

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

Synthèse des essais de laboratoire n°2 : Essais mécaniques dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont



UNION EUROPÉENNE
Fonds Européen de
Développement Régional



RÉGION
SUD
PROVENCE
ALPES
CÔTE D'AZUR



l'Europe
s'engage
sur
le Massif des Alpes

EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE RHÔNE-ALPES

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



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Opérations soutenues par l'État
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-A3

Date : Février 2023

MLA3 – Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager

Synthèse des essais de laboratoire n 2 : Essais mécaniques dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

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

Références du livrable		
Nature du livrable :	Rapport (R)	
Diffusion :	Public (PU)	
Intitulé :	Synthèse des essais de laboratoire n°2 : essais mécaniques dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont	
Date d'édition :	Février 2023	
Nombre de pages :	46 p. (hors annexes) + 50 p. annexes	
Coordinateur :	F.Rojat (Cerema)	
Rédacteur du rapport :	F.Rojat (Cerema)	
Avec la participation de :	L.Chagot, Y.Péru (Cerema)	
Relecteur :	L.Dubois (Cerema)	
Valideur :	Cédric Girardy (Cerema)	Le directeur du département Risques Infrastructures Matériaux  Cédric Girardy Signature numérique de Cedric Girardy

Résumé du livrable

Le présent document est l'un des livrables de l'axe A du projet FEDER POIA « MLA3 » (Mouvements Lents dans les Alpes : Anticiper et Aménager). Il présente et analyse les propriétés mécaniques des matériaux en place sur les sites du Beaumont (38) étudiés au sein du projet, et plus spécifiquement des argiles. Les mesures en laboratoire ont consisté essentiellement en des essais œdométriques et des essais de cisaillement à l'appareil triaxial et à la boîte de Casagrande. Le rapport met notamment en évidence les difficultés rencontrées pour réaliser certains essais (oedomètre, cisaillement à la boîte) dans les argiles litées. Les essais triaxiaux se sont révélés relativement bien adaptés et ont permis d'obtenir des valeurs de résistance des argiles (cohésions, angles de frottement) pour chaque site étudié, malgré une certaine dispersion. L'étude a été complétée par un essai triaxial sur échantillons inclinés (prélèvements du site de Corps) pour approfondir le sujet de l'anisotropie de comportement du matériau, et par un essai de fluage pour étudier la dépendance au temps de la résistance, à un niveau de chargement intermédiaire. Le présent rapport est à relier aux autres livrables de l'axe A (notamment L-A1 précisant le référentiel géologique, L-A2 rassemblant les essais d'identification géotechnique sur les matériaux du Beaumont et L-A4 synthétisant les propriétés des argiles glacio-lacustres) pour disposer d'une vue complète du contexte géotechnique local.

Mots clés

MLA3	Charlaix
Essais de laboratoire	Quet-en-Beaumont
Identification des sols	Le Motty
Corps	Argiles glacio-lacustres
Les Touches	Propriétés 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	9
1.1	Rappels sur le contexte géologique	9
1.2	Contenu du présent rapport	9
2	Les essais mécaniques	11
2.1	Principales méthodes d'essais utilisées	11
2.2	Qualité des échantillons	11
2.3	Précisions sur la réalisation et l'exploitation des essais triaxiaux	13
2.3.1	Réalisation des essais triaxiaux	13
2.3.2	Exploitation et interprétation des essais triaxiaux	15
2.4	Précisions sur la résistance de pic et la résistance résiduelle	17
2.4.1	Résistance de pic	17
2.4.2	Résistance résiduelle	18
3	Site de Charlaix	20
3.1	Données d'essais mécaniques antérieures au projet MLA3	20
3.1.1	Essais œdométriques	20
3.1.2	Essais de cisaillement (boîte de Casagrande et appareil triaxial)	20
3.2	Données d'essais mécaniques acquises durant la période du projet MLA3	22
3.2.1	Essais œdométriques	22
3.2.2	Essais de cisaillement (boîte de Casagrande et appareil triaxial)	23
3.3	Synthèse des essais mécaniques disponibles sur le site de Charlaix	25
3.3.1	Essais œdométriques	25
3.3.2	Essais de cisaillement (boîte de Casagrande et triaxial)	25
4	Site de Quet-en-Beaumont	27
4.1	Données d'essais mécaniques antérieures au projet MLA3	27
4.2	Données d'essais mécaniques acquises durant la période du projet MLA3	27
4.3	Synthèse des essais mécaniques disponibles sur le site de Quet-en-Beaumont.	28
5	Site des Touches	29
5.1	Données d'essais mécaniques antérieures au projet MLA3	29
5.2	Données d'essais mécaniques acquises durant la période du projet MLA3	29
5.2.1	Essais œdométriques	29
5.2.2	Essais de cisaillement (boîte de Casagrande et appareil triaxial)	29

5.3	Synthèse des essais mécaniques disponibles sur le site des Touches	31
5.3.1	Essais œdométriques	31
5.3.2	Essais de cisaillement (boîte de Casagrande et triaxial)	32
6	Site de Corps	33
6.1	Données d'essais mécaniques antérieures au projet MLA3	33
6.2	Données d'essais mécaniques acquises durant la période du projet MLA3	33
6.2.1	Essais œdométriques	33
6.2.2	Essais de cisaillement (appareil triaxial)	34
6.3	Synthèse des essais mécaniques disponibles sur le site de Corps	37
6.3.1	Essais œdométriques	37
6.3.2	Essais de cisaillement (triaxial)	37
7	Site du Motty / Saint-Firmin	39
7.1	Données d'essais mécaniques antérieures au projet MLA3	39
7.2	Données d'essais mécaniques acquises durant la période du projet MLA3	39
7.3	Synthèse des essais mécaniques disponibles sur le site du Motty – Saint-Firmin	39
7.3.1	Essais œdométriques	39
7.3.2	Essais de cisaillement (triaxial uniquement)	39
8	Synthèse - Conclusion	42
9	Références	43
9.1	Bibliographie	43
9.2	Table des figures	44
Annexes		45
Annexe 1 :	Essais mécaniques du site de Charlaix	45
Annexe 2 :	Essais mécaniques du site de Quet-en-Beaumont	45
Annexe 3 :	Essais mécaniques du site des Touches	45
Annexe 4 :	Essais mécaniques du site de Corps	45

1 CONTEXTE GENERAL

1.1 Rappels sur le contexte géologique

L'ensemble du contexte géologique des sites étudiés dans le cadre du projet MLA3 a été présenté dans les livrables L-A1 (géologie et géomorphologie régionales) et LA-2 (synthèse des identifications géotechniques des matériaux) et ne sera pas détaillé ici. Il sera utile de s'y référer pour pouvoir mettre en lien les propriétés mécaniques mesurées et la géologie locale des sites (histoire géologique, agencement des couches, mécanismes de glissement à l'œuvre, etc.).

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

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

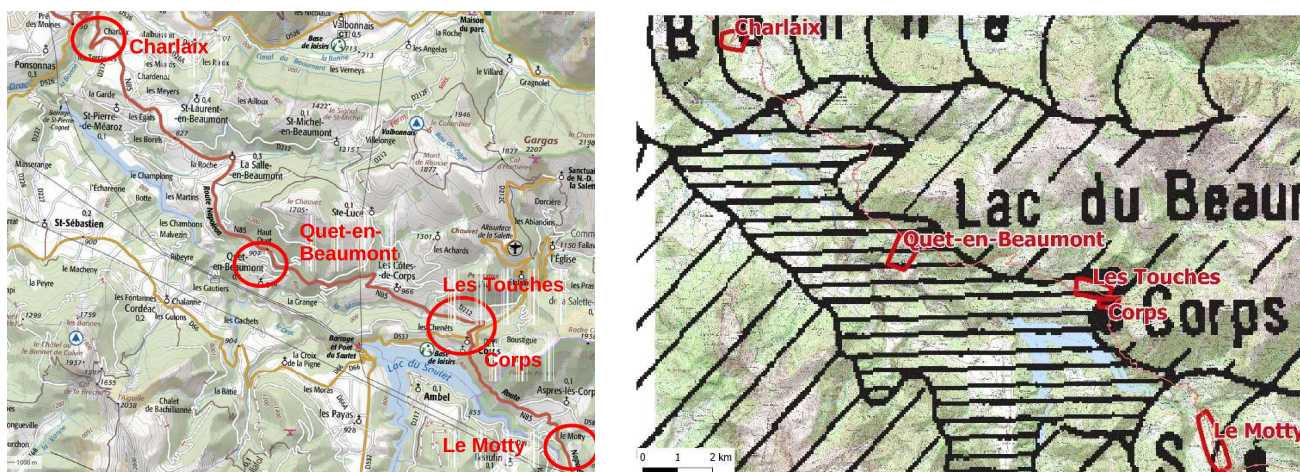


Figure 1 : Localisation des sites d'étude du projet MLA3 sur fond de plan IGN (à gauche) et après recalage sur la carte schématique des glaciers würmiens (à droite, source (Monjuvent 1978))

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

1.2 Contenu du présent rapport

Le présent rapport présente une **synthèse des essais de laboratoire de type « mécaniques »** (essais œdométriques, essais de cisaillement à la boîte de Casagrande, essais triaxiaux) sur les principaux sites d'étude, dans les terrains d'origine glacio-lacustre rencontrés (ou ponctuellement dans les terrains attenants, fluviatiles, glissés, de couverture, etc.). Ces essais sont pour partie issus de la bibliographie (prélèvements de matériaux antérieurs) ; ils ont été complétés par les divers essais réalisés sur la période du projet MLA3 suite aux campagnes de reconnaissances géotechniques de 2018 et 2021. Ces derniers ont généralement bénéficié pour leur réalisation des appareillages (triaxial, œdomètre) acquis dans le cadre du projet.

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

- L-A1 précisant le référentiel géologique,

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

Synthèse des essais de laboratoire n 2 :

Essais mécaniques dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Février 2023

- L-A2 rassemblant les essais d'identification géotechnique,
- L-A4 analysant l'ensemble des données sur les argiles litées glacio-lacustres des différents sites pour tenter d'identifier un « modèle » moyen des propriétés de ces terrains,
- L-A5 synthétisant les modèles géomécaniques de chaque site.

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

2 LES ESSAIS MECANIQUES

2.1 Principales méthodes d'essais utilisées

Deux types de données d'essais sur les formations glacio-lacustres du Beaumont sont rassemblés ici :

- des essais issus de la littérature (études et travaux antérieurs) : le projet MLA3 n'ayant pas contribué à leur réalisation, ces données sont restituées en l'état, conformément à leur formulation par leurs auteurs. Les méthodes d'essais sont celles qui étaient en vigueur à l'époque de leur réalisation ;
- des essais réalisés durant la période du projet MLA3 : ils ont été menés dans les laboratoires du Cerema de Bron et d'Aix-en-Provence pour le site du Motty.

Les normes suivantes ont été principalement employées pour les essais mécaniques :

- Essais de compressibilité à l'**œdomètre** : XP P 94-090-1 :1997 ou NF EN ISO 17892-5 :2004 ;
- Essais de **cisaillement rectiligne** : NF P 94-071-1 :1994 ;
- Essais consolidés à l'**appareil triaxial** de révolution : NF EN ISO 17892-9 :2018 ;

Les **essais de fluage** sur sol à l'appareil triaxial ne disposant pas d'une norme appropriée, ils ont été réalisés suivant un protocole spécifiquement défini pour le présent travail de recherche.

Dans la bibliographie, on retrouve également des **essais de cisaillement alternés** à la boîte de Casagrande ; à titre d'information, ceux-ci sont cadrés par la norme NF P 94-071-2 :1994.

En dehors des précisions fournies ci-après, les méthodes d'essais ne seront pas redétaillées ici.

Pour l'**interprétation de l'essai oedométrique**, les coefficients de consolidation c_v sont déterminés exclusivement avec la méthode de Casagrande, qui est jugée plus fiable que celle de Taylor. L'indice de recompression / gonflement C_s est déterminé sur un cycle de décharge-recharge, et la pression de préconsolidation σ'_p est obtenue à l'intersection de la droite de compression (C_c) et de la droite de recompression (C_s) passant par l'origine des points expérimentaux. Le coefficient de fluage C_α est la pente de la droite de fluage dans le diagramme semi-logarithmique de consolidation du sol pour un palier de chargement donné. La valeur de C_α pour des contraintes verticales ne correspondant pas à un palier précis est estimée par interpolation entre les valeurs obtenues sur les paliers supérieur et inférieur.

L'**essai triaxial** fera l'objet de précisions plus détaillées sur son déroulement et son interprétation en section 2.3.

2.2 Qualité des échantillons

Les éprouvettes d'argiles sablo-limoneuses glacio-lacustres ont été prélevées in situ au **carottier** poinçonneur ou au carottier triple, afin d'obtenir des échantillons les moins remaniés possibles (classes de qualité 1 à 2 d'après la norme NF EN ISO 22475-1). Afin de garantir la bonne conservation de ces échantillons entre le prélèvement et la date des essais, une **mise sous gaine étanche et paraffinée** a été réalisée dès l'extraction des matériaux et ceux-ci ont été conservés dans des salles tempérées.

Des **perturbations** ont néanmoins pu être observés sur certains prélèvements. On peut citer notamment les difficultés suivantes :

- une **couronne de matériaux remaniés** était régulièrement présente à la périphérie des carottes ;
- le fonçage du carottier poinçonneur (probablement parfois effectué trop rapidement par les sondeurs) a pu conduire dans certains cas à des **déformations des litages du sol**, d'autant

plus marqués que l'on se rapproche du bord de la carotte. La Figure 2 ci-dessous illustre ces phénomènes ;

- malgré tout le soin apporté à leur confinement et leur stockage, un début de **dessèchement** a pu être observé sur certains échantillons après plusieurs mois, la réalisation des essais ne pouvant pas toujours suivre rapidement le prélèvement (calendrier, disponibilité des machines, durée des essais, etc.) ;
- certains prélèvements argileux humides se sont avérés très collants et **adhéraient aux gaines de prélèvement**. Cela pouvait amener un endommagement des carottes à l'ouverture des gaines (Figure 3, Figure 4)

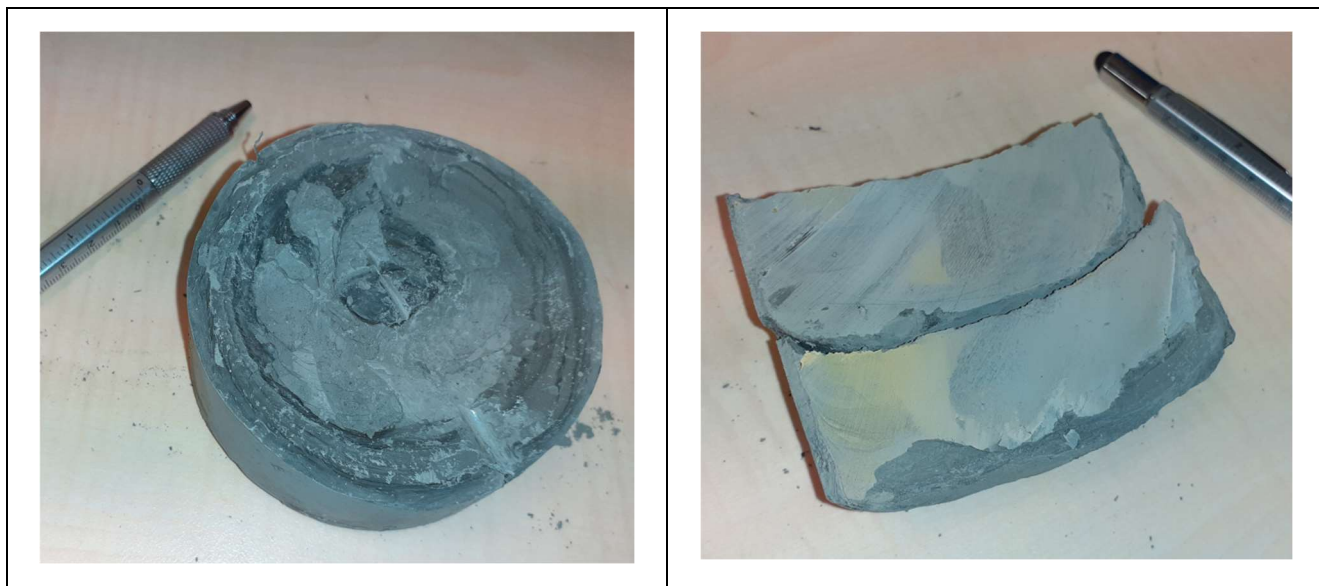


Figure 2 : (à gauche) couronne de matériaux remaniés en périphérie de carotte et (à droite) litages incurvés par le mode de prélèvement. Photographies prises sur échantillons secs d'argiles litées glacio-lacustres.



Figure 3 : Prélèvement fortement altéré à l'ouverture de la carotte par adhérence sur la gaine (sondage S8-SC2 de 9.00 à 10.50 m, Les Touches). Échantillons non retenus pour des essais mécaniques.

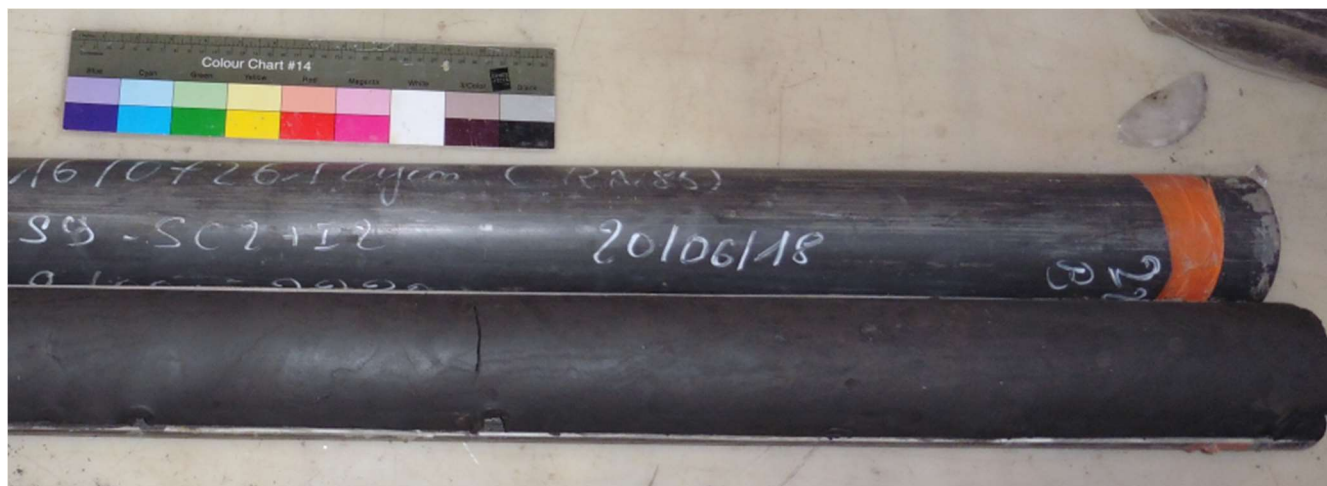


Figure 4 : Prélèvement bien conservé à l'ouverture des carottes (sondage S9-SC2 de 21.00 à 22.50 m, Corps).

Enfin, de par la nature même des argiles glacio-lacustres étudiées, de nombreux échantillons intacts présentaient un **litage bien visible** (voir Figure 5), susceptible d'entraîner des difficultés dans la préparation des essais ou des anisotropies dans les résultats. Par exemple, des échantillons légèrement desséchés se sont avérés particulièrement difficiles à tailler pour des essais triaxiaux ou œdométriques, les varves ayant alors tendance naturellement à se décoller au cours de l'opération.



Figure 5 : Litages (varves) bien visibles sur une éprouvette taillée pour essai triaxial (site de Charlaix)

Afin de limiter les perturbations correspondantes sur les éprouvettes et de garantir une bonne représentativité des essais, **seuls les échantillons d'aspect non remanié ont été retenus pour le programme d'essais mécaniques**.

De plus, les éprouvettes destinées aux essais mécaniques ont systématiquement été **taillées au cœur des carottes**, dans les zones les moins perturbées. Enfin, les échantillons pour essais triaxiaux ont fait l'objet d'une saturation ou re-saturation soignée en début de protocole (voir ci-après).

2.3 Précisions sur la réalisation et l'exploitation des essais triaxiaux

2.3.1 Réalisation des essais triaxiaux

Tous les échantillons cylindriques d'argiles du Beaumont testés à l'appareil triaxial sur la période du projet MLA3 ont été taillés au touret manuel, en cœur de carotte.

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

Synthèse des essais de laboratoire n 2 :

Essais mécaniques dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Février 2023

En dehors de l'essai de fluage, seuls des essais triaxiaux consolidés drainés (dits CID ou CD) ou des essais triaxiaux consolidés non drainés avec mesure de pression interstitielle (dits CIU ou CU+u) ont été réalisés.

Les deux types d'essais commencent par une **phase de saturation** ou de re-saturation des éprouvettes à l'eau désaérée, sous une contrepression croissante élevée (400 à 800 kPa). La saturation est considérée comme satisfaisante à l'atteinte d'un coefficient B de Skempton supérieur à 95 % (c'est-à-dire que sur un incrément de pression isotrope non-drainé au moins 95 % de cet incrément est retrouvé sur le capteur de pression interstitielle).

L'essai se poursuit par une phase de **consolidation isotrope** qui consiste à amener l'échantillon à la contrainte effective isotrope initiale souhaitée pour la phase d'écrasement. Durant cette phase, l'éprouvette est drainée. On mesure sa déformation volumique au cours du temps ; la fin de la consolidation est repérée au coude de la courbe (voir Figure 6).

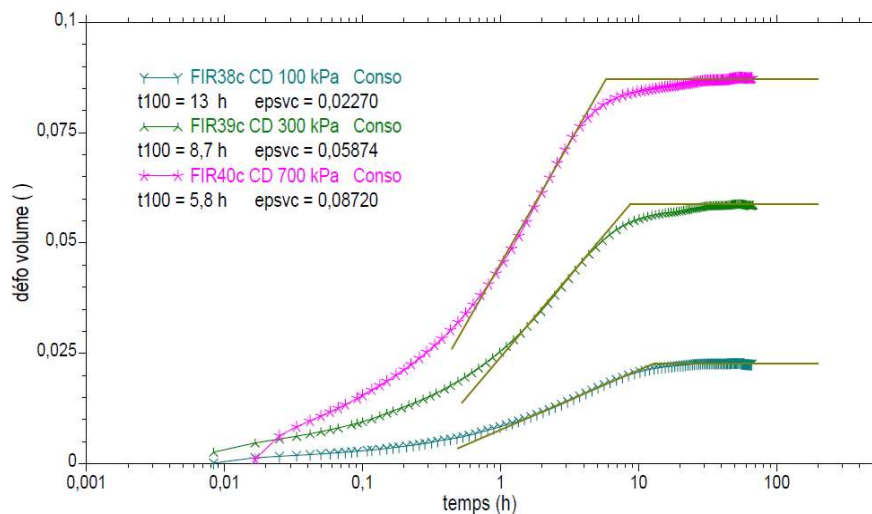


Figure 6 : Courbes de consolidation isotrope obtenues sur les échantillons FIR38c-39c-40c, sondage SC3-5 de 18.50 à 20.00 m (site du Motty), avec mise en évidence du coude de la courbe pour le calcul de t_{100} . Essais réalisés par le Cerema d'Aix-en-Provence (Cerema 2019).

Pour la **phase d'écrasement**, la contrainte radiale totale (ou pression dans la cellule triaxiale) est maintenue constante pendant que le vérin axial permet de solliciter l'échantillon jusqu'à la rupture :

- dans les **essais CID**, l'écrasement se fait à vitesse très lente, en drainant l'éprouvette de sol, afin de maintenir une pression interstitielle constante (égale à la contre-pression en fin de consolidation) durant toute la durée de cette phase. Les contraintes radiales totales et effectives restent donc constantes et seule la contrainte axiale varie ;
- dans les **essais CIU**, le drainage est fermé au cours de l'écrasement, qui peut s'effectuer de manière plus rapide. L'absence de drainage entraîne un report d'une partie des pressions appliquées à l'échantillon sur l'eau interstitielle : la pression interstitielle u varie (et est mesurée), ainsi que les contraintes effectives axiales et radiales par conséquent.

Les **vitesse d'écrasement** maximales dans les deux cas sont définies par la norme NF EN ISO 17892-9 à partir du coefficient t_{100} mesuré en phase de consolidation, en fonction des méthodes de drainage retenues pour l'éprouvette.

Durant l'écrasement sont notamment enregistrés la pression dans la cellule triaxiale, l'effort axial, la déformation axiale de l'échantillon et la variation de pression interstitielle, qui permettent ensuite de dériver toutes les autres exploitations.

Les essais CID et CIU fournissent en théorie tous deux les mêmes valeurs de cohésion et d'angle de frottement effectifs *in fine*.

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

Synthèse des essais de laboratoire n 2 :

Essais mécaniques dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Février 2023

2.3.2 Exploitation et interprétation des essais triaxiaux

L'exploitation des essais triaxiaux fait appel à divers paramètres de comportement du sol. On notera en particulier dans les essais présentés en annexe du présent rapport :

- u (kPa) : pression interstitielle ou pression de pores ;
- ε_a ou ε_1 : déformation axiale = $\Delta h / H_c$ avec Δh la variation de hauteur de l'éprouvette (mm) et H_c la hauteur de l'éprouvette en fin de consolidation (mm) ;
- σ_a ou σ_1 (kPa) : contrainte axiale (également contrainte principale majeure) ;
- σ_r ou σ_3 (kPa) : contrainte radiale (également contrainte principale mineure) ;
- $\sigma'_a, \sigma'_1, \sigma'_r, \sigma'_3$: contraintes axiales et radiales effectives ($\sigma' = \sigma - u$) ;
- p' (kPa) : contrainte moyenne effective = $(\sigma'_1 + 2.\sigma'_3) / 3$;
- q (kPa) : déviateur des contraintes = $\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_1 - \sigma'_3$;
- s' (kPa) : première variable de Lambe = $(\sigma'_1 + \sigma'_3) / 2$;
- t (kPa) : deuxième variable de Lambe = $q / 2$.

La **rupture** des échantillons est considérée comme atteinte au pic du déviateur $q_{\max}$ ou, à défaut de pic identifiable sur les courbes, pour une déformation maximale conventionnelle (souvent fixée à $\varepsilon_a = 15\%$). Le maximum de σ'_1 / σ'_3 peut aussi être utilisé dans certains cas.

Pour les essais réalisés dans le cadre du projet MLA3, les **corrections normalisées** ont été appliquées sur les efforts enregistrés : correction due à l'élasticité de la membrane, correction due aux bandes de papier filtre, correction du diamètre de l'éprouvette en cours d'écrasement (cf. normes d'essais). Pour les essais antérieurs, ces informations ne sont en général pas disponibles, et l'on ne peut que supposer que les normes ont été correctement appliquées. Cela n'entraîne toutefois que de faibles écarts sur les résultats pour les matériaux abordés ici, et ne compromettra donc pas les comparaisons, au moins pour les résistances de pic pour lesquelles les déformations restent suffisamment faibles.

Les **paramètres de Mohr-Coulomb** de résistance au cisaillement du sol sont déterminés sur des **séries d'au moins 3 échantillons comparables** écrasés à des contraintes de préconsolidation différentes. La droite de régression entre les points à la rupture dans les plans $p' - q$ ou $s' - t$ ou $\sigma'_1 - \sigma'_3$ (indifféremment) permet de calculer la cohésion effective c' et l'angle de frottement effectif φ' à partir de l'une des formules ci-dessous (à la rupture) :

- $q = \frac{6 \sin \varphi'}{3 - \sin \varphi'} p' + \frac{6 c' \cos \varphi'}{3 - \sin \varphi'}$
- $t = c' \cos \varphi' + s' \sin \varphi'$
- $\sigma'_1 = K_p \sigma'_3 + 2 c' \sqrt{K_p}$ avec $K_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} \right)$

Dans cette **interprétation conventionnelle** de l'essai triaxial, la cohésion effective c' se manifeste uniquement lorsque le sol argileux est chargé dans son **domaine surconsolidé**, c'est-à-dire sollicité en-dessous de son état de préconsolidation naturelle. Au-delà (domaine normalement consolidé), les points à la rupture s'alignent sur une droite passant par l'origine soit $c' = 0$ (Figure 7).



(voir (Leroueil, Magnan et F. 1985) par exemple) avec une hypothèse de sol isotrope et saturé. Donc, dans l'interprétation de Cambridge, l'essai sur une argile surconsolidée devrait se traduire par une ligne quasi-verticale dans le plan p' - q (soit $p' = \text{constante}$), jusqu'au contact avec la SEL (Figure 9). L'argile devient alors normalement consolidée et son état se déplace sur la SEL jusqu'à atteindre la LEC. Même si les essais réels ne correspondent pas toujours parfaitement à ce modèle, celui-ci reste intéressant pour analyser le comportement de l'échantillon et tenter d'estimer la position de la SEL et/ou de la LEC à partir des tests triaxiaux conventionnels.

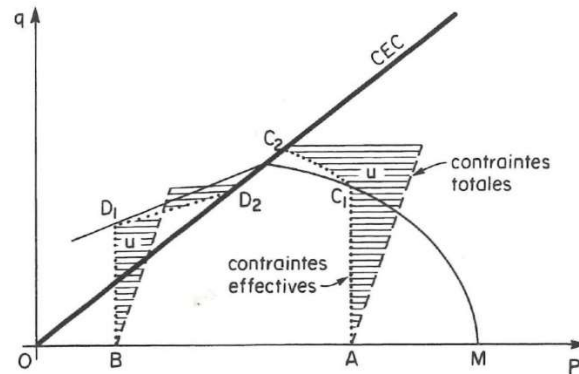


Figure 9 : Essais CIU - Chemins de contrainte non-drainés et pressions interstitielles théoriques dans le plan p' - q pour une argile surconsolidée (« CEC » = LEC), d'après (Leroueil, Magnan et F. 1985)

Mathématiquement, le très connu **modèle de Cam-Clay modifié** permet de formuler ces comportements mécaniques du sol à partir de la théorie de la plasticité, en supposant une SEL de forme elliptique de grand axe p' (axe de la contrainte moyenne effective, voir (Mestat et Riou 2002) par exemple). Ce modèle décrit des argiles « idéales » et isotropes. D'autres modèles ont ensuite été développés dans le même esprit, avec des SEL de formes différentes se rapprochant davantage des résultats expérimentaux : 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, etc.

Dans le présent document les interprétations d'ingénierie conventionnelle, telles que les fourniraient la plupart des bureaux d'études géotechniques, sont essentiellement présentées. Lorsque cela est pertinent, quelques éléments relatifs à l'approche de Cambridge du comportement des argiles sont également précisés. Cette approche permet d'adopter un point de vue critique sur l'interprétation conventionnelle, et pourra conduire à des réinterprétations de certains essais qui seront examinées dans le livrable L-A4.

2.4 Précisions sur la résistance de pic et la résistance résiduelle

2.4.1 Résistance de pic

Dans l'interprétation conventionnelle des essais triaxiaux ou des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande, **la résistance « de pic » est définie** par le pic du déviateur de contrainte q ou celui de l'effort de cisaillement τ au cours de l'essai. Elle détermine la résistance maximale du sol non remanié, au cours du cisaillement, qui peut être décrite par des paramètres de Mohr-Coulomb φ'_{pic} et c'_{pic} .

On notera que dans les essais CIU, la présence d'un pic du déviateur n'est toutefois pas nécessairement un critère de surconsolidation du sol. Ces valeurs de pic peuvent alors traduire soit des comportements surconsolidés (φ'_{oc} et c'_{oc} , voir Figure 7), soit normalement consolidés (φ'_{nc} et c'_{nc}) : il convient donc d'être particulièrement prudent dans l'interprétation d'un « alignement » des points de pic pour en tirer des paramètres de résistance.

Le vocabulaire courant des géotechniciens tend toutefois généralement à confondre les appellations $(\varphi'_{pic} - c'_{pic})$ et $(\varphi'_{oc} - c'_{oc})$.

2.4.2 Résistance résiduelle

L'interprétation conventionnelle des essais laisse **un certain flou sur la notion de résistance résiduelle**.

Fréquemment, cette **résistance « résiduelle »** est déterminée en traçant une droite qui relie les points obtenus en fin d'essai (s'ils s'alignent correctement), pour la déformation maximale atteinte. En pratique, si l'essai est poussé suffisamment loin, ces déformations finissent par se produire à volume constant et la droite peut en théorie se confondre avec la LEC, se traduisant notamment par une cohésion nulle ou quasi-nulle et un angle de frottement **correspondant à l'angle critique**.

L'une des difficultés est que la déformation maximale atteinte dans les essais n'est pas toujours la même et ne correspond pas nécessairement à des états comparables d'une éprouvette à l'autre ou d'un essai à l'autre. Elle ne correspond pas non plus systématiquement à des déformations à volume constant, et l'apparition de plans de cisaillement ne permet pas toujours de satisfaire les conditions d'homogénéité de déformation nécessaires au concept d'état critique. La signification des valeurs « résiduelles » (ou plutôt « ultimes ») ainsi fournies est donc à analyser avec prudence, à la lumière des conditions d'arrêt réelles de l'essai et des chemins de contrainte suivis. Dans le présent rapport, nous parlerons plutôt de **« résistance ultime »** (obtenue en fin d'essai), afin d'éviter toute autre confusion (voir ci-après).

Dans le domaine des glissements de terrains, on nomme aussi **« résistance résiduelle »** une approche du comportement des sols sur les **surfaces de glissement anciennes**, dont il a été démontré que la réactivation ne pouvait être calculée en utilisant les paramètres de résistance du sol déterminés de manière conventionnelle (voir précédemment). Cette résistance résiduelle n'est pas définie (comme l'état critique) par des déformations à volume constant, mais comme l'état atteint lors d'un frottement prolongé, **à grandes déformations**, qui conduit à l'évolution de la résistance de contact vers une valeur plus basse. La cohésion est alors généralement faible à nulle, et l'angle de frottement particulièrement réduit (des valeurs inférieures de 10° à l'angle de frottement de pic sont par exemple couramment rencontrées). On explique souvent ce phénomène par un alignement à l'échelle microscopique des particules d'argiles en feuillets.

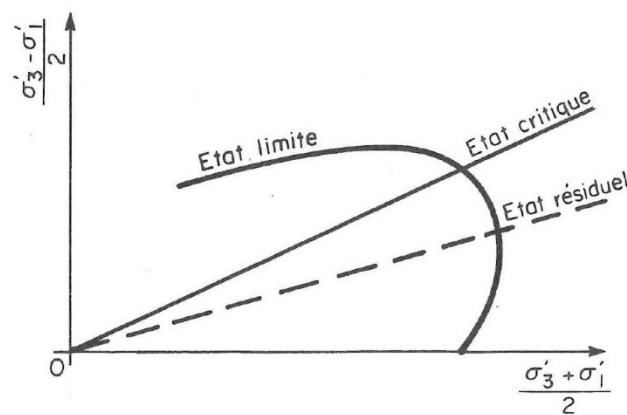


Figure 10 : Différents paliers de résistance des argiles, d'après (Leroueil, Magnan et F. 1985)

La détermination de cette résistance résiduelle en laboratoire s'effectue par des essais en grande déformation (gd) à la boîte de cisaillement annulaire, ou par des essais de cisaillement alterné à la boîte de Casagrande. Sur les sites étudiés dans le cadre du projet MLA3, on trouve ponctuellement des résultats d'essais de cisaillement alterné. Les **paramètres de résistance résiduelle ainsi déterminés seront notés $c'_{res,gd}$ et $\varphi'_{res,gd}$ afin de ne pas les confondre avec les autres approches présentées précédemment**.

On rappellera que la fiabilité et la reproductibilité des valeurs résiduelles obtenues avec ces appareillages reste toutefois sujette à caution, du fait des nombreuses difficultés propres à la boîte de

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

Synthèse des essais de laboratoire n 2 :

Essais mécaniques dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Février 2023

cisaillement (en particulier pour de grands déplacements) : non-homogénéité de la contrainte tangentielle (différences entre la contrainte maximale et la contrainte moyenne agissant sur le plan de glissement), influence de l'épaisseur de l'échantillon, influence de l'espacement entre les deux demi-boîtes au regard du $d_{\max}$ du sol, non-uniformité de la zone de cisaillement, non-maîtrise de la pression interstitielle, maîtrise imparfaite de la saturation initiale, vitesse de cisaillement mal adaptée à la perméabilités du matériau, etc. Ces difficultés sont par exemple rappelées dans (Nasreddine 2004)².

² De manière générale, pour l'ensemble de ce travail, les essais triaxiaux seront considérés comme plus fiables que les essais à la boîte de Casagrande, du fait de leur maîtrise complète des contraintes de l'échantillon.

3 SITE DE CHARLAIX

3.1 Données d'essais mécaniques antérieures au projet MLA3

Comme rappelé dans le livrable L-A2, le site de Charlaix a été largement étudié par le passé, dans le cadre d'études géotechniques mais aussi de travaux de recherche. Il disposait donc déjà avant le projet MLA3 de plusieurs résultats d'essais mécaniques du fait de cet historique.

Pour la dénomination (et l'agencement) des couches de sol citées dans le présent rapport, on se reportera au livrable L-A2 et aux essais d'identification géotechniques correspondants.

Les PV d'essais sont présentés en annexe 1.

3.1.1 Essais œdométriques

Un seul essai œdométrique a été identifié sur ce site ; il a été réalisé par le Cerema sur les prélèvements du sondage SC1 en 2014, vers 21 m de profondeur. Le sondage est situé dans la zone 1 du glissement, environ 30 m à l'amont de la RN85. L'échantillon correspond à des argiles litées / varvées de la **couche F2ch**. La contrainte effective en place est estimée à $\sigma'_{v0} \approx 280$ kPa correspondant à un indice des vides $e_0 \approx 0.787$ d'après l'essai.

L'essai avait été jugé à l'époque peu représentatif à cause d'une part d'un disquage de l'éprouvette en fin d'essai suivant les varves, et d'autre part de l'obtention d'une pression de préconsolidation très inférieure à la contrainte effective en place, témoignant d'un comportement remanié.

L'essai est toutefois présenté en annexe 1 à titre d'ordre de grandeur, étant le seul disponible historiquement sur le site. Il a été réinterprété pour le projet MLA3 à partir des données originales.

On y trouve :

- une contrainte de préconsolidation indiquant un remaniement : $\sigma'_p \approx 90$ kPa $\ll \sigma'_{v0}$;
- des coefficients de compressibilité $C_s \approx 0.022$ et $C_c \approx 0.100$;
- des coefficients de consolidation c_v compris entre 3.16×10^{-7} et 1.68×10^{-6} m²/s ;
- un coefficient de fluage C_α d'environ 1.31×10^{-3} sous 280 kPa.

Ces valeurs restent à considérer comme essentiellement indicatives du fait du remaniement de l'éprouvette. Si l'éprouvette s'est disquée, les coefficients c_v sont par exemple susceptibles d'être surévalués par l'apparition de chemins de drainage intermédiaires, etc.

3.1.2 Essais de cisaillement (boîte de Casagrande et appareil triaxial)

➤ Sondage SC12 – Essai triaxial CETE (1979 ?)

Cet essai n'a pas été retrouvé dans des archives du CETE, mais il est cité dans le rapport de la Sage (SAGE 2002). Il aurait fourni les résultats suivants dans le sondage SI-2 à 4.60 m de profondeur (**couche probable : F1ch**, moraine supérieure, décrite comme des silts à galets et graviers) :

- Poids volumique humide : $\gamma_h = 22.4$ kN/m³ ;
- Cohésion : $c'_{pic} = 20$ kPa ;
- Angle de frottement : $\phi'_{pic} = 26^\circ$.

Aucune autre donnée n'est disponible sur ces résultats.

➤ Sondage TP2 – Essai triaxial Sage (2002)

Le sondage TP2 est un sondage à la pelle mécanique (ne garantissant donc pas une absence de remaniement des échantillons) situé approximativement entre les deux branches du lacet. L'essai triaxial de type CIU a été réalisé entre 3 et 5 m de profondeur (localisation du prélèvement imprécise) dans des « silts argileux ». La couche concernée est **probablement F2ch** (argiles litées glacio-

lacustres) **ou une passée argileuse de la couche F1ch**. Les courbes d'essais sont présentées en annexe 1.

Les caractéristiques suivantes ressortent de cet essai :

- Poids volumique sec : $\gamma_d = 16.3 \text{ kN/m}^3$;
- Cohésion : $c'_{pic} = 17 \text{ kPa}$ $c'_{ult} = 0 \text{ kPa}$;
- Angle de frottement : $\varphi'_{pic} = 21.9^\circ$ $\varphi'_{ult} = 23.6^\circ$.

Les essais CIU semblent indiquer un comportement surconsolidé de l'argile aux différentes contraintes de confinement (50 – 100 – 200 kPa) appliquées pour l'essai. L'essai étant non drainé, la valeur de σ'_3 à la rupture est nettement plus faible, autour de 40 – 80 – 125 kPa respectivement. La surconsolidation se traduit *in fine* par une cohésion de pic modérée, de 17 kPa.

Les essais 2 et 3 ont été poussés suffisamment loin ($\varepsilon_a = 20$ à 25 %) pour que les caractéristiques ultimes semblent raisonnablement représentatives de la ligne d'état critique (LEC) du sol.

➤ **Sondage SC2 – Essai de cisaillement alterné CETE (2008)**

Le sondage carotté SC2 est situé dans la zone 1 de glissement de Charlaix, à l'amont de la RN85, sur le chemin d'accès en terre. Ce sondage et les essais correspondants sont restitués dans le rapport (CETE 2008).

L'essai de cisaillement alterné, fourni en annexe 1, a été réalisé (d'après les descriptions d'échantillons) dans les argiles varvées glacio-lacustres (**couche F2ch**) prélevées entre 5.30 et 6.30 m de profondeur. Dans cette zone, l'argile est qualifiée de « finement sableuse » et peut comporter localement des éléments jusqu'à 5 mm.

L'essai est *in fine* quasi-inexploitable. Du fait de la nature et de l'hétérogénéité du matériau (lité), les échantillons ne sont pas véritablement comparables entre eux. Sur les 4 cisaillements réalisés, un a été ignoré (raison non précisée), et les résultats finaux indiquent les valeurs suivantes : $c'_{pic} = 17.3 \text{ kPa}$ - $\varphi'_{pic} = 32.7^\circ$; $c'_{res,gd} = 21.4 \text{ kPa}$ - $\varphi'_{res,gd} = 16.9^\circ$.

Les points de rupture au pic sont raisonnablement alignés ; ils donnent une cohésion proche de celle obtenue par la Sage en 2002, mais un angle de frottement élevé pouvant toutefois être cohérent avec le cisaillement de lits à cailloutis. Les caractéristiques résiduelles sont en revanche difficiles à interpréter, avec des points mal alignés dans le plan ($\sigma_n - \tau$) et un accroissement incongru de la cohésion.

Le chargé d'essai propose en commentaire du PV de retenir des valeurs résiduelles de $c'_{res,gd} = 2 \text{ kPa}$ - $\varphi'_{res,gd} = 19^\circ$. Celles-ci sont en effet cohérentes avec ce qui pourrait être attendu des argiles du site mais sans rapport avec les résultats réels de l'essai.

➤ **Sondage SC1 – Essai de cisaillement à la boîte CETE (2014)**

L'essai a été réalisé dans les argiles gris-bleu litées correspondant à la **couche F2ch**, entre 13.00 et 13.45 m de profondeur.

Les résultats obtenus sont les suivants :

- Poids volumique sec : $\gamma_d = 15.4$ à 16.0 kN/m^3 ;
- Cohésion : $c'_{pic} = 18 \text{ kPa}$ $c'_{ult} = 4 \text{ kPa}$;
- Angle de frottement : $\varphi'_{pic} = 20^\circ$ $\varphi'_{ult} = 20^\circ$.

L'angle de frottement au pic est plus faible que dans les autres essais du même site et pourrait indiquer une nature plus particulièrement argileuse du lit cisailé. La cohésion mesurée est en accord avec celle des essais antérieurs. Les valeurs ultimes ne correspondent pas à des déformations volumiques totalement stabilisées mais l'essai a vraisemblablement été poussé suffisamment loin pour approcher la LEC comme l'indique la cohésion ultime faible.

3.2 Données d'essais mécaniques acquises durant la période du projet MLA3

3.2.1 Essais œdométriques

Deux essais œdométriques ont été réalisés (par le Cerema) sur le site de Charlaix sur la période du projet ; ils ont concerné les prélèvements du sondage S6-SC1 de 2018. On notera que pour ces essais, la présence des varves peut être problématique : si l'éprouvette n'est pas déjà saturée naturellement ou si elle s'est légèrement desséchée, la mise en eau de l'échantillon peut provoquer la séparation des lits au niveau des interfaces, qui apparaît au démontage de l'éprouvette. Aux contraintes faibles en particulier, des chemins de drainage parasites peuvent alors apparaître, conduisant à des courbes œdométriques irrégulières ou à des difficultés de détermination des coefficients de consolidation c_v .

➤ **Sondage S6-SC1 – Essai œdométrique Cerema (2020)**

Cet essai a été réalisé entre 18.6 et 18.9 m de profondeur. Le sondage est situé dans la zone 1 du glissement, à l'amont de la RN85 dans la zone la plus instrumentée (voir livrable L-A2). L'échantillon correspond à des argiles litées glacio-lacustres de la **couche F2ch**. La contrainte effective en place est estimée à $\sigma'_{v0} \approx 376$ kPa correspondant à un indice des vides $e_0 \approx 0.815$ d'après l'essai.

L'essai est présenté en annexe 1. Les résultats indiquent un remaniement de l'échantillon, pouvant correspondre à la décompression des varves liée au prélèvement et à la mise en eau :

- contrainte de préconsolidation trop faible, indiquant un remaniement : $\sigma'_p \approx 80$ kPa $\ll \sigma'_{v0}$;
- coefficients de compressibilité $C_s \approx 0.022$ et $C_c \approx 0.152$;
- coefficients de consolidation c_v compris entre 1.04×10^{-7} et 2.72×10^{-7} m²/s ;
- un coefficient de fluage d'environ 1.74×10^{-3} sous 376 kPa.

Ces valeurs sont à nouveau à considérer comme essentiellement indicatives du fait du remaniement de l'éprouvette. On peut toutefois constater une bonne concordance des paramètres C_s et C_c avec ceux mesurés en 2014. Les coefficients de consolidation c_v sont un peu plus faibles, mais cela peut traduire une variabilité naturelle de l'argilosité et/ou de la perméabilité du matériau.

➤ **Sondage S6-SC1 – Essai œdométrique Cerema (2022)**

Cet essai a été réalisé entre vers 15.5 m de profondeur, dans le même sondage que l'essai précédent. L'échantillon correspond à des argiles litées glacio-lacustres de la **couche F2ch**. La contrainte effective en place est estimée à $\sigma'_{v0} \approx 310$ kPa correspondant à un indice des vides $e_0 \approx 0.494$ d'après l'essai.

L'essai est présenté en annexe 1. Dans l'ensemble, le déroulement a été satisfaisant et les courbes œdométriques et de consolidation s'avèrent bien exploitables. On notera que le matériau était gonflant à la mise en eau, ce qui a entraîné une compensation du gonflement jusqu'à une pression de 41 kPa.

Les résultats suivants ont été obtenus :

- contrainte de préconsolidation : $\sigma'_p \approx 310$ kPa $\approx \sigma'_{v0}$;
- coefficients de compressibilité $C_s \approx 0.023$ et $C_c \approx 0.132$;
- coefficients de consolidation c_v compris entre 1.89×10^{-7} et 3.62×10^{-7} m²/s ;
- un coefficient de fluage d'environ 1.12×10^{-3} sous 310 kPa.

Le coefficient C_s a été estimé sur la courbe de décharge finale, uniquement avec les premiers points du fait du caractère gonflant de l'échantillon.

La pression de préconsolidation est cohérente avec la contrainte effective en place, ce qui indiquerait un sol normalement consolidé, ou très peu surconsolidé. Dans l'ensemble, les valeurs obtenues sont en accord avec celles de l'essai de 2020 (en dehors de σ'_p mieux évaluée dans le présent essai).

Enfin, un essai de perméabilité à charge variable a été réalisé sur un échantillon de la même carotte. Le PV fourni en annexe 1, indique des valeurs de perméabilité $K \approx 2.31 \times 10^{-9}$ m/s et 2.04×10^{-9} m/s sur les deux répétitions de la procédure de mesure.

3.2.2 Essais de cisaillement (boîte de Casagrande et appareil triaxial)

➤ Sondage S6-SC1 – Essai triaxial CIU Cerema (2019)

L'essai a été réalisé sur un prélèvement carotté entre 10.50 et 11.80 m de profondeur du sondage S6-SC1. La **couche concernée est F2ch** (argiles litées glacio-lacustres). Les courbes d'essais sont présentées en annexe 1 ainsi que les photographies des échantillons en fin de test.

Quatre échantillons ont été testés avec des contraintes de confinement croissantes, pour essayer d'obtenir des points d'essai à la fois dans les zones surconsolidée et normalement consolidée. L'alignement des points à la rupture ne permet toutefois pas de distinguer ces deux zones *in fine*.

Les caractéristiques suivantes ressortent de cet essai avec une interprétation « conventionnelle » (rupture au pic des courbes de déviateur) :

- Poids volumique sec : $\gamma_d = 16.2$ à 16.7 kN/m³ ;
- Cohésion : $c'_{pic} = 3$ kPa ;
- Angle de frottement : $\phi'_{pic} = 25^\circ$.

Par rapport aux essais menés à la boîte de Casagrande ou au triaxial (voir ci-avant et ci-après), la cohésion de pic apparaît nettement plus faible. Les commentaires suivants peuvent être formulés :

- il est connu que les essais à la boîte tendent à sur-évaluer la cohésion du fait des diverses incertitudes propres à l'appareillage (similaires à celles citées en section 2.4), ce qui pourrait introduire un biais ;
- sur l'essai triaxial examiné ici, seule l'allure de la première courbe (essai à 100 kPa) semble s'approcher d'un comportement surconsolidé (ligne pseudo-verticale dans le plan p' - q) avec une SEL au-dessus de la LEC (ligne B-D1 dans la Figure 9). Dans ce cas, les trois autres courbes caractériseraient plutôt la LEC ce qui expliquerait la très faible cohésion mesurée. La surconsolidation limitée pourrait ainsi être cohérente avec la profondeur de prélèvement et/ou un remaniement par le glissement.

L'angle de frottement mesuré apparaît a contrario plus élevé que dans les essais à la boîte, laissant supposer une influence plus forte de la fraction silteuse de ces argiles litées. Pour des varves centimétriques comme c'est le cas ici, la boîte de cisaillement exerce en outre une sollicitation très localisée, sur un seul lit, alors que l'appareil triaxial sollicite une rupture plus globale, en travers-lits. Une certaine anisotropie pourrait également être présente.

➤ Sondage S6-SC1 – Essai de cisaillement à la boîte Cerema (2020)

L'essai a été réalisé sur un prélèvement carotté entre 21.30 et 22.00 m de profondeur du sondage S6-SC1. La **couche concernée est F2ch** (argiles litées glacio-lacustres). Les courbes d'essais sont présentées en annexe 1.

Les caractéristiques suivantes ressortent de cet essai :

- Poids volumique sec : $\gamma_d = 16.0$ à 16.5 kN/m³ ;
- Cohésion : $c'_{pic} = 23$ kPa $c'_{ult} = 6$ kPa ;
- Angle de frottement : $\phi'_{pic} = 20^\circ$ $\phi'_{ult} = 20^\circ$.

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

Synthèse des essais de laboratoire n 2 :

Essais mécaniques dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Février 2023

Les pics sur les courbes contraintes-déformations évoquent un comportement surconsolidé jusqu'à environ $\sigma'_n = 500$ kPa. Les résultats obtenus sont concordants avec ceux du cisaillement à la boîte réalisé en 2014, avec une cohésion légèrement plus forte mais qui pourrait être en accord avec la plus grande profondeur de prélèvement.

Les valeurs ultimes ne correspondent pas à des déformations volumiques totalement stabilisées, cependant l'essai a vraisemblablement été poussé suffisamment loin pour approcher la LEC comme l'indique la cohésion ultime faible.

➤ **Sondage S6-SC1 – Essai de cisaillement à la boîte Cerema (2022)**

Cet essai a été réalisé sur un prélèvement carotté à 15.50 m de profondeur du sondage S6-SC1. Il ne fait pas l'objet d'un PV d'essai conventionnel car il avait pour objectif de cisiller des échantillons dans diverses conditions au regard du litage. En particulier, les deux cas ci-dessous ont été examinés :

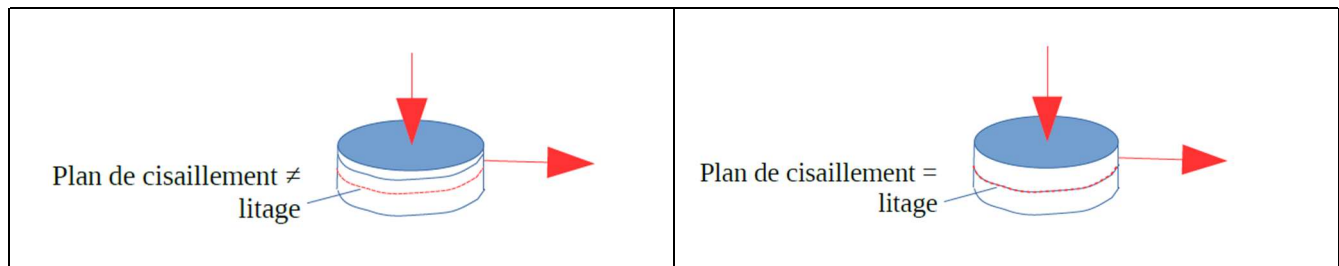


Figure 11 : Différents cas de cisaillement par rapport au litage : (à gauche) cisaillement au sein d'un banc ; (à droite) cisaillement au niveau d'une interface

Seules trois éprouvettes ont pu être préparées dans la carotte considérée. En pratique, certains lits étant légèrement déformés du fait du mode de prélèvement (voir section 2.2) il s'est avéré particulièrement difficile d'obtenir un cisaillement sur interface. Les points à la rupture obtenus sont présentés sur la Figure 12.

Le nombre de points d'essais disponibles ne permet pas de tirer des conclusions définitives sur les résistances propres à chaque situation. Cependant, on relève :

- que le point de cisaillement sur interface entre lits indique une résistance nettement inférieure à celle qui serait attendue sur la base des deux autres points
- que des droites de Mohr-Coulomb probables (représentées en pointillés sur la figure) permettraient d'obtenir les valeurs de pic suivantes :
 - plein lit ou travers-lit : $c'_{pic} \approx 9$ kPa $\phi'_{pic} \approx 26^\circ$
 - interface entre lits : $c'_{pic} \approx 0$ kPa (supposée) $\phi'_{pic} \approx 20^\circ$

Il est intéressant de constater que les valeurs d'angle de frottement en particulier encadrent relativement bien l'ensemble des résistances relevées sur le site.

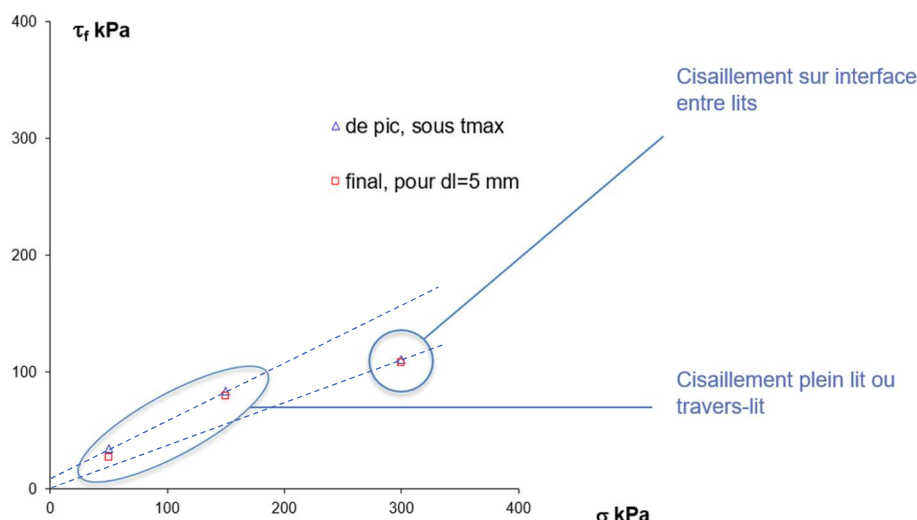


Figure 12 : Points à la rupture obtenus par cisaillement sur 3 éprouvettes du sondage S6-SC1 (15.50 m) en fonction de la position du plan de rupture par rapport aux interfaces entre lits

3.3 Synthèse des essais mécaniques disponibles sur le site de Charlaix

3.3.1 Essais œdométriques

Le tableau ci-dessous synthétise les caractéristiques œdométriques mesurées sur le site de Charlaix.

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
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

Tableau 1 : Synthèse des résultats d'essais œdométriques disponibles sur le site de Charlaix

La synthèse montre des valeurs raisonnablement cohérentes de C_s et C_c entre les échantillons, même si seul le dernier essai est véritablement exploitable compte-tenu des problèmes de remaniement observés sur les autres. On remarquera d'ailleurs la valeur de e_0 excessivement élevée sur les deux premiers échantillons par rapport au dernier. Bien que le gonflement reste modéré, il est probable que la **procédure de compensation du gonflement** mise en place sur le dernier échantillon ait prévenu efficacement le décollement des varves. *In fine*, le sol en place est dans tous les cas **vraisemblablement normalement consolidé, ou très peu surconsolidé**, soit σ'_p très proche de σ'_{v0} .

3.3.2 Essais de cisaillement (boîte de Casagrande et triaxial)

Le tableau ci-dessous synthétise les caractéristiques de résistance au cisaillement (triaxial et boîte de Casagrande) mesurées sur le site de Charlaix en approche conventionnelle.

Sondage	Prof. (m)	Couche	γ_d (kN/m ³)	c'_{pic} (kPa)	φ'_{pic} (°)	c'_{ult} (kPa)	φ'_{ult} (°)	Observations
SI2 (1979)	4.0	F1ch	Inconnu	20	26	-	-	Triaxial - Cité dans rapport Sage (2002) – Pas de PV
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

Tableau 2 : Synthèse des résultats d'essais de cisaillement disponibles sur le site de Charlaix

On notera tout d'abord sur ce site la cohérence des masses volumiques sèches mesurées au cours des différents essais, avec des valeurs systématiquement basses, entre 15.5 et 16.5 kN/m³.

Dans l'ensemble, les essais semblent indiquer de faibles niveaux de surconsolidation, en accord avec les résultats obtenus à l'œdomètre. Les cohésions sont vraisemblablement inférieures à 20 kPa, voire nettement plus basses car la plupart des valeurs hautes ont été obtenues sur des cisaillements à la boîte qui :

- tendent à sur-évaluer les cohésions du fait de la configuration même de l'essai, ne permettant par exemple pas une maîtrise parfaite des conditions de contrainte et de saturation ;
- localisent la rupture sur une zone précise de l'éprouvette, ce qui peut conduire à des variations de propriétés mécaniques significatives sur des matériaux lités comme c'est le cas ici (voir essai S6-SC1 à 15.50 m par exemple).

Les angles de frottement mesurés varient entre 20 et 25°, probablement là-aussi en fonction des conditions de cisaillement de l'éprouvette et de la nature plus ou moins sableuses des litages dont la structure n'est pas nécessairement homogène sur toute la couche F2ch.

4 SITE DE QUET-EN-BEAUMONT

4.1 Données d'essais mécaniques antérieures au projet MLA3

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

4.2 Données d'essais mécaniques acquises durant la période du projet MLA3

Les sondages réalisés sur le site de Quet-en-Beaumont ayant essentiellement conduit à prélever des matériaux sablo-graveleux, peu d'essais additionnels ont été menés. Pour mémoire (voir livrable L-A2), les argiles litées glacio-lacustres typiques des autres sites n'ont été identifiées que dans un court passage du sondage S7-SC2, entre 21.40 et 25.20 m, et en alternance avec des passées plus sableuses. Les essais mécaniques consistent in fine en deux essais de cisaillement à la boîte de Casagrande.

Les procès-verbaux d'essais sont fournis en annexe 2.

➤ **Sondage S7-SC1 – Essai de cisaillement à la boîte Cerema (2019)**

L'essai a été réalisé entre 3.9 et 4.1 m de profondeur, dans des limons sableux correspondant à la **couche F1q** (voir livrable L-A2). Du fait de la désorganisation et de l'hétérogénéité des échantillons, il n'a pas été possible de tailler des éprouvettes intactes. Les cisaillements ont donc été réalisés sur des échantillons recomposés : en conséquence, seul l'angle de frottement γ est véritablement exploitable et la différence entre les caractéristiques de pic et les caractéristiques ultimes n'est pertinente qu'au regard de la compacité obtenue sur les échantillons recomposés.

Les résultats suivants ont été obtenus :

- Poids volumique sec : $\gamma_d = 18.0 \text{ kN/m}^3$ (non significatif) ;
- Cohésion : $c'_{\text{pic}} = 22 \text{ kPa}$ $c'_{\text{ult}} = 11 \text{ kPa}$ (non significatif) ;
- Angle de frottement : $\phi'_{\text{pic}} = 33^\circ$ $\phi'_{\text{ult}} = 35^\circ$.

Compte-tenu de la reconstitution des éprouvettes, on ne retiendra de cet essai que les valeurs d'angle de frottement de 33 à 35°.

➤ **Sondage S7-SC2 – Essai de cisaillement à la boîte Cerema (2019)**

Cet essai a été réalisé sur des échantillons prélevés entre 23.7 et 24.5 m de profondeur, dans les argiles litées glacio-lacustres correspondant à la **couche F2qa** (voir livrable L-A2).

Les résultats suivants ont été obtenus :

- Poids volumique sec : $\gamma_d = 16.3 \text{ à } 16.8 \text{ kN/m}^3$;
- Cohésion : $c'_{\text{pic}} = 23 \text{ kPa}$ $c'_{\text{ult}} = 7 \text{ kPa}$;
- Angle de frottement : $\phi'_{\text{pic}} = 18^\circ$ $\phi'_{\text{ult}} = 19^\circ$.

Bien que la cohésion ultime soit un peu forte (elle devrait être quasi-nulle), probablement du fait des incertitudes propres à l'appareillage expérimental, la proximité des résultats avec ceux obtenus sur le site de Charlaix est manifeste : densités faibles (de l'ordre de 1.6), angles de frottement faibles également.

4.3 Synthèse des essais mécaniques disponibles sur le site de Quet-en-Beaumont

Le tableau ci-dessous synthétise les caractéristiques de cisaillement mesurées en approche conventionnelle sur le site de Quet-en-Beaumont.

Sondage	Prof. (m)	Couche	γ_d (kN/m ³)	c'_{pic} (kPa)	ϕ'_{pic} (°)	c'_{res} (kPa)	ϕ'_{res} (°)	Observations
S7-SC1	4.0	F1q	n.s.	n.s.	33	n.s.	35	Boîte de Casagrande – Echantillons recomposés
S7-SC2	24.0	F2qa	16.3 – 16.8	23	18	7	19	Boîte de Casagrande

Tableau 3 : Synthèse des résultats d'essais de cisaillement disponibles sur le site de Quet-en-Beaumont (n.s. = non significatif)

5 SITE DES TOUCHES

5.1 Données d'essais mécaniques antérieures au projet MLA3

Aucune donnée d'essai mécanique antérieure au projet MLA3 n'a été identifiée au cours des recherches bibliographiques, pour les matériaux du glissement des Touches.

Dans son étude de 1994 (SAGE 1994), le bureau d'études Sage avait toutefois réalisé des essais d'identification à environ 3 m de profondeur, dans des « colluvions de pente » de la zone 2 de glissement, au sein de deux sondages à la pelle mécanique TP-1 et TP-2. Ces prélèvements, correspondant à la **couche F2, ou à des passées plus argileuses au sein de la couche F1** avaient permis de proposer des valeurs d'angles de frottement par corrélation avec les indices de plasticité :

- Sondage TP1 (3.1 m) : $\varphi'_{pic} = 30^\circ$ $\varphi'_{ult} = 20$ à 25° (par corrélation)
- Sondage TP2 (2.6 m) : $\varphi'_{pic} = 28^\circ$ $\varphi'_{ult} = 20^\circ$ (par corrélation)

Ensuite, un calcul de stabilité par recalage sur les mouvements observés avait conduit à obtenir pour le contact remblai RN85 – sol support : $c' = 0$ kPa $\varphi' = 23^\circ$

Ces valeurs n'étant pas basées sur des résultats directs d'essais mécaniques en laboratoire, elles sont à considérer comme simplement indicatives.

5.2 Données d'essais mécaniques acquises durant la période du projet MLA3

5.2.1 Essais œdométriques

Compte-tenu des volumes d'échantillons exploitables, il n'a pas été réalisé d'essai œdométrique sur le site des Touches, pour lequel la priorité a été donnée aux essais de cisaillement.

5.2.2 Essais de cisaillement (boîte de Casagrande et appareil triaxial)

Divers essais de cisaillement ont été réalisés sur le site des Touches, soit sur la couche d'argile grises litées glacio-lacustres F2 typique des formations du Beaumont, soit sur la couche brune F1 de couverture, plus limoneuse. Les PV d'essais sont fournis en annexe 3.

➤ **Sondage S8-SC2 – Essai triaxial CIU Cerema (2019)**

Cet essai a été réalisé sur des échantillons prélevés entre 3.4 et 4.3 m de profondeur, dans la **couche brune de couverture F1** (« argile marron à verdâtre » sur le PV d'essai). Le sondage est situé dans la zone 2 de glissement (voir livrable L-A2).

Quatre échantillons ont été testés avec des contraintes de confinement croissantes, pour essayer d'obtenir des points d'essai à la fois dans les zones surconsolidée et normalement consolidée. L'alignement des points à la rupture ne permet toutefois pas à lui seul de distinguer ces deux zones *in fine*.

Les caractéristiques suivantes ressortent de cet essai avec une interprétation « conventionnelle » (rupture au pic des courbes de déviateur) :

- Poids volumique sec : $\gamma_d = 15.7$ à 15.9 kN/m³ ;
- Cohésion : $c'_{pic} = 16$ kPa ;
- Angle de frottement : $\varphi'_{pic} = 24^\circ$.

Toutefois, en examinant les chemins de contrainte dans le plan p'-q, seuls le premier ou les deux premiers essais (consolidés sous $\sigma'_{3c} = 50$ et 100 kPa) présentent des allures évoquant un comportement surconsolidé aboutissant sur la SEL (ligne B-D1 dans la Figure 9). Dans ce cas, les deux autres courbes caractériseraient plutôt la LEC et les points à la rupture seraient à aligner sur une droite

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

Synthèse des essais de laboratoire n 2 :

Essais mécaniques dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Février 2023

passant par l'origine. La surconsolidation limitée pourrait d'ailleurs être cohérente avec la faible profondeur de prélèvement et avec une formation « de couverture » récente.

On notera que l'angle de frottement mesuré est similaire à celui estimé par la Sage par rétro-analyse en 1994 pour le contact remblai – sol de couverture.

➤ **Sondage S8-SC1 – Essai triaxial CIU Cerema (2019)**

Cet essai a été réalisé sur des échantillons prélevés entre 7.5 et 8.1 m de profondeur, dans la **couche d'argiles grises glacio-lacustres F2**. Le sondage S8-SC1 est situé dans la zone 1 de glissement (voir livrable L-A2).

Quatre échantillons ont été testés avec des contraintes de confinement croissantes, pour essayer d'obtenir des points d'essai à la fois dans les zones surconsolidée et normalement consolidée. Les points des trois essais à 50, 100 et 300 kPa semblent effectivement s'aligner sur une première droite alors que le point à 500 kPa (échantillon TOU01) montre un comportement différent.

Dans l'interprétation conventionnelle de l'essai, les trois premiers points sont donc rattachés à la résistance de pic du matériau surconsolidé et le dernier à la droite de l'état normalement consolidé (voir Figure 7), passant par zéro. Les caractéristiques suivantes sont alors obtenues :

- Poids volumique sec : $\gamma_d = 16.1 \text{ à } 16.9 \text{ kN/m}^3$;
- Cohésion : $c'_{pic,oc} = 6 \text{ kPa}$ $c'_{nc} = 0 \text{ kPa}$;
- Angle de frottement : $\phi'_{pic,oc} = 23^\circ$ $\phi'_{nc} = 18^\circ$.

Les cohésions s'avèrent faibles ce qui ne traduirait qu'une légère surconsolidation. L'angle de frottement de pic est cohérent avec les autres mesures réalisées sur ce site. L'angle de frottement pour la partie non consolidée apparaît en revanche nettement plus faible.

Cet essai nécessite toutefois une analyse critique plus approfondie. En effet, lorsque l'on examine les chemins de contrainte dans le plan p' - q , seul le premier essai (consolidé sous $\sigma'_{3c} = 50 \text{ kPa}$) présente une allure évoquant un comportement surconsolidé (ligne pseudo-verticale dans le plan p' - q). Dans ce cas, les deux essais suivants (100 et 300 kPa) caractériseraient plutôt la LEC et les points à la rupture seraient à aligner sur une droite passant par l'origine. Enfin, pour le dernier essai à 500 kPa, la photographie de l'éprouvette montre clairement une rupture par glissement parallèlement à l'inclinaison des lits et non en travers-lits comme sur les autres échantillons (lits approximativement horizontaux) : le très faible angle de frottement relevé pourrait alors correspondre à une anisotropie du matériau, avec une résistance minimale obtenue parallèlement au litage.

Les perturbations des litages pourraient d'ailleurs être cohérentes avec la proximité de la surface de rupture.

➤ **Sondage S8-SC2 – Essai de cisaillement à la boîte Cerema (2020)**

Cet essai a été réalisé sur des échantillons prélevés entre 5.1 et 5.4 m de profondeur, dans la **couche brune de couverture F1** (« argile marron » sur le PV d'essai). Le sondage est situé dans la zone 2 de glissement (voir livrable L-A2).

Les résultats suivants ont été obtenus :

- Poids volumique sec : $\gamma_d = 16.7 \text{ à } 16.8 \text{ kN/m}^3$;
- Cohésion : $c'_{pic} = 40 \text{ kPa}$ $c'_{ult} = 9 \text{ kPa}$;
- Angle de frottement : $\phi'_{pic} = 23^\circ$ $\phi'_{ult} = 23^\circ$.

Si les angles de frottement semblent cohérents avec ce qui peut être attendu de ce type de matériau, les cohésions mesurées sont vraisemblablement excessives. Cela peut être dû aux divers artefacts propres aux essais à la boîte de cisaillement sur argiles déjà cités antérieurement.

On remarquera également que l'angle de frottement mesuré est similaire à celui estimé par la Sage en 1994 et à celui mesuré à l'appareil triaxial en 2019.

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

Synthèse des essais de laboratoire n 2 :

Essais mécaniques dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Février 2023

➤ **Sondage S8-SC1 – Essai de cisaillement à la boîte Cerema (2020)**

Cet essai a été réalisé sur des échantillons prélevés entre 8.1 et 8.4 m de profondeur, dans la **couche d'argiles grises glacio-lacustres F2**. Le sondage S8-SC1 est situé dans la zone 1 de glissement (voir livrable L-A2).

Les résultats suivants ont été obtenus :

- Poids volumique sec : $\gamma_d = 17.9$ à 18.0 kN/m^3 ;
- Cohésion : $c'_{\text{pic}} = 11 \text{ kPa}$ $c'_{\text{ult}} = 4 \text{ kPa}$;
- Angle de frottement : $\phi'_{\text{pic}} = 28^\circ$ $\phi'_{\text{ult}} = 27^\circ$.

Les différents échantillons paraissent indiquer un comportement légèrement surconsolidé de l'argile pour l'ensemble des efforts normaux testés, se traduisant par une cohésion effective de pic de 11 kPa. Les essais semblent avoir été poussés suffisamment loin pour que les résistances ultimes approchent la ligne d'état critique, comme l'indique la faible valeur de c'_{res} .

Les angles de frottement mesurés sont plus élevés que dans les autres essais du site et que pour les argiles glacio-lacustres des échantillons de Charlaix et de Quet-en-Beaumont. Cela pourrait s'expliquer par une couche plus particulièrement compacte (poids volumiques secs mesurés à 18 kN/m^3 , contre environ 16 kN/m^3 ailleurs) et/ou présentant une fraction silteuse plus importante. La coupe de sondage indiquait d'ailleurs au niveau du prélèvement : « argile sableuse avec alternance de lits centimétriques noirs et gris, à interfaces de sable fin brillant, de consistance ferme à très ferme » (voir (Cerema 2022)).

➤ **Sondage S8-SC2 – Essai triaxial CIU Cerema (2022)**

Cet essai a été réalisé sur des échantillons prélevés entre 8.25 et 9.0 m de profondeur, dans la **couche d'argiles grises glacio-lacustres F2**. Le sondage est situé dans la zone 2 de glissement (voir livrable L-A2).

Trois échantillons ont été testés avec des préconsolidations comprises entre 50 et 280 kPa. L'alignement des points à la rupture apparaît satisfaisant. On remarquera que le déviateur n'a pas présenté de pic durant cet essai ; les résistances maximales ont donc été calculées à la déformation maximale (atteinte sur l'ensemble des essais), ici 17 %. L'évolution des pressions interstitielles n'était pas non plus stabilisée en fin d'écrasement. Les résultats suivants ont été obtenus :

- Poids volumique sec : $\gamma_d = 16.7$ à 17.4 kN/m^3 ;
- Cohésion : $c'_{\text{pic}} = 9 \text{ kPa}$;
- Angle de frottement : $\phi'_{\text{pic}} = 23^\circ$.

La cohésion apparaît basse et évoque de faibles niveaux de surconsolidation. L'angle de frottement est cohérent avec celui obtenu dans la plupart des essais triaxiaux sur les argiles litées glacio-lacustres (couches F2x des différents sites).

En examinant les chemins de contrainte dans le plan p' - q , on remarque toutefois que seul le premier essai (consolidé sous $\sigma'_{3c} = 50 \text{ kPa}$) présente une allure évoquant un comportement surconsolidé aboutissant sur la SEL (ligne B-D1 dans la Figure 9). Dans ce cas, les deux autres courbes caractériseraient plutôt la LEC, avec un angle de frottement un peu plus élevé. Le paramètre λ_{Cu} peut être estimé à $\lambda_{Cu} \approx 0.303$.

5.3 Synthèse des essais mécaniques disponibles sur le site des Touches

5.3.1 Essais œdométriques

Il n'y a pas de donnée œdométrique sur ce site.

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

Synthèse des essais de laboratoire n 2 :

Essais mécaniques dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Février 2023

5.3.2 Essais de cisaillement (boîte de Casagrande et triaxial)

Le tableau ci-dessous synthétise les caractéristiques de résistance au cisaillement (triaxial et boîte de Casagrande) mesurées sur le site des Touches en approche conventionnelle.

Sondage	Prof. (m)	Couche	γ_d (kN/m ³)	c'_{pic} (kPa)	ϕ'_{pic} (°)	c'_{ult} (kPa)	ϕ'_{ult} (°)	Observations
S8-SC1 (2018)	7.80	F2	16.1 à 16.9	6	23	-	-	Triaxial
	7.80	F2	16.2	0	18	-	-	Triaxial – Point TOUT01 avec une rupture // lits
	8.20	F2	18.0	11	28	4	27	Boîte de Casagrande – Argile sableuse compacte, ferme
S8-SC2 (2018)	3.90	F1	15.7 à 15.9	16	24	-	-	Triaxial
	5.20	F1	16.8	40	23	9	23	Boîte de Casagrande – Cohésion surévaluée
	8.30	F2	16.7 à 17.4	9	23	-	-	Triaxial

Tableau 4 : Synthèse des résultats d'essais de cisaillement disponibles sur le site des Touches

En dehors d'une couche plus compacte dans le sondage SC1, les masses volumiques sèches mesurées apparaissent cohérentes entre elles et en accord avec celles mesurées sur les autres sites d'étude.

Les formations F1 et F2 montrent in fine des caractéristiques mécaniques assez proches. Les cohésions en place se situent vraisemblablement entre 5 et 15 kPa, avec des matériaux vraisemblablement peu surconsolidés. L'angle de frottement de pic se situe en général autour de 23°, comme sur d'autres sites d'étude du projet. Une variabilité importante ressort néanmoins : sur des zones plus compactes (S8-SC1 8.20 m) par exemple, l'angle de frottement peut s'accroître significativement et, à l'opposé, des ruptures parallèles aux litages peuvent conduire à des angles de frottement nettement plus faibles (S8-SC1 7.80 m).

6 SITE DE CORPS

6.1 Données d'essais mécaniques antérieures au projet MLA3

Les seules données d'essais mécaniques disponibles sur ce site antérieurement au projet MLA3 sont issues de l'étude (ADRGT 1980).

Les essais ont porté sur deux séries d'échantillons :

- **Echantillon E1 issu du sondage à la tarière ST1** : il s'agit vraisemblablement de passées fines de la couche F1c (voir livrable L-A2). Sur cet échantillon, un essai dit « de **compression simple** » (conditions non précisées) a été réalisé, fournissant une cohésion non drainée $C_u \approx 79$ kPa. Toutefois, cette valeur obtenue sur un échantillon a priori recomposé et recompacté (compte-tenu du mode de prélèvement) ne peut pas être considérée comme représentative.
- **Echantillons E2 issus de prélèvements à la pelle mécanique (puis tarière) ST2** dans des argiles grises litées, pouvant correspondre à la couche F2c, ou à des passées plus fines de la couche F1c. Ont été réalisés :
 - des essais de **compression simple** donnant des cohésions non drainées de 30 et 46 kPa. À nouveau, il est difficile d'estimer la représentativité de ces valeurs en l'absence d'information sur les conditions d'essais ;
 - cinq écrasements **triaxiaux CIU** sur des prélèvements entre 2.10 et 2.30 m de profondeur. Les courbes d'essais sont reproduites en annexe 4.

Comme le mentionnait le rapport de l'ADRGT, ces derniers essais sont difficiles à interpréter. En effet, si on considère les essais 1, 2 et 3 on trouve $\varphi'_{pic} \approx 35^\circ$ et $c'_{pic} = 0$ kPa et $\varphi'_{ult} \approx 32^\circ$ et $c'_{ult} = 0$ kPa. En revanche, si on considère les essais 4 et 5 on trouve $\varphi'_{pic} \approx 21^\circ$ et $c'_{pic} = 21$ kPa et $\varphi'_{ult} \approx 17^\circ$ et $c'_{ult} = 23$ kPa, ou encore $\varphi'_{ult} \approx 25^\circ$ et $c'_{ult} = 0$ kPa. L'ADRGT précise que les échantillons 4 et 5 correspondent très probablement à des ruptures suivant des surfaces lustrées et/ou des contacts entre varves. Les valeurs des essais 1, 2 et 3 seraient en revanche les plus significatives pour des ruptures transversales au litage.

Cette interprétation, bien qu'en partie hypothétique, est dans son principe en bonne concordance avec les observations qui ont pu être faites sur les autres sites du projet.

6.2 Données d'essais mécaniques acquises durant la période du projet MLA3

6.2.1 Essais œdométriques

➤ **Sondage S9-SC1 – Essai œdométrique Cerema (2022)**

Cet essai a été réalisé entre 12.5 et 13.0 m de profondeur. Le sondage est situé dans la zone Est du glissement, à l'aval de la RN85 (voir livrable L-A2). L'échantillon correspond à des argiles grises litées glacio-lacustres de la **couche F2c**. La contrainte effective en place est estimée à $\sigma'_{v0} \approx 175$ kPa correspondant à un indice des vides $e_0 \approx 0.487$ d'après l'essai.

L'essai est présenté en annexe 4. Il montre plusieurs défauts, probablement liés à la nature de l'échantillon, lité et gonflant, et comprenant des interfaces entre varves susceptibles de favoriser des circulations d'eau parasites (notamment à faible contrainte). La courbe de compressibilité est irrégulière et les **valeurs de Cc et Cs** qui en sont déduites sont à considérer comme indicatives. Pour déterminer Cs, seuls les premiers points du déchargement final ont été utilisés, compte-tenu du gonflement initial observé (et compensé) lors de la mise en eau. Pour la **contrainte de préconsolidation** σ'_p , la méthode

de Casagrande (voir norme NF EN ISO 17892-5) a été utilisée en l'absence de détermination fiable de C_s . Elle montre un matériau normalement consolidé.

Le courbe de consolidation à 50 kPa s'avère inexploitable, et celle à 100 kPa présente un point aberrant qui rend la détermination du coefficient c_v plus incertaine. La valeur de c_v correspondante ne sera donc pas prise en compte pour la suite.

Les résultats sont les suivants :

- contrainte de préconsolidation : $\sigma'_p \approx 175 \text{ kPa} \approx \sigma'_{v0}$;
- coefficients de compressibilité $C_s \approx 0.024$ et $C_c \approx 0.146$;
- coefficients de consolidation c_v compris entre 7.33×10^{-8} et $1.81 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$;
- un coefficient de fluage d'environ 7.32×10^{-4} sous 175 kPa.

Ces valeurs restent au final relativement cohérentes avec celles des autres sites, avec toutefois des coefficients de consolidation et de fluage un peu plus faibles.

6.2.2 Essais de cisaillement (appareil triaxial)

➤ Sondage S9-SC1 – Essai triaxial CIU Cerema (2022)

Cet essai a été réalisé sur des échantillons prélevés entre 10.5 et 11.3 m de profondeur, dans la **couche d'argiles grises glacio-lacustres F2c**. Le sondage est situé dans la zone Est de glissement, à l'aval de la RN85 (voir livrable L-A2). Le PV d'essai est fourni en annexe 4.

Trois échantillons ont été testés. Seul l'échantillon E3 présente un léger pic de déviateur, les autres montrent une courbe uniformément croissante jusqu'à l'arrêt de l'essai ($\varepsilon_v \approx 17\%$). Les résistances de pic s'avèrent bien alignées. Seul l'échantillon E3 permettant d'identifier une résistance ultime distincte, les caractéristiques ultimes ont été estimées en considérant une cohésion nulle.

Les caractéristiques suivantes ressortent de cet essai avec une interprétation « conventionnelle » (rupture au pic des courbes de déviateur) :

- Poids volumique sec : $\gamma_d = 16.8$ à 17.1 kN/m^3 ;
- Cohésion : $c'_{pic} = 6 \text{ kPa}$ $c'_{ult} = 0 \text{ kPa}$ (estimé) ;
- Angle de frottement : $\phi'_{pic} = 23^\circ$ $\phi'_{ult} = 23^\circ$.

De manière générale, ces caractéristiques mécaniques sont en bonne cohérence avec celles mesurées sur les argiles glacio-lacustres des autres sites, malgré un poids volumique sec un peu plus fort. Par ailleurs, en examinant les chemins de contrainte dans le plan p' - q , seul l'essai à 100 kPa pourrait évoquer un comportement légèrement surconsolidé. Une surconsolidation limitée serait cohérente avec les observations tirées de l'essai oedométrique. Le paramètre λ_{Cu} peut être estimé à $\lambda_{Cu} \approx 0.310$.

➤ Sondage S9-SC3 – Essai triaxial CIU Cerema (2022)

Le sondage S9-SC3 n'apparaît pas dans le livrable L-A2. Il a été réalisé en fin du projet MLA3 (fin 2021) : il s'agit d'un **forage incliné à 45°** destiné à prélever des échantillons orientés différemment par rapport au litage des argiles glacio-lacustres. Le forage est situé au voisinage du sondage S9-SD3. Seule une partie du forage a fait l'objet d'échantillons intacts en gaines.

La **coupe du sondage** est la suivante d'après les échantillons prélevés :

Profondeur	Couche	Description
4,05 à 4,7 m	F2c	Argile grise, plastique et collante. Absence de litage sableux.

4,7 à 5,9 m	F2c	Argile grise plastique à très plastique. Présence de petits cailloutis de calcaire ou de granite (cailloutis granitique vers 5,1 m de profondeur) et de petits éléments indurés noirs millimétriques.
5,9 à 6,3 m	F2c	Argile grise plastique compacte. Absence de cailloutis ou autres éléments. Litage apparent de façon très légère.
6,4 à 7,7 m	F2c	Argile grise plastique avec quelques passées graveleuses.
7,8 à 8,7 m	F2c / F3c	Transition argile / cailloutis de fond ; matériau remanié. Cailloutis calcaires et parfois granitique ou gneissique dans une matrice argileuse grise et plastique
8,7 à 11,5 m	F3c	Cailloutis prédominants ($D_{max} = 50$ mm) dans une matrice argileuse grise. Tube PVC mal fermé qui a entraîné l'assèchement des matériaux carottés.

Tableau 5 : Coupe du sondage incliné S9-SC3

Comme cela ressort de la coupe, ce forage **n'a pas donné la typologie d'échantillons attendue**. Contrairement aux sondages voisins, les argiles prélevées ici montrent peu de marques du litage. La fraction sablo-graveleuse semble également un peu plus forte au sein de la couche F2c. Les prélèvements exploitables (suffisamment intacts et suffisamment longs) pour les essais mécaniques étaient ceux prélevés entre 4.7 et 5.9 m et ceux prélevés entre 6.4 et 7.7 m.

L'essai CIU à l'appareil triaxial a été réalisé sur les échantillons prélevés entre 6.5 et 7.1 m de profondeur. Après taille, les échantillons ne montraient quasiment aucun litage visible ; celui-ci pourrait avoir été remanié par le passage d'une surface de rupture par exemple. Le PV d'essai est fourni en annexe 4.

Trois échantillons ont été testés. Compte-tenu de la forme des courbes dans le plan p' - q , les conditions « de pic » ont été considérées atteintes au maximum de σ'_1/σ'_3 (ce critère faisant partie de ceux retenus par la norme NF EN ISO 17892-9). Les caractéristiques ultimes ont été identifiées à la déformation maximale atteinte au cours des essais (soit $\varepsilon_v \approx 17\%$). Les alignements de points à la rupture conduisant à des cohésions très légèrement négatives, **la valeur de c' a été fixée à zéro**.

Les caractéristiques suivantes ressortent *in fine* de cet essai avec une interprétation « conventionnelle » (rupture au pic des courbes de déviateur) :

- Poids volumique sec : $\gamma_d = 17.1$ à 17.8 kN/m³ ;
- Cohésion : $c'_{pic} = 0$ kPa $c'_{ult} = 0$ kPa ;
- Angle de frottement : $\phi'_{pic} = 29^\circ$ $\phi'_{ult} = 27^\circ$.

Comme dans l'essai CIU précédent, on retrouve des poids volumiques un peu plus élevés que sur les autres sites. Par ailleurs, les angles de frottement s'avèrent nettement plus hauts, ce qui laisse supposer une contribution plus significative qu'ailleurs de la fraction silteuse à graveleuse. Enfin, les cohésions nulles tendent à indiquer une quasi-absence de surconsolidation (remaniement ?) et / ou un pilotage du comportement par les éléments non argileux.

Compte-tenu de la quasi-absence de litage, cet essai ne permet toutefois pas d'obtenir d'informations supplémentaires sur les anisotropies de résistance des argiles glacio-lacustres.

➤ **Sondage S9-SC3 – Essai de fluage Cerema (2022)**

Le **prélèvement carotté compris entre 4.7 et 5.9 m de profondeur du sondage S9-SC3** a été utilisé pour réaliser un essai de fluage à l'appareil triaxial. Il s'agit d'un essai non conventionnel, ne faisant pas l'objet d'une méthode normalisée. L'essai a été effectué de la manière suivante :

- Saturation de chaque éprouvette sous une contre-pression de 650 kPa puis, après vérification du coefficient de Skempton, consolidation sous une contrainte effective $\sigma'_3 = 120$ kPa ;
- Ecrasement axial drainé complet de la première éprouvette E1 (conditions CID), et obtention de la contrainte axiale maximale à la rupture σ'_{1rupt} ;

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

Synthèse des essais de laboratoire n 2 :

Essais mécaniques dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Février 2023

- Ecrasement axial drainé de la deuxième éprouvette E2 jusqu'à 85 % de $\sigma_1'_{rupt}$, puis palier de fluage jusqu'à stabilisation des déformations ou jusqu'à rupture différée ;
- Ecrasement axial drainé de la troisième éprouvette E3 jusqu'à 70 % de $\sigma_1'_{rupt}$, puis palier de fluage jusqu'à stabilisation des déformations ou jusqu'à rupture différée.

L'échantillon E1 a permis de déterminer $\sigma_1'_{rupt} = 243$ kPa sous $\sigma_3' = 120$ kPa. En faisant l'hypothèse d'une cohésion nulle au vu des essais menés antérieurement, cela correspondrait à un angle de frottement $\varphi' \approx 20^\circ$. Bien que bas, il a été considéré suffisamment cohérent avec les valeurs pouvant être obtenues sur les argiles glacio-lacustres d'après les autres essais existants.

L'échantillon E2 n'a pas permis de mesurer de fluage. Il est en effet arrivé très rapidement à la rupture pour $\sigma_1' = 0.85 \times \sigma_1'_{rupt}$. Plusieurs hypothèses peuvent être émises, en particulier des différences de résistance entre échantillons (matériau pouvant présenter des propriétés mécaniques hétérogènes, voir section 6.1), ou une application trop rapide de la charge par la machine d'essai, ayant conduit à une augmentation parasite des pressions interstitielles.

L'échantillon E3 a permis de réaliser un palier de fluage sous ($\sigma_1' = 170$ kPa, $\sigma_3' = 120$ kPa) soit 70% de la charge de rupture. Le palier de fluage a duré environ 14 jours. Les résultats sont représentés sur la Figure 13 et la Figure 14 sous forme de graphique de la déformation volumique de l'éprouvette en fonction du temps (en heures). La déformation volumique est comptée positive pour une contraction de l'éprouvette ; elle est mesurée grâce aux volumes d'eau expulsés de l'éprouvette.

La Figure 13 montre clairement la présence d'un fluage, dont l'amplitude sur l'ensemble du palier est de l'ordre de 0.5 % du volume initial de l'éprouvette. Ce fluage d'avère amorti, avec une quasi-stabilisation au cours du temps. Le graphique de la Figure 14 montre que ce fluage amorti correspond à une évolution quasi-linéaire dans une échelle de temps logarithmique jusqu'à $t \approx 300$ h (suivie par une stabilisation). En calculant la pente moyenne de la droite on peut déduire la relation suivante pour la déformation volumique entre deux instants t_0 et t sur la partie linéaire (avec les temps t exprimés en heures) :

$$\varepsilon_V(t) \approx \varepsilon_V(t_0) + 0.728 \cdot \log(t/t_0)$$

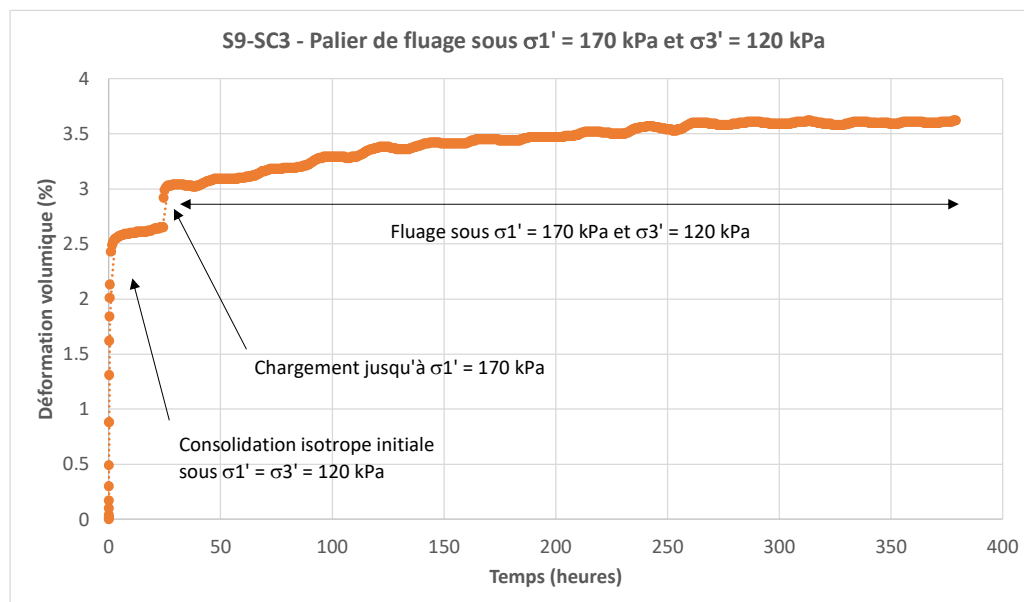


Figure 13 : Déformation volumique en fonction du temps (échelle linéaire) pour le palier de fluage de l'éprouvette E3 (70 % de la charge de rupture) – Corps S9-SC3 – 5.0 m

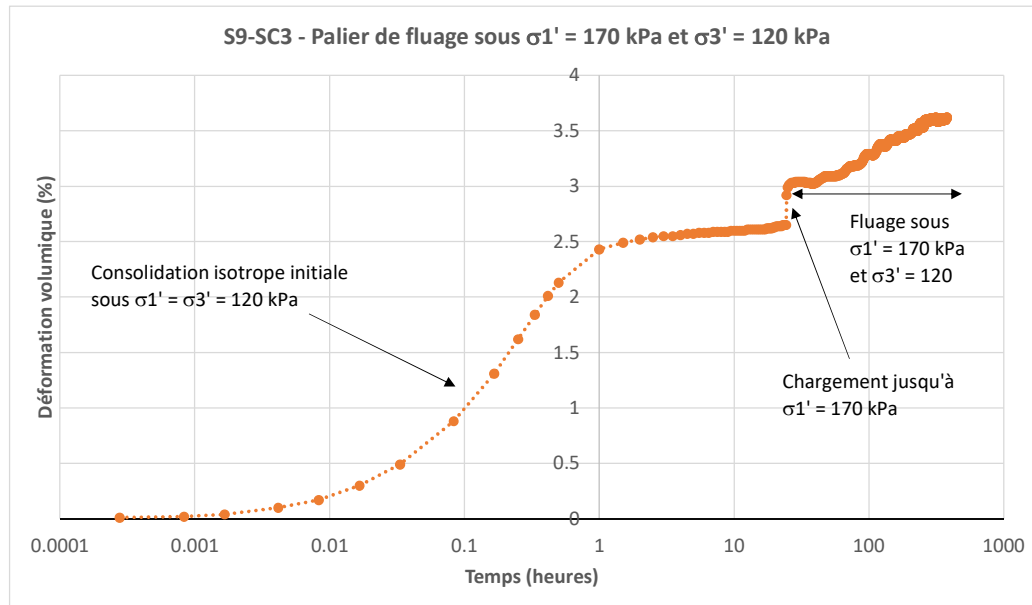


Figure 14 : Déformation volumique en fonction du temps (échelle logarithmique) pour le palier de fluage de l'éprouvette E3 (70 % de la charge de rupture) – Corps S9-SC3 – 5.0 m

Ces essais de fluage démontrent au final que lorsque le sol subit des variations de chargement $\leq 70\%$ de sa résistance maximale, une composante de fluage peut être présente, et peut s'étaler sur près de 10 jours avant stabilisation des déformations.

6.3 Synthèse des essais mécaniques disponibles sur le site de Corps

6.3.1 Essais œdométriques

Le tableau ci-dessous synthétise les caractéristiques œdométriques mesurées sur le site de Corps.

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
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 6 : Synthèse des résultats d'essais œdométriques disponibles sur le site de Corps

6.3.2 Essais de cisaillement (triaxial)

Le Tableau 7 ci-après synthétise les caractéristiques de résistance au cisaillement (triaxial uniquement) mesurées sur le site de Corps, en approche conventionnelle.

Cette synthèse fait ressortir l'hétérogénéité des matériaux rencontrés, d'une couche à l'autre mais aussi au sein d'une même couche (argiles glacio-lacustres F2c ici). Si l'essai à 10.90 m dans S9-SC1 présente des caractéristiques très proches de celles rencontrées sur les autres sites, l'essai à 8.20 m dans S9-SC3 indique des angles de frottement plus forts, associés à un matériau plus dense et présentant une fraction sableuse un peu plus importante.

L'influence du litage est également ressortie dans les essais de 1980, avec une impossibilité de trouver une droite commune à l'ensemble des points d'essais et des interprétations pouvant diverger fortement en fonction des points retenus (et des litages sollicités par l'essai).

Sondage	Prof. (m)	Couche	γ_d (kN/m ³)	c'_{pic} (kPa)	ϕ'_{pic} (°)	c'_{ult} (kPa)	ϕ'_{ult} (°)	Observations
ST2-E2 (1980)	2.20	F1c/F2c	15.1 à 17.0	Triaxial CIU – Points non alignés, essai difficilement interprétable. Couples (c'_{pic} ; ϕ'_{pic}) possibles : (0 kPa ; 35°) – (21 kPa ; 21°). Couples (c'_{ult} ; ϕ'_{ult}) possibles : (0 kPa ; 32°) – (23 kPa ; 17°) – (0 kPa ; 25°)				
S9-SC1 (2018)	10.90	F2c	16.8 à 17.1	6	23	0	23	Triaxial CIU – Résistance ultime estimée
S9-SC3 (2021)	8.20	F2c	17.1 à 17.8	0	29	0	27	Triaxial CIU – Sondage incliné

Tableau 7 : Synthèse des résultats d'essais de cisaillement disponibles sur le site de Corps

7 SITE DU MOTTY / SAINT-FIRMIN

7.1 Données d'essais mécaniques antérieures au projet MLA3

Aucune donnée d'essai mécanique antérieure au projet MLA3 n'a été identifiée au cours des recherches bibliographiques pour les matériaux du glissement du Motty / Saint-Firmin.

7.2 Données d'essais mécaniques acquises durant la période du projet MLA3

Durant la période du projet MLA3, un nombre important d'essais mécaniques en laboratoire a été réalisé par le Laboratoire d'Aix-en-Provence du Cerema dans le cadre des études de la RN85 menées en appui à la DIR Méditerranée.

Ces essais ont fait l'objet d'un rapport séparé (référence bibliographique (Cerema 2019)) qu'il est inutile de reproduire ou de répéter ici. Il est intégralement disponible dans les documents associés au projet MLA3 ou sur demande auprès du Cerema.

Les échantillons testés sont issus des sondages SC3-1 à SC3-10 et concernent les couches (voir livrable L-A2) :

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

Seule la couche Lw1 correspond véritablement à des argiles glacio-lacustres en place similaires à celles rencontrées sur les autres sites. Cependant, les matériaux des deux autres couches peuvent exhiber des caractéristiques physiques proches (voir livrable L-A2).

Les essais mécaniques ont consisté en 11 essais triaxiaux CIU et 7 essais triaxiaux CID, sur une cinquantaine d'éprouvettes de 50 mm de diamètre. Seules les caractéristiques de pic ont été déterminées dans les essais.

7.3 Synthèse des essais mécaniques disponibles sur le site du Motty – Saint-Firmin

7.3.1 Essais œdométriques

Il n'a pas été réalisé d'essai œdométrique sur ce site.

7.3.2 Essais de cisaillement (triaxial uniquement)

Le tableau ci-dessous synthétise les caractéristiques de résistance au cisaillement mesurées à l'appareil triaxial sur le site du Motty – Saint-Firmin en approche conventionnelle.

Sondage	Prof. (m)	Couche	ρ_d (kN/m ³)	c'_{pic} (kPa)	ϕ'_{pic} (°)	c'_{ult} (kPa)	ϕ'_{ult} (°)	Observations
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

	12.7	Fw1a	17.4 à 18.9	Triaxial CIU – 100-300-700 kPa. Points non alignés, essai difficilement interprétable. Carotte hétérogène. Couples (c'_{pic} ; φ'_{pic}) possibles : (0 kPa ; 32°) – (0 kPa ; 37°) – (42 kPa ; 32°)				
	22.1	Fw1a	18.7 à 19.6	0	34	-	-	Triaxial CIU – 150-250-450 kPa Les courbes p'-q n'évoquent pas de surconsolidation significative
SC3-2 (2017)	12.5	Fw1a	19.9 à 20.1	23	32	-	-	Triaxial CID – 100-300-700 kPa Tous les échantillons présentent une transition dilatant-contractant marquée
	13.5	Fw1a	19.6 à 19.8	25	33	-	-	Triaxial CIU – 100-300-700 kPa Les courbes p'-q à 100 et 300 kPa peuvent évoquer une surconsolidation
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
SC3-4 (2017)	8.7	Fw1a	15.2 à 16.8	0	27	-	-	Triaxial CIU – 100-300-700 kPa Les courbes p'-q n'évoquent pas de surconsolidation significative
SC3-5 (2017)	8.2	Fw1b	15.4 à 17.2	0	28	-	-	Triaxial CIU – 100-200-500 kPa Points mal alignés. Les courbes p'-q n'évoquent pas de surconsolidation.
	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
SC3-7 (2017)	1.8	Fw1b	15.7 à 16.0	0	23	-	-	Triaxial CIU – 100-300-700 kPa Les courbes p'-q n'évoquent pas de surconsolidation significative.
	8.5	Fw1b	18.8 à 20.9	78	22	-	-	Triaxial CID – 100-300-700 kPa Tous les échantillons présentent 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 8 : Synthèse des résultats d'essais de cisaillement à l'appareil triaxial disponibles sur le site du Motty – Saint-Firmin

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

Synthèse des essais de laboratoire n 2 :

Essais mécaniques dans les dépôts glacio-lacustres du Beaumont

Date : Février 2023

Les multiples essais réalisés révèlent à nouveau l'hétérogénéité des couches rencontrées. Les masses volumiques s'avèrent très variables : on retrouve des valeurs faibles comme sur les autres sites de glissement, mais aussi des passages beaucoup plus compacts généralement associés à une hausse des résistances.

De manière générale, la couche Fw1a (terrasse inférieure würmienne ancienne) présente des angles de frottement plus élevés que les autres couches, correspondant à une fraction sableuse plus marquée et/ou à des densités plus fortes. Elle est généralement située plus en profondeur également.

La couche d'argiles glacio-lacustres Lw1 montre des caractéristiques cohérentes avec celles recensées sur les autres sites d'études, bien que pouvant s'avérer là aussi hétérogènes. Les cohésions restent dans l'ensemble faibles à modérées (0 à 15 kPa en général) et sont logiquement associées à des niveaux de surconsolidation naturelle faible à nulle. En dehors de l'échantillon SC3-9, les angles de frottement mesurés s'étalent de 23 à 28° comme sur les autres sites.

De manière complémentaire, la Figure 15 ci-après montre une synthèse de l'ensemble des points d'essais triaxiaux acquis sur le site du Motty – Saint-Firmin d'après le rapport (Cerema 2019). Les essais ne sont pas classés par zone de prélèvement mais par quantité de particules argileuses (estimée d'après le passant granulométrique à 2 μm , voir livrable L-A2). Ce graphique montre que malgré les hétérogénéités recensées dans les différentes formations, les points d'essais s'intègrent dans un fuseau délimité par deux droites correspondant à des angles de frottement de 21,3° (minimum) et 37,7° (maximum). Les matériaux les plus argileux sont globalement compris dans un fuseau 21° – 29° ce qui se rapproche des valeurs relevées sur les couches d'argiles glacio-lacustres des autres sites.

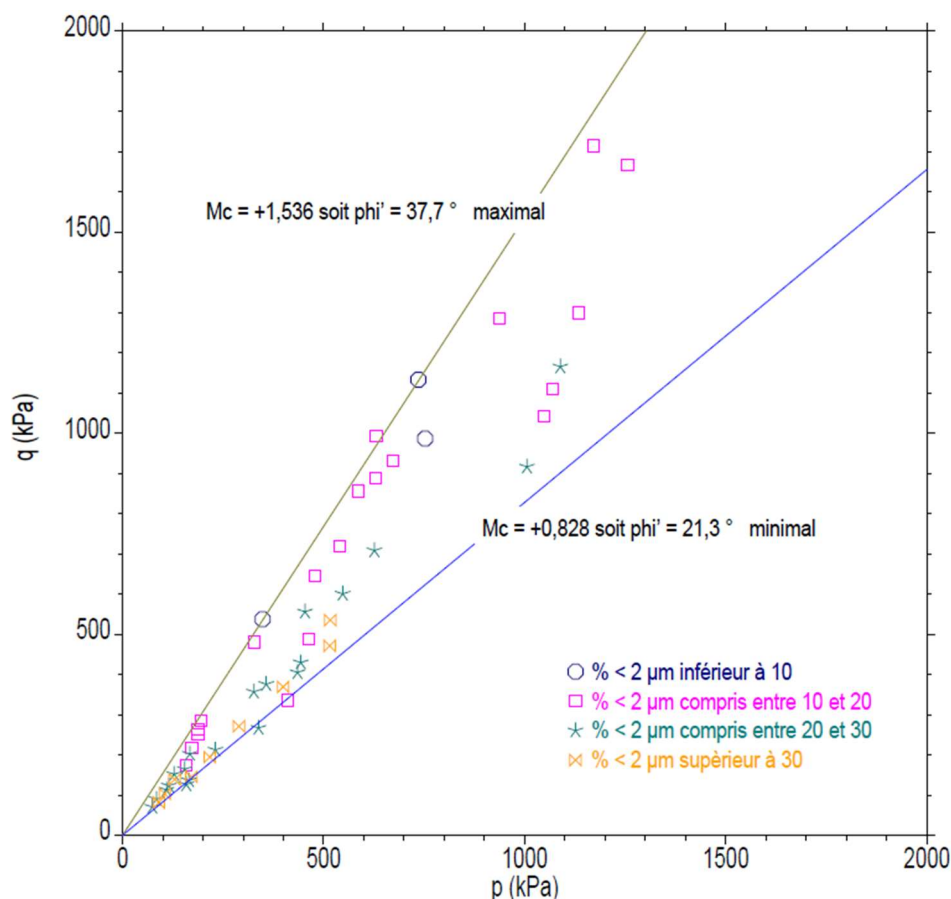


Figure 15 : Synthèse des essais mécaniques à l'appareil triaxial menés sur le site du Motty - Saint-Firmin, en fonction de la teneur en particules argileuses, d'après (Cerema 2019)

8 SYNTHÈSE - CONCLUSION

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

Ce livrable est complété par le livrable L-A2 qui présente les propriétés physiques des sols de chacun des sites d'étude, et par le livrable L-A4 qui propose une synthèse des caractéristiques de la couche d'argiles litées glacio-lacustres impliquée quasi-systématiquement dans les glissements lents observés. Cet ensemble de documents permettra pour l'avenir de disposer des paramètres d'entrée nécessaires aux modèles de calcul géotechniques impliquant ce type de matériau dans la région du Beaumont.

9 REFERENCES

9.1 Bibliographie

- ADRGT. «Etude de la stabilité des versants du torrent de la Sézia, près de Corps.» (Rapport de l'ADRGT pour le SIVOM du Canton de Corps) 1980: 44 p.
- Cerema. «Glissement de terrain des Touches (Corps, 38) - Etude de diagnostic G5 au voisinage de la RN85.» (Rapport du Cerema pour la DIR Med) 2022: 153 p.
- Cerema. «RN85 - Essais de laboratoire - Compte-rendu.» (Rapport d'essais du Cerema Méditerranée pour la DIR Med) 2019: 322.
- CETE. «RN 85 Glissement de Charlaix - Etude géotechnique de stabilisation et de confortement de la branche aval du lacet.» (Rapport du CETE de Lyon pour la DRE Rhône-Alpes) 2008: 25 p.
- Hattab, M., et Pierre-Yves Hicher. «Mécanismes de déformation dans les argiles surconsolidées.» *Revue Française de Géotechnique*, n° 117 (2006): 3-15.
- Leroueil, S., Jean-Pierre Magnan, et Tavenas F. *Remblais sur argile molle*. Lavoisier, 1985.
- Magnan, Jean-Pierre. *Mécanique des sols et des roches*. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat - Cours de mécanique des sols, 2017.
- Mestat, Philippe, et Yvon Riou. «Modélisation des sols et des ouvrages avec le modèle de Cam-Clay modifié.» *Revue Française de Génie Civil* 6, n° 5 (2002): 801-815.
- Monjuvent, G. *Le Drac – Morphologie, stratigraphie et chronologie quaternaires d'un bassin Alpin - Thèse de doctorat*. Grenoble: Univ. J.Fourier, 1978.
- Mouratidis, A., et Jean-Pierre Magnan. «Un modèle élastoplastique anisotrope avec écrouissage pour les argiles molles naturelles : Mélanie.» *Revue française de géotechnique*, n° 25 (1983): 55-62.
- Nasreddine, Khaldoun. *Effet de la rotation des contraintes sur le comportement des sols argileux*. Champs-sur-Marne: Thèse de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, 2004.
- SAGE. «Glissement de terrain RN85 lieu-dit Charlaix - Suivi de la surveillance 1999-2000 et étude géotechnique de faisabilité - Stabilisation de la branche supérieure du lacet.» (Rapport de la Sage pour la DDE de l'Isère) 2002: 128 p.
- SAGE. «R.N.85 Commune de Corps – Etude des cas n°1 et 15 – PR 100 + 700 à 850.» (Rapport de la Sage pour la DDE de l'Isère) 1994.
- Tavenas, F., et S. Leroueil. «Les concepts d'état limite et d'état critique et leurs applications pratiques à l'étude des argiles.» *Revue française de géotechnique*, n° 6 (1979): 27-49.
- Van Eekelen, Suzanne J.M., et Peter Van Den Berg. «The Delft Egg model, a constitutive model for clay.» *DIANA Computational Mechanics '94*. Kluwer Academic Publishers, 1994. 103-116.

9.2 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))	9
Figure 2 : (à gauche) couronne de matériaux remaniés en périphérie de carotte et (à droite) litages incurvés par le mode de prélèvement. Photographies prises sur échantillons secs d'argiles litées glacio-lacustres.	12
Figure 3 : Prélèvement fortement altéré à l'ouverture de la carotte par adhérence sur la gaine (sondage S8-SC2 de 9.00 à 10.50 m, Les Touches). Echantillons non retenus pour des essais mécaniques.	12
Figure 4 : Prélèvement bien conservé à l'ouverture des carottes (sondage S9-SC2 de 21.00 à 22.50 m, Corps).	13
Figure 5 : Litages (varves) bien visibles sur une éprouvette taillée pour essai triaxial (site de Charlaix)	13
Figure 6 : Courbes de consolidation isotrope obtenues sur les échantillons FIR38c-39c-40c, sondage SC3-5 de 18.50 à 20.00 m (site du Motty), avec mise en évidence du coude de la courbe pour le calcul de t_{100} . Essais réalisés par le Cerema d'Aix-en-Provence (Cerema, 2019).	14
Figure 7 : Passage du domaine surconsolidé au domaine normalement consolidé d'une argile dans le plan de Mohr ($\sigma_n' - \tau$), d'après (Magnan, 2017)	16
Figure 8 : Surface d'état limite (SEL) délimitant le domaine surconsolidé, ligne d'état critique (LEC) et exemples de chemins de contraintes permettant de les atteindre dans le plan $s' - t$; modifié de (Tavenas & Leroueil, 1979)	16
Figure 9 : Essais CIU - Chemins de contrainte non-drainés et pressions interstitielles théoriques dans le plan $p' - q$ pour une argile surconsolidée (« CEC » = LEC), d'après (Leroueil, et al., 1985)	17
Figure 10 : Différents paliers de résistance des argiles, d'après (Leroueil, et al., 1985)	18
Figure 11 : Différents cas de cisaillement par rapport au litage : (à gauche) cisaillement au sein d'un banc ; (à droite) cisaillement au niveau d'une interface	24
Figure 12 : Points à la rupture obtenus par cisaillement sur 3 éprouvettes du sondage S6-SC1 (15.50 m) en fonction de la position du plan de rupture par rapport aux interfaces entre lits	25
Figure 13 : Déformation volumique en fonction du temps (échelle linéaire) pour le palier de fluage de l'éprouvette E3 (70 % de la charge de rupture) – Corps S9-SC3 – 5.0 m	36
Figure 14 : Déformation volumique en fonction du temps (échelle logarithmique) pour le palier de fluage de l'éprouvette E3 (70 % de la charge de rupture) – Corps S9-SC3 – 5.0 m	37
Figure 15 : Synthèse des essais mécaniques à l'appareil triaxial menés sur le site du Motty - Saint-Firmin, en fonction de la teneur en particules argileuses, d'après (Cerema, 2019)	41

ANNEXES

Annexe 1 : Essais mécaniques du site de Charlaix

Annexe 2 : Essais mécaniques du site de Quet-en-Beaumont

Annexe 3 : Essais mécaniques du site des Touches

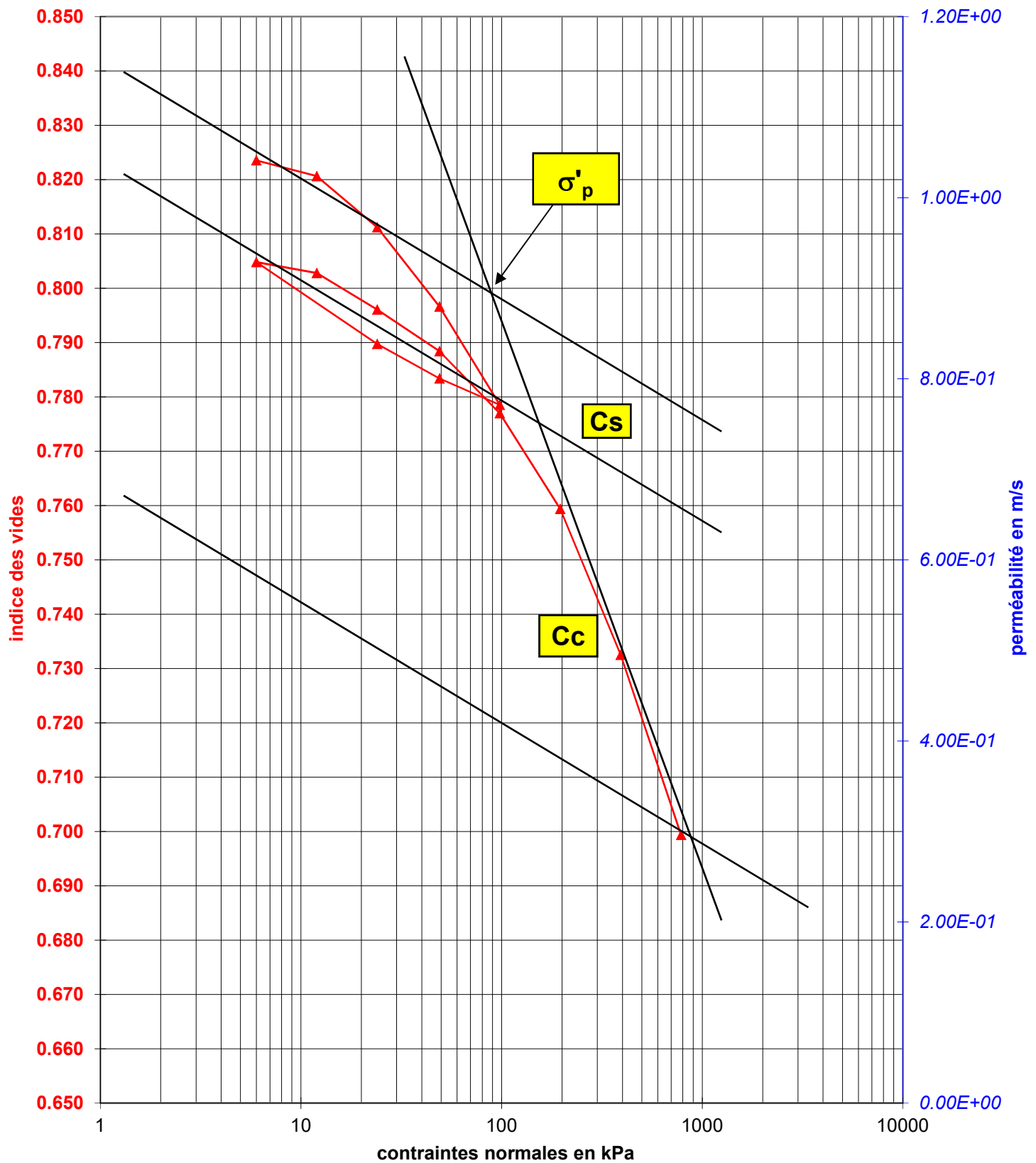
Annexe 4 : Essais mécaniques du site de Corps

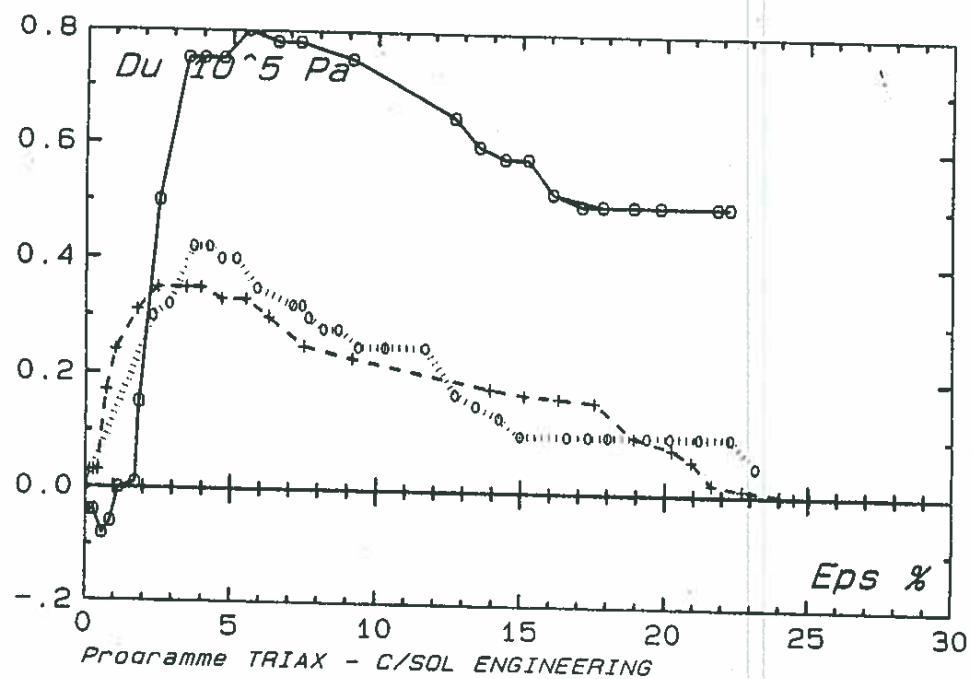
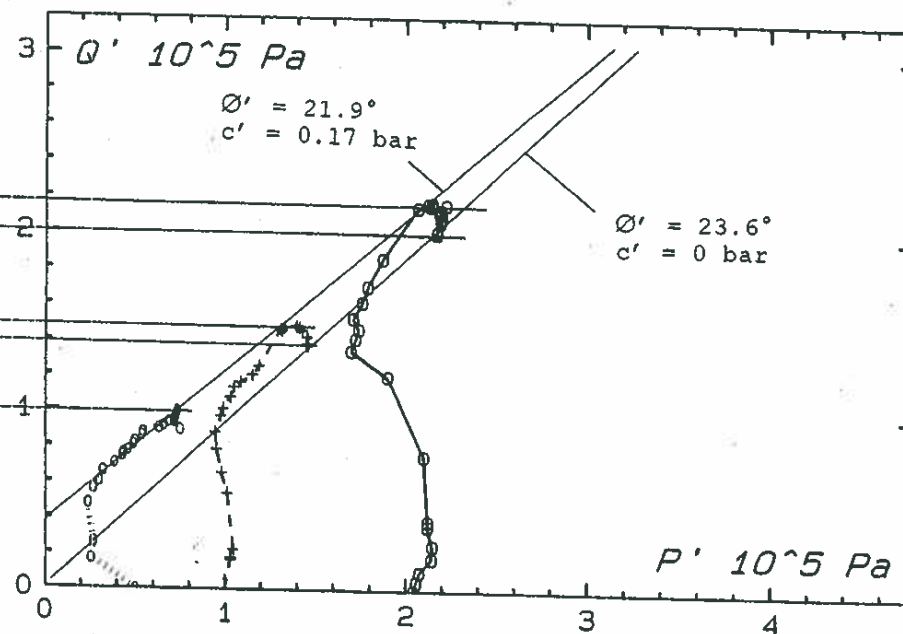
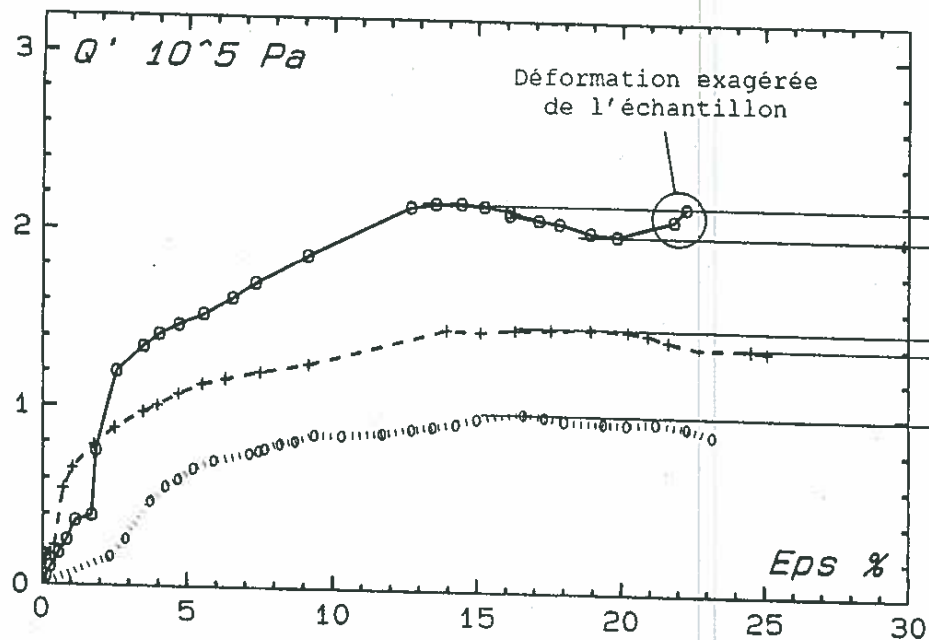
ANNEXE 1

Essais mécaniques du site de Charlaix

 Laboratoire Régional de Lyon Groupe RRMS				ESSAI DE COMPRESSIBILITE à L'OEDOMETRE suivant norme NF P 94-090-1 **																																																																																																																
Appareil SOILTEST n°: S2				Moule n°: S2																																																																																																																
dossier : 42311 Provenance : Charlaix (38) Sondage SC1 Par : DLA Echantillon 1 carottier : Cotes 20,40 m à 21,12 m Nature Argiles varvées Eprouvette disquée au démoulage en fin d'essai				Teneurs en eau <table border="1"> <tr> <th>Pesage</th> <th colspan="2">initiale</th> <th>finale</th> </tr> <tr> <td>N° tare</td> <td>S2</td> <td>T5</td> <td>S2</td> </tr> <tr> <td>PTH g</td> <td>685.20</td> <td>178.90</td> <td>197.30</td> </tr> <tr> <td>PTS g</td> <td>650.60</td> <td>150.70</td> <td>164.80</td> </tr> <tr> <td>P tare g</td> <td>536.00</td> <td>50.20</td> <td>50.20</td> </tr> <tr> <td>P eau g</td> <td>34.60</td> <td>28.20</td> <td>32.50</td> </tr> <tr> <td>P sol sec g</td> <td>114.60</td> <td>100.50</td> <td>114.60</td> </tr> <tr> <td>W %</td> <td>30.19</td> <td>28.06</td> <td>28.36</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Degré de saturation (Sr) %</td> <td>95.49</td> <td>109.48</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Hauteur des pleins (cm)</td> <td colspan="2">hp = 1.34</td> </tr> </table>				Pesage	initiale		finale	N° tare	S2	T5	S2	PTH g	685.20	178.90	197.30	PTS g	650.60	150.70	164.80	P tare g	536.00	50.20	50.20	P eau g	34.60	28.20	32.50	P sol sec g	114.60	100.50	114.60	W %	30.19	28.06	28.36	Degré de saturation (Sr) %		95.49	109.48	Hauteur des pleins (cm)		hp = 1.34																																																																						
Pesage	initiale		finale																																																																																																																	
N° tare	S2	T5	S2																																																																																																																	
PTH g	685.20	178.90	197.30																																																																																																																	
PTS g	650.60	150.70	164.80																																																																																																																	
P tare g	536.00	50.20	50.20																																																																																																																	
P eau g	34.60	28.20	32.50																																																																																																																	
P sol sec g	114.60	100.50	114.60																																																																																																																	
W %	30.19	28.06	28.36																																																																																																																	
Degré de saturation (Sr) %		95.49	109.48																																																																																																																	
Hauteur des pleins (cm)		hp = 1.34																																																																																																																		
Caractéristiques de l'éprouvette <table border="1"> <tr> <td>Position</td> <td>21.00</td> <td>m</td> </tr> <tr> <td>Section</td> <td>A 31.669</td> <td>cm²</td> </tr> <tr> <td>Hauteur initiale</td> <td>H₀ 2.444</td> <td>cm</td> </tr> <tr> <td>Volume initial</td> <td>V₀ 77.399</td> <td>cm³</td> </tr> <tr> <td></td> <td>σ'v₀ 280</td> <td>kPa</td> </tr> <tr> <td>ps estimé</td> <td>2.7</td> <td>g/cm³</td> </tr> <tr> <td>ps mesuré</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>				Position	21.00	m	Section	A 31.669	cm ²	Hauteur initiale	H ₀ 2.444	cm	Volume initial	V ₀ 77.399	cm ³		σ'v ₀ 280	kPa	ps estimé	2.7	g/cm ³	ps mesuré			Masses volumiques apparentes <table border="1"> <tr> <th></th> <th>initiale</th> <th>finale</th> <th></th> </tr> <tr> <td>ρ</td> <td>1.93</td> <td>2.04</td> <td>g/cm³</td> </tr> <tr> <td>ρ_d</td> <td>1.48</td> <td>1.59</td> <td>g/cm³</td> </tr> </table>					initiale	finale		ρ	1.93	2.04	g/cm ³	ρ _d	1.48	1.59	g/cm ³																																																																												
Position	21.00	m																																																																																																																		
Section	A 31.669	cm ²																																																																																																																		
Hauteur initiale	H ₀ 2.444	cm																																																																																																																		
Volume initial	V ₀ 77.399	cm ³																																																																																																																		
	σ'v ₀ 280	kPa																																																																																																																		
ps estimé	2.7	g/cm ³																																																																																																																		
ps mesuré																																																																																																																				
	initiale	finale																																																																																																																		
ρ	1.93	2.04	g/cm ³																																																																																																																	
ρ _d	1.48	1.59	g/cm ³																																																																																																																	
Détermination de l'indice des vides "e" <table border="1"> <tr> <th>σ' kPa</th> <th>delta h mm</th> <th>dh / H0 %</th> <th>e</th> </tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.824</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.000</td><td>0.00</td><td>0.824</td></tr> <tr><td>12</td><td>0.039</td><td>0.16</td><td>0.821</td></tr> <tr><td>24</td><td>0.165</td><td>0.68</td><td>0.811</td></tr> <tr><td>49</td><td>0.361</td><td>1.48</td><td>0.797</td></tr> <tr><td>98</td><td>0.603</td><td>2.47</td><td>0.779</td></tr> <tr><td>49</td><td>0.538</td><td>2.20</td><td>0.783</td></tr> <tr><td>24</td><td>0.453</td><td>1.85</td><td>0.790</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.251</td><td>1.03</td><td>0.805</td></tr> <tr><td>12</td><td>0.278</td><td>1.14</td><td>0.803</td></tr> <tr><td>24</td><td>0.368</td><td>1.51</td><td>0.796</td></tr> <tr><td>49</td><td>0.471</td><td>1.93</td><td>0.788</td></tr> <tr><td>98</td><td>0.624</td><td>2.55</td><td>0.777</td></tr> <tr><td>196</td><td>0.860</td><td>3.52</td><td>0.759</td></tr> <tr><td>392</td><td>1.220</td><td>4.99</td><td>0.733</td></tr> <tr><td>784</td><td>1.664</td><td>6.81</td><td>0.699</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.824</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.824</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.824</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.824</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.824</td></tr> </table>				σ' kPa	delta h mm	dh / H0 %	e			0.00	0.824	6	0.000	0.00	0.824	12	0.039	0.16	0.821	24	0.165	0.68	0.811	49	0.361	1.48	0.797	98	0.603	2.47	0.779	49	0.538	2.20	0.783	24	0.453	1.85	0.790	6	0.251	1.03	0.805	12	0.278	1.14	0.803	24	0.368	1.51	0.796	49	0.471	1.93	0.788	98	0.624	2.55	0.777	196	0.860	3.52	0.759	392	1.220	4.99	0.733	784	1.664	6.81	0.699			0.00	0.824			0.00	0.824			0.00	0.824			0.00	0.824			0.00	0.824	Caractéristiques de compressibilité <table border="1"> <tr> <td>e_i</td> <td>0.824</td> <td></td> </tr> <tr> <td>e₀</td> <td>0.787</td> <td></td> </tr> <tr> <td>C_c</td> <td>0.100</td> <td>indice de compression</td> </tr> <tr> <td>C_s</td> <td>0.022</td> <td>indice de recompression</td> </tr> <tr> <td>C_v (m²/s)</td> <td> 3.41E-07 12 à 24 kPa 3.16E-07 24 à 49 kPa 9.38E-07 49 à 98 kPa 1.10E-06 98 à 196 kPa 1.50E-06 196 à 392 kPa 1.68E-06 392 à 784 kPa - 784 à 1568 kPa </td> <td></td> </tr> <tr> <td>σ'v₀ (kPa)</td> <td>280</td> <td>contrainte verticale effective en place (nappe à -7 m)</td> </tr> <tr> <td>σ'p (kPa)</td> <td>90</td> <td>contrainte verticale effective de préconsolidation</td> </tr> </table>				e _i	0.824		e ₀	0.787		C _c	0.100	indice de compression	C _s	0.022	indice de recompression	C _v (m ² /s)	3.41E-07 12 à 24 kPa 3.16E-07 24 à 49 kPa 9.38E-07 49 à 98 kPa 1.10E-06 98 à 196 kPa 1.50E-06 196 à 392 kPa 1.68E-06 392 à 784 kPa - 784 à 1568 kPa		σ'v ₀ (kPa)	280	contrainte verticale effective en place (nappe à -7 m)	σ'p (kPa)	90	contrainte verticale effective de préconsolidation
σ' kPa	delta h mm	dh / H0 %	e																																																																																																																	
		0.00	0.824																																																																																																																	
6	0.000	0.00	0.824																																																																																																																	
12	0.039	0.16	0.821																																																																																																																	
24	0.165	0.68	0.811																																																																																																																	
49	0.361	1.48	0.797																																																																																																																	
98	0.603	2.47	0.779																																																																																																																	
49	0.538	2.20	0.783																																																																																																																	
24	0.453	1.85	0.790																																																																																																																	
6	0.251	1.03	0.805																																																																																																																	
12	0.278	1.14	0.803																																																																																																																	
24	0.368	1.51	0.796																																																																																																																	
49	0.471	1.93	0.788																																																																																																																	
98	0.624	2.55	0.777																																																																																																																	
196	0.860	3.52	0.759																																																																																																																	
392	1.220	4.99	0.733																																																																																																																	
784	1.664	6.81	0.699																																																																																																																	
		0.00	0.824																																																																																																																	
		0.00	0.824																																																																																																																	
		0.00	0.824																																																																																																																	
		0.00	0.824																																																																																																																	
		0.00	0.824																																																																																																																	
e _i	0.824																																																																																																																			
e ₀	0.787																																																																																																																			
C _c	0.100	indice de compression																																																																																																																		
C _s	0.022	indice de recompression																																																																																																																		
C _v (m ² /s)	3.41E-07 12 à 24 kPa 3.16E-07 24 à 49 kPa 9.38E-07 49 à 98 kPa 1.10E-06 98 à 196 kPa 1.50E-06 196 à 392 kPa 1.68E-06 392 à 784 kPa - 784 à 1568 kPa																																																																																																																			
σ'v ₀ (kPa)	280	contrainte verticale effective en place (nappe à -7 m)																																																																																																																		
σ'p (kPa)	90	contrainte verticale effective de préconsolidation																																																																																																																		
Cu mesuré au pénétromètre de poche kPa				Coefficient de fluage Cα à σ'v0 = 280 kPa : Cα 1.31E-03 k (m/s) estimé / mesuré																																																																																																																
Mesure de la perméabilité à charge variable						s= 0.00169																																																																																																														
σ kPa	Δh mm	h0 mm	h1 mm	urée d'écoulement seconde	perméabilité k (m/s)	observations																																																																																																														
						σ'p << σ'v0 L'échantillon présente un comportement "remanié" correspondant vraisemblablement à la décompression des varves par le prélèvement et le stockage.																																																																																																														
P.V. n° 13-157 annexe 6 du 31/01/14		Le chargé d'essais L.Chagot le : 31/01/14 signature - Essai réinterprété pour le projet MLA3			Vérifié par le RE F.Rojat le : 31/01/14 signature - Essai réinterprété pour le projet MLA3																																																																																																															

dossier: 42311
 provenance: Charlaix (38)
 Sondage SC 1
 Echantillon n° 1 - de 20,40 à 21,12 m
 partie :
 position : 21 m





charlaix

Sondage No tp2

Echantillon No 3

Profondeur: 3.00 5.00 m

ESSAI TRIAXIAL CONSOLIDE NON DRAINE
AVEC MESURES DES P.I.

Vitesse d'écrasement = 30 microns/min.

WL = 26.40% IP = 11.20%

G = 2.75 T/m³ γ_{sat}

SAGE

FIG.

N° dossier: 39317-1
Provenance: RN85 - CHARLAIX
Sondage: SC2
Echantillon: 1
Cotes: 5.30 à 6.30 m
Nature: argile grise avec des veines vertes, moyennement compacte, finement sableuse, des éléments jusqu'à 5 mm.

Caractéristiques des éprouvettes

boites rondes

Hauteur: 2.50 cm

φ 6.00 cm

vitesse de cisaillement : première alternance 0.5 μm/mn
suivantes 4.0 μm/mn
du 17/10 au 17/12 2007

Identification des éprouvettes de sol

éprouvettes : intactes recompressées

masse volumique des particules solides

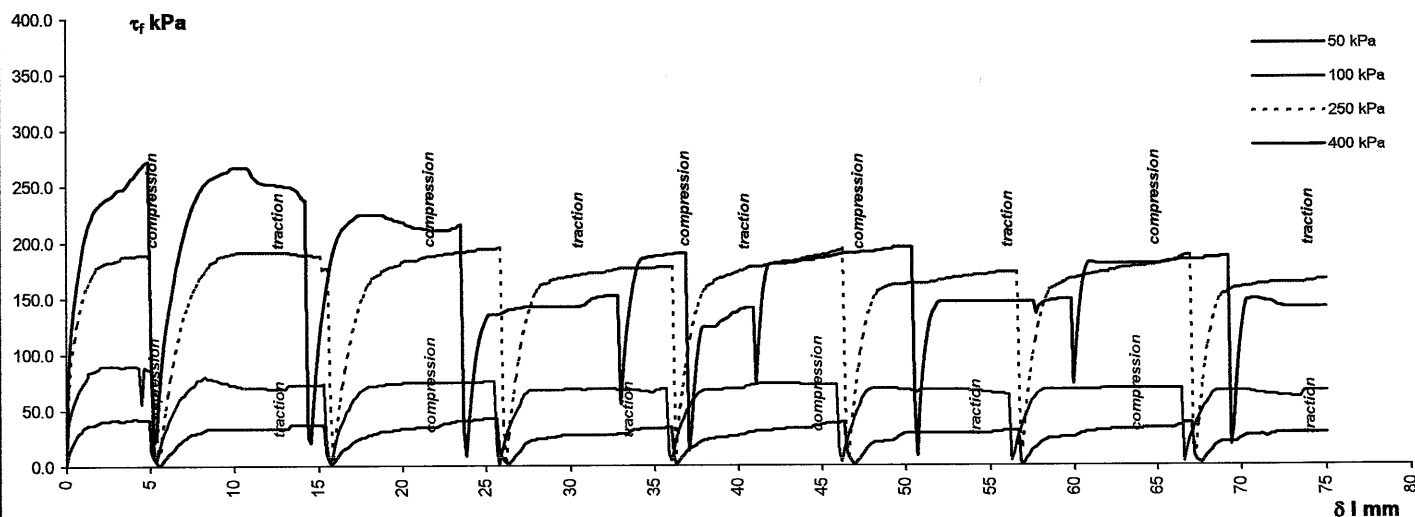
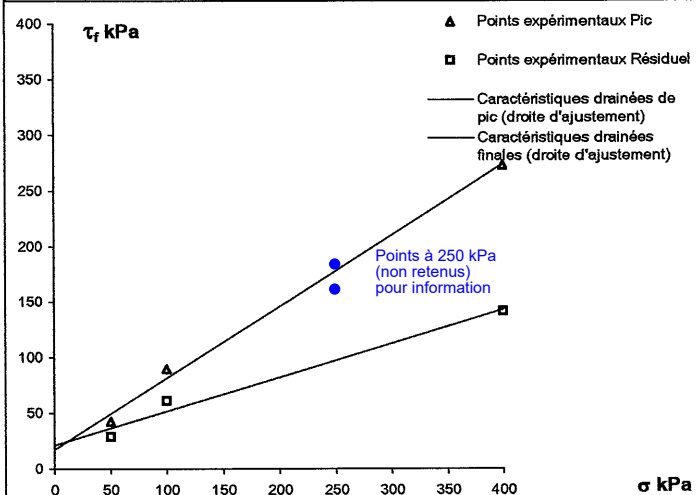
mesurée
estimée

ρ_s

2.7 g/cm³

N°	CARACTERISTIQUES INITIALES DES EPROUVETTES						Après cisaillement		Paramètres de résistance au cisaillement			
	ρ g/cm ³	ρ _d g/cm ³	w %	e	SR %	t ₁₀₀ mn	w %	σ' kPa	τ _{f,p} kPa	δl _{f,p} mm	τ _{f,r} kPa	δl _{f,r} mm
1	2.02	1.64	23.05	0.65	96.360		19.85	50	42	4.19	29	75.00
2	2.14	1.78	20.18	0.52	104.972		19.48	100	90	2.11	61	75.00
3	2.10	1.75	20.22	0.55	99.943		19.06	250				
4	2.08	1.66	25.62	0.63	109.820		19.79	400	273	4.95	141	75.00

RESULTATS			
Pic		Résiduel	
c' _p kPa	φ' _p degré	c' _r kPa	φ' _r degré
17.3	32.7	21.4	16.9



Observations

Les résultats de l'essai sur l'éprouvette cisailée sous 250 kPa n'ont pas été pris en compte. Du fait d'une certaine hétérogénéité du matériau, nous retiendrons c'_r = 2 kPa et φ'_r = 19°

P.V. n° 01//2008

Le chargé d'essais

M.LAGRANGE

Vérifié par :

Gilles BERTAINA

Chef du Groupe Géotechnique

du 12/02/2008

le : 31/01/2008

signature

le : 12/02/2008

signature

Dossier : 39317-1

Provenance : RN85 - CHARLAIX

Sondage : **SC2**

Echantillon : **1**

Profondeur : **5.30** à **6.30**

Nature : argile grise avec des veines vertes, moyennement compacte, finement sableuse, des éléments jusqu'à 5 mm.

Boîtes rondes (e = 2.5 cm) ϕ = 6 cm		Volume = 70.69 cm ³			
		Section 28.27 cm ²			
Eprouvettes : intactes ~~recompactées~~		saturation (h) 24 à 48 durée : et			
Anneau de traction : 1.35 kN		consolidation (h) 24 à 48			
		Vitesse : 0.5 puis 4 μ m/mn			
Contraintes de consolidation en kPa	50	100	250	400	
Tassement (mm) en fin de consolidation	0.782	0.568	1.238	1.746	
CARACTERISTIQUES INITIALES DES EPROUVETTES					
N° boîte	3A	3A	4A	4A	
Masse totale humide en g	1638.1	1646.4	1640.8	1639.5	
Masse de la boîte en g	1495.4	1495.4	1492.4	1492.4	
Masse humide de l'éprouvette en g	142.7	151.0	148.4	147.1	MOYENNE
Masse volumique humide ρ en g/cm ³	2.02	2.14	2.10	2.08	2.08
Masse volumique sèche ρ_d en g/cm ³	1.64	1.78	1.75	1.66	1.71
Indice des vides initial e	0.65	0.52	0.55	0.63	0.59
Degré de saturation initial S_r en %	96.36	104.97	99.94	109.82	102.77

TENEURS EN EAU INITIALES

N° tare	V4	V6	V4	V1	
Masse total humide en g	277.7	381.3	292.5	294.8	
Masse totale sèche en g	236.7	325.6	253.2	246.5	
Masse de la tare en g	58.8	49.6	58.8	58.0	
Masse d'eau en g	41.0	55.7	39.3	48.3	
Masse de sol sec en g	177.9	276.0	194.4	188.5	MOYENNE
4 Teneur en eau initiale (%)	23.05	20.18	20.22	25.62	22.27

CARACTERISTIQUES DES EPROUVETTES APRES CONSOLIDATION

N° boîte	3A	3A	4A	4A	MOYENNE
4 Masse volumique humide ρ en g/cm ³	2.08	2.19	2.21	2.24	2.18

TENEURS EN EAU FINALES

N° tare	V2	V3	V4	V1	
Masse total humide en g	185.1	182.0	198.7	162.1	
Masse totale sèche en g	163.9	158.8	176.3	144.9	
Masse de la tare en g	57.1	39.7	58.8	58.0	
Masse d'eau en g	21.2	23.2	22.4	17.2	
Masse de sol sec en g	106.8	119.1	117.5	86.9	MOYENNE
4 Teneur en eau finale (%)	19.85	19.48	19.06	19.79	19.55

N° dossier: **42311**
Provenance : **Charlaix (38)**
Sondage: **SC1**
Echantillon: **0**
cotes: **13.00** à **13.45 m**
Nature: **Argiles**

Caractéristiques géométriques des éprouvettes

Hauteur : **4.00** cm ϕ **6.00** cm
Vitesse de cisaillement: **20** $\mu\text{m} / \text{mn}$

date de l'essai : du **19-nov** au **26-nov**

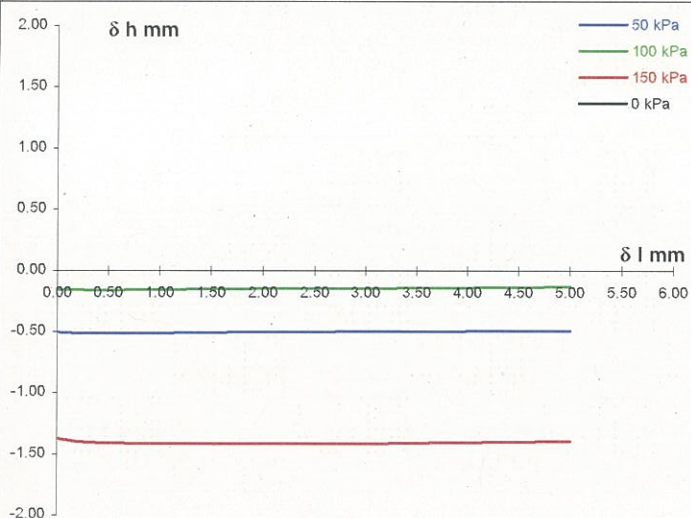
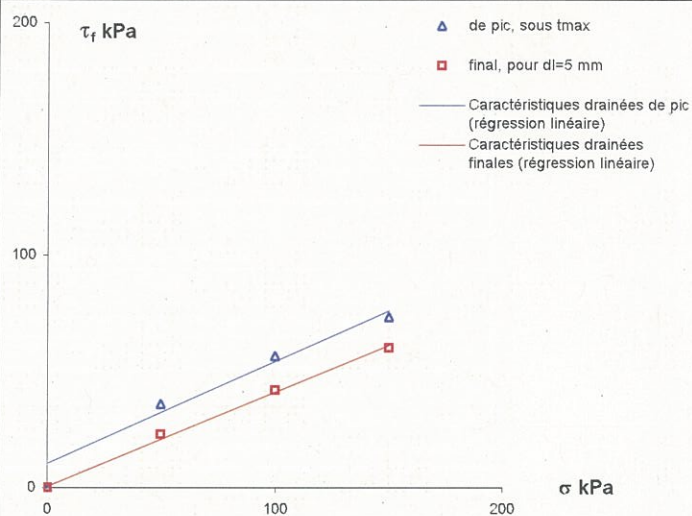
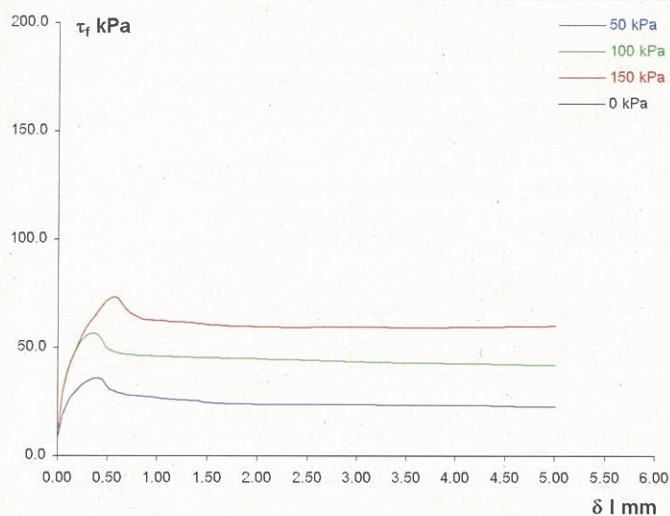
Identification des éprouvettes de sol

Eprouvettes : **intactes** **recompactées**

masse volumique des particules solides

mesurée ρ_s **g/cm³**
estimée ρ_s **2.7 g/cm³**

N°	Avant essai					Après consolidation		Après cisaillement Paramètres de résistance au cisaillement					
	ρ g/cm ³	ρ_d g/cm ³	w w %	e	SR %	ρ_d g/cm ³	t100 mn	w %	σ' kPa	$\tau_{f,p}$ kPa	$\delta l_{f,p}$ mm	$\tau_{f,f}$ kPa	$\delta l_{f,f}$ mm
1	1.97	1.54	27.77	0.75	100	1.56	5	30.56	50	36	0.405	23	5.005
2	1.99	1.60	24.33	0.69	95	1.60	1	28.48	100	56	0.365	42	5.005
3	2.00	1.58	26.77	0.71	102	1.64	5	28.85	150	73	0.565	60	5.005
4													



RESULTATS caractéristiques			
de pic, sous τ_{max}		final, pour $\delta l=5 \text{ mm}$	
c'_p kPa	ϕ'_p degré	c'_f kPa	ϕ'_f degré
18	20	4	20

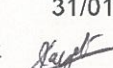
Observations

P.V. n° 13-157 annexe 5

du 31/01/14

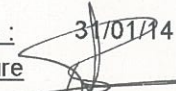
Le chargé d'essais

L.Chagot

le : 31/01/14
signature 

Vérifié par le RE

F.Rojat

le : 31/01/14
signature 

Cerema Département Laboratoire de Lyon Groupe RRMS	Essai de cisaillement rectiligne à la boîte Cisaillement direct Conforme à la Norme NF P 94-071-1
Dossier : 42311 Provenance : Charlaix (38)	Sondage : SC1 Echantillon : Profondeur : 13.00 à 13.45 Nature : Argiles

Boîtes rondes ($\phi = 6 \text{ cm}$)	Volume = 113.1 cm³
---	--------------------------------------

Eprouvettes : intactes recompressées	saturation (h) 1h durée :
Anneau de traction : 1 kN	consolidation (h) 18h Vitesse : 20 $\mu\text{m/mn}$

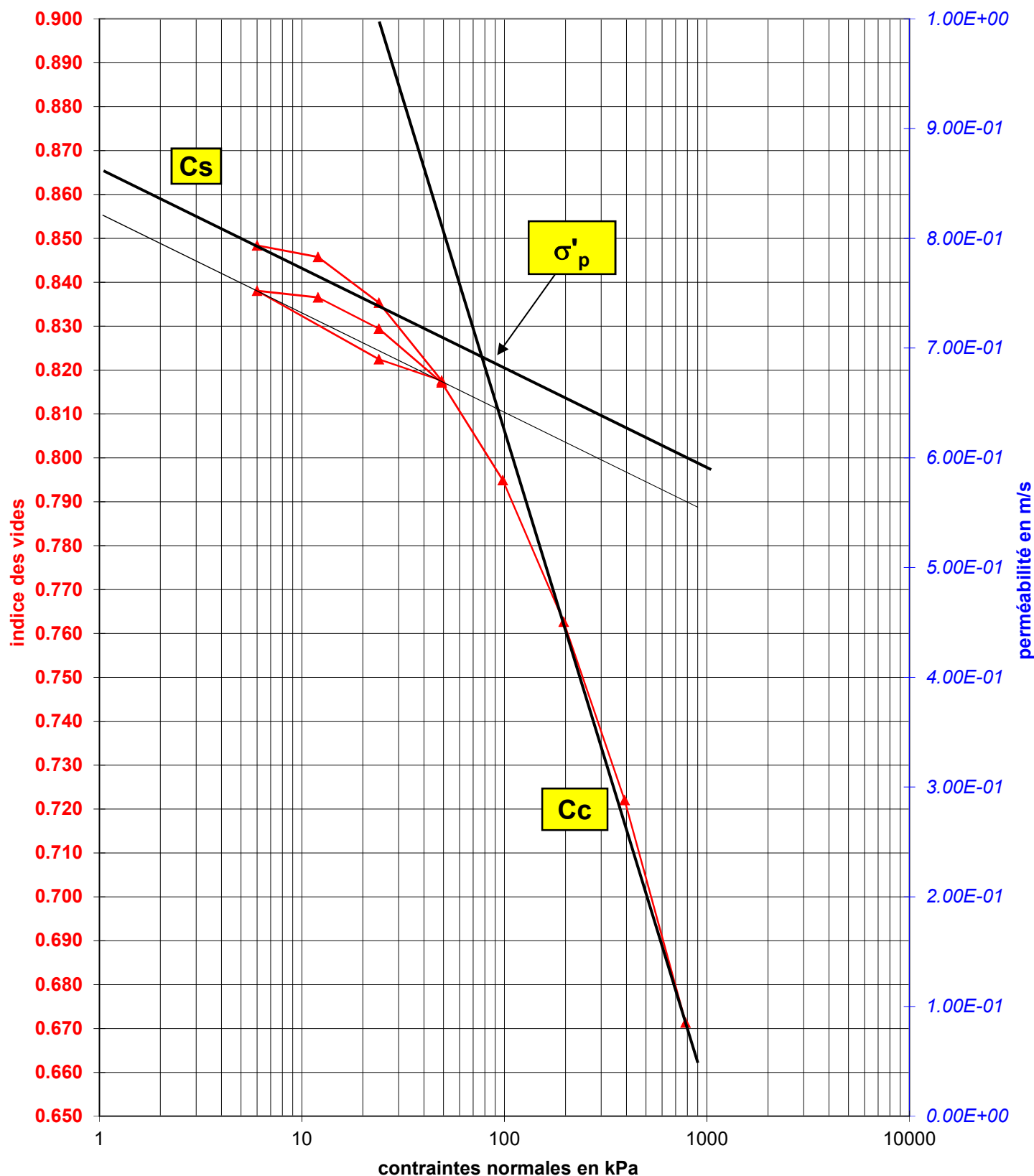
Contraintes de consolidation en kPa	50	100	150	
Tassement en mm	-0.507	-0.159	-1.375	0.000

CARACTERISTIQUES INITIALES DES EPROUVETTES					
N° boîte	298	301	311		
Masse totale humide en g	1885.80	1909.50	1905.50		
Masse de la boîte en g	1662.70	1684.80	1679.20		
Masse humide de l'éprouvette en g	223.10	224.70	226.30	0.00	
Masse sèche de l'éprouvette en g	174.61	180.73	178.51	0.00	
Masse d'eau en g	48.49	43.97	47.79	0.00	
3 Teneur en eau initiale : w en %	27.77	24.33	26.77		26.29
3 Masse volumique humide ρ en g/cm ³	1.97	1.99	2.00	0.00	1.99
3 Masse volumique sèche ρ_d en g/cm ³	1.54	1.60	1.58	0.00	1.57
3 Indice des vides initial e	0.75	0.69	0.71		0.72
3 Degré de saturation initial S_r en %	100.13	95.25	101.71		99.03

CARACTERISTIQUES FINALES					
	N° tare	R8			
Masse total humide	en g	284.00	275.60	275.90	
Masse totale sèche	en g	231.10	225.50	225.00	
Masse de la tare	en g	58.00	49.60	48.60	
Masse d'eau	en g	52.90	50.10	50.90	0.00
Masse de sol sec	en g	173.10	175.90	176.40	0.00
3 Teneur en eau finale (%)		30.56	28.48	28.85	29.30
3 Masse volumique humide ρ en g/cm ³		2.04	2.06	2.11	2.07
3 Masse volumique sèche ρ_d en g/cm ³		1.56	1.60	1.64	1.60
3 Indice des vides final e		0.73	0.68	0.65	0.69
3 Degré de saturation final S_r en %		113.46	112.45	119.69	115.20

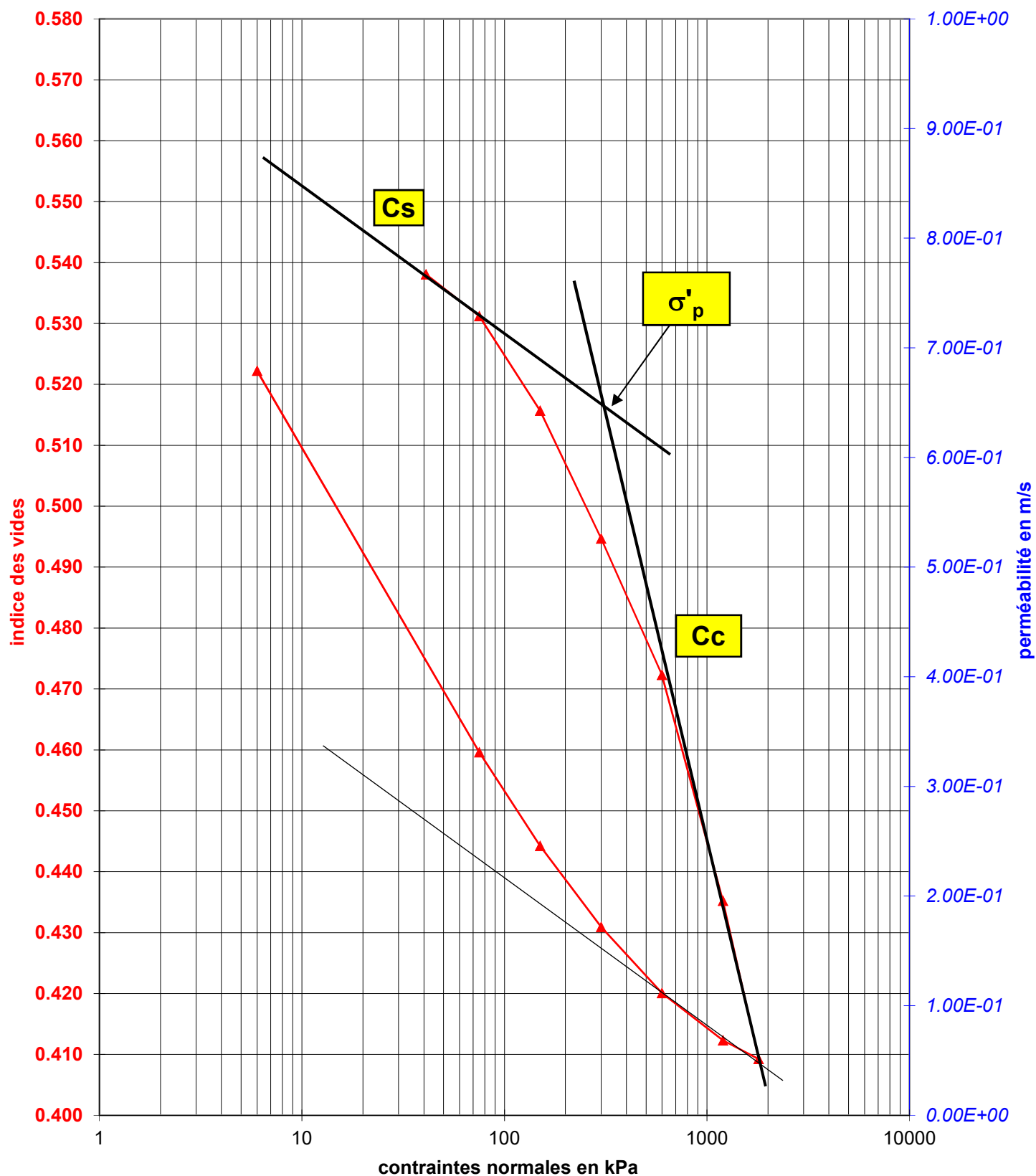
Observations	P.V. n° 13-157 annexe 5 du 31/01/14	Vérifié par le RE F.Rojat le : 31/01/14 signature
---------------------	---	---

dossier: C18LC0000
provenance: Leuge
Sondage SC 1
Echantillon n° 1 - de 1,00 à 1,50 m
position : 1,20 m



 Département Risques, Infrastructures et Matériaux		ESSAI DE COMPRESSIBILITE à L'OEDOMETRE suivant norme NF EN ISO 17892-5																																																																																									
Appareil Sols Mesures n°: SA		Moule n°: SA																																																																																									
dossier : 20-CE-0173 Provenance : RN85 Site de Charlaix (S6) Sondage S6-SC1 Par : Géotec Echantillon E1 carottier : poinçonneur Cotes 15 à 16.3 Nature Argile grise litée, nappe à 19 m		Teneurs en eau <table border="1"> <thead> <tr> <th>Pesage</th> <th colspan="2">initiale</th> <th>finale</th> </tr> <tr> <th>N° tare</th> <th>SA</th> <th>T6</th> <th>SA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>PTH g</td> <td>282.70</td> <td>176.20</td> <td>204.10</td> </tr> <tr> <td>PTS g</td> <td>255.00</td> <td>156.20</td> <td>177.30</td> </tr> <tr> <td>P tare g</td> <td>119.90</td> <td>58.00</td> <td>39.70</td> </tr> <tr> <td>P eau g</td> <td>27.70</td> <td>20.00</td> <td>26.80</td> </tr> <tr> <td>P sol sec g</td> <td>135.10</td> <td>98.20</td> <td>135.10</td> </tr> <tr> <td>W %</td> <td>20.50</td> <td>20.37</td> <td>19.84</td> </tr> </tbody> </table>		Pesage	initiale		finale	N° tare	SA	T6	SA	PTH g	282.70	176.20	204.10	PTS g	255.00	156.20	177.30	P tare g	119.90	58.00	39.70	P eau g	27.70	20.00	26.80	P sol sec g	135.10	98.20	135.10	W %	20.50	20.37	19.84																																																								
Pesage	initiale		finale																																																																																								
N° tare	SA	T6	SA																																																																																								
PTH g	282.70	176.20	204.10																																																																																								
PTS g	255.00	156.20	177.30																																																																																								
P tare g	119.90	58.00	39.70																																																																																								
P eau g	27.70	20.00	26.80																																																																																								
P sol sec g	135.10	98.20	135.10																																																																																								
W %	20.50	20.37	19.84																																																																																								
Caractéristiques de l'éprouvette Position 15.50 m Section A 38.480 cm ² Hauteur initiale H₀ 2.000 cm Volume initial V₀ 77.000 cm ³ σ'_{v0} 310 kPa ρ_s mesuré 2.7 g/cm ³ ρ_s estimé		Degré de saturation (Sr) % 102.39 102.56 Hauteur des pleins (cm) hp = 1.30 Masses volumiques apparentes <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>initiale</th> <th>finale</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ρ</td> <td>2.11</td> <td>2.16</td> <td>g/cm³</td> </tr> <tr> <td>ρ_d</td> <td>1.75</td> <td>1.77</td> <td>g/cm³</td> </tr> </tbody> </table>			initiale	finale		ρ	2.11	2.16	g/cm ³	ρ_d	1.75	1.77	g/cm ³																																																																												
	initiale	finale																																																																																									
ρ	2.11	2.16	g/cm ³																																																																																								
ρ_d	1.75	1.77	g/cm ³																																																																																								
Détermination de l'indice des vides "e" <table border="1"> <thead> <tr> <th>σ' kPa</th> <th>delta h mm</th> <th>dh / H0 %</th> <th>e</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="4">Compensation du gonflement jusqu'à 41 kPa</td> </tr> <tr><td>41</td><td>0.000</td><td>0.00</td><td>0.538</td></tr> <tr><td>75</td><td>0.089</td><td>0.45</td><td>0.531</td></tr> <tr><td>150</td><td>0.291</td><td>1.46</td><td>0.516</td></tr> <tr><td>300</td><td>0.564</td><td>2.82</td><td>0.495</td></tr> <tr><td>600</td><td>0.855</td><td>4.28</td><td>0.472</td></tr> <tr><td>1200</td><td>1.337</td><td>6.69</td><td>0.435</td></tr> <tr><td>1800</td><td>1.675</td><td>8.38</td><td>0.409</td></tr> <tr><td>1200</td><td>1.635</td><td>8.18</td><td>0.412</td></tr> <tr><td>600</td><td>1.534</td><td>7.67</td><td>0.420</td></tr> <tr><td>300</td><td>1.393</td><td>6.97</td><td>0.431</td></tr> <tr><td>150</td><td>1.220</td><td>6.10</td><td>0.444</td></tr> <tr><td>75</td><td>1.020</td><td>5.10</td><td>0.460</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.206</td><td>1.03</td><td>0.522</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.538</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.538</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.538</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.538</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.538</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.538</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.538</td></tr> </tbody> </table>		σ' kPa	delta h mm	dh / H0 %	e	Compensation du gonflement jusqu'à 41 kPa				41	0.000	0.00	0.538	75	0.089	0.45	0.531	150	0.291	1.46	0.516	300	0.564	2.82	0.495	600	0.855	4.28	0.472	1200	1.337	6.69	0.435	1800	1.675	8.38	0.409	1200	1.635	8.18	0.412	600	1.534	7.67	0.420	300	1.393	6.97	0.431	150	1.220	6.10	0.444	75	1.020	5.10	0.460	6	0.206	1.03	0.522			0.00	0.538			0.00	0.538			0.00	0.538			0.00	0.538			0.00	0.538			0.00	0.538			0.00	0.538	Caractéristiques de compressibilité e_i 0.538 e_0 0.494 C_c 0.132 indice de compression C_s 0.023 indice de recompression C_v (m ² /s) 2.335E-07 41 à 75 kPa 1.895E-07 75 à 150 kPa 2.625E-07 150 à 300 kPa 2.916E-07 300 à 600 kPa 3.224E-07 600 à 1200 kPa 3.625E-07 1200 à 1800 kPa σ'_{v0} (kPa) 310 contrainte verticale effective en place σ'_p (kPa) 310 contrainte verticale effective de préconsolidation	
σ' kPa	delta h mm	dh / H0 %	e																																																																																								
Compensation du gonflement jusqu'à 41 kPa																																																																																											
41	0.000	0.00	0.538																																																																																								
75	0.089	0.45	0.531																																																																																								
150	0.291	1.46	0.516																																																																																								
300	0.564	2.82	0.495																																																																																								
600	0.855	4.28	0.472																																																																																								
1200	1.337	6.69	0.435																																																																																								
1800	1.675	8.38	0.409																																																																																								
1200	1.635	8.18	0.412																																																																																								
600	1.534	7.67	0.420																																																																																								
300	1.393	6.97	0.431																																																																																								
150	1.220	6.10	0.444																																																																																								
75	1.020	5.10	0.460																																																																																								
6	0.206	1.03	0.522																																																																																								
		0.00	0.538																																																																																								
		0.00	0.538																																																																																								
		0.00	0.538																																																																																								
		0.00	0.538																																																																																								
		0.00	0.538																																																																																								
		0.00	0.538																																																																																								
		0.00	0.538																																																																																								
		Cu mesuré au pénétromètre de poche - kPa Coefficient de fluage C_α à 300 kPa : C_α 1.12E-03 k (m/s) estimé / mesuré																																																																																									
Mesure de la perméabilité à charge variable		s= 0.00169																																																																																									
σ kPa	Δh mm	h0 mm	h1 mm																																																																																								
			durée d'écoulement seconde																																																																																								
			perméabilité k (m/s)																																																																																								
			#DIV/0!																																																																																								
			#DIV/0!																																																																																								
			#DIV/0!																																																																																								
			#DIV/0!																																																																																								
P.V. n° OE-22-001 du 12/12/22		Le chargé d'essais L.Chagot le : 12/12/22 signature																																																																																									
		Vérifié par le RE F.Rojat le : 12/12/22 signature																																																																																									

Dossier: 20-CE-0173
Provenance : RN85 - Charlaix
Sondage S6-SC1
Echantillon n° 1 - de 15.00 à 16.30 m
position : 15.50 m



 		DRIM Groupe ECM		ESSAI DE PERMEABILITE à L'OEDOMETRE																																																																																																																																		
Appareil SOILTEST n°: S2				Moule n°: S2																																																																																																																																		
dossier : MLA3 Provenance : Charlaix (38) Sondage S6-SC1+PZ1 Par : Géotec Echantillon - carottier : - Cotes 15 à 16.3 Nature Argile grise litée, nappe à 19 m				Teneurs en eau <table border="1"> <tr> <th>Pesage</th> <th colspan="2">initiale</th> <th>finale</th> </tr> <tr> <td>N° tare</td> <td>S2</td> <td>R8</td> <td>R8</td> </tr> <tr> <td>PTH g</td> <td>689.6</td> <td>192.8</td> <td>213.8</td> </tr> <tr> <td>PTS g</td> <td>660.5</td> <td>167.2</td> <td>180.1</td> </tr> <tr> <td>P tare g</td> <td>535.9</td> <td>57.1</td> <td>57.1</td> </tr> <tr> <td>P eau g</td> <td>29.1</td> <td>25.6</td> <td>33.7</td> </tr> <tr> <td>P sol sec g</td> <td>124.6</td> <td>110.1</td> <td>123.0</td> </tr> <tr> <td>W %</td> <td>23.35</td> <td>23.25</td> <td>27.40</td> </tr> <tr> <td>Degré de saturation (Sr) %</td> <td colspan="2">93.42</td> <td>117.46</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Hauteur des pleins (cm)</td> <td colspan="2">hp = 1.463</td> </tr> </table>				Pesage	initiale		finale	N° tare	S2	R8	R8	PTH g	689.6	192.8	213.8	PTS g	660.5	167.2	180.1	P tare g	535.9	57.1	57.1	P eau g	29.1	25.6	33.7	P sol sec g	124.6	110.1	123.0	W %	23.35	23.25	27.40	Degré de saturation (Sr) %	93.42		117.46	Hauteur des pleins (cm)		hp = 1.463																																																																																								
Pesage	initiale		finale																																																																																																																																			
N° tare	S2	R8	R8																																																																																																																																			
PTH g	689.6	192.8	213.8																																																																																																																																			
PTS g	660.5	167.2	180.1																																																																																																																																			
P tare g	535.9	57.1	57.1																																																																																																																																			
P eau g	29.1	25.6	33.7																																																																																																																																			
P sol sec g	124.6	110.1	123.0																																																																																																																																			
W %	23.35	23.25	27.40																																																																																																																																			
Degré de saturation (Sr) %	93.42		117.46																																																																																																																																			
Hauteur des pleins (cm)		hp = 1.463																																																																																																																																				
Caractéristiques de l'éprouvette <table border="1"> <tr> <td>Position</td> <td>15.70</td> <td>m</td> </tr> <tr> <td>Section A</td> <td>31.669</td> <td>cm²</td> </tr> <tr> <td>Hauteur initiale H₀</td> <td>2.444</td> <td>cm</td> </tr> <tr> <td>Volume initial V₀</td> <td>77.399</td> <td>cm³</td> </tr> <tr> <td>σ'v0</td> <td>310</td> <td>kPa</td> </tr> <tr> <td>ρs estimé</td> <td>2.69</td> <td>g/cm³</td> </tr> <tr> <td>ρs mesuré</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>				Position	15.70	m	Section A	31.669	cm ²	Hauteur initiale H ₀	2.444	cm	Volume initial V ₀	77.399	cm ³	σ'v0	310	kPa	ρs estimé	2.69	g/cm ³	ρs mesuré			Masses volumiques apparentes <table border="1"> <tr> <th></th> <th>initiale</th> <th>finale</th> <th></th> </tr> <tr> <td>ρ</td> <td>1.99</td> <td>2.11</td> <td>g/cm³</td> </tr> <tr> <td>ρd</td> <td>1.61</td> <td>1.65</td> <td>g/cm³</td> </tr> </table>					initiale	finale		ρ	1.99	2.11	g/cm ³	ρd	1.61	1.65	g/cm ³																																																																																														
Position	15.70	m																																																																																																																																				
Section A	31.669	cm ²																																																																																																																																				
Hauteur initiale H ₀	2.444	cm																																																																																																																																				
Volume initial V ₀	77.399	cm ³																																																																																																																																				
σ'v0	310	kPa																																																																																																																																				
ρs estimé	2.69	g/cm ³																																																																																																																																				
ρs mesuré																																																																																																																																						
	initiale	finale																																																																																																																																				
ρ	1.99	2.11	g/cm ³																																																																																																																																			
ρd	1.61	1.65	g/cm ³																																																																																																																																			
Détermination de l'indice des vides "e" <table border="1"> <tr> <th>σ' kPa</th> <th>delta h mm</th> <th>dh / H0 %</th> <th>e</th> </tr> <tr><td>6</td><td>0.000</td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td>196</td><td>-0.552</td><td>-2.26</td><td>0.633</td></tr> <tr><td>392</td><td>-0.942</td><td>-3.85</td><td>0.607</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.671</td></tr> </table>				σ' kPa	delta h mm	dh / H0 %	e	6	0.000	0.00	0.671	196	-0.552	-2.26	0.633	392	-0.942	-3.85	0.607			0.00	0.671			0.00	0.671			0.00	0.671			0.00	0.671			0.00	0.671			0.00	0.671			0.00	0.671			0.00	0.671			0.00	0.671			0.00	0.671			0.00	0.671			0.00	0.671			0.00	0.671			0.00	0.671			0.00	0.671			0.00	0.671			0.00	0.671			0.00	0.671	Caractéristiques de compressibilité <table border="1"> <tr> <td>e_i</td> <td>0.671</td> <td></td> </tr> <tr> <td>e₀</td> <td>0.671</td> <td></td> </tr> <tr> <td>C_c</td> <td>-</td> <td>indice de compression</td> </tr> <tr> <td>C_s</td> <td>-</td> <td>indice de recompression</td> </tr> <tr> <td>C_v (m²/s)</td> <td>-</td> <td>12 à 24 kPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>-</td> <td>24 à 49 kPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>-</td> <td>49 à 98 kPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>-</td> <td>98 à 196 kPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>-</td> <td>196 à 392 kPa</td> </tr> <tr> <td>σ'v0 (kPa)</td> <td>-</td> <td>contrainte verticale effective en place</td> </tr> <tr> <td>σ'p (kPa)</td> <td>-</td> <td>contrainte verticale effective de préconsolidation</td> </tr> <tr> <td colspan="3"> Cu mesuré au pénétromètre de poche - kPa </td> </tr> <tr> <td colspan="3"> Coefficient de fluage Cα : </td> </tr> </table>				e _i	0.671		e ₀	0.671		C _c	-	indice de compression	C _s	-	indice de recompression	C _v (m ² /s)	-	12 à 24 kPa		-	24 à 49 kPa		-	49 à 98 kPa		-	98 à 196 kPa		-	196 à 392 kPa	σ'v0 (kPa)	-	contrainte verticale effective en place	σ'p (kPa)	-	contrainte verticale effective de préconsolidation	Cu mesuré au pénétromètre de poche - kPa			Coefficient de fluage Cα :		
σ' kPa	delta h mm	dh / H0 %	e																																																																																																																																			
6	0.000	0.00	0.671																																																																																																																																			
196	-0.552	-2.26	0.633																																																																																																																																			
392	-0.942	-3.85	0.607																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
		0.00	0.671																																																																																																																																			
e _i	0.671																																																																																																																																					
e ₀	0.671																																																																																																																																					
C _c	-	indice de compression																																																																																																																																				
C _s	-	indice de recompression																																																																																																																																				
C _v (m ² /s)	-	12 à 24 kPa																																																																																																																																				
	-	24 à 49 kPa																																																																																																																																				
	-	49 à 98 kPa																																																																																																																																				
	-	98 à 196 kPa																																																																																																																																				
	-	196 à 392 kPa																																																																																																																																				
σ'v0 (kPa)	-	contrainte verticale effective en place																																																																																																																																				
σ'p (kPa)	-	contrainte verticale effective de préconsolidation																																																																																																																																				
Cu mesuré au pénétromètre de poche - kPa																																																																																																																																						
Coefficient de fluage Cα :																																																																																																																																						
Mesure de la perméabilité à charge variable						s= 0.00169																																																																																																																																
σ kPa	Δh mm	h0 mm	h1 mm	durée d'écoulement seconde	perméabilité k (m/s)	observations																																																																																																																																
196	-0.552	60	50	1385	2.31E-09																																																																																																																																	
392	-0.942	60	50	1545	2.04E-09																																																																																																																																	
P.V. n° 22Per01 du 08/12/22		Le chargé d'essais L.Chagot le : 12/12/22 signature			Vérifié par le RE F.Rojat le : 12/12/22 signature																																																																																																																																	

Essais de laboratoire Avril 2019

Essai triaxial CU+u monotone S6 SC1 – Site de Charlaix

Tableau récapitulatif des éprouvettes :

Eprouvette	Etat initial					Consolidation		
	w (%)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e ()	S _r (%)	p _c (kPa)	t ₁₀₀ (h)	ε_v ()
TOU09	25,05	20,23	16,17	0,638	106,0	100	7,3	0,0193
TOU10	25,05	20,26	16,20	0,635	106,5	300	5,3	0,0505
TOU11	22,00	20,01	16,41	0,615	96,6	500	0,8	0,0572
TOU12	21,63	20,28	16,68	0,589	99,2	700	2,1	0,0620

Avec :

- $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$
- p_c pression effective de consolidation isotrope
- t₁₀₀ durée conventionnelle de consolidation
- ε_v déformation volumique de l'éprouvette durant la consolidation

Essai triaxial CU+u. Conditions d'essai

Eprouvette	d ₀ (cm)	h ₀ (cm)	condition	p _c (kPa)	v (mm/min)	date de l'essai
TOU09	5,00	9,84	CU+u	100	0,0046	09/05/2019 – 17/05/2019
TOU10	5,00	9,84	CU+u	300	0,0046	09/05/2019 – 17/05/2019
TOU11	4,99	9,84	CU+u	500	0,0046	09/05/2019 – 17/05/2019
TOU12	4,99	9,84	CU+u	700	0,0046	09/05/2019 – 17/05/2019

d₀ h₀ diamètre et hauteur initiale des éprouvettes
 CU+u consolidé non drainé
 V vitesse de cisaillement

p_c pression effective de consolidation isotrope
 u_{cp} contre-pression 500 kPa



RN85

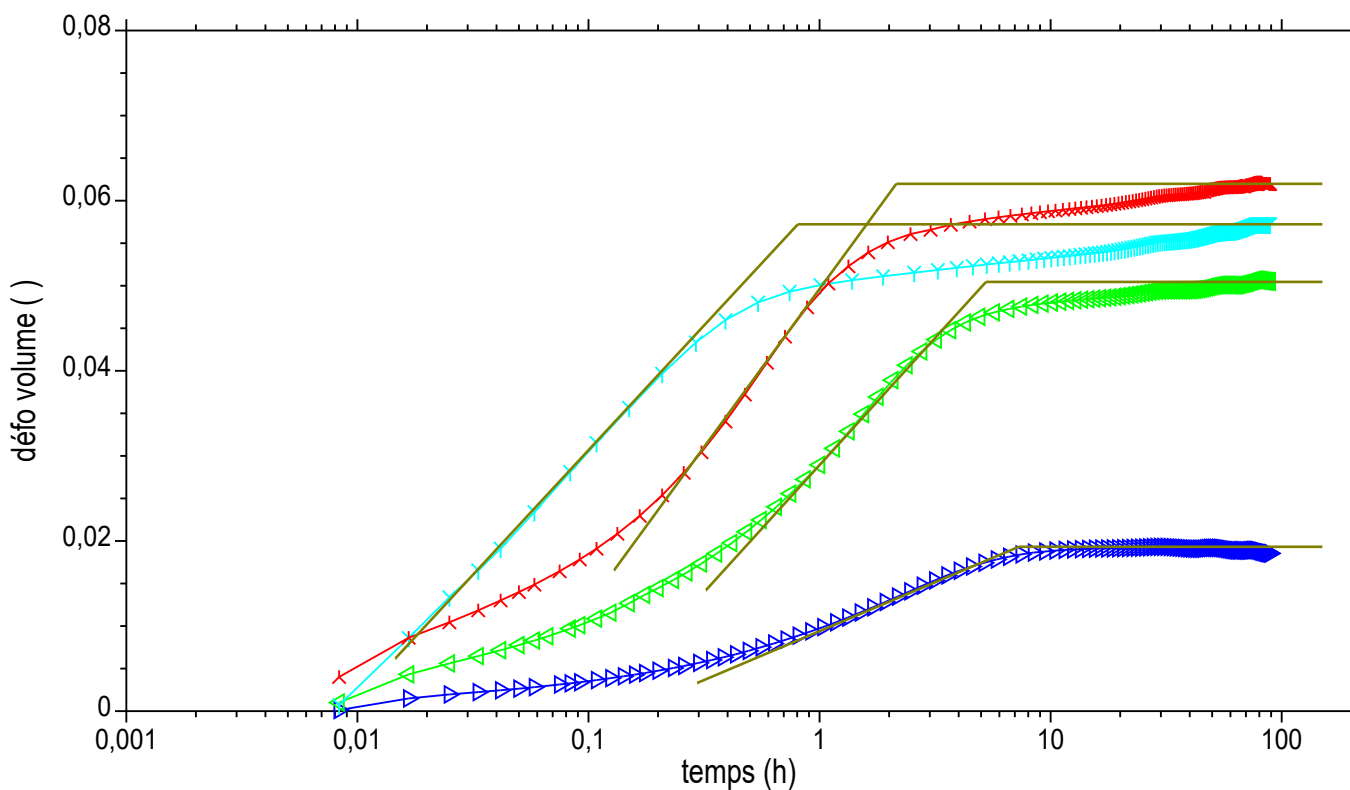
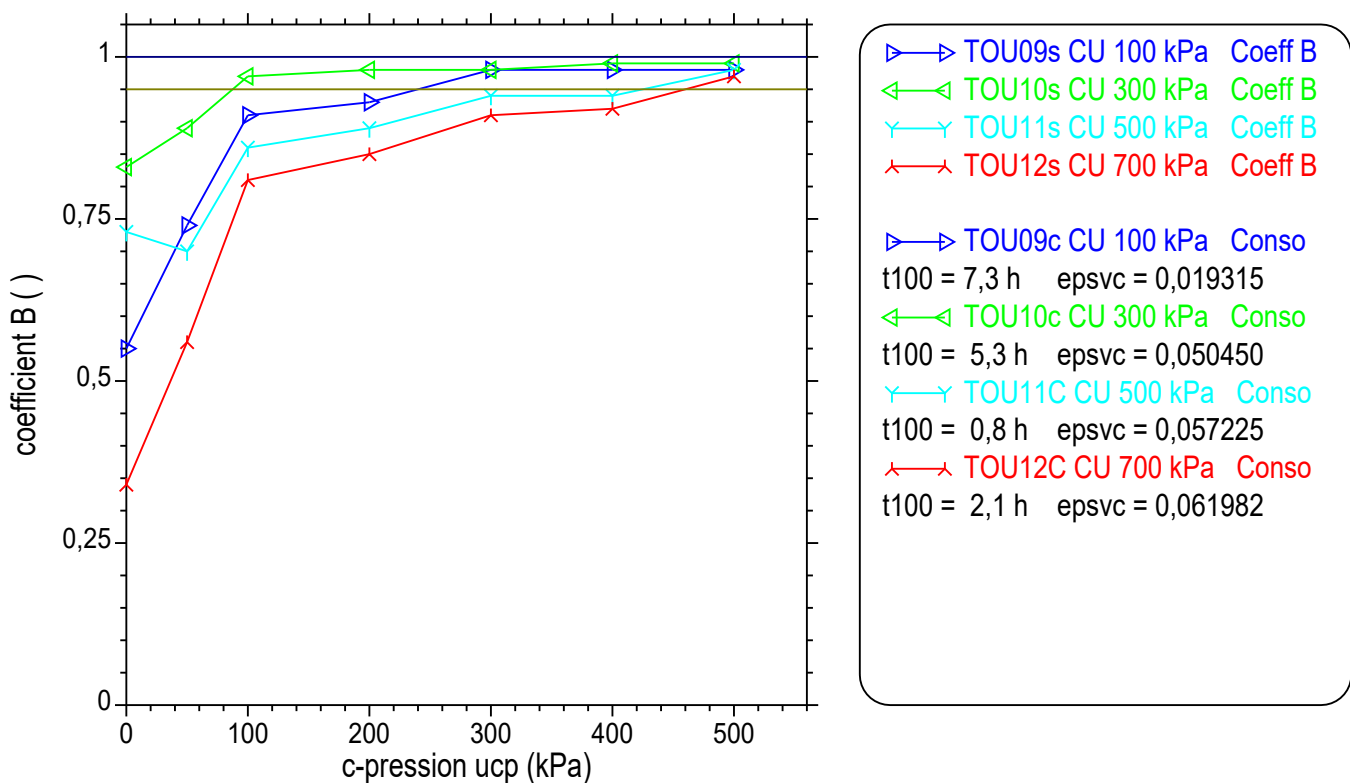
Sondage S6 SC1 – Site de Charlaix

Eprouvette TOU09, TOU10, TOU11 et TOU12 après essai

Essai triaxial CU

RN85 - Site de Charlaix
E
Argile grise

S6 SC1
10,50 - 11,80 m
TOU09s

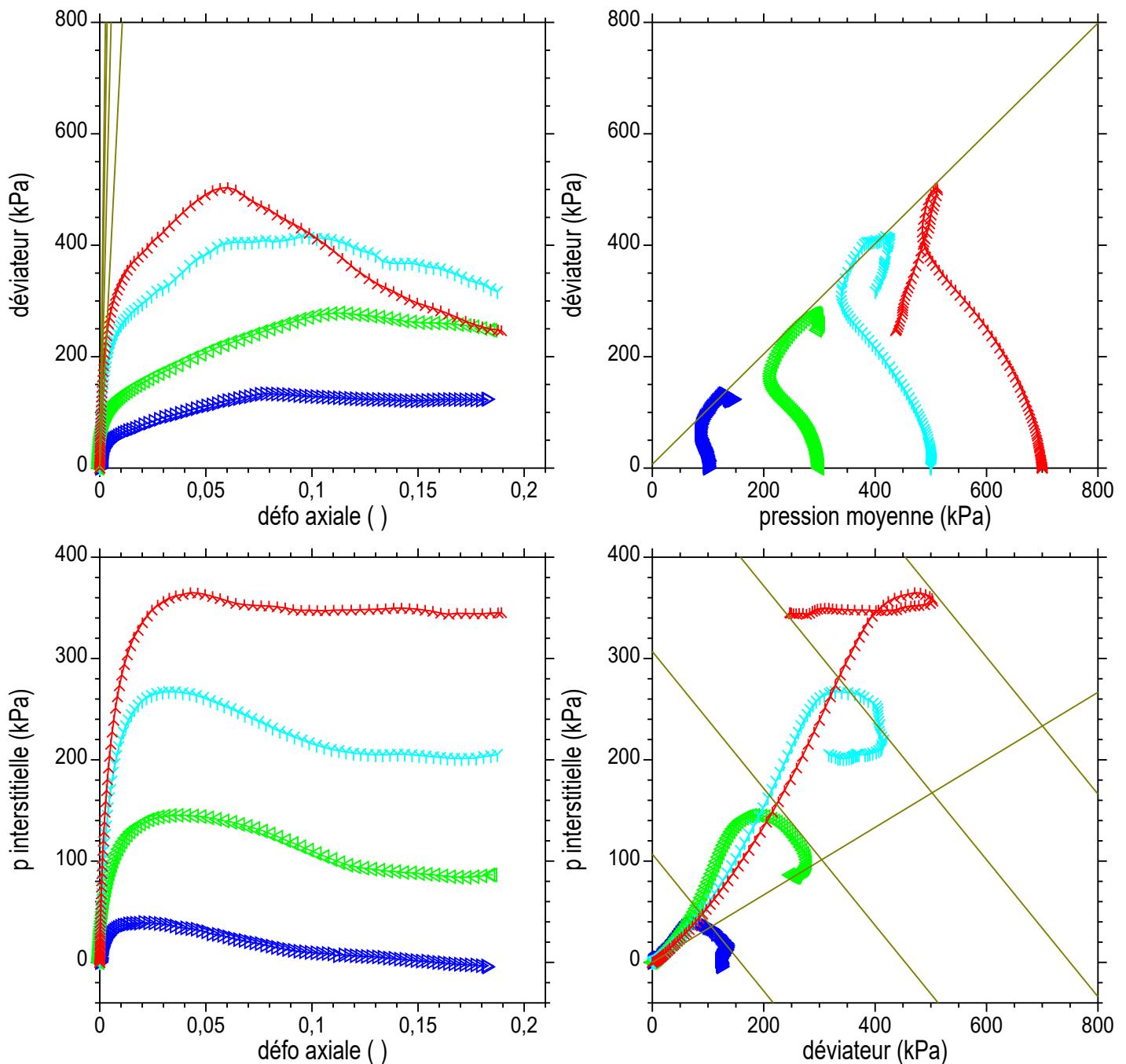


Coefficients B et courbes de consolidation isotrope.

Essai triaxial CU

RN85 - Site de Charlaix
E
Argile grise

S6 SC1
10,50 - 11,80 m
TOU09r



▷ TOU09r CU 100 kPa
 ◁ TOU10r CU 300 kPa
 Y TOU11r CU 500 kPa
 X TOU12r CU 700 kPa

$E_u = 75 \text{ MPa } 150 \text{ MPa } 233 \text{ MPa } 300 \text{ MPa}$
 $C_{qc} = 7 \text{ kPa } M_c = 0,990$
 $c' = 3 \text{ kPa } \phi' = 25,2^\circ$
 $A_c = -0,676$

Courbes contraintes déformations. Chemins des contraintes.

RN85 - Site de Charlaix

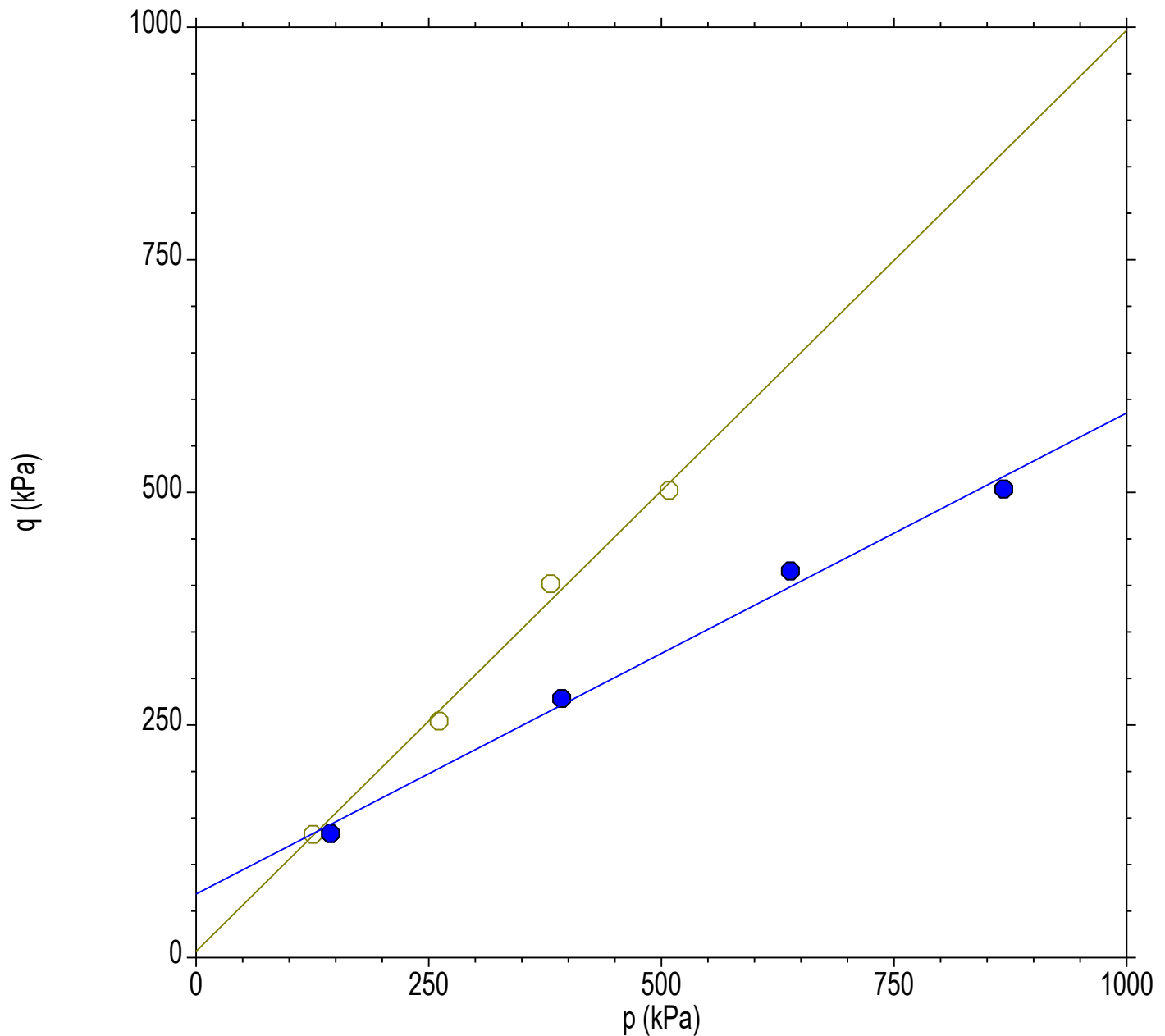
S6 SC1

E

10,50 - 11,80 m

Argile grise

TOU09-10-11-12



○ ○ TOU09-12-Rup CU En contraintes effectives (q/p)max

$M_c = +0,990$ $C_{qc} = 6,8$ kPa

$\phi_i' = 25,2^\circ$ $c' = 3,2$ kPa

● ● TOU09-12-Rup CU En contraintes totales (q)max

$M_{ccu} = +0,517$ $C_{qccu} = 68,4$ kPa

$\phi_{icu} = 13,8^\circ$ $c_{cu} = 32,4$ kPa

Département Laboratoire de Lyon Groupe RRMS Direction territoriale Centre-Est		ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE A LA BOITE CISAILLEMENT DIRECT----Conforme à la Norme NF P 94-071-1												
N° dossier: C18LL0069 Provenance : RN85 - Charlaix (S6) Sondage: S6-SC1+PZ1 Echantillon: - cotes: 21.30 à 22.00 m Nature: Argile limoneuse grise		Caractéristiques géométriques des éprouvettes Hauteur : 4.00 cm ϕ 6.00 cm Vitesse de cisaillement: 20 $\mu\text{m} / \text{mn}$ date de l'essai : du 17-août au 20-août												
Identification des éprouvettes de sol Eprouvettes : intactes ~~recompactées~~		masse volumique des particules solides estimée ρ_s 2.7 g/cm3 mesurée												
N°	Avant essai					Après consolidation		Après cisaillement	Paramètres de résistance au cisaillement					
	ρ	ρ_d	w	e	SR	ρ_d	t_{100}	w	σ'	$\tau_{f,p}$	$\delta l_{f,p}$	$\tau_{f,f}$	$\delta l_{f,f}$	
	g/cm3	g/cm3	w %		%	g/cm3	mn	%	kPa	kPa	mm	kPa	mm	
	1	2.04	1.65	23.20	0.63	99	1.65	ind	25.23	100	51	0.9	38	5.00
	2	1.98	1.60	23.85	0.69	94	1.59		28.68	250	130	1.9	107	5.00
3	2.03	1.65	23.09	0.63	98	1.73	24.59		500	201	2.5	188	5.00	
4														

RESULTATS caractéristiques			
de pic, sous τ_{max}		finales, pour $\delta l=5 \text{ mm}$	
c'_p	ϕ'_p	c'_f	ϕ'_f
kPa	degré	kPa	degré
23	20	6	20

Observations

P.V. n° 18-121 annexe 3

du 02/09/20

Le chargé d'essais
L.Chagot

le : 02/09/20
signature

Vérifié par le RE
F.Rojat

le : 02/09/20
signature

Dossier : **C18LL0069**

Provenance : **RN85 - Charlaix (S6)**

Sondage : **S6-SC1+PZ1**

Echantillon : -

Profondeur : **21.30** à **22.00**

Nature : **Argile limoneuse grise**

Boîtes rondes ($\phi = 6 \text{ cm}$)

Volume = **113.1 cm³**

Eprouvettes :
intactes ~~recompactées~~

Anneau de traction : 1 kN

saturation (h) 12

durée :

consolidation (h) 4

Vitesse : 20 $\mu\text{m/mn}$

Contraintes de consolidation en kPa

100

250

500

Tassement en mm

0.093

0.382

-1.706

0.000

CARACTERISTIQUES INITIALES DES EPROUVETTES

N° boîte	298	301	301		
Masse totale humide en g	1893.30	1908.60	1892.90		
Masse de la boîte en g	1662.80	1684.60	1662.80		
Masse humide de l'éprouvette en g	230.50	224.00	230.10		
Masse sèche de l'éprouvette en g	187.10	180.87	186.94		
Masse d'eau en g	43.40	43.13	43.16		
3 Teneur en eau initiale : w en %	23.20	23.85	23.09		MOYENNE 23.38
3 Masse volumique humide ρ en g/cm ³	2.04	1.98	2.03		2.02
3 Masse volumique sèche ρ_d en g/cm ³	1.65	1.60	1.65		1.64
3 Indice des vides initial e	0.63	0.69	0.63		0.65
3 Degré de saturation initial S_r en %	99.08	93.54	98.41		97.01

CARACTERISTIQUES FINALES

N° tare	T6	T2	T1		
Masse total humide en g	290.40	275.00	268.20		
Masse totale sèche en g	243.40	224.90	223.10		
Masse de la tare en g	57.10	50.20	39.70		
Masse d'eau en g	47.00	50.10	45.10		
Masse de sol sec en g	186.30	174.70	183.40		MOYENNE
3 Teneur en eau finale (%)	25.23	28.68	24.59		26.17
3 Masse volumique humide ρ en g/cm ³	2.07	2.04	2.16		2.09
3 Masse volumique sèche ρ_d en g/cm ³	1.65	1.59	1.73		1.66
3 Indice des vides final e	0.63	0.70	0.56		0.63
3 Degré de saturation final S_{r_f} en %	107.32	110.51	119.35		112.39

Observations

P.V. n° 18-121
annexe 3

du 02/09/20

Vérifié par le RE

F.Rojat

le : 02/09/20

signature

ANNEXE 2

Essais mécaniques du site de Quet-en-Beaumont

Département Laboratoire de Lyon Groupe RRMS Direction territoriale Centre-Est		ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE A LA BOITE CISAILLEMENT DIRECT----Conforme à la Norme NF P 94-071-1												
N° dossier: C18LL0069 Provenance : RN85 - Quet-en-Beaumont (S7) Sondage: S7-SC1+I1 Echantillon: - cotes: 3.90 à 4.10 m Nature: Limon sableux		Caractéristiques géométriques des éprouvettes Hauteur : 4.00 cm ϕ 6.00 cm Vitesse de cisaillement: 20 $\mu\text{m} / \text{mn}$ date de l'essai : du 09-mars au 13-mars												
Identification des éprouvettes de sol Eprouvettes : intactes recompactées		masse volumique des particules solides estimée ρ_s 2.64 g/cm3 mesurée												
N°	Avant essai					Après consolidation		Après cisaillement	Paramètres de résistance au cisaillement					
	ρ	ρ_d	w	e	SR	ρ_d	t100	w	σ'	$\tau_{f,p}$	$\delta l_{f,p}$	$\tau_{f,f}$	$\delta l_{f,f}$	
	g/cm3	g/cm3	w %		%	g/cm3	mn	%	kPa	kPa	mm	kPa	mm	
	1	2.13	1.80	18.13	0.47	103	1.79	ind	18.64	50	56	1.0	45	5.00
	2	2.13	1.80	18.09	0.46	103	1.81		18.16	100	88	1.8	82	5.00
3	2.13	1.80	18.00	0.46	102	1.81	18.04		150	122	1.5	115	5.00	
4														

RESULTATS caractéristiques			
de pic, sous τ_{max}		finales, pour $\delta l=5$ mm	
c'_p	ϕ'_p	c'_f	ϕ'_f
kPa	degré	kPa	degré
22	33	11	35

Observations Echantillons recompactés - la cohésion mesurée n'est pas significative.	P.V. n° 18-097 annexe 3 du 05/06/19	Le chargé d'essais L.Chagot le : 05/06/19 signature	Vérifié par le RE F.Rojat le : 05/06/19 signature
--	--	--	--

Dossier : **C18LL0069**

Provenance : **RN85 - Quet-en-Beaumont (S7)**

Sondage : **S7-SC1+I1**

Echantillon : -

Profondeur : **3.90** à **4.10**

Nature : **Limon sableux**

Boîtes rondes ($\phi = 6 \text{ cm}$)

Volume = **113.1 cm³**

Eprouvettes :
~~intactes~~ recompactées

Anneau de traction : 1 kN

saturation (h) 12

durée :

consolidation (h) 2

Vitesse : 20 $\mu\text{m/mn}$

Contraintes de consolidation en kPa

50

100

150

300

Tassement en mm

0.012

-0.192

-0.386

0.000

CARACTERISTIQUES INITIALES DES EPROUVETTES

N° boîte	298	301	301		
Masse totale humide en g	1903.30	1925.50	1925.30		
Masse de la boîte en g	1662.80	1684.60	1684.60		
Masse humide de l'éprouvette en g	240.50	240.90	240.70		
Masse sèche de l'éprouvette en g	203.60	204.00	203.98		
Masse d'eau en g	36.90	36.90	36.72		
3 Teneur en eau initiale : w en %	18.13	18.09	18.00		MOYENNE 18.07
3 Masse volumique humide ρ en g/cm ³	2.13	2.13	2.13		2.13
3 Masse volumique sèche ρ_d en g/cm ³	1.80	1.80	1.80		1.80
3 Indice des vides initial e	0.47	0.46	0.46		0.46
3 Degré de saturation initial S_r en %	102.57	103.00	102.47		102.68

CARACTERISTIQUES FINALES

N° tare	T2	T2			
Masse total humide en g	292.80	292.40	297.10		
Masse totale sèche en g	254.70	255.20	260.20		
Masse de la tare en g	50.30	50.30	55.70		
Masse d'eau en g	38.10	37.20	36.90		
Masse de sol sec en g	204.40	204.90	204.50		MOYENNE
3 Teneur en eau finale (%)	18.64	18.16	18.04		18.28
3 Masse volumique humide ρ en g/cm ³	2.12	2.13	2.14		2.13
3 Masse volumique sèche ρ_d en g/cm ³	1.79	1.81	1.81		1.80
3 Indice des vides final e	0.47	0.46	0.46		0.46
3 Degré de saturation final S_r en %	103.67	103.73	104.65		104.01

Observations

P.V. n° 18-097
annexe 3

du 05/06/19

Vérfié par le RE

F.Rojat

le : 05/06/19

signature

Département Laboratoire de Lyon Groupe RRMS Direction territoriale Centre-Est		ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE A LA BOITE CISAILLEMENT DIRECT----Conforme à la Norme NF P 94-071-1												
N° dossier: C18LL0069 Provenance : RN85 - Quet-en-Beaumont (S7) Sondage: S7-SC2+I2 Echantillon: - cotes: 23.70 à 24.50 m Nature: Argile limoneuse grise		Caractéristiques géométriques des éprouvettes Hauteur : 4.00 cm ϕ 6.00 cm Vitesse de cisaillement: 20 $\mu\text{m} / \text{mn}$ date de l'essai : du 17-août au 20-août												
Identification des éprouvettes de sol Eprouvettes : intactes ~~recompactées~~		masse volumique des particules solides estimée ρ_s 2.7 g/cm3 mesurée												
N°	Avant essai					Après consolidation		Après cisaillement	Paramètres de résistance au cisaillement					
	ρ	ρ_d	w	e	SR	ρ_d	t_{100}	w	σ'	$\tau_{f,p}$	$\delta l_{f,p}$	$\tau_{f,f}$	$\delta l_{f,f}$	
	g/cm3	g/cm3	w %		%	g/cm3	mn	%	kPa	kPa	mm	kPa	mm	
	1	2.03	1.63	24.15	0.65	100	1.60	ind	27.65	50	34	0.9	23	5.00
	2	2.04	1.65	23.65	0.63	101	1.66		25.15	150	82	1.9	63	5.00
3	2.08	1.68	23.83	0.60	106	1.72	23.54		300	119	2.5	112	5.00	
4														

RESULTATS caractéristiques			
de pic, sous τ_{max}		finales, pour $\delta l=5 \text{ mm}$	
c'_p	ϕ'_p	c'_f	ϕ'_f
kPa	degré	kPa	degré
23	18	7	19

Observations

P.V. n° 18-099 annexe 3

du 18/09/19

Le chargé d'essais
L.Chagot

le : 18/09/19
signature

Vérifié par le RE
F.Rojat

le : 18/09/19
signature

Dossier : **C18LL0069**

Provenance : **RN85 - Quet-en-Beaumont (S7)**

Sondage : **S7-SC2+I2**

Echantillon : -

Profondeur : **23.70** à **24.50**

Nature : **Argile limoneuse grise**

Boîtes rondes ($\phi = 6 \text{ cm}$)

Volume = **113.1 cm³**

Eprouvettes :
intactes ~~recompactées~~

Anneau de traction : 1 kN

saturation (h) 12

durée :

consolidation (h) 4

Vitesse : 20 $\mu\text{m/mn}$

Contraintes de consolidation en kPa

50

150

300

Tassement en mm

0.780

-0.137

-0.780

0.000

CARACTERISTIQUES INITIALES DES EPROUVETTES

N° boîte	298	301	301		
Masse totale humide en g	1891.90	1915.60	1920.30		
Masse de la boîte en g	1662.80	1684.60	1684.60		
Masse humide de l'éprouvette en g	229.10	231.00	235.70		
Masse sèche de l'éprouvette en g	184.54	186.82	190.34		
Masse d'eau en g	44.56	44.18	45.36		
3 Teneur en eau initiale : w en %	24.15	23.65	23.83		MOYENNE 23.87
3 Masse volumique humide ρ en g/cm ³	2.03	2.04	2.08		2.05
3 Masse volumique sèche ρ_d en g/cm ³	1.63	1.65	1.68		1.66
3 Indice des vides initial e	0.65	0.63	0.60		0.63
3 Degré de saturation initial S_r en %	99.58	100.62	106.47		102.23

CARACTERISTIQUES FINALES

N° tare	T1	T2	T6		
Masse total humide en g	273.20	283.20	296.90		
Masse totale sèche en g	222.60	236.40	251.20		
Masse de la tare en g	39.60	50.30	57.10		
Masse d'eau en g	50.60	46.80	45.70		
Masse de sol sec en g	183.00	186.10	194.10		MOYENNE
3 Teneur en eau finale (%)	27.65	25.15	23.54		25.45
3 Masse volumique humide ρ en g/cm ³	2.04	2.08	2.12		2.08
3 Masse volumique sèche ρ_d en g/cm ³	1.60	1.66	1.72		1.66
3 Indice des vides final e	0.69	0.63	0.57		0.63
3 Degré de saturation final S_r en %	108.73	108.24	111.50		109.49

Observations

P.V. n° 18-099
annexe 3

du 18/09/19

Vérifié par le RE

F.Rojat

le : 18/09/19
signature

ANNEXE 3

Essais mécaniques du site des Touches

Essais de laboratoire Avril 2019

Essai triaxial CU+u monotone S8 SC2 – Site des Touches

Tableau récapitulatif des éprouvettes :

Eprouvette	Etat initial					Consolidation		
	w (%)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e ()	S _r (%)	p _c (kPa)	t ₁₀₀ (h)	ε_v ()
TOU05	25,76	19,78	15,73	0,685	101,6	500	5,4	0,0657
TOU06	25,62	19,96	15,89	0,668	103,6	300	8,3	0,0460
TOU07	25,82	19,88	15,80	0,678	103,0	100	14,3	0,0168
TOU08	25,38	19,90	15,87	0,669	102,4	50	16,7	0,0063

Avec :

- $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$
- p_c pression effective de consolidation isotrope
- t₁₀₀ durée conventionnelle de consolidation
- ε_v déformation volumique de l'éprouvette durant la consolidation

Essai triaxial CU+u. Conditions d'essai

Eprouvette	d ₀ (cm)	h ₀ (cm)	condition	p _c (kPa)	v (mm/min)	date de l'essai
TOU05	5,00	9,84	CU+u	500	0,0046	30/04/2019 – 09/05/2019
TOU06	5,00	9,84	CU+u	300	0,0046	30/04/2019 – 09/05/2019
TOU07	5,00	9,84	CU+u	100	0,0046	30/04/2019 – 09/05/2019
TOU08	5,00	9,84	CU+u	50	0,0046	30/04/2019 – 09/05/2019

d₀ h₀ diamètre et hauteur initiale des éprouvettes
 CU+u consolidé non drainé
 V vitesse de cisaillement

p_c pression effective de consolidation isotrope
 u_{cp} contre-pression 500 kPa



RN85

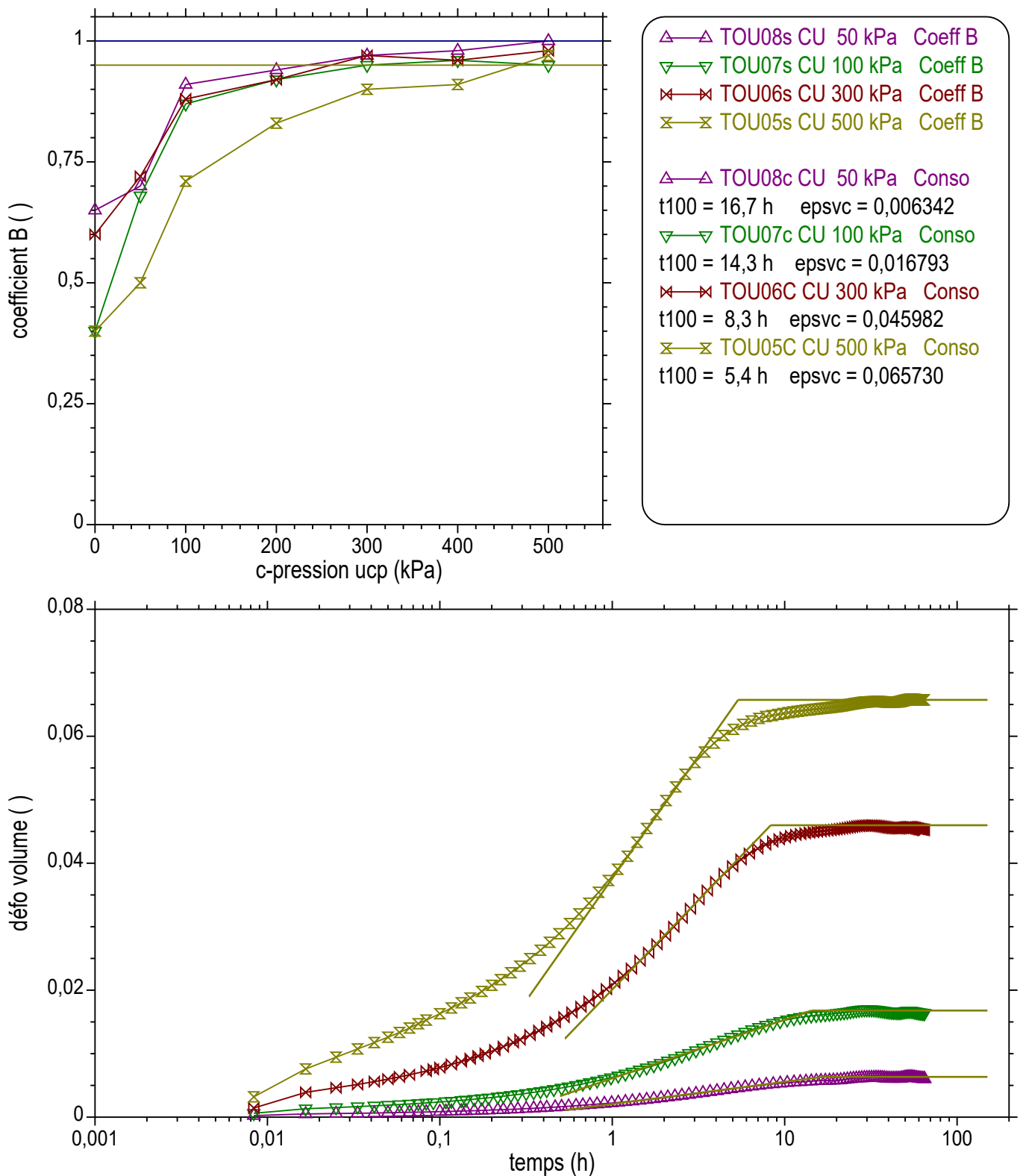
Sondage S8 SC2 – Site des Touches

Eprouvette TOU05, TOU06, TOU07 et TOU08 après essai

Essai triaxial CU

RN85 - Site des Touches
E
Argile marron à verdâtre

S8 SC2
3,40 - 4,30 m
TOU08s

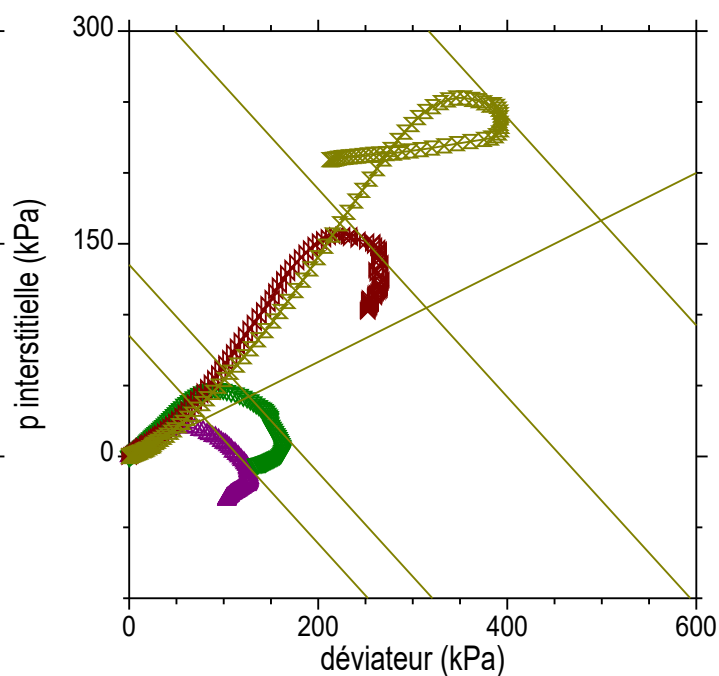
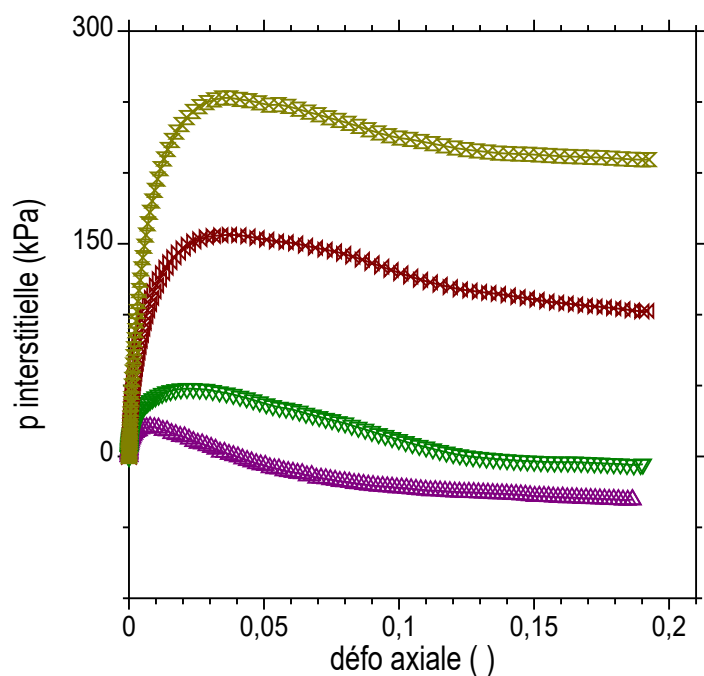
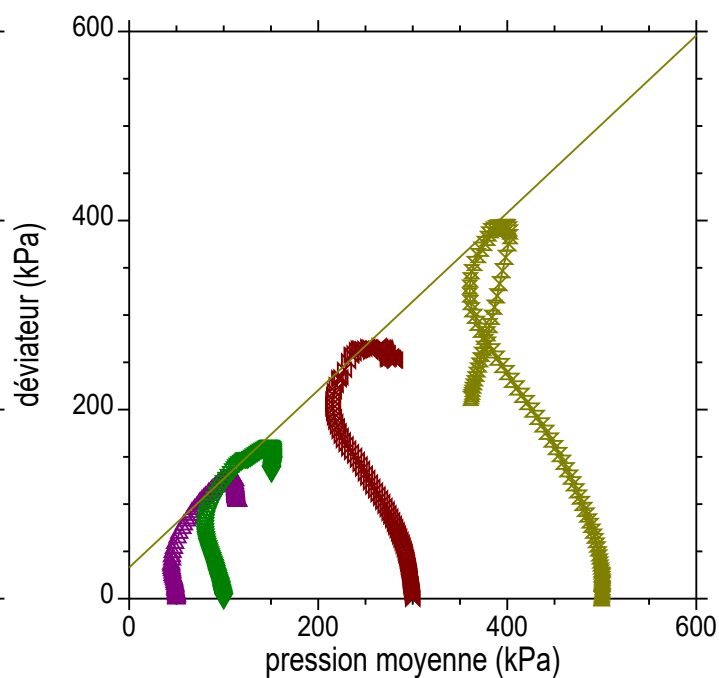
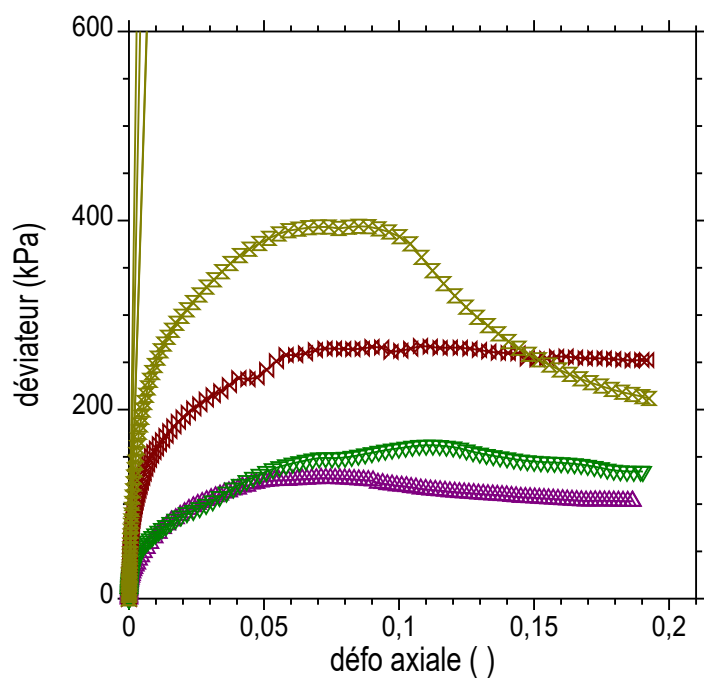


Coefficients B et courbes de consolidation isotrope.

Essai triaxial CU

RN85 - Site des Touches
E
Argile marron à verdâtre

S8 SC2
3,40 - 4,30 m
TOU08r



△ TOU08r CU 050 kPa
▽ TOU07r CU 100 kPa
× TOU06r CU 300 kPa
⌘ TOU05r CU 500 kPa

$E_u = 90 \text{ MPa}$ 92 MPa 145 MPa 213 MPa
 $C_{qc} = 33 \text{ kPa}$ $M_c = 0,938$
 $c' = 15,6 \text{ kPa}$ $\phi' = 23,9^\circ$
 $A_c = -0,733$

Courbes contraintes déformations. Chemins des contraintes.

RN85 - Site des Touches

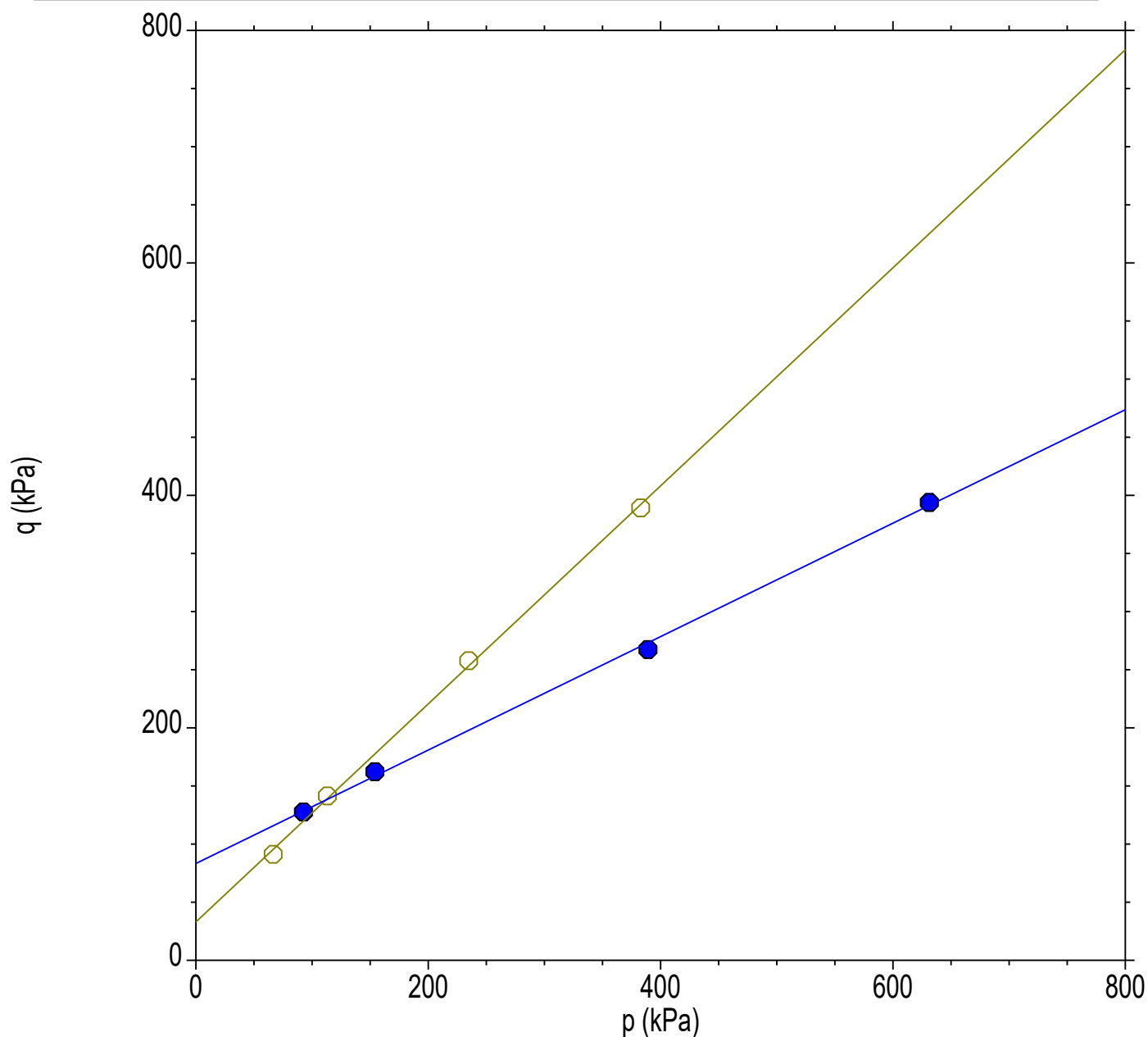
S8 SC2

E

3,40 - 4,30 m

Argile marron à verdâtre

TOU05-06-07-08



○ ○ TOU05-08-Rup CU En contraintes effectives (q/p)max

$M_c = +0,938$ $C_{qc} = 33$ kPa

$\phi_i' = 23,9^\circ$ $c' = 15,6$ kPa

● ● TOU05-08-Rup CU En contraintes totales (q)max

$M_{ccu} = +0,488$ $C_{qccu} = 83,3$ kPa

$\phi_{icu} = 13,0^\circ$ $c_{cu} = 39,5$ kPa

Essais de laboratoire Avril 2019

Essai triaxial CU+u monotone S8 SC1 – Site des Touches

Tableau récapitulatif des éprouvettes :

Eprouvette	Etat initial					Consolidation		
	w (%)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e ()	S _r (%)	p _c (kPa)	t ₁₀₀ (h)	ε_v ()
TOU01	24,42	20,17	16,21	0,635	103,9	500	5,7	0,0658
TOU02	22,98	20,37	16,57	0,600	103,5	100	9,1	0,0203
TOU03	21,91	20,63	16,92	0,566	104,6	50	3,3	0,0061
TOU04	24,78	20,11	16,11	0,645	103,8	300	6,7	0,0536

Avec :

- $\gamma_s = 26,5 \text{ kN/m}^3$
- p_c pression effective de consolidation isotrope
- t₁₀₀ durée conventionnelle de consolidation
- ε_v déformation volumique de l'éprouvette durant la consolidation

Essai triaxial CU+u. Conditions d'essai

Eprouvette	d ₀ (cm)	h ₀ (cm)	condition	p _c (kPa)	v (mm/min)	date de l'essai
TOU01	5,00	9,84	CU+u	500	0,0046	23/04/2019 – 29/04/2019
TOU02	5,00	9,84	CU+u	100	0,0046	23/04/2019 – 29/04/2019
TOU03	5,00	9,84	CU+u	50	0,0046	23/04/2019 – 29/04/2019
TOU03	5,00	9,84	CU+u	300	0,0046	23/04/2019 – 29/04/2019

d₀ h₀ diamètre et hauteur initiale des éprouvettes

CU+u consolidé non drainé

V vitesse de cisaillement

p_c pression effective de consolidation isotrope

u_{cp} contre-pression 500 kPa



RN85

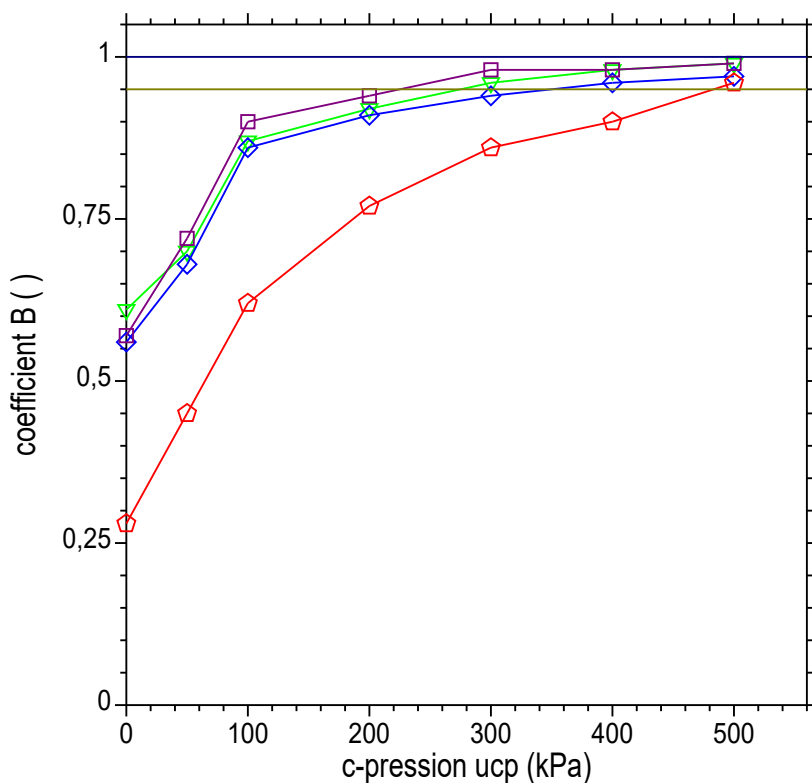
Sondage S8 SC1 – Site des Touches

Eprouvette TOU01, TOU02, TOU03 et TOU04 après essai

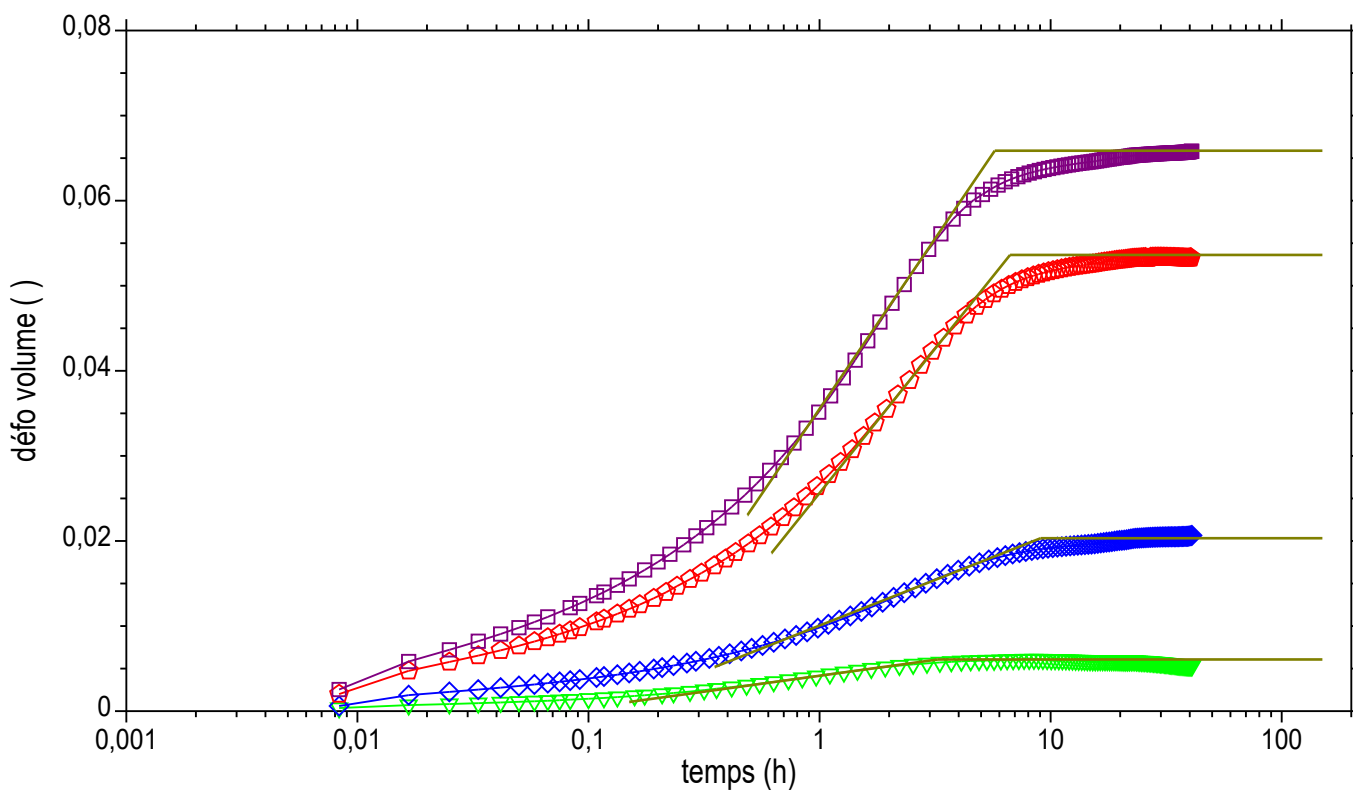
Essai triaxial CU

RN85 - Site des Touches
E
Argile sableuse

S8 SC1
7,50 - 8,10 m
TOU03s



- ▽ TOU03s CU 50 kPa Coeff B
- ◇ TOU02s CU 100 kPa Coeff B
- ◇ TOU04s CU 300 kPa Coeff B
- TOU01s CU 500 kPa Coeff B
- ▽ TOU03c CU 50 kPa Conso
- t100 = 3,3 h epsvc = 0,006072
- ◇ TOU02c CU 100 kPa Conso
- t100 = 9,1 h epsvc = 0,020324
- ◇ TOU04C CU 300 kPa Conso
- t100 = 6,7 h epsvc = 0,053622
- TOU01C CU 500 kPa Conso
- t100 = 5,7 h epsvc = 0,065814

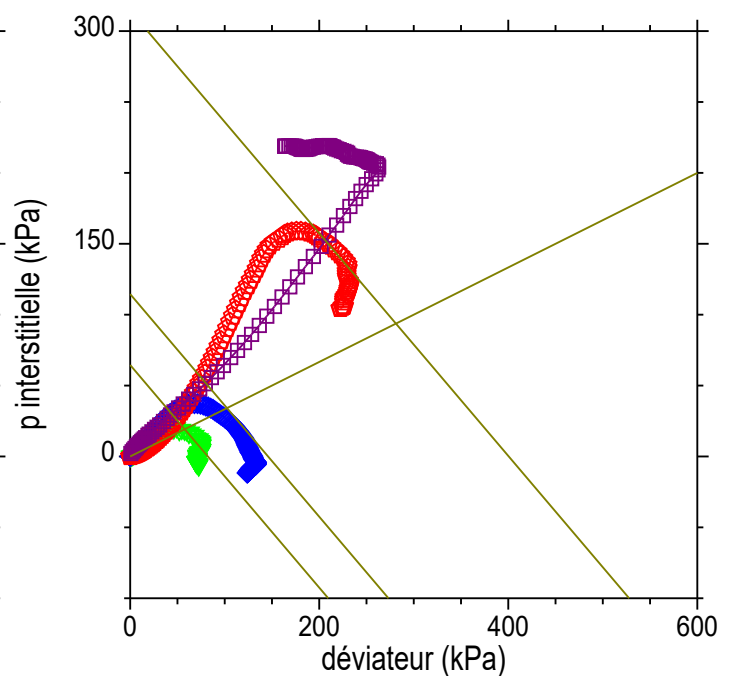
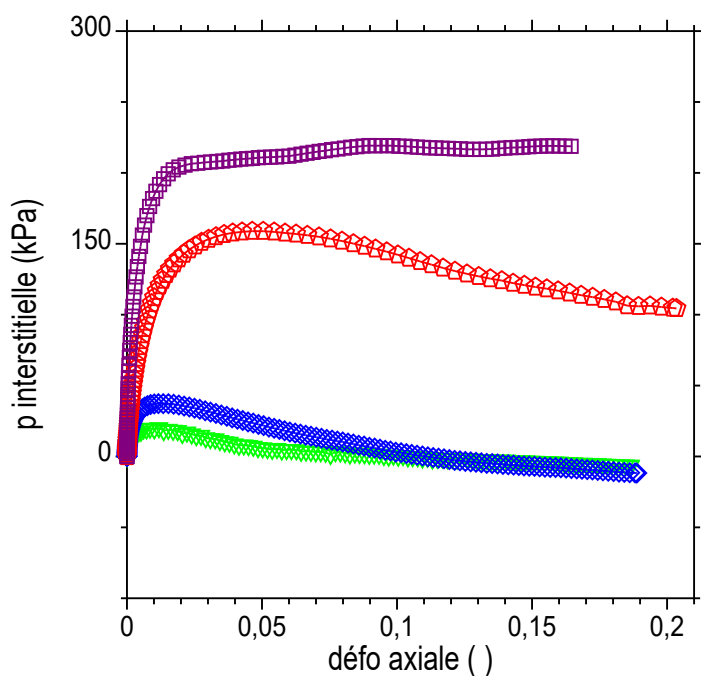
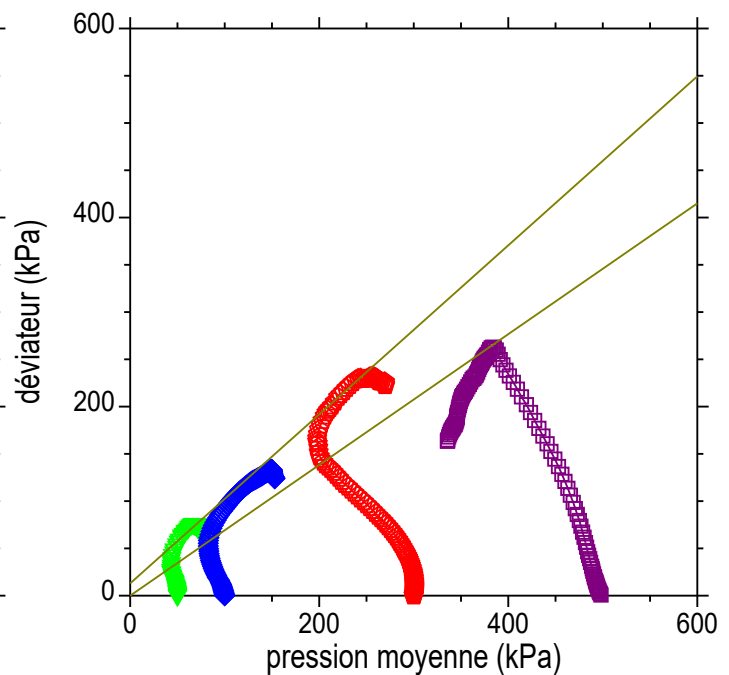
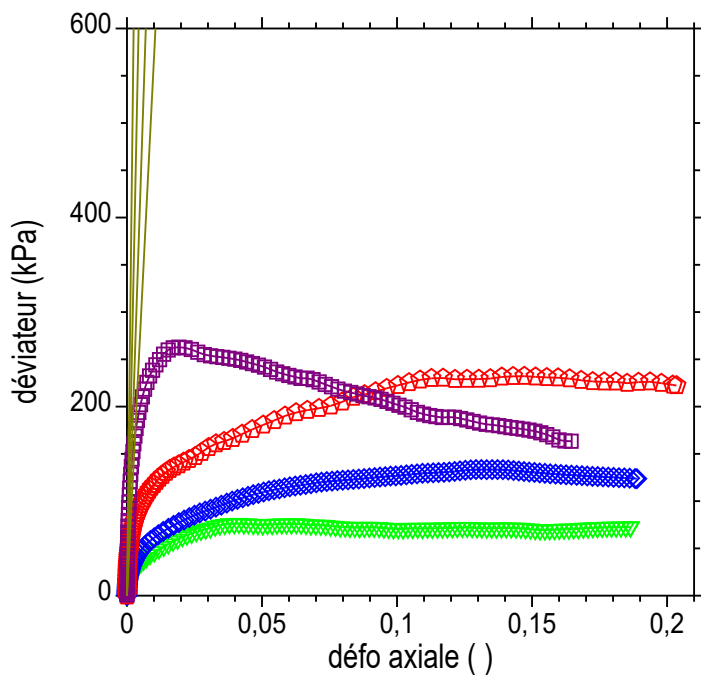


Coefficients B et courbes de consolidation isotrope.

Essai triaxial CU

RN85 - Site des Touches
E
Argile sableuse

S8 SC1
7,50 - 8,10 m
TOU03r



▼ TOU03r CU 050 kPa
 ◆ TOU02r CU 100 kPa
 ◇ TOU04r CU 300 kPa
 □ TOU01r CU 500 kPa
 Eu = 57 MPa 86 MPa 139 MPa 243 MPa

$C_{qc} = 13 \text{ kPa}$ $M_c = 0,894$
 $c' = 6 \text{ kPa}$ $\phi' = 22,9^\circ$
 $A_c = -0,785$
 $C_{qc} = 0 \text{ kPa}$ $M_c = 0,692$
 $c' = 0 \text{ kPa}$ $\phi' = 18,1^\circ$

Courbes contraintes déformations. Chemins des contraintes.

RN85 - Site des Touches

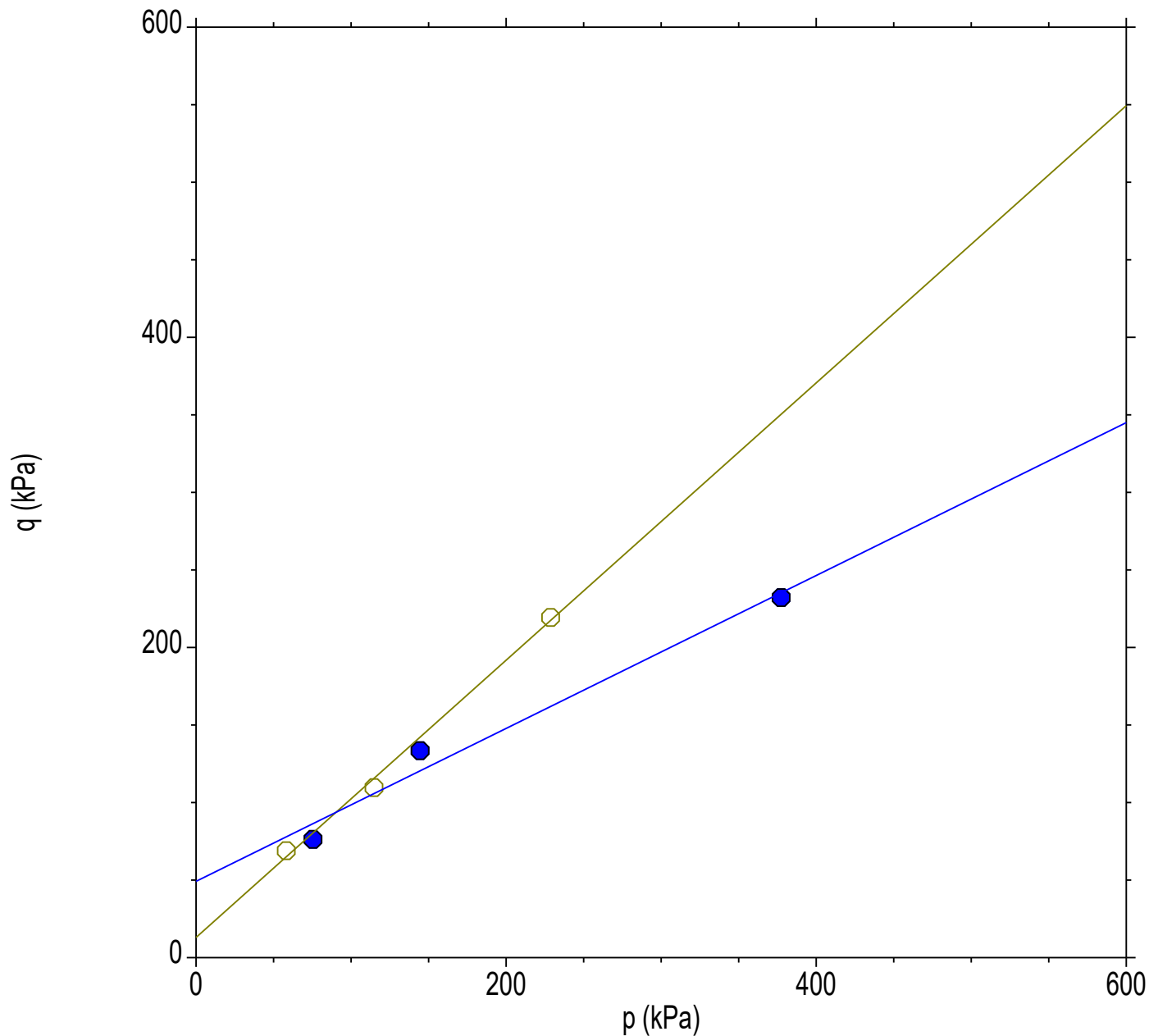
S8 SC1

E

7,50 - 8,10 m

Argile sableuse

TOU01-02-03-04



○ ○ TOU02-04-Rup CU En contraintes effectives (q/p)max

$M_c = +0,894$ $C_{qc} = 13$ kPa

$\phi_i' = 22,9^\circ$ $c' = 6$ kPa

● ● TOU02-04-Rup CU En contraintes totales (q)max

$M_{ccu} = +0,493$ $C_{qccu} = 49$ kPa

$\phi_{icu} = 13,2^\circ$ $c_{cu} = 23$ kPa

Département Laboratoire de Lyon Groupe RRMS Direction territoriale Centre-Est		ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE A LA BOITE CISAILLEMENT DIRECT----Conforme à la Norme NF P 94-071-1											
N° dossier: C18LL0069 Provenance : RN85 - Site des Touches (S8) Sondage: S8-SC2+I3 Echantillon: - cotes: 5.10 à 5.40 m Nature: Argile marron		Caractéristiques géométriques des éprouvettes Hauteur : 4.00 cm ϕ 6.00 cm Vitesse de cisaillement: 20 $\mu\text{m} / \text{mn}$ date de l'essai : du 11-févr au 14-févr											
Identification des éprouvettes de sol Eprouvettes : intactes ~~recompactées~~		masse volumique des particules solides estimée ρ_s 2.7 g/cm3 mesurée											
N°	Avant essai					Après consolidation		Après cisaillement	Paramètres de résistance au cisaillement				
	ρ g/cm3	ρ_d g/cm3	w %	e	SR %	ρ_d g/cm3	t100 mn		w %	σ' kPa	$\tau_{f,p}$ kPa	$\delta l_{f,p}$ mm	$\tau_{f,f}$ kPa
1	2.06	1.68	22.58	0.60	101	1.67	ind	24.33	50	61	0.5	31	5.00
2	2.04	1.67	22.71	0.62	99	1.68		24.76	150	103	0.6	73	5.00
3	2.05	1.68	22.05	0.61	98	1.71		23.74	300	168	1.0	140	5.00
4													

RESULTATS caractéristiques			
de pic, sous τ_{max}		finales, pour $\delta l=5 \text{ mm}$	
c'_p	ϕ'_p	c'_f	ϕ'_f
kPa	degré	kPa	degré
40	23	9	23

Observations

P.V. n° 18-053 annexe3

du 18/02/20

Le chargé d'essais
L.Chagot

le : 18/02/20
signature

Vérifié par le RE
F.Rojat

le : 18/02/20
signature

Dossier : **C18LL0069**

Provenance : **RN85 - Site des Touches (S8)**

Sondage : **S8-SC2+I3**

Echantillon : -

Profondeur : **5.10** à **5.40**

Nature : **Argile marron**

Boîtes rondes ($\phi = 6 \text{ cm}$)

Volume = **113.1 cm³**

Eprouvettes :
intactes ~~recompactées~~

Anneau de traction : 1 kN

saturation (h) 12

durée :

consolidation (h) 2

Vitesse : 20 $\mu\text{m/mn}$

Contraintes de consolidation en kPa

50

150

300

0

Tassement en mm

0.209

-0.204

-0.558

0.000

CARACTERISTIQUES INITIALES DES EPROUVETTES

N° boîte	298	301	298		
Masse totale humide en g	1896.30	1915.80	1894.80		
Masse de la boîte en g	1662.80	1684.60	1662.80		
Masse humide de l'éprouvette en g	233.50	231.20	232.00		
Masse sèche de l'éprouvette en g	190.50	188.41	190.08		
Masse d'eau en g	43.00	42.79	41.92		
3 Teneur en eau initiale : w en %	22.58	22.71	22.05		MOYENNE 22.45
3 Masse volumique humide ρ en g/cm ³	2.06	2.04	2.05		2.05
3 Masse volumique sèche ρ_d en g/cm ³	1.68	1.67	1.68		1.68
3 Indice des vides initial e	0.60	0.62	0.61		0.61
3 Degré de saturation initial S_r en %	101.08	98.79	98.17		99.35

CARACTERISTIQUES FINALES

N° tare	V1	V2	T6		
Masse total humide en g	277.10	280.90	290.10		
Masse totale sèche en g	230.90	235.10	245.40		
Masse de la tare en g	41.00	50.10	57.10		
Masse d'eau en g	46.20	45.80	44.70		
Masse de sol sec en g	189.90	185.00	188.30		MOYENNE
3 Teneur en eau finale (%)	24.33	24.76	23.74		24.27
3 Masse volumique humide ρ en g/cm ³	2.08	2.09	2.11		2.09
3 Masse volumique sèche ρ_d en g/cm ³	1.67	1.68	1.71		1.69
3 Indice des vides final e	0.62	0.61	0.58		0.60
3 Degré de saturation final S_{r_f} en %	106.72	109.27	110.47		108.82

Observations

P.V. n° 18-053
annexe 3

du 18/02/20

Vérfié par le RE

F.Rojat

le : 18/02/20
signature

Département Laboratoire de Lyon Groupe RRMS Direction territoriale Centre-Est		ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE A LA BOITE CISAILLEMENT DIRECT----Conforme à la Norme NF P 94-071-1												
N° dossier: C18LL0069 Provenance : RN85 - Site des Touches (S8) Sondage: S8-SC1+I1 Echantillon: - cotes: 8.10 à 8.40 m Nature: Argile grise		Caractéristiques géométriques des éprouvettes Hauteur : 4.00 cm ϕ 6.00 cm Vitesse de cisaillement: 20 $\mu\text{m} / \text{mn}$ date de l'essai : du 09-juin au 19-juin												
Identification des éprouvettes de sol Eprouvettes : intactes recompactées		masse volumique des particules solides estimée ρ_s 2.7 g/cm3 mesurée												
N°	Avant essai					Après consolidation		Après cisaillement	Paramètres de résistance au cisaillement					
	ρ	ρ_d	w	e	SR	ρ_d	t_{100}	w	σ'	$\tau_{f,p}$	$\delta l_{f,p}$	$\tau_{f,f}$	$\delta l_{f,f}$	
	g/cm3	g/cm3	w %		%	g/cm3	mn	%	kPa	kPa	mm	kPa	mm	
	1	2.14	1.80	19.41	0.50	104	1.80	ind	19.80	50	40	1.6	31	5.00
	2	2.14	1.79	19.55	0.51	104	1.82	19.54	100	62	1.8	53	5.00	
3	2.15	1.80	19.27	0.50	104	1.84	19.49	150	94	1.9	82	5.00		
4														

RESULTATS caractéristiques			
de pic, sous τ_{max}		finales, pour $\delta l=5 \text{ mm}$	
c'_p	ϕ'_p	c'_f	ϕ'_f
kPa	degré	kPa	degré
11	28	4	27

Observations

P.V. n° 18-090 annexe3

du

Le chargé d'essais

L.Chagot

le : 29/06/20
signature

Vérifié par le RE

F.Rojat

le : 29/06/20
signature

Dossier : **C18LL0069**

Provenance : **RN85 - Site des Touches (S8)**

Sondage : **S8-SC1+I1**

Echantillon : -

Profondeur : **8.10** à **8.40**

Nature : **Argile grise**

Boîtes rondes ($\phi = 6 \text{ cm}$)

Volume = **113.1 cm³**

Eprouvettes :
intactes ~~recompactées~~

Anneau de traction : 1 kN

saturation (h) 12

durée :

consolidation (h) 3

Vitesse : 20 $\mu\text{m/mn}$

Contraintes de consolidation en kPa

50

100

150

0

Tassement en mm

-0.302

-0.648

-0.953

0.000

CARACTERISTIQUES INITIALES DES EPROUVETTES

N° boîte	298	301	301		
Masse totale humide en g	1905.30	1926.90	1927.30		
Masse de la boîte en g	1662.80	1684.60	1684.60		
Masse humide de l'éprouvette en g	242.50	242.30	242.70		
Masse sèche de l'éprouvette en g	203.08	202.68	203.48		
Masse d'eau en g	39.42	39.62	39.22		
3 Teneur en eau initiale : w en %	19.41	19.55	19.27		MOYENNE 19.41
3 Masse volumique humide ρ en g/cm ³	2.14	2.14	2.15		2.14
3 Masse volumique sèche ρ_d en g/cm ³	1.80	1.79	1.80		1.80
3 Indice des vides initial e	0.50	0.51	0.50		0.50
3 Degré de saturation initial S_r en %	104.06	104.18	103.94		104.06

CARACTERISTIQUES FINALES

N° tare	T2	T2	T6		
Masse total humide en g	282.90	296.90	298.50		
Masse totale sèche en g	242.70	257.70	258.90		
Masse de la tare en g	39.70	57.10	55.70		
Masse d'eau en g	40.20	39.20	39.60		
Masse de sol sec en g	203.00	200.60	203.20		MOYENNE
3 Teneur en eau finale (%)	19.80	19.54	19.49		19.61
3 Masse volumique humide ρ en g/cm ³	2.15	2.18	2.20		2.18
3 Masse volumique sèche ρ_d en g/cm ³	1.80	1.82	1.84		1.82
3 Indice des vides final e	0.50	0.48	0.46		0.48
3 Degré de saturation final S_{r_f} en %	106.16	109.85	113.45		109.82

Observations

P.V. n° 18-090
annexe 3

du 29/06/20

Vérifié par le RE

F.Rojat

le : 29/06/20

signature

N° dossier : **20-CE-0173**

 Provenance : **Les Touches**

 Sondage : **S8-SC2-I3**

 Echantillons : **E1 à E3**

 Cotes : **8.25** à **9.00** m

 Nature : **Argile grise litée**
Contraintes dans le sol en place

 Profondeur moyenne de prélèvement : **z = 8.60 m**
 Contrainte totale en place estimée : **$\sigma_{v0} = 172.00$ kPa**
 Profondeur du toit de la nappe : **z_w = 4 m**
 Pression interstitielle en place estimée : **$u_0 = 46$ kPa**

 Date de l'essai : du **09/09/2021** au **15/09/2021**
Préparation des éprouvettes de sol

 Eprouvettes : **intactes** ~~recompactées~~
masse volumique des particules solides

 estimée **$\rho_s = 2.7$ g/cm³**
 mesurée

Contraintes et déformations à la rupture

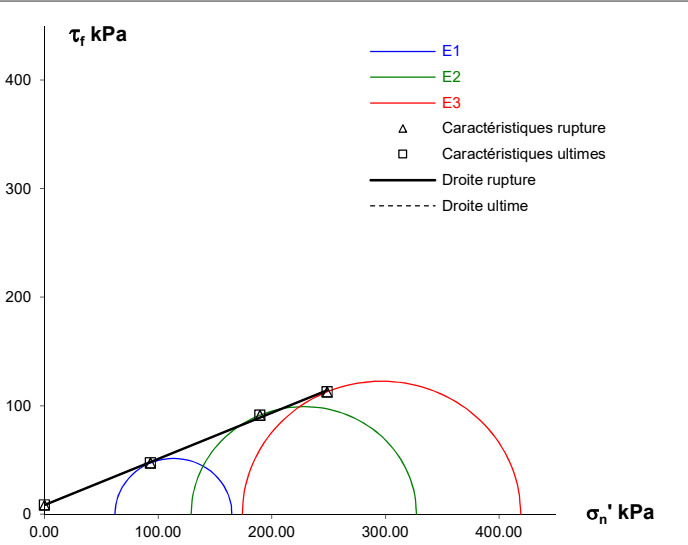
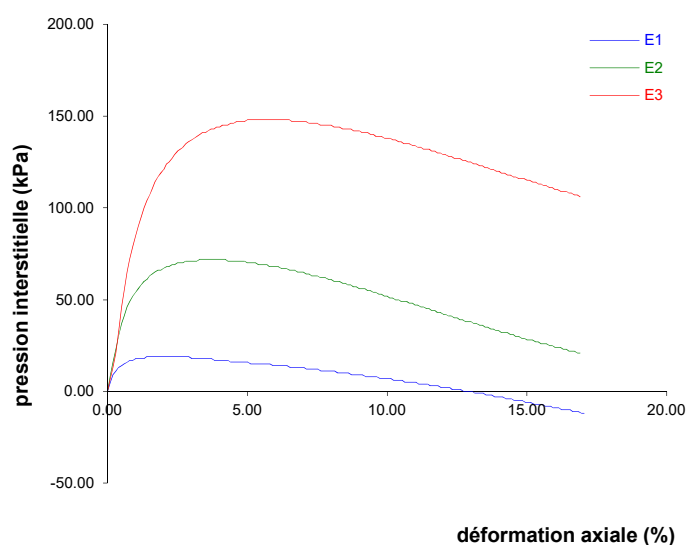
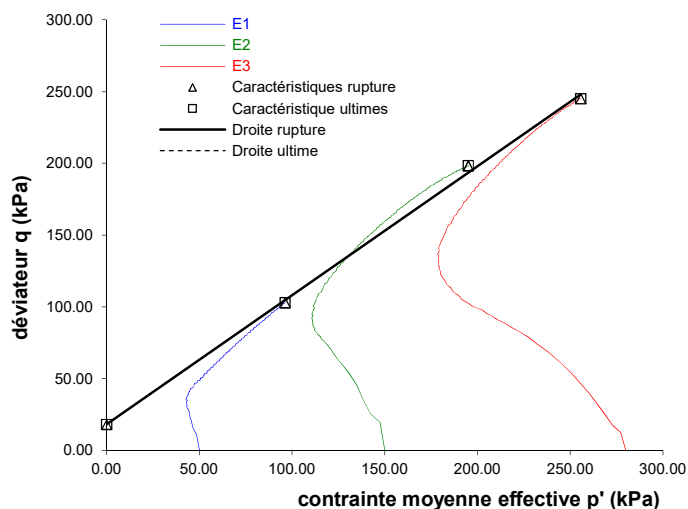
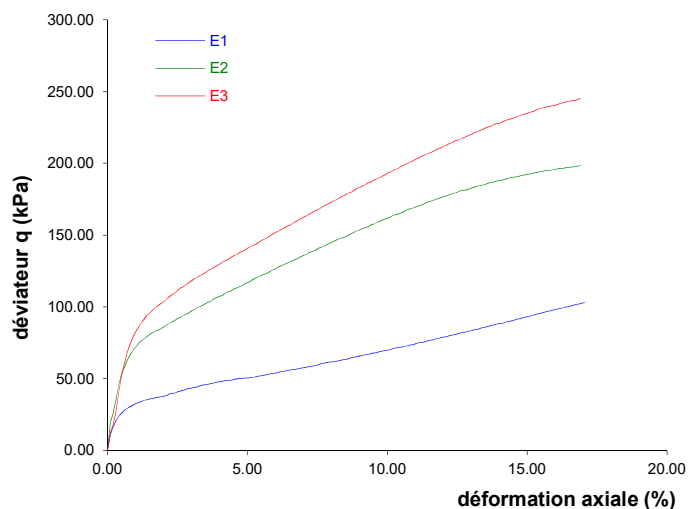
 Condition de rupture : déviateur $q_{max} / (\sigma_1' - \sigma_3')_{max}$ / déformation de : 17 %

Caractéristiques ultimes

à la déformation maximale mesurée

N°	p' kPa	q kPa	u kPa	ε_v %	σ_1' kPa	σ_3' kPa	s' kPa	t kPa	p' kPa	q kPa	u kPa	σ_1' kPa	σ_3' kPa
E1	96.29	102.88	-12.00	16.98	164.88	62.00	113.44	51.44	96.29	102.88	-12.00	164.88	62.00
E2	195.10	198.29	21.00	16.91	327.29	129.00	228.15	99.15	195.10	198.29	21.00	327.29	129.00
E3	255.70	245.09	106.00	16.91	419.09	174.00	296.55	122.55	255.70	245.09	106.00	419.09	174.00
E4													

Les valeurs du tableau sont données hors contre-pression ce qui peut conduire à des pressions interstitielles négatives


Résultats :

	Rupture	Ultime
c' (kPa)	8.6	8.6
ϕ' (°)	23.0	23.0

 P.V. n° **TR-22-001**

 du **15/09/22**
Le chargé d'essais
L.Chagot

 le : **15/09/22**
 signature

Vérifié par le RE
F.Rojat

 le : **15/09/22**
 signature

Photos des
 éprouvettes
 après essais

 N° dossier : **20-CE-0173**

 Provenance : **Les Touches**

 Sondage : **S8-SC2-I3**

 Echantillons : **E1 à E3**

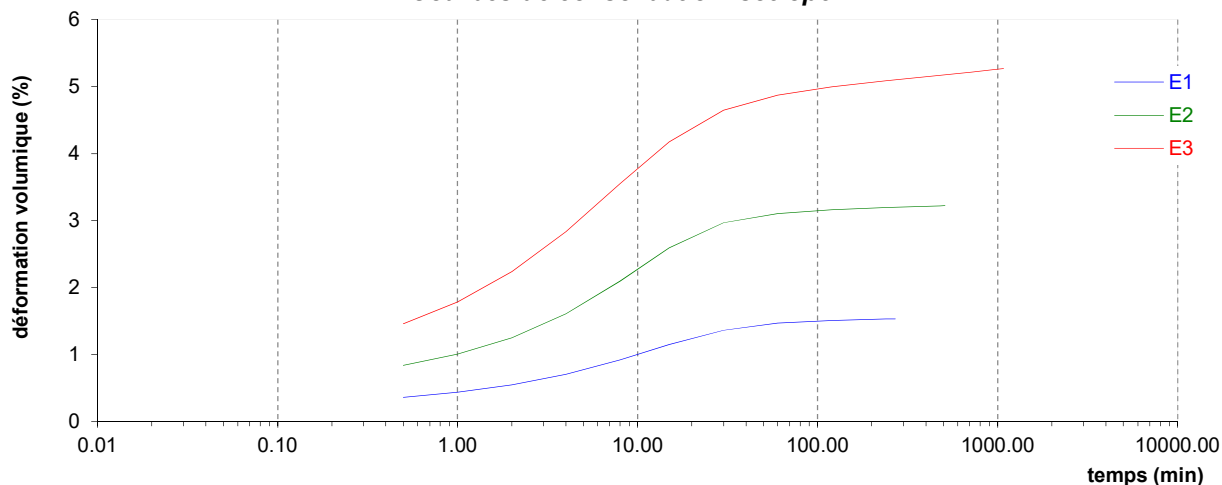
 Cotes (m) : **8.25** à **9.00**

 Nature : **Argile grise litée**
CARACTERISTIQUES INITIALES ET FINALES DES EPROUVETTES

N° éprouvette	E1	E2	E3	E4
Hauteur initiale H_i (mm)	99.60	100.10	99.91	
Diamètre initial D_i (mm)	49.90	49.90	49.50	
Volume initial V_i (cm ³)	194.78	195.76	192.27	
Teneur en eau initiale w_i (%)	22.90	21.80	22.20	
Masse volumique humide initiale ρ (g/cm ³)	2.08	2.11	2.04	
Masse volumique sèche initiale ρ_d (g/cm ³)	1.69	1.74	1.67	
Indice des vides initial e (-)	0.59	0.56	0.62	
Degré de saturation initial S_{r_i} (%)	104.17	105.91	97.01	
Teneur en eau finale w_f (%)	25.11	22.40	22.09	
				MOYENNE
				22.30
				2.08
				1.70
				0.59
				102.36
				23.20

DEROULEMENT DE L'ESSAI

N° éprouvette	E1	E2	E3	E4
Contrainte effective durant la saturation (kPa)	10.00	10.00	10.00	
Contre-pression en fin de saturation u_{cp} (kPa)	650.00	650.00	670.00	
Coefficient B en fin de saturation (≥ 0.95)	0.96	0.98	0.98	
Pression effective de consolidation isotrope p_c (kPa)	50.00	150.00	280.00	
Consolidation : volume d'eau expulsé ΔV_c (cm ³)	2.99	6.31	10.13	
Consolidation : déformation volumique ε_v (-)	0.0153	0.0322	0.0527	
Hauteur estimée en fin de consolidation H_c (mm)	99.09	99.02	98.16	
Diamètre estimé en fin de consolidation D_c (mm)	49.64	49.36	48.61	
Cisaillement : vitesse d'écrasement (mm/min)	0.0500	0.0500	0.0500	
Correction due à l'élasticité de la membrane	oui	oui	oui	
Correction due aux bandes de papier filtre	oui	oui	oui	

Courbes de consolidation isotrope

Observations :

Eprouvettes obtenues par taille à partir d'échantillons carottés intacts conservés en gaine paraffinée.
 La section de l'éprouvette est recalculée tout au long de l'essai pour tenir compte de la déformation radiale.

P.V. n° TR-22-001

du 15/09/22

Vérifié par le RE

F.Rojat

le : 15/09/22

signature

ANNEXE 4

Essais mécaniques du site de Corps

ESSAI TRIAXIAL CU

Sondage n° ST 2

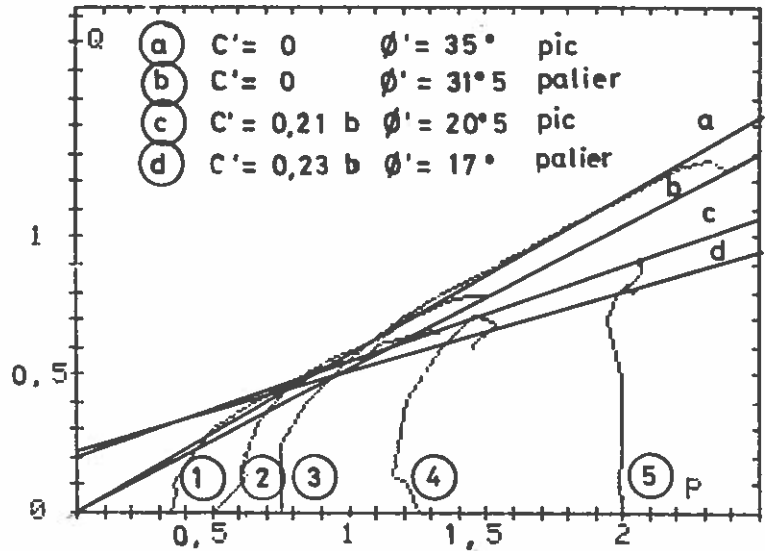
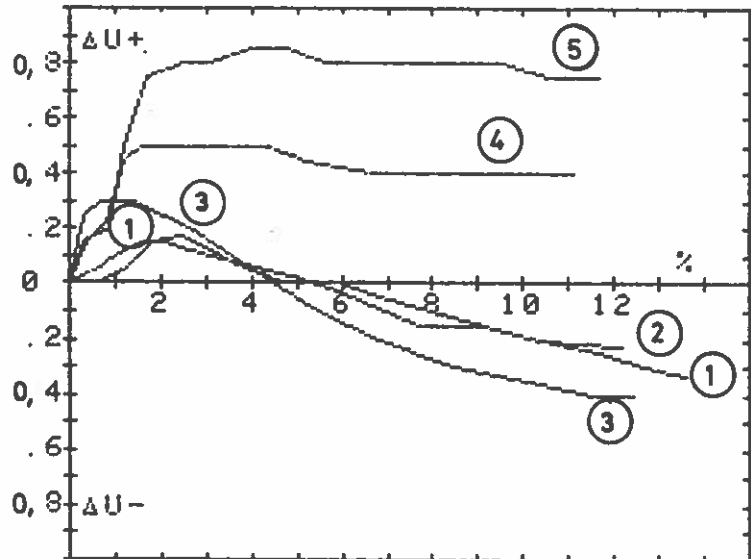
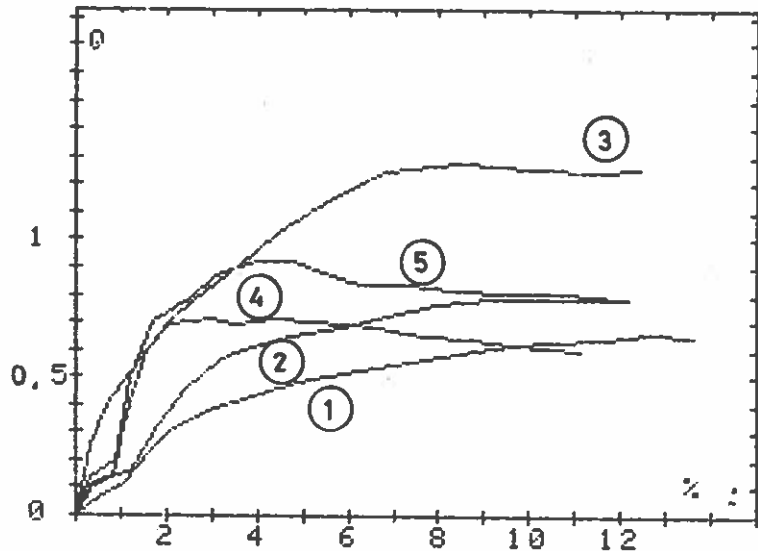
Chantier :

CORPS

Profondeur: 2,20 m

Echantillons non remaniés

Fig. 17

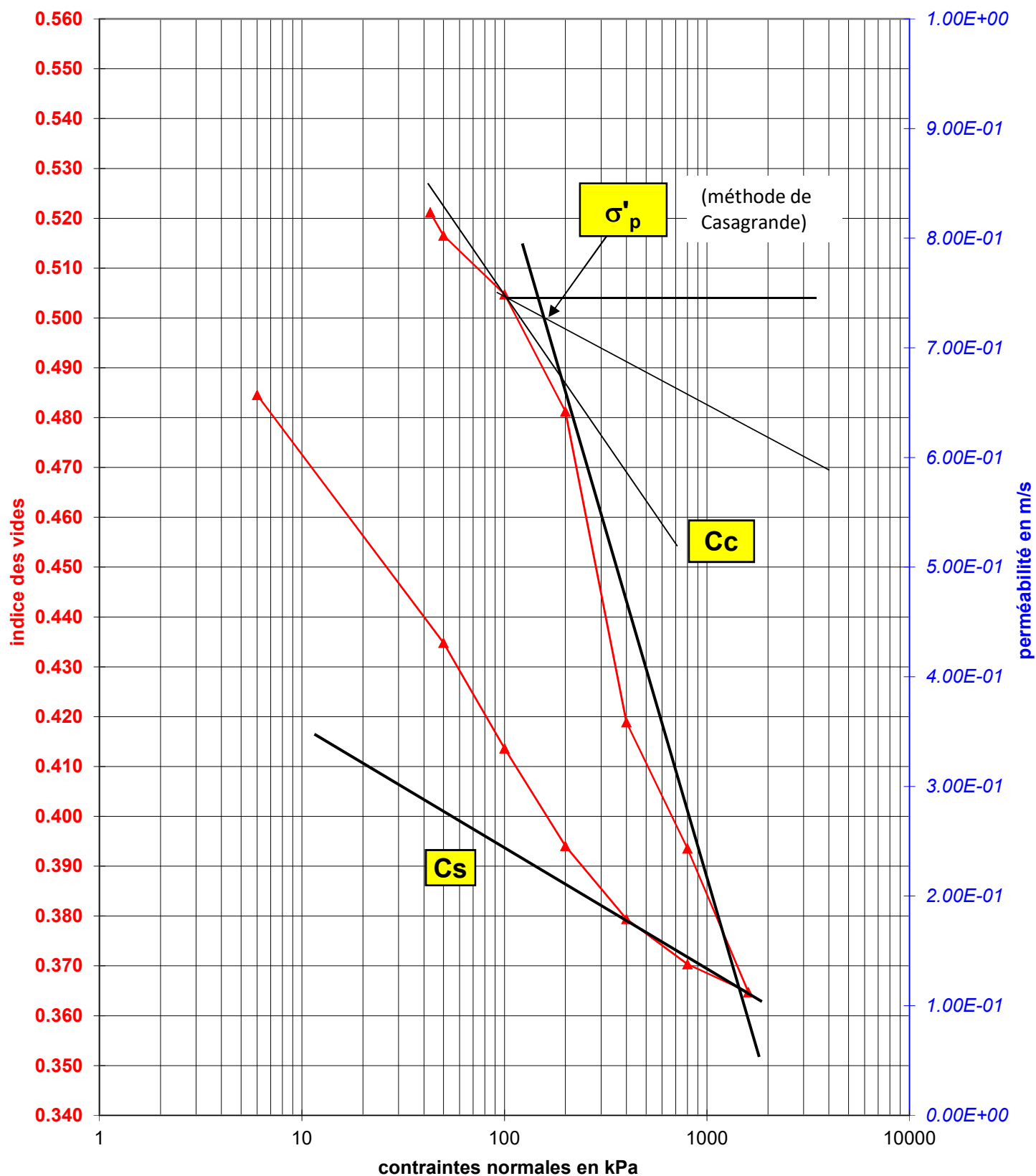


INITIAL FINAL

①	Yh	1.99	2.01	G/cm ³
	Yd	1.60	1.60	G/cm ³
	W	24.66	25.55	%
	Ws	25.47	25.55	%
	SR	96.83	100.00	%
②	Yh	1.97	2.01	G/cm ³
	Yd	1.57	1.60	G/cm ³
	W	25.78	25.34	%
	Ws	26.72	25.34	%
	SR	96.50	100.00	%
③	Yh	2.07	2.07	G/cm ³
	Yd	1.70	1.71	G/cm ³
	W	21.84	21.55	%
	Ws	21.90	21.55	%
	SR	99.71	100.00	%
④	Yh	2.05	2.07	G/cm ³
	Yd	1.67	1.70	G/cm ³
	W	22.57	21.80	%
	Ws	22.79	21.80	%
	SR	99.04	100.00	%
⑤	Yh	1.95	1.98	G/cm ³
	Yd	1.51	1.56	G/cm ³
	W	28.95	27.05	%
	Ws	29.07	27.05	%
	SR	99.59	100.00	%

 Département Risques, Infrastructures et Matériaux		ESSAI DE COMPRESSIBILITE à L'OEDOMETRE suivant norme NF EN ISO 17892-5																																																																																																																									
Appareil Sols Mesures n°: SA		Moule n°: SA																																																																																																																									
dossier : 20-CE-0173 Provenance : RN85 Site de Corps (S9) Sondage S9-SC1 Par : Géotec Echantillon E1 carottier : poinçonneur Cotes 12.5 à 13 Nature Argile grise litée, nappe à 5 m		Teneurs en eau <table border="1"> <tr> <th>Pesage</th> <th colspan="2">initiale</th> <th>finale</th> </tr> <tr> <th>N° tare</th> <th>SA</th> <th>T6</th> <th>SA</th> </tr> <tr> <td>PTH g</td> <td>282.70</td> <td>163.30</td> <td>204.10</td> </tr> <tr> <td>PTS g</td> <td>256.50</td> <td>146.30</td> <td>174.20</td> </tr> <tr> <td>P tare g</td> <td>119.90</td> <td>57.10</td> <td>39.70</td> </tr> <tr> <td>P eau g</td> <td>26.20</td> <td>17.00</td> <td>29.90</td> </tr> <tr> <td>P sol sec g</td> <td>136.60</td> <td>89.20</td> <td>136.60</td> </tr> <tr> <td>W %</td> <td>19.18</td> <td>19.06</td> <td>21.89</td> </tr> </table>		Pesage	initiale		finale	N° tare	SA	T6	SA	PTH g	282.70	163.30	204.10	PTS g	256.50	146.30	174.20	P tare g	119.90	57.10	39.70	P eau g	26.20	17.00	29.90	P sol sec g	136.60	89.20	136.60	W %	19.18	19.06	21.89																																																																																								
Pesage	initiale		finale																																																																																																																								
N° tare	SA	T6	SA																																																																																																																								
PTH g	282.70	163.30	204.10																																																																																																																								
PTS g	256.50	146.30	174.20																																																																																																																								
P tare g	119.90	57.10	39.70																																																																																																																								
P eau g	26.20	17.00	29.90																																																																																																																								
P sol sec g	136.60	89.20	136.60																																																																																																																								
W %	19.18	19.06	21.89																																																																																																																								
Caractéristiques de l'éprouvette <table border="1"> <tr> <td>Position</td> <td>12.50</td> <td>m</td> </tr> <tr> <td>Section</td> <td>A</td> <td>38.480 cm²</td> </tr> <tr> <td>Hauteur initiale</td> <td>H₀</td> <td>2.000 cm</td> </tr> <tr> <td>Volume initial</td> <td>V₀</td> <td>77.000 cm³</td> </tr> <tr> <td></td> <td>σ'v₀</td> <td>175 kPa</td> </tr> <tr> <td>ρs mesuré</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ρs estimé</td> <td>2.7</td> <td>g/cm³</td> </tr> </table>		Position	12.50	m	Section	A	38.480 cm ²	Hauteur initiale	H ₀	2.000 cm	Volume initial	V ₀	77.000 cm ³		σ'v ₀	175 kPa	ρs mesuré			ρs estimé	2.7	g/cm ³	Degré de saturation (Sr) % 98.90 121.96 Hauteur des pleins (cm) hp = 1.31 Masses volumiques apparentes <table border="1"> <tr> <th></th> <th>initiale</th> <th>finale</th> <th></th> </tr> <tr> <td>ρ</td> <td>2.11</td> <td>2.19</td> <td>g/cm³</td> </tr> <tr> <td>ρd</td> <td>1.77</td> <td>1.82</td> <td>g/cm³</td> </tr> </table>			initiale	finale		ρ	2.11	2.19	g/cm ³	ρd	1.77	1.82	g/cm ³																																																																																							
Position	12.50	m																																																																																																																									
Section	A	38.480 cm ²																																																																																																																									
Hauteur initiale	H ₀	2.000 cm																																																																																																																									
Volume initial	V ₀	77.000 cm ³																																																																																																																									
	σ'v ₀	175 kPa																																																																																																																									
ρs mesuré																																																																																																																											
ρs estimé	2.7	g/cm ³																																																																																																																									
	initiale	finale																																																																																																																									
ρ	2.11	2.19	g/cm ³																																																																																																																								
ρd	1.77	1.82	g/cm ³																																																																																																																								
Détermination de l'indice des vides "e" <table border="1"> <tr> <th>σ' kPa</th> <th>delta h mm</th> <th>dh / H0 %</th> <th>e</th> </tr> <tr> <td colspan="4">Compensation du gonflement jusqu'à 43 kPa</td> </tr> <tr><td>43</td><td>0.000</td><td>0.00</td><td>0.521</td></tr> <tr><td>50</td><td>0.061</td><td>0.31</td><td>0.517</td></tr> <tr><td>100</td><td>0.216</td><td>1.08</td><td>0.505</td></tr> <tr><td>200</td><td>0.525</td><td>2.63</td><td>0.481</td></tr> <tr><td>400</td><td>1.345</td><td>6.73</td><td>0.419</td></tr> <tr><td>800</td><td>1.678</td><td>8.39</td><td>0.394</td></tr> <tr><td>1600</td><td>2.057</td><td>10.29</td><td>0.365</td></tr> <tr><td>800</td><td>1.983</td><td>9.92</td><td>0.370</td></tr> <tr><td>400</td><td>1.864</td><td>9.32</td><td>0.379</td></tr> <tr><td>200</td><td>1.671</td><td>8.36</td><td>0.394</td></tr> <tr><td>100</td><td>1.414</td><td>7.07</td><td>0.414</td></tr> <tr><td>50</td><td>1.135</td><td>5.68</td><td>0.435</td></tr> <tr><td>6</td><td>0.481</td><td>2.41</td><td>0.485</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.521</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.521</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.521</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.521</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.521</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.521</td></tr> <tr><td></td><td></td><td>0.00</td><td>0.521</td></tr> </table>		σ' kPa	delta h mm	dh / H0 %	e	Compensation du gonflement jusqu'à 43 kPa				43	0.000	0.00	0.521	50	0.061	0.31	0.517	100	0.216	1.08	0.505	200	0.525	2.63	0.481	400	1.345	6.73	0.419	800	1.678	8.39	0.394	1600	2.057	10.29	0.365	800	1.983	9.92	0.370	400	1.864	9.32	0.379	200	1.671	8.36	0.394	100	1.414	7.07	0.414	50	1.135	5.68	0.435	6	0.481	2.41	0.485			0.00	0.521			0.00	0.521			0.00	0.521			0.00	0.521			0.00	0.521			0.00	0.521			0.00	0.521	Caractéristiques de compressibilité <table border="1"> <tr> <td>e_i</td> <td>0.521</td> <td></td> </tr> <tr> <td>e₀</td> <td>0.487</td> <td></td> </tr> <tr> <td>C_c</td> <td>0.146</td> <td>indice de compression</td> </tr> <tr> <td>C_s</td> <td>0.024</td> <td>indice de recompression (est.)</td> </tr> <tr> <td rowspan="5">C_v (m²/s)</td> <td>inexploitable</td> <td>43 à 50 kPa</td> </tr> <tr> <td>6.481E-08</td> <td>50 à 100 kPa</td> </tr> <tr> <td>7.330E-08</td> <td>100 à 200 kPa</td> </tr> <tr> <td>1.037E-07</td> <td>200 à 400 kPa</td> </tr> <tr> <td>1.405E-07</td> <td>400 à 800 kPa</td> </tr> <tr> <td></td> <td>1.807E-07</td> <td>800 à 1600 kPa</td> </tr> <tr> <td>σ'v₀ (kPa)</td> <td>175</td> <td>contrainte verticale effective en place</td> </tr> <tr> <td>σ'p (kPa)</td> <td>175</td> <td>contrainte verticale effective de préconsolidation</td> </tr> </table>		e _i	0.521		e ₀	0.487		C _c	0.146	indice de compression	C _s	0.024	indice de recompression (est.)	C _v (m ² /s)	inexploitable	43 à 50 kPa	6.481E-08	50 à 100 kPa	7.330E-08	100 à 200 kPa	1.037E-07	200 à 400 kPa	1.405E-07	400 à 800 kPa		1.807E-07	800 à 1600 kPa	σ'v ₀ (kPa)	175	contrainte verticale effective en place	σ'p (kPa)	175	contrainte verticale effective de préconsolidation
σ' kPa	delta h mm	dh / H0 %	e																																																																																																																								
Compensation du gonflement jusqu'à 43 kPa																																																																																																																											
43	0.000	0.00	0.521																																																																																																																								
50	0.061	0.31	0.517																																																																																																																								
100	0.216	1.08	0.505																																																																																																																								
200	0.525	2.63	0.481																																																																																																																								
400	1.345	6.73	0.419																																																																																																																								
800	1.678	8.39	0.394																																																																																																																								
1600	2.057	10.29	0.365																																																																																																																								
800	1.983	9.92	0.370																																																																																																																								
400	1.864	9.32	0.379																																																																																																																								
200	1.671	8.36	0.394																																																																																																																								
100	1.414	7.07	0.414																																																																																																																								
50	1.135	5.68	0.435																																																																																																																								
6	0.481	2.41	0.485																																																																																																																								
		0.00	0.521																																																																																																																								
		0.00	0.521																																																																																																																								
		0.00	0.521																																																																																																																								
		0.00	0.521																																																																																																																								
		0.00	0.521																																																																																																																								
		0.00	0.521																																																																																																																								
		0.00	0.521																																																																																																																								
e _i	0.521																																																																																																																										
e ₀	0.487																																																																																																																										
C _c	0.146	indice de compression																																																																																																																									
C _s	0.024	indice de recompression (est.)																																																																																																																									
C _v (m ² /s)	inexploitable	43 à 50 kPa																																																																																																																									
	6.481E-08	50 à 100 kPa																																																																																																																									
	7.330E-08	100 à 200 kPa																																																																																																																									
	1.037E-07	200 à 400 kPa																																																																																																																									
	1.405E-07	400 à 800 kPa																																																																																																																									
	1.807E-07	800 à 1600 kPa																																																																																																																									
σ'v ₀ (kPa)	175	contrainte verticale effective en place																																																																																																																									
σ'p (kPa)	175	contrainte verticale effective de préconsolidation																																																																																																																									
Cu mesuré au pénétromètre de poche kPa Coefficient de fluage Cα à σ'v0 = 175 kPa : Cα 7.32E-04 k (m/s) estimé / mesuré																																																																																																																											
Mesure de la perméabilité à charge variable																																																																																																																											
σ kPa	Δh mm	h0 mm	h1 mm	durée d'écoulement seconde	perméabilité k (m/s)																																																																																																																						
					#DIV/0!																																																																																																																						
					#DIV/0!																																																																																																																						
					#DIV/0!																																																																																																																						
					#DIV/0!																																																																																																																						
P.V. n° OE-22-001		Le chargé d'essais		Vérifié par le RE																																																																																																																							
du 12/12/22		L.Chagot		F.Rojat																																																																																																																							
		le : 12/12/22		le : 12/12/22																																																																																																																							
signature		signature		signature																																																																																																																							

Dossier: 20-CE-0173
Provenance: RN85 - Corps
Sondage S9-SC1
Echantillon n° 1 - de 12.50 à 13.00 m
Position : 12.50 m

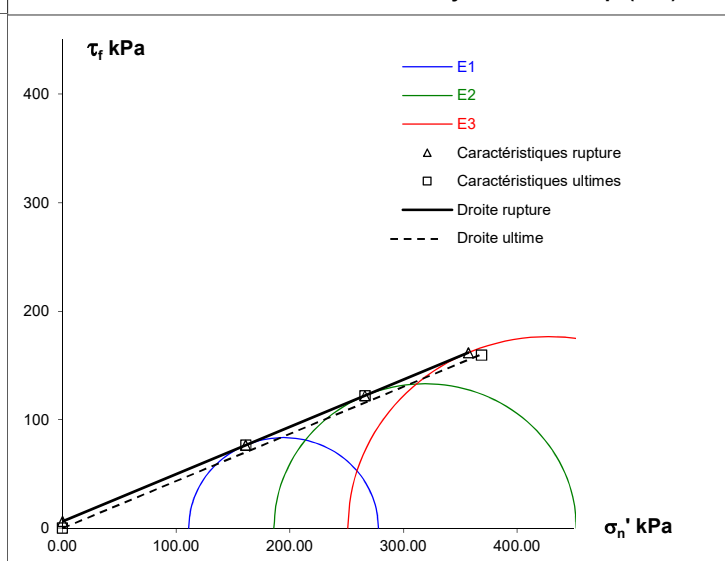
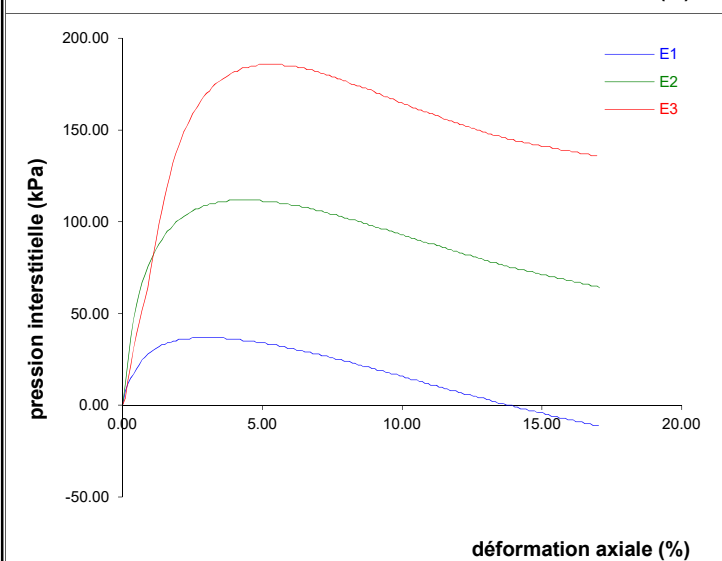
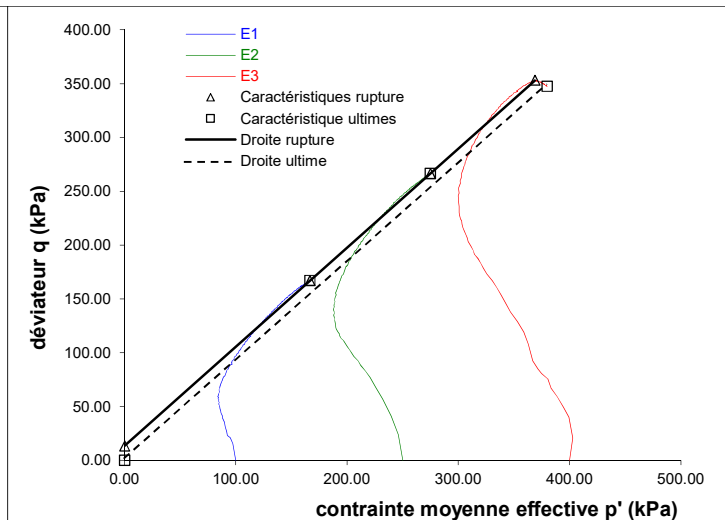
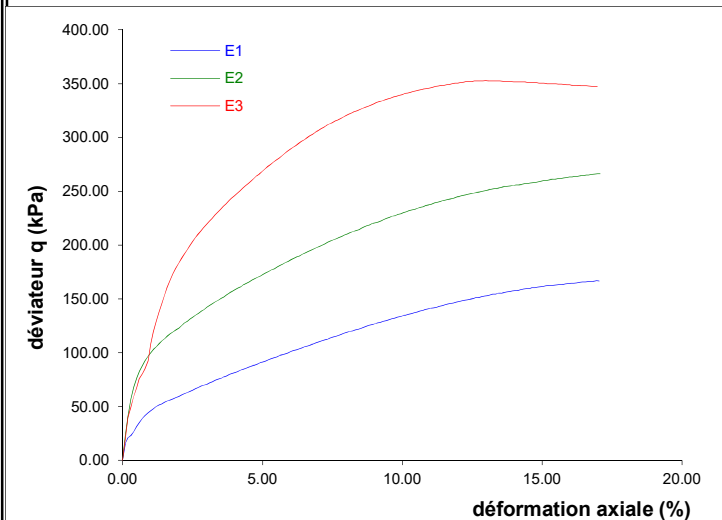


N° dossier : 20-CE-0173		Contraintes dans le sol en place	
Provenance : Corps		Profondeur moyenne de prélèvement : z = 10.90 m	
Sondage : S9-SC1-I1		Contrainte totale en place estimée : $\sigma_{v0} = 218.00$ kPa	
Echantillons : E1 à E3		Profondeur du toit de la nappe : z_w = 5 m	
Cotes : 10.50 à 11.30 m		Pression interstitielle en place estimée : $u_0 = 59$ kPa	
Nature : Argile grise du Beaumont		Date de l'essai : du 21/03/2022 au 24/03/2022	

Préparation des éprouvettes de sol		masse volumique des particules solides	
Eprouvettes : intactes	recompactées	estimée ρ_s 2.7 g/cm³	mesurée

N°	Contraintes et déformations à la rupture								Caractéristiques ultimes				
	Condition de rupture : déviateur q_{max} / (σ'_1/σ'_3) _{max} / déformation de : 15 %								à la déformation maximale mesurée				
	p' kPa	q kPa	u kPa	ε_v %	σ'_1 kPa	σ'_3 kPa	s' kPa	t kPa	p' kPa	q kPa	u kPa	σ'_1 kPa	σ'_3 kPa
E1	166.64	166.91	-11.00	17.03	277.91	111.00	194.46	83.46	166.64	166.91	-11.00	277.91	111.00
E2	274.73	266.19	64.00	17.06	452.19	186.00	319.10	133.10	274.73	266.19	64.00	452.19	186.00
E3	368.64	352.91	149.00	12.98	603.91	251.00	427.46	176.46	379.78	347.35	136.00	611.35	264.00
E4													

Les valeurs du tableau sont données hors contre-pression ce qui peut conduire à des pressions interstitielles négatives



Résultats :

	Rupture	Ultimes
c' (kPa)	6.3	0.0
ϕ' (°)	23.5	23.4

(Ech. E3 uniquement)

P.V. n°	TR-22-002
du	30/09/22

Le chargé d'essais	
L.Chagot	
le : 30/09/22	
signature	

Vérifié par le RE	
F.Rojat	
le : 30/09/22	
signature	

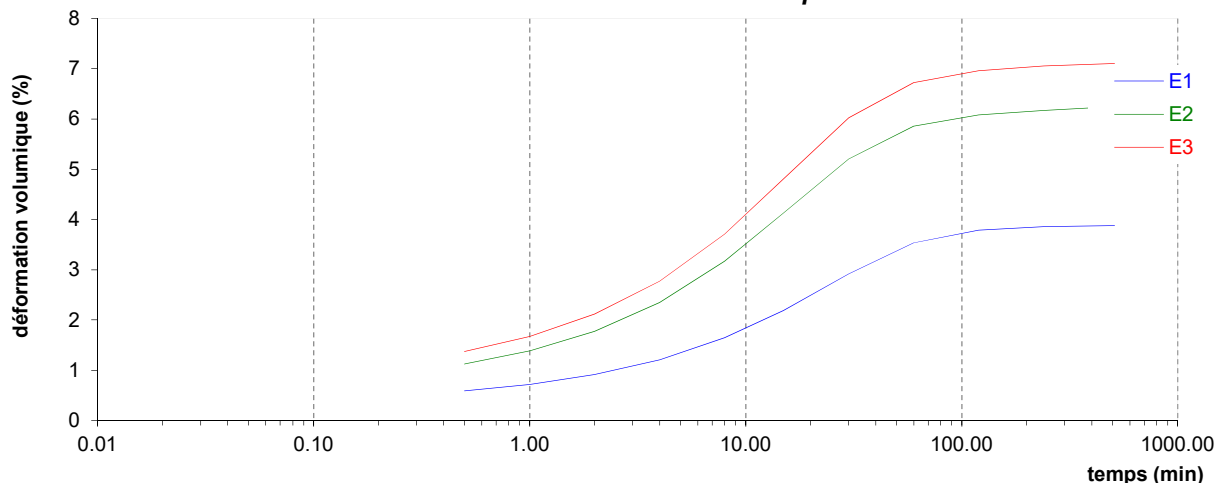
Photos des
 éprouvettes
 après essais

 N° dossier : **20-CE-0173**
 Provenance : **Corps**
 Sondage : **S9-SC1-I1**
 Echantillons : **E1 à E3**
 Cotes (m) : **10.50** à **11.30**
 Nature : **Argile grise du Beaumont**
CARACTERISTIQUES INITIALES ET FINALES DES EPROUVETTES

N° éprouvette	E1	E2	E3	E4
Hauteur initiale H_i (mm)	99.80	99.60	100.20	
Diamètre initial D_i (mm)	50.20	50.10	49.80	
Volume initial V_i (cm ³)	197.53	196.35	195.17	
Teneur en eau initiale w_i (%)	22.89	23.85	20.38	
Masse volumique humide initiale ρ (g/cm ³)	2.07	2.08	2.06	
Masse volumique sèche initiale ρ_d (g/cm ³)	1.69	1.68	1.71	
Indice des vides initial e (-)	0.60	0.61	0.57	
Degré de saturation initial Sr_i (%)	102.99	105.83	95.78	
Teneur en eau finale w_f (%)	23.07	25.52	20.88	
				MOYENNE
				22.37
				2.07
				1.69
				0.59
				101.53
				23.16

DEROULEMENT DE L'ESSAI

N° éprouvette	E1	E2	E3	E4
Contrainte effective durant la saturation (kPa)	10.00	10.00	10.00	
Contre-pression en fin de saturation u_{cp} (kPa)	650.00	650.00	650.00	
Coefficient B en fin de saturation (≥ 0.95)	0.96	0.96	0.96	
Pression effective de consolidation isotrope p_c (kPa)	100.00	250.00	400.00	
Consolidation : volume d'eau expulsé ΔV_c (cm ³)	7.66	12.33	13.87	
Consolidation : déformation volumique ε_v (-)	0.0388	0.0628	0.0711	
Hauteur estimée en fin de consolidation H_c (mm)	98.51	97.51	97.83	
Diamètre estimé en fin de consolidation D_c (mm)	49.54	49.02	48.58	
Cisaillement : vitesse d'écrasement (mm/min)	0.0500	0.0500	0.0500	
Correction due à l'élasticité de la membrane	oui	oui	oui	
Correction due aux bandes de papier filtre	oui	oui	oui	

Courbes de consolidation isotrope

Observations :

Eprouvettes obtenues par taille à partir d'échantillons carottés intacts conservés en gaine paraffinée.
 La section de l'éprouvette est recalculée tout au long de l'essai pour tenir compte de la déformation radiale.
 Les caractéristiques ultimes ont été calculées uniquement sur l'échantillon E3, seul à présenter un pic, avec une cohésion ultime imposée à zéro.

P.V. n° TR-22-002

du 30/09/22

Vérifié par le RE

F.Rojat

le : 30/09/22

signature

N° dossier : **20-CE-0173**

 Provenance : **Corps**

 Sondage : **S9-SC3**

 Echantillons : **E1 à E3**

 Cotes : **6.50** à **7.10** m

 Nature : **Argile grise du Beaumont**
Contraintes dans le sol en place

 Profondeur moyenne de prélèvement : **z = 6.80 m**
 Contrainte totale en place estimée : **$\sigma_{v0} = 136.00$ kPa**
 Profondeur du toit de la nappe : **z_w = 5 m**
 Pression interstitielle en place estimée : **$u_0 = 18$ kPa**

 Date de l'essai : du **07/12/2022** au **19/12/2022**
Préparation des éprouvettes de sol

 Eprouvettes : **intactes** ~~recompactées~~
masse volumique des particules solides

 estimée **$\rho_s = 2.7$ g/cm³**
 mesurée

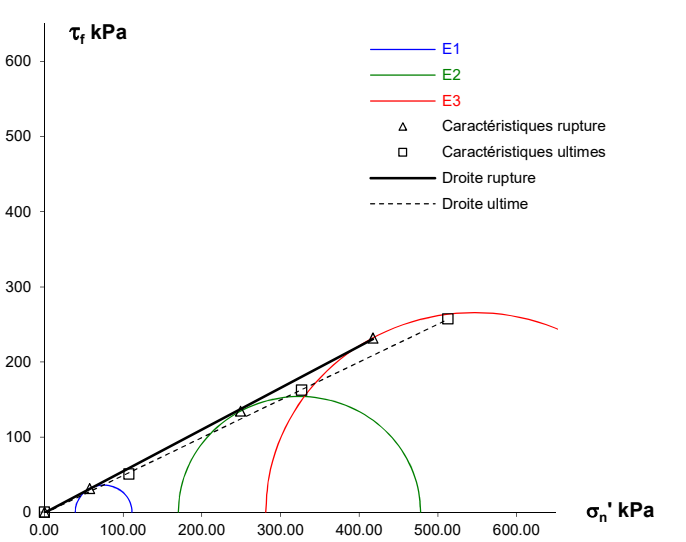
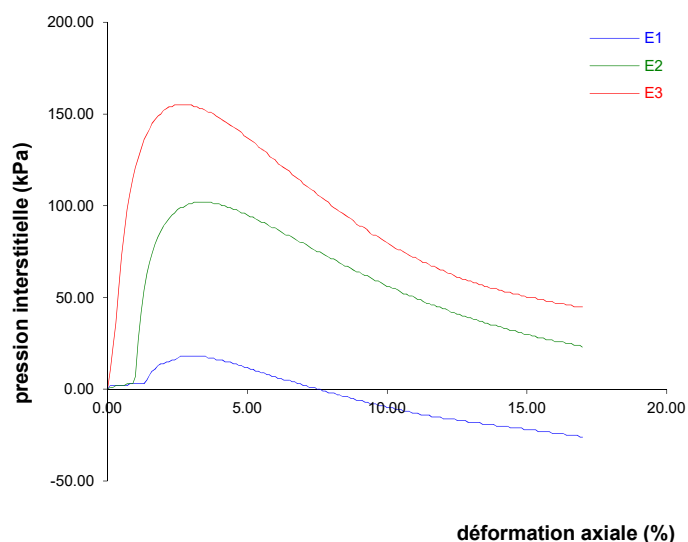
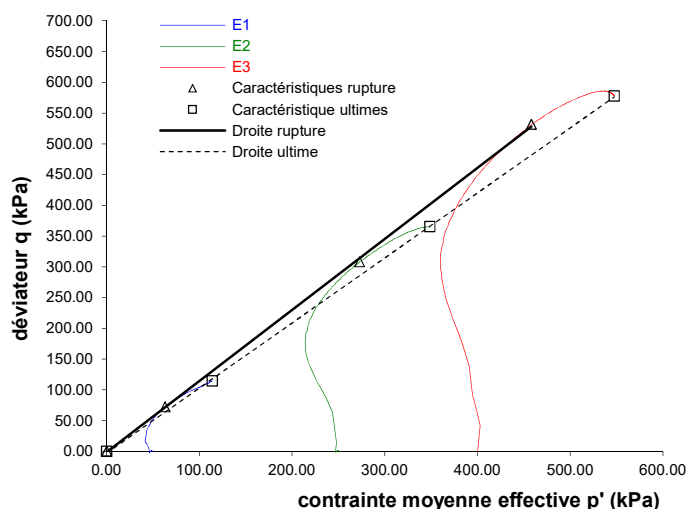
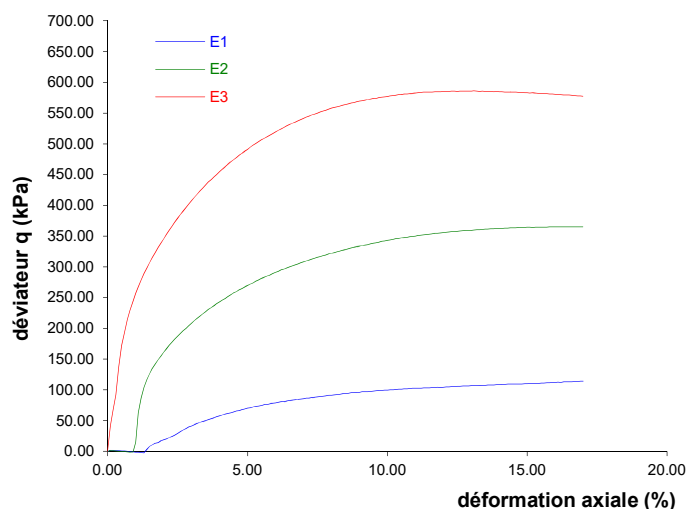
Contraintes et déformations à la rupture

 Condition de rupture : ~~déviateur q_{max} / (σ'_1/σ'_3)_{max} / déformation de : 17 %~~
Caractéristiques ultimes

à la déformation maximale mesurée

N°	p' kPa	q kPa	u kPa	ε_v %	σ'_1 kPa	σ'_3 kPa	s' kPa	t kPa	p' kPa	q kPa	u kPa	σ'_1 kPa	σ'_3 kPa
E1	63.05	72.16	11.00	5.21	111.16	39.00	75.08	36.08	114.07	114.20	-26.00	190.20	76.00
E2	272.64	307.91	80.00	7.00	477.91	170.00	323.95	153.95	348.59	364.77	23.00	591.77	227.00
E3	458.08	531.23	119.00	6.50	812.23	281.00	546.62	265.62	547.46	577.37	45.00	932.37	355.00
E4													

Les valeurs du tableau sont données hors contre-pression ce qui peut conduire à des pressions interstitielles négatives


Résultats :

	Rupture	Ultime
c' (kPa)	0.0	0.0
ϕ' (°)	29.1	27.0

 P.V. n° **TR-22-003**

 du **16/01/23**
Le chargé d'essais
L.Chagot

 le : **16/01/23**
 signature

Vérifié par le RE
F.Rojat

 le : **16/01/23**
 signature

Photos des
 éprouvettes
 après essais

 N° dossier : **20-CE-0173**

 Provenance : **Corps**

 Sondage : **S9-SC3**

 Echantillons : **E1 à E3**

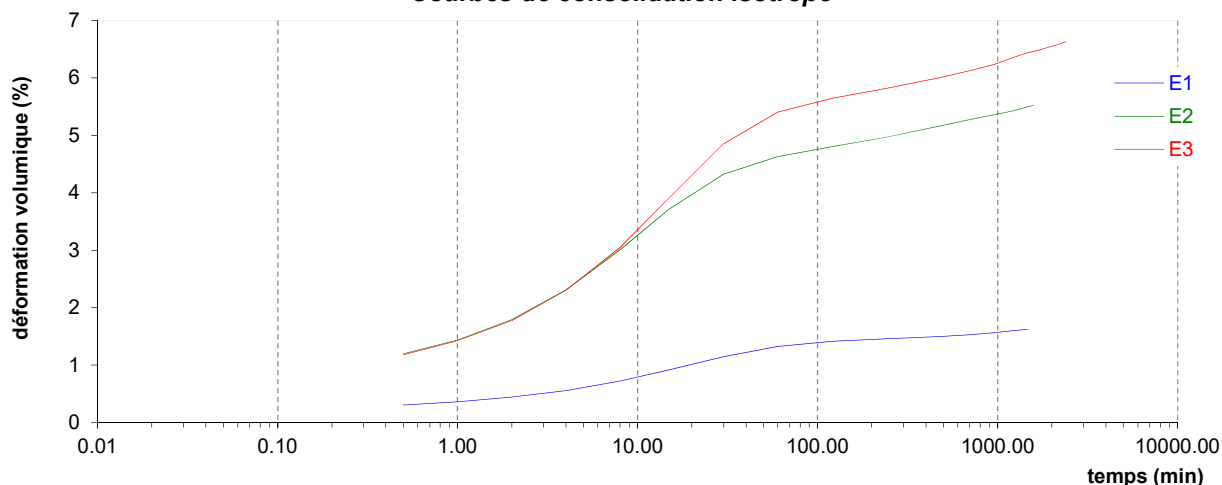
 Cotes (m) : **6.50** à **7.10**

 Nature : **Argile grise du Beaumont**
CARACTERISTIQUES INITIALES ET FINALES DES EPROUVETTES

N° éprouvette	E1	E2	E3	E4
Hauteur initiale H_i (mm)	100.00	100.10	100.10	
Diamètre initial D_i (mm)	49.90	49.60	49.30	
Volume initial V_i (cm ³)	195.56	193.41	191.08	
Teneur en eau initiale w_i (%)	21.79	20.47	18.62	
Masse volumique humide initiale ρ (g/cm ³)	2.08	2.12	2.12	
Masse volumique sèche initiale ρ_d (g/cm ³)	1.71	1.76	1.78	
Indice des vides initial e (-)	0.58	0.54	0.51	
Degré de saturation initial S_{r_i} (%)	100.96	102.76	98.02	
Teneur en eau finale w_f (%)	22.12	20.44	18.97	
				MOYENNE
				20.29
				2.10
				1.75
				0.54
				100.58
				20.51

DEROULEMENT DE L'ESSAI

N° éprouvette	E1	E2	E3	E4
Contrainte effective durant la saturation (kPa)	10.00	10.00	10.00	
Contre-pression en fin de saturation u_{cp} (kPa)	650.00	650.00	650.00	
Coefficient B en fin de saturation (≥ 0.95)	0.96	0.96	0.98	
Pression effective de consolidation isotrope p_c (kPa)	50.00	250.00	400.00	
Consolidation : volume d'eau expulsé ΔV_c (cm ³)	3.17	10.68	12.67	
Consolidation : déformation volumique ε_v (-)	0.0162	0.0552	0.0663	
Hauteur estimée en fin de consolidation H_c (mm)	99.46	98.26	97.89	
Diamètre estimé en fin de consolidation D_c (mm)	49.63	48.66	48.17	
Cisaillement : vitesse d'écrasement (mm/min)	0.0500	0.0500	0.0500	
Correction due à l'élasticité de la membrane	oui	oui	oui	
Correction due aux bandes de papier filtre	oui	oui	oui	

Courbes de consolidation isotrope

Observations :

Eprouvettes obtenues par taille à partir d'échantillons carottés intacts conservés en gaine paraffinée.
 La section de l'éprouvette est recalculée tout au long de l'essai pour tenir compte de la déformation radiale.
 La cohésion obtenue étant légèrement négative, une valeur nulle a été imposée dans la régression linéaire.

P.V. n° TR-22-003

du 16/01/23

Vérifié par le RE

F.Rojat

le : 16/01/23

signature



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Cerema

CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

UGA
Université
Grenoble Alpes



ENTPE

L'école de l'aménagement durable des territoires



UNION EUROPÉENNE

Fonds Européen de
Développement Régional



EN PARTENARIAT AVEC LA RÉGION AUVERGNE-RHÔNE-ALPES