

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

Modèle physique et mécanique des argiles glacio-lacustres du Beaumont : une vision transversale



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

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 soutenu par l'Etat
FONDS NATIONAL
D'AMÉNAGEMENT
ET DE DÉVELOPPEMENT
DU TERRITOIRE

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

LIVRABLE N° L-A4

Date : Mars 2023

MLA3 – Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Modèle physique et mécanique des argiles glacio-lacustres du Beaumont : une vision transversale

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 :	Paramètres physiques et mécaniques des argiles glacio-lacustres du Beaumont : une vision transversale	
Date d'édition :	Mars 2023	
Nombre de pages :	47 p.	
Coordinateur :	F.Rojat (Cerema)	
Rédacteur du rapport :	F.Rojat (Cerema)	
Avec la participation de :	-	
Relecteur :	L.Dubois (Cerema)	
Valideur :	Cédric Girardy (Cerema)	Le directeur du département Risques Infrastructures Matériaux  Cédric Girardy

Résumé du livrable

Le présent document est l'un des livrables de l'axe A du projet FEDER POIA « MLA3 » (Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager). Il présente et analyse les propriétés mécaniques des seules argiles glacio-lacustres du Beaumont (38), rencontrées au cours du projet et principalement impliquées dans les glissements de terrains, en adoptant une vision transversale aux différents sites d'étude. Cela a permis de déterminer une « carte d'identité » de ces formations tant sur leurs caractéristiques physiques (granulométrie, argilosité, masse volumique, etc.) que mécaniques (résistances, couplages hydro-mécaniques,...). Les différentes approches retenues ici ont globalement montré, malgré une certaine homogénéité d'aspect, une dispersion des propriétés des matériaux, qui n'apparaît pas liée à la comparaison de prélèvements issus de différents sites, mais bien à l'hétérogénéité naturelle de la formation. Il a cependant été possible d'identifier un certain nombre de traits distinctifs qui pourront à l'avenir servir de modèle géotechnique typique de ces argiles.

Concernant les caractéristiques physiques, des plages de valeurs propres à cette formation géologique ont pu être établies dans les différentes représentations suivantes : fuseau granulométrique, diagramme de Casagrande (IP vs. w_L , classification USCS), valeur au bleu (VBS vs. $C_{2\mu m}$), diagramme de compacité (masse volumique sèche vs. teneur en eau), classification GTR, classification triangulaire des sols du GEPPA, teneurs en carbonates.

Concernant les caractéristiques mécaniques, les argiles litées glacio-lacustres du Beaumont ne se sont pas avérées fortement surconsolidées, et les paramètres de résistance c' et ϕ' conventionnels sont apparus dispersés. Les observations ont montré que de multiples facteurs intervenaient dans cette dispersion : le type d'essai utilisé, la profondeur de prélèvement, le poids volumique des échantillons, la quantité d'argile, le litage,... Des moyennes et des plages de valeurs ont toutefois été établies ; elles pourront permettre des études de sensibilité. Enfin, sur la base d'une analyse bibliographique, compte-tenu de la variabilité des résultats d'essais et des multiples spécificités de comportement observées sur ces argiles litées, la formulation d'un modèle de comportement plus avancé que cette approche « conventionnelle » de la résistance n'a pas été jugé susceptible de mieux répondre aux besoins pratiques de l'ingénierie des pentes.

Mots clés

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

Statut de communication du rapport

Ce document est accessible librement au public sur internet. Il est capitalisé sur la plateforme documentaire [CeremaDoc](https://doc.cerema.fr/) : <https://doc.cerema.fr/>

Contexte du rapport

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

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

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

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

Le projet MLA3 associe 3 partenaires : le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema - direction territoriale Centre-Est), l'Université Grenoble Alpes (UGA - Laboratoire ISTerre – UMR CNRS 5275) et l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE – Laboratoire RIVES – UMR CNRS 5600). Il a bénéficié de la participation ou de la contribution ponctuelle de multiples acteurs externes au cours de son déroulement (DIR Med¹, RTM, PARN, communes, conseils départementaux, habitants, acteurs économiques locaux, etc.).

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

Sommaire

1	Contexte général	8
1.1	Rappels sur le contexte géologique et géotechnique.....	8
1.2	Contenu du présent rapport.....	8
2	Propriétés d'identification géotechnique des argiles litées du Beaumont	10
2.1	Caractéristiques granulométriques et d'argilosité.....	10
2.1.1	Synthèse des tableaux de valeurs correspondant aux différents sites	10
2.1.2	Synthèse graphique : courbes granulométriques.....	12
2.1.3	Synthèse graphique : indice de plasticité, diagramme de Casagrande	14
2.1.4	Synthèse graphique : valeur au bleu VBS	16
2.1.5	Synthèse graphique : classification GTR des sols fins.....	16
2.1.6	Synthèse graphique : triangle des textures.....	17
2.2	Masses volumiques, teneurs en eau, saturation.....	18
2.2.1	Synthèse des tableaux de valeurs	18
2.2.2	Synthèses graphiques	20
2.3	Teneurs en carbonates	21
2.4	Carte d'identité descriptive des argiles litées glacio-lacustres du Beaumont ..	21
3	Propriétés mécaniques des argiles litées du Beaumont.....	23
3.1	Caractéristiques œdométriques	23
3.2	Caractéristiques de résistance au cisaillement (essais triaxiaux et à la boîte de Casagrande)	24
3.2.1	Synthèse des valeurs relevées sur les différents sites (approche conventionnelle)	24
3.2.2	Variabilité des caractéristiques mécaniques en fonction des sites	26
3.2.3	Dépendance des résistances mécaniques au type d'essai de cisaillement.....	27
3.2.4	Dépendance des résistances mécaniques à la profondeur de prélèvement	28
3.2.5	Dépendance des résistances mécaniques au poids volumique sec.....	28
3.2.6	Dépendance des résistances mécaniques à la quantité d'argile.....	29
3.2.7	Conclusion sur les caractéristiques de résistance au cisaillement	30
4	Approfondir l'approche mécanique ?	31
4.1	Modèles de comportement des argiles (analyse bibliographique).....	31
4.1.1	Généralités	31
4.1.2	Approche de Cambridge pour le comportement des argiles	32
4.1.3	Exemple du modèle de Cam-Clay modifié.....	34
4.1.4	Limitations du modèle de Cam-Clay modifié pour les argiles réelles	35

4.1.5	Quelle approche pour les argiles réelles ?	36
4.2	Quelle approche mécanique pour les argiles glacio-lacustres du Beaumont ?	38
5	Conclusion.....	40
6	Références.....	42
6.1	Bibliographie	42
6.2	Table des figures.....	44

1 CONTEXTE GENERAL

1.1 Rappels sur le contexte géologique et géotechnique

L'ensemble du contexte géologique et géotechnique des sites étudiés dans le cadre du projet MLA3 a été présenté dans les livrables L-A1 (géologie et géomorphologie régionales), LA-2 (synthèse des identifications géotechniques des matériaux) et LA-3 (synthèse des essais mécaniques sur les matériaux) qui ne seront pas re-détaillés ici. Ils constituent les données d'entrée du présent rapport ; il sera utile de s'y référer pour comprendre l'origine de l'ensemble des essais de laboratoire analysés et leur présentation détaillée.

Pour mémoire, les travaux du projet MLA3 s'articulent autour de **5 sites pilotes dans la zone géologique du Beaumont** (proche du Trièves), le long de la RN85 entre La Mure (38) et Saint-Firmin (05). Les matériaux affectés par les mouvements de terrain dans cette aire d'étude sont principalement des **argiles litées « glacio-lacustres » quaternaires** (époque würmienne), déposées sur la frange de l'ancien lac de barrage cataglaciaire du Beaumont. D'autres sols que ces argiles litées sont également présents, qui ont pu faire eux aussi l'objet d'essais de laboratoire dans les livrables précédents.

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

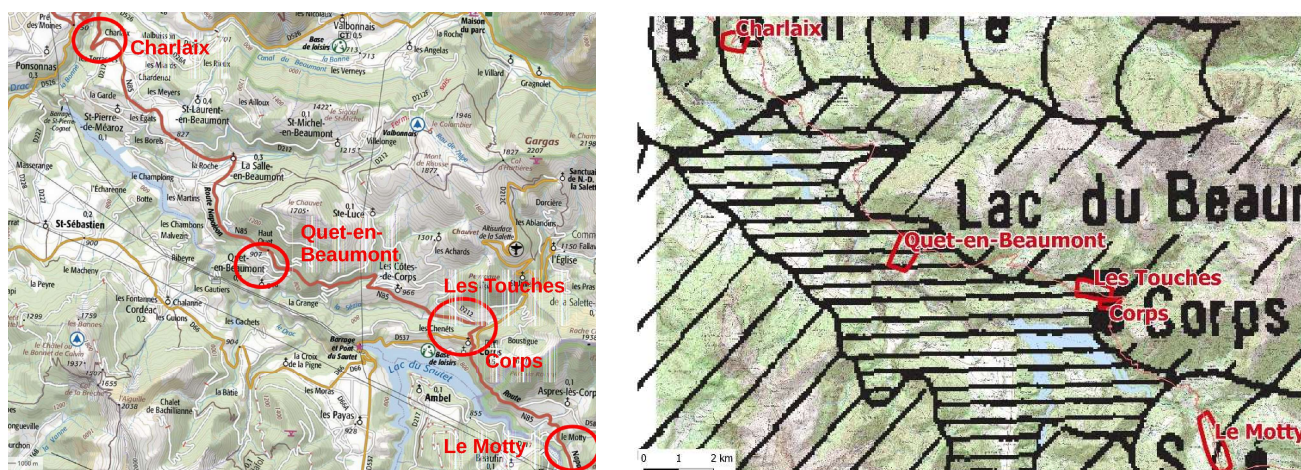


Figure 1 : Localisation des sites d'étude du projet MLA3 sur fond de plan IGN (à gauche) et après recalage sur la carte schématique des glaciers würmiens (à droite, source (Monjuvent, 1978))

On se reportera au livrable L-A2 pour le détail des sondages de reconnaissance menés en 2018 et 2021 sur chaque site, qui ont permis de disposer des échantillons étudiés.

1.2 Contenu du présent rapport

Après avoir détaillé et interprété dans les livrables L-A2 et L-A3 les essais de laboratoire de chaque site d'étude indépendamment, le présent rapport **adopte une vision transversale pour se concentrer spécifiquement sur l'un des matériaux recensés : les argiles litées glacio-lacustres**. De couleur gris-sombre à verdâtre, marquées par des litages généralement sub-horizontaux centimétriques, celles-ci sont en effet présentes sur chacun des sites (bien qu'éloignés de plusieurs kilomètres), et identifiées comme hébergeant les surfaces de rupture de la plupart des glissements de terrain actifs.

En considérant l'origine géologique commune de ces argiles litées ainsi que leurs caractéristiques visuelles très comparables, le présent livrable vise à examiner s'il est possible **d'établir une sorte de « carte d'identité » de cette formation**, qu'il s'agisse de ses propriétés d'identification géotechnique (granularité, argilosité, etc.) ou de ses propriétés mécaniques et rhéologiques. Cela permettrait de

disposer, pour des applications d'ingénierie ou de recherche, d'un modèle moyen pouvant servir de référence lorsque ces matériaux sont impliqués dans un nouveau glissement sans avoir encore fait l'objet d'essais dédiés. Par ailleurs, le nombre d'essais élevé obtenu en croisant les données de plusieurs sites constitue une base de données riche et unique des caractéristiques géotechniques des argiles du Beaumont ; il est donc pertinent de s'intéresser à leur homogénéité (ou non) sur l'ensemble de la zone géographique concernée, ainsi qu'au degré de dispersion susceptible d'être rencontré pour chaque paramètre. Enfin, cette approche transversale permettra de disposer d'une vision élargie et raisonnablement représentative du matériau, qui pourra utilement alimenter des études ultérieures n'ayant que rarement l'opportunité de disposer d'un tel volume de données.

Dans les livrables L-A2 et L-A3, cette formation d'argiles litées glacio-lacustres du Beaumont était codée en bleu clair et dénommée : F2ch (site de Charlaix), F2qa (site de Quet-en-Beaumont), F2 (site des Touches), F2c (site de Corps), Lw1 (site du Motty / St-Firmin). **Seuls les essais correspondants seront considérés ici.**

2 PROPRIETES D'IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE DES ARGILES LITEES DU BEAUMONT

2.1 Caractéristiques granulométriques et d'argilosité

La totalité des essais de laboratoire présentés ici (granulométrie, sédimentométrie ou granulométrie laser, limites d'Atterberg, valeur au bleu de méthylène du sol) est détaillée dans le livrable L-A2, ainsi que les méthodes de classification des sols employées.

2.1.1 Synthèse des tableaux de valeurs correspondant aux différents sites

Les **résultats d'essais relatifs aux seules argiles litées glacio-lacustres** sont synthétisés dans le Tableau 1 ci-dessous.

Des moyennes et écarts-types ont été déterminés, avec ou sans la zone du Motty / Saint-Firmin pour laquelle les quantités de particules fines ont été obtenues au granulomètre laser au lieu de la sédimentométrie (voir explication ci-après).

	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								
Charlaix	SI-2 (1979)	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
	TP9 (2001)	5.5	38	84	91	94	99	10	40	20	20	-	F2ch	Ap	A2
	SC2 (2007)	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)	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
	S6-SC1 (2018)	18.5	46	89	95	97	99	5	-	-	-	1.41	F2ch	Ap	A1
Quet	S7-SC2 (2018)	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
Les Touches	S8-SC1 (2018)	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
	S8-SD2 (2018)	4,5	36	77	81	85	99	4	-	-	-	1,61	F2	Ap	A1
		7,7	41	87	94	98	99	5	34	23	11	-	F2	Ap/Lp	A1
	S8-SC2 (2018)	15,0	36	87	96	99	100	0,2	-	-	-	1,66	F2	Ap	A1
		2,5	45	88	93	97	99	5	44	29	15	-	F2	Lp	A2
	S8-SD3 (2018)	5,5	49	94	97	98	99	5	40	23	17	-	F2	Ap	A2
		2,5	42	93	95	97	98	10	-	-	-	1,82	F2	Ap	A1

	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-SD4 (2018)	5,5	34	83	90	98	99	4	-	-	-	1,86	F2	Ap	A1
Corps	S9-SC1 (2018)	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 (2018)	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
Le Motty	SC3-1 (2018)	9.5	24	89	98	99	100	0.2	36	21	15	1.65	Lw1	Ap	A2
	SC3-3 (2018)	8.0	31	93	99	100	100	0.1	40	23	17	1.90	Lw1	Ap	A2
	SC3-5 (2018)	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
	SC3-8	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
	Moyenne		36.5	85.4	92.8	95.9	98.9	4.43	36.9	21.4	15.5	1.74	-	-	-
	Ecart-type		10.6	11.5	8.6	7.0	4.1	8.49	5.5	3.4	4.8	0.40	-	-	-
	Coeff. variation		0.29	0.14	0.09	0.07	0.04	1.92	0.15	0.16	0.31	0.23			
	Moyenne hors Lw1		40.4	86.0	92.4	95.6	98.5	5.85	36.9	21.5	15.4	1.93	-	-	-
	Ecart-type hors Lw1		8.9	10.9	8.5	7.5	4.8	9.48	4.8	3.6	4.4	0.34	-	-	-
	Coeff. variation		0.22	0.13	0.09	0.08	0.05	1.62	0.13	0.17	0.29	0.18			

Tableau 1 : Synthèse des données d'identification géotechnique des argiles glacio-lacustres de l'ensemble des sites d'étude (F2ch : Charlaix – F2qa : Quet-en-Beaumont – F2 : Les Touches – F2c : Corps – Lw1 : Le Motty / St-Firmin). Les écarts-types sont calculés avec un diviseur en n-1 en référence à l'ensemble de la population.

Le Tableau 1 montre un **niveau de dispersion raisonnable** pour des géomatériaux, qui tend à confirmer la **similitude des argiles glacio-lacustres entre les différents sites d'études**. Les argiles du Motty / Saint-Firmin restent globalement dans la même gamme que les matériaux des autres sites, malgré un D_{max} généralement plus faible et une moindre quantité de particules inférieures à 2 µm.

Ce dernier point est vraisemblablement lié la **sous-estimation (parfois plus de 50 %) de la fraction 0-2 µm fréquemment constatée avec la technique de la granulométrie laser** (voir par exemple (McCave, et al. 1986), (Loizeau, et al. 1994) ou (Rojat et Gendre 2009)) par rapport à la sédimentométrie. Cet effet est bien visible sur les représentations graphiques des courbes granulométriques fournies plus loin ; il se fait sentir jusque vers 20 µm environ.

Il ressort de cette première synthèse qu'**en moyenne**, l'argile litée glacio-lacustre typique du Beaumont est un matériau présentant environ 40 % de particules de taille argileuse (< 2 µm) et un D_{max} proche de 5 mm (mais très variable). Elle présente un indice de plasticité de l'ordre de 15 avec un indice de

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

Modèle physique et mécanique des argiles glacio-lacustres du Beaumont : une vision transversale

Date : Mars 2023

liquidité proche de 37 %, et une valeur au bleu de méthylène VBS entre 1.5 et 2. Sa classification USCS/LCPC est principalement Ap ou Lp et sa classification GTR (2000) A1 à A3 (en moyenne A2).

On remarquera que le terme « d'argile » employé pour dénommer ces sols est en réalité abusif, puisque la proportion d'argile minéralogique (dont la taille est $< 2 \mu\text{m}$ mais pouvant être mélangée à d'autres particules très fines) est en moyenne de l'ordre de 40 %. Le reste du sol est constitué de limons et de sables. **Une description géotechnique par ordre de proportions des différentes tailles de particules pourrait être une « argile limoneuse légèrement sableuse ».**

Le Tableau 1 peut aussi permettre de calculer l'indice d'activité de Skempton des argiles : $\text{Ac} = \text{IP} / \text{C}_2$ pour chaque échantillon. On obtient (hors site du Motty) des valeurs s'étalant de **0.26 à 0.73**, avec une moyenne à 0.40. Cela correspond à des **argiles peu actives**.

Malgré cette relative homogénéité, on rappellera que du fait du caractère finement lité (d'ordre centimétrique) de ces matériaux, et compte-tenu des volumes nécessaires pour la réalisation des essais de laboratoire, les résultats présentés dans le Tableau 1 sont nécessairement issus du mélange de plusieurs lits. Ils sont donc plutôt représentatifs de la nature homogénéisée « en grand » de ces matériaux. Cependant, des hétérogénéités centimétriques pourront ressortir sur des essais ne sollicitant qu'une fine fraction du sol comme les essais de cisaillement direct (voir plus loin).

Dans les paragraphes suivants, les résultats du Tableau 1 sont présentés sous forme de graphiques de synthèse, permettant d'identifier visuellement, dans différentes représentations, une « zone des argiles glacio-lacustres du Beaumont ».

2.1.2 Synthèse graphique : courbes granulométriques

L'ensemble des courbes granulométriques disponibles sur les différents sites ont été récupérées sous format numérique, ou digitalisées pour celles (plus anciennes) de Charlaix, afin de pouvoir les représenter ensemble dans un seul graphique.

La Figure 2 met en regard les courbes granulométriques de tous les matériaux prélevés sur les différents sites d'étude et les seules courbes des argiles glacio-lacustres. Cette visualisation permet d'identifier que **les argiles litées représentent bien un sous-ensemble restreint, aux caractéristiques nettement plus délimitées que celles rencontrées de manière générale sur l'ensemble des sols de la zone du Beaumont**. Elles correspondent souvent aux matériaux les plus fins, même si d'autres formations peuvent avoir des caractéristiques proches (F1 sur le site des Touches ou Fw1a sur le site du Motty par exemple).

La Figure 3 présente uniquement des fuseaux typiques (pour les sites de Charlaix – Quet – Les Touches – Corps d'une part et pour le site du Motty d'autre part) pouvant être tirés de la Figure 2 (bas), ainsi que la courbe « moyenne » correspondant aux proportions granulométriques moyennes « hors Lw1 » du Tableau 1.

La déviation vers le bas des courbes granulométriques du site du Motty, pour les particules $< 20 \mu\text{m}$, apparaît nettement sur ce graphique. Cette déviation étant attribuable à la méthode de mesure par granulométrie laser, **seul le fuseau établi à partir de la sédimentométrie (méthode de référence conventionnelle pour les classifications), sur les autres sites, sera considéré comme caractéristique de ces argiles litées**.

La courbe moyenne n'est pas située au centre du fuseau, indiquant une plus forte proportion de sols rattachables à la partie basse du fuseau.

Sur la même figure, le fuseau granulométrique typique des **argiles du Trièves** proposé par (Vuillemeret, 1992) est également représenté. On constate **la très grande similarité avec la zone granulométrique des argiles du Beaumont**, de même âge et issues d'un lac glaciaire voisin.

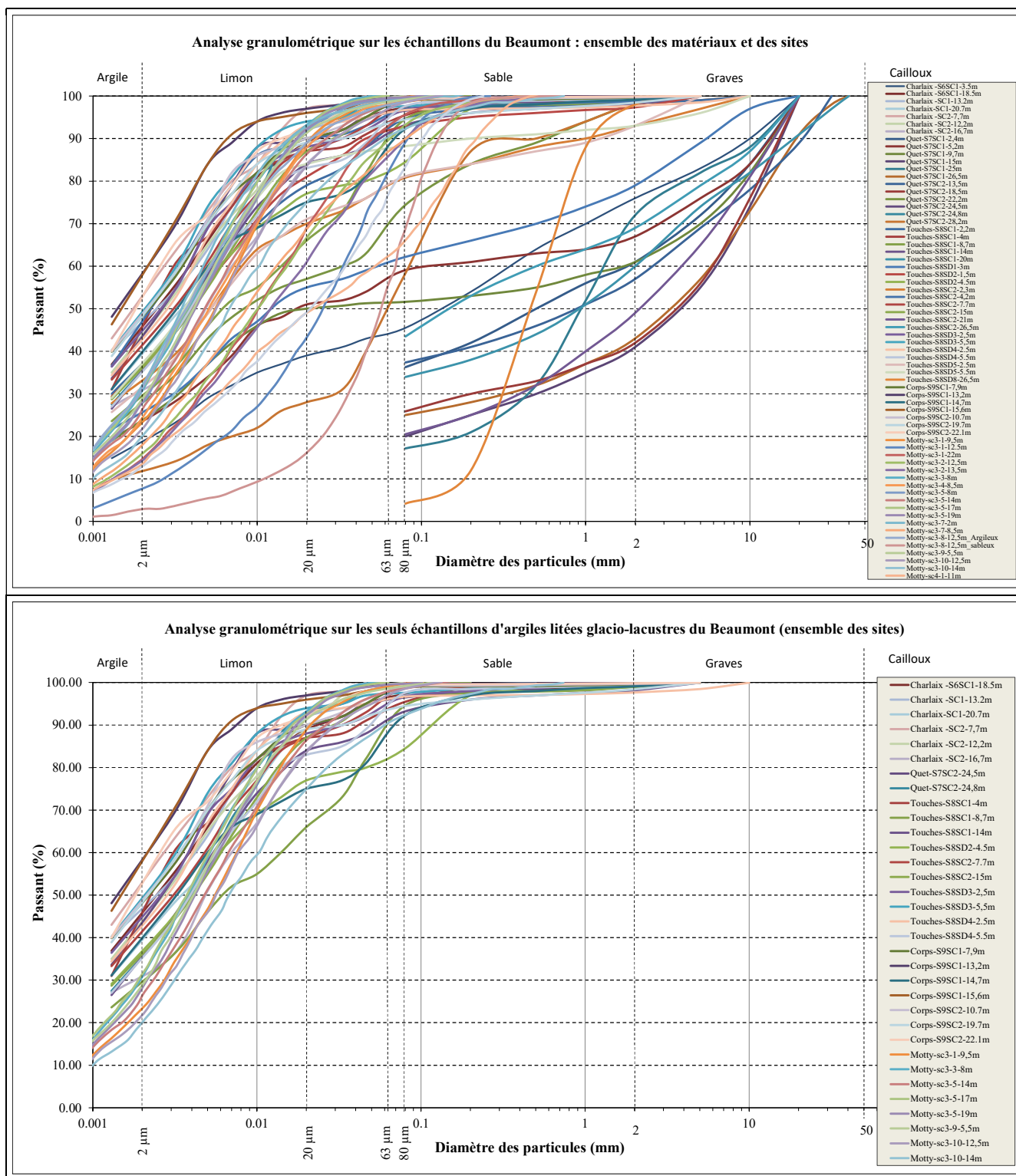


Figure 2 : Mise en regard des courbes granulométriques obtenues sur l'ensemble des prélèvements des 5 sites d'étude (en haut) et des seules courbes granulométriques relatives aux argiles litées glacio-lacustres (en bas)

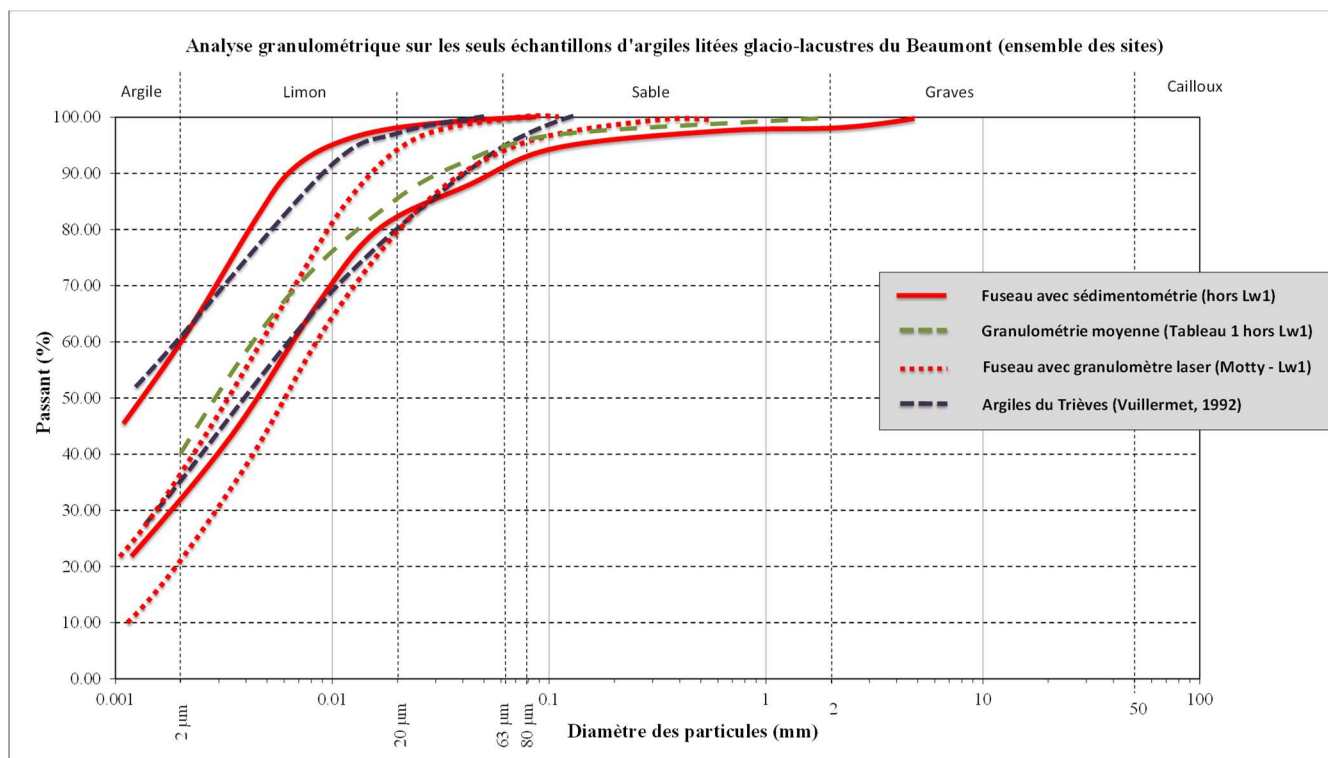


Figure 3 : Identification des fuseaux granulométriques typiques des argiles litées glacio-lacustres du Beaumont à partir des courbes de la Figure 2 et comparaison avec le fuseau typique des argiles du Trièves.

2.1.3 Synthèse graphique : indice de plasticité, diagramme de Casagrande

Le diagramme de Casagrande est une représentation de référence employée en particulier pour dénommer les sols argileux dans la classification USCS-LCPC (voir livrable L-A2). Elle met en relation la limite de liquidité w_L et l'indice de plasticité IP, et permet de distinguer notamment les zones des argiles peu plastiques à très plastiques et les zones des limons peu plastiques à très plastiques.

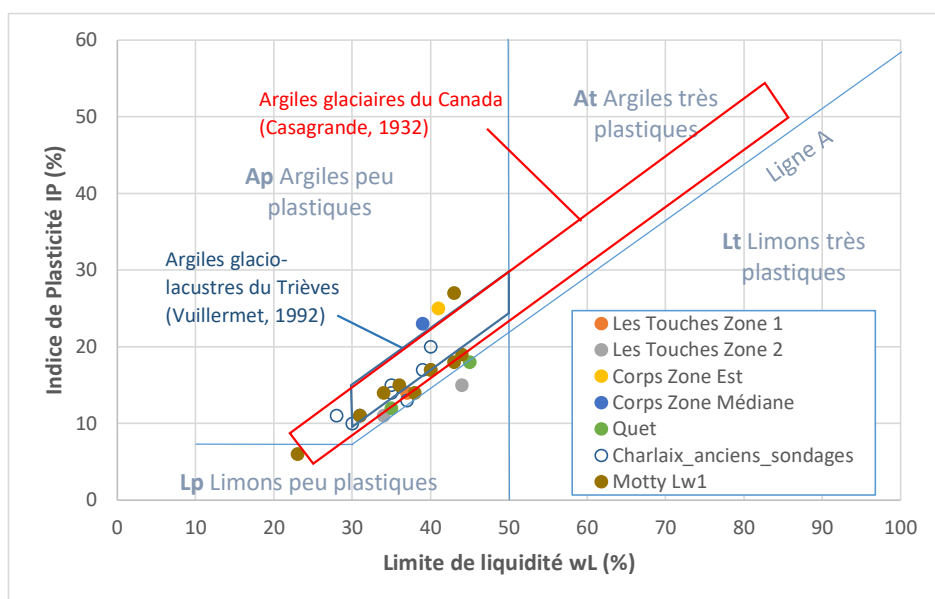


Figure 4 : Résultats d'essais sur les argiles litées glacio-lacustres du Beaumont prélevées dans les différents sites d'étude et comparaison avec deux fuseaux issus de la littérature

La Figure 4 présente, dans ce diagramme :

- les points relatifs aux argiles litées glacio-lacustres des différents sites d'étude du projet MLA3 ;
- la zone typique des argiles glacio-lacustres du Trièves voisines, d'après (Vuillermet, 1992) ;
- la zone typique des argiles glaciaires du Canada reportée par (Casagrande, 1932).

Comme cela est souvent observé pour des sols issus d'une même origine géologique, les propriétés des argiles glacio-lacustres du Beaumont **tendent à s'aligner parallèlement à la « ligne A »** du diagramme. Elles apparaissent tout-à-fait cohérentes avec les deux fuseaux issus de la littérature également présentés dans le diagramme, malgré une tendance à des IP légèrement plus faibles. Il pourrait toutefois s'agir d'un biais statistique.

Comme souligné dans le livrable L-A2, la relative dispersion des points au sein de cet ensemble est également à rapprocher des **différences de nature pouvant exister entre les lits au sein des argiles varvées** (voir Figure 5). 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** citées en section 2.1.1, 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 voisine du Trièves (voir minéralogie du Tableau 2).



Figure 5 : Litages bien visibles sur des échantillons issus des prélèvements carottés du site de Charlaix.

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)

2.1.4 Synthèse graphique : valeur au bleu VBS

Les valeurs au bleu des sols peuvent être couramment représentées dans un diagramme les reliant au passant à 2 μm C_2 issu des analyses granulométriques (dans lequel se retrouvent la plupart des argiles minéralogiques). (Magnan & Youssefian, 1989), sur la base de l'analyse d'un grand nombre d'essais de laboratoire, ont proposé un zonage de ce diagramme, correspondant aux dénominations de Casagrande.

Les résultats d'essais issus des sites d'études du projet MLA3 sont cohérents avec l'allure générale du diagramme de (Magnan & Youssefian, 1989) (droites rayonnant depuis l'origine), et **s'alignent raisonnablement sur une corrélation $VBS \approx 0.045 C_2$** . Curieusement, cette relation reste d'ailleurs valable pour les autres matériaux prélevés sur la zone du Beaumont (constat observable en reprenant l'ensemble des données du livrable L-A2 dans ce même diagramme), ce qui pourrait indiquer une sensibilité relativement similaire des argiles dans les différents sols. En pratique, l'indice d'activité $A_{CB} = VBS / C_2 \times 100$ s'avère être en moyenne autour de 5 ce qui évoque à nouveau des argiles peu actives.

Les données du Motty (Lw1) sont situées dans la partie basse de la représentation. À nouveau, cela est lié au biais introduit par l'usage de la granulométrie laser par rapport à la sédimentométrie employée sur les autres sites. Si on multiplie par 1.5 la valeur de C_2 des échantillons du Motty (ce qui correspond à la correction nécessaire pour faire correspondre les fuseaux dans la Figure 3), le points du Motty se retrouvent alors en parfaite correspondance avec ceux des autres sites.

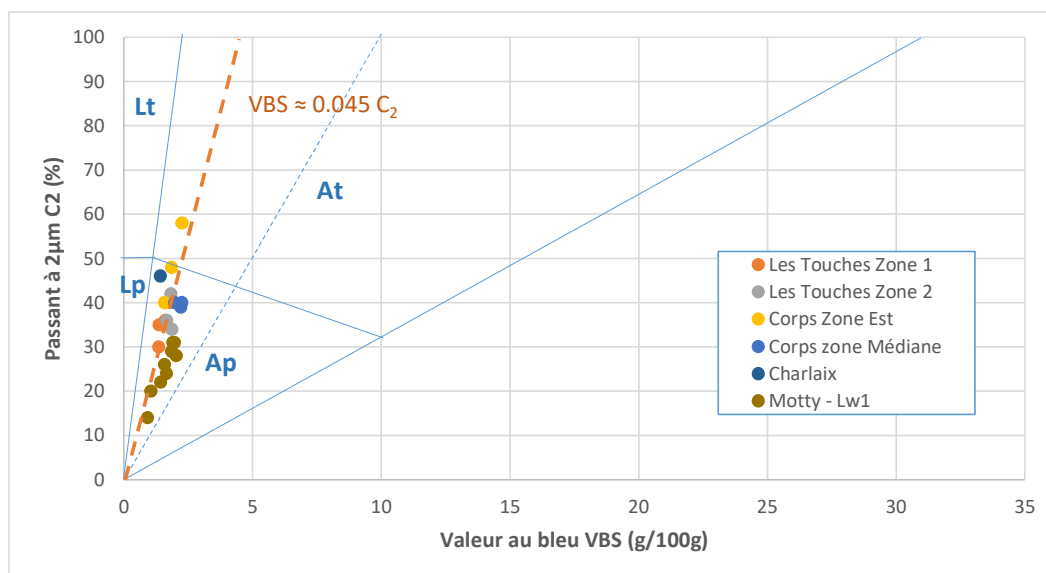


Figure 6 : Représentation des valeurs au bleu VBS des argiles litées glacio-lacustres du Beaumont dans le diagramme C_2 - VBS de Magnan et Youssefian (1989)

2.1.5 Synthèse graphique : classification GTR des sols fins

Les argiles glacio-lacustres du Beaumont, de catégories A1 à A3, peuvent être représentées dans le diagramme conventionnel de classification du GTR (voir (LCPC-SETRA, 1992)). La Figure 7 montre le résultat de cette représentation. En pratique, comme ces matériaux montrent en très grande majorité des passants à 80 μm proches de 100 %, peu de catégories de la classification GTR sont concernées et **les points s'avèrent peu dispersés**. La classification dans ce cas se ramène quasiment à un tri suivant la valeur d'IP ou de VBS, avec un intérêt plus limité. Néanmoins, une « zone des argiles glacio-lacustres du Beaumont » apparaît clairement.

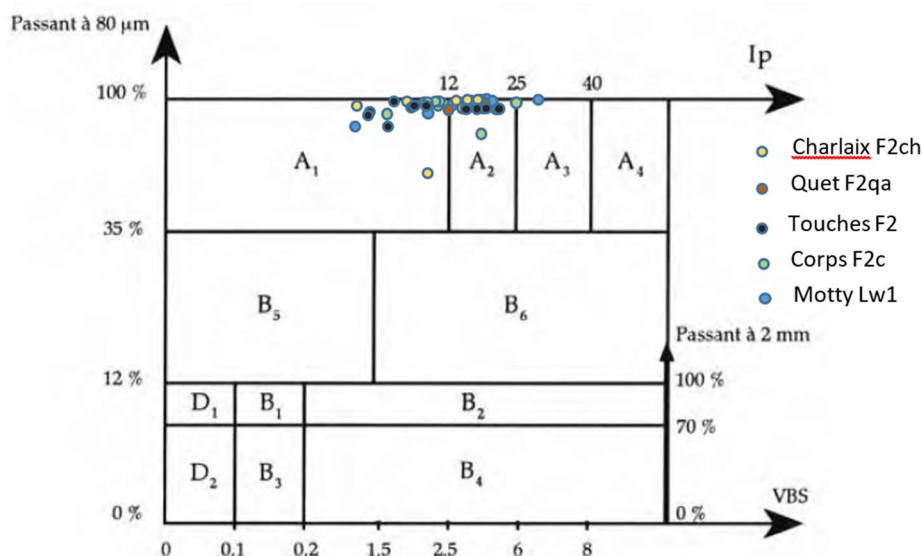


Figure 7 : Représentation des argiles litées glacio-lacustres du Beaumont dans le diagramme usuel du guide des terrassements routiers « GTR » (LCPC-SETRA, 1992)

2.1.6 Synthèse graphique : triangle des textures

Comme dans le livrable L-A2, c'est le **triangle des textures du GEPPA** qui a été retenu pour représenter les échantillons d'argiles glacio-lacustres du Beaumont. Pour mémoire, la limite haute des limons est fixée à 50 µm dans cette représentation, et les proportions ont été calculées à partir de la granulométrie complète (pas uniquement à partir de la fraction 0-2 mm).

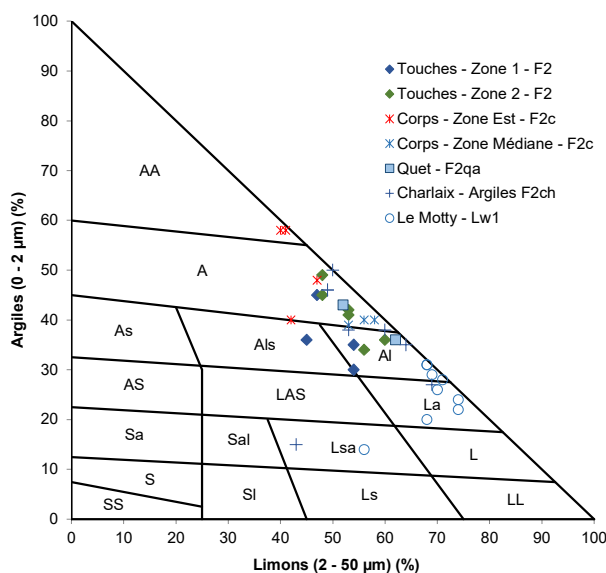


Figure 8 : Représentation de la granulométrie des argiles glacio-lacustres du Beaumont dans le triangle des textures du GEPPA

Une « zone des argiles glacio-lacustres » apparaît nettement. **Les sols se classent majoritairement dans les catégories A, Al et Als c'est-à-dire Argile, Argile limoneuse et Argile limono-sableuse.** Ponctuellement, quelques Limons sablo-argileux (Lsa) et Argiles lourdes (AA) peuvent également être rencontrés. On retrouve dans cette représentation le biais granulométrique des échantillons du Motty, qui se trouvent légèrement décalés par rapport à la moyenne des autres sites, du fait de l'usage du

granulomètre laser. Comme dans les représentations précédentes, en corrigeant ce biais par un facteur 1.5 sur le passant à 2 μm , les points redeviennent tout-à-fait comparables à ceux observés ailleurs.

2.2 Masses volumiques, teneurs en eau, saturation

2.2.1 Synthèse des tableaux de valeurs

Sont synthétisées ci-après les caractéristiques de **masse volumique, teneur en eau et saturation** des échantillons d'argiles litées glacio-lacustres du Beaumont.

Ces mesures ont pu être effectuées soit spécifiquement sur carottes, soit à l'occasion d'essais mécaniques sur échantillons « intacts » (non remaniés), comme des essais œdométriques ou de cisaillement. Dans ce dernier cas plusieurs éprouvettes peuvent avoir fait l'objet de mesures à une même profondeur moyenne. Les mesures de teneurs en eau isolées (hors mesures de masse volumique) n'ont pas été prises en compte dans l'analyse, puisqu'elles ne permettent pas de conclure à elles seules sur le degré d'humidification ou de saturation du matériau.

Site	Sondage	Prof. (m)	Couche	ρ (Mg/m ³)	ρ_s (Mg/m ³)	w (%)	ρ_d (Mg/m ³)	Sr (%)
Charlaix	SC1	13.2	F2ch	1.97	-	27.8	1.54	100
				1.99	-	24.3	1.6	95
				2.00	-	26.8	1.58	102
	S6-SC1	11.10	F2ch	2.06	-	25.0	1.65	106
				2.07	-	25.0	1.65	106
				2.04	-	22.0	1.67	97
				2.07	-	21.6	1.70	99
		15.5	F2ch	2.11	-	20.5	1.75	102
		21.7	F2ch	2.04	-	23.2	1.65	99
				1.98	-	23.8	1.6	94
				2.03	-	23.1	1.65	98
Quet	S7-SC2	24	F2qa	2.03	2.70	24.1	1.63	100
				2.04	-	23.6	1.65	101
				2.08	-	23.8	1.68	106
Les Touches	S8-SC1	6.2	F2	2.03	2.63	21.5	1.66	97
		7.8	F2	2.06	-	24.4	1.65	104
				2.08	-	23.0	1.69	103
				2.10	-	21.9	1.72	105
				2.05	-	24.8	1.64	104
				2.14	-	19.4	1.8	104
		8.2	F2	2.14	-	19.5	1.79	104
				2.15	-	19.2	1.8	104
				2.05	2.74	23.3	1.65	97
	S8-SC2	7.7	F2	2.08	-	22.9	1.69	104
	S8-SC2	8.3	F2	2.11	-	21.8	1.74	106
				2.04	-	22.2	1.67	97

Site	Sondage	Prof. (m)	Couche	ρ (Mg/m³)	ρ _s (Mg/m³)	w (%)	ρ _d (Mg/m³)	Sr (%)	
Corps	S9-SC1	10.9	F2c	2.07	-	22.9	1.69	103	
				2.08	-	23.8	1.68	106	
				2.06	-	20.4	1.71	96	
		12.5	F2c	2.11	-	19.2	1.77	99	
	S9-SC3	6.8	F2c	2.08	-	21.8	1.71	101	
				2.12	-	20.5	1.76	103	
2.12				-	18.6	1.78	98		
Le Motty	SC3-1	9.5	Lw1	2.17	-	18.5	1.83	105	
				2.15	-	18.7	1.81	102	
				2.17	-	17.0	1.85	100	
	SC3-3	8.0	Lw1	2.35	-	23.0	1.69	103	
				2.58	-	25.3	1.63	104	
				2.39	-	23.4	1.69	105	
	SC3-5	14.2	Lw1	1.94	-	23.7	1.67	104	
				2.07	-	23.7	1.68	105	
		17.2	Lw1	2.06	-	24.1	1.66	104	
				2.03	-	25.8	1.61	103	
				2.06	-	24.2	1.66	104	
		19.2	Lw1	2.03	-	25.4	1.62	103	
				2.04	-	24.9	1.63	103	
				2.05	-	24.7	1.64	103	
	SC3-8	12.6	Lw1	2.06	-	22.0	1.69	99	
				2.07	-	23.0	1.68	102	
				2.07	-	23.0	1.69	103	
	SC3-9	5.5	Lw1	2.01	-	26.9	1.58	104	
				1.97	-	29.1	1.53	102	
				1.99	-	28.9	1.54	104	
	SC3-10	12.7	Lw1	2.19	-	18.0	1.86	107	
				2.17	-	18.8	1.83	106	
				2.17	-	18.9	1.83	106	
		14.2	Lw1	2.16	-	19.2	1.81	105	
				2.11	-	21.9	1.73	106	
				2.13	-	21.0	1.76	106	
	Moyennes :				2.09	2.69	22.7	1.69	102
	Ecart-types :				0.101	0.056	2.71	0.079	3.2
	Coeff. variation :				0.05	0.02	0.12	0.05	0.03

Tableau 3 : Masses volumiques, teneurs en eau et taux de saturation obtenus sur les argiles glacio-lacustres du Beaumont, sur les 5 sites d'étude

La **masse volumique sèche moyenne** obtenue sur l'ensemble des échantillons est de **1.69 Mg/m³** ce qui indique une compacité généralement peu élevée. Les extrêmes vont de 1.53 à 1.86 Mg/m³. Les mesures de **masse volumique des grains** sont peu nombreuses : elles fournissent toutefois une valeur moyenne de **2.7 Mg/m³** qui correspond à une observation courante sur les sols fins.

Le **taux de saturation S_r** a également pu être calculé pour chaque échantillon. Pour mémoire, S_r désigne le rapport entre le volume d'eau du matériau et le volume « des vides » (c'est-à-dire des espaces intergranulaires). Il est calculé par :

$$S_r = \frac{w \cdot \rho_s \cdot \rho_d}{\rho_s - \rho_d}$$

S_r apparaît régulièrement supérieur à 100 % dans le tableau (y compris sur la moyenne) ce qui n'est normalement pas possible. Cela est usuellement lié :

- à des défauts de mesure du volume, évalué au pied à coulisse sur les éprouvettes taillées destinées aux essais mécaniques,
- ou à une valeur incorrecte de ρ_s qui est simplement estimée à 2.7 Mg/m³ lorsqu'il n'y a pas eu de mesure au pycnomètre sur les grains de l'échantillon.

Compte-tenu de l'ensemble des valeurs mesurées, toutes proches de 100%, on pourra retenir au final que **les argiles glacio-lacustres sont systématiquement saturées ou quasi-saturées en place, indépendamment de la profondeur de prélèvement.**

2.2.2 Synthèses graphiques

Les valeurs du Tableau 3 sont représentées dans les graphiques de la Figure 9, d'une part dans le diagramme classique teneur en eau – masse volumique sèche – saturation couramment employé en terrassement, d'autre part en termes de relation entre les masses volumiques sèches et la profondeur de prélèvement.

La première représentation permet de retrouver les constats mentionnés dans le paragraphe précédent en termes de variabilité des valeurs mesurées et de taux de saturation. La seconde représentation permet d'observer une **absence de corrélation entre la profondeur de prélèvement et la masse volumique des échantillons, que ce paramètre soit examiné sur un site donné ou sur l'ensemble des sites**. Cela pourrait être un indice de non-corrélation des caractéristiques mécaniques des sols en présence avec la profondeur (la résistance étant fréquemment liée à la densité pour les sols sableux à limoneux), sous réserve de l'influence ou non de la consolidation de la fraction argileuse. Cela sera examiné dans la section 3.

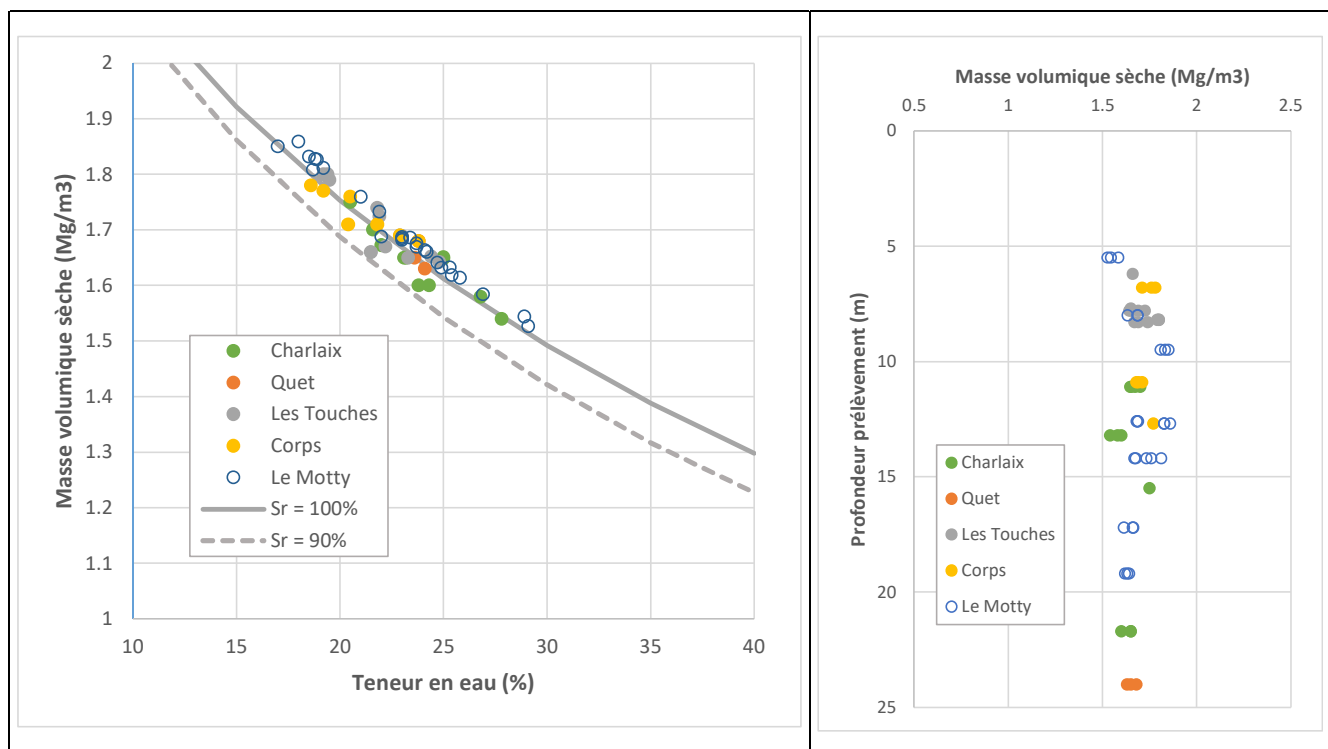


Figure 9 : Mesures sur les prélèvements des différents sites : (à gauche) masses volumiques sèches, teneurs en eau et taux de saturation ; (à droite) masses volumiques sèches en fonction de la profondeur

2.3 Teneurs en carbonates

Bien que peu nombreuses, plusieurs mesures de teneurs en carbonates réalisées dans le cadre du projet MLA3 (voir livrable L-A2) concernent les argiles glacio-lacustres. Elles sont synthétisées dans le Tableau 4.

Site	Sondage	Prof. (m)	Couche	Teneur en carbonates	Qualificatif
Charlaix	S6-SC1	15.6	F2ch	13 %	Faiblement marneux
Les Touches	S8-SC1-I1	8.5	F2	26 %	Faiblement marneux
	S8-SC2-I3	12.1	F2	33 %	Marneux
Corps	S9-SC1-I1	12.1	F2c	18 %	Faiblement marneux
	S9-SC2-I2	10.7	F2c	27 %	Faiblement marneux

Tableau 4 : Teneurs en carbonates mesurées sur les argiles litées glacio-lacustres des sites de Charlaix (F2ch), Les Touches (F2), Corps (F2c)

Dans l'ensemble, ces matériaux apparaissent **faiblement marneux**, avec des teneurs en carbonates de l'ordre de 15 à 30 % (moyenne à 23 % mais sur un nombre d'échantillons faible).

2.4 Carte d'identité descriptive des argiles litées glacio-lacustres du Beaumont

Les caractéristiques mesurées sur l'ensemble des essais ont permis de positionner les argiles glacio-lacustres du Beaumont dans différentes représentations. Une « **carte d'identité** » indiquant les zones typiques de ces matériaux est donc présentée en Figure 10.

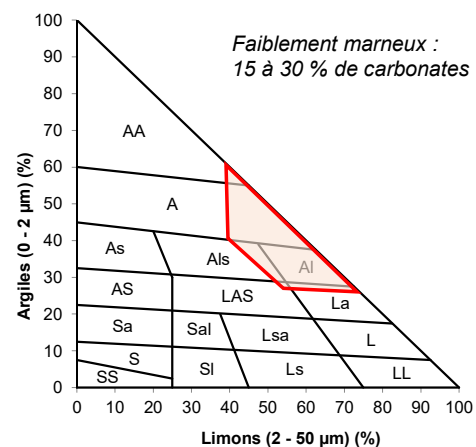
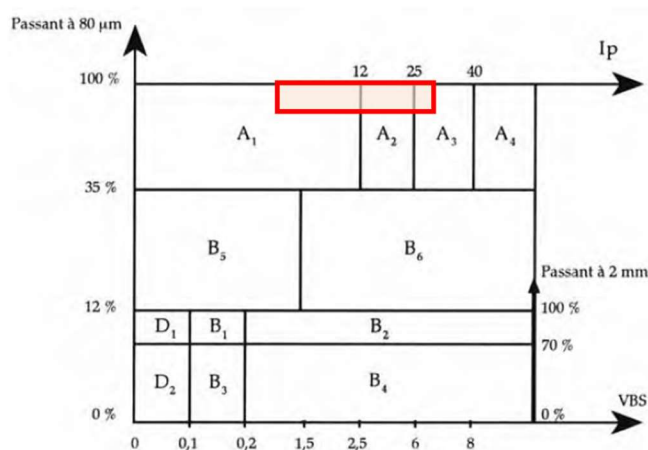
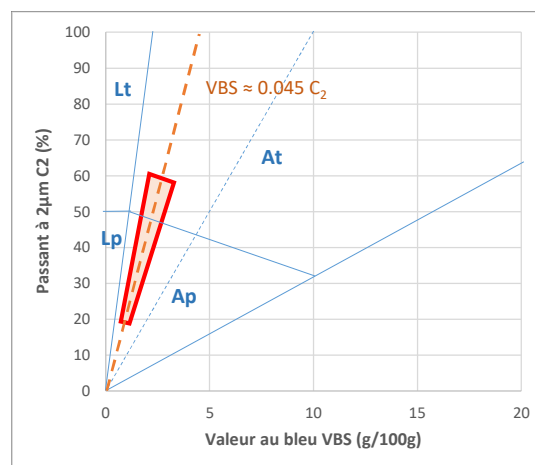
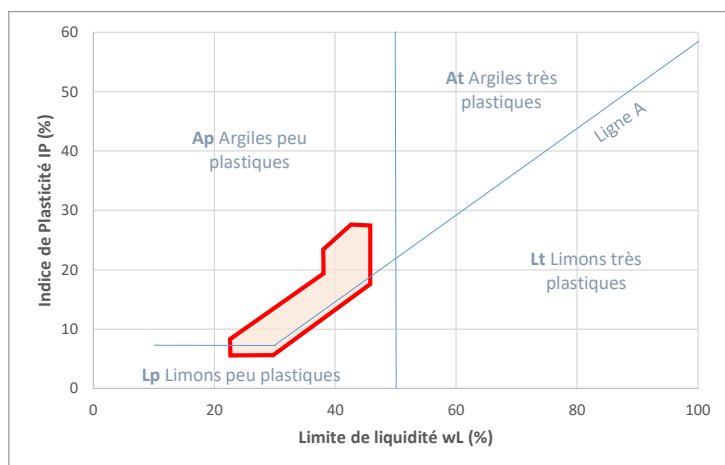
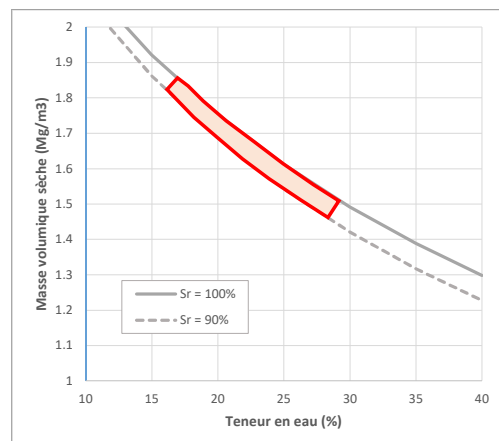
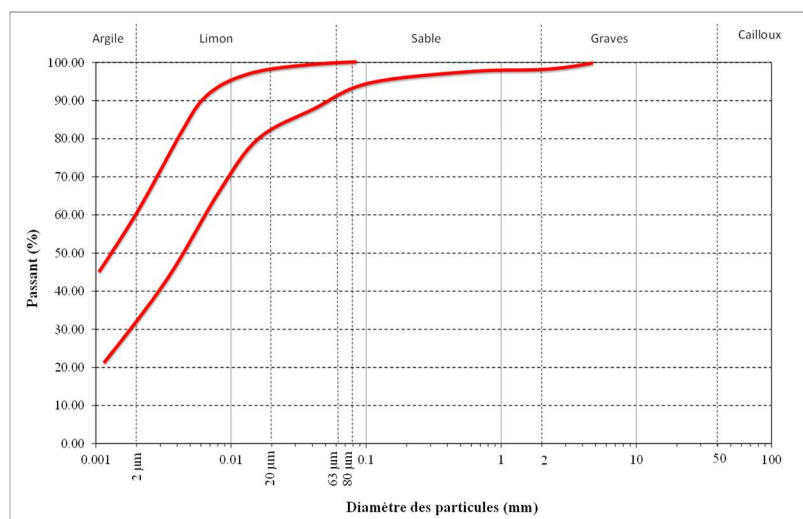


Figure 10 : Carte d'identité des argiles litées glacio-lacustres du Beaumont dans différentes représentations : Fuseau granulométrique ; Masse volumique sèche vs. Teneur en eau ; VBS vs. passant à 2 µm C2 (par sédimentométrie) ; diagramme de Casagrande (IP vs. w_L), classification GTR, classification triangulaire des sols du GEPPA.

3 PROPRIETES MECANIKES DES ARGILES LITEES DU BEAUMONT

Les différentes propriétés mécaniques synthétisées ici ont été présentées dans le livrable L-A3. Le lecteur pourra s'y référer pour retrouver les différents paramètres d'essais, les courbes de résultats, ainsi qu'une analyse plus détaillée de chaque essai.

3.1 Caractéristiques œdométriques

Les **résultats d'essais œdométriques relatifs aux seules argiles litées glacio-lacustres** du Beaumont sont synthétisés dans le Tableau 5 ci-dessous.

	Sondage	Prof. (m)	Couche	e_0 (-)	σ'_{v0} (kPa)	C_s (-)	C_c (-)	σ'_p (kPa)	c_v (m ² /s)	C_α (-) (à σ'_{v0})	Observations
Charlaix	SC1 (2014)	21.0	F2ch	0.787	280	0.022	0.100	90	3.16×10^{-7} à 1.68×10^{-6}	1.31×10^{-3}	Echantillon remanié – disquage des varves
	S6-SC1 (2018)	18.7	F2ch	0.815	376	0.022	0.152	80	1.04×10^{-7} à 2.72×10^{-7}	1.74×10^{-3}	Echantillon remanié
	S6-SC1 (2018)	15.5	F2ch	0.494	310	0.023	0.132	310	1.89×10^{-7} à 3.62×10^{-7}	1.12×10^{-3}	Compensation du gonflement initial
Corps	SC9-SC1 (2018)	12.7	F2c	0.487	175	0.024	0.146	175	7.33×10^{-8} à 1.81×10^{-7}	7.32×10^{-4}	Courbes irrégulières – Valeurs indicatives

Tableau 5 : Synthèse des essais œdométriques menés sur les argiles litées glacio-lacustres du Beaumont (sites de Charlaix et Corps)

Au total, les essais sont peu nombreux. Cela n'est pas surprenant, les essais mécaniques destinés à mesurer les caractéristiques de cisaillement (boîte de Casagrande, appareil triaxial) étant généralement plus appropriés à l'analyse des mécanismes des glissements de terrains que les essais œdométriques.

Ces derniers permettent toutefois de disposer d'éléments sur le degré de surconsolidation des matériaux et sur leurs paramètres de compressibilité.

Au final, **un seul essai s'avère exploitable**, celui de Charlaix S6-SC1-15.5 m. En effet, les deux essais SC1-21.0 m et S6-SC1-18.7 m n'avaient pas fait l'objet d'une procédure de compensation du gonflement initial et/ou étaient issus de prélèvements potentiellement remaniés : cela s'est traduit par des disquages de l'échantillon, perturbant les déformations mesurées et conduisant à l'observation d'une « sous-consolidation » ($\sigma'_p \ll \sigma'_{v0}$) sans signification physique ici. L'essai sur le prélèvement de Corps ne montre pas de sous-consolidation mais a fait l'objet d'une procédure d'essai automatique accélérée qui s'est au final avérée non satisfaisante (courbes irrégulières). Les valeurs obtenues y sont toutefois cohérentes avec celles de l'essai Charlaix-S6-SC1-15.5 m.

Au final, on pourra retenir de ces essais que les argiles litées glacio-lacustres du Beaumont ne montrent **pas de surconsolidation significative (elles paraissent normalement consolidées $\sigma'_p \approx \sigma'_{v0}$)**. Les coefficients de compressibilité sont de l'ordre de $C_s \approx 0.023$ et $C_c \approx 0.132$ et les coefficients de consolidation c_v de l'ordre de 2.5×10^{-7} m²/s. Le fluage œdométrique est modéré, avec un coefficient C_α de l'ordre de 1 à 2×10^{-3} dans les conditions de contrainte en place.

3.2 Caractéristiques de résistance au cisaillement (essais triaxiaux et à la boîte de Casagrande)

3.2.1 Synthèse des valeurs relevées sur les différents sites (approche conventionnelle)

Le Tableau 6 ci-dessous reprend les valeurs de cohésion c' et d'angle de frottement φ' obtenues sur les argiles glacio-lacustres des différents sites étudiés dans le cadre du projet, **en approche conventionnelle**. Nous nommons ici « approche conventionnelle » la pratique courante de l'ingénierie géotechnique, consistant à réaliser des essais de résistance au cisaillement sur 3 ou 4 échantillons prélevés à une profondeur similaire et soumis à des contraintes de confinement différentes, et à en déduire par régression une droite de Mohr-Coulomb donnant les valeurs de c' et φ' . Dans cette approche, seuls les sols argileux surconsolidés sont caractérisés par une cohésion significative, les sols normalement consolidés montrant une cohésion nulle ou très faible. Le lecteur pourra se reporter à la section 2.3.2 du livrable L-A3 pour des explications plus détaillées, ou à la section 4 du présent rapport.

Pour mémoire, les valeurs « de pic » (c'_{pic} , φ'_{pic}) sont usuellement obtenues au maximum du déviateur de contrainte q ou de l'effort de cisaillement τ ; les valeurs ultimes (c'_{ult} , φ'_{ult}) sont celles obtenues en fin d'essai, au maximum de déformation (lorsque leur détermination est possible).

	Sondage	Prof. (m)	Couche	γ_d (kN/m ³)	c'_{pic} (kPa)	φ'_{pic} (°)	c'_{ult} (kPa)	φ'_{ult} (°)	Observations
Charlaix	TP2 (2001)	24.0	F2ch (F1ch ?)	16.3	17	21.9	0	23.6	Triaxial
	SC2 (2007)	5.80	F2ch (F1ch ?)	16.4 à 17.8	Cisaillement alterné, quasi-inexploitable. Matériau plus sableux. Valeurs estimées : $c'_{pic} = 17.3$ kPa - $\varphi'_{pic} = 32.7^\circ$; $\varphi'_{res,gd} = 16.9^\circ$				
	SC1 (2012)	13.20	F2ch	15.4 à 16.0	18	20	4	20	Boîte de Casagrande
	S6-SC1 (2018)	11.10	F2ch	16.2 à 16.7	3	25	-	-	Triaxial
		15.50	F2ch	-	Boîte de Casagrande plein lits et inter-lits. Valeurs estimées : Plein lit : $c'_{pic} = 9$ kPa - $\varphi'_{pic} = 26^\circ$ - Inter-lit $c'_{pic} \approx 0$ kPa - $\varphi'_{pic} = 20^\circ$				
		21.70	F2ch	16.0 à 16.5	23	20	6	20	Boîte de Casagrande
Quet	S7-SC2	24.0	F2qa	16.3 – 16.8	23	18	7	19	Boîte de Casagrande
Les Touches	S8-SC1 (2018)	7.80	F2	16.1 à 16.9	6	23	-	-	Triaxial
		7.80	F2	16.2	0	18	-	-	Triaxial – Point TOUT01 avec une rupture // lits
		8.20	F2	18.0	11	28	4	27	Boîte de Casagrande – Argile sableuse compacte, ferme
	S8-SC2 (2018)	8.30	F2	16.7 à 17.4	9	23	-	-	Triaxial
Corps	S9-SC1 (2018)	10.90	F2c	16.8 à 17.1	6	23	0	23	Triaxial CIU – Résistance ultime estimée
	S9-SC3 (2021)	6.80	F2c	17.1 à 17.8	0	29	0	27	Triaxial CIU – Sondage incliné

	Sondage	Prof. (m)	Couche	γ_d (kN/m ³)	c'_{pic} (kPa)	ϕ'_{pic} (°)	c'_{ult} (kPa)	ϕ'_{ult} (°)	Observations
Le Motty	SC3-1 (2017)	9.5	Lw1	17.7 à 18.1	0	27	-	-	Triaxial CID – 100-300-700 kPa Seul l'essai à 100 kPa présente une transition dilatant-contractant marquée
	SC3-3 (2017)	8.0	Lw1	16.0 à 16.5	0	23	-	-	Triaxial CIU – 100-200-500 kPa Les courbes p'-q n'évoquent pas de surconsolidation significative
	SC3-5 (2017)	14.2	Lw1	14.3 à 16.4	0	26	-	-	Triaxial CIU – 100-500 kPa Les courbes p'-q n'évoquent pas de surconsolidation significative.
		17.2	Lw1	15.8 à 16.3	0	26	-	-	Triaxial CIU – 100-300-700 kPa Les courbes p'-q n'évoquent pas de surconsolidation significative.
		19.2	Lw1	15.9 à 16.1	11	23	-	-	Triaxial CID – 100-300-700 kPa Seul l'essai à 100 kPa présente une transition dilatant-contractant marquée
	SC3-8 (2017)	12.6	Lw1	16.5 à 16.6	Triaxial CID – 100-300-700 kPa. Points non alignés, essai difficilement interprétable. Carotte hétérogène. Couples (c'_{pic} ; ϕ'_{pic}) possibles : (0 kPa ; 29°) – (0 kPa ; 27°) – (35 kPa ; 17°)				
	SC3-9 (2017)	5.5	Lw1	15.0 à 15.5	Triaxial CIU – 100-200-500 kPa. Les courbes p'-q n'évoquent pas de surconsolidation significative. Points non alignés. Couples (c'_{pic} ; ϕ'_{pic}) possibles : (13 kPa ; 18°) – (0 kPa ; 20°)				
	SC3-10 (2017)	12.7	Lw1	17.9 à 18.2	0	28	-	-	Triaxial CIU – 100-300-700 kPa Seule la courbe p'-q à 100 kPa peut évoquer une légère surconsolidation
		14.2	Lw1	17.0 à 17.8	18	25	-	-	Triaxial CID – 100-300-700 kPa Transition dilatant-contractant marquée sur les essais à 100 et 300 kPa

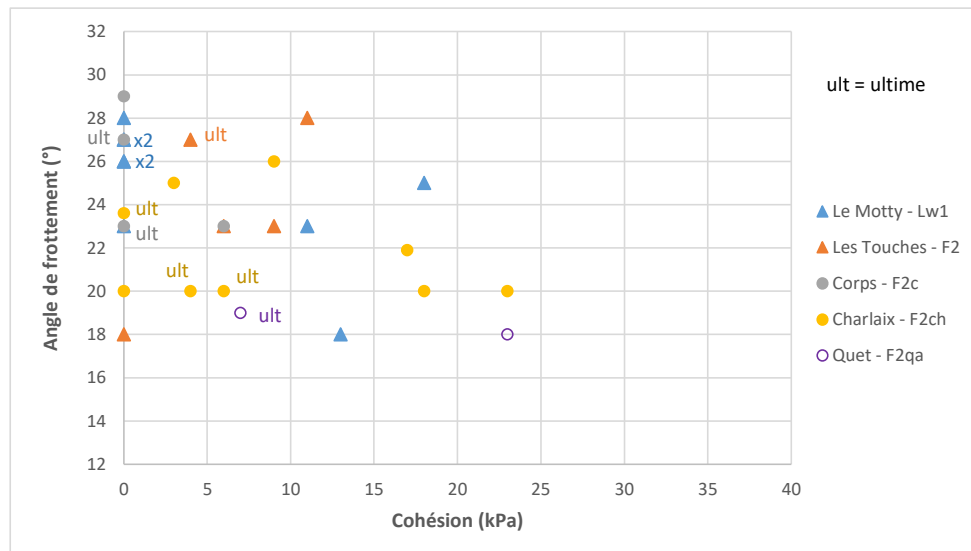
Tableau 6 : Synthèse des résistances au cisaillement mesurées en "approche conventionnelle" de Mohr-Coulomb (boîte de Casagrande ou appareil triaxial), sur les échantillons d'argiles glacio-lacustres du Beaumont des 5 sites d'étude

Pour les analyses suivantes (représentations graphiques, etc.) dérivant de ce tableau, les choix ci-après ont été faits sur les essais présentant des résultats inhabituels, dans l'esprit d'une approche « conventionnelle » de bureau d'études :

- Essai « Charlaix » SC2 (2007) – 5.80 m : essai non retenu (matériau plus sableux, courbes d'essai non concluantes) ;
- Essai « Charlaix » S6-SC1 (2018) – 15.50 m : conservation des deux jeux de valeurs, représentatifs des comportements plein-lit et inter-lit et donc de la variabilité possible des propriétés du matériau sur de petites distances ;
- Essai « Le Motty » SC3-8 (2017) – 12.60 m : conservation du couple (c'_{pic} , ϕ'_{pic}) moyennant au mieux les trois points à la rupture, à savoir : $c'_{pic} = 0$ kPa, $\phi'_{pic} = 27^\circ$;
- Essai « Le Motty » SC3-9 (2017) – 5.50 m : conservation du couple (c'_{pic} , ϕ'_{pic}) moyennant au mieux les trois points à la rupture, à savoir : $c'_{pic} = 13$ kPa, $\phi'_{pic} = 18^\circ$.

3.2.2 Variabilité des caractéristiques mécaniques en fonction des sites

La Figure 11 présente graphiquement les différentes **valeurs des paramètres de résistance au cisaillement** (cohésion, angle de frottement) du Tableau 6, **en fonction des sites d'étude**. Les points correspondants aux résistances ultimes sont signalés par la mention « ult », les autres points sont des résistances de pic.



3.2.3 Dépendance des résistances mécaniques au type d'essai de cisaillement

Le contrôle des conditions d'essais dans une boîte de cisaillement (type Casagrande) est usuellement considéré comme nettement moins rigoureux que dans un appareil triaxial. Il est par exemple difficile durant le cisaillement comme à la rupture de déterminer précisément, sur la base des conditions externes d'essai, l'état précis des contraintes au sein du matériau. Plus particulièrement, les effets suivants se superposent au sein de la boîte :

- rotation des contraintes principales au cours de l'essai ;
- mise en butée du matériau contre les parois de la boîte, hétérogénéité interne des contraintes, déplacements horizontaux non uniformes au sein de la boîte (voir (Hvorslev, 1960) par ex.). À noter toutefois que dans la littérature les avis divergent sur l'impact réel de ces biais sur la rupture finale (voir par ex. (Castellanos & Brandon, 2013)) ;
- effets de la bande de cisaillement imposée et de l'espacement entre les deux demi-boîtes lorsque des particules de quelques millimètres sont présentes : imbrication des grains et dilatance empêchée pouvant générer une sur-évaluation de la cohésion et/ou de l'angle de frottement ;
- contrôle approximatif de la saturation de l'échantillon (saturation sous faible pression d'eau, pas de procédure de Skempton contrairement à l'essai triaxial, etc.) et des conditions de drainage durant l'essai.

Il est donc légitime de s'interroger sur une possible différence entre les résultats acquis à l'appareil triaxial et à la boîte de Casagrande sur les argiles glacio-lacustres. La Figure 12 permet de comparer les valeurs de c' et ϕ' suivant les deux procédures d'essais.

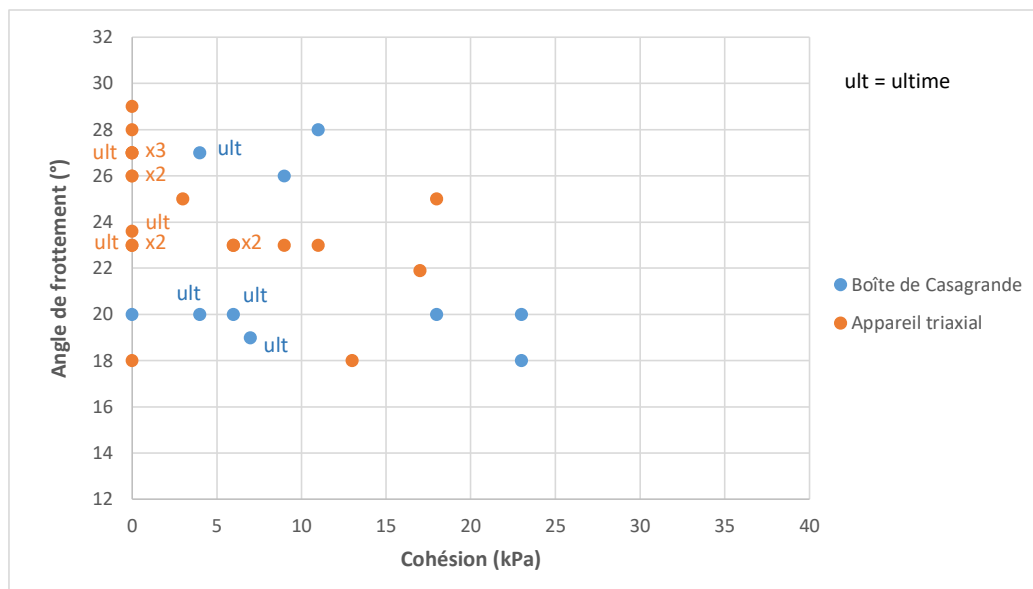


Figure 12 : Comparaison des valeurs de cohésion et angle de frottement obtenus sur les argiles glacio-lacustres du Beaumont en fonction du type d'essai de cisaillement utilisé (boîte de Casagrande, appareil triaxial)

La dispersion des angles de frottement apparaît similaire entre les deux méthodes. En revanche, la boîte de Casagrande conduit à des cohésions en moyenne plus fortes (par exemple : une seule valeur à 0 kPa à la boîte alors qu'elles sont nombreuses sur les essais triaxiaux, valeurs de pic fréquemment supérieures à 10 kPa) et **plus dispersées**. Les valeurs du Tableau 6 permettent de calculer sur les cohésions de pic une moyenne à 14 kPa pour les essais à la boîte contre 5 kPa pour les essais triaxiaux. Sur les cohésions ultimes, la moyenne est de 5 kPa à la boîte, contre 0 kPa au triaxial.

On retrouve donc ici un constat relativement courant de **surévaluation des cohésions sur les sols fins par la boîte de Casagrande**. Celle-ci ne sera donc pas recommandée pour évaluer ce paramètre sur les argiles glacio-lacustres du Beaumont.

3.2.4 Dépendance des résistances mécaniques à la profondeur de prélèvement

La Figure 13 représente l'évolution des paramètres c' et φ' en fonction de la profondeur de prélèvement de l'échantillon testé.

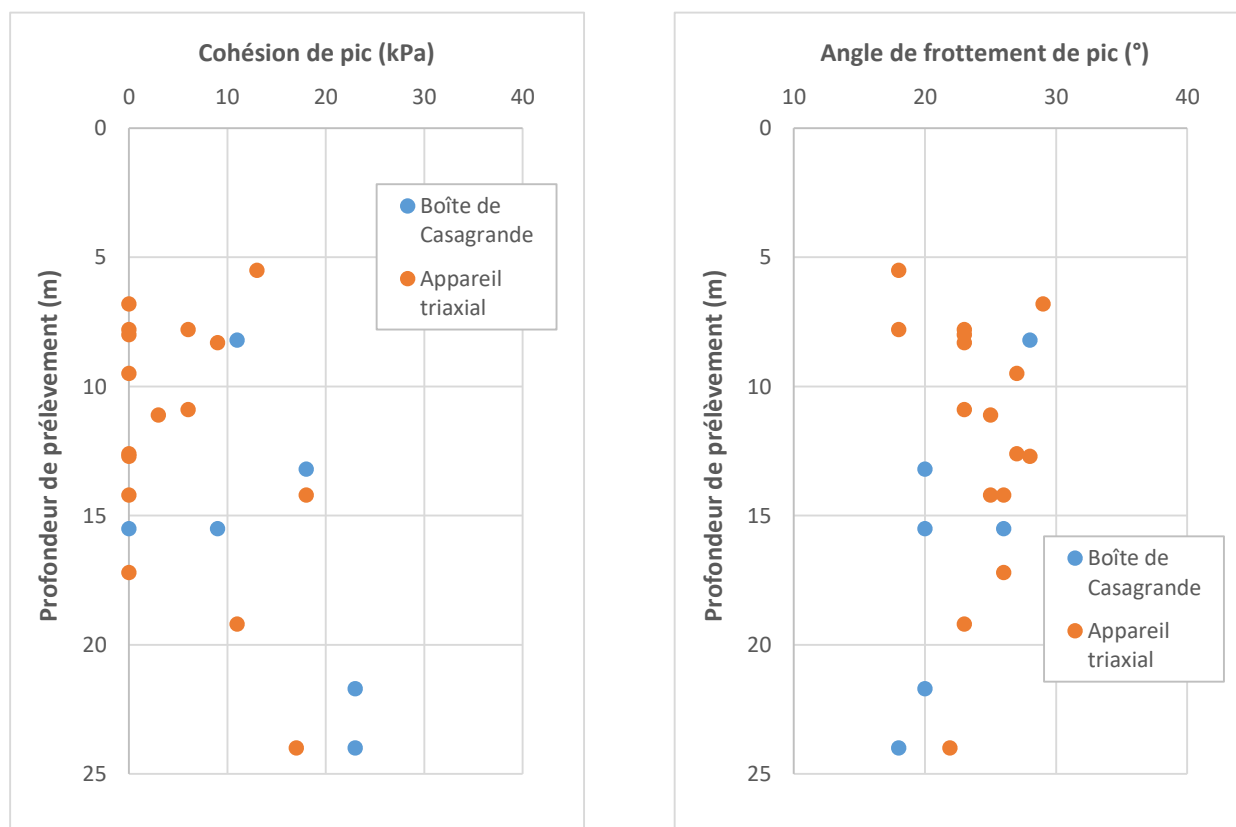


Figure 13 : Evolution de la cohésion et de l'angle de frottement suivant la profondeur de prélèvement des échantillons d'argiles glacio-lacustres du Beaumont

Sur les **angles de frottement**, aucune corrélation significative n'apparaît en fonction de la **profondeur**.

Sur les **cohésions**, la dispersion est importante comme vu dans la section précédente. On remarque néanmoins que les cohésions nulles à faibles se trouvent toutes dans les 17 premiers mètres, qui correspondent aux couches plus particulièrement susceptibles de remaniement par les glissements observés, ou d'altération chimique (réduction de la teneur en calcaire par exemple). Au-delà de 20 m, les cohésions relevées sont supérieures à 15 kPa (seulement 3 points disponibles cependant). Ces observations **semblent raisonnablement cohérentes avec l'hypothèse de matériaux peu ou pas surconsolidés**, le degré de consolidation ayant alors tendance à s'accroître avec la profondeur actuelle de prélèvement et les premiers mètres pouvant être chahutés par les mouvements de terrains.

3.2.5 Dépendance des résistances mécaniques au poids volumique sec

La Figure 14 représente la variation des paramètres c' et φ' en fonction du poids volumique sec de l'échantillon testé.

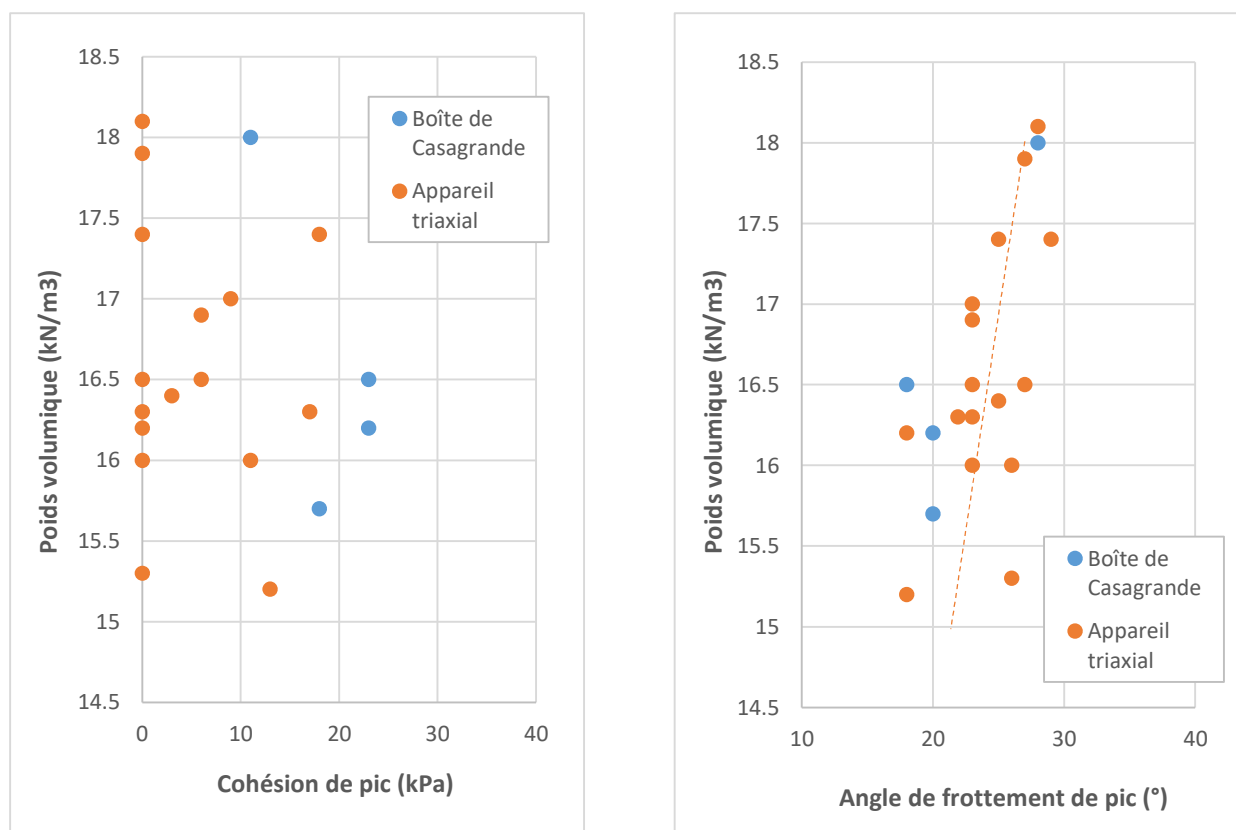


Figure 14 : Variation de la cohésion et de l'angle de frottement en fonction du poids volumique sec des échantillons d'argiles glacio-lacustres du Beaumont

Les **cohésions** ne montrent aucune corrélation avec les **poids volumiques secs** des échantillons.

Sur les **angles de frottement**, bien que les valeurs soient dispersées comme cela avait déjà été mis en évidence dans les sections précédentes, une tendance à l'**accroissement en fonction de la masse volumique sèche** est observée. C'est un constat assez courant sur les matériaux sablo-limoneux, mais plus rare sur des « argiles ». On rappellera toutefois que les argiles glacio-lacustres du Beaumont contiennent en réalité une part très significative de particules de taille limoneuse (voir 2.1).

Dans le cas présent la courbe de tendance proposée sur le graphique correspond approximativement à la relation : $\varphi' \approx 2 \cdot \gamma_d - 9$.

3.2.6 Dépendance des résistances mécaniques à la quantité d'argile

Sur le site du Motty, des analyses granulométriques ont été réalisées de manière systématique pour chaque essai de cisaillement à l'appareil triaxial. En croisant les données du Tableau 6 et du Tableau 1, on peut déterminer la proportion approximative d'argile dans l'échantillon, en se basant sur le passant à 2 μm (pratique courante en géotechnique même si elle inclut un biais dans la mesure où des particules non argileuses peuvent aussi se trouver dans la fraction 0-2 μm).

Deux autres essais triaxiaux pourraient faire l'objet de la même analyse : Charlaix-SC1(2012)-13.2m et Quet-S7-SC2-24m. Cependant, pour ces deux essais, les granulométries de la fraction fine ont été réalisées par sédimentométrie, ce qui n'est pas strictement comparable à la granulométrie laser comme déjà précisé antérieurement (voir 2.1.2 par exemple). De plus, les cisaillements ont été effectués à la boîte de Casagrande et non à l'appareil triaxial. Ces deux essais ne sont donc pas inclus dans l'analyse du fait des biais correspondants.

La Figure 15 montre donc les **valeurs de cohésion et d'angle de frottement au regard du passant à 2 μm** des échantillons sur le seul site du Motty. **Aucune corrélation n'apparaît sur la cohésion**, ce

qui était attendu car l'observation d'une cohésion significative dans un matériau saturé dépend certes de la présence d'argile mais aussi de son degré de surconsolidation (qui s'avère faible et variable d'un prélèvement à l'autre dans le cas présent, voir sections précédentes). En revanche, **l'angle de frottement semble montrer une tendance à augmenter lorsque la quantité d'argile mesurée diminue**. Cela est cohérent avec la mobilisation plus importante de particules frottantes (sableuses à limoneuses) dans le cisaillement lorsque l'argile minéralogique se raréfie. Le nombre de points disponible et la dispersion ne permettent toutefois pas de proposer une corrélation fiable entre ϕ' et le passant à 2 μm .

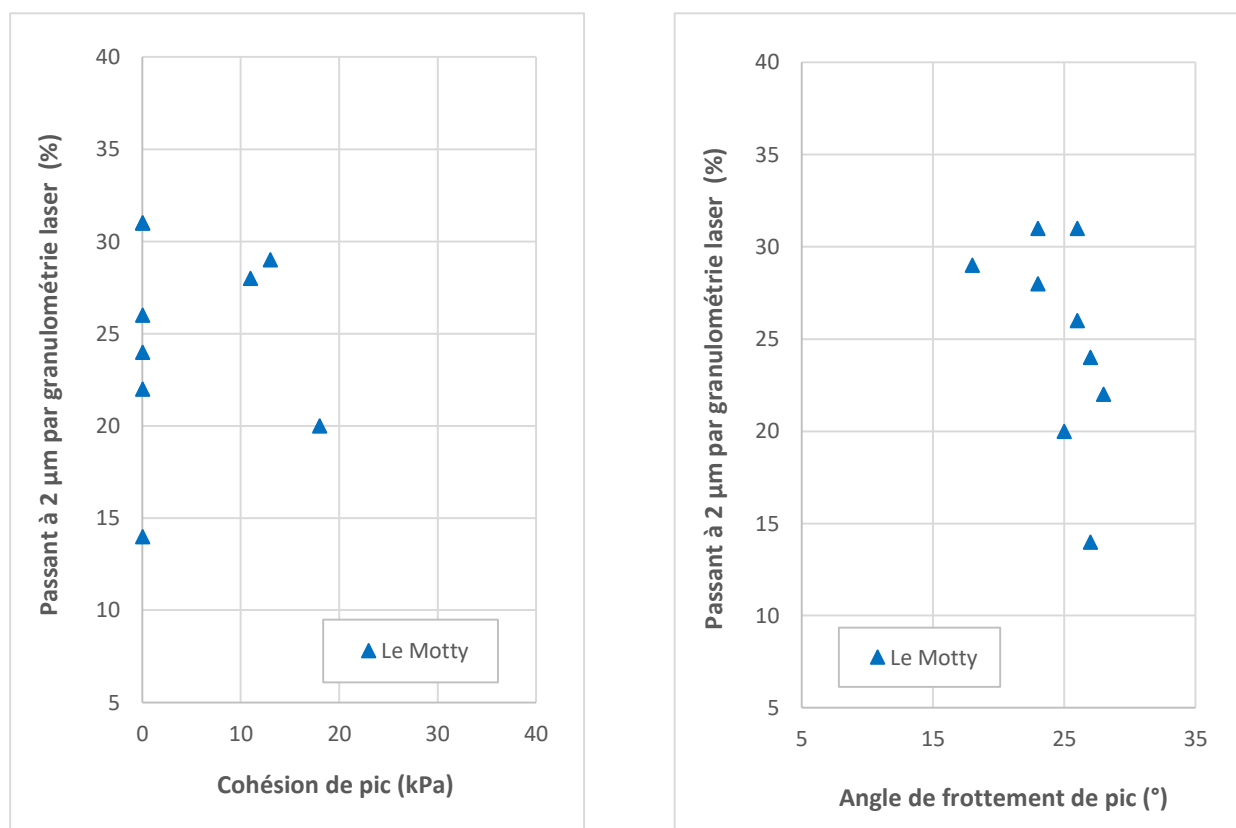


Figure 15 : Variation de la cohésion et de l'angle de frottement en fonction de la quantité d'argile (assimilée au passant à 2 μm par granulométrie laser) des échantillons d'argiles glacio-lacustres du site du Motty.

3.2.7 Conclusion sur les caractéristiques de résistance au cisaillement

À travers l'approche « conventionnelle », correspondant à celle couramment utilisée par les bureaux d'études en géotechnique (c'est-à-dire la réalisation de 3 à 4 essais de cisaillement successifs à une profondeur donnée pour en tirer un critère de Mohr-Coulomb), de premiers enseignements sur la résistance au cisaillement des argiles litées glacio-lacustres du Beaumont peuvent être tirés.

Tout d'abord, les échantillons apparaissent **en général peu surconsolidés**, comme cela avait déjà été anticipé sur la base des essais œdométriques. Cela se traduit par des **cohésions souvent faibles à nulles**, et pouvant dépendre de la profondeur (en-dessous des terrains remaniés par les glissements).

D'autre part, **les résistances s'avèrent dispersées**. Les angles de frottement peuvent varier entre 18 et 29° et les cohésions entre 0 et 23 kPa en valeurs de pic. De multiples facteurs interviennent dans cette dispersion d'après les observations réalisées :

- Le **type d'essai** utilisé : la boîte de Casagrande apparaît surévaluer les cohésions et ne sera donc pas recommandée en général sur ces matériaux ;

- La **profondeur de prélèvement** : elle est susceptible de jouer sur la cohésion lorsque les matériaux sont normalement consolidés, remaniés par les glissements, ou affectés par des altérations chimiques proches de la surface ;
- Le **poids volumique** des échantillons : il tend à faire croître l'angle de frottement ;
- La **quantité d'argile** (évaluée par le passant à 2 μm) : elle tend à faire diminuer l'angle de frottement.
- Le **litage** : la résistance mesurée peut varier en fonction des lits cisailés, ou de l'orientation de la sollicitation parallèle ou transversale au litage. Cet effet semble plus marqué sur les essais à la boîte qui présélectionnent la bande de cisaillement au sein du matériau.

En revanche, aucun lien n'est apparu entre la dispersion des valeurs et l'éloignement des sites de prélèvement : il s'agit donc plutôt d'une caractéristique de la formation et non d'un biais qui aurait été introduit en tentant de comparer des matériaux trop différents entre les sites.

Au final, pour des études de stabilité, un comportement moyen raisonnable pour les argiles glacio-lacustres du Beaumont impliquées dans les glissements le long de la RN85 peut être proposé avec les caractéristiques suivantes :

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

La cohésion pourra aussi être choisie nulle, pour les matériaux glissés notamment, comme cela a été montré par les essais. Des **études de sensibilité sur l'angle de frottement seront à recommander pour prendre en compte sa variabilité**, y compris au sein d'un même site, s'il n'y a que peu d'essais disponibles.

4 APPROFONDIR L'APPROCHE MECANIQUE ?

4.1 Modèles de comportement des argiles (analyse bibliographique)

4.1.1 Généralités

L'interprétation conventionnelle des essais de cisaillement, sous forme d'une simple droite de Mohr-Coulomb à partir de quelques tests sur des échantillons comparables, présente l'avantage de la simplicité et de l'applicabilité directe aux logiciels de calcul de stabilité des pentes (équilibre limite).

Cependant, cette approche ignore les comportements spécifiques aux argiles qui ont pu être traduits historiquement dans des modèles plus avancés et qui peuvent être utiles à des modélisations numériques fines. Elle **ignore également les comportements en contrainte – déformation – pression interstitielle au cours du cisaillement**, qui permettent de cerner les divers paramètres de déformabilité et de couplage hydro-mécanique utiles aux modèles numériques de type éléments finis par exemple. À noter que l'utilité de telles modélisations « avancées » n'est pas systématique pour le traitement des mouvements de terrains examinés ici et dépend de l'objectif recherché (voir livrable L-A5 et fin de la présente section 4).

On examine ici **s'il peut être intéressant d'approfondir l'étude mécanique** des matériaux impliqués dans les glissements des 5 sites d'étude du projet, sur la base des données disponibles, **avec des modèles de comportement plus complexes**. On se référera ici principalement à **l'approche de Cambridge** déjà présentée succinctement dans le livrable L-A3, qui est davantage détaillée ici. On abordera ensuite sa déclinaison dans le modèle conventionnel de Cam-Clay ainsi que les limites de ce modèle dans le cas des argiles réelles, afin de déterminer si une approche géomécanique plus aboutie peut être menée sur les essais rassemblés dans le cadre du projet MLA3.

4.1.2 Approche de Cambridge pour le comportement des argiles

L'approche « de Cambridge » se réfère aux **concepts d'état limite et d'état critique** pour comprendre le comportement des matériaux argileux au voisinage de la rupture. Elle a été établie initialement pour des **argiles « idéales », c'est-à-dire isotropes, parfaitement élasto-plastiques et ne présentant que très peu d'influence du temps ou de sa structure *in situ*** (voir (Leroueil, et al., 1985) par exemple). En pratique, cela correspond à des « argiles » pouvant être fabriquées en laboratoire par consolidation isotrope de matériau remanié tel que du kaolin. De fait, le modèle qui en est tiré permet de bien identifier des éléments clés du comportement du sol mais ne correspondra pas parfaitement aux argiles réelles rencontrées sur le terrain.

Le modèle distingue le comportement des argiles normalement consolidées de celles surconsolidées, et l'analyse dans un espace tridimensionnel ($e - p' - q$) (avec e l'indice des vides, p' la contrainte moyenne $(\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3')/3$, q le déviateur des contraintes $\sigma_1' - \sigma_3'$).

Dans le cas d'une **sollicitation de compression isotrope**, l'approche de Cambridge propose un modèle bilinéaire de pentes C_s (indice de gonflement ou de recompression) et C_c (indice de compression) dans le plan $(\log(p') - e)$, et les relations sont les suivantes (voir Figure 16) :

- partant d'un état remanié, le sol (normalement consolidé) se place le long d'une « **courbe vierge isotrope** » d'équation :

$$\Delta e = -C_c \Delta \log(p')$$

- en cas de **déchargement-rechargement** après un certain chemin de consolidation initial, le sol adopte un **comportement surconsolidé** sur ce nouveau trajet, qui correspond à la droite :

$$\Delta e = -C_s \Delta \log(p')$$

À noter que la projection de la ligne d'état critique (voir plus loin) dans le plan $(\log(p') - e)$ est parallèle à la courbe vierge isotrope de pente C_c , l'écart entre les deux étant caractéristique du matériau étudié (Leroueil, et al., 1985).

L'essai œdométrique, qui est un essai de compression anisotrope, permet également d'obtenir des valeurs de C_s et C_c (usuellement dans le plan $(\log(\sigma_v') - e)$). La droite de pente C_c du sol normalement consolidé en sollicitation anisotrope est parallèle à la courbe vierge isotrope et à la ligne d'état critique. *In fine*, les valeurs C_s et C_c tirées de l'essai œdométrique conventionnel peuvent être utilisées directement pour caractériser le comportement isotrope du modèle de Cambridge.

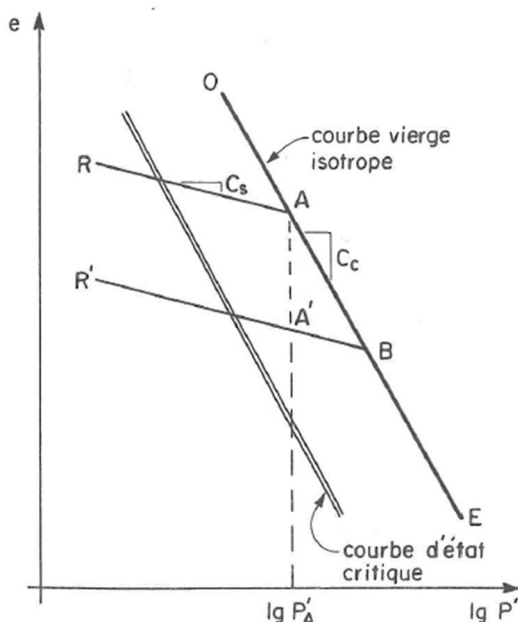


Figure 16 : Compression isotrope et courbe d'état critique théoriques dans le plan $(\log(p') - e)$. Les chemins AR et BR' sont des chemins de déchargement-recharge dans lesquels le sol présente un comportement surconsolidé. Source diagramme : (Leroueil, et al., 1985).

Dans le cas d'une sollicitation triaxiale drainée ou non drainée, (Roscoe, et al., 1958) et (Henkel, 1960) ont montré que dans l'espace $(e - p' - q)$, les chemins suivis par les éprouvettes de sol normalement consolidé soumises à l'essai se situent sur une surface unique appelée **surface d'état limite (SEL)** de l'argile. Projetés dans le plan $(p' - q)$, ces chemins donnent :

- dans le cas drainé une droite de pente 3 ($\Delta q = 3.\Delta p'$),
- dans le cas non-drainé une courbe s'orientant vers les valeurs plus faibles de p' (l'écart entre les deux courbes drainées et non-drainées correspondant à la valeur de pression interstitielle pour un déviateur q donné).

Bien que la SEL soit unique, en fonction des conditions d'essai (drainées / non-drainées) et du point de départ p' de l'essai, la projection dans le plan $(p' - q)$ du chemin suivi sur cette surface donnera donc des courbes différentes. Cela est représenté dans la Figure 17 montrant pour deux états de consolidation initiale A et B des chemins triaxiaux et leur projection non-drainée U_A, U_B ou drainée D_A, D_B dans le plan $(p' - q)$.

Enfin, à grandes déformations, les échantillons atteignent un état critique « stationnaire », à déformation volumique nulle, se situant sur une unique courbe (CEC) dans l'espace $(e - p' - q)$ qui se projette dans le plan $(p' - q)$ sous forme d'une droite, dite **ligne d'état critique (LEC)**, d'équation :

$$q = M.p'$$

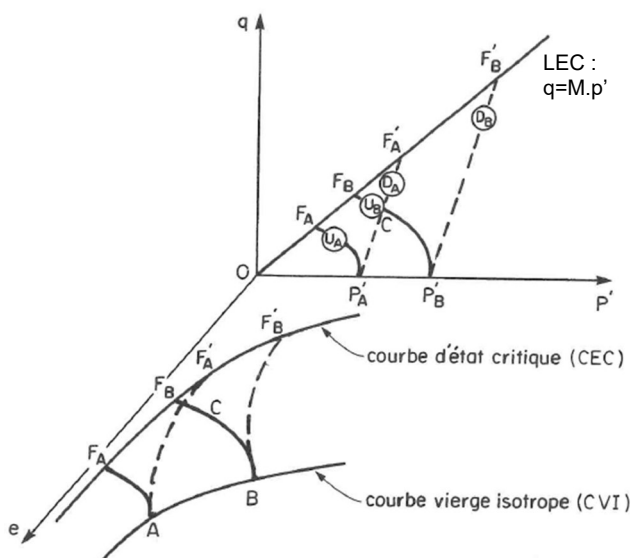


Figure 17 : Chemins de contrainte drainés (D_A, D_B) et non-drainés (U_A, U_B) d'une argile normalement consolidée dans l'approche de Cambridge. Les points A et B sont les points de départ de la sollicitation triaxiale (resp. P'_A et P'_B en projection dans le plan $(p' - q)$), et les points F_A, F_B, F'_A, F'_B sont les points finaux. Source diagramme : (Leroueil, et al., 1985).

Quand le sol est surconsolidé, c'est-à-dire lorsqu'il a subi une décharge avant d'être remobilisé à des contraintes inférieures à celles qu'il a déjà connues au cours de son histoire, cela se traduit notamment par un **supplément de résistance « à gauche » de la courbe d'état critique**, qui se manifeste par une surface prolongeant la SEL.

L'essai triaxial sur un sol surconsolidé ne part pas de la courbe vierge isotrope puisqu'il fait suite à une décharge. Dans le plan $p' - q$, cela donne un point de départ sous la SEL du sol surconsolidé (point de départ A ou B dans la Figure 18, le point M étant situé sur la courbe vierge isotrope et représentant la pression moyenne de consolidation atteinte antérieurement p_c). L'essai drainé suivra alors comme précédemment un chemin tel que $\Delta q = 3.\Delta p'$. L'essai non-drainé s'effectuera quant à lui sur un chemin théorique à $p' = \text{constante}$, qui est imposé par l'hypothèse d'un matériau élastique, isotrope, avec des grains et un fluide interstitiel considérés comme incompressibles (ce qui permet une déformation volumique $\varepsilon_v = 0$ durant l'essai triaxial-non drainé). Une fois que ce chemin atteint la SEL (le sol devient normalement consolidé), il se prolonge sur celle-ci dans l'espace tridimensionnel $(e - p' - q)$ jusqu'à atteindre la LEC. De tels chemins projetés dans le plan $(p' - q)$ sont présentés sur la Figure 18.

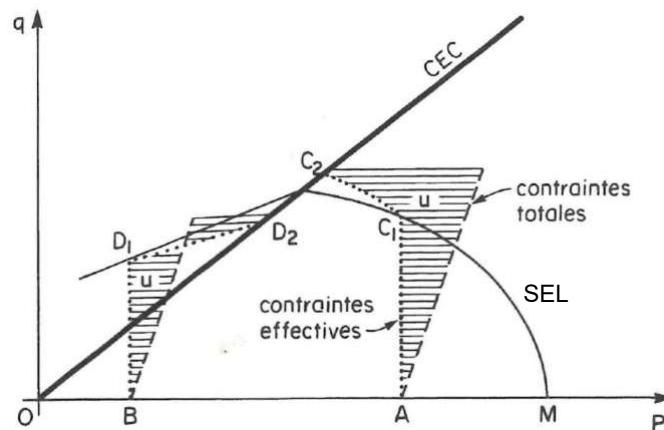


Figure 18 : Chemins de contrainte non-drainés en contrainte effective (BD_1, AC_1C_2) et en contraintes totales (équivalents aux chemins drainés sous la SEL), et pressions interstitielles théoriques u , dans le plan p' - q pour une argile surconsolidée (« CEC » = LEC, la projection de la SEL correspond à une surconsolidation initiale jusqu'au point M). Diagramme d'après (Leroueil, et al., 1985)

4.1.3 Exemple du modèle de Cam-Clay modifié

Historiquement, divers modèles ont été établis pour décrire la forme de la SEL ainsi que les comportements expliqués dans les paragraphes précédents. Le célèbre **modèle de Cam-Clay modifié** (Burland, 1965) par exemple, qui ne s'applique véritablement qu'aux argiles « idéales » (remaniées, isotropes), décrit la SEL comme une ellipse de grand axe p' dont l'intersection avec la LEC se trouve au niveau du petit axe. **L'équation de la SEL** est alors donnée par :

$$q^2 - M^2(p' \cdot (p'_c - p')) = 0$$

Cette représentation de la SEL a l'avantage d'être simple, de n'être paramétrée que par la pression de préconsolidation isotrope p'_c et la pente M de la LEC, et de décrire en une seule équation les comportements à droite (en-dessous) et à gauche (au-dessus) de la LEC pour les argiles surconsolidées. Une représentation en est donnée en Figure 19.

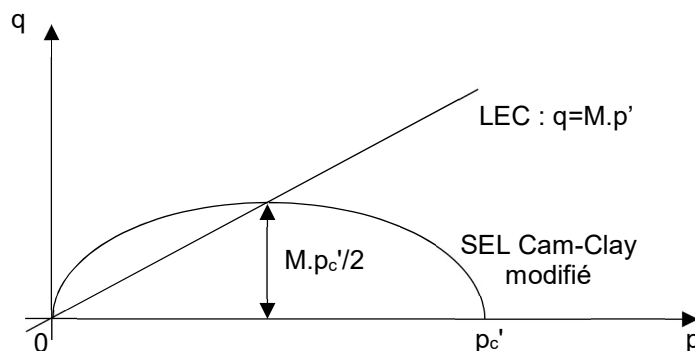


Figure 19 : SEL du modèle de Cam-Clay modifié dans le plan $p' - q$

En-dessous de la surface d'état limite (SEL), les **relations contraintes-déformations** sont décrites par une loi élastique isotrope non linéaire (compte-tenu de la dépendance de e et donc des déformations volumiques ε_v à $\ln(p')$). Les paramètres en sont usuellement le module de cisaillement G et le coefficient $\kappa = C_s / \ln(10)$. Une formulation explicite en est par exemple proposée par (Mestat & Riou, 2002) :

$$d\varepsilon_{ij}^e = \frac{1}{3G} d\sigma_{ij} + \frac{1}{3} \left(\frac{\kappa}{1+e_0} \frac{1}{p'} - \frac{1}{G} \right) dp' \delta_{ij} \quad \text{avec } e_0 \text{ l'indice des vides à l'état initial}$$

Ce comportement élastique est simplement **modélisable avec une loi de Hooke incrémentale** usuelle à deux paramètres (K et G par exemple), dans laquelle G reste fixe et K est une fonction de la pression moyenne p' et de l'indice des vides e .

Enfin, le chemin de contrainte « plastique » à écoulement sur la SEL et la LEC est caractérisé par la pente M de la LEC, par le paramètre $\lambda = C_c / \ln(10)$ et par un indice des vides de référence e_{ref} permettant de positionner la courbe vierge isotrope ou la courbe d'état critique dans le plan $(e - \ln(p'))$.

En conditions non drainées, les pressions interstitielles lors de l'essai triaxial peuvent être obtenues directement par $u = p - p'$: p est connu via le pilotage de l'essai en contraintes totales, et l'évolution de p' peut être déduite de l'absence de déformation volumique dans les deux plans $(p' - q)$ ($\rightarrow \Delta p' = 0$ durant la phase élastique) et $(p' - e)$ ($\rightarrow \Delta e = 0$ sur la SEL).

4.1.4 Limitations du modèle de Cam-Clay modifié pour les argiles réelles

Si le modèle de Cam-Clay modifié constitue une référence pour le comportement des argiles idéales, son application aux argiles réelles peut faire l'objet de diverses critiques.

Tout d'abord, lorsque le sol est surconsolidé, la partie elliptique de la SEL au-dessus de la LEC est généralement considérée comme excessivement optimiste en termes de résistance de pic (q_{max}). La proposition de (Hvorslev, 1937) d'utiliser plutôt une droite, de manière similaire à ce qui est représenté sur la Figure 18, se rapproche davantage de la réalité des observations. On retombe alors, tout en restant dans le formalisme de Cambridge, sur une interprétation des points à la rupture assez semblable à celle de « l'approche conventionnelle » de la section 3.2.

D'autre part, il a été démontré sur de nombreuses argiles réelles que la forme elliptique de la SEL avec p' pour grand axe n'était que rarement adaptée. Par exemple, (Tavenas & Leroueil, 1979) mettaient déjà en évidence sur l'argile de Saint-Alban que si la SEL avait une forme effectivement proche de l'ellipse, elle s'orientait en revanche plutôt sur un axe correspondant aux conditions de contrainte anisotrope $\sigma_v = K_0 \cdot \sigma_h$ sous lesquelles l'argile naturelle avait été déposée et consolidée. Cela a par la suite été confirmé sur de nombreuses argiles réelles à travers le monde (voir (Leroueil, et al., 1985) par exemple). On notera sur la Figure 20 que les formes elliptiques à différents degrés de consolidation restent toutefois bien homothétiques.

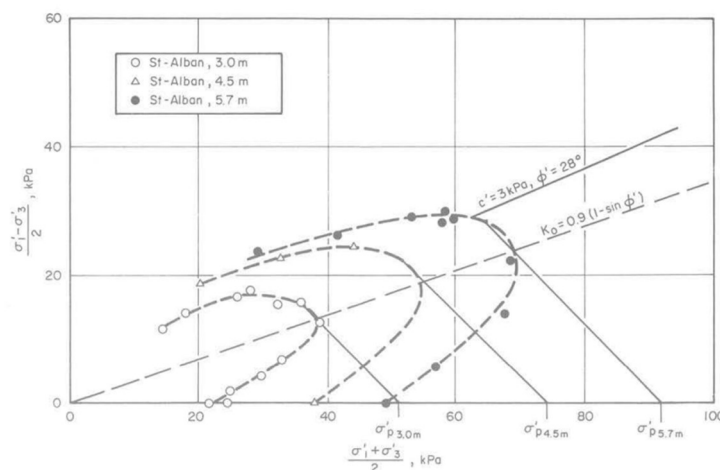


Figure 20 : Courbes d'état limite (SEL) dans le plan $s' - t$ de l'argile de Saint-Alban à différentes profondeurs d'après (Tavenas & Leroueil, 1979)

Enfin, la forme des courbes $p' - q$ sous la SEL en conditions non drainées peut s'éloigner de la droite verticale théorique idéale. Notamment, des courbes « en S » peuvent être rencontrées pour certaines argiles et limons, comme détaillé par (Serratrice, 2012), qui présente les formes typiques de la Figure 21 :

- dans la **phase 1**, le sol se comporte de manière **élastique et isotrope**, avec $\Delta p' = 0$ conformément à la théorie ;

- cependant, dès la **phase 2**, des **pressions interstitielles beaucoup plus importantes que celles normalement prévisibles se manifestent**. (Serratrice, 2012) indique que dans cette zone des déformations non-linéaires et irréversibles apparaissent (confirmées par des chargements cycliques), ce qui est en contradiction avec l'hypothèse théorique d'élasticité des modèles de type Cam-Clay. Le comportement de la phase 2 peut également impliquer **une contractance du squelette** du sol, qui n'est possible qu'en écartant l'hypothèse courante d'incompressibilité des phases liquides et solides, puisque l'essai non drainé s'effectue sans échange de masse avec l'extérieur. C'est logiquement la **compressibilité du fluide** qui est dans ce cas mobilisée, celle-ci étant plus élevée que celle des grains solides. Dans ce cas on ne peut plus considérer non plus que $\Delta e = 0$ durant l'essai non drainé ;
- dans la **phase 3**, la **pression interstitielle diminue**, toujours à la faveur de déformations irréversibles du sol, avec un **comportement dilatant du squelette**. L'éprouvette atteint l'enveloppe de rupture et la suit approximativement jusqu'au stade ultime de la **phase 4** ;
- dans cette dernière partie, les **pressions interstitielles se stabilisent**, mais comme l'homogénéité des déformations n'est plus assurée (bande de cisaillement dans l'éprouvette, etc.) on n'atteint pas nécessairement la droite d'état critique théorique.

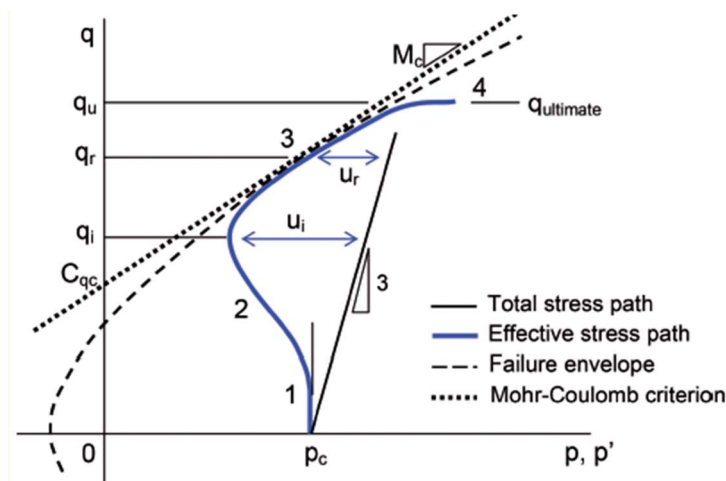


Figure 21 : Chemins de contrainte totale et effective rencontrés dans des essais non drainés sur argiles réelles d'après (Serratrice, 2012)

Il a également été souligné dans diverses publications que **l'anisotropie des argiles** tendait à provoquer en plus une **inclinaison de la phase 1 par rapport à la verticale**.

Dans les essais triaxiaux du projet MLA3 (voir livrable L-A3), ces courbes en S, avec éventuellement un point de départ incliné par rapport à la verticale, ont été fréquemment rencontrées. Il est alors beaucoup plus délicat de distinguer les comportements fortement surconsolidés, peu surconsolidés et normalement consolidés à partir de la forme des courbes, puisque celles-ci n'obéissent plus aux comportements typiques de la Figure 18.

4.1.5 Quelle approche pour les argiles réelles ?

Diverses adaptations du modèle de base de Cam-Clay ont été proposées pour aborder les argiles réelles, en se rapprochant davantage des spécificités de leur comportement.

Tout d'abord, au niveau de **l'enveloppe de rupture** ou surface d'état limite SEL, **des formes plus proches de la réalité** ont été établies par divers auteurs. De nombreux modèles, restant basés sur les principes mécaniques de l'approche de Cambridge, existent dans la littérature : par exemple le modèle YLight ((Leroueil, Magnan et F. 1985)) ou le modèle Mélanie ((Mouratidis et Magnan 1983)) avec une **ellipse inclinée par rapport à l'axe p'** , le modèle Delft Egg ((Van Eekelen et Van Den Berg 1994)) avec une SEL en forme d'œuf, le modèle AA1-CLAY (Dejaloud & Rezanian, 2021) permettant des SEL de contour variable telles l'ellipse inclinée, la goutte, etc. avec des paramètres de forme supplémentaires.

Pour le comportement du sol **sous la surface d'état limite**, les observations semblant indiquer que **l'hypothèse d'élasticité n'est pas réellement vérifiée** ont également conduit à des évolutions. D'après (Al Tabbaa, 1987) ou (Stallebrass, 1990) les seuls modèles de comportement susceptibles de prédire de manière appropriée le comportement (notamment cyclique) des sols argileux sont ceux qui incluent des déformations plastiques sur la plus grande part du chemin de chargement, et qui comportent au moins une surface de charge cinématique (c'est-à-dire évoluant en forme et/ou en position dans le plan (p' - q)).

Il s'agit **des familles de modèles « à bulle »**, tels que représentés dans la Figure 22, dont il existe de multiples versions dans la littérature, prenant en compte divers effets d'anisotropie, de déstructuration, etc. On peut citer par exemple, en plus de la formulation initiale de Al Tabbaa (qui n'incluait que 2 paramètres supplémentaires par rapport au modèle de Cam-Clay mais avec une SEL elliptique non inclinée), les modèles plus avancés SClay1 proposé par (Karstunen, et al., 2005) ou Sclay1-S de (Sivasithamparam, 2012).

Dans les modèles à bulle, la SEL est conservée mais considérée comme une surface « frontière » à l'intérieur de laquelle évolue une « bulle » (surface de charge cinématique) qui délimite les comportements strictement élastiques. Dès que l'état de contrainte atteint le bord de la bulle, le sol commence à accumuler des déformations plastiques. La bulle est entraînée avec l'évolution des contraintes, jusqu'à atteindre la surface « frontière » qui se comporte alors comme dans le modèle classique de Cam-Clay. Ce type de modèle permet donc de cumuler des déformations irréversibles à l'intérieur de la SEL et de simuler un effet mémoire pour des mobilisations cycliques du sol, et donc de se rapprocher des observations réelles.

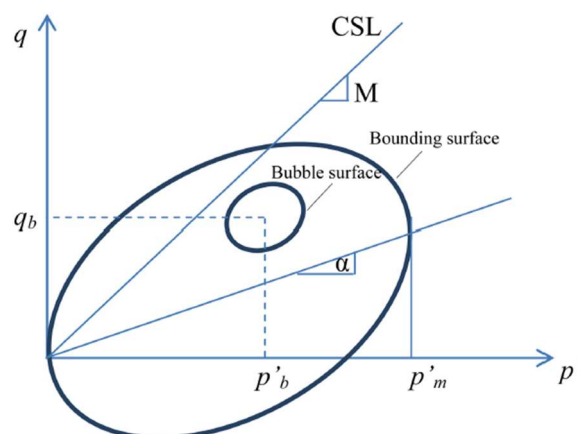


Figure 22 : Principe d'un modèle de comportement "à bulle" pour les argiles d'après (Boumezerane, 2014)

En outre, pour améliorer la prise en compte des couplages hydro-mécaniques dans les sollicitations non drainées, il est possible d'incorporer dans les modèles **les principes de la mécanique des milieux poreux** (voir (Coussy, 1991) par exemple) qui propose un cadre complet et rigoureux de représentation des interactions sol – fluide. La poroélasticité permet de prendre en compte la compressibilité des grains et du fluide dans le milieu (considéré comme isotrope en transformations infinitésimales), en introduisant notamment :

- le coefficient de Biot $b = 1 - \frac{K_0}{K_S}$;
- le module de Biot M tel que : $\frac{1}{M} = \frac{b-n}{K_S} + \frac{n}{K_{fl}}$;

avec : n la porosité, K_0 le module d'incompressibilité drainé de la matrice solide, K_S et K_{fl} les modules d'incompressibilité des grains et du fluide respectivement.

La contrainte effective élastique s'écrit alors $\sigma' = \sigma - b.u$ (où u est la pression interstitielle) et les relations d'élasticité linéaire sont formulées de la manière suivante (avec les déformations et contraintes positives en compression) :

$$\underline{\sigma} - \underline{\sigma}_0 = \lambda_e Tr[\underline{\varepsilon}] + 2\mu_e \underline{\varepsilon} + b(u - u_0)\underline{1}$$

$$\frac{u - u_0}{M} = b.Tr[\underline{\varepsilon}] + \frac{m_{fl}}{\rho_{fl}}$$

Avec : λ_e et μ_e les paramètres élastiques de Lamé drainés

b et M les coefficients et modules de Biot

$\underline{\sigma}$ et $\underline{\varepsilon}$ les tenseurs des contraintes et des déformations

ρ_{fl} la masse volumique du fluide

m_{fl} l'apport de masse fluide par unité de volume initial (nul en sollicitation non drainée)

Les relations peuvent être de même formulées dans le cas élastoplastique en intégrant la déformation plastique ε_p (non détaillé ici, voir (Coussy, 1991) ou (Giraud, 1993) ou (Rojat, 2010)).

Enfin, les couplages hydro-mécaniques peuvent aussi être décrits par **l'approche empirique de (Skempton, 1954)**, couramment utilisée dans le domaine de l'interprétation des essais de laboratoire (le coefficient B étant notamment employé pour vérifier l'état de saturation en cours d'essai). Pour des variations de contrainte principale $\Delta\sigma_1$ et $\Delta\sigma_3$, Skempton exprime la variation de pression interstitielle sous la forme :

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

Le coefficient B vaut 1 lorsque le matériau est saturé, et le coefficient A vaut 1/3 pour un sol élastique et isotrope (saturé), ce qui permet bien de retomber sur $\Delta p = 0$ au début de la sollicitation triaxiale.

Les **variations de pression interstitielle** n'obéissant pas parfaitement à l'hypothèse d'élasticité peuvent alors être représentées en **faisant simplement varier le coefficient A** au cours de la sollicitation triaxiale. Dans ce cas, **A vaudra approximativement 1/3 en début de sollicitation** en l'absence d'anisotropie trop marquée, et **$(\sin(\varphi) - 1)/(2.\sin(\varphi))$ (valeur négative) en fin de sollicitation** si celle-ci s'achève sur une droite de Coulomb d'angle de frottement φ . On considère parfois que la rupture est obtenue dans l'essai triaxial non drainé au pic de pression interstitielle dans le plan $(u - q)$, c'est-à-dire pour $A \approx 0$.

Cette **approche empirique** pourrait être utilisée pour décrire l'évolution de la pression interstitielle tout au long de la sollicitation. Il s'agirait alors de trouver une fonction $A = f(q)$ présentant une pente initiale de 1/3 et une pente finale de $(\sin(\varphi) - 1)/(2.\sin(\varphi))$, et une forme reproduisant au mieux les évolutions observées. Ce type de fonction n'est pas présent dans la littérature mais n'aurait pas nécessairement un intérêt majeur pour les argiles réelles : elle introduirait des paramètres supplémentaires difficiles à rattacher à la physique du sol, serait très variable d'un essai à l'autre et d'un échantillon à l'autre, et aurait une validité réduite pour les matériaux anisotropes.

4.2 Quelle approche mécanique pour les argiles glacio-lacustres du Beaumont ?

L'analyse bibliographique menée dans les paragraphes précédents montre :

- que **l'approche conventionnelle** basée sur une élasticité linéaire et un critère de rupture de Mohr-Coulomb (avec éventuellement deux branches en fonction du degré de surconsolidation) présente l'avantage de la **simplicité mais ignore de nombreuses spécificités** du comportement des argiles ;
- que **l'approche de Cambridge** (état limite, état critique) permet *a priori* de disposer d'un **cadre général approprié** permettant une meilleure compréhension des phénomènes et une description unifiée des comportements relevés dans les essais triaxiaux et œdométriques, que

l'argile soit surconsolidée (SEL, LEC) ou qu'elle soit remaniée (on retombe dans ce cas sur la courbe de comportement vierge du sol et sur une résistance limitée par la LEC) ;

- que la **mise en œuvre mathématique** de cette approche n'est toutefois **pas simple** lorsque l'on s'intéresse au comportement des argiles réelles comme c'est le cas pour le projet MLA3. En particulier, le **modèle courant de Cam-Clay modifié**, qui reste raisonnablement simple avec un nombre de paramètres limité, **présente de multiples défauts** :
 - il a été principalement établi pour des argiles idéales (remaniées, isotropes),
 - il surestime le pic de résistance dans la zone surconsolidée,
 - la forme et l'orientation de la SEL y est mal adaptée, traduisant mal la préconsolidation anisotrope des sols naturels,
 - l'hypothèse d'élasticité (non linéaire) sous la SEL n'est régulièrement pas vérifiée.

Il est possible toutefois, tout en restant dans le cadre général de l'approche de Cambridge, de proposer **des modèles de plus en plus complexes** permettant de reproduire un certain nombre de comportements observés : modification de la forme de la SEL, modèle à bulle, intégration des couplages hydro-mécaniques, etc. Ces modèles améliorés sont intéressants pour comprendre de manière approfondie le comportement d'un matériau donné en laboratoire, mais ils font appel à un **nombre de paramètres élevé**, nécessitant parfois des essais particuliers (non disponibles dans le cadre du projet) et un nombre important de prélèvements de caractéristiques homogènes. Ils seraient donc très difficiles à déterminer (et peu représentatifs *in fine*) dans un contexte comme celui du Beaumont où les sols présentent une certaine variabilité intrinsèque (voir section 3.2).

Ces modèles malgré leur complexité n'intègrent d'ailleurs pas nécessairement l'ensemble des propriétés des matériaux puisqu'ils ne prennent pas en compte par exemple les évolutions visco-élasto-plastiques (fluage) qu'il faudrait encore ajouter. Le livrable L-A3 a montré que celles-ci pouvaient être présentes sur les argiles du Beaumont. Enfin, la **représentativité *in situ*** de ces modèles n'est pas évidente : ils sont par exemple basés sur des essais mécaniques de révolution (triaxiaux) qui ignorent la contrainte intermédiaire σ_2 susceptible de modifier les comportements. Il peut aussi exister des effets d'échelle sur les sols structurés entre la mesure en laboratoire et le comportement en grande masse.

En conséquence, **considérant que les matériaux du Beaumont sont concernées par la totalité des limitations** mentionnées dans les sections 4.1.4 et 4.1.5 (voir courbes d'essais du livrable L-A3), il apparaît vain ici de vouloir intégrer l'ensemble des essais mécaniques dans la formulation d'un modèle général de comportement des argiles glacio-lacustres, pour tenter de reproduire la totalité des comportements observés. L'objectif, dans le cadre de « recherche-action » du projet MLA3, est surtout de **disposer de modèles adaptés aux besoins de l'ingénierie** et directement applicables par les praticiens des bureaux d'études, ce qui reste raisonnablement atteignable à partir des approches simples conventionnelles (voir livrable L-A5 également). L'accroissement de complexité des modèles avancés n'apparaît ici pas nécessairement profitable au regard de ces objectifs et des incertitudes résiduelles liées au terrain et à la variabilité naturelle des sols.

À titre d'illustration, **l'ensemble des points p'-q à la rupture des différents essais triaxiaux** menés sur les argiles glacio-lacustres ont été représentés dans un même graphique sur la Figure 23. Ces points sont essentiellement compris entre deux droites de pentes 0.8 et 1.22, correspondant à des angles de frottement respectifs de 20.7° et 30.5°. La droite moyenne (pente 1.01, en tirets) représente un angle de frottement de 25.6°. On retrouve bien les dispersions citées dans les sections antérieures du présent rapport.

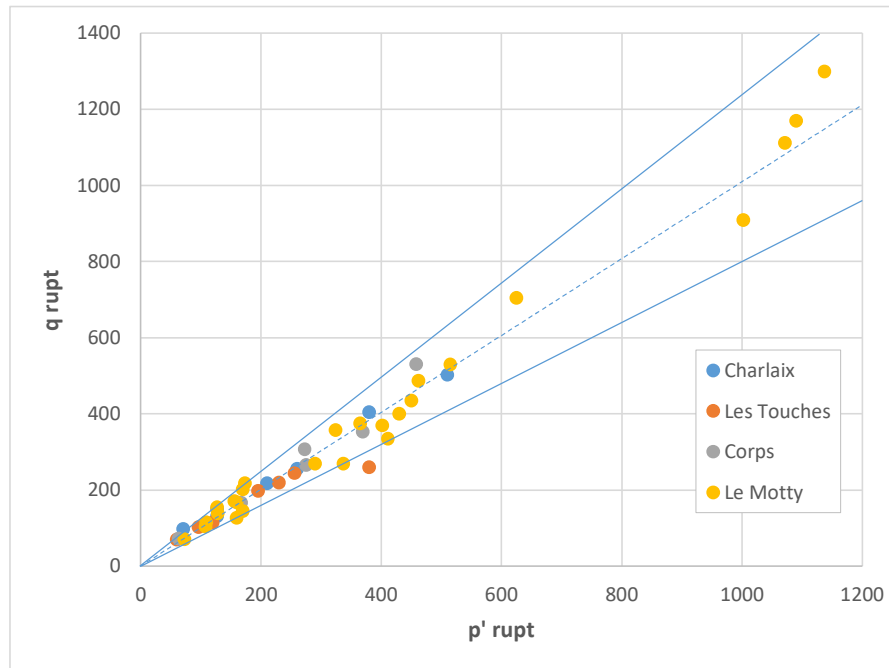


Figure 23 : Ensemble des points à la rupture obtenus sur les argiles glacio-lacustres du Beaumont par essais triaxiaux (CD ou CIU), dans le plan p' - q

On pourrait, en supposant une suffisante homogénéité des matériaux, **tenter d'extraire de ce graphique la pente M** de la droite d'état critique présente dans tous les modèles de l'approche de Cambridge. Pour cela, il semble raisonnable de ne conserver que les points correspondant aux plus fortes valeurs de p' ($p' > 400$ kPa par exemple), qui ont *a priori* été écrasés en conditions normalement consolidées. Le graphique montre clairement qu'une forte dispersion reste présente et qu'il ne serait pas possible d'établir pour M davantage qu'une valeur moyenne de **représentativité limitée**.

5 CONCLUSION

Le présent livrable L-A4 a permis de **synthétiser l'ensemble des données d'essais rassemblées sur les seules argiles glacio-lacustres du Beaumont dans le cadre du projet MLA3**. Il présente une vision transversale aux 5 sites d'étude du projet (Charlaix, Quet-en-Beaumont, Les Touches, Corps, Le Motty / Saint-Firmin) afin de déterminer une « carte d'identité » de ces formations tant sur leurs caractéristiques physiques (granulométrie, argilosité, masse volumique, etc.) que mécaniques (résistances, couplages hydro-mécaniques,...). Les différentes approches retenues ici ont globalement montré, malgré une certaine homogénéité d'aspect, **une dispersion des propriétés des matériaux**, qui n'apparaît pas liée à la comparaison de prélèvements issus de différents sites, mais bien à **l'hétérogénéité naturelle de la formation**. Il a cependant été possible d'identifier un certain nombre de traits distinctifs qui pourront à l'avenir servir de modèle géotechnique typique de ces argiles.

Concernant les **caractéristiques physiques**, des plages de valeurs propres à cette formation géologique ont pu être établies dans les **différentes représentations** suivantes : fuseau granulométrique, diagramme de Casagrande (IP vs. w_L , classification USCS), valeur au bleu (VBS vs. $C_{2\mu m}$), diagramme de compacité (masse volumique sèche vs. teneur en eau), classification GTR, classification triangulaire des sols du GEPPA, teneurs en carbonates. Une synthèse en a été présentée dans la Figure 10 du rapport. **En moyenne**, l'argile litée glacio-lacustre typique du Beaumont est un

matériau faiblement marneux, présentant environ 40 % de particules de taille argileuse ($< 2 \mu\text{m}$) et un D_{max} proche de 5 mm (mais très variable). Elle présente un indice de plasticité de l'ordre de 15 avec un indice de liquidité proche de 37 %, et une valeur au bleu de méthylène VBS entre 1.5 et 2. Sa classification USCS/LCPC est principalement Ap ou Lp et sa classification GTR (2000) A1 à A3 (en moyenne A2).

Concernant les **caractéristiques mécaniques**, les argiles litées glacio-lacustres du Beaumont ne montrent **pas de surconsolidation significative** (elles paraissent généralement normalement consolidées $\sigma'_p \approx \sigma'_{v0}$). Les **essais œdométriques** (peu nombreux) donnent des coefficients de compressibilité de l'ordre de $C_s \approx 0.023$ et $C_c \approx 0.132$ et des coefficients de consolidation c_v de l'ordre de $2.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Le fluage œdométrique est modéré, avec un coefficient C_α de l'ordre de 1 à 2×10^{-3} dans les conditions de contrainte en place.

Les essais de cisaillement (boîte de Casagrande et triaxial) montrent une **dispersion significative des résistances**. Les angles de frottement peuvent varier entre 18 et 29° et les cohésions entre 0 et 23 kPa en valeurs de pic. De multiples facteurs interviennent dans cette dispersion d'après les observations réalisées : le type d'essai utilisé (la boîte de Casagrande surévalue les cohésions par exemple), la profondeur de prélèvement, le poids volumique des échantillons, la quantité d'argile, le litage,... En revanche, aucun lien n'est apparu entre la dispersion des valeurs et l'éloignement des sites de prélèvement. Pour des études de stabilité, un **comportement moyen raisonnable** pour les argiles glacio-lacustres du Beaumont impliquées dans les glissements le long de la RN85 a été toutefois proposé avec les caractéristiques suivantes : $\varphi'_{\text{moy, pic}} \approx 23^\circ$ et $0 \leq c'_{\text{moy, pic}} \leq 5 \text{ kPa}$, à tempérer par des études de sensibilité. Des valeurs nettement plus faibles peuvent en effet être rencontrées lorsque les sols sont remaniés ou en situation de résistance résiduelle (grands déplacements).

Enfin, après étude bibliographique, compte-tenu de la **variabilité des résultats d'essais** et des multiples **spécificités de comportement** des argiles du Beaumont au regard des modèles idéaux de type « Cambridge » (et dérivés), il n'a pas été jugé pertinent dans le cadre de cette recherche-action d'établir un **modèle mécanique plus complexe**. Celui-ci n'aurait qu'une représentativité limitée (dispersion des propriétés du terrain, etc.) malgré un grand nombre de paramètres, et **resterait peu applicable aux besoins de l'ingénierie pour les études de glissements**.

6 REFERENCES

6.1 Bibliographie

- ADRGT, 1980. Etude de la stabilité des versants du torrent de la Sézia, près de Corps. p. 44 p..
- Al Tabbaa, A., 1987. Permeability and stress-strain response of speswhite kaolin. *Ph.D. thesis, University of Cambridge*.
- Boumezerane, D., 2014. Modeling unloading/reloading in peat using a kinematic bubble model. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, pp. 9-14.
- Burland, J., 1965. The yielding and dilation of clay. *Geotechnique*, 15(2), pp. 211-214.
- Casagrande, A., 1932. Research on the Atterberg limits of soils. *Public Roads*, 13(8), pp. 121-130.
- Castellanos, B. & Brandon, T., 2013. A Comparison Between the Shear Strength Measured with Direct Shear and Triaxial. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 317-320.
- Cerema, 2019. RN85 - Essais de laboratoire - Compte-rendu. p. 322.
- Cerema, 2022. Glissement de terrain des Touches (Corps, 38) - Etude de diagnostic G5 au voisinage de la RN85. p. 153 p..
- CETE, 2008. RN 85 Glissement de Charlaix - Etude géotechnique de stabilisation et de confortement de la branche aval du lacet. p. 25 p..
- Coussy, O., 1991. *Mécanique des milieux poreux*. Paris: Editions Technip.
- Dejaloud, H. & Rezanian, M., 2021. Adaptive anisotropic constitutive modeling of natural clays. *Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 45(12), pp. 1756-1790.
- Giraud, A., 1993. Couplages Thermo-Hydro-Mécaniques dans les Milieux Poreux Peu Perméables : Application aux Argiles Profondes. *Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris*, p. 269.
- Giraud, A., Gourc, J., Besson, L. & Fabre, D., 1981. Approche pluridisciplinaire des problèmes posés par un glissement de terrain sur faible pente. *Revue Française de Géotechnique*, Issue 14, pp. 57-66.
- Hattab, M. & Hicher, P.-Y., 2006. Mécanismes de déformation dans les argiles surconsolidées. *Revue Française de Géotechnique*, Issue 117, pp. 3-15.
- Henkel, D., 1960. The shear strength of saturated remoulded clays. *ASCE Specialty Conference on Shear Strength of cohesive soils*, pp. 533-554.
- Hvorslev, M., 1937. Über die Festigkeitseigenschaften gestörter bindiger Böden. *Ingeniorvidenskabelige Skrifter*, Issue 45.
- Hvorslev, M., 1960. Physical components of the shear strength of saturated clays. *Research Conference on Shear Strength of Cohesive Soils*, pp. 169-273.
- Karstunen, M. et al., 2005. Effect of anisotropy and destructuration on the behavior of Murro Test Embankment. *ASCE International Journal of Geomechanics*, 5(2), pp. 87-97.
- LCPC-SETRA, 1992. *Réalisation des remblais et des couches de forme. Fascicule 1 : Principes généraux - Fascicule 2 : Annexes techniques*. Bagneux, France: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées - Service d'Etude Technique des Routes et Autoroutes.
- Leroueil, S., Magnan, J.-P. & F., T., 1985. *Remblais sur argile molle*. s.l.:Lavoisier.
- Magnan, J.-P., 2017. *Mécanique des sols et des roches*. s.l.:Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat - Cours de mécanique des sols.

- Magnan, J.-P. & Youssefian, G., 1989. Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, Issue 159, pp. 93-104.
- Mestat, P. & Riou, Y., 2002. Modélisation des sols et des ouvrages avec le modèle de Cam-Clay modifié. *Revue Française de Génie Civil*, 6(5), pp. 801-815.
- Monjuvent, G., 1978. *Le Drac – Morphologie, stratigraphie et chronologie quaternaires d'un bassin Alpin - Thèse de doctorat*. Grenoble: Univ. J.Fourier.
- Mouratidis, A. & Magnan, J.-P., 1983. Un modèle élastoplastique anisotrope avec écrouissage pour les argiles molles naturelles : Mélanie. *Revue française de géotechnique*, Issue 25, pp. 55-62.
- Nasreddine, K., 2004. *Effet de la rotation des contraintes sur le comportement des sols argileux*. Champs-sur-Marne: Thèse de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées.
- Rojat, F., 2010. Comportement des tunnels dans les milieux rocheux de faibles caractéristiques mécaniques. *Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris*, p. 312.
- Roscoe, K., Schofield, A. & Wroth, C., 1958. On the yielding of soils. *Geotechnique*, Volume 8, pp. 22-53.
- SAGE, 1994. R.N.85 Commune de Corps – Etude des cas n°1 et 15 – PR 100 + 700 à 850.
- SAGE, 2002. 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. p. 128 p..
- Serratrice, J.-F., 2012. Identification of clayey, silty and sandy soils from the Var deltaic plateau based on piezocone penetration testing. *BLPC*, Issue 279, pp. 65-94.
- Sivasithamparam, N., 2012. Development and Implementation of Advanced Soft Soil Models in Finite Elements. *Ph.D. thesis, University of Strathclyde, Scotland*.
- Skempton, A., 1954. The pore pressure coefficients A and B. *Geotechnique*, Issue 4, pp. 143-147.
- Stallebrass, S., 1990. Modelling the effect of recent stress history on the deformation of overconsolidated soils. *Ph.D thesis, City University, London, UK*.
- Tavenas, F. & Leroueil, S., 1979. Les concepts d'état limite et d'état critique et leurs applications pratiques à l'étude des argiles. *Revue française de géotechnique*, Issue 6, pp. 27-49.
- Van Eekelen, S. J. & Van Den Berg, P., 1994. *The Delft Egg model, a constitutive model for clay*. s.l., Kluwer Academic Publishers, pp. 103-116.
- Vuillermet, E., 1992. *Caractéristiques géotechniques des argiles glacio-lacustres du Trièves - Thèse de doctorat*. Grenoble: Univ. Grenoble 1.

6.2 Table des figures

Figure 1 : Localisation des sites d'étude du projet MLA3 sur fond de plan IGN (à gauche) et après recalage sur la carte schématique des glaciers würmiens (à droite, source (Monjuvent, 1978))	8
Figure 2 : Mise en regard des courbes granulométriques obtenues sur l'ensemble des prélèvements des 5 sites d'étude (en haut) et des seules courbes granulométriques relatives aux argiles litées glacio-lacustres (en bas)	13
Figure 3 : Identification des fuseaux granulométriques typiques des argiles litées glacio-lacustres du Beaumont à partir des courbes de la Figure 2 et comparaison avec le fuseau typique des argiles du Trièves.....	14
Figure 4 : Résultats d'essais sur les argiles litées glacio-lacustres du Beaumont prélevées dans les différents sites d'étude et comparaison avec deux fuseaux issus de la littérature	14
Figure 5 : Litages bien visibles sur des échantillons issus des prélèvements carottés du site de Charlaix.	15
Figure 6 : Représentation des valeurs au bleu VBS des argiles litées glacio-lacustres du Beaumont dans le diagramme C_2 - VBS de Magnan et Youssefian (1989).....	16
Figure 7 : Représentation des argiles litées glacio-lacustres du Beaumont dans le diagramme usuel du guide des terrassements routiers « GTR » (LCPC-SETRA, 1992).....	17
Figure 8 : Représentation de la granulométrie des argiles glacio-lacustres du Beaumont dans le triangle des textures du GEPPA.....	17
Figure 9 : Mesures sur les prélèvements des différents sites : (à gauche) masses volumiques sèches, teneurs en eau et taux de saturation ; (à droite) masses volumiques sèches en fonction de la profondeur	21
Figure 10 : Carte d'identité des argiles litées glacio-lacustres du Beaumont dans différentes représentations : Fuseau granulométrique ; Masse volumique sèche vs. Teneur en eau ; VBS vs. passant à $2 \mu m$ C_2 (par sédimentométrie) ; diagramme de Casagrande (IP vs. w_L), classification GTR, classification triangulaire des sols du GEPPA.....	22
Figure 11 : Valeurs de cohésion et d'angle de frottement obtenues par essais de cisaillement (boîte de Casagrande ou appareil triaxial) sur les argiles glacio-lacustres du Beaumont, en fonction des sites d'études. La mention « x 2 » indique deux points d'un même site superposés.	26
Figure 12 : Comparaison des valeurs de cohésion et angle de frottement obtenus sur les argiles glacio-lacustres du Beaumont en fonction du type d'essai de cisaillement utilisé (boîte de Casagrande, appareil triaxial).....	27
Figure 13 : Evolution de la cohésion et de l'angle de frottement suivant la profondeur de prélèvement des échantillons d'argiles glacio-lacustres du Beaumont	28
Figure 14 : Variation de la cohésion et de l'angle de frottement en fonction du poids volumique sec des échantillons d'argiles glacio-lacustres du Beaumont.....	29
Figure 15 : Variation de la cohésion et de l'angle de frottement en fonction de la quantité d'argile (assimilée au passant à $2 \mu m$ par granulométrie laser) des échantillons d'argiles glacio-lacustres du site du Motty.....	30
Figure 16 : Compression isotrope et courbe d'état critique théoriques dans le plan ($\log(p') - e$). Les chemins AR et BR' sont des chemins de décharge-recharge dans lesquels le sol présente un comportement surconsolidé. Source diagramme : (Leroueil, et al., 1985).....	32
Figure 17 : Chemins de contrainte drainés (D_A , D_B) et non-drainés (U_A , U_B) d'une argile normalement consolidée dans l'approche de Cambridge. Les points A et B sont les points de départ de la sollicitation triaxiale (resp. P_A' et P_B' en projection dans le plan ($p' - q$)), et les points F_A , F_B , F_A' , F_B' sont les points finaux. Source diagramme : (Leroueil, et al., 1985).....	33

Figure 18 : Chemins de contrainte non-drainés en contrainte effective (BD_1 , AC_1C_2) et en contraintes totales (équivalents aux chemins drainés sous la SEL), et pressions interstitielles théoriques u , dans le plan p' - q pour une argile surconsolidée (« CEC » = LEC, la projection de la SEL correspond à une surconsolidation initiale jusqu'au point M). Diagramme d'après (Leroueil, et al., 1985).....	34
Figure 19 : SEL du modèle de Cam-Clay modifié dans le plan $p' - q$	34
Figure 20 : Courbes d'état limite (SEL) dans le plan $s' - t$ de l'argile de Saint-Alban à différentes profondeurs d'après (Tavenas & Leroueil, 1979)	35
Figure 21 : Chemins de contrainte totale et effective rencontrés dans des essais non drainés sur argiles réelles d'après (Serratrice, 2012).....	36
Figure 22 : Principe d'un modèle de comportement "à bulle" pour les argiles d'après (Boumezerane, 2014)	37
Figure 23 : Ensemble des points à la rupture obtenus sur les argiles glacio-lacustres du Beaumont par essais triaxiaux (CD ou CIU), dans le plan p' - q	40



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

UGA
Université
Grenoble Alpes



ENTPE

L'école de l'aménagement durable des territoires



UNION EUROPÉENNE

Fonds Européen de
Développement Régional



**RÉGION
SUD**

PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES