positionnés dans le **triangle de textures du GEPPA** (Figure 26). On retrouve bien l'homogénéité des matériaux, notamment pour la couche F2 qui se situe essentiellement dans le domaine des sols argileux (A) et argilo-limoneux (Al). Les plus fortes proportions de sables (jusqu'à la classe LAS) sont rencontrées dans la couche F1 superficielle.

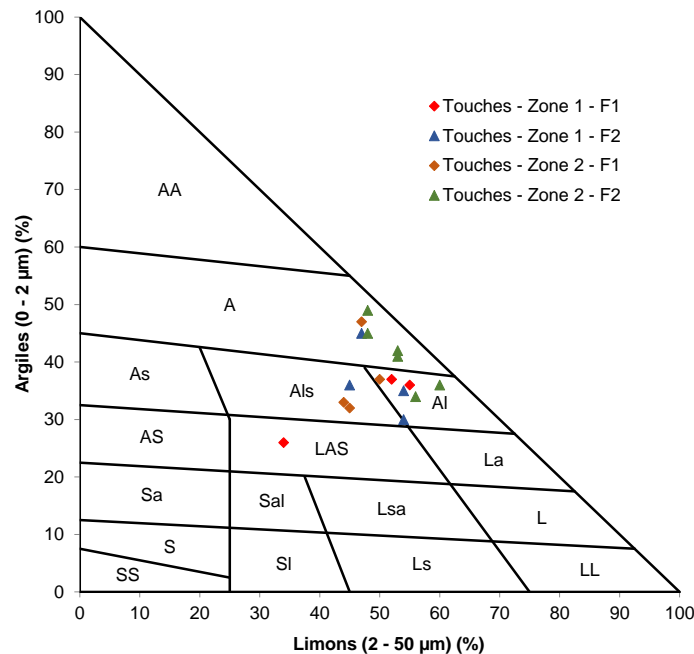


Figure 26 : Positionnement des prélèvements de 2018 du site des Touches dans le triangle de textures du GEPPA

Des **mesures de teneur en eau** ont également été réalisées par le Cerema sur les prélèvements du site des Touches. Bien qu'elles ne correspondent pas à des caractéristiques intrinsèques du matériau, puisqu'elles varient en fonction de la position de la nappe ou de l'impluvium, elles permettent de disposer d'une approximation de l'état hydrique des sols en place. Elles sont donc rassemblées ci-dessous à titre informatif.

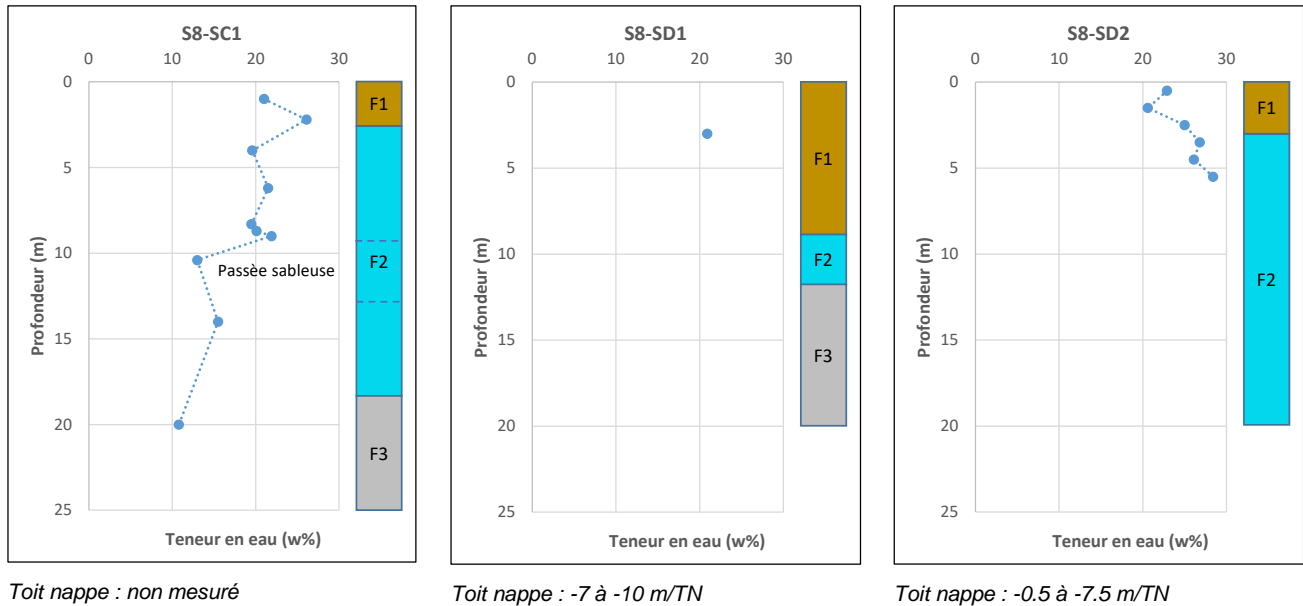


Figure 27 : Site des Touches : mesures de teneur en eau en fonction de la profondeur sur trois sondages de la zone 1 de glissement (prélèvements du 18/04/2018 au 04/05/2018)

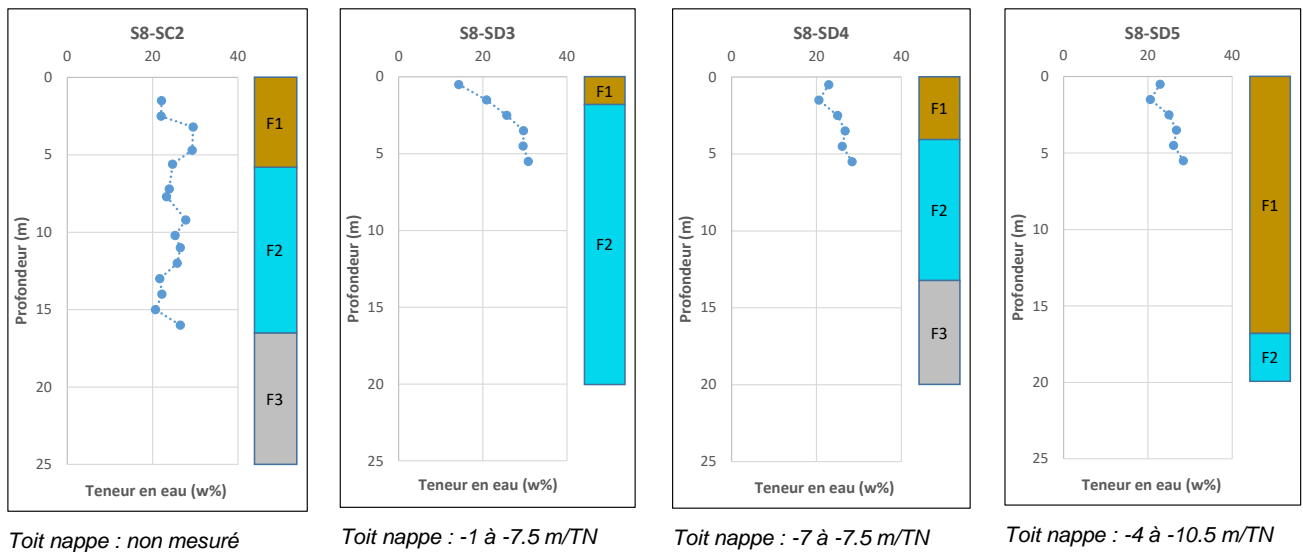


Figure 28 : Site des Touches : mesures de teneur en eau en fonction de la profondeur sur quatre sondages de la zone 2 de glissement (prélèvements du 23/04/2018 au 03/05/2018)

Les **teneurs en eau relevées sont élevées**, souvent entre 20 et 30%, indiquant des états humides du matériau. Ce constat est à rapprocher des fortes contraintes hydriques du site, citées antérieurement. À noter que la plupart des sondages tendent à montrer un accroissement des teneurs en eau avec la profondeur, pouvant être liée à une imbibition principalement issue de la nappe (battements et/ou remontées capillaires). Le forage S8-SC1 en revanche montre un profil décroissant : cela laisse supposer dans ce cas un rôle prépondérant de l'impluvium, avec une couche sableuse en profondeur pouvant favoriser les drainages.

Certains prélèvements intacts ont également pu faire l'objet de **mesures de masse volumique**, qui sont rassemblées dans le Tableau 11. De manière générale, les masses volumiques sèches apparaissent faibles ($< 1.7 \text{ Mg/m}^3$) et témoignent d'un compactage modéré des sols : cela peut être dû à leur mode de dépôt, ou à leur remaniement progressif par le glissement de terrain au cours du temps.

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

Synthèse des essais de laboratoire n 1 :

Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Décembre 2022

Les taux de saturation sont élevés, permettant de considérer que les matériaux sont dans un état saturé ou quasi-saturé quelle que soit la profondeur (y compris hors nappe).

Remarque : les valeurs de $S_r > 100\%$ peuvent être liées à des incertitudes sur la mesure ou l'estimation de ρ_s , ou à une sur-imbibition de la périphérie de la carotte par un fluide de forage, si les mesures n'ont pas pu être réalisées au cœur de l'échantillon.

Sondage	Prof. (m)	Couche	ρ (Mg/m ³)	ρ_s (Mg/m ³)	w (%)	ρ_d (Mg/m ³)	Sr (%)
S8-SC1-I1	6.2	F2	2.03	2.63	21.5	1.66	97
	7.8	F2	2.04	2.65 (est.)	23	1.67	104
S8-SC2-I3	3.8	F1	1.98	2.65 (est.)	25.6	1.57	99
	4.7	F1	1.99	2.68	29.3	1.58	112
	5.3	F1	2.05	2.68 (est.)	22.5	1.68	100
	7.7	F2	2.05	2.74	23.3	1.65	97

Tableau 11 : Mesure des masses volumiques (ρ : masse volumique humide, ρ_s : masse volumique des grains (est. = estimée)) et des teneurs en eau (w), et calcul des masses volumiques sèches (ρ_d) et des taux de saturation en eau (Sr) sur les prélèvements du site des Touches

Enfin, deux prélèvements du site des Touches ont pu faire l'objet de mesures de teneur en carbonates. Les résultats sont présentés ci-après. Les deux résultats sont homogènes ; les argiles litées glacio-lacustres apparaissent « faiblement marneuses » à « marneuses ».

Sondage	Prof. (m)	Couche	Teneur en carbonates	Qualificatif
S8-SC1-I1	8.5	F2	26 %	Faiblement marneux
S8-SC2-I3	12.1	F2	33 %	Marneux

Tableau 12 : Teneurs en carbonates mesurées sur des échantillons du site des Touches

6 SITE DE CORPS

6.1 Contexte géologique

6.1.1 Géologie locale et délimitation du glissement

Le site du glissement de Corps se situe en symétrique de celui des Touches par rapport au ruisseau de la Sézia, et présente donc un contexte géologique similaire (voir section 5.1.1 et Figure 22 (haut)).

Les formations glacio-lacustres d'âge Würmien (Quaternaire), résultant du comblement de l'ancien lac glaciaire du Beaumont, constituent la terrasse de Pellafol (ou plateau de Corps), dont la surface est quasi-plane et horizontale, entaillée par la Sézia, affluent du Drac. Il s'agit d'argiles sableuses litées, ou argiles varvées, du Beaumont (voir section 1), généralement peu à moyennement plastiques. D'anciennes alluvions grossières du Würm (cailloutis) et des dépôts de la glaciation précédente du Riss pourraient être intercalés entre le substratum rocheux et les formations glacio-lacustres. L'épaisseur maximale de ces formations würmiennes atteint près de 120 m à Corps.

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

La zone plus spécifiquement étudiée est entourée sur la Figure 29 ci-dessous. En se référant également à la Figure 22, on observe que l'instabilité des terrains était déjà référencée sur la carte géologique.

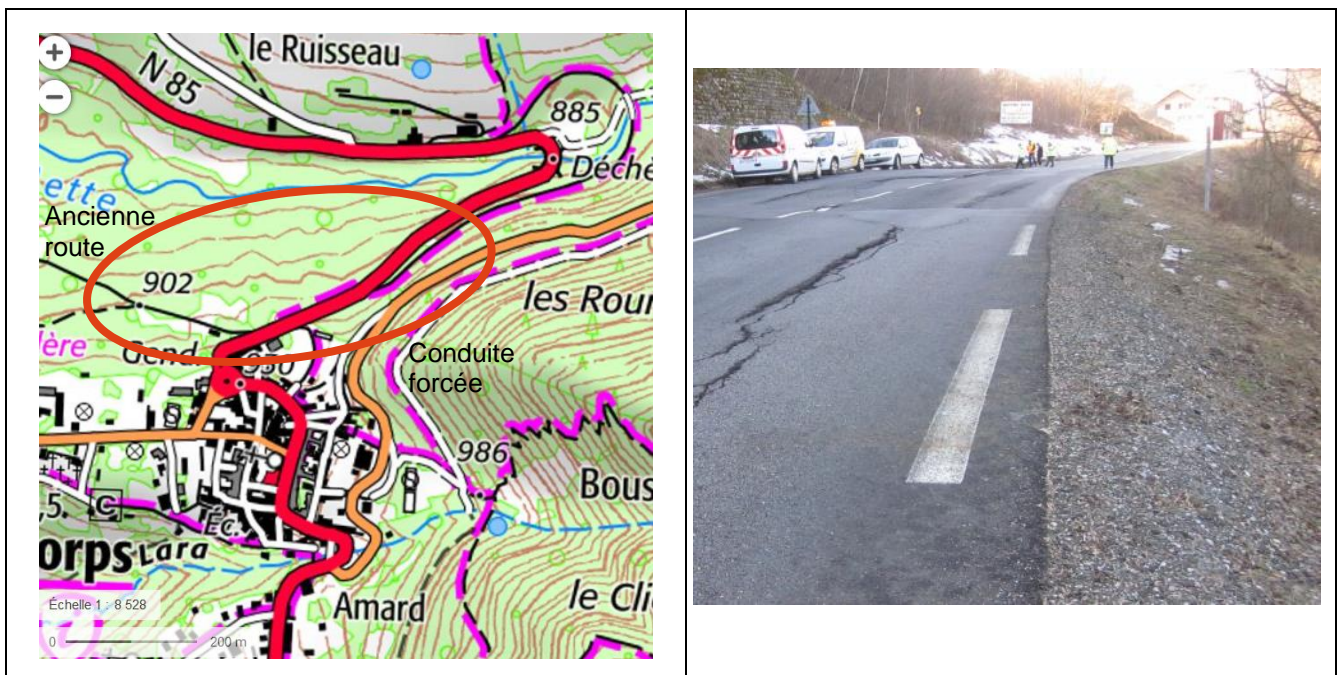


Figure 29 : (à gauche) Zone de mouvements de terrains étudiée au voisinage de Corps, sur fond de carte topographique IGN (source : Géoportail) et (à droite) Pathologies sur la RN85 au niveau de l'escarpement principal.

Le glissement évolue en direction de la Sézia, et présente un escarpement principal assez bien délimité, qui s'approche des zones construites du Nord de Corps, intercepte la RN85 et y génère des pathologies très récurrentes (voir photographie de la Figure 29). Sur la Figure 30, qui reprend un extrait du relevé LIDAR réalisé dans le cadre du projet MLA3, le tracé observable de l'escarpement principal du glissement a été figuré en pointillés rouges.

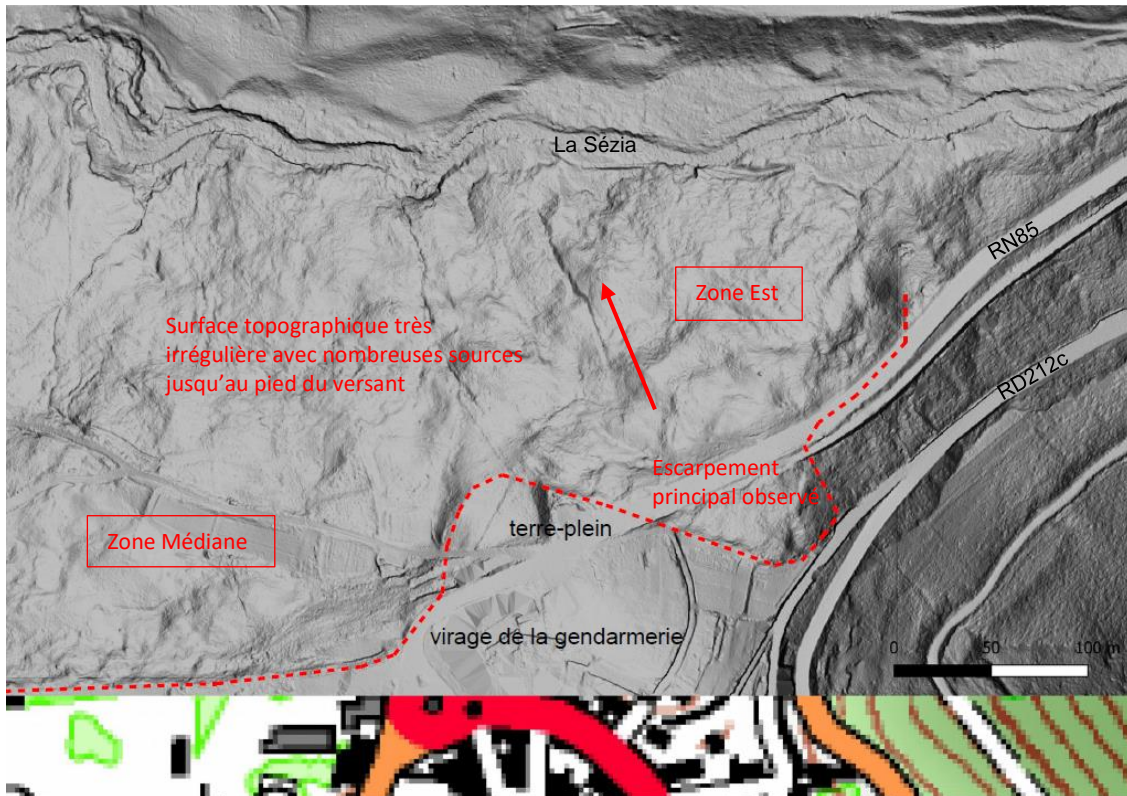


Figure 30 : Délimitation de la zone de glissement sur fond de relevé LIDAR

6.1.2 Structure des terrains et mécanismes de glissement

Les emplacements des sondages réalisés en 2018 et ayant permis d'acquérir les résultats d'essais de laboratoire sur la durée du projet MLA3 sont présentés en Figure 31.

Sur toute l'étendue du glissement de terrain, les sondages et les profils électriques et sismiques indiquent l'existence en surface d'une couche continue de sables graveleux, localement très humides, surmontant des argiles grises litées. Cette couche est également présente dans la partie inférieure du versant jusqu'à la berge de la Sézia où affleurent les argiles grises litées. L'épaisseur de cette couche superficielle semble légèrement diminuer en direction de la Sézia. En-dessous des argiles grises litées est présente une couche hétérogène formée d'intercalations de lentilles graveleuses dans des argiles grises, avant d'atteindre le substratum compact généralement profond. Certaines couches peuvent être absentes dans quelques sondages.

Le Tableau 13, tiré du rapport (Cerema 2021), précise la localisation des différentes couches dans les sondages.

Les désordres observés sur le site sont les manifestations en surface d'un vaste glissement de terrain naturel, dont la surface de glissement est située dans la frange supérieure, plus altérée, des argiles grises litées (couche F2c) et est alimentée en permanence par des circulations d'eau. Les surfaces de rupture sont identifiées entre 5 et 10 m de profondeur dans la zone Est et entre 11 et 15 m de profondeur dans la zone Médiane.

Deux facteurs déclenchants principaux sont par ailleurs identifiés :

- élévation des niveaux d'eau dans les sables graveleux de surface et les argiles grises litées,
- érosion torrentielle du pied du versant par la Sézia.

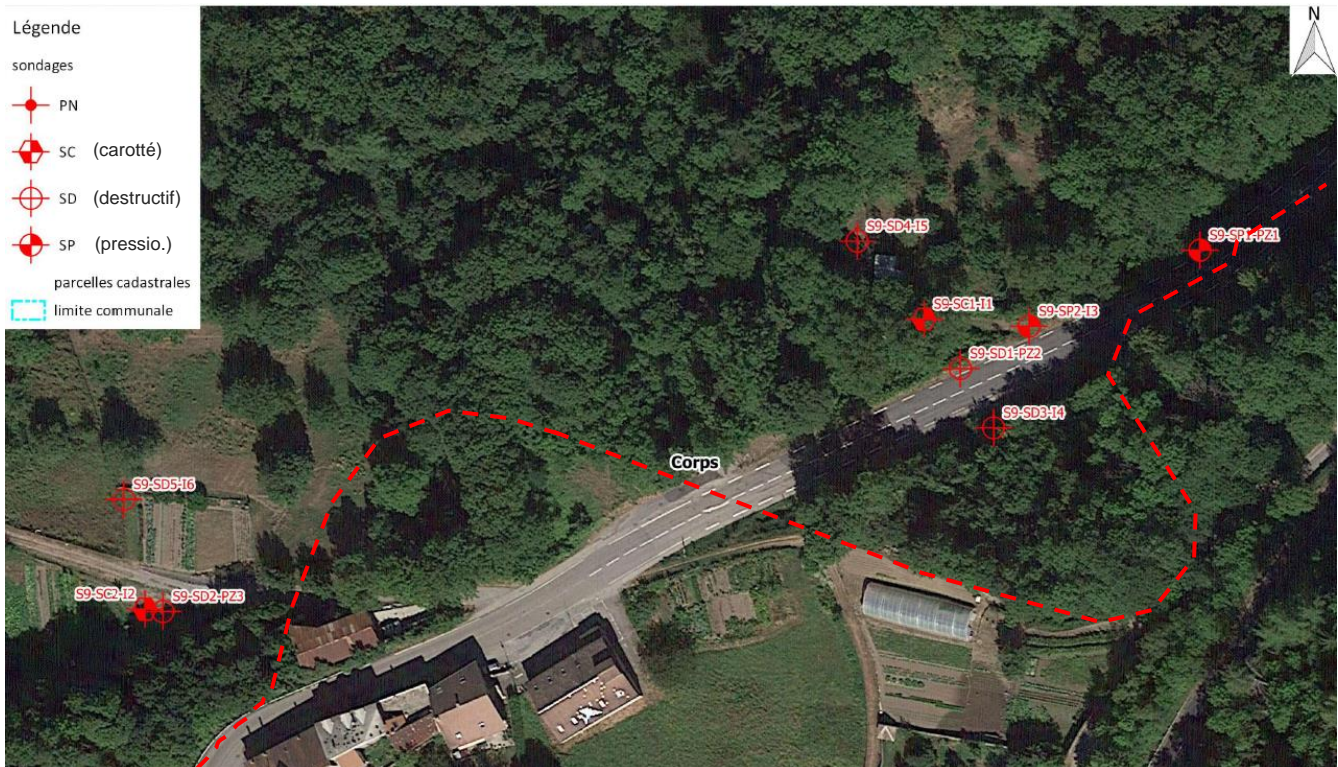


Figure 31 : Implantation des sondages réalisés en 2018 par l'entreprise Géotec sur le site de Corps, dont les échantillons ont été employés pour les essais de laboratoire du projet MLA3

Zone du glissement	Sondage	Formation F1c : sables graveleux de surface	Formation F2c : argiles grises litées	Formation F3c : intercalations / lentilles graveleuses dans les argiles grises litées	Formation F4c : rocher très compact (calcaire sombre à débit schisteux)
Glissement est	SC1-I1 (906,3)	0,7 à 6,5 m	6,5 à 16,2 m 18,1 à 19,6 m 22,0 à 24,5 m	16,2 à 18,1 m 19,6 à 22,0 m 24,5 à 28,3 m	28,3 à 30,0 m (arrêt)
	SP1-Pz1 (909,0)	1,1 à 6,4 m	absente	absente	6,4 à 12,5 m (arrêt)
	SP2-I3 (911,6)	0 à 5,5 m	5,5 à 14,7 m	14,7 à 18,5 m (arrêt)	non atteinte
	SD1-Pz2 (913,4)	1,0 à 7,0 m	7,0 à 19,2 m	19,2 à 25,0 m (arrêt)	non atteinte
	SD3-I4 (914,7)	1,0 à 3,7 m	3,7 à 17,5 m	17,5 à 25,0 m (arrêt)	non atteinte
	SD4-I5 (903,8)	1,0 à 5,0 m	5,0 à 20,0 m	non rencontrée	non atteinte
Partie médiane	SC2-I2 (910,8)	1,8 à 7,1 m	7,1 à 25,0 m (arrêt)	non rencontrée	non atteinte
	SD2-Pz3 (910,9)	2,0 à 6,5 m	6,5 à 25,0 m (arrêt)	non rencontrée	non atteinte
	SD5-I6 (908,9)	0,8 à 3,8 m	3,8 à 25,0 m (arrêt)	non rencontrée	non atteinte

Tableau 13 : Profondeur des différentes couches dans les sondages de 2018 du site de Corps

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

Synthèse des essais de laboratoire n 1 :

Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Décembre 2022

6.2 Essais de laboratoire

6.2.1 Données antérieures

Peu de données d'essais antérieures sont disponibles sur ce site. L'étude (ADRGT 1980) présentait quelques identifications de terrains sur des sondages destructifs à la tarière (sondage ST1 dans la zone Est du glissement, sondage ST2 dans la zone Médiane) pouvant correspondre, d'après les descriptions géologiques et les coupes interprétatives, aux couches d'argiles silteuses grises litées F2c. Toutefois, il pourrait aussi plus probablement s'agir de passées fines au sein de la formation F1c, compte-tenu des reconnaissances réalisées ultérieurement et des profondeurs considérées.

Comme sur le site voisin des Touches, ces essais avaient mis en évidence des argiles peu plastiques (Ap – classification GTR A2), avec une fraction argileuse peu active (Ac = IP / C₂ de l'ordre de 0.6 à 0.7). Les essais sont résumés dans le Tableau 14.

Sondage	Prof. (m)	Passant à (%) :					Dmax (mm)	w _L (%)	w _P (%)	IP (%)	VBS	Couche	USCS M.&Y.	GTR
		2 µm	20 µm	50 µm	80 µm	2 mm								
ST1	0.5	29	70	76	79	92	10	18.5	38.6	17.7	-	F1c / F2c ?	Ap	A2
ST2	1.0	18	70	96	98	100	2	25.4	31.2	12.2	-	F1c / F2c ?	Ap	A2
ST2	2.2	30	85	96	98	100	2	25.5	32.1	14.2	-	F1c / F2c ?	Ap	A2

Tableau 14 : Identifications géotechniques effectuées par l'ADRGT sur le site de Corps en 1980 à partir d'échantillons prélevés à la tarière

6.2.2 Essais effectués sur la période du projet MLA3 (2018-2022)

Les sondages réalisés sur la période du projet ont permis d'acquérir des données complémentaires sur les sols en place. Celles-ci sont rassemblées dans le Tableau 15 (implantations des sondages visibles sur la Figure 31, essais Cerema). Le sondage SC1-I1 est localisé dans la « Zone Est » du glissement alors que le SC2-I2 est dans la « Zone Médiane ».

Lorsque l'argilosité a été estimée par la valeur au bleu du sol au lieu de l'indice de plasticité, la classification USCS/LCPC a été remplacée par la correspondance de (Magnan et Youssefian 1989), prenant en compte cet essai. Les valeurs sont alors indiquées en italique dans la colonne « USCS / M.&Y. ».

Sondage	Prof. (m)	Passant à (%) :					Dmax (mm)	w _L (%)	w _P (%)	IP (%)	VBS	Couche	USCS M.&Y.	GTR
		2 µm	20 µm	50 µm	80 µm	2 mm								
S9-SC1-I1	7.9	48	89	95	99	100	5	-	-	-	1.85	F2c	Ap	A1
	13.2	58	97	99	100	100	2	-	-	-	2.25	F2c	At	A1/2
	14.7	40	75	82	92	99	5	-	-	-	1.58	F2c	Ap	A1
	15.6	58	96	98	99	100	5	41	16	25	-	F2c	Ap	A2/3
S9-SC2-I2	10.7	40	86	96	99	100	5	-	-	-	1.97	F2c	Ap	A1
	19.7	39	89	92	94	98	5	39	16	23	2.21	F2c	Ap	A1
	22.1	40	92	98	99	100	5	-	-	-	2.24	F2c	Ap	A1

Tableau 15 : Identifications géotechniques des sols sur les prélèvements issus des sondages de 2018 sur le site de Corps.

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

Synthèse des essais de laboratoire n 1 :

Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Décembre 2022

Les **formations litées glacio-lacustres** typiques, correspondant à la couche F2c, montrent comme dans le site voisin des Touches une certaine homogénéité, avec des classifications A1 – A2 – A3 (GTR) ou Ap / At (USCS / M.&Y). L'argilosité est toutefois en moyenne un peu plus importante qu'aux Touches.

Cela est confirmé par les **proportions granulométriques d'argiles** (assimilées à la fraction < 2 µm, C₂) élevées, entre 39 et 58 %, et les indices d'activité un peu plus forts. L'indice d'activité de Skempton ($A_c = IP / C_2$) peut par exemple être calculé sur les deux échantillons ayant fait l'objet de limites d'Atterberg : on obtient $A_c \approx 0,43$ et $A_c \approx 0,59$ respectivement (argiles restant peu actives néanmoins). L'indice $A_{CB} = VBS / C_2 \times 100$, basé sur la valeur au bleu du sol, donne après calcul des résultats compris entre 3.8 et 5.8, caractéristiques à nouveau d'argiles peu à moyennement actives. Ces observations indiquent probablement une faible proportion d'argiles sensibles dans le matériau.

Les prélèvements peuvent également être positionnés dans le **triangle de textures du GEPPA** (Figure 32). On retrouve bien des matériaux proches du site des Touches, dans le domaine des sols argileux à argilo-limoneux (A - Al), mais aussi deux points au sein des « argiles lourdes » AA pour le sondage SC1-I1 (à 13.2 et 15.6 m).

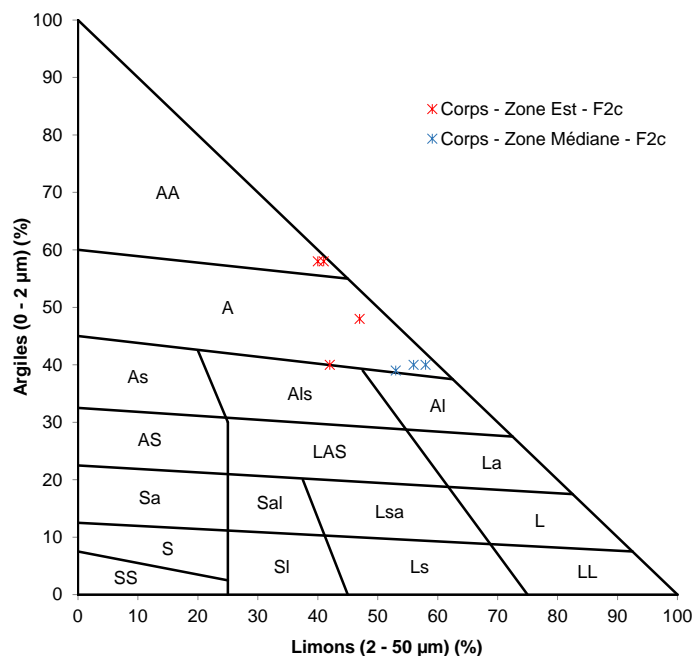


Figure 32 : Positionnement des prélèvements de 2018 du site de Corps dans le triangle de textures du GEPPA

Des **mesures de teneur en eau** ont également été réalisées par le Cerema sur les prélèvements du site de Corps. Bien qu'elles ne correspondent pas à des caractéristiques intrinsèques du matériau, puisqu'elles varient en fonction de la position de la nappe ou de l'impluvium, elles permettent de disposer d'une approximation de l'état hydrique des sols en place. Elles sont présentées ci-dessous à titre informatif.

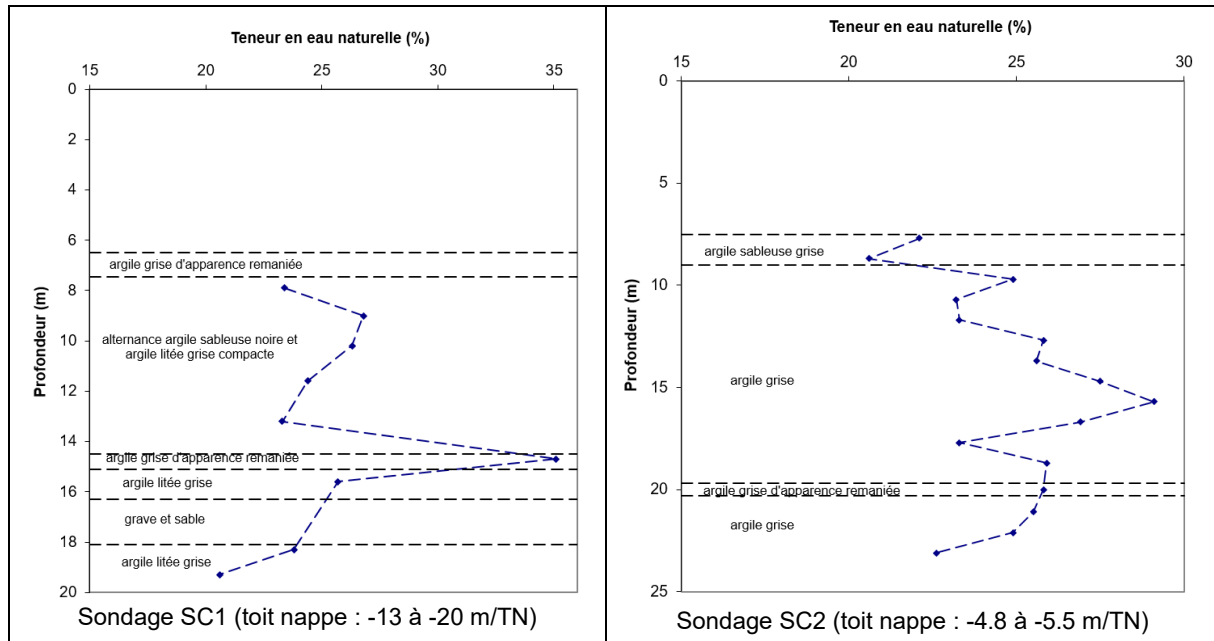


Figure 33 : Site de Corps : mesures de teneur en eau en fonction de la profondeur sur les sondages carottés SC1 et SC2 (prélèvements du 19/06/2018 au 05/07/2018)

Les matériaux présentent dans l'ensemble des humidités élevées, dont les hétérogénéités sont vraisemblablement liées aux plus ou moins fortes proportions d'argiles (l'eau étant préférentiellement adsorbée au sein des fractions fines). Les ordres de grandeur sont en moyenne similaires sous nappe et hors nappe (w autour de 25 %), ce qui laisse suspecter un état saturé permanent, en dehors des dessiccations saisonnières très superficielles.

Enfin, quelques prélèvements du site de Corps ont pu faire l'objet de mesures de teneur en carbonates. Les résultats sont présentés ci-après. Les argiles litées glacio-lacustres apparaissent « faiblement marneuses ». L'hétérogénéité avec la couche superficielle plus sablo-graveleuse se manifeste nettement.

Sondage	Prof. (m)	Couche	Teneur en carbonates	Qualificatif
S9-SC1-I1	5.5	F1c	61 %	Marneux
	12.1	F2c	18 %	Faiblement marneux
S9-SC2-I2	10.7	F2c	27 %	Faiblement marneux

Tableau 16 : Teneurs en carbonates mesurées sur des échantillons du site de Corps

7 SITE DU MOTTY / SAINT-FIRMIN

7.1 Contexte géologique et mécanismes à l'œuvre

7.1.1 Géologie locale

Le site du Motty / Saint-Firmin se présente comme une longue zone de glissements, parallèle au cours du Drac et en mouvement vers celui-ci, traversée sur près de 2 km par la RN85. L'instabilité de cette zone est bien connue et identifiée sur la carte géologique (voir Figure 34), à travers diverses formations actives :

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

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

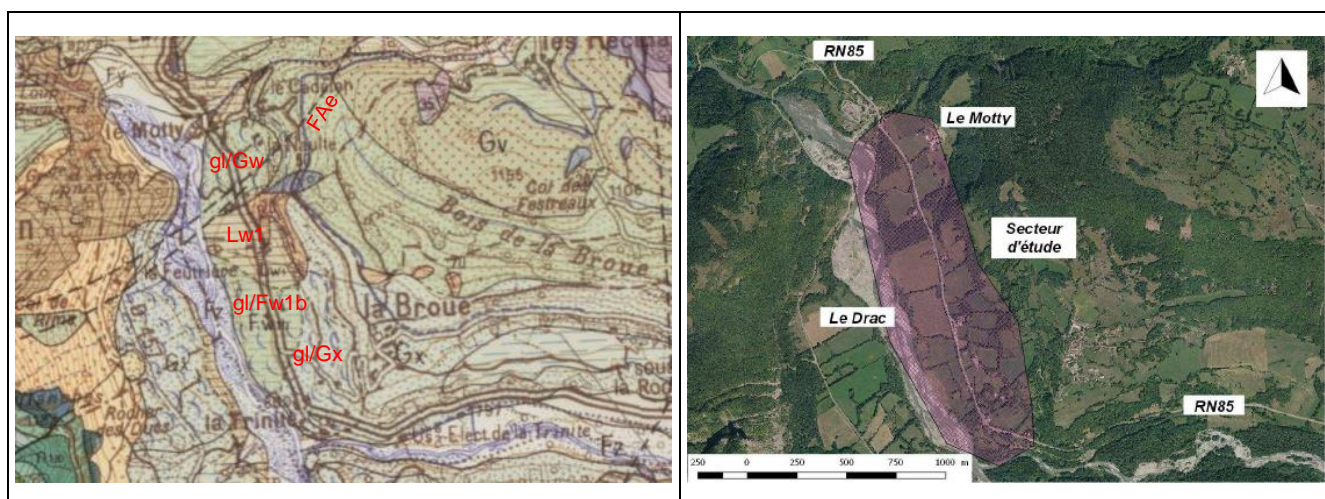


Figure 34 : (à gauche) Principales formations identifiées sur la carte géologique (1/50 000ème, source BRGM) dans la zone de glissement du Motty / Saint-Firmin ; (à droite) Délimitation générale des zones instables étudiées autour de la RN85, d'après (Cerema 2020)

En pratique, la stratigraphie se révèle irrégulière le long du glissement : les glaciations successives du Würm, les divagations du cours du Drac et les glissements ont modelé de manière plus ou moins enchevêtrée les différentes formations précédentes, que l'on retrouve ou non dans les forages. Les formations litées glacio-lacustres notamment sont moins constantes que sur les autres sites du projet MLA3, ce qui est cohérent avec l'implantation du site du Motty plus proche des ensembles glaciaires de la Séveraisse et du Drac que du lac d'obturation (voir Figure 2).

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

7.1.2 Structure des terrains et mécanismes de glissement

Le site du Motty / Saint-Firmin a été principalement étudié par le Cerema Méditerranée dans le cadre d'études de renforcement des terrains autour de la RN85. Il a fait l'objet d'une importante campagne de reconnaissances géotechniques en 2017 (Figure 35), environ 1 an avant le début du projet MLA3, suivie d'essais de laboratoire, de suivis instrumentés qui se poursuivent encore actuellement et de rapports d'études ou de calculs successifs. La description détaillée du glissement n'étant pas l'objet du présent livrable, le lecteur intéressé se pourra se reporter utilement aux coupes de sondage de (Geotec 2017) ou aux rapports produits par le Cerema Méditerranée sur ce site, comme (Cerema 2016), (Cerema 2019) ou (Cerema 2020).

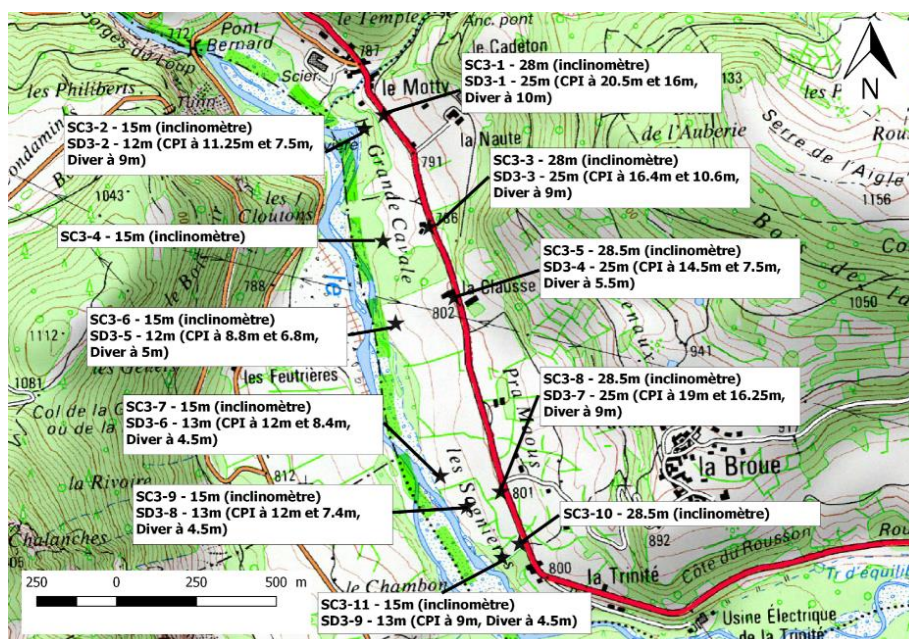


Figure 35 : Implantation des principaux forages de reconnaissance réalisés en 2017 sur le site du Motty / Saint-Firmin, avec l'instrumentation associée (source : Cerema Méditerranée)

Dans l'ensemble, les glissements observés concernent des **épaisseurs variables, avec des surfaces de cisaillement généralement comprises entre 7 et 15 m, mais pouvant atteindre ponctuellement une profondeur de 25 m**. Un résumé des profondeurs de rupture relevées sur les inclinomètres par le Cerema Méditerranée est donné en Figure 36. Contrairement aux autres sites étudiés ici, les surfaces de cisaillement ne se situent **pas systématiques au sein des formations d'argiles glacio-lacustres** (ou de leur contact). On retrouve également des zones de rupture au sein des formations alluvionnaires du Drac Fw1a/b, qui peuvent contenir des passages argileux (d'aspect proche). La Figure 37 présente à titre d'exemple une coupe géotechnique interprétative établie par le Cerema Méditerranée dans la zone du sondage SC3-8 (profil 5), mais qui ne peut pas être généralisée à l'ensemble du glissement, la répartition des couches en fonction de la profondeur pouvant être très variable d'un profil à l'autre. On retrouve toutefois sur quasiment tous les profils l'ordonnancement Gw/Gx – Fw1b – Lw – Fw1a, certaines couches pouvant être absentes en fonction des endroits.

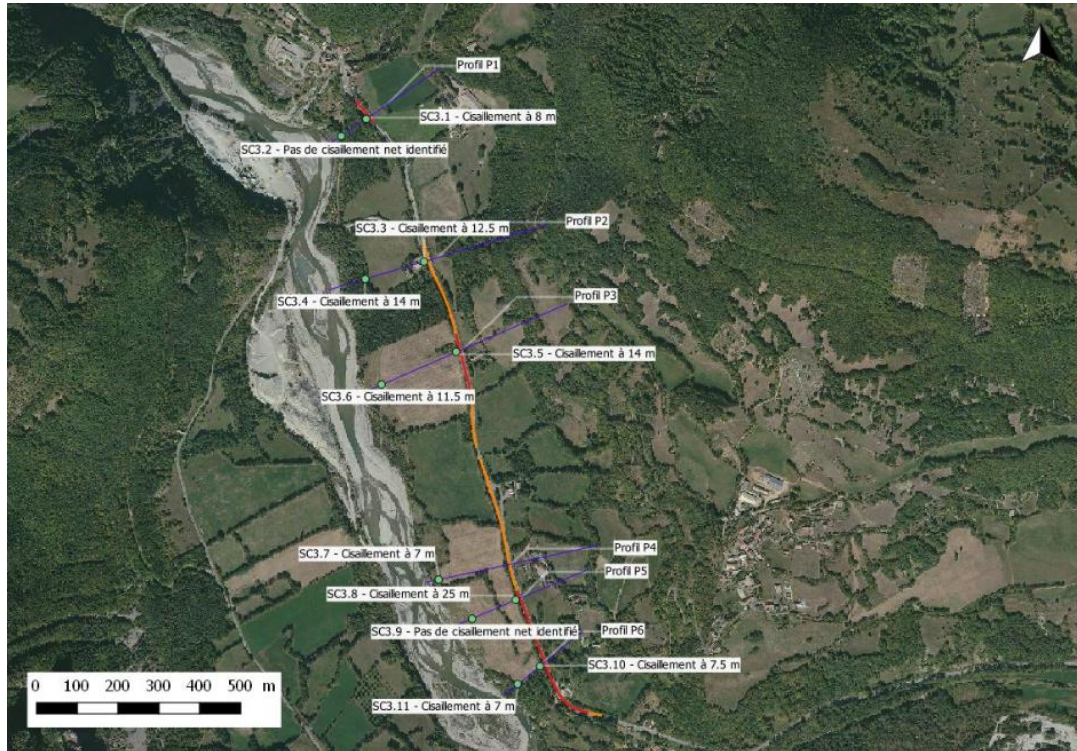


Figure 36 : Principales profondeurs de cisaillement relevées par le Cerema Méditerranée sur le site du Motty Saint-Firmin, par instrumentation inclinométrique (Cerema 2020)

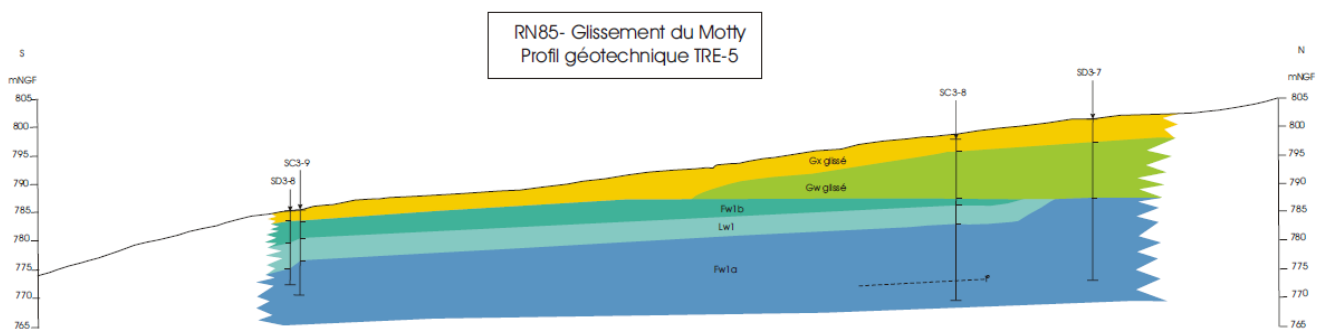


Figure 37 : Coupe géotechnique interprétative au niveau du sondage SC3-8 (profil 5) sur le glissement du Motty / Saint-Firmin (Cerema 2020)

En termes de mécanismes, outre la faible résistance au cisaillement des sols concernés, les causes du glissement identifiées sont notamment liées à la présence massive d'eau dans les matériaux en mouvement (avec des nappes subaffleurantes et parfois, probablement, en charge) et à la sape du pied de glissement par le cours du Drac.

Pour la suite, à des fins de cohérence avec les analyses menées sur les autres sites et avec les objectifs du présent rapport, seules les couches d'argiles litées glacio-lacustres Lw1 (ou similaires) sont analysées. Elles sont principalement identifiées aux profondeurs suivantes dans les forages carottés.

7.2 Essais de laboratoire

Sur le site du Motty / Saint-Firmin, il n'a pas été identifié de données d'essais anciennes au cours des recherches bibliographiques. Les seuls essais disponibles sont ceux réalisés par le Cerema Méditerranée, sur commande de la DIR Med, entre juillet 2017 et décembre 2018, sur les prélèvements issus des sondages carottés cités précédemment. Ces essais étant nombreux (identifications géotechniques, teneurs en eau, masses volumiques, essais triaxiaux), ils permettent d'obtenir une bonne connaissance des matériaux en place.

Les essais d'identification issus de cette campagne sont résumés dans le Tableau 17. Dans cette campagne d'essais les granulométries avaient été effectuées par méthode laser, ce qui peut entraîner des biais sur les fractions les plus fines (2 μm en particulier) par rapport aux sédimentométries des autres sites d'étude.

Sondage	Prof. (m)	Passant à (%) :					Dmax (mm)	w _L (%)	w _p (%)	IP (%)	VBS	Couche	USCS M.&Y.	GTR
		2 μm	20 μm	50 μm	80 μm	2 mm								
SC3-1	9.5	24	89	98	99	100	0.2	36	21	15	1.65	Lw1	Ap	A2
	12.7	8	43	75	90	100	0.3	23	18	5	0.71	Fw1a	Lp	A1
	22.1	15	68	90	95	100	0.7	23	16	7	0.98	Fw1a	Lp	A1
SC3-2	12.5	16	66	86	93	100	0.7	27	18	8	1.03	Fw1a	Ap	A1
	13.5	15	61	82	90	100	0.8	24	16	8	0.97	Fw1a	Ap	A1
SC3-3	8.0	31	93	99	100	100	0.1	40	23	17	1.90	Lw1	Ap	A2
SC3-4	8.5	24	88	97	98	100	0.2	40	22	18	1.73	Fw1a	Ap	A2
SC3-5	8.2	28	91	98	99	100	0.2	33	20	13	1.53	Fw1b	Ap	A2
	14.2	26	86	96	98	100	0.2	38	24	14	1.58	Lw1	Ap	A2
	17.2	31	92	99	100	100	0.2	43	25	18	1.96	Lw1	Ap	A2
	19.2	28	92	99	100	100	0.1	43	16	27	2.03	Lw1	Ap	A3
SC3-7	1.8	33	93	98	99	100	0.2	46	28	18	2.04	Fw1b	Lp	A2
	8.5	18	68	83	90	100	1	27	19	8	0.81	Fw1b	Ap	A1
SC3-8	12.6	14	50	70	84	100	0.5	23	17	6	0.92	Lw1	Lp	A1
SC3-9	5.5	29	91	98	99	100	0.2	44	25	19	1.84	Lw1	Ap	A2
SC3-10	12.7	22	84	96	98	100	0.3	34	20	14	1.43	Lw1	Ap	A2
	14.2	20	75	88	92	100	1	31	20	11	1.05	Lw1	Ap	A1

Tableau 17 : Synthèse des essais d'identification réalisés durant la campagne d'essais 2017-2018 sur les échantillons du site du Motty (Cerema 2019)

Tous les essais ont été réalisés sur des échantillons d'aspect argilo-limoneux dans les différentes formations, quel que soit leur étalement granulométrique réel. Cela ne permet donc pas de constater la nature sablo-graveleuse plus prononcée des couches Fw1a/b alors que celle-ci est confirmée par les coupes de sondages. Cela montre néanmoins que certaines parties des formations Fw1a/b présentent des caractéristiques géotechniques proches des argiles litées glacio-lacustres Lw1, ce qui explique qu'elles puissent également être impliquées dans les phénomènes de glissements observés.

Les argiles glacio-lacustres apparaissent dans l'ensemble homogènes avec des classifications principalement Ap (USCS) ou A2 (GTR) cohérentes avec les mesures réalisées sur les autres sites d'étude. L'indice d'activité de Skempton ($A_c = IP / C_2$) peut être calculé sur les différents échantillons ayant fait l'objet de limites d'Atterberg : on obtient des valeurs de l'ordre de 0.6 sur Fw1a et Lw (peu

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

Synthèse des essais de laboratoire n 1 :

Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Décembre 2022

actif), 0.5 sur Fw1b (peu actif également). Ces valeurs sont comparables avec celles des autres sites et conduisent aux mêmes commentaires (peu d'argiles sensibles).

Deux échantillons s'écartent toutefois significativement des caractéristiques moyennes :

- SC3-8 12.60 m : cet échantillon provient d'une carotte avec des passages à tendance argileuse et à tendance sableuse. Les résultats correspondent à un mélange, ce qui crée un écart par rapport aux autres prélèvements plus argileux ;
- SC3-5 19.20 m : cet échantillon montre un indice de plasticité élevé malgré un passant à 2 µm conforme aux autres prélèvements de la couche Lw1. L'indice d'activité de Skempton est proche de 1, pouvant indiquer une présence d'argiles sensibles (smectites ?) accrue.

Les prélèvements peuvent également être positionnés dans **le triangle de textures du GEPPA** (voir Figure 38). Par rapport aux autres sites étudiés, les points de la couche Lw1 se situent un peu plus bas dans le triangle, dans la zone des argiles limoneuses et des limons argileux principalement. Cela peut être lié à une différence réelle de granularité, mais plus probablement à la méthode de granulométrie laser employée, qui sous-estime usuellement la fraction < 2 µm par rapport à la sédimentométrie (voir section 2.1). Les couches alluvionnaires (terrasses würmiennes) se situent préférentiellement dans la zone des limons et limons argileux.

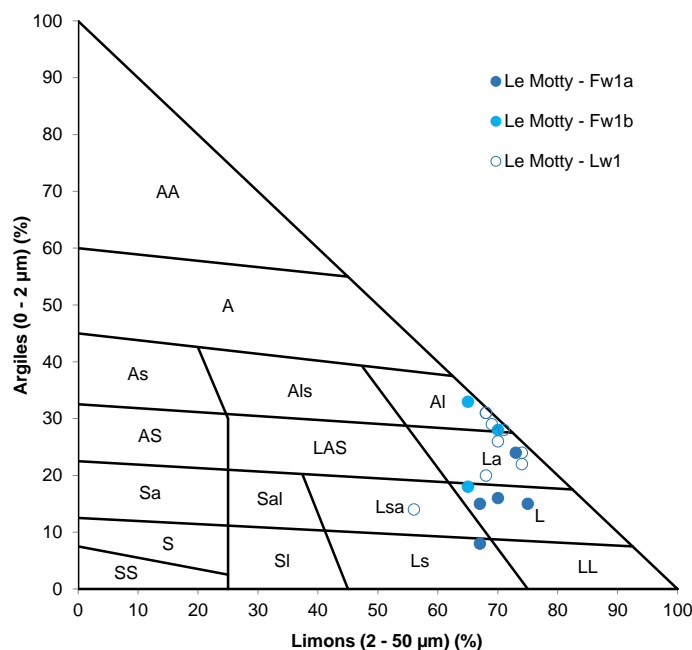


Figure 38 : Positionnement des prélèvements de 2017 du site du Motty / Saint-Firmin dans le triangle de textures du GEPPA

Dans le cadre de la campagne d'essais, le Cerema Méditerranée a également réalisé un nombre important de mesures de teneur en eau et de poids volumiques sur les échantillons carottés. La synthèse issue du rapport d'essais, qui ne distingue toutefois pas la nature des sols, est reproduite en Figure 39. On observe une dispersion importante des teneurs en eau (entre 2 et 32 %), probablement liée au caractère plus ou moins argileux ou sableux des échantillons, et des masses volumiques (entre 16.5 et 23 kN/m³). L'analyse plus détaillée des valeurs montre que les matériaux sont quasi-systématiquement dans un état saturé. Par ailleurs, on relève :

- que la moyenne des poids volumiques se situe entre 20 et 20.5 kN/m³, conformément à ce qui pouvait être attendu pour ces matériaux dans un état quasi-saturé ;

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

Synthèse des essais de laboratoire n 1 :

Identifications des sols dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Décembre 2022

- qu'il n'existe sur ce site aucune corrélation entre la profondeur et les poids volumiques ou les teneurs en eau.

Les caractéristiques mécaniques étant fréquemment liées à la densité pour un sol donné, on pourra donc s'attendre à une absence de dépendance à la profondeur de la résistance au cisaillement.

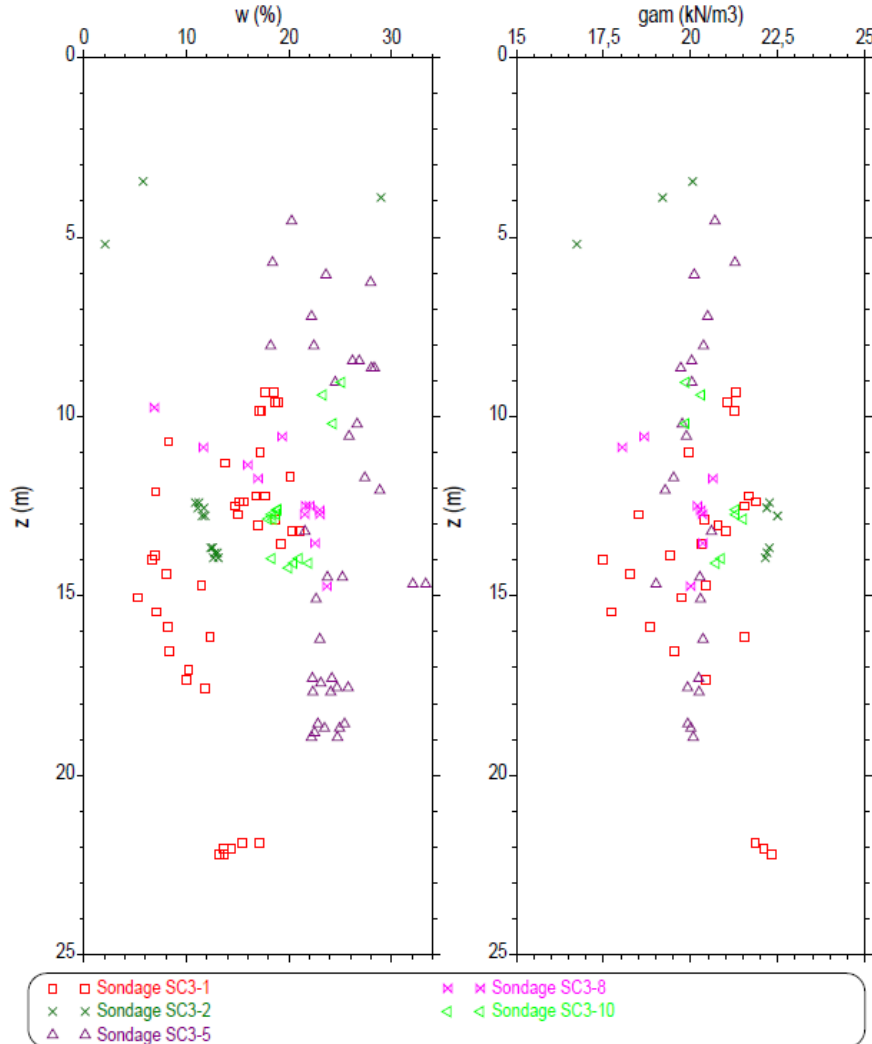


Figure 39 : Synthèse des teneurs en eau et des poids volumiques humides en fonction de la profondeur dans 5 sondages de la zone d'étude. Source (Cerema 2019)

8 SYNTHÈSE - CONCLUSION

Le présent livrable a permis de dresser une vision détaillée des propriétés d'identification géotechnique des matériaux présents sur chacun des sites d'étude du projet MLA3 (Charlaix, Quet-en-Beaumont, Les Touches, Corps, Le Motty / Saint-Firmin), en rassemblant toutes les données historiques disponibles et tous les nouveaux résultats d'essais acquis au cours du projet. Il constitue à ce titre une synthèse unique sur les argiles du Beaumont, désormais disponible pour les futurs travaux de recherche comme pour les missions de bureaux d'études dans la région.

Ce livrable est complété par le livrable L-A3 qui présente de même les propriétés mécaniques des sols de chacun des sites d'étude, et par le livrable L-A4 qui propose une synthèse des caractéristiques de la couche d'argiles litées glacio-lacustres impliquée quasi-systématiquement dans les glissements lents observés. Cet ensemble de documents permettra pour l'avenir de disposer des paramètres d'entrée nécessaires aux modèles de calcul géotechniques impliquant ce type de matériau dans la région du Beaumont.

9 ANNEXES

9.1 Bibliographie

- ADRGT. «Etude de la stabilité des versants du torrent de la Sézia, près de Corps.» (Rapport de l'ADRGT pour le SIVOM du Canton de Corps) 1980: 44 p.
- ADRGT. «RN 85 - Lieu dit Charlaix - Etude de glissement de terrain - Rapport provisoire.» (Rapport de l'ADRGT pour la DDE de l'Isère) 1980: 41 p.
- AFNOR. «NF P 11-300 : Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.» AFNOR, 1992. 21 p.
- Antoine, P., A. Giraud, et G. Monjuvent. «Les argiles litées du Trièves (Isère); Conditions de gisement et exemples de propriétés géotechniques.» *Bulletin de la Société Géologique de France* S7-XXXIII, n° 2 (1981): 117-127.
- ASTM. «Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) D2487-17e1.» American Society for Testing and Materials, 2020.
- Baize, Denis. *Guide des analyses en pédologie - Seconde édition*. INRA-Quae, 2000.
- Bièvre, Grégory, Agnès Joseph, et Catherine Bertrand. «Preferential water infiltration path in a slow-moving clayey earthslide evidenced by cross-correlation of hydrometeorological time series (Charlaix Landslide, French Western Alps).» *Geofluids*, 2018: 21 p.
- Cerema. «Glissement de terrain des Touches (Corps, 38) - Etude de diagnostic G5 au voisinage de la RN85.» (Rapport du Cerema pour la DIR Med) 2022: 153 p.
- Cerema. «RN 85 - Hautes-Alpes - Secteur du Motty - Estimation sommaire de la faisabilité et du coût de renforcement.» (Rapport du Cerema Méditerranée pour la DIR Med) 2020: 28 p.
- Cerema. «RN 85 de la limite des Départements Isère / Hautes-Alpes à Gap – Reconnaissances géotechniques et instrumentation des secteurs 1A, 3A à 3D, 4A et 11 – Étude PRO.» (Rapport du Cerema Méditerranée pour la DIR Med) 2016: 51 p.
- Cerema. «RN 85 Glissement de Corps - Diagnostic géotechnique G5.» (Rapport du Cerema pour la DIR Med) 2021: 50 p.
- Cerema. «RN85 - Essais de laboratoire - Compte-rendu.» (Rapport d'essais du Cerema Méditerranée pour la DIR Med) 2019: 322.
- Cerema. «RN85 - Site de Quet-en-Beaumont - Etude de diagnostic géotechnique (G5).» (Rapport du Cerema pour la DIR Med) 2021: 136 p.
- CETE. «RN 85 Glissement de Charlaix - Etude géotechnique de stabilisation et de confortement de la branche aval du lacet.» (Rapport du CETE de Lyon pour la DRE Rhône-Alpes) 2008: 25 p.
- Geotec. «RN85 - Instrumentation et reconnaissances géotechniques - Secteur 3 (R.N. 85 - PR 3+400 à 5.000).» (Rapport de l'entreprise Geotec pour la DIR Med) 2017: 104 p.
- Giraud, Albert, J.P. Gourc, L. Besson, et Denis Fabre. «Approche pluridisciplinaire des problèmes posés par un glissement de terrain sur faible pente.» *Revue Française de Géotechnique*, 1981: 57-66.
- Joseph, Agnès, Grégory Bièvre, et Samuel Dauphin. «RN 85 Glissement de Charlaix - Caractérisation, instrumentation et surveillance.» *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur (JNGG)*. Beauvais, 2014. 11 p.
- Lambert, A., et G. Montjuvent. «Quelques vues nouvelles sur l'histoire quaternaire de la vallée du Drac (note préliminaire).» *Géologie Alpine*, 1968: 117-138.

- LCPC-SETRA. *Réalisation des remblais et des couches de forme. Fascicule 1 : Principes généraux - Fascicule 2 : Annexes techniques.* Bagnoux, France: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - Service d'Etude Technique des Routes et Autoroutes, 1992.
- Loizeau, J.-L., D. Arbouille, S. Santiago, et J.-P. Vernet. «Evaluation of a wide range laser diffraction grain size analyzer for use with sediments.» n° 41 (1994): 353-361.
- Magnan, Jean-Pierre, et Ghassem Youssefian. «Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols.» *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 159 (1989): 93-104.
- McCave, I. N., R. J. Bryant, H. F. Cook, et C. A. Coughanowr. «Evaluation of a laser-diffraction-size analyzer for use with natural sediments.» *Journal of Sedimentary Petrology*, n° 56 (1986): 561-564.
- Monjuvent, G. *Le Drac – Morphologie, stratigraphie et chronologie quaternaires d'un bassin Alpin - Thèse de doctorat.* Grenoble: Univ. J.Fourier, 1978.
- ONF-RTM. «Commune de Quet-en-Beaumont - Suivi des glissements de terrains - Année 2018.» (Rapport du RTM pour la commune de Quet-en-Beaumont) 2019: 48 p.
- Plumelle, Claude, Denis Fabre, Olivier Fouché, Alain Hirschauer, et Alain Tabbagh. *Théorie et pratique de la géotechnique.* Paris: Editions du Moniteur, 2013.
- Richer de Forges, A., C. Feller, M. Jamagne, et D. Arrouays. «Perdus dans le triangle des textures.» *Etude et gestion des sols*, 2008: 97-111.
- Rojat, Fabrice, et Virginie Gendre. «Réutilisation d'argiles à graviers en remblai de grande hauteur : Le chantier expérimental de Carmaux.» *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussée*, n° 274 (2009): 89-107.
- SAGE. «Glissement de terrain RN85 lieu-dit Charlaix - Suivi de la surveillance 1999-2000 et étude géotechnique de faisabilité - Stabilisation de la branche supérieure du lacet.» (Rapport de la Sage pour la DDE de l'Isère) 2002: 128 p.
- SAGE. «R.N.85 Commune de Corps – Etude des cas n°1 et 15 – PR 100 + 700 à 850.» (Rapport de la Sage pour la DDE de l'Isère) 1994.

9.2 Table des figures

Figure 1 : Carte schématique des glaciers würmiens (au maximum WII) dans le bassin Drac-Durance, d'après (Monjuvent 1978). La zone regroupant les principaux mouvements le long de la RN85 et les 5 sites de référence du projet MLA3 est figurée en rouge.....	9
Figure 2 : 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)	10
Figure 3 : Position des sondages réalisés en 2018, sur commande de la DIR Méditerranée, ayant permis de disposer de prélèvements pour le projet MLA3	11
Figure 4 : Résumé de la classification USCS / LCPC, d'après (Plumelle, et al. 2013).....	14
Figure 5 : Correspondance de la classification USCS/LCPC des sols à une qualification de l'argilosité par la valeur au bleu (en abscisse) d'après (Magnan et Youssefian 1989)	14
Figure 6 : Résumé de la classification GTR des sols fins (Dmax < 50 mm) d'après (LCPC-SETRA 1992)	15
Figure 7 : Triangle de texture des sols proposé par le GEPPA, d'après (Baize 2000).....	16
Figure 8 : Le lacet de Charlaix et (approximativement) les deux zones principales de glissement autour de la RN85 (sur fond de photo aérienne Geoportail, 2021)	17
Figure 9 : Coupe géologique synthétique du versant de la Bonne telle que proposée par Lambert et Montjuvent (1968).....	18
Figure 10 : Profil géologique et géotechnique de synthèse proposé par (Bièvre, Joseph et Bertrand 2018) pour le haut de la zone 1 de glissement de Charlaix (entre la RN 85 et la RD 212)	19
Figure 11 : Argiles litées de la couche F2ch, sur le sondage carotté SC1 de 2012 (photos Cerema, laboratoire d'essais). À gauche : aspect normal des varves avec alternances silteuses (gris-vert) et argileuses (gris-noir) au-dessus de la surface de rupture. À droite : lits désorganisés au niveau de la surface de rupture vers -16.0 m.....	21
Figure 12 : Positionnement des prélèvements du site de Charlaix (antérieurs et contemporains au projet MLA3) dans le triangle de textures du GEPPA	22
Figure 13 : Vue d'ensemble de l'implantation des sondages de 2018 (sauf SD10 datant de 2021) sur la zone du glissement de Charlaix.....	23
Figure 14 : Coupe transversale du Beaumont au voisinage de Quet-en-Beaumont (Cordéac) d'après Montjuvent (1978).....	24
Figure 15 : Détail de la cartographie géologique locale (réinterprétée par le Cerema, sur base des données BRGM). La zone d'étude (« village ») est figurée en pointillés blancs.	25
Figure 16 : Implantation des sondages de 2018 sur le site de Quet-en-Beaumont	26
Figure 17 : Profil interprétatif d'ensemble des mouvements affectant le haut de la zone du village de Quet-en-Beaumont.....	27
Figure 18 : Surfaces de cisaillement relevées sur les inclinomètres suivis par le RTM sur l'ensemble du versant de Quet-en-Beaumont, principalement au sein d'argiles glacio-lacustres (source : ONF-RTM, 2019)	27
Figure 19 : Quelques photographies des carottes prélevées sur le site de Quet-en-Beaumont : (en haut) S7-SC1 de 15.5 à 16.5 m – formation F2q, (au milieu) S7-SC2 de 18.5 à 20.0 m – formation F2q (en bas) S7-SC2 de 23.5 à 25.0 m – formation F2qa.....	28
Figure 20 : Positionnement des prélèvements de 2018 du site de Quet-en-Beaumont dans le triangle de textures du GEPPA.....	29

Figure 21 : Site de Quet-en-Beaumont : mesures de teneur en eau en fonction de la profondeur sur les deux sondages S7-SC1 et S7-SC2 (prélèvements du 30/05/2018 au 12/06/2018)	30
Figure 22 : (en haut) Extrait annoté des cartes géologiques de La Mure et de Saint-Bonnet dans la zone des Touches (source BRGM), et (en bas) Figuration des principaux ensembles sur vue satellite 3D (source Cerema sur fond Google Earth) (Cerema 2022)	32
Figure 23 : 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.	33
Figure 24 : 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.	34
Figure 25 : Sondages de 2018 sur le site des Touches : (en haut) Echantillon carotté de la couche F1 issu du sondage S8-SC2-I3, 4.50 à 5.80 m de profondeur (en bas) Echantillon carotté de la couche F2 issu du sondage S8-SC2-I3 de 4.50 à 5.80 m de profondeur (photos Cerema)	35
Figure 26 : Positionnement des prélèvements de 2018 du site des Touches dans le triangle de textures du GEPPA	37
Figure 27 : Site des Touches : mesures de teneur en eau en fonction de la profondeur sur trois sondages de la zone 1 de glissement (prélèvements du 18/04/2018 au 04/05/2018).....	38
Figure 28 : Site des Touches : mesures de teneur en eau en fonction de la profondeur sur quatre sondages de la zone 2 de glissement (prélèvements du 23/04/2018 au 03/05/2018)	38
Figure 29 : (à gauche) Zone de mouvements de terrains étudiée au voisinage de Corps, sur fond de carte topographique IGN (source : Géoportail) et (à droite) Pathologies sur la RN85 au niveau de l'escarpement principal.	40
Figure 30 : Délimitation de la zone de glissement sur fond de relevé LIDAR	41
Figure 31 : Implantation des sondages réalisés en 2018 par l'entreprise Géotec sur le site de Corps, dont les échantillons ont été employés pour les essais de laboratoire du projet MLA3	42
Figure 32 : Positionnement des prélèvements de 2018 du site de Corps dans le triangle de textures du GEPPA.....	44
Figure 33 : Site de Corps : mesures de teneur en eau en fonction de la profondeur sur les sondages carottés SC1 et SC2 (prélèvements du 19/06/2018 au 05/07/2018)	45
Figure 34 : (à gauche) Principales formations identifiées sur la carte géologique (1/50 000ème, source BRGM) dans la zone de glissement du Motty / Saint-Firmin ; (à droite) Délimitation générale des zones instables étudiées autour de la RN85, d'après (Cerema 2020)	46
Figure 35 : Implantation des principaux forages de reconnaissance réalisés en 2017 sur le site du Motty / Saint-Firmin, avec l'instrumentation associée (source : Cerema Méditerranée)	47
Figure 36 : Principales profondeurs de cisaillement relevées par le Cerema Méditerranée sur le site du Motty Saint-Firmin, par instrumentation inclinométrique (Cerema 2020)	48
Figure 37 : Coupe géotechnique interprétative au niveau du sondage SC3-8 (profil 5) sur le glissement du Motty / Saint-Firmin (Cerema 2020).....	48
Figure 38 : Positionnement des prélèvements de 2017 du site du Motty / Saint-Firmin dans le triangle de textures du GEPPA.....	50
Figure 39 : Synthèse des teneurs en eau et des poids volumiques humides en fonction de la profondeur dans 5 sondages de la zone d'étude. Source (Cerema 2019).....	51



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

UGA

Université
Grenoble Alpes



ENTPE

L'école de l'aménagement durable des territoires



UNION EUROPÉENNE

Fonds Européen de
Développement Régional



**RÉGION
SUD**

PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR



**l'Europe
s'engage
sur
le Massif Alpin**

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES