



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la  
communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle  
comunicazioni DATEC

**Bundesamt für Strassen**  
**Office fédéral des routes**  
**Ufficio federale delle Strade**

# **Essais croisés interlaboratoires en mécanique des sols et des roches**

**Ringversuche in Boden– und Felsmechanik**

**Cross–tests in soil and rock mechanics**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)**  
**Faculté de l'Environnement Naturel, Architectural et Construit**  
**J.-F. Mathier, Geol. Dipl. UNIL**  
**G. Gruaz, ing. civil ETS, REG A**

**Mandat de recherche VSS 1998/188 sur demande de  
l'Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS**



Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie  
Office fédéral des routes

# **Essais croisés inter-laboratoires en mécanique des sols et des roches**

## **Ringversuche in Boden- und Felsmechanik**

**Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne  
Faculté de l'Environnement Naturel, Architectural et Construit**

**J.-F. Mathier, Laboratoire de mécanique des roches  
G. Gruaz, Laboratoire de mécanique des sols**

**Mandat de recherche VSS 1998/198 sur la proposition de  
l'Union des professionnels suisses de la route**

**Mai 2005**



## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>7</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>8</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>9</b>
<b>1. MANDAT ET OBJECTIFS</b> .....	<b>10</b>
1.1 PREAMBULE.....	10
1.2 MANDAT.....	10
1.3 OBJECTIFS .....	10
1.4 DEMARCHE ET PLANNING.....	11
1.4.1 Sélection des laboratoires.....	11
1.4.2 Préparation des échantillons.....	11
1.4.3 Choix des essais .....	11
1.4.4 Réalisation des essais.....	12
<b>2. NORMES NATIONALES ET INTERNATIONALES</b> .....	<b>13</b>
2.1 NORMES UTILISEES .....	13
<b>3. METHODE DE LA RECHERCHE</b> .....	<b>14</b>
3.1 LABORATOIRES PARTICIPANTS .....	14
3.2 ESSAIS REALISES .....	14
3.3 TYPES DE MATERIAUX UTILISES .....	15
3.3.1 Sols.....	15
3.3.2 Roches.....	15
3.4 MODE DE PREPARATION DES ECHANTILLONS .....	15
3.4.1 Sols.....	15
3.4.2 Roches.....	16
<b>4. RESULTATS OBTENUS SUR LES SOLS</b> .....	<b>17</b>
4.1 CONSOLIDATION UNIAXIALE A L'OEDOMETRE .....	17
4.1.1 Résultats.....	17
4.1.2 Commentaires, analyses et recommandations.....	17
4.2 GRANULOMETRIE ET SEDIMENTOMETRIE.....	25
4.2.1 Résultats.....	25
4.2.2 Commentaires, analyses et recommandations.....	25
4.3 ESSAIS DE CISAILLEMENT A LA BOITE DE CASAGRANDE.....	30
4.3.1 Résultats.....	30
4.3.2 Commentaires, analyses et recommandations.....	30

4.4	ESSAIS DE DETERMINATION DE LA MASSE VOLUMIQUE APPARENTE HUMIDE ET DE LA MASSE SPECIFIQUE DES GRAINS .....	37
4.4.1	Résultats .....	37
4.4.2	Commentaires, analyses et recommandations .....	40
4.5	ESSAIS DE DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU ET DES LIMITES DE CONSISTANCE D'ATTERBERG .....	41
4.5.1	Résultats .....	41
4.5.2	Commentaires, analyses et recommandations .....	45
<b>5</b>	<b>RESULTATS OBTENUS SUR LES ROCHES.....</b>	<b>46</b>
5.1	GENERALITES .....	46
5.2	LABORATOIRES PARTICIPANTS .....	46
5.2.1	Laboratoire L1 .....	46
5.2.2	Laboratoire L2 .....	46
5.2.3	Laboratoire L3 .....	46
5.2.4	Laboratoire L5 .....	47
5.2.5	Laboratoire L7 .....	47
5.2.6	Laboratoire L8 .....	47
5.2.7	Laboratoire L9 .....	47
5.3	EXPLOITATION DES RESULTATS DES ESSAIS .....	47
5.3.1	Masse volumique apparente .....	49
5.3.2	Compression uniaxiale .....	51
5.3.3	Module de déformation .....	53
5.3.4	Résistance à la traction indirecte .....	56
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONS ET PROPOSITIONS POUR LA POURSUITE DE CETTE ETUDE.....</b>	<b>58</b>
6.1	CONCLUSIONS .....	58
6.2	PROPOSITIONS DE POURSUITE DE L'ETUDE.....	59
	<b>ANNEXES.....</b>	<b>61</b>
	ANNEXE 1. MODE OPERATOIRE POUR LA PREPARATION DES ECHANTILLONS DE SOLS.....	61
	ANNEXE 2. RESULTATS DES ESSAIS POUR LE GRES .....	62
	ANNEXE 3. RESULTATS DES ESSAIS POUR L'ANHYDRITE .....	63
	ANNEXE 4. RESULTATS DES ESSAIS POUR LE MARBRE .....	64
	ANNEXE 5. RESULTATS DES ESSAIS POUR LE CALCAIRE.....	65

## Liste des tableaux et figures

- Tableau 1.1 *Laboratoires de mécanique des roches*
- Tableau 1.2 *Laboratoires de mécanique des sols*
- Tableau 2.1 *Liste des normes utilisées*
- Tableau 3.1 *Essais de mécanique des roches*
- Tableau 3.2 *Essais de mécanique des sols*
- Figure 4.1.1 *Consolidation à l'oedomètre incrémental pour le mélange de sable et opalite*
- Tableau 4.1.1 *Valeurs de l'indice des vides ( $e$ ) en fonction de la contrainte effective ( $\sigma'$  [kN/m<sup>2</sup>]) pour le mélange sable+opalite*
- Figure 4.1.2 *Valeurs de  $C_c$  avec la moyenne et son écart-type pour le mélange sable+opalite*
- Figure 4.1.3 *Valeurs de  $C_s$  avec la moyenne et son écart-type pour le mélange sable+opalite*
- Figure 4.1.4 *Consolidation à l'oedomètre incrémental pour le limon de Bioley*
- Tableau 4.1.2 *Valeurs de l'indice des vides ( $e$ ) en fonction de la contrainte effective ( $\sigma'$  [kN/m<sup>2</sup>]) pour le limon de Bioley.*
- Figure 4.1.5 *Valeurs de  $C_c$  avec la moyenne et son écart-type pour le limon de Bioley*
- Figure 4.1.6 *Valeurs de  $C_s$  avec la moyenne et son écart-type pour le limon de Bioley*
- Figure 4.1.7 *Consolidation à l'oedomètre incrémental pour l'argile de Genève*
- Tableau 4.1.3 *Valeurs de l'indice des vides ( $e$ ) en fonction de la contrainte effective ( $\sigma'$  [kN/m<sup>2</sup>]) pour l'argile de Genève*
- Figure 4.1.8 *Valeurs de  $C_c$  avec la moyenne et son écart-type pour l'argile de Genève*
- Figure 4.1.9 *Valeurs de  $C_s$  avec la moyenne et son écart-type pour l'argile de Genève*
- Figure 4.2.1 *Résultats de la granulométrie et de la sédimentométrie pour le mélange de sable+opalite*
- Tableau 4.2.1 *Valeurs des pourcentages granulométriques pour le mélange de sable+opalite*
- Figure 4.2.2 *Résultats de la granulométrie et de la sédimentométrie pour le limon de Bioley*
- Tableau 4.2.2 *Valeurs des pourcentages granulométriques pour le limon de Bioley*
- Figure 4.2.3 *Résultats de la granulométrie et de la sédimentométrie pour l'argile de Genève*
- Tableau 4.2.3 *Valeurs des pourcentages granulométriques pour l'argile de Genève*
- Figure 4.3.1 *Résultats des essais de cisaillement direct sur le mélange de sable+opalite*
- Tableau 4.3.1 *Résultats des essais de cisaillement direct effectués sur le mélange de sable+opalite*
- Figure 4.3.2 *Valeurs de l'angle de frottement interne  $\phi'$  avec la moyenne et son écart-type pour le mélange de sable+opalite*
- Figure 4.3.3 *Valeurs de la cohésion effective  $c'$  avec la moyenne et son écart-type pour le mélange de sable+opalite*
- Figure 4.3.4 *Résultats des essais de cisaillement effectués sur le limon de Bioley*
- Tableau 4.3.2 *Résultats des essais de cisaillement direct effectués sur le limon de Bioley*
- Figure 4.3.5 *Valeurs de l'angle de frottement interne  $\phi'$  avec la moyenne et son écart-type pour le limon de Bioley*

- Figure 4.3.6 Valeurs de la cohésion effective  $c'$  avec la moyenne et son écart-type pour le limon de Bioley
- Figure 4.3.7 Résultats des essais de cisaillement direct sur l'argile de Genève.
- Tableau 4.3.3 Résultats des essais de cisaillement direct effectués sur l'argile de Genève.
- Figure 4.3.8 Valeurs de l'angle de frottement interne  $\phi'$  avec la moyenne et son écart-type pour l'argile de Genève
- Figure 4.3.9 Valeurs de la cohésion effective  $c'$  avec la moyenne et son écart-type pour l'argile de Genève
- Tableau 4.4.1 Masse volumique apparente et masse volumique des grains
- Figure 4.4.1 Masse volumique apparente humide avec écart-type pour le sable+opalite
- Figure 4.4.2 Masse volumique apparente humide avec écart-type pour le limon de Bioley
- Figure 4.4.3 Masse volumique apparente humide avec écart-type pour l'argile de Genève
- Figure 4.4.4 Masse volumique des grains avec écart-type pour le mélange sable+opalite
- Figure 4.4.5 Masse volumique des grains avec écart-type pour le limon de Bioley
- Figure 4.4.6 Masse volumique des grains avec écart-type pour l'argile de Genève
- Tableau 4.5.1 Valeurs de la teneur en eau  $w$
- Figure 4.5.1 Teneur en eau naturelle avec la moyenne et son écart-type pour le sable+opalite
- Figure 4.5.2 Teneur en eau naturelle avec la moyenne et son écart-type pour le limon de Bioley
- Figure 4.5.3 Teneur en eau naturelle avec la moyenne et son écart-type pour l'argile de Genève
- Tableau 4.5.2 Valeurs des limites de liquidité ( $w_L$ ) et de plasticité ( $w_P$ )
- Figure 4.5.4 Limite de liquidité  $w_L$  avec la moyenne et son écart-type pour le mélange sable+opalite
- Figure 4.5.5 Limite de plasticité  $w_P$  avec la moyenne et son écart-type pour le mélange sable+opalite
- Figure 4.5.6 Limite de liquidité  $w_L$  avec la moyenne et son écart-type pour le limon de Bioley
- Figure 4.5.7 Limite de plasticité  $w_P$  avec la moyenne et son écart-type pour le limon de Bioley
- Figure 4.5.8 Limite de liquidité  $w_L$  avec la moyenne et son écart-type pour l'argile de Genève
- Figure 4.5.9 Limite de plasticité  $w_P$  avec la moyenne et son écart-type pour l'argile de Genève
- Tableau 5.1 Masse volumique apparente [ $t/m^3$ ]
- Figure 5.1 Représentation graphique des résultats de la masse volumique apparente
- Tableau 5.2 Test de Cochran sur les valeurs de la masse volumique apparente
- Tableau 5.3 Test de Grubbs sur les valeurs de la masse volumique apparente
- Tableau 5.4 Résistance en compression uniaxiale [ $MN/m^2$ ]
- Figure 5.2 Représentation graphique des résultats de la résistance en compression uniaxiale
- Tableau 5.5 Test de Cochran sur les valeurs de la résistance en compression uniaxiale
- Tableau 5.6 Test de Grubbs sur les valeurs de la résistance en compression uniaxiale

- Tableau 5.7*    *Module de déformation [MN/m<sup>2</sup>]*
- Figure 5.3*    *Représentation graphique des résultats du module E*
- Tableau 5.8*    *Test de Cochran sur les valeurs du module E*
- Tableau 5.9*    *Test de Grubbs sur les valeurs du module E*
- Tableau 5.10*    *Module E déterminé avec jauges*
- Tableau 5.11*    *Résistance à la traction indirecte [MN/m<sup>2</sup>]*
- Figure 5.4*    *Représentation graphique des résultats de la résistance en traction indirecte*
- Tableau 5.12*    *Test de Cochran sur les valeurs de la résistance en traction indirecte*
- Tableau 5.13*    *Test de Grubbs sur les valeurs de la résistance en traction indirecte*



## RÉSUMÉ

Suite aux diverses démarches et investigations effectuées par les laboratoires d'essai en vue de l'obtention de leur accréditation, l'Office fédéral de métrologie et d'accréditation (METAS) s'était rendu compte qu'en Suisse il y avait un manque important d'essais croisés à disposition dans tous les domaines de la mécanique des sols et des roches. De plus, on avait constaté que les rares essais croisés qui avaient été réalisés par le passé présentaient parfois de grandes dispersions en fonction du laboratoire qui les exécutait. Afin d'y remédier, les laboratoires de mécanique des sols et des roches de l'EPFL ont obtenu un crédit de recherche auprès de l'Office fédéral des routes (OFROU) pour organiser un programme d'essais inter-laboratoires.

Par la même occasion il a été décidé de confectionner des matériaux de référence aux caractéristiques parfaitement connues afin de pouvoir également y recourir dans le futur. Un choix d'essais a été proposé à différents laboratoires accrédités en géotechnique et en mécanique des roches afin de savoir s'ils étaient intéressés à participer à cette étude.

Les essais suivants ont été proposés en mécanique des roches: masse volumique apparente humide, compression simple, module de déformation, traction indirecte; et en mécanique des sols: teneur en eau, masse volumique apparente humide et masse spécifique des grains, granulométrie et sédimentométrie, limites de liquidité et de plasticité, cisaillement à la boîte et oedomètre incrémental.

L'étude a consisté essentiellement en la réalisation des essais, leur exploitation par des méthodes statistiques, ainsi que l'analyse et la comparaison des résultats (reproductibilité) obtenus par les différents laboratoires.

L'analyse des résultats a permis de mettre en évidence les tendances suivantes:

- D'une manière générale il existe une relativement bonne concordance des résultats des essais en fonction des différents laboratoires
- Pour certains essais la dispersion a été plus importante, mais cela est plutôt dû, pour la majorité des cas, aux conditions d'essais qui n'étaient pas tout à fait identiques, car cela n'avait pas été spécifié de manière suffisamment précise au départ.

Ces résultats pourront être utilisés à l'avenir pour permettre de donner une variabilité acceptable des paramètres d'essais.

## ZUSAMMENFASSUNG

Anlässlich verschiedener Vorgehen und Nachforschungen der Prüflabore im Hinblick auf ihre Akkreditierung, wurde sich das Bundesamt für Metrologie und Akkreditierung (METAS) bewusst, dass es in der Schweiz einen grossen Mangel an vorhandenen Ringversuchen in allen Bereichen der Boden- und der Felsmechanik gab. Ausserdem wurde festgestellt, dass die seltenen in der Vergangenheit durchgeführten Ringversuche manchmal große Streuungen in Funktion des Versuchslabors aufwiesen. Um dem abzuhelpfen haben die Boden- und Felsmechanik-Laboratorien der EPFL vom Bundesamt für Straßen (ASTRA) einen Forschungsauftrag für die Organisation von Ringversuchen zwischen Versuchsanstalten erhalten.

Bei der selben Gelegenheit wurden auch Referenzstoffe mit bekannten Eigenschaften, die auch in der Zukunft benützt werden können, hergestellt. Eine Auswahl von Versuchen wurde verschiedenen in der Geotechnik und der Felsmechanik akkreditierten Laboratorien vorgeschlagen, um zu wissen, ob sie an einer Teilnahme an dieser Studie interessiert waren.

Folgende Versuche wurden vorgeschlagen:

Felsmechanik: Raumbgewicht, einachsige Druckfestigkeit, Verformungsmodul, indirekte Zugfestigkeit;

Bodenmechanik: Wassergehalt, Raumbgewicht und Korndichte, Korngrössenverteilung und Sedimentation, Fliess- und Ausrollgrenzen, Scherfestigkeit und inkrementaler Oedomerversuch.

Die Studie bestand hauptsächlich darin, die Versuche zu verwirklichen, sie mit statistischen Methoden auszuwerten und die Ergebnisse der verschiedenen Laboratorien zu analysieren und zu vergleichen (Reproduzierbarkeit).

Die Analyse der Ergebnisse hat es erlaubt, folgende Tendenzen hervorzuheben:

- Im allgemeinen ist die Übereinstimmung der Versuchsergebnisse der verschiedenen Laboratorien ziemlich gut.
- Für manche Versuche gibt es zwar eine grössere Streuung; in den meisten Fällen ist diese aber eher auf nicht ganz identische Versuchsbedingungen, die nicht präzise genug angegeben wurden, zurückzuführen.

Diese Ergebnisse werden in Zukunft dazu dienen können, eine akzeptable Variabilität der Versuchsparameter anzugeben.

## SUMMARY

During various investigations performed by testing laboratories in order to obtain their accreditation, the Swiss Federal Office of Metrology and Accreditation (METAS) found out that, in Switzerland, there was an important lack of crossed tests available in all areas of rock and soil mechanics. Moreover, the few existing crossed tests results were sometimes varying a lot as a function of the laboratory they were performed at. Having recognized this problem, the soil and rock mechanics laboratories at EPFL obtained from the Swiss Federal Roads Authority (FEDRO) funding destined to organize an inter-laboratory testing programme.

Within this project, it was decided to define materials, whose characteristics were precisely known, for future reference. A panel of tests was proposed to different accredited geotechnical and rock mechanics laboratories in order to know whether or not they were interested in participating in this study.

The following tests were proposed for rock mechanics: mass unit weight, unconfined compression strength, modulus of elasticity, indirect tensile strength and for soil mechanics: water content, mass unit weight and unit weight of solid particles, grain size distribution and sedimentometry, liquid and plastic limits, direct shear test and incremental oedometer.

The study essentially consisted in performing tests, analysing them by statistical methods and comparing the results (reproducibility) obtained by the different laboratories.

The analysis of the results outlined the following trends:

- In general, a relatively good agreement was observed among the results of the various laboratories
- For some specific tests the variations were more pronounced. This could be attributed to the somewhat variable tests conditions. Some of the latter had indeed not been sufficiently precisely defined at the beginning of the study.

Those results are to be used in the future to define an acceptable variability of test parameters.



# 1. Mandat et objectifs

## 1.1 Préambule

Lors des démarches et investigations des laboratoires en vue de l'obtention d'une accréditation auprès du Service d'Accréditation Suisse, ce dernier s'est rendu compte, qu'en Suisse, il n'y avait, pour ainsi dire, jamais eu d'essais croisés entre les différents laboratoires d'essais en mécanique des sols et des roches. De plus, on a constaté que pour les rares essais croisés réalisés par le passé, ces derniers présentaient des dispersions importantes en fonction du laboratoire qui les exécutait.

Les écarts parfois observés sur certains résultats d'essais ont conduit les laboratoires LMR+S de l'EPFL à proposer un programme d'essais croisés tant en mécanique des sols qu'en mécanique des roches.

## 1.2 Mandat

Suite à ce constat, les LMS+R de l'EPFL ont sollicité et obtenu un crédit de recherche auprès de l'Office fédéral des routes (OFROU) pour promouvoir un programme d'essais croisés inter-laboratoires dans les domaines de la mécanique des sols et des roches. Le mandat de recherche correspondant porte le numéro 1998/188. Il est libellé par l'OFROU de la manière suivante : « Essais croisés inter-laboratoires en mécanique des sols et des roches ». Le crédit a été accordé en juillet 2001.

## 1.3 Objectifs

La recherche a pour objectifs de:

- 1) mettre en place une méthodologie pour la fabrication d'échantillons à partir de matériaux bien connus afin d'avoir à l'avenir des matériaux de référence à disposition
- 2) effectuer différents essais de laboratoire en mécanique des sols et des roches sur des matériaux de référence pour apprécier la dispersion des résultats obtenus en fonction des laboratoires qui les réalisent
- 3) démontrer et quantifier au moyen de nombreux essais et par une analyse statistique la reproductibilité et la répétitivité des résultats obtenus pour ces essais
- 4) apporter la preuve que le respect d'une assurance qualité contribue à une amélioration des résultats d'essai.

## 1.4 Démarche et planning

Le programme de recherche s'est déroulé selon les étapes suivantes:

- sélection des laboratoires et évaluation de leurs méthodes d'essai
- préparation des échantillons à partir de matériaux connus et envoi de ces derniers aux différents laboratoires entre septembre 2002 et mars 2003
- réalisation des essais croisés par les différents laboratoires sélectionnés : 2003-2004
- examen critique et comparatif des résultats obtenus par les laboratoires
- rédaction du rapport final.

### 1.4.1 Sélection des laboratoires

En novembre 2001 un courrier a été adressé à une vingtaine de laboratoires de géotechnique et de mécanique des roches, avec délai au 15 janvier 2002 pour nous indiquer leur intérêt à participer à une campagne d'essais croisés et pour déterminer les essais qu'ils étaient d'accord de réaliser. Treize ont finalement répondu favorablement à la requête des LMR+S.

### 1.4.2 Préparation des échantillons

La confection des matériaux de référence, la préparation des échantillons de sols et le carottage d'éprouvettes de roche à partir de blocs de carrière s'est déroulée dans le courant 2002. Finalement l'envoi des échantillons aux différents laboratoires s'est effectué en septembre 2002 pour les sols et en janvier 2003 pour les roches.

### 1.4.3 Choix des essais

Les essais proposés en mécanique des sols étaient les suivants :

- détermination de la teneur en eau, du poids volumique apparent et du poids volumique des grains
- granulométrie et sédimentométrie
- limites de liquidité et de plasticité
- cisaillement à la boîte de Casagrande
- oedomètre incrémental.

Pour la mécanique des roches, les essais retenus étaient :

- détermination du poids volumique apparent
- essai de compression uniaxiale
- détermination du module E
- essai de traction indirecte.

#### 1.4.4 Réalisation des essais

Les dates d'envoi des échantillons aux différents laboratoires et les dates du retour des résultats à nos laboratoires sont présentées dans les tableaux 1.1 et 1.2.

On peut constater le temps parfois important entre l'envoi et la réception des résultats, et même l'abandon très tardif de certains laboratoires. A décharge des laboratoires, il faut rappeler que leur participation à ce programme d'essais était bénévole et que le temps qu'ils y ont consacré n'a pas été rémunéré.

Tableau 1.1 Laboratoires de mécanique des roches

Laboratoire	Date d'envoi des échantillons de roche	Retour des résultats au laboratoire roche
Laboratoire L1	janvier 2003	février 2004
Laboratoire L2	janvier 2003	février 2004
Laboratoire L3	décembre 2002	février 2003
Laboratoire L4	janvier 2003	abandon novembre 2003
Laboratoire L5	mars 2003	novembre 2003
Laboratoire L7	janvier 2003	janvier 2004
Laboratoire L8	décembre 2002	février 2003
Laboratoire L9	janvier 2003	janvier 2004

Tableau 1.2 Laboratoires de mécanique des sols

Laboratoire	Date d'envoi des échantillons de sol	Retour des résultats au laboratoire sols
Laboratoire L1	septembre 2002	novembre 2002
Laboratoire L2	septembre 2002	abandon avril 2004
Laboratoire L3	septembre 2002	février 2003
Laboratoire L5	septembre 2002	janvier 2003
Laboratoire L6	septembre 2002	novembre 2003
Laboratoire L7	septembre 2002	abandon janvier 2004
Laboratoire L8	septembre 2002	février 2004
Laboratoire L9	septembre 2002	abandon novembre 2004
Laboratoire L10	septembre 2002	novembre 2002

## 2. Normes nationales et internationales

### 2.1 Normes utilisées

Tableau 2.1 Liste des normes utilisées

Essais de mécanique des sols	Normes nationales	Normes internationales
Teneur en eau	SN 670 340b	
Poids spécifique apparent humide	SN 670 335a	
Poids spécifique des grains	SN 670 335a	
Granulométrie	SN 670 810c	
Sédimentométrie	SN 670 816a	
Limites d'Atterberg	SN 670 345a	
Cisaillement à la boîte	ISSMFE-ETC5-F2.97	ASTM D3080
Oedomètre incrémental	ISSMFE-ETC5-D1.97	ASTM D2435
<b>Essais de mécanique des roches</b>		
Poids spécifique apparent humide	SN 670 335a	
compression uniaxiale	SN 670 353	ASTM D2938
module de déformation	SN 670 353	ASTM D3148
traction indirecte	SN 670 354	ASTM D, NF P94-422

Le tableau 2.1 dresse la liste des normes retenues. Les laboratoires suisses ont utilisé les normes suisses SN en vigueur, alors que le laboratoire français a appliqué les normes ASTM ou AFNOR. Les normes suisses SN sont très voisines des normes appliquées à l'étranger, notamment en mécanique des roches. On peut donc affirmer que l'application de l'une ou l'autre de ces normes ne devrait pas influencer de manière significative les résultats obtenus.

### 3. Méthode de la recherche

#### 3.1 Laboratoires participants

Sur la base du registre établi par le SAS, des contacts ont été pris avec une vingtaine de laboratoires de toute la Suisse, accrédités dans les domaines de la géotechnique et de la caractérisation des matériaux. Deux laboratoires français de mécanique des roches ont également été approchés, l'un à Grenoble, l'autre à Toulouse. Huit laboratoires suisses et un français ont finalement répondu favorablement à notre requête, en réalisant tout ou partie des essais proposés dans cette recherche. La liste suivante donne leur nom, adresse et numéro d'accréditation suisse:

- IMP Bautest AG, Institut für Materialprüfung, 4625 Oberbuchsitzen, STS 016
- Zschokke SA, Laboratoire de la construction, 1242 Satigny, STS 020
- Frutiger AG, 3661 Uetendorf, STS 030
- V-S-H, Versuchstollen Hagerbach, 7320 Sargans, STS 060
- IMM SA, Istituto Meccanica dei Materiali, 6916 Grancia, STS 113
- Geotest AG, 3052 Zollikofen, STS 123
- LCBE SA, Laboratoire de contrôle, 1615 Bossonnens, STS 159
- LMR+S, Laboratoires de mécanique des sols et des roches de l'EPFL, 1015 Lausanne, STS 224
- LRPC, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées, Toulouse (F)

Il faut souligner que deux laboratoires ont participé aux deux programmes d'essais, soit sur les sols et sur les roches. A l'opposé, certains laboratoires n'ont pas effectué, par manque de temps, tous les essais qu'ils s'étaient initialement engagés à réaliser.

Quatre laboratoires, intéressés dans un premier temps par cette étude, ont reçu les échantillons, puis ont finalement décidé d'abandonner au cours de l'étude, ce qui a passablement retardé le programme initialement prévu et par conséquent la rédaction du rapport final.

#### 3.2 Essais réalisés

Les tableaux 3.1 et 3.2 indiquent la liste des essais de mécanique des sols et des roches effectués par les différents laboratoires.

Tableau 3.1 Essais de mécanique des roches

Essais réalisés	Laboratoires						
	L1	L2	L3	L5	L7	L8	L9
Poids volume apparent	-	oui	oui	-	oui	oui	oui
Compression uniaxiale	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Module E	oui	-	oui	-	oui	oui	oui
Essai brésilien	oui	-	oui	oui	oui	oui	oui

Tableau 3.2 Essais de mécanique des sols

Essais réalisés	Laboratoires					
	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Teneur en eau	oui	oui	oui	oui	-	oui
Poids volume apparent	oui	oui	-	-	-	oui
Poids spécifique des grains	oui	oui	-	-	oui	oui
Granulométrie	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Sédimentométrie	oui	oui	oui	oui	oui	oui
Limites d'Atterberg	oui	oui	-	oui	oui	oui
Cisaillement à la boîte	-	oui	-	-	oui	oui
Oedomètre incrémental	-	oui	-	-	-	oui

### 3.3 Types de matériaux utilisés

#### 3.3.1 Sols

Dans le cadre de cette recherche, trois types de matériaux ont été retenus et utilisés pour la réalisation des essais en mécanique des sols, il s'agit de :

- un limon de Bioley-Orjulaz provenant d'une grave écrêtée à 2 mm, utilisée depuis fort longtemps au LMS pour toutes sortes d'applications et de travaux de recherche
- un mélange d'opalite et de sable du Léman dans la proportion de 40 % d'opalite et de 60 % de sable de granulométrie 0 à 3 mm
- une argile limoneuse de Genève prélevée directement sur place à l'aide de tubes carottiers de diamètre 80 mm.

#### 3.3.2 Roches

Quatre types de roches ont été utilisés pour les essais. Il s'agit de:

- grès molassique de Villarod composé de 65 % de quartz, 30 % de carbonates et 5% d'argiles
- marbre de Carrare, blanc
- anhydrite massive de la région de Bex
- calcaire urgonien de Sixte (Haute-Savoie), massif, avec présence de stylolithes.

### 3.4 Mode de préparation des échantillons

#### 3.4.1 Sols

La préparation des échantillons a été effectuée de la manière suivante :

- 1) Le limon de Bioley-Orjulaz, écrêtée à 2 mm, a été préparé avec une teneur en eau de 19.5 % jusqu'à l'obtention d'une pâte bien homogène, puis déposé en chambre humide pendant un jour au minimum. Ensuite la matière ainsi préparée a été

soigneusement pesée en fonction de la dimension des échantillons à réaliser, puis compactée sous presse dans un tube de 80 mm de diamètre, avec une charge et un temps bien défini selon le mode opératoire du Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL (annexe 1). Les échantillons ont ensuite été démoulés, puis emballés et conservés en chambre climatique à humidité et température constantes jusqu'à la livraison aux différents laboratoires.

- 2) Le mélange d'opalite et de sable du Léman a été préparé avec une teneur en eau de 13.0 %, dans les proportions mentionnées sous 3.3.1, jusqu'à l'obtention d'une pâte bien homogène, puis déposé en chambre humide pendant un jour au minimum. La procédure de préparation et de livraison aux divers laboratoires est la même que pour le limon de Bioley-Orjulaz.
- 3) En ce qui concerne l'argile limoneuse de Genève, il s'agit d'échantillons intacts, peu remaniés, prélevés directement sur le site du chantier Rolex, ne nécessitant donc pas de préparation particulière, si ce n'est l'emballage et le stockage en chambre climatique.

### 3.4.2 Roches

Des éprouvettes de 55 mm de diamètre ont été extraites par carottage à l'eau dans des blocs provenant de quatre carrières différentes. Elles ont ensuite été sciées à environ 110 mm de hauteur, puis rectifiées. Les exigences de parallélisme et de planéité ont été contrôlées et enregistrées pour toutes les éprouvettes.

Chaque laboratoire a reçu un lot de 20 éprouvettes (cinq par type de roche) de 110 x 55 mm pour les essais de compression uniaxiale et 20 éprouvettes (cinq par type de roche) de 55 x 55 mm pour les essais brésiliens.



## 4. Résultats obtenus sur les sols

### 4.1 Consolidation uniaxiale à l'oedomètre

#### 4.1.1 Résultats

Suite à la défection de plusieurs laboratoires en cours d'étude, seul deux laboratoires ont finalement effectué des essais de consolidation uniaxiale à l'appareil oedométrique.

Les résultats obtenus par ces deux laboratoires sont représentés sur les figures 4.1.1 à 4.1.9 et résumés dans les tableaux 4.1.1 à 4.1.3.

#### 4.1.2 Commentaires, analyses et recommandations

On a considéré dans un premier temps tous les essais réalisés par le laboratoire L6, soit 4 essais sur le mélange de sable et opalite, 4 essais sur le limon de Bioley-Orjulaz et 3 essais sur l'argile de Genève.

Les résultats des essais du laboratoire L4 sont comparés à ceux du laboratoire L6. En analysant les conditions initiales de ces échantillons avant essai, soit les valeurs de  $e_0$ , de la teneur en eau et de la masse volumique apparente humide, on comprend tout de suite les différences observées en valeurs absolues. En revanche, si l'on analyse ces résultats en valeurs relatives en comparant les indices de compression  $C_c$  et les indices de gonflement  $C_s$ , soit les pentes en charge et en décharge de ces courbes de consolidation, on s'aperçoit qu'ils sont tout de même parfaitement comparables et tout à fait acceptables. En effet les écarts-types et coefficients de variation sont bien inférieurs à ceux donnés dans la norme SN 670'010b, pages 8 et 11, pour des sols similaires.

Le laboratoire L4 présente les résultats complets (selon la méthode de Taylor) du calcul du coefficient de consolidation  $c_v$ , du coefficient de perméabilité, ainsi que les graphiques et données numériques  $\Delta t - \Delta h$ , pour chaque étape de chargement. Le laboratoire L6 ne présente pas les données numériques  $\Delta t - \Delta h$ , mais uniquement les résultats des coefficients de consolidation  $c_v$  et de celui de la perméabilité  $k$ , obtenus pour ces essais. Les comparaisons de ces résultats n'ont pas été effectuées dans cette étude car trop différents. Cela provient en grande partie de l'interprétation des graphiques de consolidation pour déterminer la valeur de  $t_{90}$  avec la méthode de Taylor.

En effet les  $t_{90}$  déterminés par le laboratoire L4 sont pris très souvent au tout début du graphique de consolidation à chaque étape de chargement, ce qui fait qu'ils ne représentent pas de façon optimale les tassements à 90 % considérés par Taylor et sont dès lors difficilement comparables avec ceux obtenus par le laboratoire L6. Cet état de fait ne permet pas de pousser plus loin la comparaison entre ces résultats.

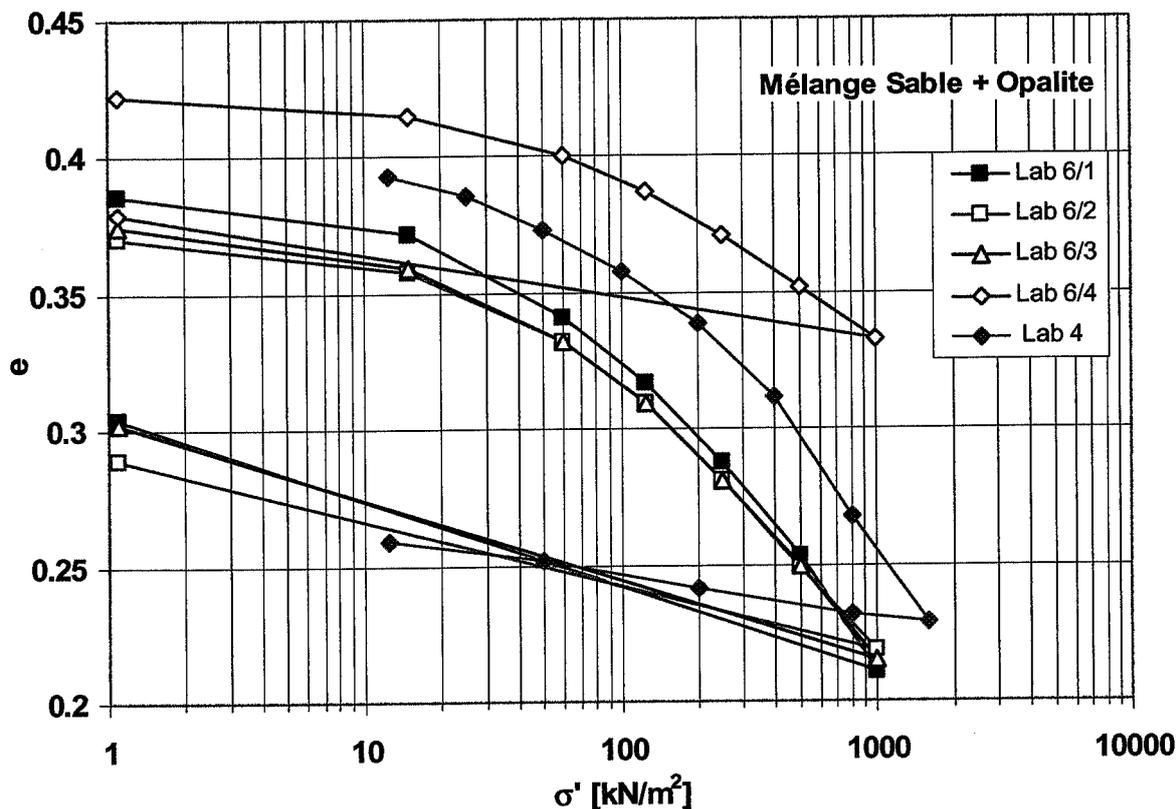
Le laboratoire L6 a fait la décharge en un seul palier, présupposant la linéarité, tandis que le laboratoire L4 l'a faite par paliers, ce qui paraît plus raisonnable.

Dans l'ensemble ces résultats sont tout de même assez bons (cf. figures 4.1.1 à 4.1.9 et tableaux 4.1.1 à 4.1.3). Bien entendu il existe des différences notamment dues aux conditions initiales d'essai. Certains échantillons semblent s'être quelque peu desséchés. En effet on note une réduction de la teneur en eau et par conséquent des indices des vides, ce qui fait qu'ils ne suivent pas la même courbe de consolidation. Comme le laboratoire L4 a effectué la consolidation avec des contraintes différentes, la comparaison est plus difficile, mais on peut constater que les courbes de consolidation se rejoignent quand même pour les contraintes les plus élevées.

Le laboratoire L4 devrait présenter les résultats des indices des vides avec plus de précision, c'est-à-dire avec trois décimales après la virgule, ce qui aurait permis d'établir une meilleure comparaison avec le laboratoire L6.

En fait, toutes les différences constatées sont amplement justifiées par les variations des conditions initiales observées dans les résultats fournis, quand bien même tous ces échantillons avaient été préparés de la même manière, soit avec une teneur en eau et un poids volumique apparent quasi identiques.

A l'avenir ou lors d'une nouvelle étude comparative inter-laboratoires, les conditions de transport et la conservation des échantillons, voire les délais de réalisation devront absolument être précisés afin de s'assurer que les conditions initiales d'essai restent pratiquement les mêmes d'un laboratoire à l'autre, au moment de la réalisation des essais.

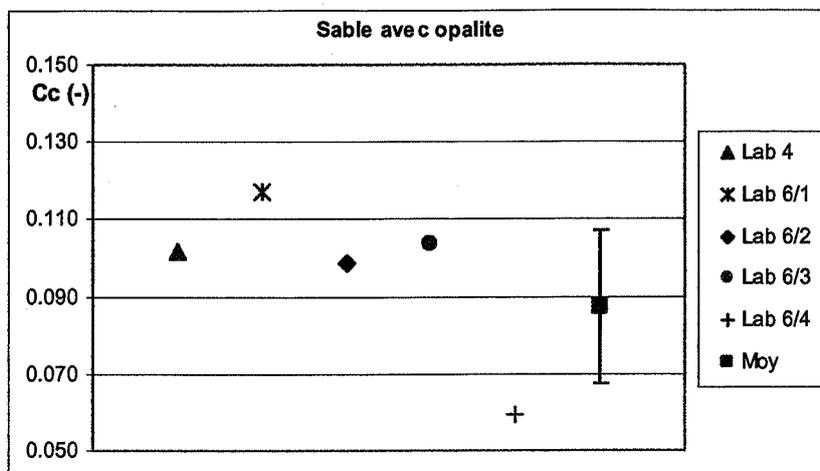


- L6/1 :  $e_0 = 0.386$   $w_{nat.} = 12.4 \%$   $\rho_{init} = 2.18 \text{ t/m}^3$
- L6/2 :  $e_0 = 0.369$   $w_{nat.} = 12.6 \%$   $\rho_{init} = 2.19 \text{ t/m}^3$
- △ L6/3 :  $e_0 = 0.369$   $w_{nat.} = 12.6 \%$   $\rho_{init} = 2.19 \text{ t/m}^3$
- ◇ L6/4 :  $e_0 = 0.420$   $w_{nat.} = 14.9 \%$   $\rho_{init} = 2.18 \text{ t/m}^3$
- ◆ L4 :  $e_0 = 0.410$   $w_{nat.} = 13.4 \%$   $\rho_{init} = 2.17 \text{ t/m}^3$

Figure 4.1.1 Consolidation à l'oedomètre incrémental pour le mélange de sable et opalite

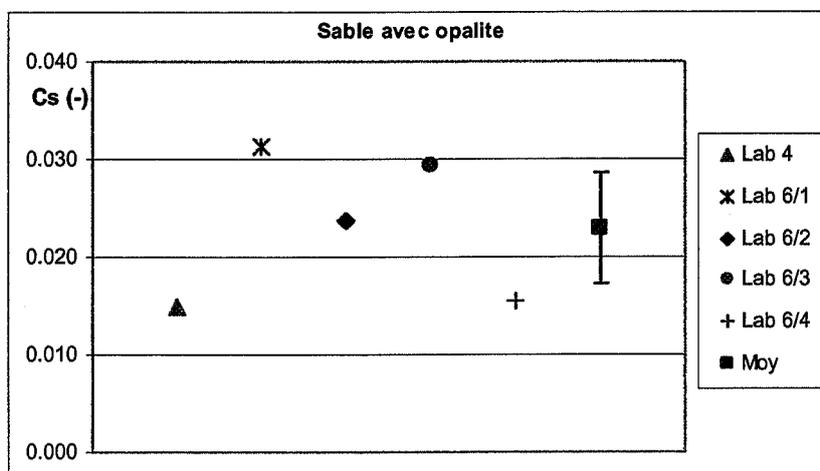
Tableau 4.1.1 Valeurs de l'indice des vides (e) en fonction de la contrainte effective ( $\sigma'$  [kN/m<sup>2</sup>]) pour le mélange sable + opalite

Laboratoire		$\sigma'$	1.1	15	60	125	250	500	1000	1.1				
L6/1	e		0.386	0.372	0.341	0.317	0.288	0.253	0.211	0.304				
L6/2	e		0.370	0.358	0.332	0.310	0.281	0.249	0.219	0.289				
L6/3	e		0.375	0.359	0.332	0.310	0.281	0.250	0.215	0.302				
L6/4	e		0.422	0.415	0.400	0.387	0.371	0.352	0.333	0.379				
L4	$\sigma'$		12.5	25	50	100	200	400	800	1600	800	200	50	12.5
	e		0.393	0.386	0.373	0.358	0.339	0.312	0.268	0.229	0.232	0.242	0.252	0.259



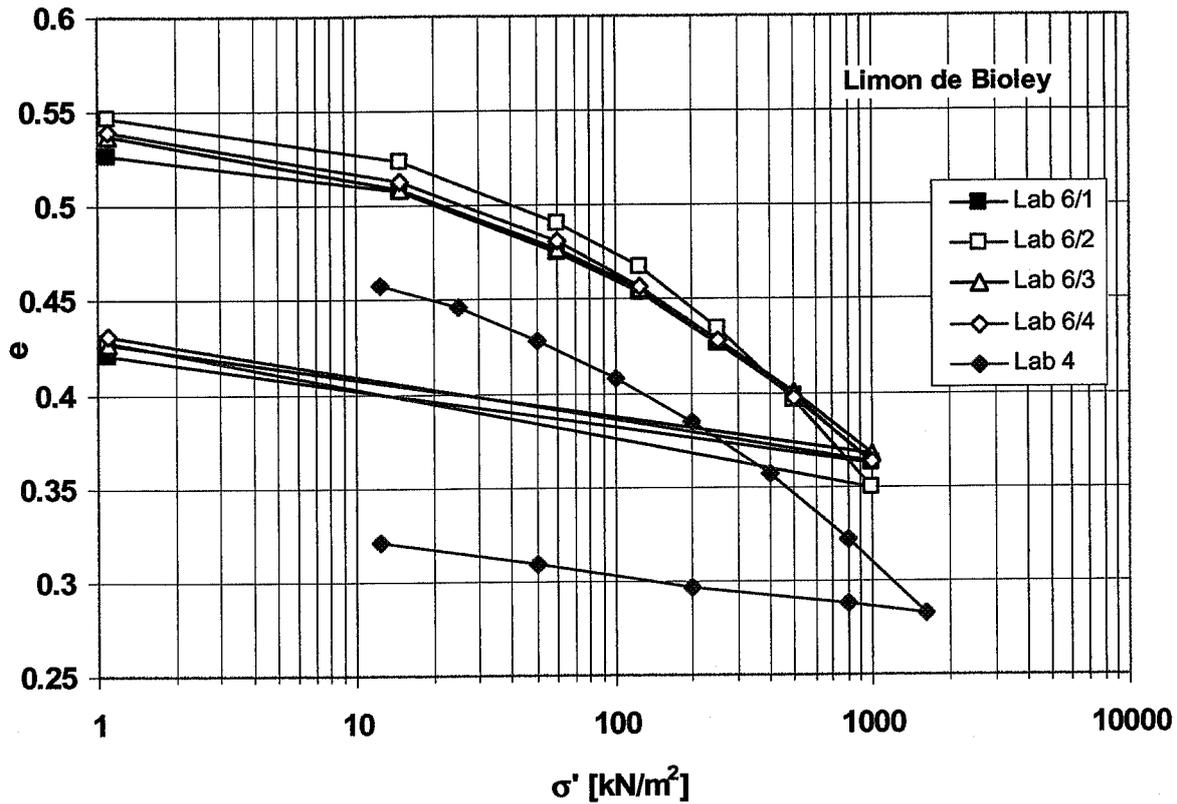
Laboratoire	Cc
Lab 4	0.102
Lab 6/1	0.117
Lab 6/2	0.099
Lab 6/3	0.104
Lab 6/4	0.059
Moyenne	0.087
Ecart-type	0.020
CV	22.8%

Figure 4.1.2 Valeurs de Cc avec la moyenne et son écart-type pour le mélange sable+opalite



Laboratoire	Cs
Lab 4	0.015
Lab 6/1	0.031
Lab 6/2	0.024
Lab 6/3	0.029
Lab 6/4	0.016
Moyenne	0.023
Ecart-type	0.006
CV	24.9%

Figure 4.1.3 Valeurs de Cs avec la moyenne et son écart-type pour le mélange sable+opalite

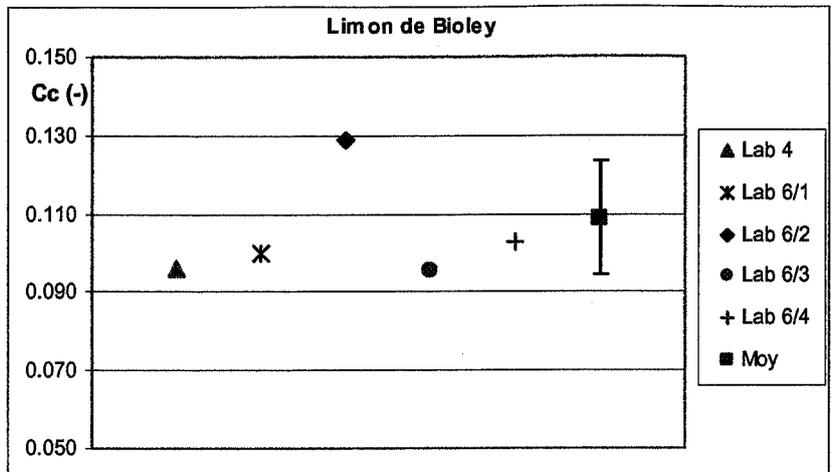


- L6/1 :  $e_0 = 0.525$   $w_{nat.} = 19.5 \%$   $\rho_{init} = 2.12 \text{ t/m}^3$
- L6/2 :  $e_0 = 0.546$   $w_{nat.} = 19.3 \%$   $\rho_{init} = 2.10 \text{ t/m}^3$
- △ L6/3 :  $e_0 = 0.542$   $w_{nat.} = 19.1 \%$   $\rho_{init} = 2.12 \text{ t/m}^3$
- ◇ L6/4 :  $e_0 = 0.538$   $w_{nat.} = 18.9 \%$   $\rho_{init} = 2.13 \text{ t/m}^3$
- ◆ L4 :  $e_0 = 0.470$   $w_{nat.} = 17.8 \%$   $\rho_{init} = 2.17 \text{ t/m}^3$

Figure 4.1.4 Consolidation à l'oedomètre incrémental pour le limon de Bioley

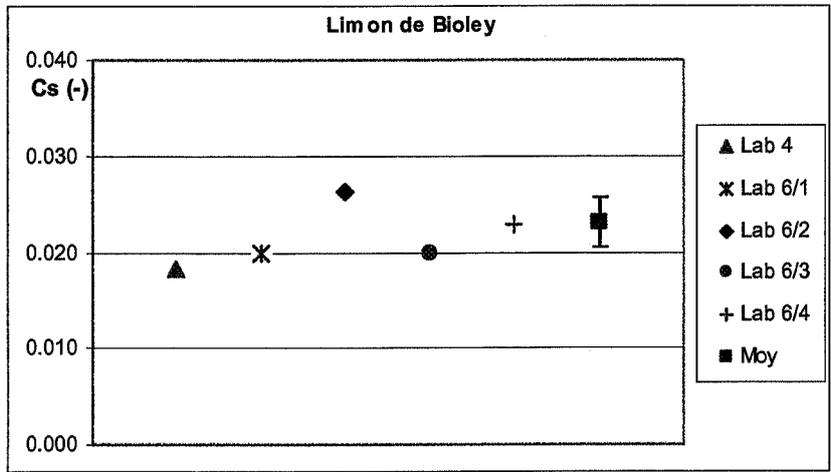
Tableau 4.1.2 Valeurs de l'indice des vides (e) en fonction de la contrainte effective ( $\sigma'$  [kN/m²]) pour le limon de Bioley

Laboratoire		$\sigma'$	1.1	15	60	125	250	500	1000	1.1				
L6/1	e		0.527	0.508	0.475	0.454	0.426	0.399	0.362	0.421				
L6/2	e		0.547	0.524	0.491	0.467	0.435	0.396	0.350	0.428				
L6/3	e		0.537	0.509	0.477	0.456	0.428	0.401	0.368	0.427				
L6/4	e		0.540	0.513	0.481	0.457	0.428	0.397	0.363	0.431				
L4	$\sigma'$		12.5	25	50	100	200	400	800	1600	800	200	50	12.5
	e		0.458	0.446	0.428	0.408	0.385	0.357	0.322	0.283	0.288	0.297	0.309	0.321



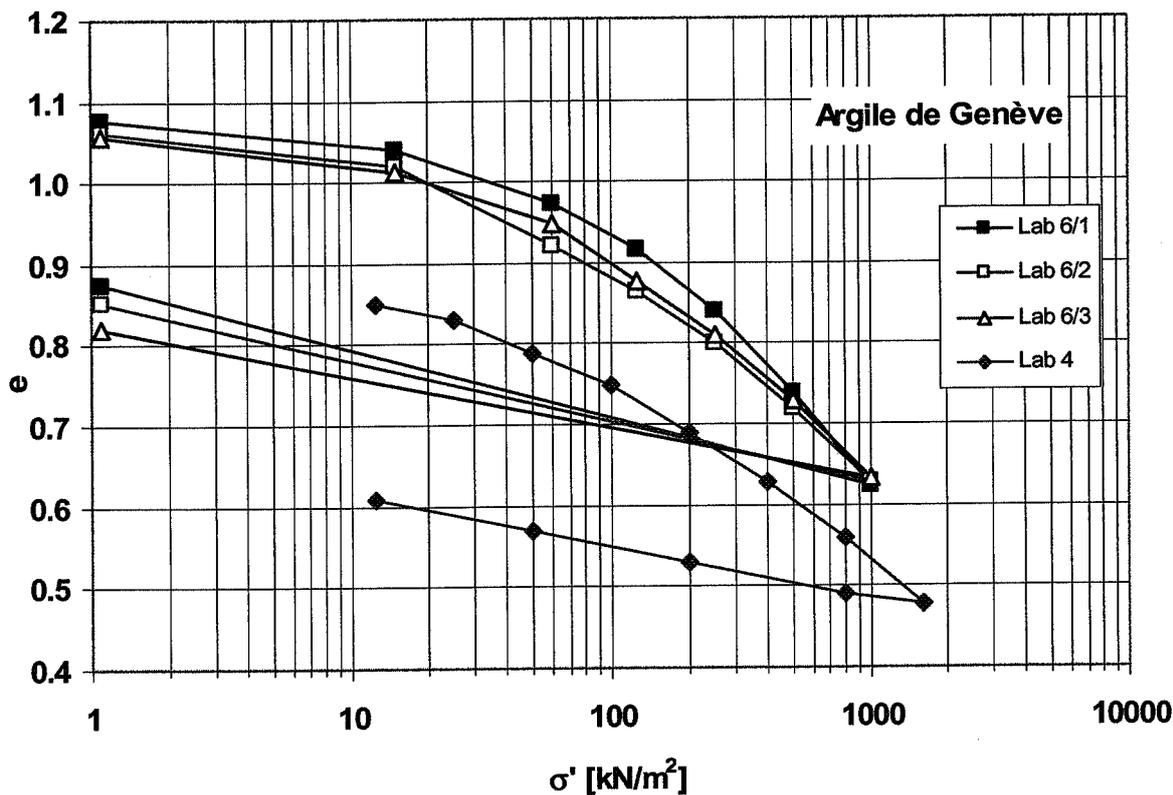
Laboratoire	Cc
Lab 4	0.096
Lab 6/1	0.100
Lab 6/2	0.129
Lab 6/3	0.095
Lab 6/4	0.103
Moyenne	0.109
Ecart-type	0.014
CV	13.1%

Figure 4.1.5 Valeurs de Cc avec la moyenne et son écart-type pour le limon de Bioley



Laboratoire	Cs
Lab 4	0.018
Lab 6/1	0.020
Lab 6/2	0.026
Lab 6/3	0.020
Lab 6/4	0.023
Moyenne	0.023
Ecart-type	0.003
CV	11.4%

Figure 4.1.6 Valeurs de Cs avec la moyenne et son écart-type pour le limon de Bioley



- L6/1 :  $e_0 = 1.069$   $w_{nat.} = 38.7\%$   $\rho_{init} = 1.84 \text{ t/m}^3$
- L6/2 :  $e_0 = 1.062$   $w_{nat.} = 38.4\%$   $\rho_{init} = 1.86 \text{ t/m}^3$
- △ L6/3 :  $e_0 = 1.056$   $w_{nat.} = 38.2\%$   $\rho_{init} = 1.87 \text{ t/m}^3$
- ◆ L4 :  $e_0 = 0.89$   $w_{nat.} = 34.5\%$   $\rho_{init} = 1.92 \text{ t/m}^3$

Figure 4.1.7 Consolidation à l'oedomètre incrémental pour l'argile de Genève

Tableau 4.1.3 Valeurs de l'indice des vides (e) en fonction de la contrainte effective ( $\sigma'$  [kN/m<sup>2</sup>]) pour l'argile de Genève

Laboratoire		$\sigma'$	1.1	15	60	125	250	500	1000	1.1				
L6/1	e		1.076	1.039	0.974	0.918	0.841	0.739	0.625	0.876				
L6/2	e		1.062	1.020	0.922	0.866	0.801	0.719	0.63	0.853				
L6/3	e		1.056	1.014	0.948	0.878	0.810	0.729	0.635	0.821				
L4	$\sigma'$		12.5	25	50	100	200	400	800	1600	800	200	50	12.5
	e		0.85	0.83	0.79	0.75	0.69	0.63	0.56	0.48	0.49	0.53	0.57	0.61

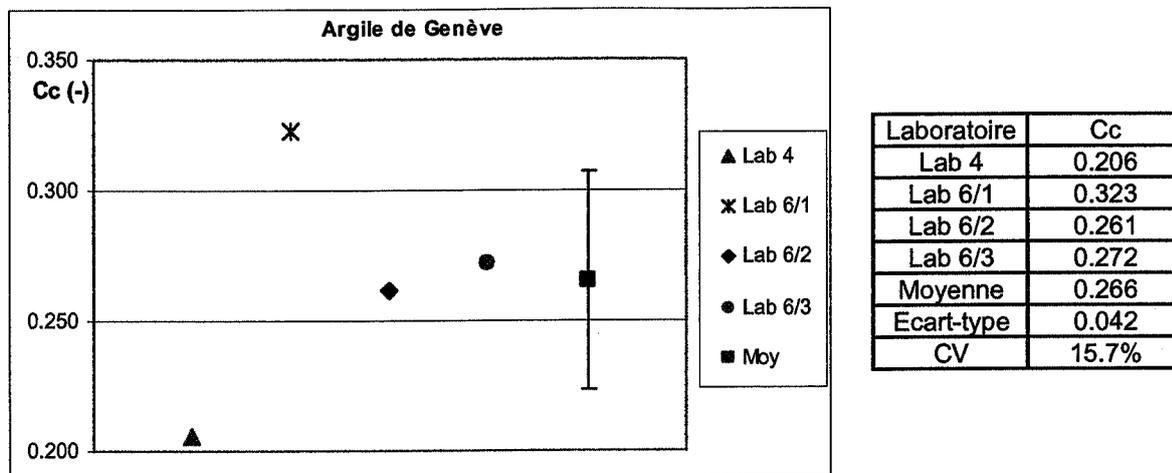


Figure 4.1.8 Valeurs de Cc avec la moyenne et son écart-type pour l'argile de Genève

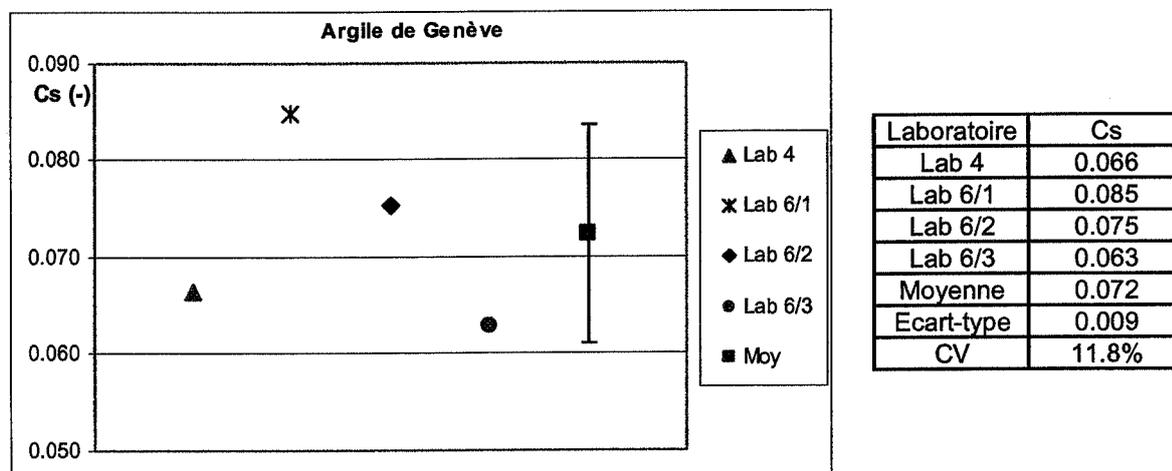


Figure 4.1.9 Valeurs de Cs avec la moyenne et son écart-type pour l'argile de Genève

## 4.2 Granulométrie et sédimentométrie

### 4.2.1 Résultats

Six laboratoires ont effectué les essais d'analyse granulométrique et les résultats obtenus sont présentés dans les figures 4.2.1 à 4.2.3 et résumés dans les tableaux 4.2.1 à 4.2.3.

### 4.2.2 Commentaires, analyses et recommandations

Les résultats appellent les commentaires suivants :

- On a considéré dans un premier temps tous les essais réalisés par le laboratoire L6, pour lequel on a calculé les moyennes des diamètres des grains et des pourcentages de matériau passant.
- Dans le but de conserver au maximum l'information disponible, tous les diamètres de grains ont été considérés.
- Dans les essais où le premier tamis indiqué avait un pourcentage associé inférieur à 100%, on a considéré que pour le tamis précédent le pourcentage devait bien entendu être aussi égal à 100% (cas du laboratoire L3).
- Les seules corrections apportées aux résultats d'essais réalisés ont été celles dues à des erreurs évidentes et clairement explicables, comme le cas déjà cité ci-dessus pour le laboratoire L3.
- Pour le laboratoire L2, (cf. <sup>\*1</sup> du tableau 4.2.3) les valeurs représentées ont été estimées et non pas mesurées directement à partir de l'essai. De même pour le laboratoire L3, (cf. <sup>\*2</sup> du tableau 4.2.3), les valeurs représentées ont été corrigées pour que le passage de la granulométrie à la sédimentométrie soit réaliste, sans quoi le pourcentage de matériau passant aurait tout à coup été supérieur au précédent, ce qui est impossible.

La comparaison des résultats des courbes granulométriques est assez aisée pour le tamisage, mais l'est beaucoup moins pour la sédimentométrie. Vu la variété des temps de lecture observés, la comparaison entre ces essais ne peut pas s'effectuer de façon numérique (calcul des moyennes, écarts types et coefficient de variation), mais plutôt de manière graphique.

On peut également noter que :

- Le laboratoire L1 présente une tendance régulière à avoir des résultats différents des autres laboratoires, notamment avec des pourcentages plus bas. Cette différence est tout spécialement évidente pour le limon de Bioley-Orjulaz, mais surtout pour l'argile de Genève.
- Les autres laboratoires présentent des résultats très rapprochés entre eux. Dans le cas particulier du laboratoire L6, on remarquera que la répétitivité des résultats obtenus est très bonne.

- Etant en présence de sols fins, les degrés d'uniformité  $C_{ud}$  et de courbure  $C_{cd}$  n'ont pas pu être calculés car on ne peut jamais déterminer le  $D_{10}$  et parfois même pas le  $D_{30}$  comme pour l'argile de Genève. Hormis les résultats du laboratoire L1 pour l'argile de Genève, on peut néanmoins affirmer que les résultats d'ensemble restent dans un fuseau relativement étroit par rapport aux fuseaux décrits dans la norme SN 670'010b, pages 8 et 11, pour des sols similaires. En classant ces sols selon la classification USCS (norme SN 670'008a), on obtient pour tous les laboratoires un SC pour le mélange de sable et d'opelite, un CL pour le limon de Bioley et un CM pour l'argile de Genève.

Lors d'une autre campagne d'essais croisés il faudra décider préalablement quels tamis doivent être utilisés pour la granulométrie, et à quels temps précis les lectures devront être prises pour la sédimentométrie, afin de faciliter grandement l'interprétation statistique des résultats en fonction de la dimension des grains.

Il faudrait également pouvoir demander à chaque laboratoire d'effectuer plusieurs essais sur le même échantillon de sol afin d'étudier la répétitivité et la variabilité des résultats par laboratoire.

Il serait utile, voire même recommandé, d'associer à ces programmes d'essais inter-laboratoires la participation de tous les laboratoires accrédités dans le domaine de la géotechnique. Cela nous donnerait une vision d'ensemble beaucoup plus riche sur la dispersion possible de ces résultats.

Il manque encore l'étude d'un sol plus sableux, voire graveleux pour avoir un éventail de sols plus large.

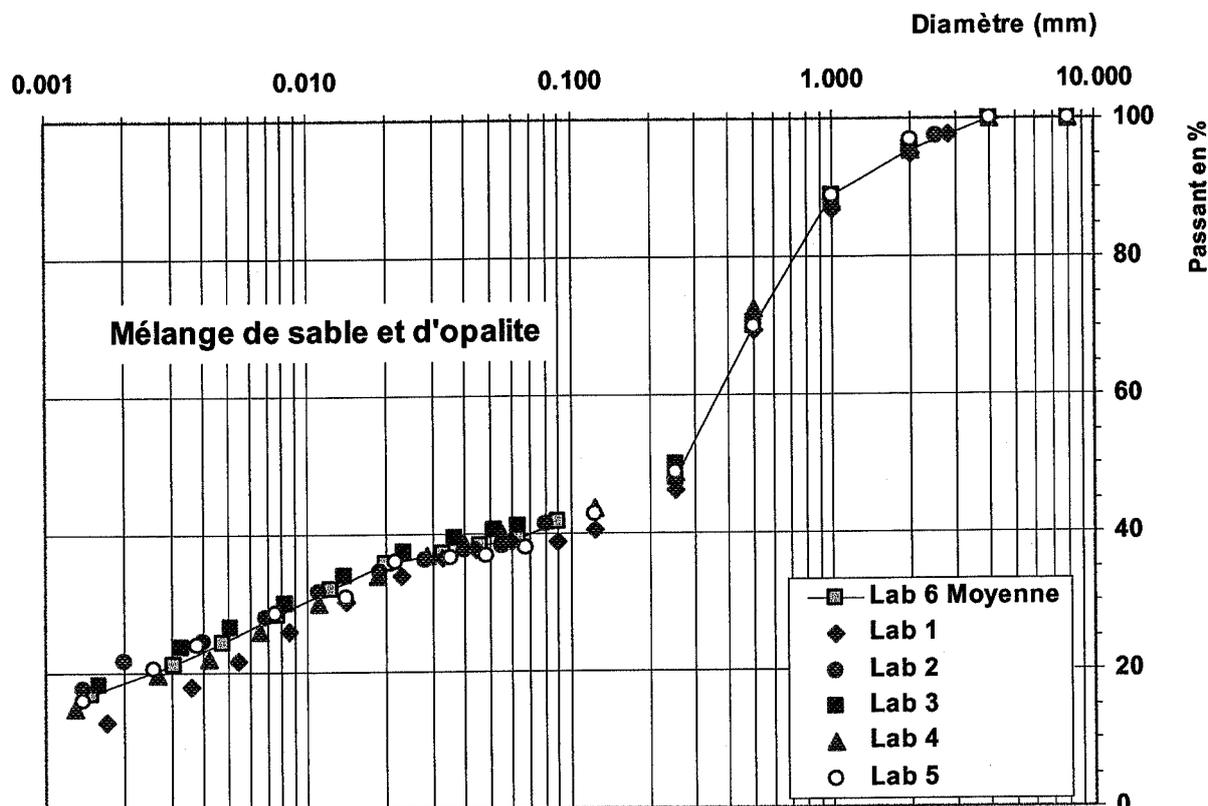


Figure 4.2.1 Résultats de la granulométrie et de la sédimentométrie pour le mélange de sable+opalite

Tableau 4.2.1 Valeurs des pourcentages granulométriques pour le mélange de sable+opalite

L1		L2		L3		L4		L5		moyenne L6	
Diam. [mm]	Passant [%]										
4.0000	100	4.0000	99.9	8.0000	100	8.0000	100	8.0000	100	8.00000	100.0
2.8000	97.7	2.5000	97.3			4.0000	100	4.0000	100	4.00000	100.0
2.0000	94.9	2.0000	95.5	2.0000	95.76	2.0000	95.5	2.0000	97	2.00000	95.4
1.0000	87	1.0000	88.7	1.0000	88.42	1.0000	88.4	1.0000	89	1.00000	89.0
0.5000	69.5	0.5000	70.9	0.5000	70.58	0.5000	72.6	0.5000	70	0.50000	70.0
0.2500	46.3	0.2500	48.4	0.2500	50.11	0.2500	49	0.2500	49	0.25000	47.9
0.1250	40.7	0.1250	43			0.1250	43.7	0.1250	43		
0.0900	39	0.0800	41.4	0.0630	41.22	0.0554	39.9	0.0680	38	0.09000	41.6
0.0600	38.9	0.0550	38.3	0.0512	40.43			0.0480	37	0.06285	39.1
0.0440	37.7	0.0400	37.6			0.0397	38.5			0.04545	38.4
0.0330	36.5	0.0280	36.3	0.0365	39.52	0.0286	36.8	0.0350	36.5	0.03265	37.2
0.0230	34	0.0190	34.7	0.0234	37.49	0.0185	34	0.0215	36	0.02000	35.9
0.0140	30.3	0.0110	31.8	0.0138	34.1	0.0111	30.1	0.0140	31	0.01220	32.1
0.0085	26	0.0069	27.9	0.0082	30.04	0.0066	26.1	0.0076	28.5	0.00770	28.4
0.0054	21.6	0.0040	24.7	0.0051	26.43	0.0042	22.1	0.0038	24	0.00475	24.4
0.0036	17.9	0.0020	21.8	0.0033	23.71	0.0027	19.6	0.0026	20.5	0.00310	21.1
0.0017	13	0.0014	17.8	0.0016	18.29	0.0013	14.9	0.0014	16	0.00150	16.7

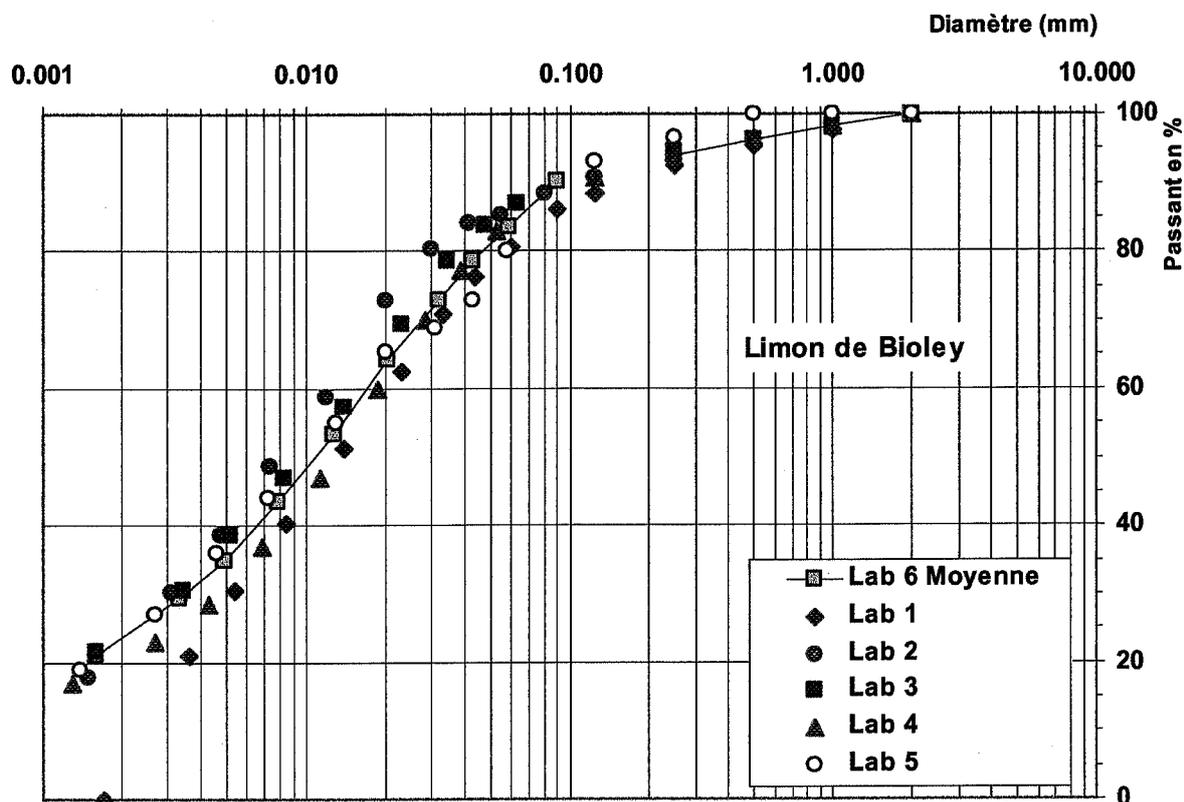


Figure 4.2.2 Résultats de la granulométrie et de la sédimentométrie pour le limon de Bioley

Tableau 4.2.2 Valeurs des pourcentages granulométriques pour le limon de Bioley

L1		L2		L3		L4		L5		moyenne L6	
Diam. [mm]	Passant [%]										
2.0000	100	2.0000	100	2.0000	100	2.0000	100	2.0000	100	2.0000	100
1.0000	97.7	1.0000	98.0	1.0000	98.2	1.0000	98.3	1.0000	100	1.0000	98.1
0.5000	95.4	0.5000	96.2	0.5000	96.3	0.5000	96.4	0.5000	99.9	0.5000	96.2
0.2500	92.4	0.2500	93.6	0.2500	94.6	0.2500	93.8	0.2500	96.5	0.2500	94.0
0.1250	88.5	0.1250	90.9			0.1250	90.9	0.1250	93.0		
0.0900	86.3	0.0800	88.6	0.0630	86.9			0.0580	80.0	0.0900	90.1
0.0600	80.6	0.0550	85.4	0.0478	84.0	0.0535	83.1	0.0430	73.0	0.0588	83.6
0.0440	76.5	0.0420	84.2			0.0389	77.3			0.0434	78.6
0.0330	70.9	0.0300	80.4	0.0347	78.6	0.0284	70.1	0.0310	69.0	0.0321	72.9
0.0230	62.6	0.0200	72.8	0.0229	69.3	0.0188	60.0	0.0200	65.5	0.0206	64.3
0.0140	51.4	0.0120	58.8	0.0139	57.4	0.0114	47.0	0.0130	55.0	0.0128	53.4
0.0085	40.3	0.0074	48.7	0.0083	47.0	0.0068	36.9	0.0072	44.0	0.0078	43.4
0.0054	30.6	0.0048	38.6	0.0052	38.5	0.0043	28.6	0.0046	36.0	0.0049	35.0
0.0036	20.9	0.0031	30.4	0.0034	30.4	0.0027	23.1	0.0027	27.0	0.0033	29.4
0.0017	0.0	0.0015	18.0	0.0016	21.6	0.0013	17.0	0.0014	19.0	0.0016	21.1

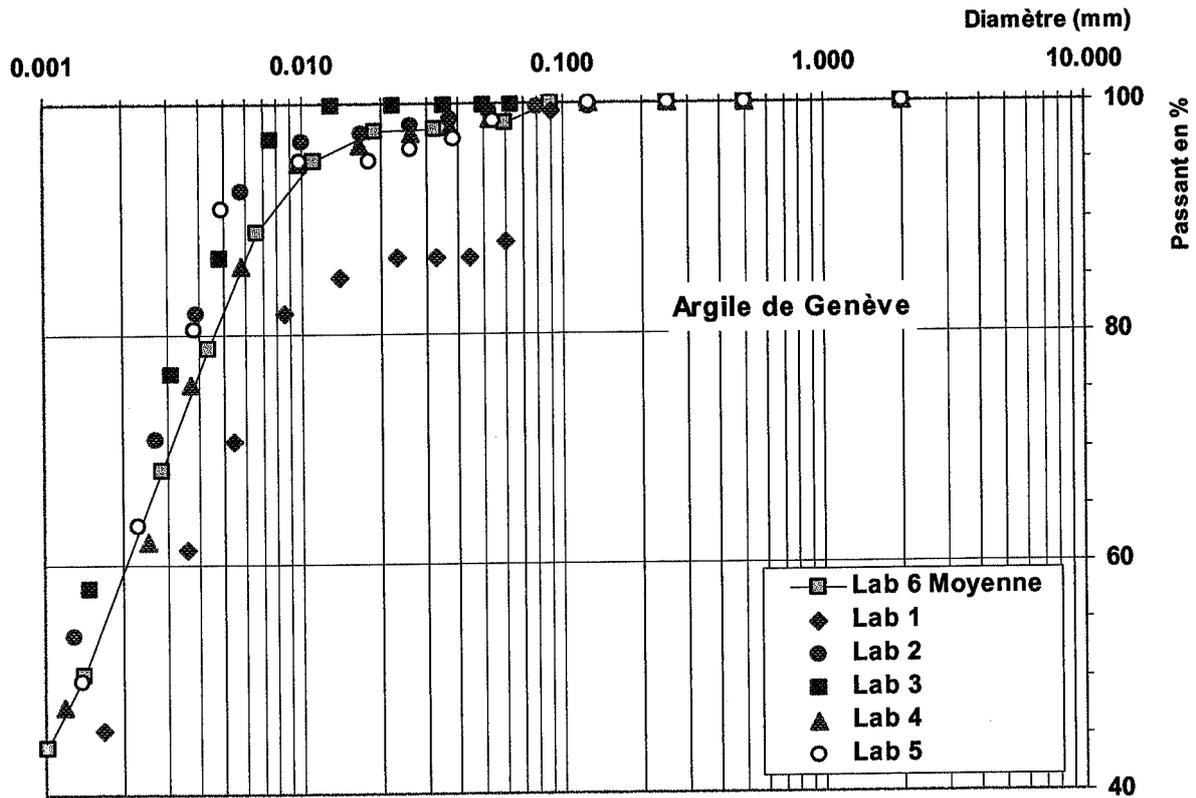


Figure 4.2.3 Résultats de la granulométrie et de la sédimentométrie pour l'argile de Genève

Tableau 4.2.3 Valeurs des pourcentages granulométriques pour l'argile de Genève

L1		L2		L3		L4		L5		moyenne L6	
Diam. [mm]	Passant [%]	Diam. [mm]	Passant [%]	Diam. [mm]	Passant [%]	Diam. [mm]	Passant [%]	Diam. [mm]	Passant [%]	Diam. [mm]	Passant [%]
2.0000	100	2.0000	100	2.0000	100	2.0000	100	2.0000	100	2.0000	100
0.5000	100	0.5000	99.9	0.5000	99.9	0.5000	100	0.5000	100	0.5000	100
0.2500	100	0.2500	99.8	0.2500	99.9	0.2500	100	0.2500	100	0.2500	100
0.1250	100	0.1250	99.7			0.1250	100	0.1250	100		
0.0900	99.3	0.0800	99.6							0.0900	100
0.0600	88.1	0.0520	99.3* <sup>1</sup>	0.0630	99.9* <sup>2</sup>	0.0520	98.7	0.0540	98.5	0.0600	98.3
0.0440	86.6	0.0370	98.7* <sup>1</sup>	0.0499	99.9* <sup>2</sup>	0.0369	98.0	0.0380	97.0		
0.0330	86.6	0.0260	98.1* <sup>1</sup>	0.0354	99.9* <sup>2</sup>	0.0262	97.4	0.0260	96.0	0.0323	97.8
0.0230	86.6	0.0170	97.4* <sup>1</sup>	0.0224	99.9* <sup>2</sup>	0.0166	96.4	0.0180	95.0	0.0191	97.5
0.0140	85.0	0.0100	96.8	0.0130	99.9* <sup>2</sup>	0.0097	94.8	0.0099	95.0	0.0112	95.0
0.0085	81.8	0.0058	92.4	0.0076	96.9	0.0058	85.9	0.0049	91.0	0.0067	89.0
0.0054	70.8	0.0039	81.9	0.0048	86.7	0.0037	75.7	0.0038	80.5	0.0043	78.8
0.0017	45.6	0.0013	53.8	0.0015	58.0	0.0012	47.7	0.0014	50.0	0.0014	50.4
										0.0010	44.2

\*<sup>1</sup> valeurs estimées

\*<sup>2</sup> valeurs corrigées



## 4.3 Essais de cisaillement à la boîte de Casagrande

### 4.3.1 Résultats

Seuls trois laboratoires ont effectué des essais de cisaillement direct à la boîte de Casagrande. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures 4.3.1 à 4.3.9 et résumés dans les tableaux 4.3.1 à 4.3.3.

### 4.3.2 Commentaires, analyses et recommandations

Les résultats appellent les commentaires suivants :

- Les droites de régression de tous les essais sont représentées sur un même graphique vu que le nombre total d'essais n'était pas très élevé. On a également représenté la droite de régression pour l'ensemble de ces essais.

Les résultats sont dans l'ensemble assez bons et tout à fait comparables. En effet l'analyse statistique des valeurs de  $\phi'$  et de  $c'$  obtenues montre que les écart-types et les coefficients de variation sont bien inférieurs aux valeurs données dans la norme SN 670'010b, pages 8 et 11, pour des sols semblables.

Le laboratoire L6 ne présente pas dans ces rapports finaux les valeurs numériques obtenues lors de la réalisation de ces essais. Cela a été signalé au laboratoire concerné, qui va y remédier.

La vitesse de cisaillement n'est pas indiquée dans les essais effectués par le laboratoire no 5. Elle varie pour les essais effectués par le laboratoire L4 de 0.01 ; 0.06 et 0.03 mm/min, et pour le laboratoire L6 de 0.00033 ; 0.00167 et 0.00058 mm/s, c'est-à-dire respectivement 0.0198 ; 0.102 et 0.0348 mm/min.

Il n'est pas très évident de savoir quand est-ce qu'il faut considérer le modèle  $\tau' = \sigma' \text{tg}\Phi'$  et quand le modèle  $\tau' = c' + \sigma' \text{tg}\Phi'$  lorsque le sol présente une cohésion très faible. Ceci est bien entendu indépendant du travail des différents laboratoires, mais reste une réflexion et une discussion intéressante pour l'avenir.

Chaque laboratoire n'ayant réalisé qu'un seul essai sur chaque échantillon, il est dès lors impossible d'étudier la répétitivité de ces essais par laboratoire. Les sols qui ont été choisis, avec ces valeurs de densité et de teneur en eau ont un comportement très semblable, soit une assez faible cohésion, et un angle de frottement interne effectif compris entre 26 et 31 degrés.

Il serait à l'avenir judicieux d'imposer préalablement aux laboratoires participants la vitesse de cisaillement à utiliser, ce qui facilitera aussi la comparaison des résultats. D'autre part il faudra choisir un sol avec une plus grande cohésion, voire éventuellement de réaliser des essais non-drainés.

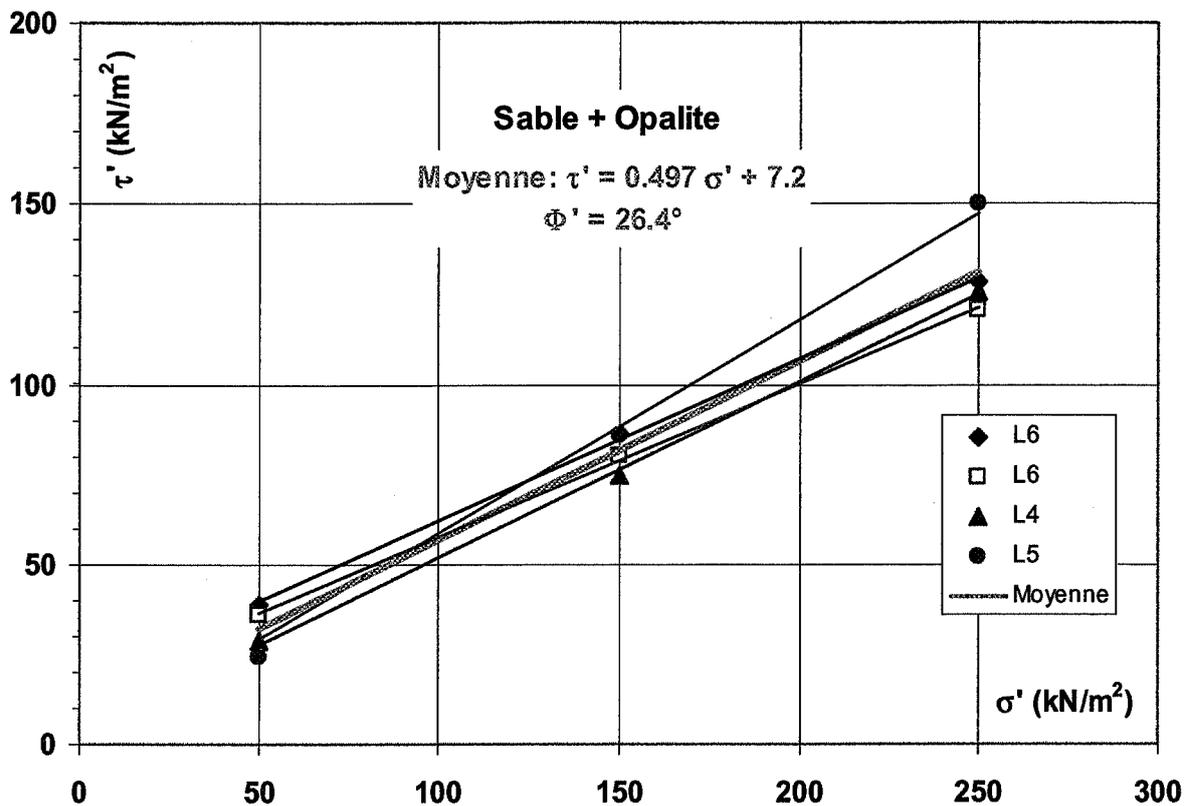
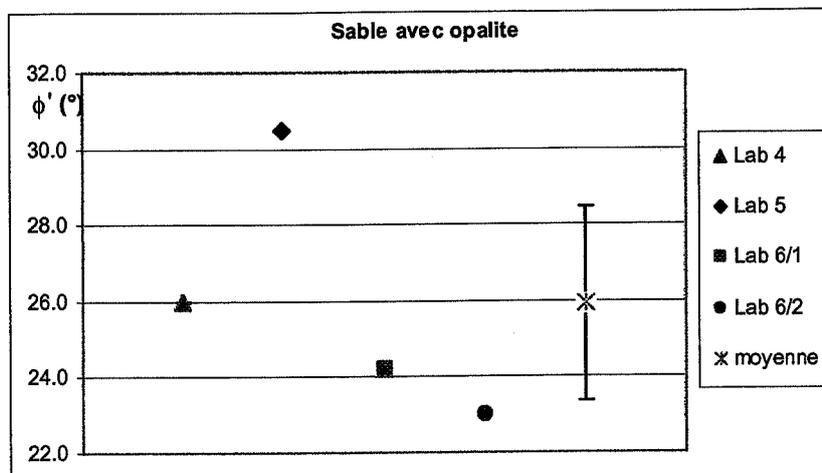


Figure 4.3.1 Résultats des essais de cisaillement direct sur le mélange de sable+opalite.

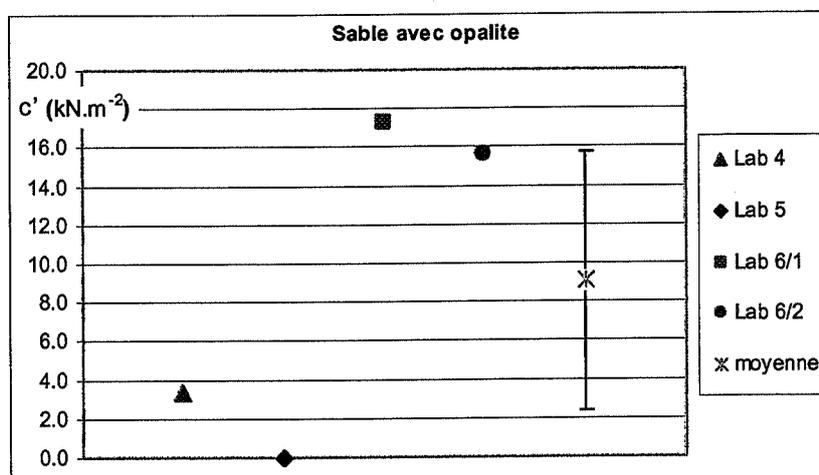
Tableau 4.3.1 Résultats des essais de cisaillement direct effectués sur le mélange de sable+opalite

Laboratoire	Mélange sable + opalite											
	L6/1			L6/2			L4			L5		
$\sigma$ [kN.m <sup>-2</sup> ]	50	150	250	50	150	250	50	150	250	50	150	250
$\tau$ [kN.m <sup>-2</sup> ]	38.6	86.7	128.3	36.1	80.5	120.8	28.6	74.6	126.0	24.4	86.0	150.0
$\phi'$ [°]	24.2			23.0			26.7			30.5		
$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	17.3			15.6			0			0		



Laboratoire	$\phi'$ [°]
Lab 4	26.0
Lab 5	30.5
Lab 6/1	24.2
Lab 6/2	23.0
moyenne	25.9
Ecart-type	2.5
CV	9.8%

Figure 4.3.2 Valeurs de l'angle de frottement interne  $\phi'$  avec la moyenne et son écart-type pour le mélange de sable avec opalite



Laboratoire	$c'$ [kPa]
Lab 4	3.4
Lab 5	0.0
Lab 6/1	17.3
Lab 6/2	15.6
moyenne	9.1
Ecart-type	6.7
CV	74.1%

Figure 4.3.3 Valeurs de la cohésion effective  $c'$  avec la moyenne et son écart-type pour le mélange de sable avec opalite

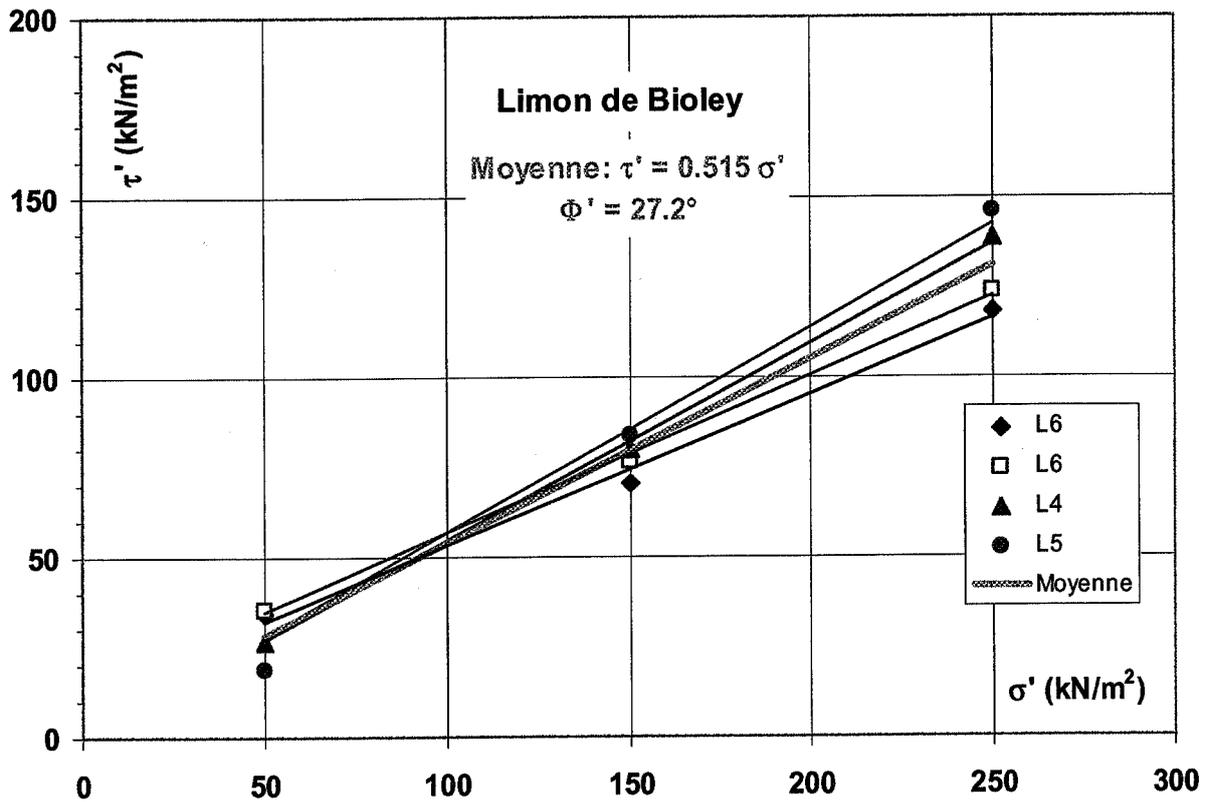
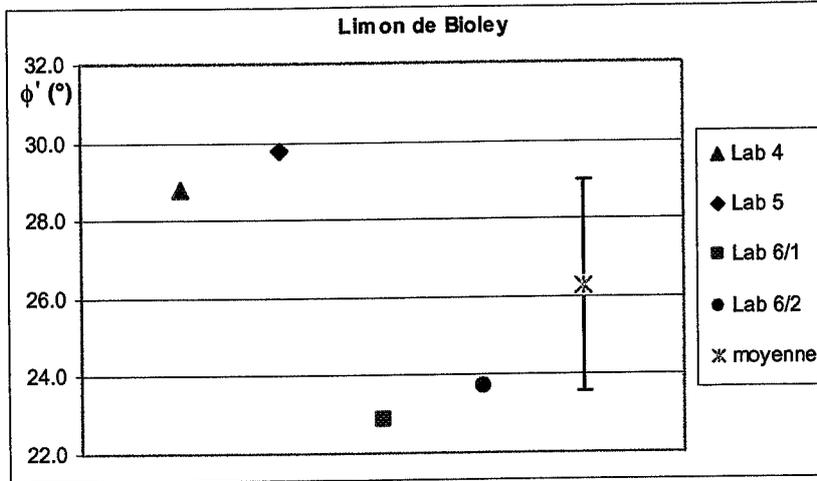


Figure 4.3.4 Résultats des essais de cisaillement effectués sur le limon de Bioley

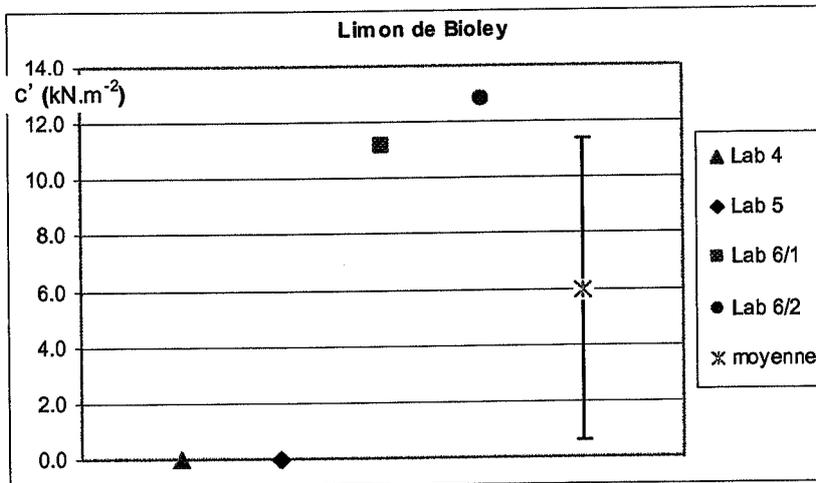
Tableau 4.3.2 Résultats des essais de cisaillement direct effectués sur le limon de Bioley

Laboratoire	Limon de Bioley											
	L6/1			L6/2			L4			L5		
$\sigma$ [kN.m <sup>-2</sup> ]	50	150	250	50	150	250	50	150	250	50	150	250
$\tau$ [kN.m <sup>-2</sup> ]	34.2	70.8	118.6	35.8	76.7	123.9	26.8	79.8	139.0	19.1	83.8	146.0
$\phi'$ [°]	22.9			23.7			28.8			29.8		
$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	11.2			12.8			0			0		



Laboratoire	$\phi$ [°]
Lab 4	28.8
Lab 5	29.8
Lab 6/1	22.9
Lab 6/2	23.7
moyenne	26.3
Ecart-type	2.7
CV	10.3%

Figure 4.3.5 Valeurs de l'angle de frottement interne  $\phi'$  avec la moyenne et son écart-type pour le limon de Bioley



Laboratoire	$c'$ [kPa]
Lab 4	0.0
Lab 5	0.0
Lab 6/1	11.2
Lab 6/2	12.8
moyenne	6.0
Ecart-type	5.4
CV	89.8%

Figure 4.3.6 Valeurs de la cohésion effective  $c'$  avec la moyenne et son écart-type pour le limon de Bioley

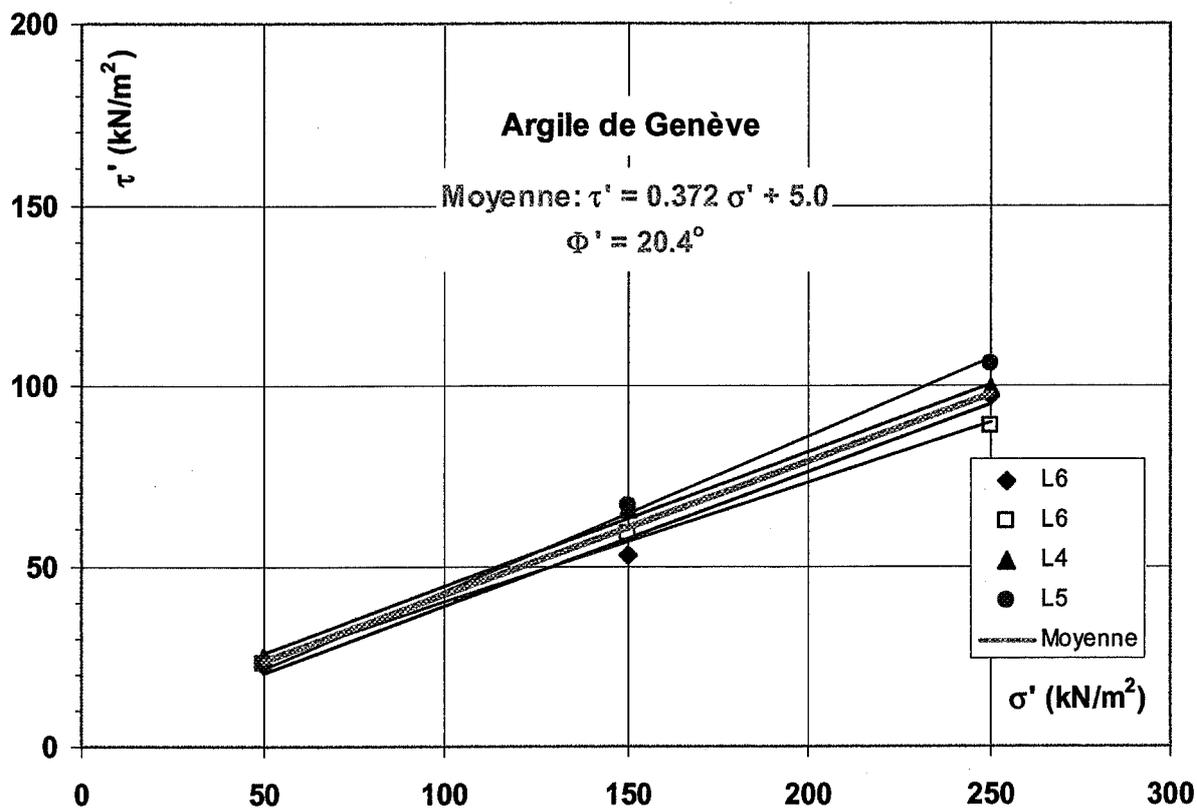
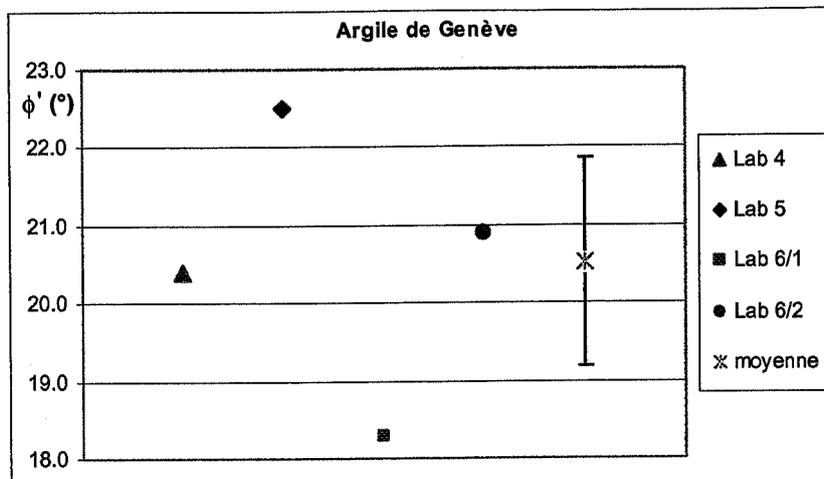


Figure 4.3.7 Résultats des essais de cisaillement direct sur l'argile de Genève

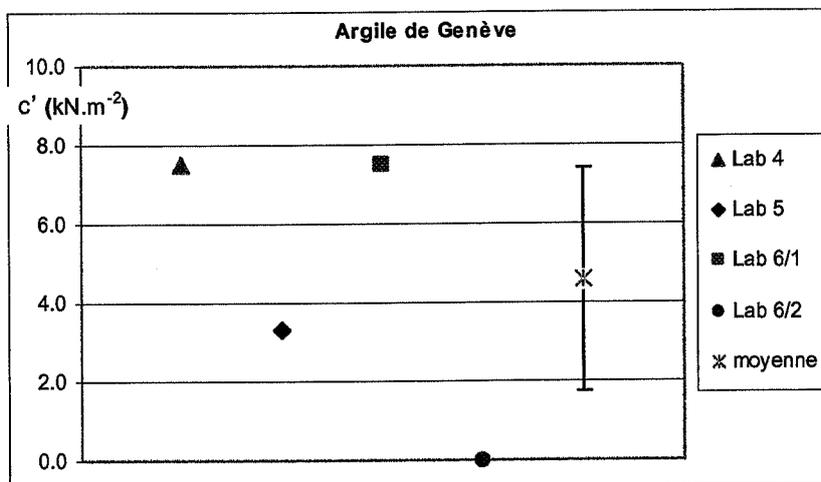
Tableau 4.3.3 Résultats des essais de cisaillement direct effectués sur l'argile de Genève

Argile de Genève												
Laboratoire	L6/1			L6/2			L4			L5		
$\sigma$ [kN.m <sup>-2</sup> ]	50	150	250	50	150	250	50	150	250	50	150	250
$\tau$ [kN.m <sup>-2</sup> ]	22.8	52.8	97.5	23.0	59.0	89.0	24.9	65.7	99.3	23.2	67.0	106.0
$\phi'$ [°]	18.3			20.9			20.4			22.5		
$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	7.5			0			7.5			3.3		



Laboratoire	$\phi$ [°]
Lab 4	20.4
Lab 5	22.5
Lab 6/1	18.3
Lab 6/2	20.9
moyenne	20.5
Ecart-type	1.3
CV	6.5%

Figure 4.3.8 Valeurs de l'angle de frottement interne  $\phi'$  avec la moyenne et son écart-type pour l'argile de Genève



Laboratoire	$c'$ [kPa]
Lab 4	7.5
Lab 5	3.3
Lab 6/1	7.5
Lab 6/2	0.0
moyenne	4.6
Ecart-type	2.8
CV	61.6%

Figure 4.3.9 Valeurs de la cohésion effective  $c'$  avec la moyenne et son écart-type pour l'argile de Genève



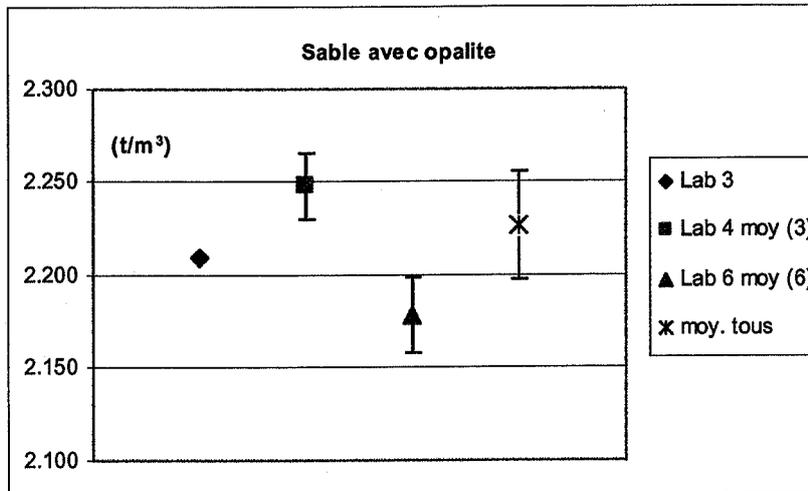
## 4.4 Essais de détermination de la masse volumique apparente humide et de la masse spécifique des grains

### 4.4.1 Résultats

Trois laboratoires ont participé aux essais de détermination de la masse volumique apparente humide et quatre à celle de la masse volumique des grains. Les résultats obtenus figurent dans le tableau 4.4.1 et sont représentés dans les figures 4.4.1 à 4.4.6.

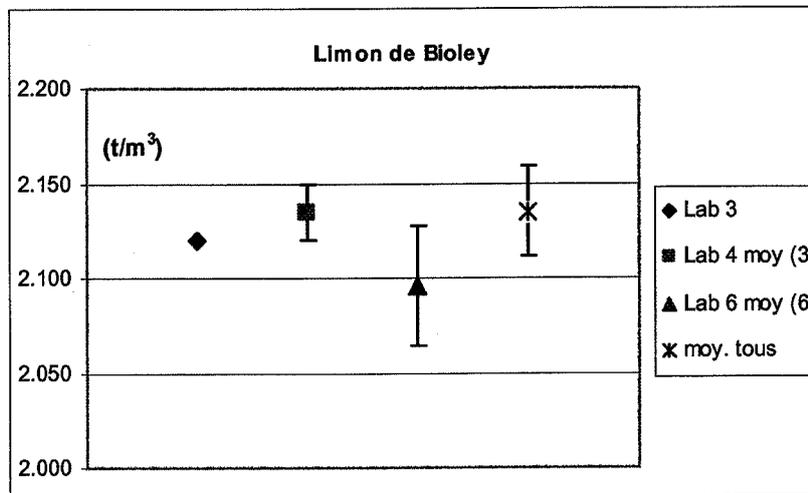
Tableau 4.4.1. Masse volumique apparente et masse volumique des grains

Laboratoire	mélange sable+opalite		limon de Bioley		argile de Genève	
	$\rho$ [t/m <sup>3</sup> ]	$\rho_s$ [t/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ [t/m <sup>3</sup> ]	$\rho_s$ [t/m <sup>3</sup> ]	$\rho$ [t/m <sup>3</sup> ]	$\rho_s$ [t/m <sup>3</sup> ]
L3	2.210	2.730	2.120	2.740	1.850	2.760
L4/1	2.262	2.690	2.160	2.709	1.891	2.687
L4/2	2.243	2.693	2.154	2.707	1.871	2.698
L4/3	2.239	2.690	2.145	2.704	1.885	2.686
L4/4	-	2.694	-	2.705	-	2.692
L5	-	2.700	-	2.740	-	2.750
L6/1	2.140	2.729	2.075	2.746	1.822	2.756
L6/2	2.158	2.730	2.039	2.747	1.824	2.767
L6/3	2.180	2.699	2.076	2.736	1.840	2.765
L6/4	2.190	2.705	2.120	2.746	1.860	2.762
L6/5	2.196	2.702	2.140	2.741	1.840	2.765
L6/6	2.204	2.729	2.120	2.746	1.870	2.762
L6/7	2.183	-	2.100	-	1.839	-
moyenne	2.200	2.708	2.114	2.731	1.854	2.738
écart-type	0.037	0.017	0.038	0.018	0.023	0.035
coeff. var. [%]	1.7	0.6	1.8	0.7	1.3	1.3



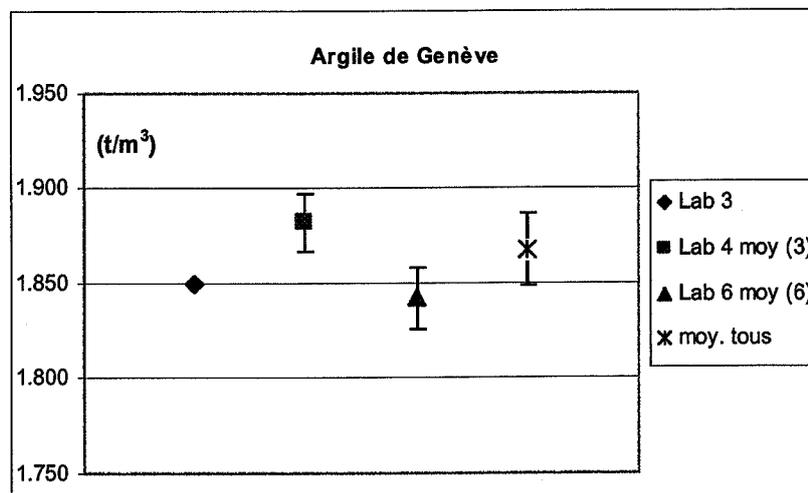
Laboratoire	$\rho_h$ [t/m <sup>3</sup> ]
Lab 3	2.210
Lab 4 moy (3)	2.248
Lab 6 moy (6)	2.179
Moyenne	2.227
Ecart-type	0.029
CV	1.3%

Figure 4.4.1 Masse volumique apparente humide avec écart-type pour le sable avec opalite



Laboratoire	$\rho_h$ [t/m <sup>3</sup> ]
Lab 3	2.120
Lab 4 moy (3)	2.135
Lab 6 moy (6)	2.096
Moyenne	2.135
Ecart-type	0.024
CV	1.1%

Figure 4.4.2 Masse volumique apparente humide avec écart-type pour le limon de Bioley



Laboratoire	$\rho_h$ [t/m <sup>3</sup> ]
Lab 3	1.850
Lab 4 moy (3)	1.882
Lab 6 moy (6)	1.842
Moyenne	1.868
Ecart-type	0.019
CV	1.0%

Figure 4.4.3 Masse volumique apparente humide avec écart-type pour l'argile de Genève

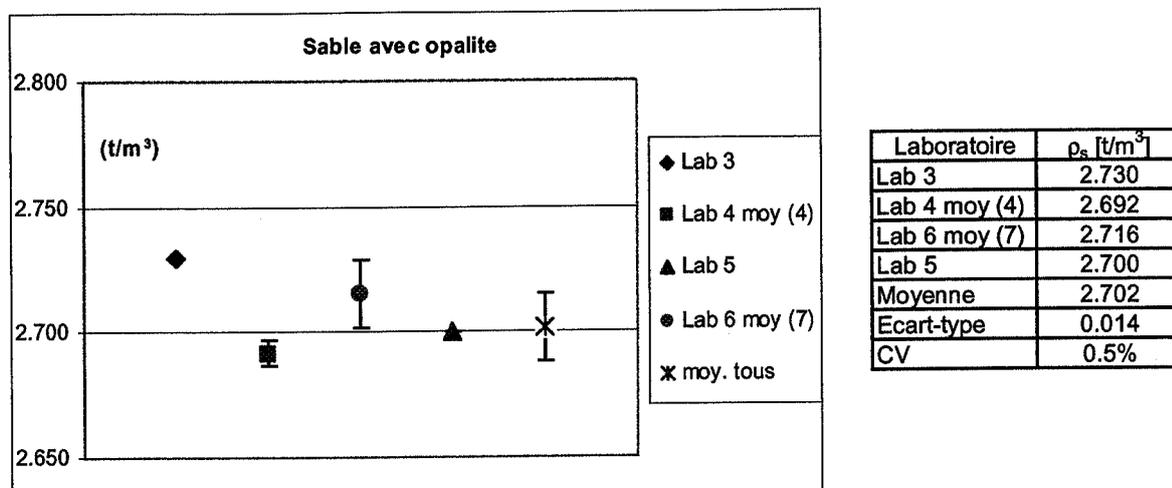


Figure 4.4.4 Masse volumique des grains avec écart-type pour le sable+opalite

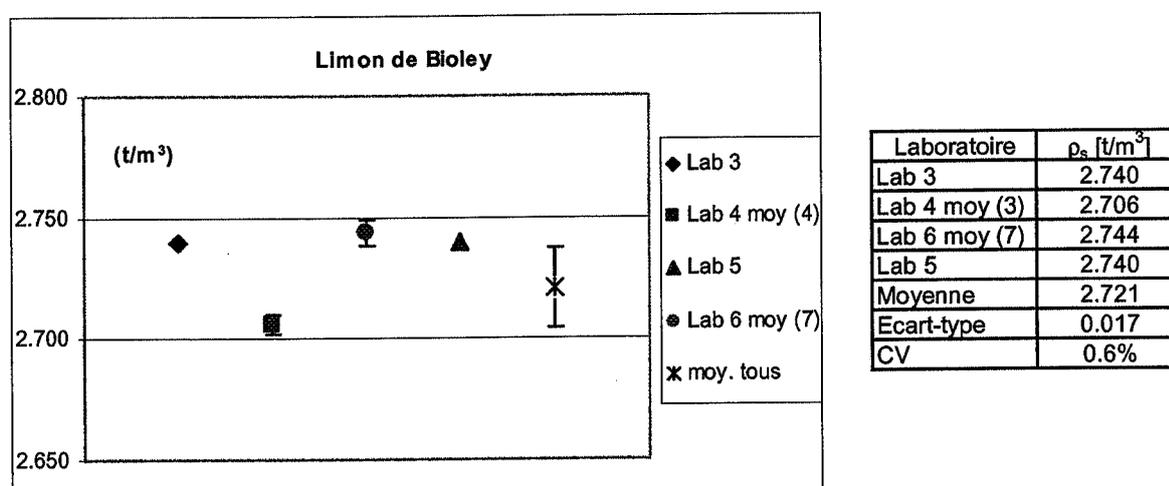


Figure 4.4.5 Masse volumique des grains avec écart-type pour le limon de Bioley

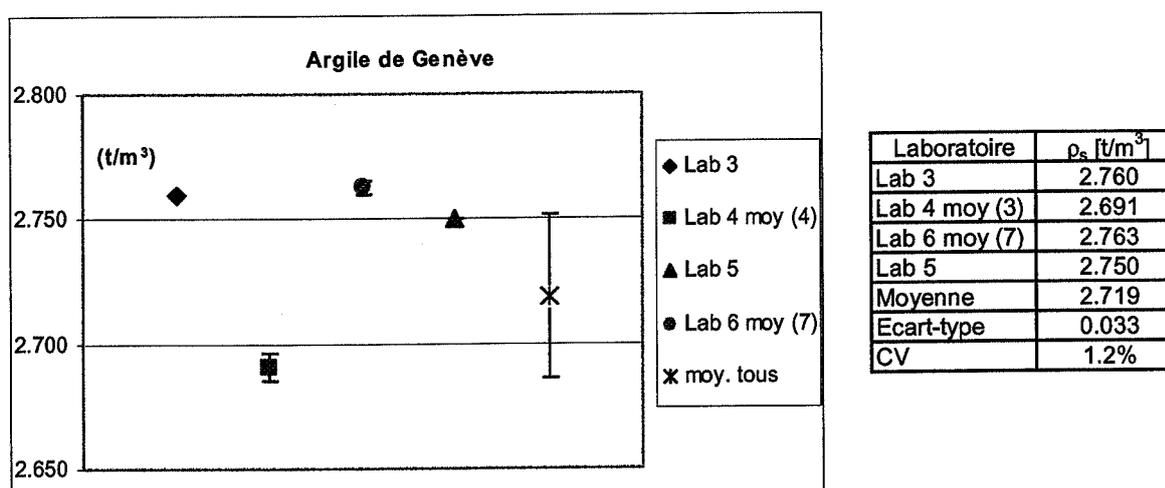


Figure 4.4.6 Masse volumique des grains avec écart-type pour l'argile de Genève

#### 4.4.2 Commentaires, analyses et recommandations

Le laboratoire L6 ayant réalisé plusieurs essais de détermination du poids volumique apparent humide et du poids volumique des grains pour chaque type de sol, il a été décidé de prendre en considération uniquement la moyenne de ces essais et de reporter également le coefficient de variation. La procédure a été pareille pour le laboratoire L4 qui a aussi réalisé plusieurs essais. Nous avons aussi représenté sur chaque figure la moyenne de tous les essais avec leurs écart-type et coefficient de variation.

Les résultats obtenus sont très bons avec des écart-types et des coefficients de variation très faibles en comparaison avec ceux donnés dans la norme SN670'010b pour des sols similaires.

Il n'y a pas de recommandations particulières à formuler pour une prochaine campagne d'essais croisés, si ce n'est le fait de demander aux différents laboratoires impliqués d'effectuer plusieurs essais par type de sol.

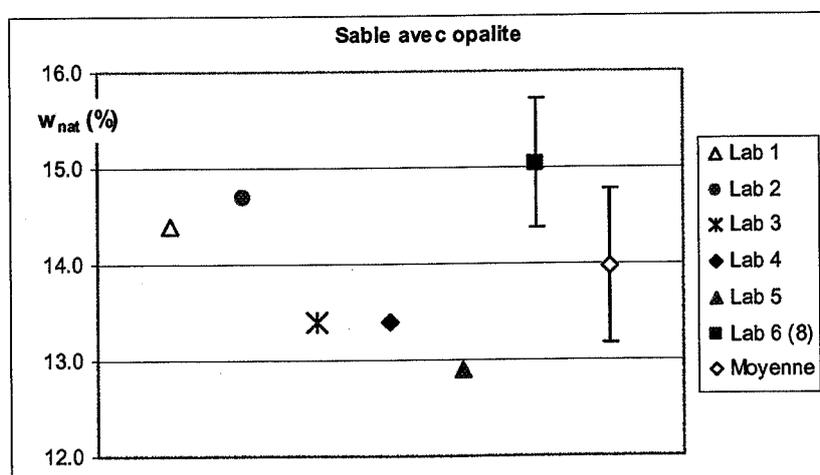
## 4.5 Essais de détermination de la teneur en eau et des limites de consistance d'Atterberg

### 4.5.1 Résultats

Six laboratoires ont participé aux essais de détermination de la teneur en eau naturelle et quatre ont effectué les limites de liquidité et de plasticité d'Atterberg. Les résultats obtenus apparaissent dans les tableaux 4.5.1 et 4.5.2 et sont représentés dans les figures 4.5.1 à 4.5.9

Tableau 4.5.1 Valeurs de la teneur en eau  $w$

Laboratoire	mélange sable+opalite	limon de Bioley	argile de Genève
L1	14.4	19.0	38.9
L2	14.7	18.4	39.8
L3	13.4	18.3	37.2
L4	13.4	17.8	34.5
L5	12.9	19.0	36.3
L6/1	15.0	19.0	37.6
L6/2	15.0	19.0	37.8
L6/3	14.8	19.0	38.0
L6/4	14.5	19.5	35.0
L6/5	15.0	19.8	35.0
L6/6	16.2	18.9	37.9
L6/7	14.1	19.3	39.3
L6/8	15.8	-	39.9
moyenne	14.6	18.9	37.5
écart-type	0.94	0.54	1.82
coeff. var. [%]	6.5	2.9	4.9



Laboratoire	$w$ [%]
Lab 1	14.4
Lab 2	14.7
Lab 3	13.4
Lab 4	13.4
Lab 5	12.9
Lab 6	15.1
Moyenne	14.0
Ecart-type	0.8
CV	5.6%

Figure 4.5.1. Teneur en eau naturelle avec la moyenne et son écart-type pour le sable+opalite

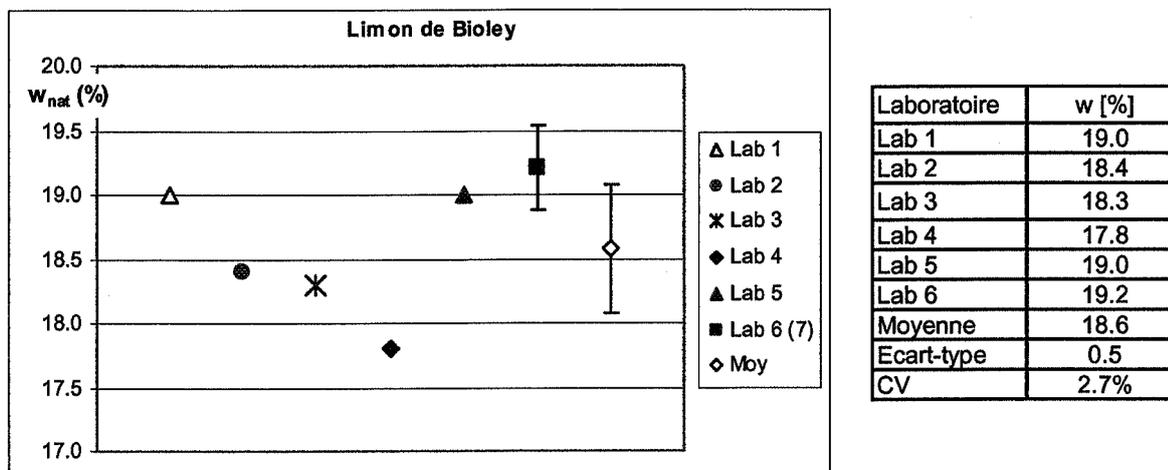


Figure 4.5.2 Teneur en eau naturelle avec la moyenne et son écart-type pour le limon de Bioley

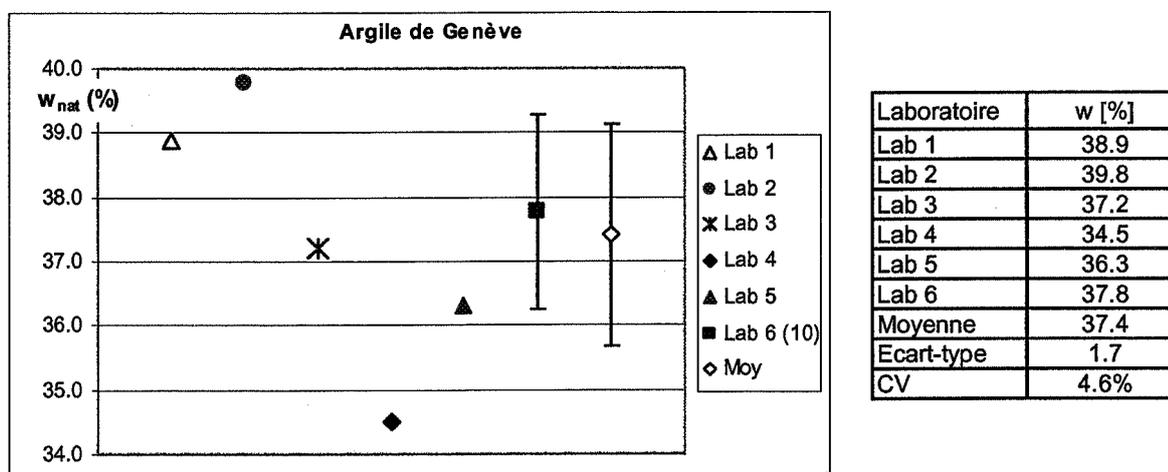
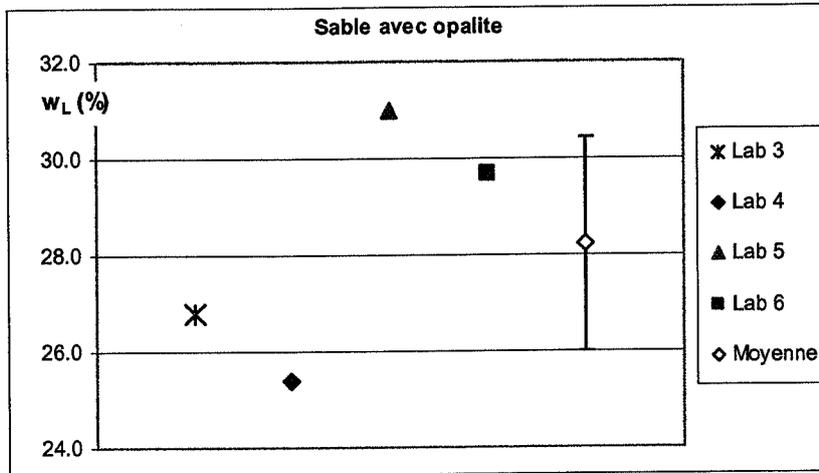


Figure 4.5.3 Teneur en eau naturelle avec la moyenne et son écart-type pour l'argile de Genève

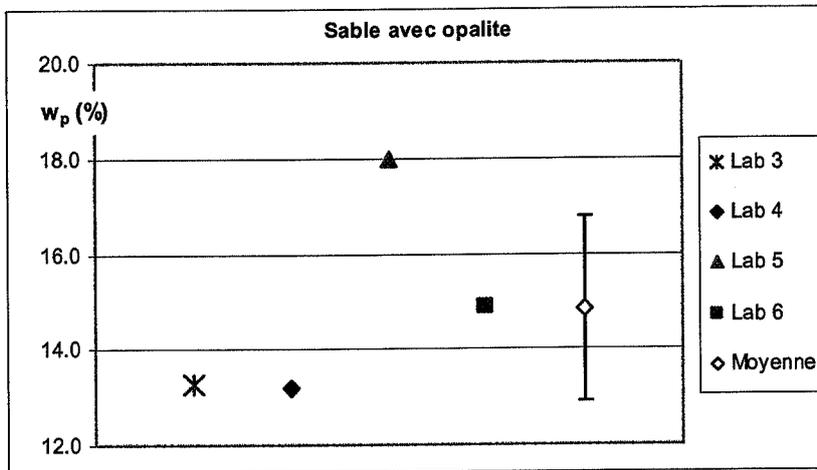
Tableau 4.5.2. Valeurs des limites de liquidité ( $w_L$ ) et de plasticité ( $w_P$ )

Laboratoire	mélange sable+opalite		limon de Bioley		argile de Genève	
	$w_P$	$w_L$	$w_P$	$w_L$	$w_P$	$w_L$
L3	13.3	26.8	18.2	29.1	22.1	45.0
L4	13.2	25.4	16.1	26.8	21.2	42.5
L5	18.0	31.0	17.0	32.0	22.0	52.0
L6/1	14.9	29.7	15.5	28.9	22.9	41.1
L6/2					27.8	42.5
L6/3					20.2	49.8
moyenne	14.9	28.2	16.7	29.2	22.7	45.5
écart-type	2.24	2.57	1.17	2.14	2.66	4.44
Coeff. var. [%]	15.1	9.1	7.0	7.3	11.7	9.8



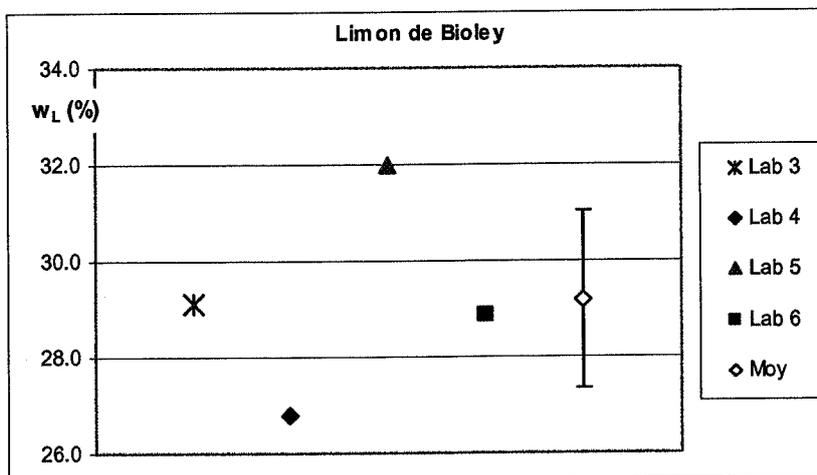
Laboratoire	w <sub>L</sub> [%]
Lab 3	26.8
Lab 4	25.4
Lab 5	31.0
Lab 6	29.7
Moyenne	28.2
Ecart-type	2.2
CV	7.9%

Figure 4.5.4 Limite de liquidité w<sub>L</sub> avec la moyenne et son écart-type pour le sable+opalite



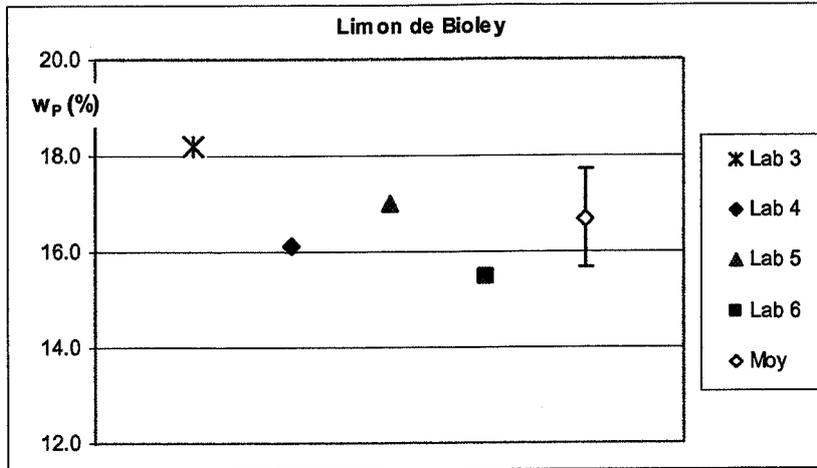
Laboratoire	w <sub>P</sub> [%]
Lab 3	13.3
Lab 4	13.2
Lab 5	18.0
Lab 6	14.9
Moyenne	14.9
Ecart-type	1.9
CV	13.1%

Figure 4.5.5 Limite de plasticité w<sub>P</sub> avec la moyenne et son écart-type pour le sable+opalite



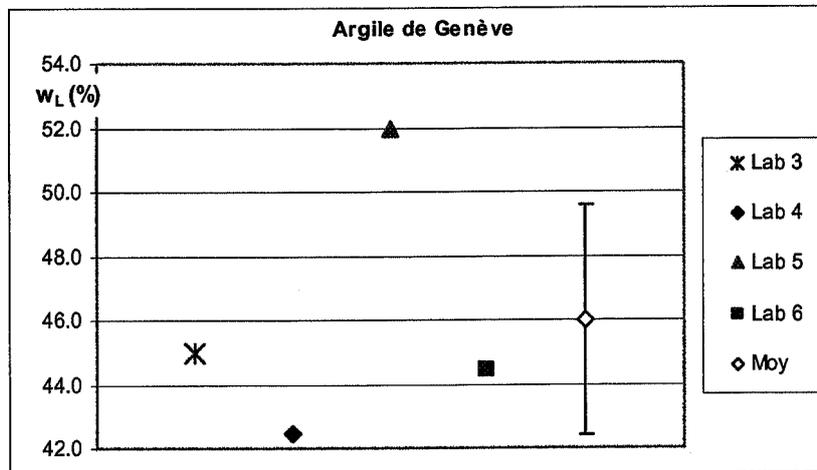
Laboratoire	w <sub>L</sub> [%]
Lab 3	29.1
Lab 4	26.8
Lab 5	32.0
Lab 6	28.9
Moyenne	29.2
Ecart-type	1.9
CV	6.3%

Figure 4.5.6 Limite de liquidité w<sub>L</sub> avec la moyenne et son écart-type pour le limon de Bioley



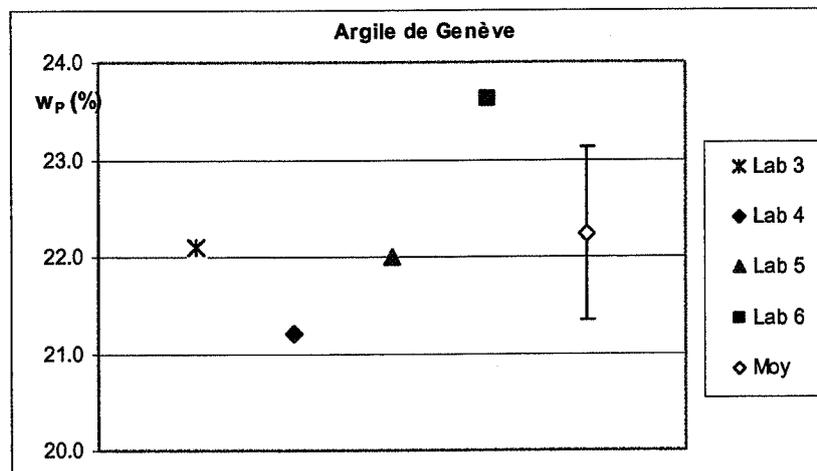
Laboratoire	w <sub>P</sub> [%]
Lab 3	18.2
Lab 4	16.1
Lab 5	17.0
Lab 6	15.5
Moyenne	16.7
Ecart-type	1.0
CV	6.1%

Figure 4.5.7 Limite de plasticité  $w_P$  avec la moyenne et son écart-type pour le limon de Bioley



Laboratoire	w <sub>L</sub> [%]
Lab 3	45.0
Lab 4	42.5
Lab 5	52.0
Lab 6	44.5
Moyenne	46.0
Ecart-type	3.6
CV	7.8%

Figure 4.5.8. Limite de liquidité  $w_L$  avec la moyenne et son écart-type pour l'argile de Genève



Laboratoire	w <sub>P</sub> [%]
Lab 3	22.1
Lab 4	21.2
Lab 5	22.0
Lab 6	23.6
Moyenne	22.2
Ecart-type	0.9
CV	4.0%

Figure 4.5.9 Limite de plasticité  $w_P$  avec la moyenne et son écart-type pour l'argile de Genève

#### 4.5.2 Commentaires, analyses et recommandations

Le laboratoire L6 ayant effectué plusieurs essais de détermination de la teneur en eau naturelle, nous avons là aussi reporté uniquement la moyenne et le coefficient de variation obtenus.

Nous avons également représenté sur chaque figure, comme pour les autres essais, la moyenne de tous les résultats obtenus par les différents laboratoires avec leur coefficient de variation.

Pour les limites de liquidité et de plasticité, tous les essais sont reportés, soit un essai par sol et par laboratoire. On trouvera aussi la valeur moyenne de tous ces essais avec leur écart-type et moyenne.

Les résultats sont dans l'ensemble moyens. Ils sont bons pour la teneur en eau naturelle, mais un peu moins en ce qui concerne les limites de consistance d'Atterberg. On remarque que cet essai reste assez difficile à réaliser et que l'expérience de l'opérateur est prépondérante, vu que les résultats dépendent en partie de son interprétation, surtout pour la limite de plasticité. Malgré cela, les écarts-types et les coefficients de variation restent bien en deçà de ceux donnés dans la norme SN 670'010b pour des sols semblables.

Comme pour la détermination des masses volumiques, il n'y a pas de recommandations particulières à formuler, mis à part le fait d'effectuer plusieurs essais par type de sol pour pouvoir apprécier la répétitivité de ces derniers par laboratoire. A l'avenir la participation d'un plus grand nombre de laboratoires et l'application stricte du mode opératoire, lors de la réalisation de ces essais, serait un avantage indéniable pour affiner l'analyse.



## **5 Résultats obtenus sur les roches**

### **5.1 Généralités**

Les essais choisis pour les roches sont la détermination de la masse volumique apparente, les résistances à la compression uniaxiale et à la traction indirecte, ainsi que la détermination du module de déformation.

En préambule il faut rappeler que le pilotage des essais de compression uniaxiale peut être asservi soit en déformation, soit en charge ou en contrainte. La première méthode est généralement appliquée car elle permet un contrôle plus aisé de la rupture et empêche notamment l'éclatement soudain de l'éprouvette. Toutefois les laboratoires appliquent l'une ou l'autre des méthodes en fonction des équipements dont ils disposent.

### **5.2 Laboratoires participants**

#### **5.2.1 Laboratoire L1**

Ce laboratoire procède pour chaque type de roche à un premier essai de compression uniaxiale, sans suivi des déformations, qui permet ainsi de calibrer l'ordre de grandeur de la charge de rupture. Pour les essais suivants, la charge est appliquée jusqu'à une valeur oscillant entre 60 et 80% de la charge de rupture, suivie d'une décharge. Les capteurs de déplacement sont ensuite enlevés et l'essai est poursuivi jusqu'à la rupture. Cette procédure, inspirée des recommandations de la Société Internationale de Mécanique des Roches, correspond à un protocole interne du laboratoire; elle empêche, lors d'une rupture brusque, d'endommager le capteur de déplacement. La vitesse de chargement n'est pas précisée et aucune information sur la densité n'est fournie.

#### **5.2.2 Laboratoire L2**

Les essais de compression uniaxiale ont été effectués selon la norme ASTM 2938-95 avec des vitesses de chargement de  $0.03 \text{ N/mm}^2/\text{s}$  pour le grès et  $0.3 \text{ N/mm}^2/\text{s}$  pour les autres roches. En remplacement des essais de traction indirecte ce laboratoire a effectué des essais d'écrasement ponctuel selon la norme ASTM 5731.

#### **5.2.3 Laboratoire L3**

La vitesse de chargement des essais de compression uniaxiale a été asservie en déformation, soit  $0.05 \text{ mm/min}$ , alors que pour les essais brésiliens la vitesse était de  $0.05 \text{ N/mm}^2/\text{s}$ . Les normes appliquées sont respectivement ASTM D 3148 et ASTM D 3967. Lors de l'essai de compression 2 à 3 cycles de décharge et recharge sont effectués pour déterminer la valeur du module E et du coefficient de Poisson.

#### 5.2.4 Laboratoire L5

Les essais de compression uniaxiale et les essais de traction indirecte ont été effectués au moyen d'une presse à béton Mohr-Federhaf avec des vitesses de chargement respectivement de 1.3 kN/s et 0.2 kN/s, quel que soit le type de roche testé. Les essais sont conformes à la norme SIA 162/1.

#### 5.2.5 Laboratoire L7

Les essais de compression uniaxiale ont été réalisés selon la norme ASTM D2938-86 et la détermination du module d'élasticité selon ASTM D3148-96. Pour les roches dures, la vitesse de chargement appliquée était comprise entre 0.24 et 0.28 kN/s, alors que pour le grès, plus tendre, la vitesse a été fixée à 0.02 kN/s. Quant aux essais de traction indirecte effectués selon la norme NF P94-422, la vitesse de chargement a été fixée à 0.03 kN/s pour le grès, 0.22 kN/s pour le calcaire et 0.13 kN/s pour le marbre et l'anhydrite.

#### 5.2.6 Laboratoire L8

Les essais de compression simple ont été effectués avec un asservissement de la vitesse de déformation à une valeur de 0,1 %/min jusqu'à la rupture. Pendant l'essai la déformation axiale a été mesurée à l'aide de 2 capteurs LVDT placés entre les plateaux de la presse ; la déformation diamétrale a été mesurée au moyen d'une chaîne extensométrique. Les valeurs du module de déformation E et du coefficient de Poisson  $\nu$  ont été calculées pour une contrainte correspondant à 50 % de la contrainte de rupture. Les normes appliquées sont respectivement ASTM D 3148 et ASTM D 3967. Le module a également été déterminé à l'aide de jauges collées sur la surface de l'éprouvette. Le laboratoire L8 a effectué deux séries complètes de tous les essais (L8a et L8b).

#### 5.2.7 Laboratoire L9

Ce laboratoire a reçu des éprouvettes aux mêmes dimensions que les autres laboratoires, mais sans qu'elles aient été rectifiées. Il s'agissait de voir si les opérations de surfacage par un autre laboratoire pouvaient influencer les résultats. Les procédures d'essai de ce laboratoire correspondent aux descriptions du laboratoire L7.

### 5.3 Exploitation des résultats des essais

Les résultats des divers essais effectués sont résumés dans les tableaux 5.1 à 5.4. Ils présentent pour chaque caractéristique testée et pour chaque type de roche la moyenne des résultats obtenus, leur écart type, coefficient de variation, valeurs minimale et maximale ainsi que le nombre d'essais effectués.

Les résultats de tous les participants ont été analysés selon les recommandations de la norme ISO 5725-2 (Exactitude des résultats et méthodes de mesure – Partie 2 : Méthode base pour la

détermination de la répétabilité et de la reproductibilité d'une méthode de mesure normalisée), qui propose deux tests d'évaluation.

Le test de Cochran consiste à comparer la variabilité interne de chaque participant à celle de l'ensemble représentée par l'écart type moyen, ceci afin d'écarter les valeurs de variabilité aberrante du calcul de l'écart type de référence.

$$C = \frac{s_{\max}^2}{\sum_{i=1}^p s_i^2}$$

$s_{\max}$  = écart-type le plus élevé de l'ensemble

$s_i$  = écart-type du laboratoire considéré

- Si  $C$  est inférieur ou égal à sa valeur critique à 5%, la caractéristique testée est acceptée comme étant correcte.
- Si  $C$  est supérieur à sa valeur critique à 5% et inférieur ou égal à sa valeur critique à 1%, la caractéristique testée est appelée valeur isolée.
- Si  $C$  est supérieur à sa valeur critique à 1%, la caractéristique testée est appelée valeur statistique aberrante.

Les valeurs critiques pour 6 laboratoires effectuant chacun 5 essais sont respectivement égales à **0.564** (1%) et **0.480** (5%).

Le test de Grubbs consiste à confronter chaque valeur extrême (maximale ou minimale) à la moyenne de l'ensemble de la population, ceci afin d'écarter les moyennes aberrantes du calcul de la moyenne de référence.

$$G_p = (x_p - \bar{x}) / s$$

$x_p$  = moyenne maximale

$x_l$  = moyenne minimale

$$G_l = (\bar{x} - x_l) / s$$

$\bar{x}$  = moyenne des laboratoires

$s$  = écart-type des laboratoires

- Si  $G_p$  ou  $G_l$  est inférieur ou égal à sa valeur critique à 5%, la caractéristique testée est acceptée comme étant correcte.
- Si  $G_p$  ou  $G_l$  est supérieur à sa valeur critique à 5% et inférieur ou égal à sa valeur critique à 1%, la caractéristique testée est appelée valeur isolée.
- Si  $G_p$  ou  $G_l$  est supérieur à sa valeur critique à 1%, la caractéristique testée est appelée valeur statistique aberrante.

Les valeurs critiques pour 6 laboratoires effectuant chacun 5 essais sont respectivement égales à **1.973** (1%) et **1.887** (5%).

### 5.3.1 Masse volumique apparente

Tableau 5.1 Masse volumique apparente [ $t/m^3$ ]

<b>GRES</b>							
Laboratoire	L2	L3	L7	L8a	L8b	L9	L2 à L9
moyenne	2.176	2.184	2.175	2.172	2.176	2.164	2.174
écart-type	0.011	0.007	0.003	0.004	0.005	0.009	0.009
coeff. var. [%]	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4
valeur minimale	2.16	2.18	2.17	2.17	2.17	2.15	2.15
valeur maximale	2.19	2.19	2.18	2.18	2.18	2.17	2.19
nombre essais	5	5	4	5	5	5	29

<b>ANHYDRITE</b>							
Laboratoire	L2	L3	L7	L8a	L8b	L9	L2 à L9
moyenne	2.854	2.865	2.851	2.846	2.840	2.843	2.850
écart-type	0.005	0.005	0.008	0.009	0.007	0.005	0.010
coeff. var. [%]	0.2	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.4
valeur minimale	2.85	2.86	2.84	2.84	2.83	2.84	2.83
valeur maximale	2.86	2.87	2.86	2.86	2.85	2.85	2.87
nombre essais	5	5	5	5	5	4	29

<b>MARBRE</b>							
Laboratoire	L2	L3	L7	L8a	L8b	L9	L2 à L9
moyenne	2.708	2.721	2.706	2.712	2.706	2.702	2.709
écart-type	0.004	0.006	0.002	0.008	0.009	0.004	0.008
coeff. var. [%]	0.2	0.2	0.1	0.3	0.3	0.2	0.3
valeur minimale	2.70	2.71	2.70	2.70	2.70	2.70	2.70
valeur maximale	2.71	2.73	2.71	2.72	2.72	2.71	2.73
nombre essais	5	5	5	5	5	5	30

<b>CALCAIRE</b>							
Laboratoire	L2	L3	L7	L8a	L8b	L9	L2 à L9
moyenne	2.694	2.709	2.684	2.712	2.706	2.691	2.700
écart-type	0.005	0.006	0.018	0.013	0.005	0.004	0.014
coeff. var. [%]	0.2	0.2	0.7	0.5	0.2	0.1	0.5
valeur minimale	2.69	2.70	2.65	2.70	2.70	2.69	2.65
valeur maximale	2.70	2.72	2.70	2.73	2.71	2.70	2.73
nombre essais	5	5	5	5	5	4	29

Pour tous les laboratoires, les résultats montrent des valeurs moyennes très semblables et des écarts-types bas (tableau 5.1 et figure 5.1). Les faibles coefficients de variation CV calculés reflètent la nature très homogène du grès, de l'anhydrite et du marbre. En revanche pour le calcaire, le plus grand écart entre les valeurs minimale et maximale peut s'expliquer par une nature plus hétérogène, notamment la présence de stylolithes.

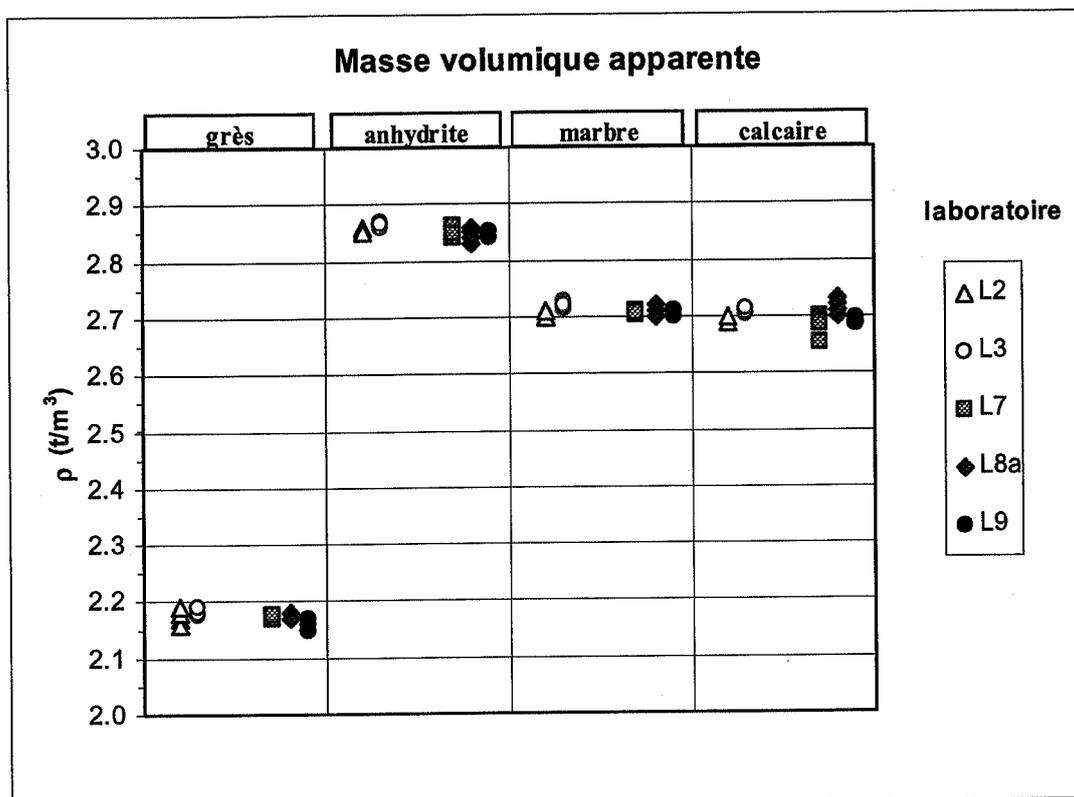


Figure 5.1 Représentation graphique des résultats de la masse volumique apparente

Tableau 5.2 Test de Cochran sur les valeurs de la masse volumique apparente

			grès	anhydrite	marbre	calcaire
Valeur critique 1%	0.564	C	0.418	0.298	0.346	0.542
Valeur critique 5%	0.480					

Tableau 5.3 Test de Grubbs sur les valeurs de la masse volumique apparente

			grès	anhydrite	marbre	calcaire
Valeur critique 1%	1.973	$G_p$	1.461	1.660	1.780	1.145
Valeur critique 5%	1.887	$G_1$	1.614	1.082	1.070	1.342

Les deux tests, donnés aux tableaux 5.2 et 5.3, révèlent que les valeurs mesurées peuvent être considérées comme correctes. Le test de Cochran montre une légère anomalie pour la densité des calcaires, probablement due au laboratoire L7, qui présente un écart-type de 0.018. Cela correspondant à un coefficient de variation de 0.7%, alors que la moyenne des laboratoires se situe entre 0.1 et 0.5%.

### 5.3.2 Compression uniaxiale

Tableau 5.4 Résistance en compression uniaxiale [ $MN/m^2$ ]

<b>GRES</b>									
Laboratoire	L1	L2	L3	L5	L7	L8a	L8b	L9	L1 à L9
moyenne	12.12	9.82	8.52	9.86	9.15	11.48	12.22	8.91	10.29
écart-type	1.09	1.91	0.93	1.47	1.01	1.71	0.70	1.58	1.87
coeff. var. [%]	9.0	19.5	10.9	14.9	11.1	14.9	5.7	17.7	18.2
valeur minimale	10.8	7.3	7.4	7.8	8.0	8.8	11.4	7.1	7.1
valeur maximale	13.1	12.3	9.5	11.6	10.1	13.1	13.1	11.1	13.1
nombre essais	5	5	5	5	4	5	5	5	39

<b>ANHYDRITE</b>									
Laboratoire	L1	L2	L3	L5	L7	L8a	L8b	L9	L1 à L9
moyenne	154.82	158.58	163.20	158.76	162.93	167.50	152.96	144.05	158.08
écart-type	30.51	15.56	8.05	5.59	24.18	11.04	23.42	4.57	17.41
coeff. var. [%]	19.7	9.8	4.9	3.5	14.8	6.6	15.3	3.2	11.0
valeur minimale	127.9	134.0	155.1	151.6	127.8	152.3	118.9	138.6	118.9
valeur maximale	202.3	173.2	174.3	164.4	179.8	180.6	183.1	149.7	202.3
nombre essais	5	5	5	5	4	5	5	4	38

<b>MARBRE</b>									
Laboratoire	L1	L2	L3	L5	L7	L8a	L8b	L9	L1 à L9
moyenne	104.68	103.36	106.70	107.46	100.70	104.62	105.80	101.45	104.35
écart-type	11.35	7.63	3.97	3.97	2.50	4.38	1.89	1.97	5.56
coeff. var. [%]	10.8	7.4	3.7	3.7	2.5	4.2	1.8	1.9	5.3
valeur minimale	85.3	91.5	101.7	101.2	98.0	97.8	104.3	98.5	85.3
valeur maximale	113.8	110.6	110.4	110.6	104.2	109.3	108.6	103.6	113.8
nombre essais	5	5	5	5	5	5	5	5	40

<b>CALCAIRE</b>									
Laboratoire	L1	L2	L3	L5	L7	L8a	L8b	L9	L1 à L9
moyenne	188.54	193.06	165.74	186.38	184.79	200.86	198.26	204.28	189.88
écart-type	16.07	30.88	9.90	6.11	27.36	10.31	7.21	8.23	19.31
coeff. var. [%]	8.5	16.0	6.0	3.3	14.8	5.1	3.6	4.0	10.2
valeur minimale	171.4	138.7	152.6	178.6	137.5	186.5	190.9	192.9	137.5
valeur maximale	213.8	215.4	177.6	195.0	202.5	209.9	207.3	211.3	215.4
nombre essais	5	5	5	5	5	5	5	4	39

Les différents laboratoires ont des résultats raisonnablement équivalents. En particulier, dans le cas du marbre, les résultats montrent des valeurs moyennes très proches et des écarts-types bas. Ceci non seulement reflète l'homogénéité des échantillons mais une très bonne répétitivité des essais pour chaque laboratoire, ainsi qu'une procédure soignée pour l'ensemble des laboratoires. Les dispersions légèrement supérieures obtenues pour les autres matériaux sont dues

à une plus grande variabilité des caractéristiques mécaniques des échantillons et de leur nature minéralogique.

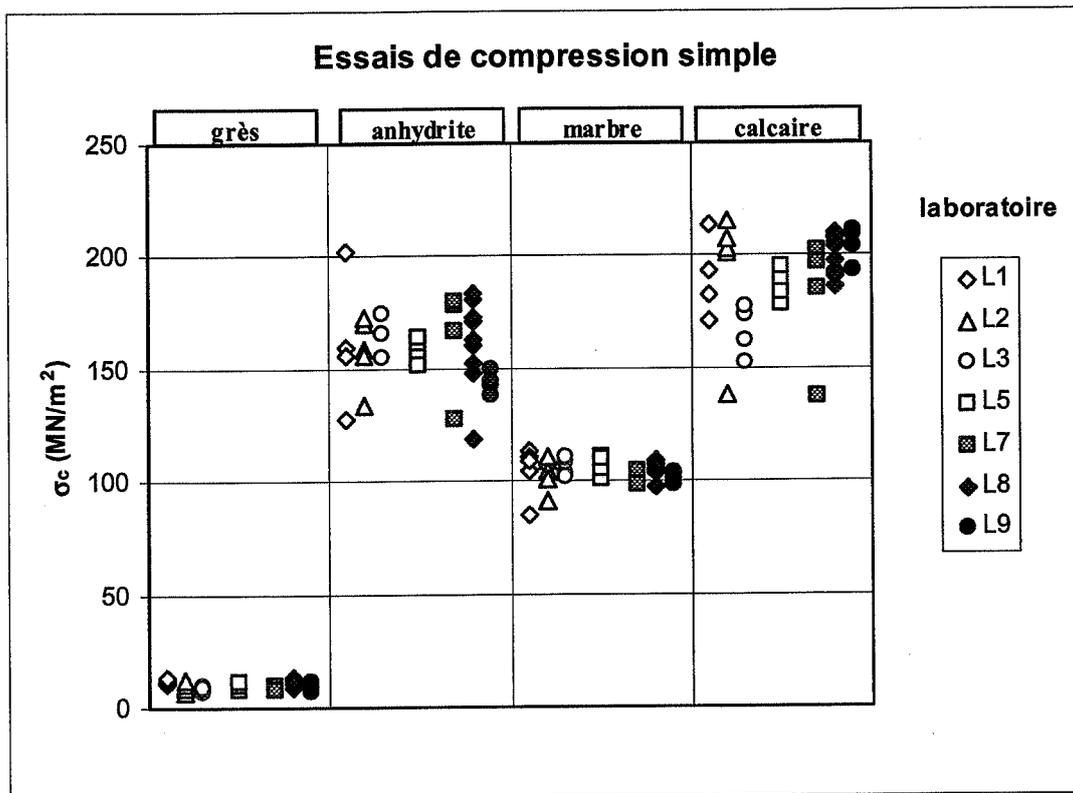


Figure 5.2 Représentation graphique des résultats de la résistance en compression uniaxiale

Tableau 5.5 Test de Cochran sur les valeurs de la résistance en compression uniaxiale

			grès	anhydrite	marbre	calcaire
Valeur critique 1%	0.463	C	0.256	0.466	0.520	0.420
Valeur critique 5%	0.391					

En éliminant la plus faible valeur du marbre du laboratoire L1 (85.3 MPa), la valeur de C du test de Cochran (tableau 5.5) passe de 0.520 à 0.434.

Tableau 5.6 Test de Grubbs sur les valeurs de la résistance en compression uniaxiale

			grès	anhydrite	marbre	calcaire
Valeur critique 1%	2.274	G <sub>p</sub>	1.329	1.323	1.300	1.157
Valeur critique 5%	2.126	G <sub>1</sub>	1.180	1.892	1.521	2.020

Le test de Grubbs (tableau 5.6) montre que tous les résultats peuvent être considérés comme corrects.

### 5.3.3 Module de déformation

Tableau 5.7 Module de déformation [MN/m<sup>2</sup>]

GRES							
Laboratoire	L1	L3	L7	L8a	L8b	L9	L1 à L9
moyenne	2750	1943	1483	2387	2255	1623	2070
écart-type	957	396	140	319	203	270	586
coeff. var. [%]	34.8	20.4	9.5	13.4	9.0	16.6	28.3
valeur minimale	2000	1460	1300	2050	2000	1300	1300
valeur maximale	4000	2270	1642	2770	2550	1860	4000
nombre essais	4	5	4	5	5	5	28

ANHYDRITE							
Laboratoire	L1	L3	L7	L8a	L8b	L9	L1 à L9
moyenne	91500	60940	26990	54960	44010	24379	50779
écart-type	4041	1438	950	2913	12877	1209	22599
coeff. var. [%]	4.4	2.4	3.5	5.3	29.3	5.0	44.5
valeur minimale	88000	59300	25800	51700	29850	22700	22700
valeur maximale	95000	62300	27811	58000	55700	25499	95000
nombre essais	4	5	4	5	5	4	27

MARBRE							
Laboratoire	L1	L3	L7	L8a	L8b	L9	L1 à L9
moyenne	70250	54640	23819	45370	45382	22380	42723
écart-type	2062	1488	506	1754	504	920	16590
coeff. var. [%]	2.9	2.7	2.1	3.9	1.1	4.1	38.8
valeur minimale	68000	52600	23100	42500	44750	21400	21400
valeur maximale	73000	56600	24397	47200	46150	23471	73000
nombre essais	4	5	5	5	5	5	29

CALCAIRE							
Laboratoire	L1	L3	L7	L8a	L8b	L9	L1 à L9
moyenne	79750	54880	26432	49940	49874	26469	47518
écart-type	2986	1453	655	537	613	312	17763
coeff. var. [%]	3.7	2.6	2.5	1.1	1.2	1.2	37.4
valeur minimale	76000	52600	25400	49100	49100	26030	25400
valeur maximale	83000	56600	27100	50600	50570	26732	83000
nombre essais	4	5	5	5	5	4	28

Pour la plupart de laboratoires, le module a été calculé en tenant compte de la déformation mesurée entre les plateaux de la presse pour une contrainte égale à 50% de la résistance ultime de l'échantillon. On observe que le laboratoire no 1 présente des valeurs systématiquement plus hautes que les autres, et le laboratoire no 9 présente des valeurs systématiquement plus basses, et ceci pour les 4 matériaux considérés. Les laboratoires L1 et L3 ont mesuré la déformation au moyen d'un dispositif fixé directement sur l'échantillon. D'autre part, le laboratoire L3 a effectué

2 cycles de charge-décharge pendant l'essai de compression uniaxiale, ce qui permet de calculer deux modules correspondants. Dans l'analyse des résultats seul le module de charge à 50% de la contrainte de rupture a été considéré.

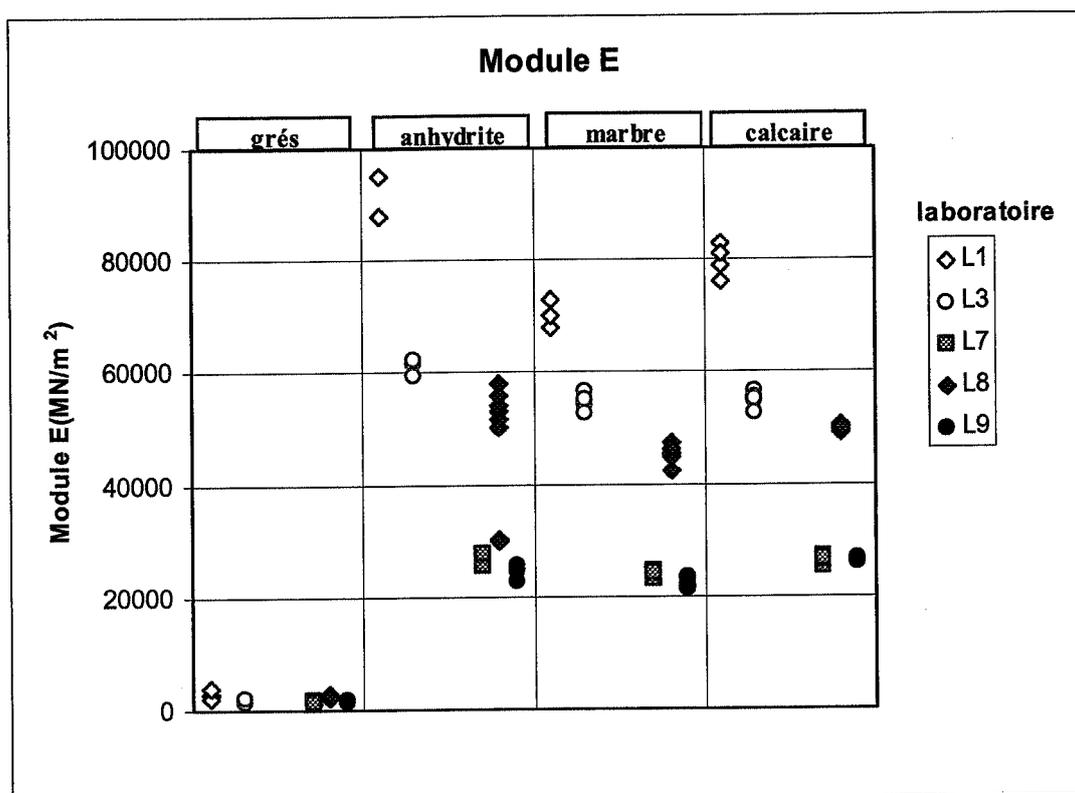


Figure 5.3 Représentation graphique des résultats du module E

Tableau 5.8 Test de Cochran sur les valeurs du module E

			grès	anhydrite	marbre	calcaire
Valeur critique 1%	0.564	C	0.718	0.844	0.448	0.685
Valeur critique 5%	0.480					

Tableau 5.9 Test de Grubbs sur les valeurs du module E

			grès	anhydrite	marbre	calcaire
Valeur critique 1%	1.973	G <sub>p</sub>	1.917	1.506	1.364	1.508
Valeur critique 5%	1.887	G <sub>1</sub>	0.827	1.068	1.161	1.094

Le test de Grubbs (tableau 5.9) est satisfaisant. En revanche le test de Cochran (tableau 5.8) fait apparaître des divergences importantes au niveau des valeurs de module obtenues. Cela s'explique aisément par la méthode de mesure des déformations. Les laboratoires L1 et L3 utilisent un dispositif, mis en place directement sur l'éprouvette, alors que les autres laboratoires ont utilisé des capteurs de déplacement LVDT placés entre les plateaux de la presse.

D'autre part, les laboratoires L7 et L8 ont déterminé le module à l'aide de jauges collées sur la surface de l'éprouvette. Le tableau 5.10 présente les modules obtenus avec le capteur placé entre les plateaux  $E_p$  et celui obtenu à l'aide des jauges  $E_j$ . Le rapport  $E_j/E_p$  est relativement constant pour chaque laboratoire, quelle que soit la roche testée. En revanche on peut noter que ce rapport est plus élevé pour le laboratoire L7 (2.36) que pour le laboratoire L8 (1.54).

Tableau 5.10 Module  $E$  déterminé avec jauges

Roche	Laboratoire L7				Laboratoire L8			
	Echantillon	$E_p$ (MPa)	$E_j$ (MPa)	$E_j/E_p$	Echantillon	$E_p$ (MPa)	$E_j$ (MPa)	$E_j/E_p$
grès	RX94_G031	1642	3920	2.4	RX94_G041	2300	3100	1.3
					RX94_G042	1890	2550	1.3
					RX94_G043	2000	2600	1.3
					RX94_G044	2275	3043	1.3
					RX94_G045	2150	3330	1.5
anhydrite	RX94_A032	27811	72100	2.6	RX94_A036	54200	79300	1.5
					RX94_A037	58000	85000	1.5
					RX94_A040	51700	78250	1.5
					RX94_A041	54000	81800	1.5
					RX94_A045	55700	80700	1.4
marbre	RX94_M031	24397	55120	2.3	RX94_M036	47200	81600	1.7
					RX94_M037	45700	76000	1.7
					RX94_M038	46150	78000	1.7
					RX94_M039	45300	80000	1.8
					RX94_M043	45280	76900	1.7
calcaire	RX94_C035	26861	59570	2.2	RX94_C041	50570	80800	1.6
					RX94_C042	49100	78400	1.6
					RX94_C043	49400	78800	1.6
					RX94_C044	50300	77800	1.5
					RX94_C045	50000	80200	1.6
moyenne				2.36				
écart-type				0.17				
					1.54			
					0.14			

### 5.3.4 Résistance à la traction indirecte

Tableau 5.11 Résistance à la traction indirecte [ $MN/m^2$ ]

GRES							
Laboratoire	L1	L3	L5	L7	L8a	L8b	L1 à L8
moyenne	0.94	0.84	0.80	1.97	1.01	1.01	1.10
écart-type	0.09	0.11	0.07	0.23	0.08	0.12	0.42
coeff. var. %	9.5	13.6	8.8	11.9	8.1	11.8	38.5
valeur minimale	0.8	0.7	0.7	1.7	0.9	0.9	0.7
valeur maximale	1.0	1.0	0.9	2.3	1.1	1.2	2.3
nombre essais	5	5	5	5	5	5	30

ANHYDRITE							
Laboratoire	L1	L3	L5	L7	L8a	L8b	L1 à L8
moyenne	9.16	12.88	8.68	11.75	9.32	8.66	10.07
écart-type	2.29	1.51	0.80	1.99	1.84	1.65	2.30
coeff. var. %	25.0	11.7	9.2	17.0	19.8	19.1	22.8
valeur minimale	6.5	10.7	7.8	8.2	7.5	6.5	6.5
valeur maximale	11.7	14.2	9.8	12.8	12.1	11.1	14.2
nombre essais	5	5	5	5	5	5	30

MARBRE							
Laboratoire	L1	L3	L5	L7	L8a	L8b	L1 à L8
moyenne	9.46	11.14	6.34	9.01	8.20	7.08	8.54
écart-type	0.71	0.81	0.88	0.53	1.08	1.16	1.80
coeff. var. %	7.5	7.3	13.9	5.9	13.2	16.5	21.0
valeur minimale	8.9	10.4	5.0	8.3	6.6	5.7	5.0
valeur maximale	10.5	12.5	7.3	9.7	9.6	8.3	12.5
nombre essais	5	5	5	5	5	5	30

CALCAIRE							
Laboratoire	L1	L3	L5	L7	L8a	L8b	L1 à L8
moyenne	10.30		7.78	12.28	5.46	6.12	8.39
écart-type	1.76		2.84	2.26	0.80	1.11	3.14
coeff. var. %	17.1		36.5	18.4	14.7	18.2	37.5
valeur minimale	9.0		4.9	8.9	4.1	5.0	4.1
valeur maximale	13.4		12.2	14.1	6.1	7.6	14.1
nombre essais	5		5	5	5	5	25

Les essais de traction indirecte montrent une plus grande dispersion des résultats. Non tellement à l'intérieur de chaque laboratoire, mais en considérant la totalité des résultats le coefficient de variation atteint des valeurs de l'ordre du 40%.

Ceci mérite une révision des procédures d'essai, bien qu'il soit accepté dans la littérature que les essais en traction ont une plus grande dispersion que ceux de compression simple.

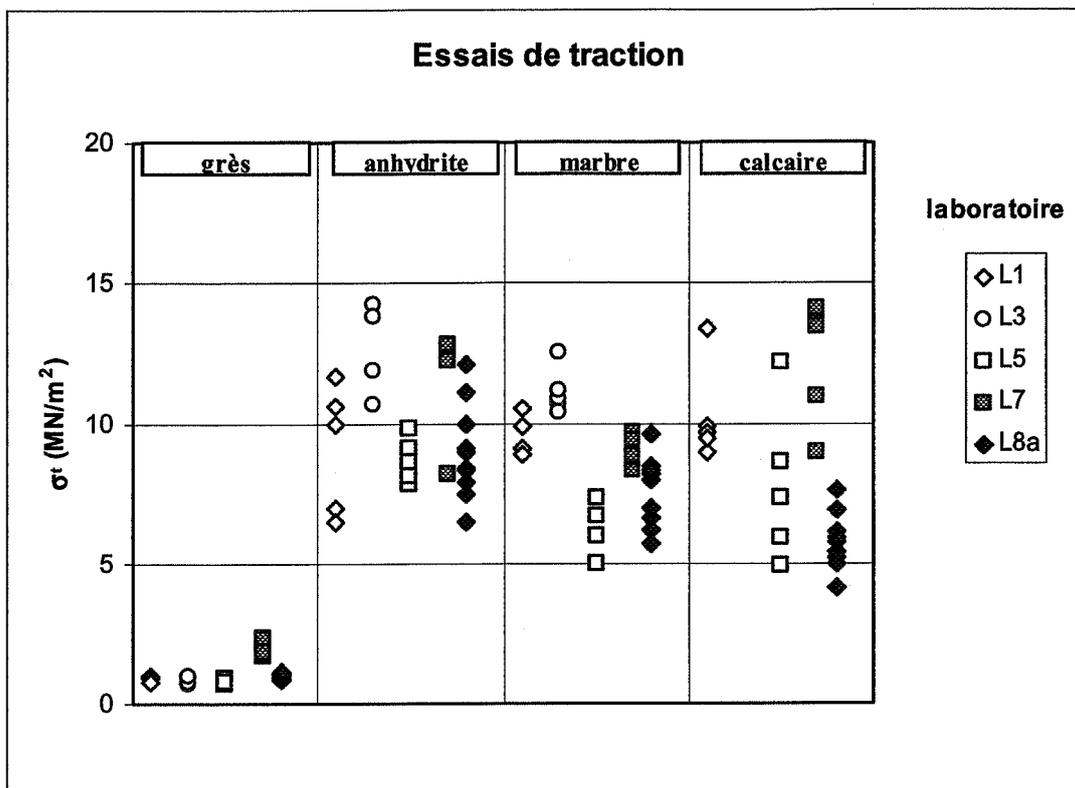


Figure 5.4 Représentation graphique des résultats de la résistance en traction indirecte

Tableau 5.12 Test de Cochran sur les valeurs de la résistance en traction indirecte

			grès	anhydrite	marbre	calcaire
Valeur critique 1%	0.564	C	0.537	0.287	0.286	0.444
Valeur critique 5%	0.480					

Tableau 5.13 Test de Grubbs sur les valeurs de la résistance en traction indirecte

			grès	anhydrite	marbre	calcaire
Valeur critique 1%	1.973	G <sub>p</sub>	2.000	1.568	1.507	1.357
Valeur critique 5%	1.887	G <sub>1</sub>	0.677	0.790	1.273	1.021

Les deux tests de Cochran et Grubbs (tableaux 5.12 et 5.13) font apparaître une anomalie pour le grès. L'examen des résultats montre que les valeurs du laboratoire L7 sont deux fois plus fortes que celles des autres laboratoires. En divisant leurs valeurs par 2, C passe de 0.537 à 0.235 et les valeurs G<sub>p</sub> et G<sub>1</sub> respectivement à 1.442 et 0.886, donc largement en dessous des valeurs critiques.

## 6. Conclusions et propositions pour la poursuite de cette étude

### 6.1 Conclusions

Sur la vingtaine de laboratoires contactés pour participer à cette étude, treize laboratoires ont dans un premier temps répondu favorablement à notre requête, mais finalement seuls neuf laboratoires ont réellement effectué certains essais des listes proposées. On peut déplorer le nombre restreint de laboratoires participants, mais il faut imputer cette lacune davantage à un manque de temps et de moyens, plutôt qu'à un désintérêt manifeste de leur part.

En mécanique des sols, les essais croisés suivants ont été réalisés :

- consolidation uniaxiale à l'oedomètre
- granulométrie et sédimentométrie
- cisaillement direct à la boîte de Casagrande
- détermination de la masse volumique apparente humide et de la masse volumiques des grains
- détermination de la teneur en eau naturelle et des limites d'Atterberg.

Dans l'ensemble les résultats de tous ces essais sont assez satisfaisants malgré quelques petites erreurs inévitables pour une première campagne d'essais croisés.

En effet, après une analyse statistique des paramètres les plus importants résultant de ces essais, on peut noter que les résultats se situent tous largement en deçà des écarts-types et coefficients de variation donnés dans la norme SN 670'010b pour des sols similaires. De plus, les coefficients de variation de certains de ces paramètres ont également pu être comparés à ceux indiqués et admis dans le cours de « Fiabilité et Sécurité » du Prof. L. Vulliet, et là encore ils se retrouvent nettement à l'intérieur des plages définies. Par conséquent, tous les paramètres principaux, analysés en détail au chapitre 4, se situent dans des plages de variation auxquelles on était en droit de s'attendre, d'autant plus que les échantillons de sols testés étaient bien connus et qu'ils ont été confectionnés de manière systématique en laboratoire.

De manière générale, les résultats d'essais obtenus sur les roches par les différents laboratoires peuvent être considérés comme bons, notamment :

- La masse volumique apparente a été déterminée avec beaucoup de précision, puisque les coefficients de variation sont inférieurs à 0.7%.
- Il en est de même de la résistance à la compression uniaxiale, où les légères divergences observées s'expliquent davantage par la nature minéralogique contrastée des roches testées, plutôt que par les procédures utilisées.

- Les essais de traction indirecte montrent en revanche une plus grande dispersion des résultats, non tellement à l'intérieur de chaque laboratoire, mais lorsque l'on considère la totalité des résultats le coefficient de variation atteint des valeurs de l'ordre de 40%. Ceci mériterait une révision des procédures d'essai, bien que dans la littérature il soit accepté que les essais de traction indirecte présentent une plus grande dispersion que ceux de compression uniaxiale.
- La détermination du module E a montré certaines carences dans son estimation. Certains laboratoires ont tenu compte de la déformation mesurée entre les plateaux de la presse, d'autres l'ont mesurée au moyen d'un dispositif fixé directement sur l'échantillon. Ces procédures différentes expliquent les valeurs très hétérogènes du module calculé.

Les tests statistiques de Cochran et de Grubbs montrent, hormis pour le module E, que tous les résultats des laboratoires sont considérés comme corrects.

## 6.2 Propositions de poursuite de l'étude

Au vu de ces premiers résultats prometteurs, il faudra, lors d'une prochaine campagne d'essais croisés en mécanique des sols, fournir aux différents participants des échantillons encore mieux protégés, afin que leurs caractéristiques ne soient pas modifiées pendant le transport et l'entreposage avant la réalisation des essais. On devra également s'assurer que les laboratoires qui ne pourront pas réaliser ces essais dans un laps de temps raisonnable, comme cela a été le cas cette fois-ci, aient absolument la possibilité de conserver les échantillons à tester dans une chambre climatique à humidité et température constantes. En mécanique des roches, il s'agira de livrer des échantillons bruts, les laboratoires se chargeant alors de la préparation et notamment du rectifiage des faces des éprouvettes, afin de contrôler l'influence de ces opérations sur la valeur de la résistance en compression uniaxiale.

Pour les sols, les conditions d'essais, les types d'essai, les vitesses de cisaillement, les paliers de charge œdométriques, les contraintes appliquées, les tamis utilisés, les temps auxquels les lectures devront être prises, ainsi que tout autre paramètre utile à la meilleure réalisation possible de ces essais devront être parfaitement définis. Pour les essais sur roches, la vitesse de chargement, le type d'asservissement de la presse, le type de capteurs de déplacement utilisés et la description du dispositif de mesure, notamment pour les mesures de module, devront être précisés.

Toutes ces recommandations devraient sensiblement améliorer les résultats et permettre de faire des comparaisons plus détaillées des différents paramètres qui n'ont pas pu être analysés lors de cette première campagne d'essais croisés.

En outre, de manière plus générale les délais entre l'envoi des échantillons et le retour des résultats devront être imposés. Un calendrier avec échéancier précis devra être fixé et respecté.

D'autre part pour effectuer une analyse statistique valable, plusieurs essais devront être effectués par type de sol.

Les fichiers numériques des résultats d'essais devraient être fournis par les laboratoires participants afin de faciliter la synthèse de ceux-ci.

Cette expérience a été enrichissante et elle doit être poursuivie, par exemple par la création d'un réseau de laboratoires et l'élaboration d'un programme annuel ou bisannuel d'essais, qui devrait permettre d'affiner et de confirmer ces premiers résultats obtenus tant en mécanique des roches qu'en mécanique des sols.

D'autres campagnes d'essais croisés plus ponctuelles et mieux ciblées doivent être entreprises afin de pouvoir fixer, dans les normes relatives aux essais, les coefficients de variation des paramètres déterminés en laboratoire. Ces derniers pourront également être introduits sur les protocoles des résultats d'essai remis aux clients des laboratoires.

Finalement, dans la mesure de ses compétences, le METAS pourrait inciter, voire imposer aux laboratoires accrédités ou en voie de l'être, une participation plus soutenue à ces programmes d'essais croisés.



## Annexes

### Annexe 1. Mode opératoire pour la préparation des échantillons de sols

#### 1) Dimensions des échantillons :

Diamètre : 80 ou 100 mm, hauteur : 60 ou 100 mm

#### 2) Quantité requise pour un échantillon :

Sable + opalite : mélange d'une masse sèche de 60 % de Sable du Léman (0/3mm), soit 562.80 g avec 40 % d'opalite, soit 375.20 g. Masse sèche totale de 938 g et masse d'eau de 122 g, ce qui correspond à une masse humide de 1060 g pour une teneur en eau de 13.0 %.

Limon de Bioley : mélange d'une masse sèche de 890 g avec une masse d'eau de 161 g, correspondant à une masse humide de 1051 g avec une teneur en eau de 19.5 %.

#### 3) Préparer une quantité de matériau d'environ 6 kg humide pour la fabrication de cinq échantillons à la fois.

#### 4) Fabrication d'un échantillon:

- Mélanger la matière sèche et l'eau à l'aide du malaxeur HOBART jusqu'à l'obtention d'une pâte bien homogène.
- Confectionner au diamètre requis une éprouvette de forme cylindrique en la tapant sur une surface de travail plate et lisse pour éliminer au maximum les éventuelles poches d'air.
- Préparer les pièces composant le moule: 1 petit poussoir, 1 bague, 1 tube, 2 filtres humides et 1 grand poussoir. Mettre en place le petit poussoir et sa bague ainsi qu'un filtre, puis le tube de forme cylindrique correspondant au diamètre requis.
- Introduire le cylindre de matière ainsi préparé dans le moule, ajouter le deuxième filtre humide sur l'éprouvette puis introduire le grand poussoir.
- Mettre l'ensemble sous la presse Enerpac et presser sur le grand poussoir jusqu'à ce que le tube ne glisse plus et reste fixe, soit environ 10 bars.
- Enlever la bague, puis remettre l'assemblage sous la presse Enerpac
- Charger l'éprouvette en maintenant la pression du manomètre à 100 bars pendant 60 sec.
- Démouler le tout en employant également la presse si nécessaire ainsi que le contre tube de démoulage.
- Placer l'éprouvette dans une boîte hermétique et la déposer en chambre humide ou effectuer directement les essais souhaités.

## Annexe 2. Résultats des essais pour le grès

grès		Compression uniaxiale					Traction indirecte		
Laboratoire	Echantillon	Haut [mm]	Diam [mm]	$\rho$ [t/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_c$ [MPa]	E [MPa]	Haut [mm]	Diam [mm]	$\sigma_t$ [MPa]
L1	RX94_G001	110.0	54.0		12.6		56.0	54.0	1.0
L1	RX94_G002	110.0	54.0		13.1	3000	56.0	54.0	1.0
L1	RX94_G003	110.0	54.0		10.8	2000	55.0	54.0	1.0
L1	RX94_G004	110.0	54.0		11.1	2000	56.0	54.0	0.9
L1	RX94_G005	110.0	54.0		13.0	4000	56.0	54.0	0.8
L2	RX94_G006	110.9	54.5	2.18	7.3				
L2	RX94_G007	108.8	52.8	2.17	9.5				
L2	RX94_G008	108.8	52.8	2.16	9.0				
L2	RX94_G009	108.8	52.8	2.18	11.0				
L2	RX94_G010	108.8	54.5	2.19	12.3				
L3	RX94_G011	109.0	52.7	2.18	7.4	5000	55.8	52.4	0.9
L3	RX94_G012	109.6	54.4	2.19	9.5	5700	56.4	52.7	0.7
L3	RX94_G013	109.2	52.7	2.18	7.7	5300	56.1	52.4	0.8
L3	RX94_G014	110.7	54.5	2.18	8.8	4900	55.7	52.8	0.8
L3	RX94_G015	109.5	52.7	2.19	9.2	5600	56.0	52.4	1.0
L5	RX94_G021	110.0	52.7		7.8		56.6	52.6	0.8
L5	RX94_G022	107.9	52.7		10.9		56.0	54.4	0.7
L5	RX94_G023	109.7	52.7		9.6		56.0	54.3	0.9
L5	RX94_G024	110.0	52.7		9.4		55.9	54.3	0.8
L5	RX94_G025	108.8	54.0		11.6		56.8	52.6	0.8
L7	RX94_G031	110.0	52.8	2.18	9.9	1642	55.7	54.3	1.7
L7	RX94_G032	110.1	52.8	2.17	8.6	1500	55.8	54.3	1.9
L7	RX94_G033						56.0	54.3	2.0
L7	RX94_G034	108.7	52.7	2.18	10.1	1489	55.8	54.3	2.3
L7	RX94_G035	108.6	52.6	2.18	8.0	1300	55.8	54.3	1.9
L8a	RX94_G036	110.7	54.5	2.17	13.1	2555	55.8	52.7	1.0
L8a	RX94_G037	110.6	54.1	2.17	10.9	2770	52.8	54.3	1.0
L8a	RX94_G038	109.8	52.8	2.17	12.6	2050	53.5	52.8	0.9
L8a	RX94_G039	109.9	52.8	2.17	12.0	2060	53.8	52.7	1.1
L8a	RX94_G040	107.6	52.8	2.18	8.8	2500	53.4	54.3	1.0
L8b	RX94_G041	109.7	52.7	2.18	12.7	2300	51.1	52.6	0.9
L8b	RX94_G042	109.8	52.8	2.17	11.4	2550	55.0	52.6	1.0
L8b	RX94_G043	107.6	52.7	2.18	12.2	2000	53.3	52.8	1.1
L8b	RX94_G044	110.0	52.7	2.18	13.1	2275	52.2	52.6	0.9
L8b	RX94_G045	112.7	54.6	2.17	11.7	2150	53.7	52.7	1.2
L9	RX94_G046	110.2	52.9	2.15	7.1	1860			
L9	RX94_G047	109.1	52.8	2.16	8.1	1300			
L9	RX94_G048	111.9	52.6	2.17	8.5	1360			
L9	RX94_G049	112.5	54.3	2.17	9.9	1805			
L9	RX94_G050	108.6	53.9	2.17	11.1	1790			



### Annexe 4. Résultats des essais pour le marbre

marbre		Compression uniaxiale					Traction indirecte		
Laboratoire	Echantillon	Haut [mm]	Diam [mm]	$\rho$ [t/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_c$ [MPa]	E [MPa]	Haut [mm]	Diam [mm]	$\sigma_t$ [MPa]
L1	RX94_M001	110.0	54.0		113.8		55.0	54.0	10.5
L1	RX94_M002	110.0	54.0		104.5	70000	55.0	54.0	9.1
L1	RX94_M003	110.0	54.0		110.9	68000	57.0	54.0	8.9
L1	RX94_M004	110.0	54.0		108.9	70000	55.0	54.0	9.9
L1	RX94_M005	110.0	54.0		85.3	73000	55.0	54.0	8.9
L2	RX94_M006	111.0	53.5	2.71	91.5				
L2	RX94_M007	110.3	53.5	2.71	109.1				
L2	RX94_M008	110.1	53.5	2.70	104.6				
L2	RX94_M009	110.2	52.2	2.71	101.0				
L2	RX94_M010	110.2	54.2	2.71	110.6				
L3	RX94_M011	110.0	53.5	2.71	103.3	54600	55.7	53.2	10.7
L3	RX94_M012	110.1	54.0	2.73	108.1	61300	55.4	52.0	10.9
L3	RX94_M013	110.1	54.1	2.72	110.0	59300	55.1	53.0	12.5
L3	RX94_M014	110.1	53.3	2.72	101.7	60000	55.2	53.4	10.4
L3	RX94_M015	110.0	54.1	2.72	110.4	60600	55.3	53.0	11.2
L5	RX94_M021	110.3	52.3		101.2		55.4	53.4	6.7
L5	RX94_M022	111.0	53.3		109.3		55.8	54.5	7.3
L5	RX94_M023	110.6	53.2		110.6		55.5	53.3	6.7
L5	RX94_M024	110.2	54.1		105.9		55.4	51.6	5.0
L5	RX94_M025	110.3	54.2		110.3		55.3	52.6	6.0
L7	RX94_M031	109.7	52.3	2.70	98.0	24397	57.9	53.7	8.3
L7	RX94_M032	110.7	53.2	2.70	101.4	23700	57.6	53.6	8.8
L7	RX94_M033	110.8	53.1	2.71	101.3	23700	57.4	53.6	9.7
L7	RX94_M034	110.9	53.2	2.71	104.2	23100	55.2	53.4	8.8
L7	RX94_M035	110.2	53.5	2.71	98.6	24200	57.6	53.9	9.4
L8a	RX94_M036	109.8	54.1	2.72	109.3	47200	55.0	54.6	8.5
L8a	RX94_M037	109.7	54.2	2.70	105.3	45700	55.2	52.4	8.3
L8a	RX94_M038	110.1	54.1	2.72	107.2	46150	54.5	53.6	8.0
L8a	RX94_M039	110.2	54.1	2.71	103.5	45300	55.2	54.4	6.6
L8a	RX94_M040	110.1	53.5	2.71	97.8	42500	55.3	54.3	9.6
L8b	RX94_M041	109.9	54.3	2.70	108.6	45450	54.7	53.5	5.7
L8b	RX94_M042	110.1	53.4	2.72	104.9	45280	56.3	53.4	8.2
L8b	RX94_M043	110.0	54.1	2.71	104.3	45280	55.0	53.4	8.3
L8b	RX94_M044	110.2	53.6	2.70	104.3	44750	55.2	51.6	6.2
L8b	RX94_M045	110.0	54.3	2.70	106.9	46150	55.2	54.0	7.0
L9	RX94_M046	111.2	52.3	2.70	101.3	23471			
L9	RX94_M047	110.7	53.2	2.70	98.5	21871			
L9	RX94_M048	109.9	53.1	2.70	103.6	23250			
L9	RX94_M049	109.8	53.1	2.70	100.9	21910			
L9	RX94_M050	107.9	53.2	2.71	102.9	21400			



