



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**

# **VALIDATION DE L'ŒDOMÈTRE CRS SUR DES ÉCHANTILLONS INTACTS**

Validierung des CRS-Oedometers mittels  
intakter Proben

Validation of Constant Rate of Strain oedometer  
on intact samples

**Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL**  
**Gilbert Steinmann**

**Mandat de recherche VSS 2008/501 sur proposition de**  
**l'Union des Professionnels de la route**

**Février 2010**

**1321**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



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**

# **VALIDATION DE L'ŒDOMÈTRE CRS SUR DES ÉCHANTILLONS INTACTS**

Validierung des CRS-Oedometers mittels  
intakter Proben

Validation of Constant Rate of Strain oedometer  
on intact samples

**Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL**  
**Gilbert Steinmann**

**Mandat de recherche VSS 2008/501 sur proposition de**  
**l'Union des Professionnels de la route**

**Février 2010**

## Impressum

### **Centre de recherche et équipe de projet**

**Chef de projet**

Gilbert Steinmann, Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL

### **Commission technique responsable**

Commission technique 5 : Techniques de construction et géotechnique

### **Commission de suivi**

**Président**

Jean-Louis Amiguet

**Membres**

Markus Caprez

Sara Montani

Henry Bovay

Christoph Gassmann

Martin Vogelhuber

Gerhard Christen

Jean-François Mathier

### **Requérant**

Union des Professionnels de la route

### **Informations**

Le présent document est téléchargeable sur <http://partnershop.vss.ch>.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>IMPRESSUM</b> .....	<b>4</b>
<b>CENTRE DE RECHERCHE ET EQUIPE DE PROJET</b> .....	<b>4</b>
<b>COMMISSION TECHNIQUE RESPONSABLE</b> .....	<b>4</b>
<b>COMMISSION DE SUIVI</b> .....	<b>4</b>
<b>REQUERANT</b> .....	<b>4</b>
<b>INFORMATIONS</b> .....	<b>4</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>7</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>8</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>9</b>
<b>1 RAPPORT FINAL</b> .....	<b>10</b>
1.1 Mandats.....	10
1.2 Objectifs de la recherche.....	10
1.3 Démarche suivie.....	11
<b>2 Problématique</b> .....	<b>11</b>
2.1 Introduction.....	11
2.2 Étude bibliographique.....	12
<b>3 Théorie de la consolidation des sols</b> .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3.1 Avant propos .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3.2 Principe des contraintes effectives de Terzaghi (1925).....	13
3.3 La théorie de la consolidation unidimensionnelle .....	14
<b>4 Les œdomètres</b> .....	<b>22</b>
4.1 Œdomètre classique .....	22
4.2 Œdomètre CRS (vitesse de déformation constante) .....	23
4.3 Les autres œdomètres.....	23
<b>5 Étude expérimentale</b> .....	<b>24</b>
5.1 Appareil CRS .....	24
5.2 Protocoles utilisés .....	27
5.3 Conditions des essais .....	28
5.4 Les expériences réalisées .....	28
5.5 Caractéristiques des matériaux utilisés .....	30
5.6 Résultats bruts.....	30
<b>6 Exploitation et analyse des résultats de l'essai CRS</b> .....	<b>30</b>
6.1 Analyse des essais.....	30
6.2 Interprétation des essais .....	31
<b>7 Analyse et exploitation des résultats de l'essai œdométrique classique</b> .....	<b>37</b>
7.1 Analyse des essais.....	37
7.2 Interprétation des essais .....	37
<b>8 Comparaison des résultats entre les essais CRS et incrémentaux</b> .....	<b>39</b>
8.1 Résultats des essais .....	39
8.2 Contrainte de préconsolidation .....	46
8.3 Comparaison des courbes œdométriques.....	48
<b>9 Remarques concernant l'exécution des essais</b> .....	<b>51</b>

9.1 Saturation des éprouvettes .....	51
9.2 Saturation du matériel .....	52
9.3 Préparation des éprouvettes .....	53
9.4 Consolidation primaire et secondaire.....	55
9.5 Influence de la vitesse .....	56
9.6 Commentaires sur les essais œdométrique CRS.....	57
9.7 Améliorations possibles de l'essai CRS .....	58
<b>10 Conclusions .....</b>	<b>60</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>61</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>62</b>
<b>Symboles et abréviations .....</b>	<b>63</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>64</b>
<b>Equation de la consolidation .....</b>	<b>66</b>

## RESUME

L'essai œdométrique standard (œdomètre incrémental) est un très vieil essai (Terzaghi, 1925) toujours réalisé aujourd'hui. Il présente différents défauts, notamment l'imprécision de la détermination de la contrainte de préconsolidation et une procédure longue et complexe. L'essai à vitesse de chargement constante (CRS) remédie à ces deux défauts mais il n'est pas encore considéré comme un essai standard.

Cette recherche a pour objectif de favoriser l'introduction en Suisse, comme essai standard, de l'essai œdométrique CRS. Elle doit aussi servir de base à la rédaction d'une norme fixant la procédure de cet essai.

La recherche a été menée selon la démarche suivante :

- Étude de la théorie de la consolidation des sols soumis à une compression unidimensionnelle et en fonction du type de sollicitation apportée.
- Étude bibliographique et comparaison des différentes procédures existant dans le monde pour l'essai CRS.
- Choix d'une procédure et établissement d'un mode d'emploi.
- Essais comparatifs entre l'essai œdométrique standard (incrémental) et l'essai CRS réalisé selon la procédure choisie sur différents types de sols.
- Propositions pour l'établissement d'une procédure suisse pour l'essai CRS.

L'étude bibliographique a montré que l'essai CRS était utilisé depuis les années soixante-dix et qu'il était normalisé dans quelques pays.

Plusieurs types d'appareils existent sur le marché avec des modes de sollicitations différentes. L'appareil utilisé a permis de réaliser des essais à vitesse constante.

Les essais ont été réalisés sur des échantillons intacts en provenance de divers chantiers en Suisse (Genève, Berne, Vaud, Valais et Tessin).

Les résultats des analyses de ces essais montrent globalement une bonne correspondance des résultats entre les deux types d'essais. On trouve en particulier des courbes œdométriques et les caractéristiques  $C_c$ ,  $C_s$ ,  $c_v$ ,  $k$  et  $m_v$  très semblables.

Les principales difficultés qui sont apparues lors de la réalisation des essais étaient liées, d'une part à des problèmes de manipulation et d'autre part à l'influence de la vitesse.

Cette recherche montre que l'essai CRS pourrait actuellement remplacer avantageusement l'essai œdométrique incrémental classique pour tous les sols compressibles rencontrés en Suisse. Pour les sols très argileux (argiles grasses) des essais complémentaires devraient être encore effectués pour affiner les résultats qui sont influencés de façon significative, comme pour l'œdomètre incrémental, par la viscosité de ces sols.

Cependant, dans ces conditions, l'essai CRS présente assez d'atouts pour être normalisé en Suisse.

## ZUSAMMENFASSUNG

Der Standard-Oedometerversuch (Inkremental-Oedometer) existiert schon seit langem (Terzaghi, 1925) und wird heute immer noch angewandt. Er weist verschiedene Mängel auf, insbesondere die Ungenauigkeit in der Bestimmung des Vorkonsolidationsdruckes, sowie die Dauer und Komplexität des Verfahrens. Obwohl der Versuch mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit (CRS) beide vorausgenannten Mängel behebt, wird er noch nicht als Standardversuch erachtet.

Der Forschungsbeitrag hat zum Ziel, die Einführung des CRS-Oedometerversuches als Standardversuch in der Schweiz zu begünstigen. Der Beitrag soll auch als Grundlage für die Verfassung einer Norm dienen, die das Versuchsverfahren festlegt.

Die Forschungsstudie wurde wie folgt durchgeführt:

- Studium der Konsolidierungs-Theorie von Böden unter eindimensionaler Belastung, gemäß der Beanspruchungsart.
- Bibliographische Recherchen zum Vergleich der weltweit existierenden, verschiedenen CRS-Versuchsverfahren.
- Auswahl eines Versuchsverfahrens und Verfassen einer Gebrauchsanweisung.
- Komparative Versuche zwischen dem inkrementalen Standard-Oedometerversuch und dem ausgewählten CRS-Versuch anhand verschiedener Bodentypen.
- Vorschläge für die Schaffung eines Schweizer Verfahrens für den CRS-Versuch.

Die bibliographischen Recherchen haben gezeigt, dass der CRS-Versuch seit den siebziger Jahren benützt wird und in einigen Ländern genormt wurde.

Mehrere Gerätetypen mit verschiedenen Belastungsschemen existieren auf dem Markt. Das benützte Gerät erlaubt es, Versuche mit konstanter Geschwindigkeit durchzuführen.

Die Versuche wurden an intakten Proben durchgeführt, die von verschiedenen Schweizer Baustellen stammen (Genf, Bern, Waadt, Wallis und Tessin).

Die Versuchsergebnisse zeigen eine global gute Übereinstimmung zwischen beiden Versuchstypen. Insbesondere erhält man sehr ähnliche Oedometerkurven und  $C_c$ ,  $C_s$ ,  $c_v$ ,  $k$  und  $m_v$  Werte.

Die während der Versuche aufgetretenen Hauptschwierigkeiten waren einerseits durch Handhabungsprobleme und andererseits durch die Versuchsgeschwindigkeit verursacht.

Diese Forschungsstudie zeigt, dass der CRS-Versuch nun den klassischen inkrementalen Oedometerversuch für alle verdichtbaren Schweizer Böden ersetzen könnte. Bei den sehr tonhaltigen Böden und bei den Tonen müssten noch Zusatzversuche durchgeführt werden, um die Ergebnisse zu verfeinern, da diese erheblich von der Viskosität solcher Böden abhängen.

Unter diesen Bedingungen weist der CRS-Versuch jedoch genügend Vorteile auf, um in der Schweiz genormt zu werden.

## SUMMARY

The standard oedometric test (incremental oedometer) is a very old test (Terzaghi, 1925) which is still carried out today. It has several drawbacks, particularly the inaccuracy in the determination of the preconsolidation stress and the duration and complexity of the procedure. The constant rate loading test (CRS) avoids these two problems, but it is not yet considered as a standard test.

The first research works carried out in 2004 and supporting the introduction of the CRS oedometric test in Switzerland as a standard test were promising. However, the tested samples were all remoulded. For the present research, intact samples have been used for CRS oedometric tests in order first to validate the procedure and secondly to draft a standard.

Between 2008 and 2010, the project steps have been the following:

- Bibliographic survey and comparison of existing worldwide processes for CRS tests
- Contact with private companies in order to find and obtain suitable samples
- Choice of a procedure and writing of a user's manual for intact samples
- Comparative tests between standard oedometric tests (incremental) and the CRS test carried out according to the elected procedure on intact samples of various ground types
- Proposals for a standard Swiss procedure for CRS test

Comparative tests were carried out on typical Swiss un-remoulded soils. They are presented in this report according to the following categories:

- Clayey soils (clay, silty clay and clayey silt)
- Slightly clayey silt
- Silt, silty sand and fine sand

Like in the precedent research, the test results on intact samples show a good overall analogy between the two types of tests. The oedometric curves and the characteristic indices ( $C_c$ ,  $C_s$ ,  $c_v$ ,  $k$  and  $m_v$ ) are in particular very similar. The determination of the preconsolidation stress was facilitated by the measurement of the pore pressure during the test. However, the permeability of the test tube must not be too high so that the pressure is allowed to increase. The results show that this method is suitable for clayey and silty-clayey soils. In contrast for silty and silty-sandy soils, the loading rate should not be too high, which is a limitation for our apparatus.

The main shortcomings that appeared during tests were linked to manipulation problems on the one hand, and to the heterogeneity of the samples on the other hand. The time span between the two kinds of tests, due to the unavailability of the apparatuses and technicians, was also sometimes sources of confusion when making comparisons.

This research however shows that the CRS test could at present advantageously replace the traditional oedometric test for any kind of compressible Swiss soils. For the argillaceous soils (very plastic clay) and in comparison with the incremental tests, the loading rate had no significant influence on the results.

Consequently and under these conditions, the advantages of the CRS tests are numerous enough to justify a standardisation in Switzerland.

# 1 RAPPORT FINAL

## 1.1 Mandats

En date du 11 décembre 2001, un premier mandat avait été confié au Laboratoire de Mécanique des sols de l'EPFL par l'Office fédéral des routes (OFROU) pour étudier le remplacement de l'essai œdométrique standard par un essai à vitesse de chargement constante, l'essai œdométrique CRS (Constant Rate of Strain) en vue de favoriser son introduction en Suisse. Cette étude devait également servir de base à la rédaction d'une norme fixant la procédure de cet essai.

Ce premier mandat a apporté des résultats très encourageants mais avait été réalisé uniquement sur des sols reconstitués. Après avoir pris connaissance des conclusions du rapport l'OFROU a demandé au LMS un complément d'étude sur le même thème mais qui devait apporter une validation de l'essai CRS sur des échantillons intacts et qui devra aboutir à une reconnaissance de cet essai en Suisse et à la rédaction d'une norme sur cet essai.

Dans ce sens, le 19.08.2008 et après examen de la requête de la Commission technique 5 de l'Union suisse des professionnels de la route (VSS), l'OFROU a décidé que:

1. Le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL (LMS) effectuera une validation de l'essai CRS sur des échantillons intacts en complément du premier mandat en vue de favoriser son introduction en Suisse. Cette étude doit également servir de base à la rédaction d'une norme fixant la procédure de cet essai.
2. Ces travaux de recherche sont évalués à 39'000.- francs, montant pour lequel une subvention de 100% est assurée.
3. La Commission technique 5.08 de la VSS est chargée de la surveillance de ce mandat.

## 1.2 Objectifs de la recherche

Les objectifs de cette recherche sont les suivants :

1. Effectuer des essais comparatifs sur toute une palette d'échantillons intacts, allant des sols pulvérulents aux sols cohésifs.
2. Comparer les résultats obtenus par les deux méthodes d'essais, soit :
  - la courbe œdométrique,
  - la contrainte de la consolidation du sol,
  - les autres caractéristiques des sols ( $C_c$ ,  $C_s$ ,  $C_v$ ,  $k$  et  $m_v$ ).
3. Élaborer une méthode simplifiée pour le calcul de la contrainte de préconsolidation avec validation par rapport à la méthode graphique traditionnelle de Casagrande.
4. Proposer une base pour la normalisation de l'essai œdométrique CRS en Suisse. Il faut donc mettre en place une méthode d'interprétation simplifiée de l'essai et un mode opératoire qui pourra être utilisé par d'autres laboratoires de géotechnique.

### 1.3 Démarche suivie

La démarche suivie s'est déroulée selon les étapes suivantes:

- Recherche et réception de toute une palette d'échantillons intacts représentatifs des sols plutôt compressibles en Suisse.
- Essais comparatifs, sur des échantillons intacts, entre l'essai œdométrique standard (incrémental) et l'essai CRS réalisé selon la procédure déjà mise au point.
- Élaboration et affinement d'un mode opératoire rigoureux pour la préparation des échantillons et leur mise en place.
- Traitement et analyse des résultats expérimentaux obtenus.
- Synthèse de tous les essais expérimentaux effectués dans le cadre de cette recherche.
- Propositions pour l'établissement d'une procédure suisse normalisée de l'essai CRS.
- Étude de l'influence du fluage sur l'essai CRS, ceci pour des échantillons intacts.
- Synthèse des résultats et rédaction du rapport.

## 2 Problématique

### 2.1 Introduction

En Suisse, où les sols compressibles prédominent, l'essai œdométrique est probablement l'essai de mécanique des sols le plus important. L'essai réalisé actuellement est dit incrémental, la charge verticale étant appliquée par paliers et l'éprouvette placée dans un anneau métallique qui empêche toute déformation latérale. Il est réalisé dans de nombreux laboratoires de géotechnique, selon des procédures diverses, mais cependant proches les unes des autres, car il n'existe pas de norme suisse décrivant une procédure unique. Au LMS, cet essai a été accrédité en 1999.

Cet essai et la procédure qui lui est associée a été mis au point par K. Terzaghi (1925), puis amélioré par A. Casagrande (vers 1932) et par G. Gilboy (1936). Les premiers essais œdométriques effectués en Suisse selon ces développements datent de 1935 environ. Depuis, les principales améliorations ont porté surtout sur les méthodes d'acquisition des données de l'essai.

Les principaux défauts de l'essai incrémental sont :

- La difficulté de déterminer la contrainte de préconsolidation qui est d'une très grande importance pour le calcul des tassements.
- La longue durée de l'essai et les nombreuses opérations à réaliser qui déterminent un coût élevé.
- Les conditions de déformation et de drainage qui font que la déformabilité du sol ainsi déterminée est avant tout celle provoquée par la consolidation du sol (drainage de l'eau interstitielle). Cet essai ne donne ainsi de bons résultats que pour les sols dont la taille maximale des grains est inférieure au 1/10 du diamètre de la bague ( $\emptyset_{\max}$  des grains  $< \emptyset$  bague /10) et que l'échantillon destiné à l'essai œdométrique soit intact. Ces limites sont cependant aussi propres à l'essai à vitesse de chargement constante (CRS).

L'essai CRS (Constant Rate of Strain) à vitesse de chargement constante remédie aux deux premiers défauts mis en évidence ci-dessus, mais il n'est pas encore considéré comme un essai standard; dès lors, l'objectif principal de cette recherche est de valider l'essai œdométrique CRS.

Notre étude a pour but de voir s'il est possible de remplacer l'essai classique par l'essai à l'oedomètre CRS, puis de tenter de normaliser cet essai.

Pour ce faire, la théorie de Terzaghi a été adaptée à l'essai CRS afin d'obtenir la courbe œdométrique et de calculer les valeurs des paramètres de compressibilité du sol.

Une comparaison entre les résultats obtenus au moyen des deux dispositifs permettra de mettre en évidence les avantages potentiels de l'oedomètre CRS. La possibilité de retrouver la contrainte de préconsolidation, à partir des résultats de l'essai CRS, selon la méthode de Casagrande et celle proposée par les développeurs de l'appareil sera étudiée de manière approfondie.

Par rapport à l'essai incrémental, les deux plus grands avantages de l'essai à vitesse de chargement constante (CRS) sont :

- la détermination plus précise de la contrainte de préconsolidation
- une procédure plus simple et plus rapide donc moins coûteuse.

Il existe, bien entendu, d'autres essais pour déterminer les paramètres de déformabilité d'un sol parmi lesquels on peut citer :

- l'essai de compression triaxiale, réalisé dans la cellule de l'essai triaxial,
- l'essai de plaque réalisé in situ,
- l'essai pressiométrique ou dilatométrique réalisé dans des forages,
- les essais géophysiques, valables en petites déformations

## 2.2 Étude bibliographique

### *Historique*

Le premier essai de consolidation par CRS a été proposé en 1959 par Hamilton et Crawford, puis développé notamment par Crawford (1964), Smith et Wahls (1969), Lowe et al. (1969), Aboshi et al. (1970). La théorie de l'essai CRS a été étudiée par Wissa et al. (1971), et Janbu (1981) qui l'ont validée et incorporée à l'ASTM (American Society for Testing and Materials).

A la suite des premiers développements de la méthode et de la théorie de l'essai CRS, de nombreuses études ont été faites sur ce sujet. En effet, l'essai CRS est considéré comme une alternative à l'essai incrémental classique.

A ce jour, l'essai CRS est normalisé dans certains pays comme la Norvège (1985) et aux USA par la norme ASTM (D4186).

La liste bibliographique complète est donnée en fin de rapport.

## 2.3 Théorie de la consolidation des sols

Un sol est un ensemble, plus ou moins homogène, constitué de trois phases :

- Les éléments solides : particules minérales (et parfois matières organiques) appuyées les unes sur les autres qui forment le squelette.
- Le liquide : principalement de l'eau qui remplit (partiellement ou totalement) les interstices du squelette.
- Le gaz : air, vapeur d'eau ou autre gaz (lorsque le sol n'est pas saturé).

La figure 3.1 représente un modèle schématique d'un sol non-saturé et saturé.

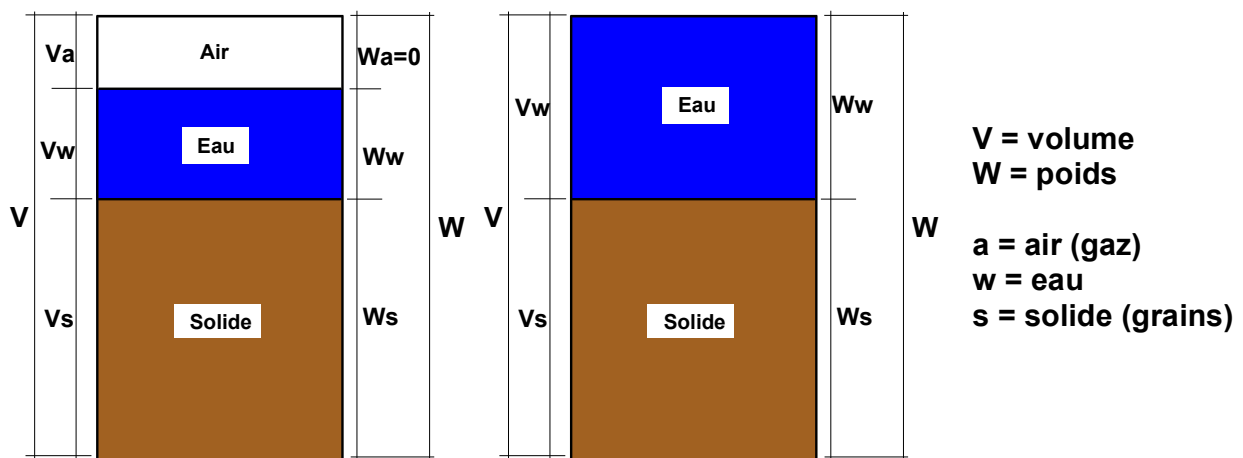


Figure 3.1 : Représentation schématique d'un sol non-saturé (à gauche) et saturé (à droite)

Dans le cadre de cette étude, les sols ont toujours été considérés saturés en eau. Ils ne sont donc constitués que d'éléments solides et d'eau (figure 3.1).

La consolidation est étudiée à partir de déformations verticales et toutes les contraintes évoquées sont des contraintes de compression.

## 2.4 Principe des contraintes effectives de Terzaghi (1925)

Le principe de contraintes effectives, défini par Terzaghi, s'écrit de la sorte :

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3.1)$$

avec :

- $\sigma'$  : contrainte effective
- $\sigma$  : contrainte totale
- $u$  : pression interstitielle

Par la suite,  $\Delta u$  sera utilisé pour définir la surpression interstitielle due à une contrainte.

$\sigma'$  est la contrainte correspondant aux efforts transmis par le squelette minéral du sol. C'est elle qui détermine la déformation et la résistance au cisaillement du sol.

Cette relation est expérimentale, mais elle peut être démontrée par des considérations thermodynamiques (p. ex. Laloui, Hutter, Vulliet, 1998). Elle est valable en statique et en dynamique (dans le cadre de l'hypothèse de petits déplacements) pour de faibles pressions interstitielles de l'ordre de 1000 kPa ou inférieures.

En général, les pressions interstitielles mesurées pendant les essais œdométriques ne dépassent pas des valeurs de l'ordre de 100 kPa. Dès lors, l'équation définie par Terzaghi sera considérée comme valable pour toutes les expériences réalisées dans le cadre de cette étude.

## 2.5 Théorie de la consolidation unidimensionnelle

### 2.5.1 *Théorie générale*

L'œdomètre permet d'étudier les déformations verticales d'un sol au cours du temps. En première approximation le problème étudié sera considéré comme unidimensionnel.

Les tassements du sol sous une charge au cours du temps peuvent être décomposés en 3 parties :

- des tassements élastiques instantanés,
- des tassements par consolidation primaire,
- des tassements par consolidation secondaire.

Pour les argiles et autres sols pris en compte, la consolidation primaire est la déformation qui paraît prépondérante. La consolidation secondaire n'est pas prise en considération dans le cadre de cette recherche.

Dans un sol fin saturé ( $S_r = 1$ ), la consolidation primaire se traduit au moment de l'application d'une surcharge  $p$  par une augmentation dans le sol de la pression interstitielle  $\Delta u_0$  ( $\Delta u_0 = p$ ). La faible perméabilité du sol empêche l'eau de s'échapper immédiatement (figure 3.2). Par la suite, cette surpression de l'eau interstitielle qui crée un gradient hydraulique, va provoquer un écoulement d'une partie de l'eau en direction des zones non chargées. A un temps  $t_\infty$  (durée théoriquement infinie), la surpression  $\Delta u$  s'annule complètement et la totalité de la surcharge  $p$  est reportée sur le squelette minéral ( $\Delta \sigma' = p$ ). L'eau interstitielle et le squelette minéral ont retrouvé un nouvel équilibre.

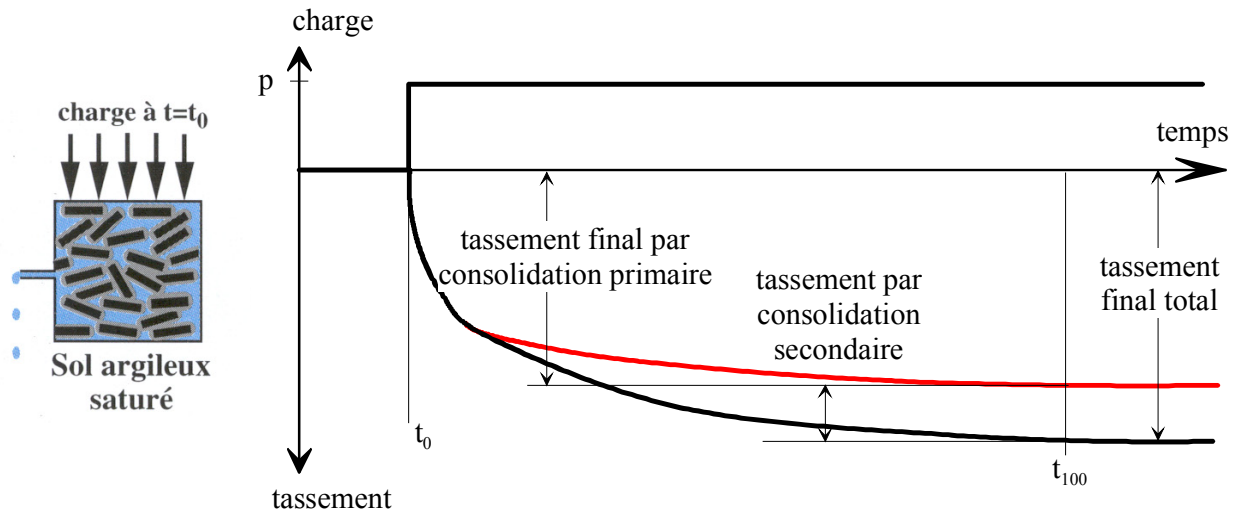


Figure 3.2 : Évolution du tassement d'un sol saturé soumis à une surcharge

### 2.5.2 Schéma de principe

La figure 3.3 montre le principe de la consolidation primaire par analogie avec un piston (modèle de Terzaghi). Pour mémoire le modèle de Gibson et Lo, qui représente les consolidations primaire et secondaire qui se produisent simultanément sous l'effet d'une surcharge est également représenté.

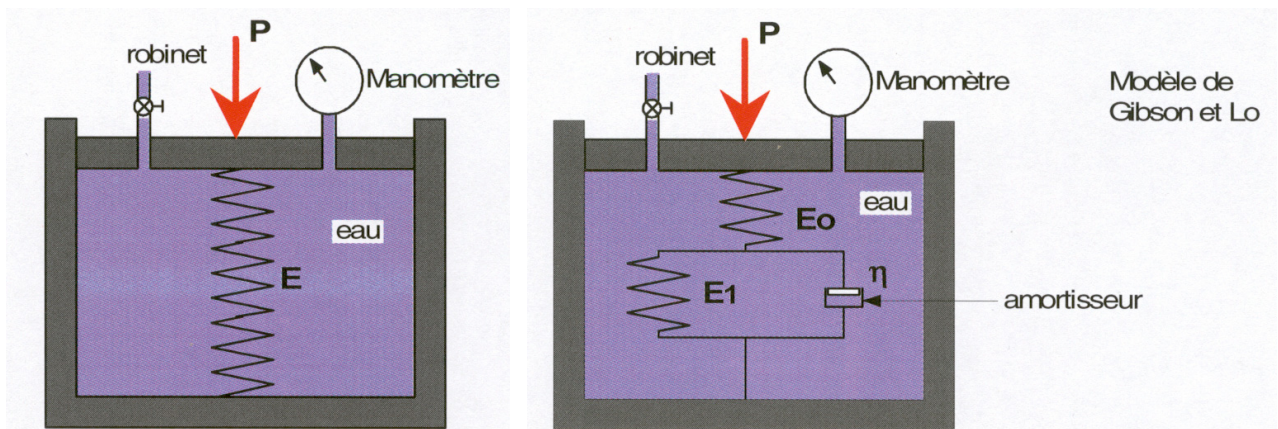


Figure 3.3 : Principe de la consolidation : modèles de Terzaghi (à gauche) et de Gibson et Lo (à droite)

Le ressort plongé dans de l'eau simule le squelette solide. Lors de l'application de la surcharge  $p$ , le robinet est fermé, l'eau ne peut pas s'évacuer : toute la surcharge est reprise par l'eau ( $\Delta u = p$ ). Avec l'ouverture du robinet, l'eau peut s'évacuer et la consolidation primaire commence, ce qui provoque un enfoncement du piston (tassement). Une fois la surpression dans l'eau évacuée ( $\Delta u = 0$ ), toute la surcharge est reprise par le ressort (squelette) d'où un nouvel équilibre.

### 2.5.3 Dispositif de l'essai œdométrique

Pour la réalisation d'un essai œdométrique, l'échantillon intact est placé dans une bague rigide et il est drainé soit par le haut et le bas, soit uniquement par le haut (voir schéma de l'appareillage aux chapitres 4.1 et 4.2).

Au temps  $t = 0$  ( $t_0$ ), une charge est appliquée à l'échantillon de sol, créant sur le sol une contrainte totale  $\sigma$  (figure 3.4). A cet instant ( $t_0$ ) toute la surcharge est reprise par l'eau du sol, la pression interstitielle vaut alors  $\Delta u_0 = \sigma$ . En effet, l'eau est beaucoup moins compressible que le squelette minéral du sol et le volume d'eau du sol sera identique avant et juste après l'application de la charge.

Cette augmentation de la pression interstitielle crée un gradient hydraulique, le haut (et éventuellement le bas) de l'échantillon étant à l'air libre, donc à  $u = 0$  (figure 3.4).

La loi de Darcy supposée applicable permet de prévoir que l'eau s'écoulera vers les limites du sol à pression nulle:

$$v = k i \quad (3.2)$$

dans laquelle :

- $v$  vitesse d'écoulement de l'eau (m/s)
- $k$  perméabilité de Darcy (m/s)
- $i$  gradient hydraulique (-)

Au début ( $t_1$ ), la pression interstitielle est nulle en haut (et éventuellement en bas), mais encore très forte :

- au centre de l'échantillon (drainage en haut et à la base),
- au bas de l'échantillon (drainage vers le haut seulement).

Par la suite, à l'instant ( $t_2$ ), l'eau s'écoule et une part de la surcharge sera reprise par le squelette du sol. Les contraintes effectives  $\sigma'$  augmentent dans tout l'échantillon.

Au temps  $t = \infty$  ( $t_\infty$ ), la surpression interstitielle est nulle ( $\Delta u_\infty = 0$ ) dans toute la couche et toute la surcharge est alors reprise par le sol ( $\sigma' = \sigma$ ).

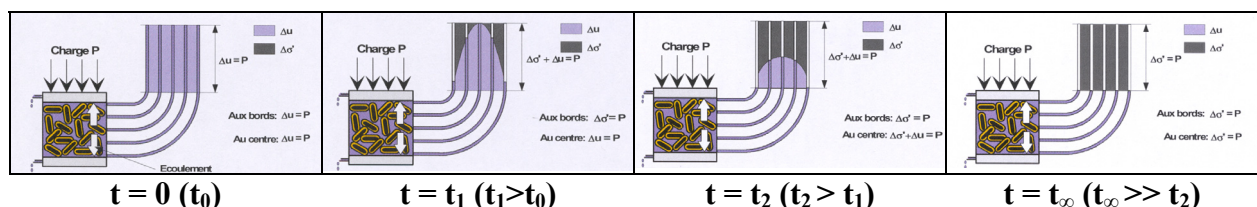


Figure 3.4 : Évolution des contraintes pendant la consolidation primaire pour un échantillon drainé vers le haut et le bas.

La vitesse d'écoulement de l'eau  $v$  de ce phénomène va dépendre de la rapidité avec laquelle l'eau peut s'échapper du terrain, donc de sa perméabilité  $k$ .

Terzaghi a expliqué les lois générales de la consolidation en prenant en compte les hypothèses suivantes :

- le sol est saturé
- l'eau et les particules solides sont incompressibles par rapport au squelette minéral
- la loi de Darcy est applicable
- le coefficient de perméabilité est constant dans toutes les directions
- la surcharge appliquée est uniforme
- le problème est unidimensionnel
- l'indice de vide  $e$  ne dépend que de la contrainte effective  $\sigma'$ .

Dès lors, l'équation différentielle de la consolidation primaire peut s'écrire :

$$c_v \cdot \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} = \frac{\partial \Delta u}{\partial t} \quad (3.3)$$

Dans laquelle  $c_v$  est le coefficient de consolidation; il vaut :

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w \cdot m_v} \quad [\text{m/s}^2] \quad (3.4)$$

où:  $\gamma_w$  est le poids volumique de l'eau ( $\gamma_w \approx 9.81 \text{ kN/m}^3$ )  
 $m_v$  est le coefficient de compression; il vaut :

$$m_v = \frac{\Delta e}{(1 + e_0) \cdot \Delta \sigma'} \quad [\text{m}^2/\text{kN}] \quad (3.5)$$

Avec :  $\Delta \sigma'$  l'incrément de contrainte effective, égal à l'incrément de charge,  
 $e_0$  l'indice de vide correspondant à l'état initial, avant la mise en place de  $\Delta \sigma$   
 $\Delta e$  la variation d'indice des vides pendant l'incrément de contrainte  $\Delta \sigma'$ .

Le coefficient de consolidation peut aussi être donné en fonction de la hauteur de l'échantillon:

$$m_v = \frac{\Delta H_\infty}{H} \cdot \frac{1}{\Delta \sigma'} \quad [\text{m}^2/\text{kN}] \quad (3.6)$$

Avec :

$H$  hauteur de l'échantillon (avant la mise en place de  $\Delta \sigma$ ).  
 $\Delta H_\infty$  variation maximale de hauteur (tassement) sous la contrainte  $\Delta \sigma'$ .

On définit également le module œdométrique,  $E_{\text{œd}}$ , qui vaut:

$$E_{\text{œd}} = \frac{1}{m_v} \quad [\text{kN/m}^2] \quad (3.7)$$

### 2.5.4 Courbe œdométrique et interprétation

L'ensemble des couples  $\Delta\sigma'$  -  $\Delta e$  permettent de dresser la courbe œdométrique dans le plan  $e - \log \sigma'$  (figure 3.5).

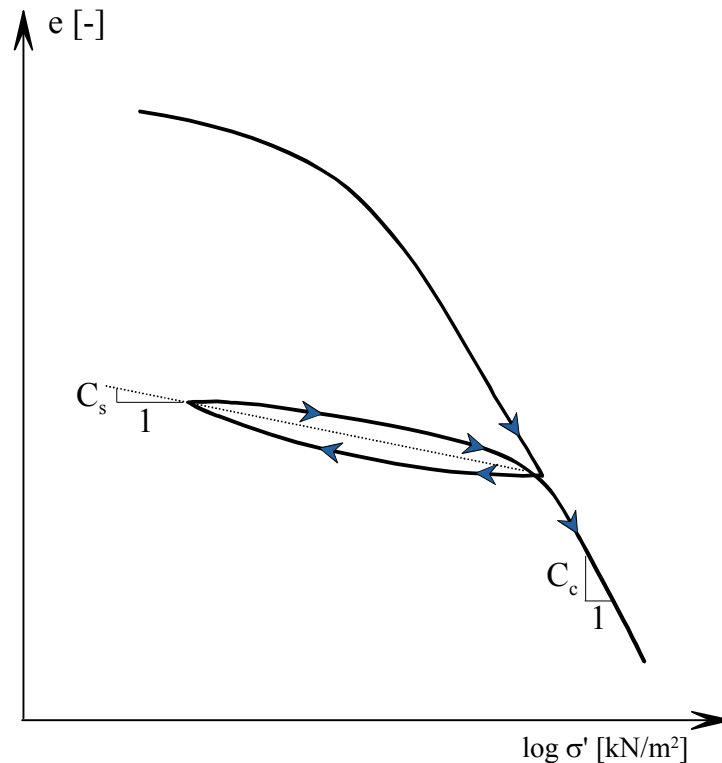


Figure 3.5. Courbe œdométrique

Par régression linéaire, on tire de la figure 3.5 l'indice de compression  $C_c$  de la partie vierge (ou plastique) et l'indice de gonflement,  $C_s$ , de la partie décharge – recharge (ou partie pseudo élastique).

### 2.5.5 Théorie de la consolidation appliquée au CRS

La théorie de Terzaghi s'appliquant à l'oedomètre classique correspond à un échantillon de sol se trouvant sous une charge constante. Pour l'oedomètre CRS, cette théorie doit être adaptée car il n'est plus possible d'utiliser l'incrément de contrainte entre les paliers.

Globalement, cela consiste à prendre l'équation différentielle du mouvement, à la résoudre, puis appliquer les conditions aux limites et initiales, c'est à dire la pression interstitielle nulle en haut de l'échantillon, pas d'écoulement à la base de l'échantillon et le taux constant de variation de la hauteur.

Davis et Raymond, 1965, en partant des hypothèses de Terzaghi :

- coefficient de consolidation  $c_v$  constant,
- validité de la loi de Darcy
- ainsi que de l'adoption d'une loi liant les contraintes et les déformations du type :

$$e = e_0 - C_c \log_{10} (\sigma' / \sigma_0') \quad [-] \quad (3.8)$$

formulent une équation de la consolidation sans faire d'hypothèses sur le type de chargement, la vitesse de chargement ou d'autres paramètres, semblable à celle de Terzaghi mais en fonction des déformations verticales  $\varepsilon$  (au lieu de la variation de la pression interstitielle en fonction du temps):

$$c_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (3.9)$$

Où  $z$  est la profondeur mesurée depuis la partie supérieure de l'échantillon.

Si on impose une vitesse de déformation relative (par rapport à la hauteur)  $r$  constante, cette équation permet de trouver (Wissa, Christian, Davis et Meiberg, 1971) une solution en régime permanent de type parabolique liant les déformations verticales et la profondeur  $z$  :

$$\varepsilon(z, t) = r \cdot t + \frac{r \cdot H^2}{c_v} \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{z^2}{H^2} \right) - \left( \frac{z}{H} \right) + \frac{1}{3} \right] \quad (3.10)$$

Pour tout instant  $t$ , la différence de déformations  $\Delta\varepsilon$  entre la tête et la base de l'échantillon vaut :

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot \frac{r \cdot H^2}{c_v} \quad (3.11)$$

De plus, sur n'importe quel point  $z$ , la différence de déformations  $\Delta\varepsilon$  entre deux instants  $t_1$  et  $t_2$  vaut:

$$\Delta\varepsilon = r(t_2 - t_1) \quad (3.12)$$

Sur la partie supérieure de l'échantillon la contrainte totale appliquée  $\sigma_v$  est connue et l'excès de pression interstitielle  $u_0$  vaut :

$$u_0 = 0 \quad (3.13)$$

Dès lors:

$$\sigma'_{v0} = \sigma_v \quad (3.14)$$

avec  $\sigma'_{v0}$  : contrainte effective sur le sommet de l'échantillon

A la base de l'échantillon, l'excès de la pression interstitielle  $u_b$  est mesuré. La contrainte verticale effective  $\sigma'_{vb}$  vaut donc:

$$\sigma'_{vb} = \sigma_v - u_b \quad (3.15)$$

La différence des contraintes effectives  $\Delta\sigma'_v$  entre le haut et la base de l'échantillon est égale à:

$$\Delta\sigma'_v = u_b \quad (3.16)$$

A ce stade deux hypothèses sont envisagées:

- Le sol suit un comportement linéaire: la relation entre les déformations verticales et les contraintes verticales effectives est une constante.
- Le sol suit un comportement non-linéaire: la relation entre les déformations verticales et le logarithme des contraintes verticales effectives est une constante.

#### a) comportement linéaire

La variation des contraintes effectives verticales  $\Delta\sigma'_v$  peut alors s'écrire :

$$\Delta\sigma'_v = \frac{\Delta\varepsilon}{m_v} \quad (3.17)$$

Par la suite le coefficient de perméabilité  $k$  devient:

$$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{r \cdot H^2 \cdot \gamma_w}{u_b} \quad [\text{m/s}] \quad (3.18)$$

Puisque la variation de la déformation verticale  $\Delta\varepsilon$  est constante à chaque point, la variation de la contrainte verticale effective  $\Delta\sigma'_v$  et la distribution des pressions interstitielles  $u$  doit aussi être constante à chaque point. Le coefficient de compressibilité volumique  $m_v$  peut alors s'exprimer en termes de variations des contraintes verticales totales  $\Delta\sigma_v$  :

$$m_v = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta\sigma_v} = \frac{r \cdot \Delta t}{\Delta\sigma_v} \quad [\text{m}^2/\text{kN}] \quad (3.19)$$

où  $\Delta\sigma_v$  est la variation de la contrainte totale mesurée en un incrément de temps  $\Delta t$ .

Finalement, le coefficient de consolidation  $c_v$  est obtenu par substitution de (3.18) et (3.19) dans (3.4):

$$c_v = \frac{H^2}{2u_b} \cdot \frac{\Delta\sigma_v}{\Delta t} \quad [\text{m}^2/\text{s}] \quad (3.20)$$

#### a) comportement non-linéaire

L'indice de compression  $C_c$ , est défini comme la pente de la courbe œdométrique en échelle semi logarithmique (figure 3.5); il peut raisonnablement être admis égal à:

$$C_c = \frac{-de}{d(\log \sigma'_v)} \quad [-] \quad (3.21)$$

Pour de petites déformations il est possible de remplacer la variation de l'indice de vide  $e$  par la variation des déformations  $\varepsilon$  puis de définir l'indice de déformation  $C_\varepsilon$  avec les relations:

$$\frac{-d\varepsilon}{d(\log \sigma'_v)} = C_\varepsilon = \frac{C_c}{(1+e)} \quad [-] \quad (3.22)$$

Sur l'essai œdométrique CRS, l'indice de déformation  $C_\varepsilon$  peut être calculé à partir des mesures effectuées sur le sommet et à la base de l'échantillon:

$$C_\varepsilon = \frac{\varepsilon(0,t) - \varepsilon(H,t)}{\log(\sigma_v) - \log(\sigma_v - u_b)} = \frac{r \cdot \Delta t}{\log(\sigma_{v2}/\sigma_{v1})} \quad [-] \quad (3.23)$$

Avec

- $\varepsilon(0,t)$  : déformation au sommet de l'échantillon
- $\varepsilon(H,t)$  : déformation à la base de l'échantillon
- $\Delta t$  : différence de temps ( $t_2 - t_1$ )
- $\sigma_{v2}$  : contrainte verticale totale au temps  $t_2$
- $\sigma_{v1}$  : contrainte verticale totale au temps  $t_1$

Avec cette méthode, le coefficient de consolidation  $c_v$  est déterminé par la relation:

$$c_v = \frac{H^2 \cdot \log(\sigma_{v2}/\sigma_{v1})}{2 \cdot \Delta t \cdot \log(1 - u_b/\sigma_v)} \quad [m^2/s] \quad (3.24)$$

dans laquelle, le terme  $u_b/\sigma_v$  peut être moyenné sur l'intervalle de temps  $\Delta t$ .

Finalement, une fois l'indice de déformation  $C_\varepsilon$  calculé à partir de (3.23), le coefficient de compressibilité  $m_v$  est alors égal à:

$$m_v = \frac{0.434 \cdot C_\varepsilon}{(\sigma_{v1} + \sigma_{v2})/2} = \frac{0.434 \cdot C_\varepsilon}{\bar{\sigma}_v} \quad [m^2/kN] \quad (3.25)$$

Avec:  $\bar{\sigma}_v$  : contrainte verticale moyenne sur l'intervalle  $\Delta t$ .

Le coefficient de perméabilité est alors déterminé par la formule classique:

$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad [m/s] \quad (3.26)$$

Pour la suite de cette recherche sur l'essai CRS, il a été admis que le sol se comporte de manière linéaire et que la relation entre la contrainte verticale effective et la déformation est une constante.

### 3 Les œdomètres

#### 3.1 Œdomètre classique

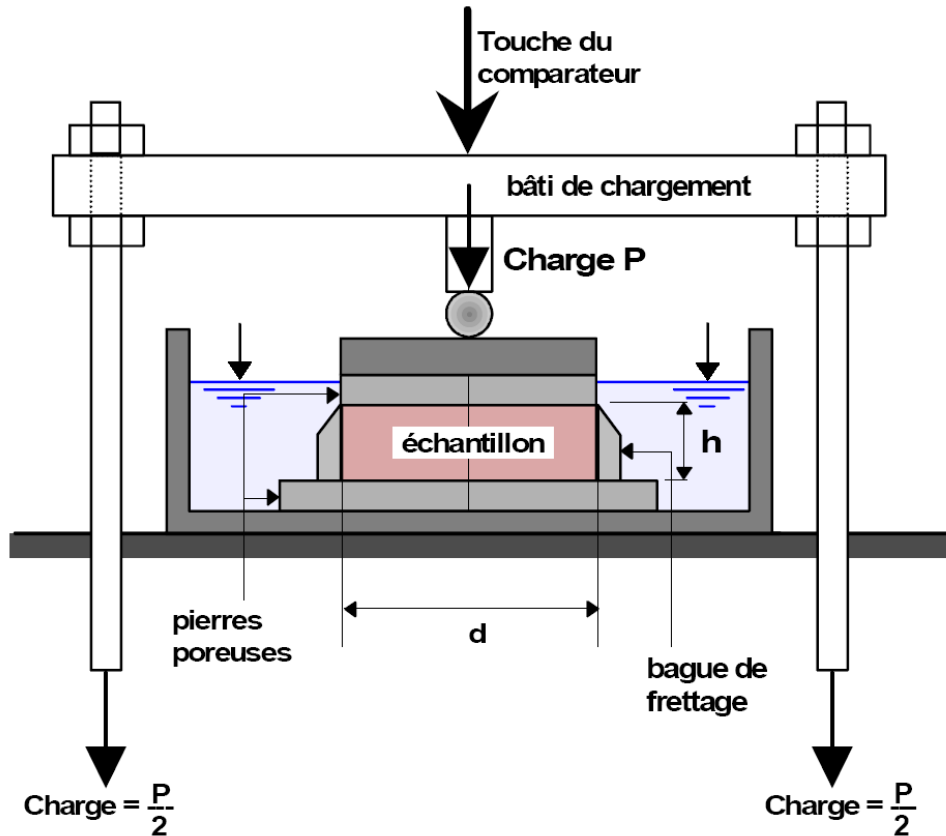


Figure 4.1 : Schéma de l'œdomètre incrémental classique

L'œdomètre classique est le plus utilisé. Il est également appelé œdomètre incrémental.

Avec cet appareil, l'essai classique est réalisé par paliers de chargement successifs au moyen de charges appliquées de manière croissante.

Il est également possible d'effectuer des décharges/recharges pour déterminer des caractéristiques élastiques (indice de gonflement  $C_s$ ), de plus l'échantillon est drainé par le haut et le bas (figure 6.1).

Pour réaliser cet essai, l'échantillon de sol est placé dans une éprouvette et la première charge lui est appliquée. La déformation de l'échantillon débute instantanément. Un comparateur permet de mesurer le tassement du sol dès l'application de la charge. Lorsque la déformation est inférieure ou égale à 10 microns en 12 heures, la consolidation primaire, pour cette charge, est alors considérée comme terminée et il est possible d'appliquer la charge suivante.

Finalement autant de points sont obtenus que de charges ont été appliquées. Les résultats sont reportés sous la forme d'une courbe œdométrique dans le plan  $e - \log \sigma'$ .

### 3.2 Œdomètre CRS (vitesse de déformation constante)

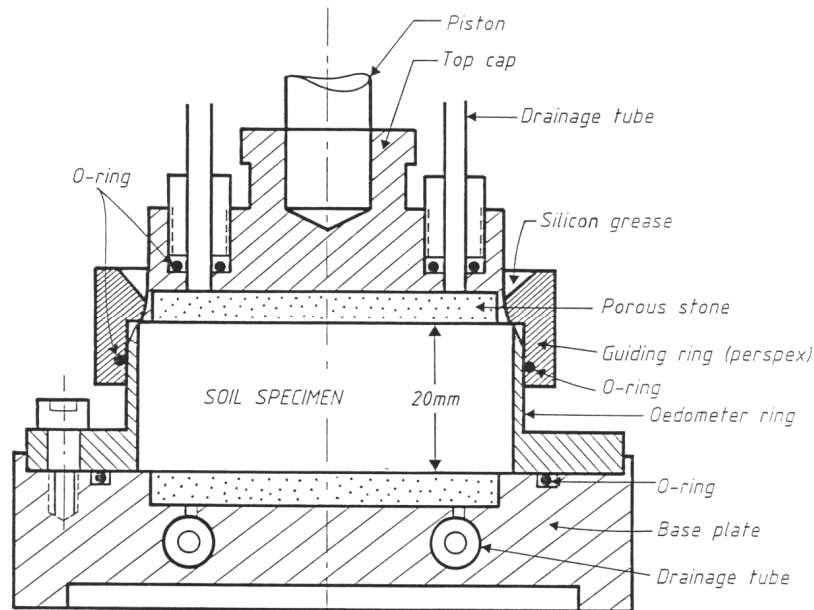


Figure 4.2: Schéma de l'œdomètre CRS

Contrairement à l'œdomètre classique, l'œdomètre de type CRS (Constant Rate of Strain) a un fonctionnement continu.

Dans cet appareil, l'échantillon est placé entre deux pierres poreuses saturées en eau. L'échantillon n'est drainé que par le haut et sa base est reliée à un capteur qui mesure la pression interstitielle.

Le socle de l'appareil est soulevé par un moteur "pas-à-pas" avec une vitesse constante. Un capteur de force, solidaire d'un cadre rigide, mesure la force verticale appliquée à l'échantillon pendant l'essai.

Un capteur de déplacement, placé sur le socle de l'appareil, indique la variation de la hauteur de l'échantillon pendant l'essai.

### 3.3 Les autres œdomètres

Les autres œdomètres recensés dans la littérature sont également des œdomètres à chargement continu. Il en existe deux types :

- *Essai CRS à vitesse de **chargement** constante.*

Dans ce cas, ce n'est pas la vitesse de tassement de l'échantillon qui est imposée mais l'augmentation de la contrainte totale ( $\Delta\sigma_v$ ) appliquée à l'échantillon de sol. Il fonctionne de manière similaire à l'œdomètre CRS (Smith et Wahls, 1969).

- *Essais à gradient de pression contrôlé.*

Le dispositif de cet appareil est équivalent à celui du CRS : un moteur fait monter l'échantillon de sol qui est ainsi comprimé. Cet échantillon est drainé par le haut. Des capteurs de force, de pression et de déplacement mesurent les différentes grandeurs pendant l'essai (Lowe, Jonas et Obrician, 1969).

La particularité de cet œdomètre est la présence d'une boucle de rétroaction servant à la régulation du gradient de pression interstitielle. La pression interstitielle est mesurée en temps réel et cette mesure est utilisée pour régler la vitesse du moteur de manière à contrôler le gradient de pression présent dans l'échantillon.

Il faut remarquer que la référence en matière d'essai œdométrique dans tous les pays est l'œdomètre incrémental. L'œdomètre CRS, quant à lui, est déjà normalisé aux USA et en Norvège (voir chapitre 2.2); de plus de nombreuses recherches sont en cours ou ont déjà été effectuées avec cet appareil notamment au Canada (S. Leroueil).

## 4 Étude expérimentale

### 4.1 Appareil CRS

L'appareillage destiné aux essais œdométriques CRS est constitué de plusieurs éléments principaux décrits en détail ci-dessous:

- la cellule œdométrique
- le cadre de chargement et les capteurs
- le système d'acquisition des données.

#### 4.1.1 Composition de la cellule CRS

La cellule CRS est composée des parties suivantes (figure 5.1):

- L'embase inférieure à laquelle sont raccordés les tubes pour la mesure de la pression interstitielle et la saturation du système.
- Une bague de  $\varnothing$  50mm et de hauteur 20mm (préparation et frettage de l'éprouvette d'essai).
- Une bague en PVC.
- Le top cap (piston supérieur) avec des orifices pour le drainage.
- Deux pierres poreuses, 2 joints O-rings et vis de montage.

#### 4.1.2 Cadre de chargement et capteurs

La cellule CRS complète est placée lors de l'essai sur un cadre de chargement rigide (figure 5.2). Le capteur de déformation est solidaire de ce même bâti rigide; il mesure la hauteur effective de l'éprouvette, indépendamment de la déformation du capteur de force.

Le capteur de force est, quant à lui, placé au-dessus du piston guide. Pour éviter toute sollicitation de l'éprouvette avant sa mise en charge, il est suspendu par des ressorts au bâti

rigide. La déformation à vitesse constante de l'éprouvette d'essai est obtenue grâce à un moteur pas à pas (situé sous la table de travail). La gamme des 5 vitesses disponibles va de 0.06 à 1 mm/h.

Le capteur de pression, destiné à la mesure de la pression interstitielle qui se développe au cours de l'essai est connecté à l'un des 2 tubes de drainage qui sortent de la cellule CRS (l'autre étant réservé à la purge et à la saturation du système).



Figure 5.1: Vue éclatée de la cellule de l'oedomètre CRS

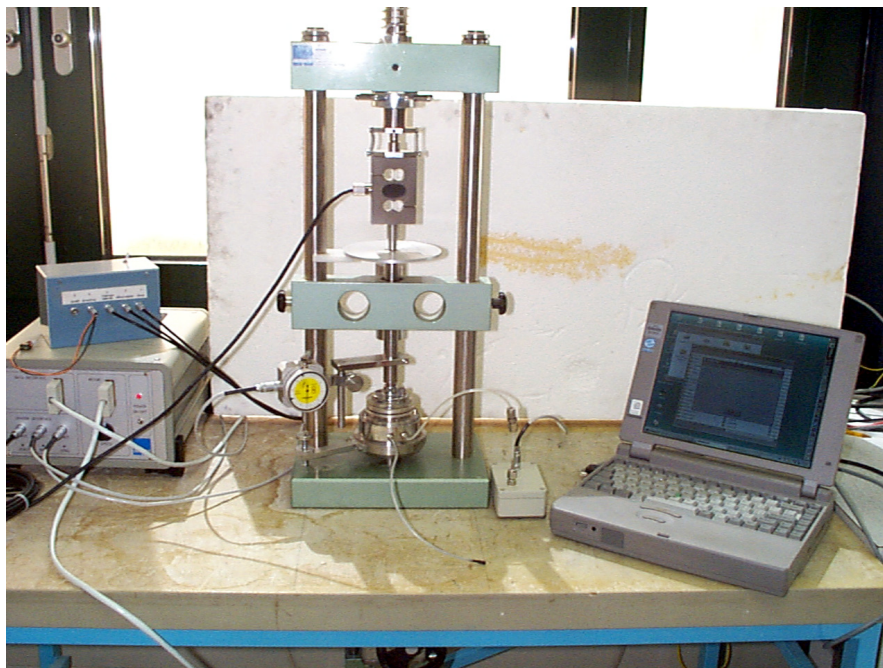


Figure 5.2: Vue de l'oedomètre CRS (au centre) et de ses composants.

#### 4.1.3 *Cadre de chargement et capteurs*

La cellule CRS complète est placée lors de l'essai sur un cadre de chargement rigide (figure 5.2). Le capteur de déformation est solidaire de ce même bâti rigide; il mesure la hauteur effective de l'éprouvette, indépendamment de la déformation du capteur de force.

Le capteur de force est, quant à lui, placé au-dessus du piston guide. Pour éviter toute sollicitation de l'éprouvette avant sa mise en charge, il est suspendu par des ressorts au bâti rigide.

La déformation à vitesse constante de l'éprouvette d'essai est obtenue grâce à un moteur pas à pas (situé sous la table de travail). La gamme des 5 vitesses disponibles va de 0.06 à 1 mm/h.

Le capteur de pression, destiné à la mesure de la pression interstitielle qui se développe au cours de l'essai est connecté à l'un des 2 tubes de drainage qui sortent de la cellule CRS (l'autre étant réservé à la purge et à la saturation du système).

#### 4.1.4 *Régulation et acquisition des données*

Deux boîtiers de commande (à gauche sur la figure 5.2) permettent la connexion électrique et électronique du moteur et de tous les capteurs. La régulation de la vitesse du moteur est effectuée à partir de ces boîtiers au moyen d'un sélecteur rotatif à 6 positions. La sélection du sens de marche et/ou l'arrêt du moteur sont actionnés par des commutateurs spécifiques.

Afin d'éviter toute surcharge du capteur de force, un système d'inversion du sens de rotation du moteur a été réalisé. Un petit appareil électronique mesure en permanence la tension électrique à la sortie du capteur et enclenche automatiquement un cycle de décharge de l'éprouvette, ceci sans aucune surveillance de l'essai.

L'acquisition des données a été effectuée dans le cadre de cette étude par un enregistreur MADD. Par la suite ce système d'acquisition des données pourra être modifié par un système plus approprié (LabView par exemple).

#### 4.1.5 *Stockage définitif et traitement des données*

A la fin de l'essai, les données stockées sur une cassette mémoire du MADD sont transférées dans un PC pour leur traitement, et leur sauvegarde a été effectuée sur le serveur du LMS+R.

## 4.2 Protocoles utilisés

### 4.2.1 Mode opératoire pour CRS

Le mode opératoire de l'essai CRS a été mis au point et rédigé, à partir des données du fabricant et de la littérature, par M. Steve Tschäppät, ancien laborant du LMS.

#### *Montage de l'éprouvette dans la cellule*

- Peser la bague de confinement avec deux filtres mouillés (saturés).
- Faire une mesure de la hauteur avec la jauge (hauteur de référence).
- Carotter soigneusement l'échantillon avec la bague de confinement.
- Araser l'éprouvette des deux côtés et mettre un filtre papier sur chaque face.
- Peser l'éprouvette et déterminer la teneur en eau avec le surplus de l'échantillon.
- Placer la bague (avec l'éprouvette) dans la cellule CRS. Elle doit alors reposer sur une pierre poreuse saturée, visser les 4 vis (ne pas oublier le joint O'ring), et faire une mesure de la hauteur de l'éprouvette de sol.
- Placer la bague en PVC, avec la partie conique vers le haut sur la bague de confinement (ne pas oublier le joint O'ring), ainsi que le top cap muni de sa pierre poreuse saturée sur l'échantillon.

#### *Réalisation de l'essai*

- Amener la cellule complète sur le dispositif de chargement de l'oedomètre CRS.
- Saturer les tubes de pression interstitielle par application d'une dépression sur le principe des vases communicants. Veiller à ce que toutes les bulles d'air aient disparu.
- Raccorder un des deux tubes au capteur de pression en faisant bien attention qu'il n'y ait pas de bulle d'air dans les tuyaux et raccords.
- Connecter le MADD à l'ordinateur et se mettre en mode multimètre (programme WINMADD).
- Placer l'échantillon sur la presse et le mettre en place (avance manuelle) jusqu'à l'application d'une légère charge sur l'éprouvette (de l'ordre de 5 à 10 N).
- Régler le comparateur de déplacement au premier millimètre de déplacement pour ne pas atteindre la fin de course du capteur pendant l'essai
- Choisir une vitesse du moteur adaptée au choix de l'essai et à la qualité du sol à tester.
- Programmer par l'intermédiaire du PC le MADD, notamment la fréquence de l'auscultation.
- Mettre en marche le moteur.
- Lancer l'essai.

#### *Fin d'un essai*

- Terminer l'essai (arrêt du moteur, déchargement manuel, débranchement des capteurs).
- Sortir l'éprouvette de la cellule, puis la démouler et la faire sécher à l'étuve pour la mesure de la masse sèche de l'éprouvette et par la suite la détermination de  $h_s$  (hauteur du squelette minéral).

#### 4.2.2 Mode opératoire pour oedomètre classique

Le mode opératoire du LMS (ES.410) a été utilisé pour la réalisation des essais à l'oedomètre standard.

La préparation et la mise en place de l'échantillon sont effectuées pratiquement de la même manière que pour l'oedomètre CRS.

Le sol doit être saturé, mais il n'y a pas besoin de saturer tout le matériel autour, puisqu'il n'y a pas de mesure des pressions interstitielles au cours du test.

Après la mise en route de l'essai, une nouvelle charge est appliquée sur l'éprouvette, généralement toutes les 24h environ, en fonction du critère choisi pour déterminer la fin du tassement par consolidation. Pour la plupart des paliers, c'est par l'intermédiaire d'un bras de levier que la contrainte est transmise à l'échantillon testé.

La gamme habituelle des paliers de charge pour ce type d'essai est la suivante (en kPa):

Chargement: 1.1 – 15 – 60 – 125 – 250 – 500 – 1000, puis décharge à 1.1 (éventuellement par paliers)

A la fin de l'essai, l'éprouvette subit la même manipulation (séchage) que pour l'oedomètre CRS.

### 4.3 Conditions des essais

Les essais ont tous été réalisés au Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL et par son personnel.

Ils ont été effectués à une température constante égale à  $20 \pm 1$  °C. La température du laboratoire est en effet régulée toute l'année, car celle-ci a une grande influence sur le comportement des sols.

### 4.4 Les expériences réalisées

Les essais ont été réalisés sur des échantillons intacts en provenance de divers chantiers en Suisse (Genève, Berne, Vaud, Valais et Tessin). Des bureaux privés nous ont transmis généreusement plusieurs échantillons, notamment :

- Le bureau B+S à Berne (M. W. Steiner)
- Le bureau Geotest SA Le Mont s/ Lausanne (M. J.-L. Amiguet)

Le LMS remercie ces précieux donateurs, d'autant plus que le prélèvement d'échantillons intacts n'était pas prévu dans la demande de financement de cette étude.

Plusieurs autres échantillons ont été fournis directement par le LMS au fur et à mesure de leur réception pour des études privées.

Tous les échantillons étaient soit paraffinés et emballés dans du plastique ou alors dans des tubes carottiers avec bouchons de paraffine aux extrémités afin de leur garantir une bonne conservation, sans dégradation de leurs caractéristiques intrinsèques.

Les essais se sont déroulés entre décembre 2008 et février 2010 en fonction de la disponibilité du personnel du LMS et de la réception de nouveaux échantillons.

La liste ci-après résume tous les essais effectués y compris la nature des terrains et la profondeur à laquelle les échantillons ont été prélevés.

En principe chaque essai CRS a été comparé à un essai œdométrique standard, cependant quelques protocoles de résultats d'essai n'ont pas été retrouvés, notamment pour des tests réalisés en 2008.

N° Essai	Date essai standard	Date essai CRS	Référence	Profondeur (m)	Nature de l'échantillon	Remaniement
CRSval1	18.11.09	23.11.09	L+A Grand canal	20	Limon sabl.	Faible
CRSval2	18.11.09	2.12.09	28764 F1 EPFL	18.65 - 18.91	Limon - arg.	Faible
CRSval2_2	-	19.1.10	28764 F1 EPFL	18.65 - 18.91	Limon - arg.	Faible
CRSval3	18.11.09	1.12.09	28764 F2 EPFL	14.2 - 14.5	Limon	Faible
CRSval3_2	-	7.1.10	28764 F2 EPFL	14.2 - 14.5	Limon	Faible
CRSval4	25.11.09	25.11.09	SX102 C0813	20	Limon + grav.	fort
CRSval5	30.11.09	30.11.09	SX102 Casa Grand	21.95-22.13	Limon - sabl.	Faible
CRSval5_2	-	18.1.10	SX102 Casa Grand	21.95-22.13	Limon - sabl.	Faible
CRSval6	8.12.09	14.12.09	S5977	15.6-16.3	Limon arg.	Faible
CRSval6_2	8.12.09	21.1.09	S5977	15.6-16.3	Limon arg.	Faible
CRSval7	8.12.09	9.12.09	S5977	8.46-8.70	Limon arg.	Faible
CRSval7_2	-	20.1.10	S5977	8.46-8.70	Limon arg.	Faible
CRSval8	8.12.09	8.12.09	S6202	Motte	Limon arg.	moyen
CRSval8_2	-	15.1.10	S6202	Motte	Limon arg.	moyen
CRSval9	-	13.1.10	S6015	Motte	Argile	Faible
CRSval10 (26)	6.1.10	28.1.10	S6209 - Sigirino	19.00-19.70	Limon - arg.	Faible
CRSval11 (13)	6.1.10	29.1.10	S6209 - Sigirino	16.00-16.40	Limon - arg.	Faible
CRSval12 (14)	5.1.10	1.2.10	S6209 - Sigirino	19.30-19.90	Limon - arg.	Faible
CRSval13 (25)	6.1.10	2.2.10	S6209 - Sigirino	13.50-14.20	Limon sabl.	Faible
CRSval14 (38)	6.1.10	11.2.10	S6209 - Sigirino	18.70-19.30	Limon - arg.	Faible
CRSval15	28.1.09	26.1.09	SX102 - Rennaz	18.25-18.50	Limon arg. varvé de sable fin	Faible
CRSval16	28.1.09	27.1.09	SX102 - Jordi Mechenhaus	25.1-25.3	Argile lim.	Faible
CRSval17	5.2.09	5.2.09	SX102 - Genève	6.90-7.10	Argile lim. avec graviers	Faible
CRSval17_2	5.2.09	9.2.09	SX102 - Genève	6.90-7.10	Argile lim. avec graviers	Faible
CRSval18	11.2.09	11.2.09	SX102 - Belp	36.6-36.8	Argile lim. - comp.	Faible
CRSval19	6.1.09	21.1.09	SX102 - S6176 Pfyngut	3.50-4.00	Limon cray. sabl. avec MO	moyen
CRSval20	4.3.09	2.12.08	Belp Medienhaus	19.1	Argile lim.	Faible
CRSval21	30.3.09	16.4.09	Kunstmuseum Bern	11.45-11.60	Limon sabl.	Faible
CRSval22	30.3.09	29.4.09	Kunstmuseum Bern	19.85-20.00	Sable fin lim.	Faible
CRSval23	-	13.11.08	Gallerie Chouly	5.10-5.20	Argile lim.	
CRSval23_2	-	17.11.08	Gallerie Chouly	5.10-5.20	Argile lim.	

## 4.5 Caractéristiques des matériaux utilisés

Comme le montre la liste des essais effectués, les terrains qui ont servi à ces essais sont très variés, ils peuvent être regroupés en plusieurs catégories distinctes:

- Les argiles et les limons ± argileux,
- Les limons et limons ± sableux, voire graveleux,
- Un limon crayeux.

Plusieurs de ces essais ont été effectués à double, surtout en présence de matériaux très hétérogènes.

La compacité de ces matériaux est assez différenciée en fonction principalement de leur profondeur. De même la pression de préconsolidation, qui dépend des conditions de contraintes que le terrain a subi au cours de son histoire va varier en fonction des matériaux utilisés pour cette étude.

L'identification de ces matériaux, selon la norme VSS 670'006b, n'a pas été effectuée sur ces éprouvettes afin de privilégier le nombre d'essai œdométrique réalisés.

## 4.6 Résultats bruts

Les protocoles de tous les essais effectués sont donnés en annexe.

# 5 Exploitation et analyse des résultats de l'essai CRS

## 5.1 Analyse des essais

Pour l'analyse des essais CRS, deux types de données sont à disposition. Les caractéristiques de l'éprouvette sont définies par:

- la géométrie ( $\emptyset$  et hauteur)
- les masses volumiques ( $\rho$ ,  $\rho_d$ , et  $\rho_s$ )
- les teneurs en eau  $w$  (initiale et finale).

Les données brutes enregistrées sont disponibles à la fin de l'essai CRS sous la forme d'un tableau numérique dans lequel figure :

- le temps (date et heure de chaque acquisition)
- la force verticale sur l'échantillon de sol
- la pression interstitielle à la base de l'échantillon
- la déformation totale de l'échantillon.

Ce tableau peut contenir plus de 3000 points enregistrés, en fonction de la fréquence d'auscultation.

## 5.2 Interprétation des essais

Les caractéristiques de l'éprouvette et des données brutes sont utilisées et interprétées par la suite pour calculer les différents paramètres. Dans un premier temps, la courbe œdométrique est établie après le calcul de l'indice des vides ( $e$ ) et de la contrainte effective verticale ( $\sigma'$ ). Par la suite les grandeurs physiques suivantes sont déterminées:

- la pression de préconsolidation  $\sigma'_p$
- le coefficient de consolidation  $c_v$
- les indices de compression  $C_c$  et  $C_s$
- la perméabilité de Darcy  $k$
- le coefficient de compressibilité  $m_v$
- le module œdométrique  $E_{\text{œd}}$ .

### 5.2.1 Indice des vides $e$

L'indice des vides  $e$  est une grandeur sans unité qui donne en volume le taux de vides (air + eau), de l'échantillon par rapport à la matière sèche. Dans l'hypothèse d'un sol saturé (cas de l'essai œdométrique), le volume des vides est uniquement représenté par de l'eau, ce qui donne:

$$e = \frac{V_{\text{eau}}}{V_{\text{matière_sèche}}} = \frac{V_w}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{h - h_s}{h_s} \quad (-) \quad (6.1)$$

Avec :  $h$  hauteur courante effective de l'éprouvette (mesurée en continu)  
 $h_s$  hauteur sèche ou hauteur du squelette minéral (constante pour l'éprouvette testée).  
 La hauteur du squelette minéral  $h_s$  peut être déterminée de deux manières, à partir de:

- la masse initiale humide ( $W$ ), la teneur en eau de l'échantillon ( $w$ ) et les masses volumiques  $\rho$  et  $\rho_s$
- la masse sèche de l'éprouvette ( $W_s$ ) et de la masse volumique des grains  $\rho_s$ .

Dans les deux cas, la surface de l'éprouvette doit être connue.

### 5.2.2 Contrainte effective $\sigma'$

La contrainte effective dans l'éprouvette  $\sigma'$  est calculée à partir de la loi de Terzaghi (éq. 3.1). La contrainte  $\sigma$  est supposée uniforme sur toute la surface de l'échantillon de sol. Le calcul de cette contrainte totale  $\sigma$  est obtenu en divisant la charge verticale  $p$  appliquée et mesurée par la surface sur laquelle elle s'exerce. La surpression interstitielle  $u_b$  à la base de l'échantillon est également mesurée en continu au moyen d'un capteur de pression. L'effet de pesanteur sur la pression de l'eau peut être négligé car les hauteurs sont faibles par rapport aux surpressions interstitielles qui sont de l'ordre de quelques dizaines de kPa dans un essai œdométrique. Par exemple pour une hauteur  $H$  de 2cm (taille maximale de l'échantillon), la surpression due à la force de gravité sur l'eau vaut seulement 0.2 kPa.

Le calcul de la pression interstitielle moyenne au centre de l'éprouvette est effectué à partir des données connues:

- La pression de l'eau au sommet de l'éprouvette qui est nulle, car cette face de l'échantillon est drainée.
- La pression de l'eau mesurée à la base de l'éprouvette. Cette pression évolue tout au long de l'essai.

Une interpolation linéaire pourrait être envisagée, cependant Terzaghi (1925) a démontré que la répartition de la pression suit une loi parabolique avec la hauteur, comme le montre également la figure 6.1.

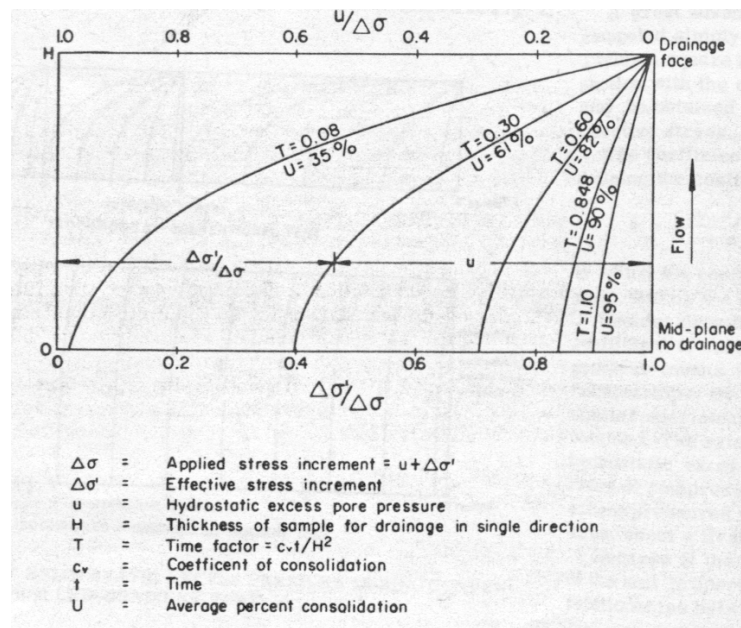


Figure 6.1: Isochrones de la surpression interstitielle dans l'essai œdométrique (Lowe, 1969)

Le calcul de la pression interstitielle  $u$  moyenne dans l'échantillon en fonction du temps  $t$  est donné pour une fonction parabolique par la relation:

$$u_{\text{moyen}}(t) = \frac{1}{3} \cdot [2 \cdot u(0, t) + u(H, t)] \quad (6.2)$$

dans laquelle:  $u(0, t)$  pression à la base de l'éprouvette ( $= u_b$ ) au temps  $t$   
 $u(H, t)$  pression interstitielle à la face supérieure de l'éprouvette (par définition égale à 0)

dès lors,

$$u_{\text{moyen}} = \frac{2}{3} \cdot u_b \quad (6.3)$$

Comme cette pression interstitielle est considérée comme une surpression par rapport à l'état initial:

$$\Delta u = u_{\text{moyen}} \quad (6.4)$$

Tous les éléments sont ainsi réunis pour retrouver la contrainte effective définie par Terzaghi (Equation 3.1).

### 5.2.3 Courbe œdométrique

Le résultat d'un essai œdométrique est traduit par une courbe œdométrique qui donne pour chaque contrainte verticale effective, reportée en abscisse et en échelle logarithmique, la valeur de l'indice de vide de l'éprouvette, reportée en ordonnée (échelle arithmétique).

Cette représentation donne un aperçu de la compressibilité du sol analysé, qui est fonction de la grandeur de l'indice de vide et de l'importance de la variation des contraintes effectives verticales (figure 6.2).

### 5.2.4 Pression de préconsolidation $\sigma'_p$

Lorsqu'un sol a déjà été soumis à une contrainte verticale il est dit "consolidé". Cette contrainte à laquelle il a été soumis au préalable est appelée la contrainte de préconsolidation  $\sigma'_p$  et elle est couramment déterminée au moyen de l'essai œdométrique.

Il existe de nombreuses approches pour déterminer la contrainte de préconsolidation. On abordera certaines d'entre elles ci-dessous. De façon générale, cette problématique existe dans le contexte de l'élasto-plasticité pour l'identification de la surface de charge (ou limite plastique). Dans sa thèse, Françoise Geiser (1999) décrit et valide plusieurs méthodes faisant appel à des représentations variées des essais, par exemple en considérant les déformations volumiques ou déviatoriques, les différents invariants de contrainte, ou encore l'énergie de déformation.

Il faut encore citer les méthodes graphiques développées par Schmertmann (1955) et celle de Casagrande (1936), la plus utilisée.

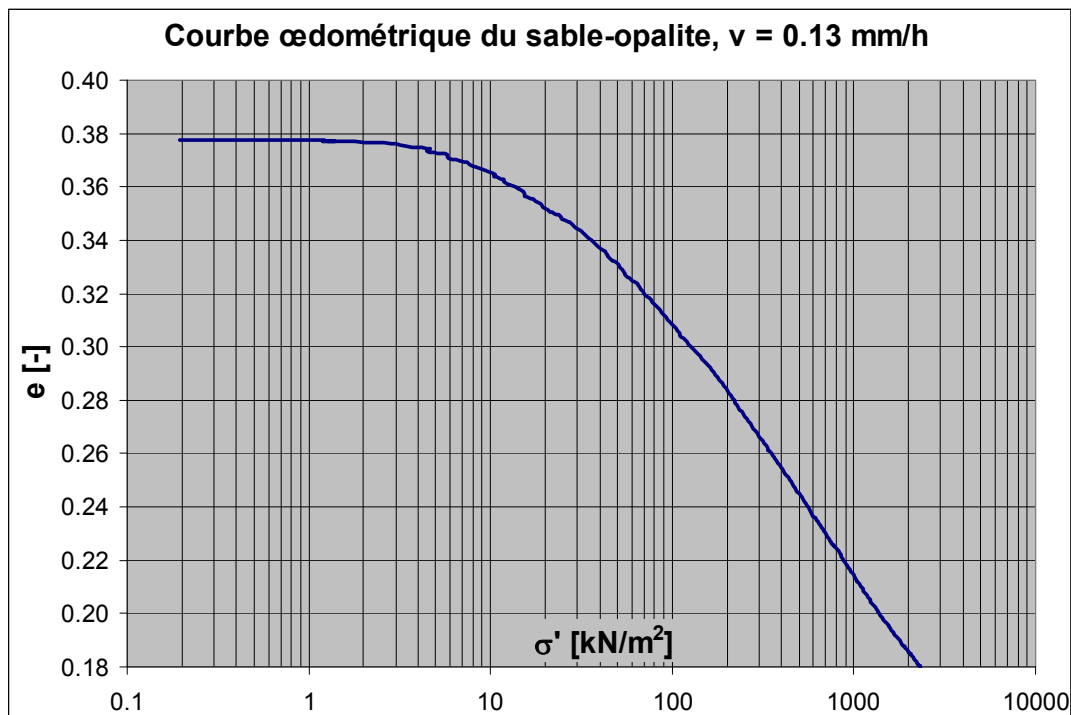


Figure 6.2: Représentation classique de la courbe œdométrique

### 5.2.4.1 Méthode de Casagrande

La méthode la plus utilisée actuellement en pratique pour la détermination de la contrainte de préconsolidation ( $\sigma'_p$ ) est la méthode graphique, développée par Casagrande (1936) et illustrée à la figure 6.3.

Pour déterminer la contrainte de préconsolidation selon Casagrande, le point P de courbure maximum de la courbe œdométrique doit tout d'abord être déterminé visuellement. Une tangente t à cette courbe en ce point, ainsi qu'une droite horizontale h passant par également par ce point P sont tracées. La bissectrice d' de ces 2 droites (t et h) coupe l'asymptote de partie rectiligne finale de la courbe œdométrique a. L'intersection de ces 2 droites (a et d') situe le point de préconsolidation  $\sigma'_p$  de Casagrande.

Il existe cependant un obstacle lié à l'échelle utilisée pour la validité de la méthode de Casagrande. Le point de courbure maximum est une caractéristique de la courbe qui dépend en effet de l'échelle considérée. Le point de courbure maximum se déplace vers la droite lorsque la courbe œdométrique est aplatie et il se déplace vers la gauche lorsqu'elle est étirée verticalement. De plus, si la courbe est assez régulière, ce phénomène d'échelle a une grande influence sur la localisation précise du point de courbure maximum.

La figure 6.4 illustre ce problème: la même courbe peut apparaître différemment selon l'échelle choisie. A gauche, on placerait le point de courbure maximum à une valeur de contrainte beaucoup moins élevée qu'à droite.

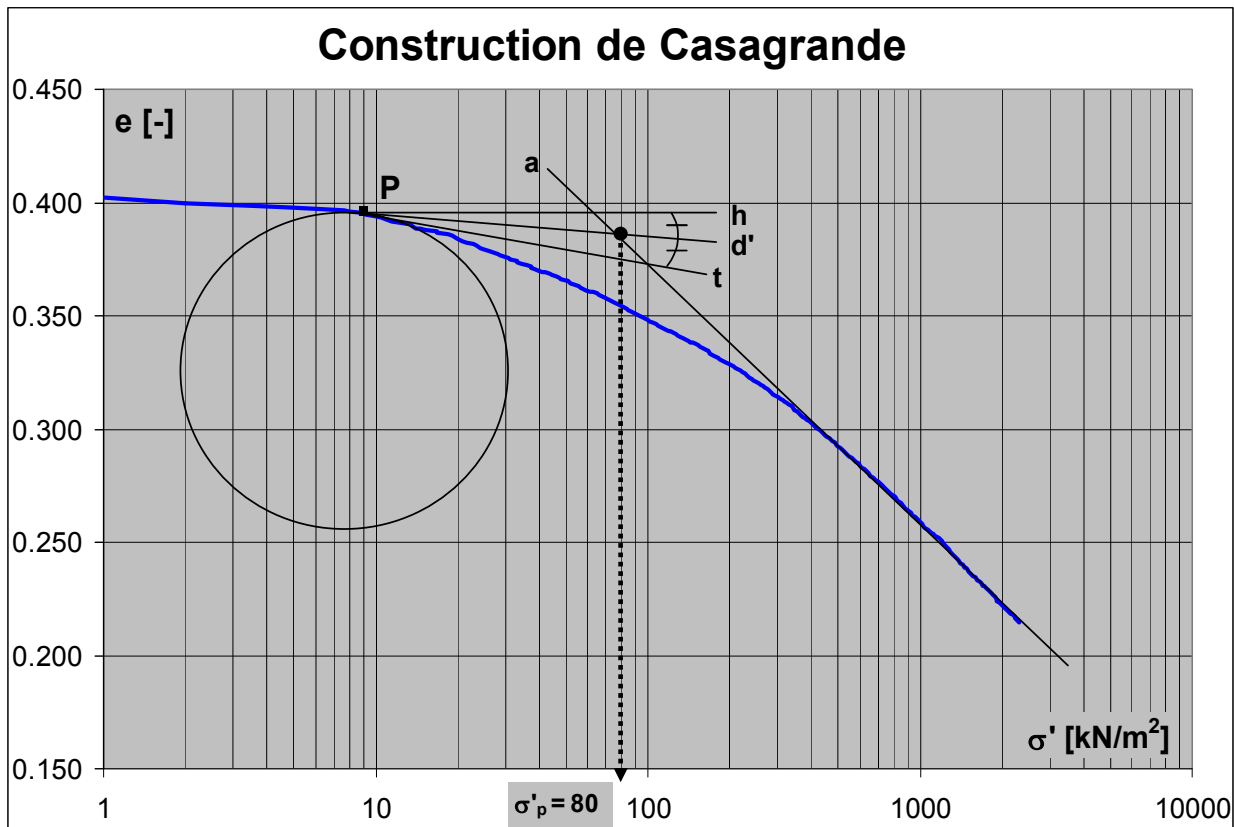


Figure 6.3: Détermination de la préconsolidation selon la méthode de Casagrande (courbe œdométrique du sable - opalite)

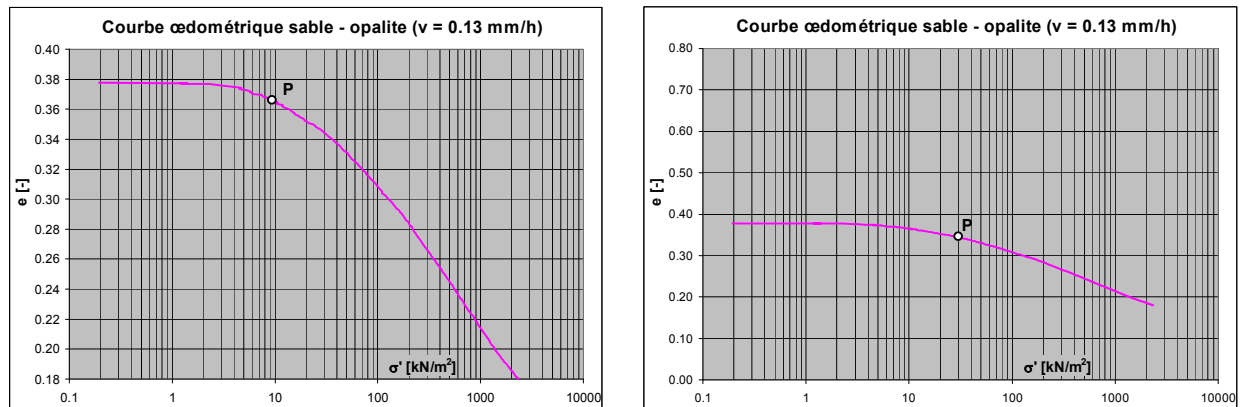


Figure 6.4: Influence de l'échelle sur la détermination du point P de courbure maximum

Dès lors, la méthode de Casagrande donne des points de courbure maximum variables, donc des pressions de préconsolidation différentes suivant l'échelle de la courbe, aussi bien en abscisse qu'en ordonnée.

#### 5.2.4.2 Détermination de $\sigma'_p$ à partir de la pression interstitielle

Le premier mode opératoire de l'essai CRS, élaboré par le " Norwegian Geotechnical Institute" (NGI) préconisait d'utiliser la courbe de la variation de la pression interstitielle en cours d'essai pour la détermination de la pression de préconsolidation des éprouvettes testées. En effet, au cours d'un essai CRS correctement effectué, la courbe représentant l'évolution de la pression interstitielle  $u_b$  en fonction de la contrainte effective  $\sigma'$ , présente un net changement de pente à une contrainte effective comparable à la pression de préconsolidation apparente  $\sigma'_p$  (déterminée graphiquement sur la courbe œdométrique).

Cette propriété de l'essai CRS a également été reprise pour la publication de C. T. Gorman et al (1978) avec de nombreux essais comparatifs qui ont donné de bons résultats.

Il faut toutefois remarquer que la pression interstitielle évolue également en fonction de la vitesse d'écrasement de l'éprouvette (plus cette vitesse est grande, plus la pression interstitielle va être importante). Le choix de la vitesse d'écrasement va donc être important ; dans la littérature citée ci-dessus et dans la norme ASTM D4186 (1996) il est préconisé que la pression interstitielle maximale ne devrait pas dépasser 30% de la contrainte totale appliquée à l'éprouvette. Les différents essais effectués ont montré que la position du point d'inflexion sur la courbe ( $u_b - \sigma'$ ) ne varie pas en fonction de la vitesse pour autant que celle-ci reste dans les limites fixées ci-dessus.

Les quelques exemples ci-après (figure 6.5) montrent que cette méthode a donné de bons résultats sur les sols reconstitués. Pour les échantillons intacts on verra que la méthode reste valable, pour autant qu'une pression interstitielle puisse se développer au cours de l'essai, ce qui n'est parfois pas le cas, surtout pour les matériaux très perméables.

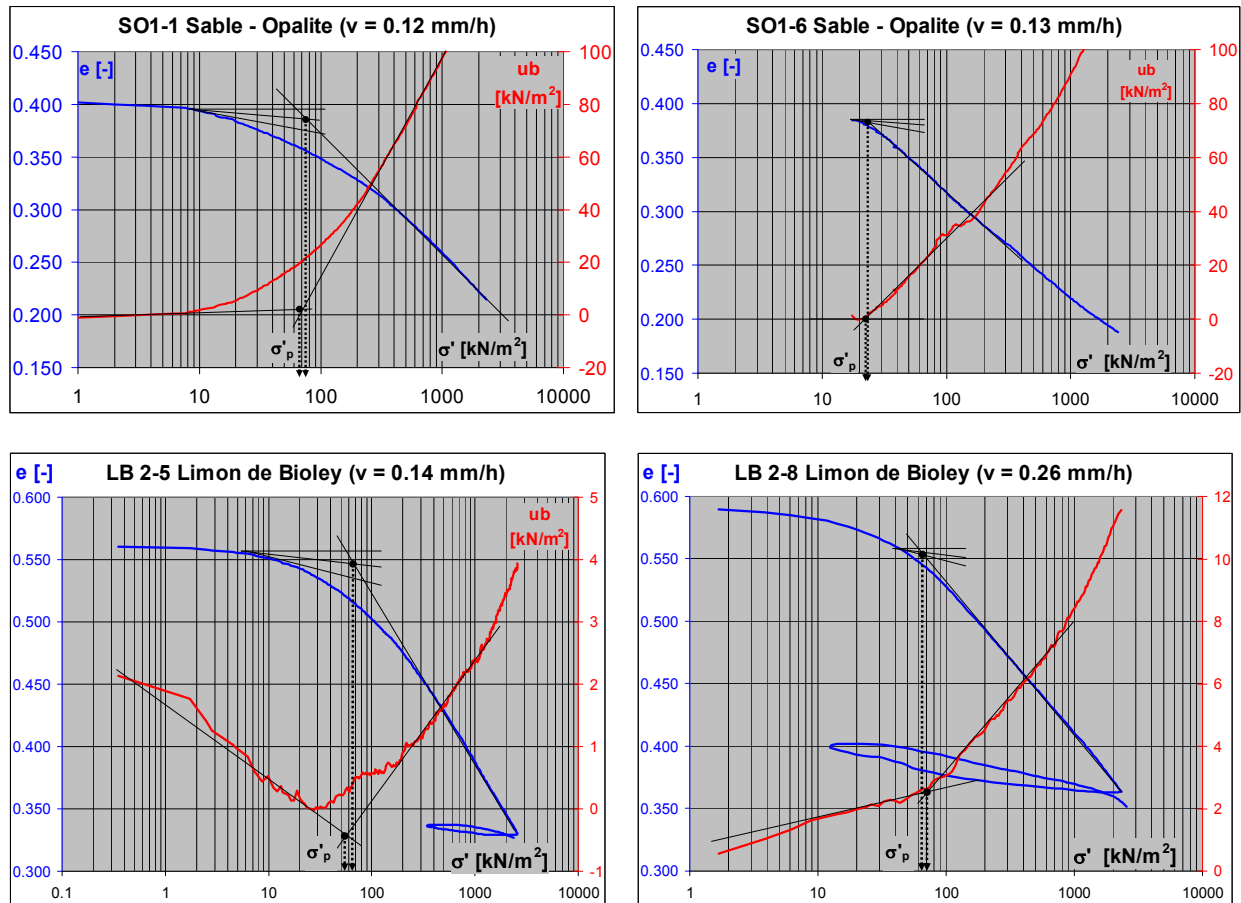


Figure 6.5: Détermination de la pression de préconsolidation par la méthode de Casagrande et à partir de la pression interstitielle

### 5.2.5 Paramètres des essais œdométriques CRS

A l'aide des formules développées pour l'œdomètre CRS (voir chapitre 3.3), les paramètres habituels de l'essai œdométrique incrémental peuvent être déterminés. Il s'agit principalement:

- de la perméabilité  $k$  (m/s)
- du coefficient de compressibilité  $m_v$  ( $m^2/kN$ )
- du coefficient de consolidation  $c_v$  ( $m/s^2$ )
- de l'indice de compression  $C_c$  (-)
- de l'indice de gonflement  $C_s$  (-)

### 5.2.6 Feuilles de résultats

Les résultats des essais CRS sont donnés en annexe, sous la forme de graphiques (courbe œdométrique) et de tableaux numériques.

## 6 Analyse et exploitation des résultats de l'essai œdométrique classique

### 6.1 Analyse des essais

Comme pour l'essai CRS, deux types de données sont à disposition pour l'oedomètre incrémental:

#### 6.1.1 Les caractéristiques de l'éprouvette

- géométrie ( $\emptyset$  et hauteur)
- masses volumiques ( $\rho$ ,  $\rho_d$ , et  $\rho_s$ )
- teneurs en eau  $w$  (initiale et finale)

#### 6.1.2 Les données brutes enregistrées

Ces valeurs sont disponibles à la fin de l'essai sous la forme d'un tableau numérique dans lequel figure :

- le temps (date et heure de chaque acquisition)
- la contrainte verticale imposée à l'éprouvette de sol lors de chaque palier,
- la déformation totale de l'échantillon.

### 6.2 Interprétation des essais

Les caractéristiques de l'éprouvette et des données brutes sont interprétées par la suite directement par un programme informatique.

Dans un premier temps, la courbe œdométrique est établie après le calcul de l'indice des vides ( $e$ ) et de la contrainte effective verticale  $\sigma'$  et par la suite les autres grandeurs physiques sont calculées.

#### 6.2.1 Indice des vides $e$ et contrainte effective verticale $\sigma'$

Dans l'essai classique, à la fin de chaque palier de chargement les surpressions interstitielles sont supposées être totalement dissipées. Le critère de changement de charge, appliqué par le LMS, est atteint lorsque la déformation de l'éprouvette est inférieure à 10  $\mu\text{m}$  en 12 heures. Dès lors, si la pression interstitielle est admise égale à 0, selon la loi de Terzaghi, la contrainte effective est égale à la contrainte totale.

Le tassement de l'éprouvette à la fin de chaque palier de chargement est également connu, ce qui permet de calculer l'indice de vide  $e$ , au moyen des mêmes formules que celles utilisées au chapitre 6.2.

#### 6.2.2 Courbe œdométrique

Chaque palier de contrainte ou incrément de charge donne un point de la courbe œdométrique. La représentation de cette dernière est identique à celle de l'essai CRS, si ce n'est que les points sont reliés entre eux par des segments de droite (figure 7.1).

### 6.2.3 Pression de préconsolidation $\sigma'_p$

La méthode graphique manuelle de Casagrande est utilisée pour retrouver le point de préconsolidation. La représentation de la courbe œdométrique laisse apparaître des segments assez longs entre chaque palier de chargement. La recherche de la pression de consolidation est donc rendue plus délicate, car les changements de courbure n'apparaissent que sur les points de changement de contrainte.

La recherche de la pression de consolidation par un programme informatique est possible, cependant pour être précis, il faut passer par un lissage soigné de la courbe œdométrique et les caractéristiques de cette courbe rendent cette opération très délicate.

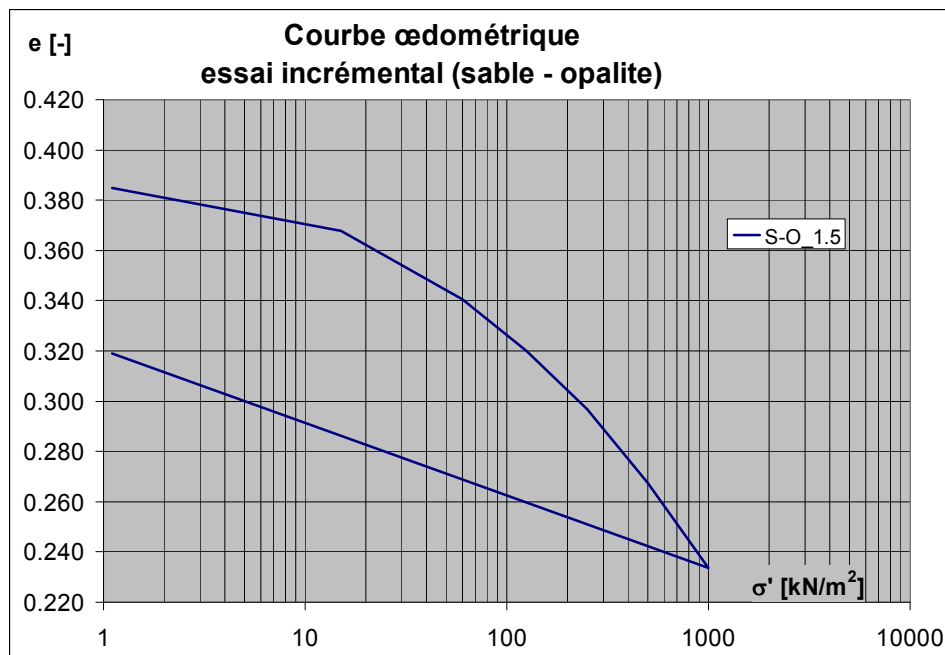


Figure 7.1: Résultat d'un essai œdométrique incrémental

### 6.2.4 Paramètres des essais œdométriques standards

A l'aide des formules développées pour l'oedomètre incrémental (voir chapitre 3.3), les paramètres suivants peuvent être déterminés:

- la perméabilité  $k$  (m/s)
- le coefficient de compressibilité  $m_v$  (m<sup>2</sup>/kN)
- le coefficient de consolidation  $c_v$  (m/s<sup>2</sup>)
- l'indice de compression  $C_c$  (-)
- l'indice de gonflement  $C_s$  (-)

Dans l'oedomètre classique, la perméabilité  $k$  est calculée à partir de la durée de consolidation primaire. Cette dernière est déterminée par les méthodes graphiques de Taylor ( $\sqrt{t}$ ) ou de Casagrande ( $\log t$ ) (figures 7.2 et 7.3). Il est admis que la perméabilité  $k$  reste constante entre deux paliers de charge.

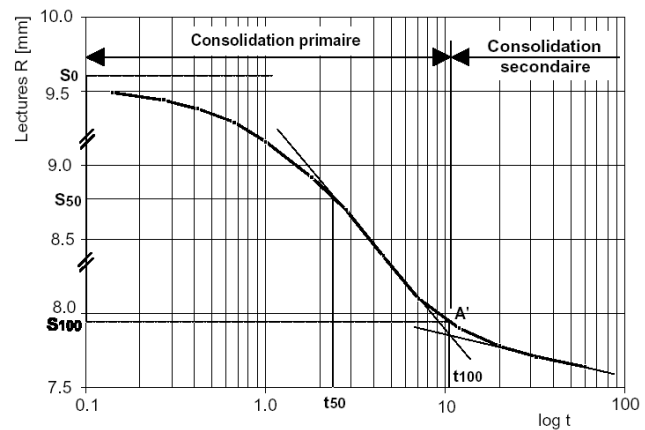
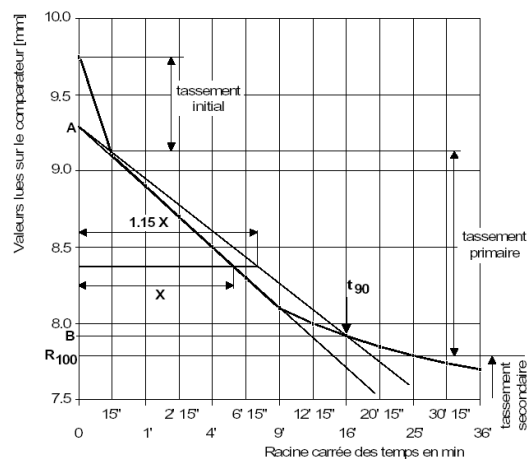


Figure 7.2: Méthode graphique de Taylor Figure 7.3. Méthode graphique de Casagrande

### 6.2.5 Feuilles de résultats

Les résultats des essais incrémentaux sont donnés en annexe, sous la forme de protocoles d'essais avec graphiques (courbes œdométriques) et tableaux numériques.

## 7 Comparaison des résultats entre les essais CRS et incrémentaux

### 7.1 Résultats des essais

Les tableaux 8.1 à 8.4 ci-après donnent les différents paramètres déterminés à partir de tous les essais œdométriques CRS (en noir) et incrémentaux (en rouge) effectués. Ces valeurs figurent également sur les protocoles d'essais qui sont donnés en annexe.

Pour tous les échantillons testés, les paramètres suivants ont été calculés pour des contraintes effectives  $\sigma'$  comprises entre 60 et 3'000 kPa:

- module œdométrique  $E_{\text{œd}}$  [kPa]
- indice de compression (pente)  $C_c$  [-]
- coefficient de consolidation  $c_v$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
- perméabilité  $k$  [m/s]

Afin de permettre une comparaison plus directe entre les différents types d'essais, les paliers de contraintes effectives ont été définis par rapport à ceux de l'œdomètre incrémental, à savoir:

60 – 125	( $\text{kN}/\text{m}^2$ )
125 – 250	( $\text{kN}/\text{m}^2$ )
250 – 500	( $\text{kN}/\text{m}^2$ )
500 – 1000	( $\text{kN}/\text{m}^2$ )
1000 – 3000	( $\text{kN}/\text{m}^2$ ) (seul. CRS)

Au pied de chaque tableau figurent également les valeurs moyennes de chaque paramètre, données séparément pour les essais CRS et incrémentaux

Les échantillons intacts testés ont été regroupés en 3 catégories distinctes pour des raisons de lisibilité des tableaux et des graphiques. Il s'agit des matériaux suivants:

- Argile et Limon argileux (A et La)
- Limon peu argileux (L-a)
- Limon, Limon sableux et Sable (L, Ls et S)

Tableau 8.1: Module œdométrique  $E_{œd}$  [kPa]

Comparaison des modules œdométriques $E_{œd}$ [Kpa]							
N° d'essais	Contrainte effective $\sigma'$ [Kpa]						
	30 à 60	60 à 125	125 à 250	250 à 500	500 à 1000	1000 à 3000	
Argile et limon argileux							
CRSval6	CRS	1605	2983	5917	11261	17941	29701
	Standard	-	2750	4710	8080	14790	-
CRSval7	CRS	2305	3923	7285	14541	22410	37600
	CRS 2	2274	4518	6795	13794	26206	39997
CRSval8	Standard	-	3630	5300	8180	13860	-
	CRS	3320	4660	7333	10817	17269	30334
CRSval9	CRS 2	2665	4356	6698	10947	17773	33809
	Standard	-	5080	6720	9420	14780	-
CRSval15	CRS	1105	2211	4556	7643	12710	24242
	Standard	-	2540	4210	7970	11680	-
CRSval16	CRS	1961	3543	6817	12145	22422	40789
	Standard	-	5270	6850	10810	15440	-
CRSval17	CRS	1626	3140	6106	8789	12967	22141
	Standard	-	4470	5870	7560	9930	-
CRSval18	CRS	2142	3830	6087	10846	19669	37158
	Standard	-	3370	5050	8280	13730	-
CRSval20	CRS	2124	3588	6424	12876	23326	34931
	Standard	-	3040	4730	7460	12690	-
CRSval23	CRS	1725	3149	5665	7912	12439	19967
	Standard	-	3310	5400	8590	12600	-
CRSval23	CRS	1824	3349	5957	10570	19802	34428
	CRS 2	2278	4049	7801	12287	24683	47511
CRSval23	Standard	-	-	-	-	-	-
Limon peu argileux							
CRSval2	CRS	1599	2856	6441	11110	17386	30584
	CRS 2	1627	2856	6024	11519	17226	30922
CRSval10	Standard	-	2470	4160	7780	13800	-
	CRS	2756	5508	8878	17373	29891	43030
CRSval11	Standard	-	2650	3830	6710	10210	-
	CRS	2521	4787	9757	14778	21068	29134
CRSval12	Standard	-	4840	7350	12580	18450	-
	CRS	2683	4584	7929	13078	21232	34895
CRSval14	Standard	-	5350	7870	13280	19390	-
	CRS	2448	4666	8637	15598	28050	39865
CRSval19	Standard	-	2410	4910	7030	10400	-
	CRS	1989	3882	7194	14384	26208	37014
CRSval19	Standard	-	5270	6850	10810	15440	-
Limon, Limon sableux et Sable fin							
CRSval1	CRS	4869	8465	12604	18730	30278	57027
	Standard	-	5080	7740	13000	20280	-
CRSval3	CRS	1558	2729	5817	9451	14432	26129
	CRS 2	1550	2853	6250	11143	17884	29740
CRSval4	Standard	-	2550	4270	7920	14090	-
	CRS	2132	3302	6833	11112	22644	45503
CRSval5	Standard	-	3770	5230	8100	12240	-
	CRS	3582	6103	10323	17349	30054	59020
CRSval13	CRS 2	2651	4608	8432	14407	25028	43599
	Standard	-	6300	9830	13990	22550	-
CRSval21	CRS	2950	5496	9349	17260	29893	65527
	Standard	-	5370	7830	13740	20190	-
CRSval22	CRS	3609	6355	13447	24618	44771	101483
	Standard	-	6470	12060	18210	36670	-
CRSval22	CRS	3592	6635	13805	23312	40069	80566
	Standard	-	6150	10180	14060	25730	-

Tableau 8.2: Indice de compression  $C_c$  [-]

Coefficient de l'indice de compression $C_c$ [-]							
N° d'essais	Contrainte effective $\sigma'$ [Kpa]						
	30 à 60	60 à 125	125 à 250	250 à 500	500 à 1000	1000 à 3000	
Argile et limon argileux							
CRSval6	CRS	0.100	0.110	0.115	0.117	0.142	0.187
	Standard		0.122	0.141	0.160	0.170	
CRSval7	CRS	0.066	0.081	0.092	0.104	0.114	0.151
	CRS 2						
CRSval8	Standard		0.091	0.124	0.158	0.180	
	CRS	0.039	0.060	0.079	0.106	0.130	0.163
CRSval9	CRS 2	0.056	0.071	0.092	0.111	0.135	0.159
	Standard		0.063	0.096	0.135	0.168	
CRSval15	CRS	0.146	0.140	0.137	0.156	0.183	0.207
	Standard						
CRSval16	CRS	0.077	0.086	0.092	0.102	0.108	0.135
	Standard		0.057	0.089	0.110	0.151	
CRSval17	CRS	0.106	0.109	0.111	0.153	0.202	0.256
	Standard		0.081	0.123	0.188	0.277	
CRSval18	CRS	0.073	0.086	0.106	0.118	0.125	0.150
	Standard		0.092	0.123	0.146	0.171	
CRSval20	CRS	0.085	0.100	0.112	0.117	0.133	0.186
	Standard		0.115	0.147	0.182	0.207	
CRSval23	CRS	0.100	0.117	0.127	0.178	0.223	0.296
	Standard		0.110	0.135	0.166	0.219	
CRSval23	CRS	0.087	0.099	0.109	0.124	0.131	0.163
	CRS 2	0.079	0.087	0.094	0.115	0.118	0.158
CRSval23	Standard						
	Limon peu argileux						
CRSval2	CRS	0.104	0.118	0.109	0.118	0.148	0.183
	CRS 2	0.100	0.113	0.109	0.112	0.146	0.180
	Standard		0.135	0.159	0.165	0.180	
CRSval10	CRS	0.065	0.069	0.085	0.089	0.101	0.159
	Standard		0.162	0.224	0.247	0.312	
CRSval11	CRS	0.073	0.077	0.078	0.101	0.141	0.224
	Standard		0.079	0.104	0.120	0.161	
CRSval12	CRS	0.064	0.077	0.089	0.108	0.132	0.179
	Standard		0.069	0.094	0.110	0.148	
CRSval14	CRS	0.074	0.077	0.085	0.096	0.106	0.166
	Standard		0.171	0.166	0.226	0.295	
CRSval19	CRS	0.087	0.090	0.099	0.099	0.105	0.168
	Standard		0.057	0.089	0.110	0.151	
Limon, Limon sableux et Sable fin							
CRSval1	CRS						
	Standard						
CRSval3	CRS	0.114	0.126	0.118	0.140	0.179	0.218
	CRS 2	0.104	0.116	0.106	0.118	0.140	0.185
CRSval4	Standard		0.128	0.151	0.159	0.173	
	CRS	0.064	0.085	0.082	0.101	0.096	0.109
CRSval5	Standard		0.088	0.127	0.160	0.206	
	CRS	0.043	0.054	0.065	0.079	0.089	0.103
CRSval13	CRS 2	0.063	0.072	0.080	0.093	0.106	0.139
	Standard		0.052	0.067	0.093	0.113	
CRSval21	CRS	0.060	0.066	0.077	0.085	0.098	0.107
	Standard		0.070	0.096	0.108	0.145	
CRSval22	CRS	0.038	0.043	0.043	0.046	0.051	0.056
	Standard		0.045	0.049	0.064	0.063	
CRSval22	CRS	0.038	0.042	0.040	0.048	0.057	0.066
	Standard		0.047	0.058	0.083	0.089	

Tableau 8.3: Coefficient de consolidation  $c_v$  [ $m^2/s$ ]

Coefficient de consolidation $C_v$ [ $m^2/s$ ]							
N° d'essais	Contrainte effective $\sigma'$ [Kpa]						
	30 à 60	60 à 125	125 à 250	250 à 500	500 à 1000	1000 à 3000	
Argile et limon argileux							
CRSval6	CRS	2.48E-07	2.40E-07	2.90E-07	3.91E-07	5.27E-07	7.21E-07
	Standard		9.46E-08	1.05E-07	1.89E-07	2.06E-07	
CRSval7	CRS	6.58E-07	7.85E-07	1.04E-06	1.28E-06	1.62E-06	2.14E-06
	CRS 2						
CRSval8	Standard		2.36E-07	2.95E-07	2.87E-07	3.00E-07	
	CRS	3.51E-06	1.86E-06	1.36E-06	1.22E-06	1.14E-06	2.70E-06
CRSval9	CRS 2	1.19E-06	1.02E-06	9.01E-07	7.79E-07	7.00E-07	6.60E-07
	Standard		2.26E-07	2.88E-07	2.82E-07	2.89E-07	
CRSval15	CRS	8.65E-08	1.04E-07	1.42E-07	1.98E-07	2.84E-07	3.89E-07
	Standard						
CRSval16	CRS	5.16E-07	6.17E-07	8.53E-07	1.16E-06	1.55E-06	1.89E-06
	Standard		3.25E-07				
CRSval17	CRS	1.43E-07	1.90E-07	2.44E-07	2.77E-07	2.70E-07	2.96E-07
	Standard		2.11E-07	3.48E-07	3.22E-07	2.67E-07	
CRSval18	CRS	1.55E-07	1.29E-07	1.18E-07	2.44E-07	2.78E-07	4.46E-07
	Standard		7.05E-08	1.00E-07	1.41E-07	1.84E-07	
CRSval20	CRS	1.51E-07	1.71E-07	2.52E-07	3.52E-07	4.68E-07	6.11E-07
	Standard		1.45E-07	1.88E-07	2.42E-07	2.86E-07	
CRSval23	CRS	1.94E-07	2.68E-07	3.59E-07	4.03E-07	4.01E-07	4.83E-07
	Standard		9.79E-08	1.10E-07	1.08E-07	1.36E-07	
CRSval23	CRS	1.85E-07	1.68E-07	1.66E-07	2.06E-07	2.62E-07	3.23E-07
	CRS 2	1.49E-07	1.52E-07	1.88E-07	2.50E-07	3.13E-07	3.73E-07
CRSval23	Standard						
Limon peu argileux							
CRSval2	CRS	2.49E-07	2.80E-07	3.90E-07	5.21E-07	6.84E-07	8.47E-07
	CRS 2	2.26E-07	2.54E-07	3.36E-07	4.63E-07	6.27E-07	7.95E-07
	Standard	-	1.71E-07	2.42E-07	2.89E-07	3.33E-07	-
CRSval10	CRS	2.63E-05	3.60E-05	4.54E-05	6.01E-05	7.51E-05	8.04E-05
	Standard		-	-	4.85E-07	-	-
CRSval11	CRS	7.53E-05	4.69E-05	4.78E-05	5.02E-05	4.66E-05	3.64E-05
	Standard	-	7.56E-07	7.65E-07	7.07E-07	-	-
CRSval12	CRS	-	-	-	-	-	-
	Standard	-	-	9.97E-07	8.56E-07	-	-
CRSval14	CRS	-	-	-	-	1.09E-03	2.14E-04
	Standard	-	-	-	-	-	-
CRSval19	CRS	1.37E-05	2.12E-05	3.18E-05	4.51E-05	6.72E-05	9.68E-05
	Standard	-	-	-	-	-	-
Limon, Limon sableux et Sable fin							
CRSval1	CRS	-	-	-	-	-	-
	Standard	-	-	-	-	-	-
CRSval3	CRS	3.04E-07	3.68E-07	4.64E-07	6.18E-07	7.82E-07	9.30E-07
	CRS 2	2.69E-07	3.34E-07	4.86E-07	6.94E-07	9.36E-07	1.21E-06
CRSval4	Standard	-	2.02E-07	2.52E-07	2.92E-07	1.51E-07	-
	CRS	1.76E-04	5.53E-05	4.80E-05	2.34E-05	1.41E-05	1.59E-05
CRSval5	Standard	-	-	-	-	-	-
	CRS	7.88E-04	4.29E-04	2.82E-04	3.49E-04	5.05E-04	5.33E-04
CRSval13	CRS 2	7.82E-04	1.13E-03	1.19E-03	9.74E-04	6.48E-04	8.61E-04
	Standard	-	-	2.59E-09	-	-	-
CRSval21	CRS	1.56E-04	1.42E-04	2.22E-04	2.84E-04	4.31E-04	6.30E-04
	Standard	-	-	-	-	-	-
CRSval22	CRS	4.51E-06	7.06E-06	1.08E-05	1.55E-05	2.21E-05	3.01E-05
	Standard	-	1.37E-07	2.58E-07	3.61E-08	7.43E-08	-
CRSval22	CRS	5.82E-05	7.58E-05	2.84E-05	8.07E-06	9.05E-06	1.18E-05
	Standard	-	1.60E-07	2.55E-07	2.81E-07	2.33E-08	-

Tableau 8.4: Perméabilité  $k$  [ $m/s$ ]

Comparaison des coefficients de perméabilité k [m/s]							
N° d'essais	Contrainte effective $\sigma'$ [Kpa]						
	30 à 60	60 à 125	125 à 250	250 à 500	500 à 1000	1000 à 3000	
Argile et limon argileux							
CRSval6	CRS	1.24E-10	7.42E-11	4.96E-11	3.51E-11	3.00E-11	2.49E-11
	Standard	-	3.38E-10	2.18E-10	2.29E-10	1.36E-09	-
CRSval7	CRS	2.68E-10	1.99E-10	1.44E-10	1.06E-10	7.51E-11	5.97E-11
	CRS 2	-	-	-	-	-	-
CRSval8	Standard	-	6.38E-10	5.46E-10	3.45E-10	2.13E-10	-
	CRS	1.03E-09	3.93E-10	1.88E-10	1.15E-10	7.00E-11	9.13E-11
CRSval9	CRS 2	4.21E-10	2.25E-10	1.31E-10	7.01E-11	3.97E-11	2.05E-11
	Standard	-	4.36E-10	4.21E-10	2.93E-10	1.92E-10	-
CRSval15	CRS	6.49E-11	4.38E-11	3.04E-11	2.57E-11	2.29E-11	1.69E-11
	Standard	-	-	-	-	-	-
CRSval16	CRS	2.61E-10	1.75E-10	1.29E-10	1.00E-10	7.27E-11	4.99E-11
	Standard	-	-	-	-	-	-
CRSval17	CRS	8.05E-11	5.87E-11	3.99E-11	3.19E-11	2.14E-11	1.39E-11
	Standard	-	4.64E-10	5.81E-10	4.18E-10	2.64E-10	-
CRSval18	CRS	5.48E-11	2.84E-11	1.78E-11	2.27E-11	1.44E-11	1.25E-11
	Standard	-	2.05E-10	1.94E-10	1.68E-10	1.32E-10	-
CRSval20	CRS	7.13E-11	5.15E-11	4.22E-11	3.15E-11	2.43E-11	2.04E-11
	Standard	-	4.67E-10	3.90E-10	3.18E-10	2.21E-10	-
CRSval23	CRS	1.07E-10	8.49E-11	6.41E-11	5.16E-11	3.36E-11	2.52E-11
	Standard	-	2.90E-10	1.99E-10	1.24E-10	1.06E-10	-
CRSval23	CRS	6.34E-11	3.87E-11	2.69E-11	2.22E-11	1.47E-11	1.07E-11
	CRS 2	8.27E-11	4.48E-11	2.64E-11	2.00E-11	1.38E-11	9.71E-12
CRSval23	Standard	-	-	-	-	-	-
Limon peu argileux							
CRSval2	CRS	1.36E-10	9.69E-11	6.10E-11	4.74E-11	4.01E-11	2.87E-11
	CRS 2	1.20E-10	8.38E-11	5.59E-11	4.02E-11	3.67E-11	2.65E-11
	Standard	-	6.79E-10	5.70E-10	3.64E-10	2.37E-10	-
CRSval10	CRS	9.91E-09	6.88E-09	5.25E-09	3.71E-09	2.62E-09	1.94E-09
	Standard	-	-	-	7.10E-10	-	-
CRSval11	CRS	2.99E-08	1.07E-08	5.16E-09	3.51E-09	2.33E-09	1.33E-09
	Standard	-	1.53E-09	1.02E-09	5.51E-10	-	-
CRSval12	CRS	-	-	-	-	-	-
	Standard	-	-	1.24E-09	6.32E-10	-	-
CRSval14	CRS	-	-	-	-	3.85E-08	5.98E-09
	Standard	-	-	-	-	-	-
CRSval19	CRS	6.98E-09	5.63E-09	4.54E-09	3.28E-09	2.61E-09	2.67E-09
	Standard	-	6.04E-14	-	-	-	-
Limon, Limon sableux et Sable fin							
CRSval1	CRS	-	-	-	-	-	-
	Standard	-	-	-	-	-	-
CRSval3	CRS	1.86E-10	1.31E-10	8.04E-11	6.48E-11	5.48E-11	3.72E-11
	CRS 2	1.59E-10	1.18E-10	7.96E-11	6.49E-11	5.45E-11	4.19E-11
CRSval4	Standard	-	7.76E-10	5.78E-10	3.62E-10	1.05E-10	-
	CRS	1.04E-07	1.71E-08	7.56E-09	2.41E-09	6.52E-10	3.65E-10
CRSval5	Standard	-	-	-	-	-	-
	CRS	1.94E-07	7.74E-08	2.84E-08	2.08E-08	1.69E-08	9.44E-09
	CRS 2	2.60E-07	2.37E-07	1.39E-07	7.03E-08	2.67E-08	2.04E-08
CRSval13	Standard	-	-	2.58E-12	-	-	-
	CRS	5.86E-08	2.79E-08	2.45E-08	1.75E-08	1.51E-08	1.08E-08
CRSval21	Standard	-	-	-	-	-	-
	CRS	1.25E-09	1.12E-09	8.20E-10	6.42E-10	5.02E-10	3.25E-10
CRSval22	Standard	-	2.08E-10	2.10E-10	1.94E-11	1.99E-11	-
	CRS	1.67E-08	1.16E-08	2.40E-09	3.60E-10	2.32E-10	1.52E-10
CRSval22	Standard	-	2.55E-10	2.46E-10	1.96E-10	8.86E-12	-

Les figures 8.1 à 8.4 montrent les corrélations entre les paramètres déterminés pour les différents types d'essais. Elles offrent une meilleure vue d'ensemble des résultats et de la concordance qu'il existe entre les essais CRS et incrémentaux.

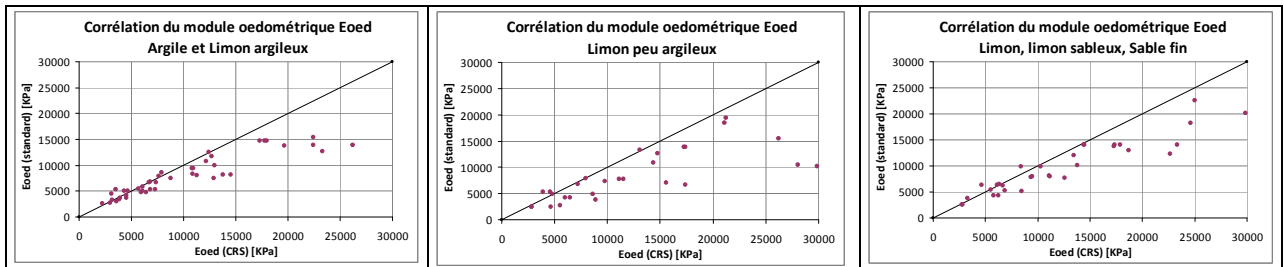


Figure 8.1: Corrélation du module œdométrique  $E_{oed}$

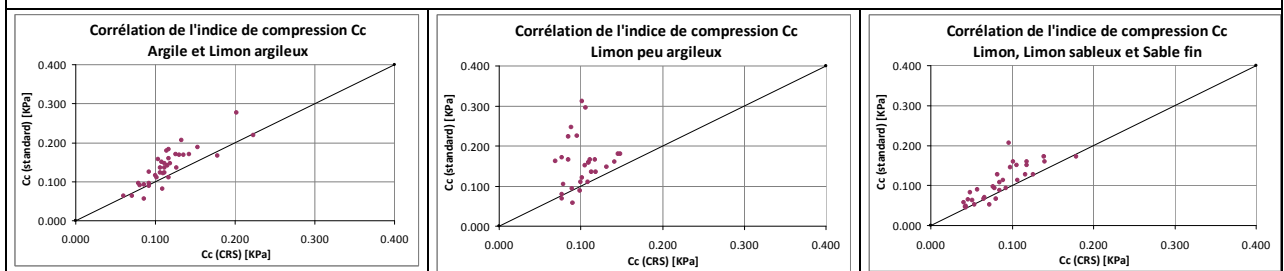


Figure 8.2: Corrélation de l'indice de compression  $C_c$

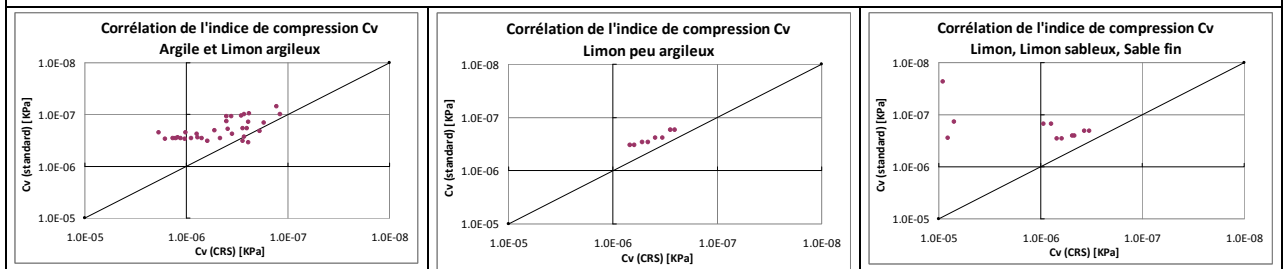


Figure 8.3: Corrélation du coefficient de consolidation  $c_v$

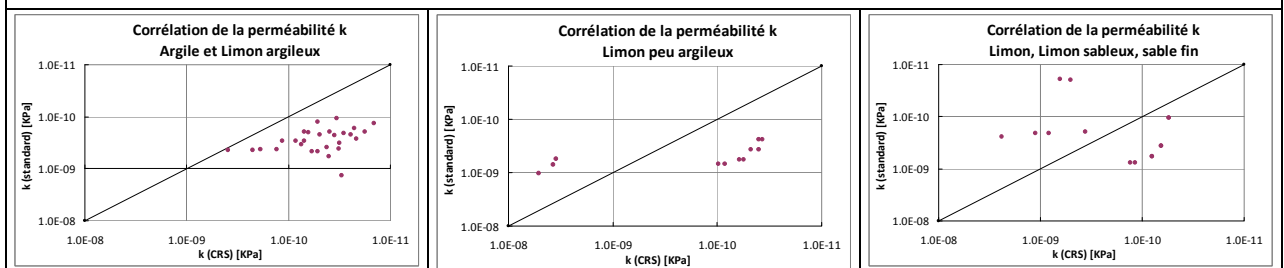


Figure 8.4: Corrélation de la perméabilité  $k$

Les Tableaux 8.1 à 8.4 et les Figures 8.1 à 8.4 montrent qu'il existe pour la plupart des paramètres une assez bonne correspondance entre les résultats de l'oedomètre CRS et ceux de l'essai standard. Les quelques exceptions mises en évidence sont principalement dues à des hétérogénéités dans les échantillons eux-mêmes.

Les commentaires suivants peuvent être apportés:

- Le module œdométrique ( $E_{\text{œd}}$ ) présente des valeurs très similaires avec des écarts faibles. Seules quelques valeurs calculées sous des contraintes voisines de 1000 kPa, montrent des différences (valeur plus élevée avec l'oedomètre CRS). Ces différences ne seraient pas significatives dans leur utilisation par des modèles de calcul de tassement en regard des autres imprécisions liées par exemple à l'hétérogénéité du terrain.
- Bonne corrélation pour l'indice de compression ( $C_c$ ), sauf peut-être pour les échantillons de Limon peu argileux en provenance de Sigirino (CRSval10 et CRSval14) probablement due à une hétérogénéité des échantillons intacts.
- La corrélation pour le coefficient de consolidation ( $C_v$ ) montre que pour les sols les plus argileux cette valeur est souvent plus élevée. Ce même phénomène est également observé dans des sols limono-sableux, où il est encore plus marqué sur les éprouvettes CRSval5 (non prise en compte dans le tableau 8.3), CRSval21 et CRSval22. Pour ces dernières, comme pour les essais effectués sur les sols argileux, les valeurs de l'oedomètre CRS devraient être plus proches de la réalité, car les temps de consolidation pour ces matériaux, calculés avec les valeurs de l'oedomètre incrémental devraient être surestimés (surtout pour les sols les plus perméables). En effet lors de nombreux calculs de la durée du tassement avec les résultats de l'oedomètre incrémental, il est apparu que les temps étaient souvent surévalués par rapport à la réalité.
- Pour le coefficient de perméabilité  $k$  les corrélations sont relativement bonnes, surtout pour les sols argileux et avec des valeurs si faibles ( $k = \sim 10^{-10}$  à  $10^{-11}$  m/s). Il est également possible de voir que ce coefficient augmente avec la proportion de limon (voire de sable fin).
- Il faut également remarquer, sur les deux types d'essais, l'évolution de l'indice de compression ( $C_c$ ) avec la contrainte effective ( $\sigma'$ ). Elle montre que la courbe œdométrique n'est pas rectiligne dans la zone de déformations plastiques, ceci contrairement la théorie de Cam Clay (développée dans les années 60) qui veut que  $C_c$  est une constante pour un sol donné et qu'il ne dépend pas de la contrainte  $\sigma'$ . Ce phénomène, dont la cause provient probablement de l'utilisation pour ces essais de sols reconstitués, est à l'origine des difficultés rencontrées pour déterminer précisément la contrainte de consolidation.

## 7.2 Contrainte de préconsolidation

La contrainte de préconsolidation a été déterminée sur les échantillons testés par la méthode décrite au chapitre 6.2 à partir de l'évolution de la pression interstitielle en cours d'essai.

Le tableau 8.5 ci-après résume les résultats obtenus et qui figurent sur les protocoles des essais CRS donnée en annexe.

Il contient en plus de la nature des terrains, un aperçu de l'état de consolidation du matériau et la valeur de la contrainte de préconsolidation obtenue avec les essais CRS.

N° Essai	Référence	Profondeur	Etat de consolidation	Nature de l'échantillon	Contrainte préconsolidation $\sigma'_c$ (kPa)
CRSval1_1	L+A Grand canal	20	normal	Limon sableux	
CRSval1_2	L+A Grand canal	20	normal	Limon sableux	
CRSval2	28764 F1 EPFL	18.65 - 18.91	normal	Limon peu argileux	14
CRSval2_2	28764 F1 EPFL	18.65 - 18.91	normal	Limon peu argileux	12
CRSval3	28764 F2 EPFL	14.2 - 14.5	normal	Limon	9
CRSval3_2	28764 F2 EPFL	14.2 - 14.5	normal	Limon	12
CRSval4	SX102 C0813	20	surconsolidé	Limon + graviers	245
CRSval5	SX102 Casa Grand	21.95-22.13	normal	Limon peu sableux	
CRSval5_2	SX102 Casa Grand	21.95-22.13	normal	Limon peu sableux	
CRSval6	S5977	15.6-16.3	normal	Limon argileux	14
CRSval6_2	S5977	15.6-16.3	normal	Limon argileux	11
CRSval7	S5977	8.46-8.70	normal	Limon argileux	15
CRSval7_2	S5977	8.46-8.70	normal	Limon argileux	6
CRSval8	S6202			Limon argileux	55
CRSval8_2	S6202			Limon argileux	90
CRSval9	S6015			Argile	7
CRSval10 (26)	S6209 - Sigirino	19.00-19.70	normal	Limon peu argileux	29
CRSval11 (13)	S6209 - Sigirino	16.00-16.40	normal	Limon peu argileux	74
CRSval12 (14)	S6209 - Sigirino	19.30-19.90		Limon peu argileux	
CRSval13 (25)	S6209 - Sigirino	13.50-14.20	normal	Limon sableux	
CRSval14 (38)	S6209 - Sigirino	18.70-19.30		Limon peu argileux	
CRSval15	SX102 - Rennaz	18.25-18.50	surconsolidé	Limon arg. varvé de S fin	51
CRSval16	SX102 - Jordi	25.1-25.3		Argile limoneuse	4
CRSval17	SX102 - Genève	6.90-7.10	normal	Argile lim avec graviers	30
CRSval17_2	SX102 - Genève	6.90-7.10		Argile lim. avec graviers	
CRSval18	SX102 - Belp	36.6-36.8	normal	Argile lim. peu compacte	36
CRSval19	SX102 - S6176	3.50-4.00	normal	Limon cray. et sabl. + MO	36
CRSval20	Belp Medienhaus	19.1	surconsolidé	Argile limoneuse	455
CRSval21	Kunstmuseum Bern	11.45-11.60		Limon sableux	
CRSval22	Kunstmuseum Bern	19.85-20.00		Sable fin limoneux	
CRSval23	Gallerie Chouly	5.10-5.20		Argile limoneuse	37
CRSval23_2	Gallerie Chouly	5.10-5.20		Argile limoneuse	35

Il faut remarquer que la détermination de la contrainte de préconsolidation devient délicate pour les matériaux sans cohésion (limon, limon sableux et sable fin). En effet dans ces terrains, la pression interstitielle n'arrive pas à se développer en cours d'essai. La vitesse d'exécution de l'essai devrait pour ces matériaux être beaucoup plus élevée, ce que ne permettait pas notre appareillage.

Par contre pour les terrains surconsolidés, voire très fortement surconsolidés, avec une prédominance d'argile, la détermination de  $\sigma'_c$  est précise, bien reproductible et facile à obtenir.

La détermination précise de la contrainte de préconsolidation est plus délicate par les méthodes conventionnelles (Casagrande ou Schmertmann) du fait de la courbure quasi continue et assez uniforme des courbes oedométriques de la plupart des échantillons

### 7.3 Comparaison des courbes œdométriques

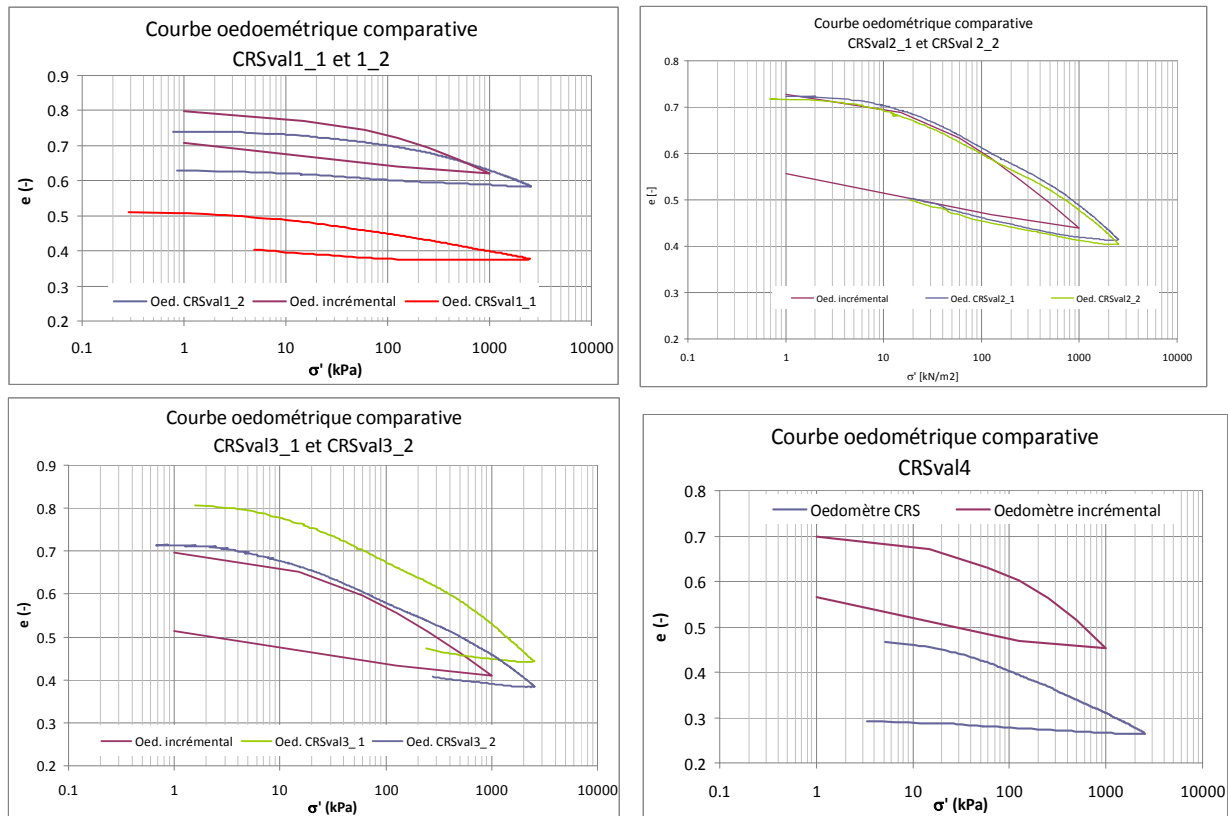
L'œdomètre classique reste la référence pour connaître la réaction des sols à une compression verticale. Expérimentalement, il est admis que cet appareil donne des résultats d'une précision acceptable, qui s'approche le mieux possible de la réalité (les erreurs commises se compensent plus ou moins).

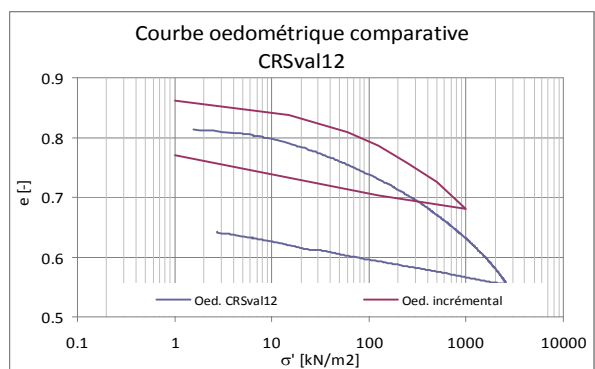
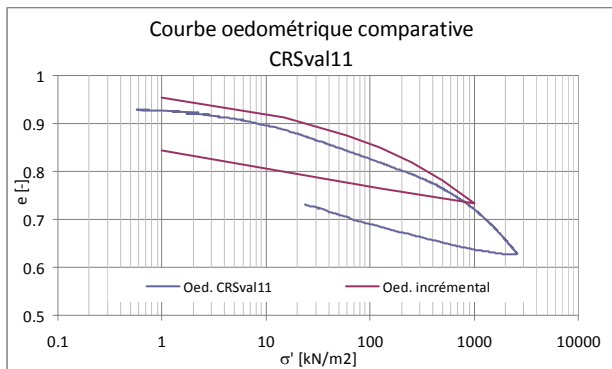
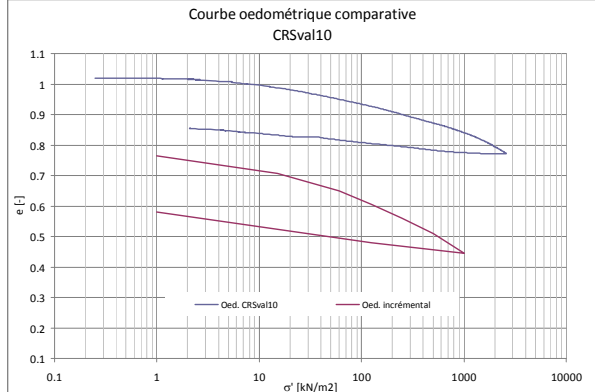
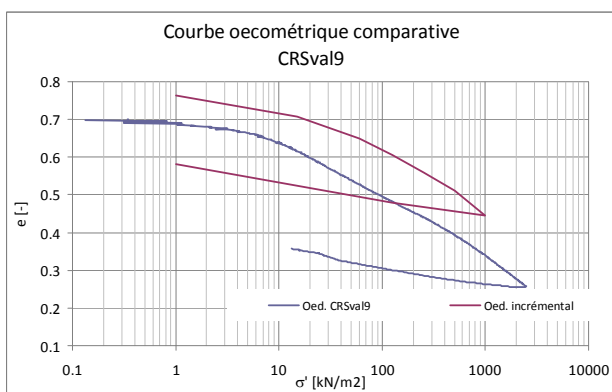
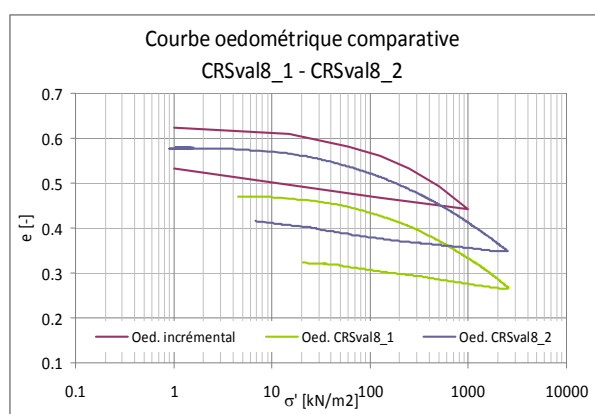
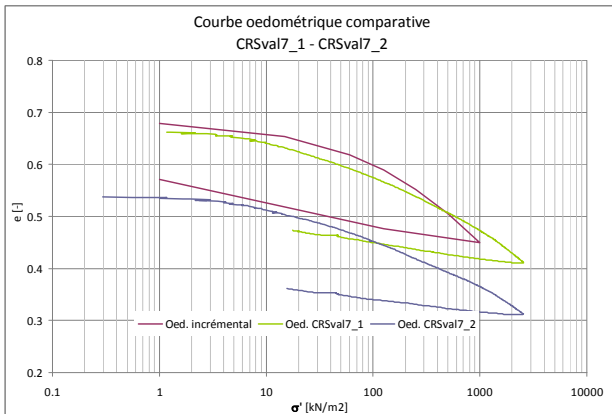
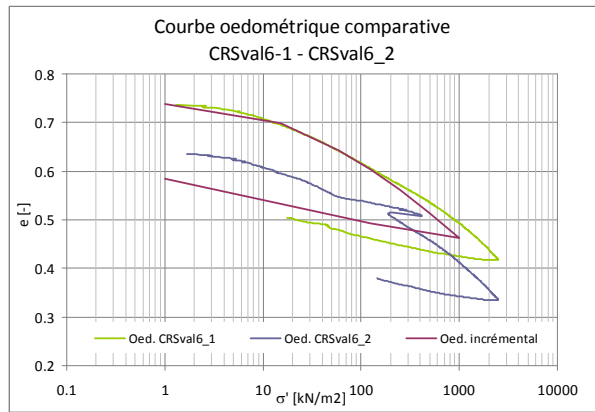
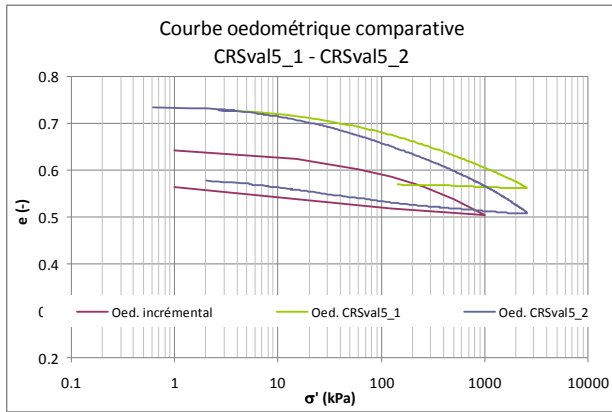
Dans le cadre de cette étude, il est parfois apparu quelques variations des résultats entre les différents types d'essais. Ce phénomène est probablement dû à un manque d'homogénéité des échantillons sur lesquels ont toutes été prélevées les éprouvettes pour les essais CRS et incrémentaux. Il faut également remarquer que la variation naturelle des sols est souvent du même ordre de grandeur que les différences observées.

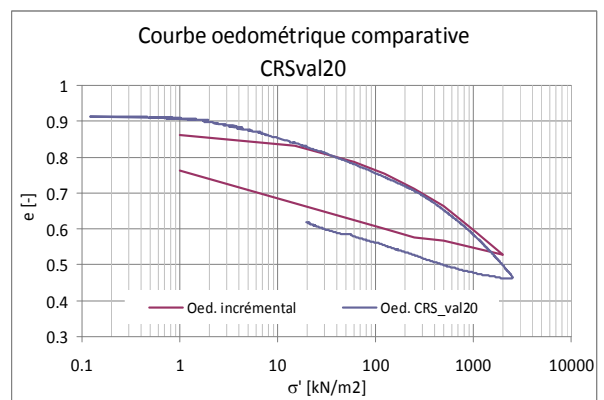
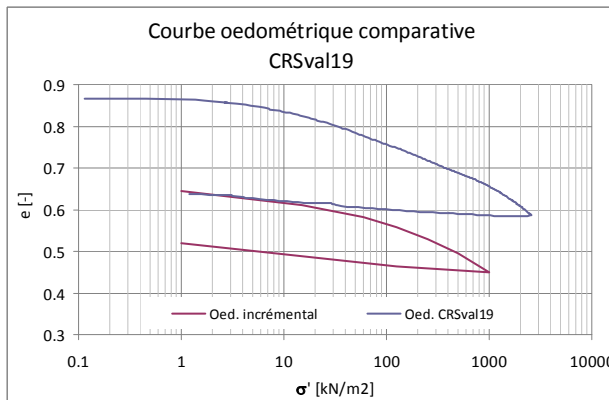
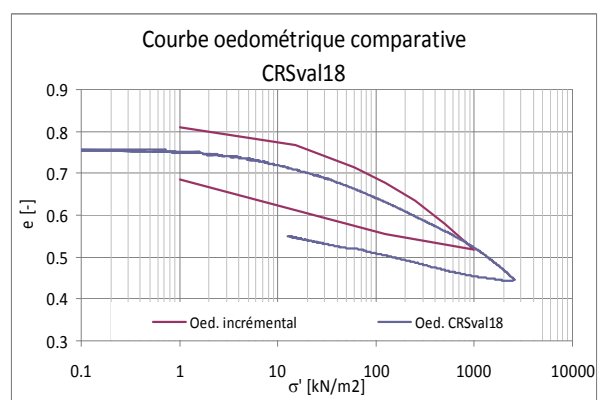
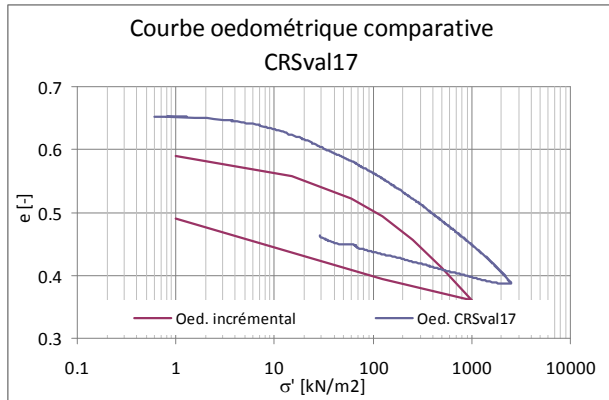
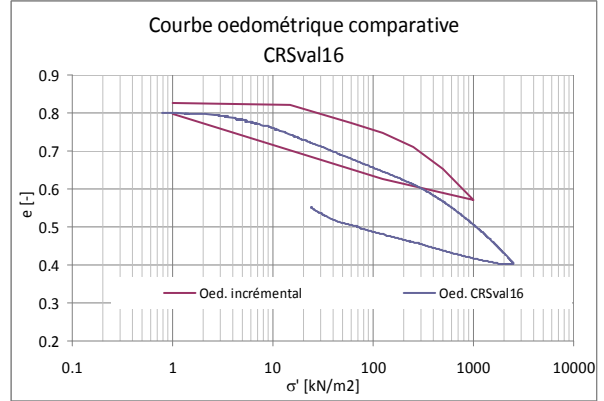
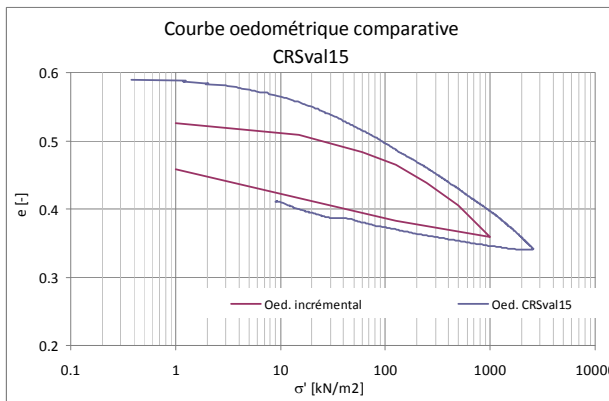
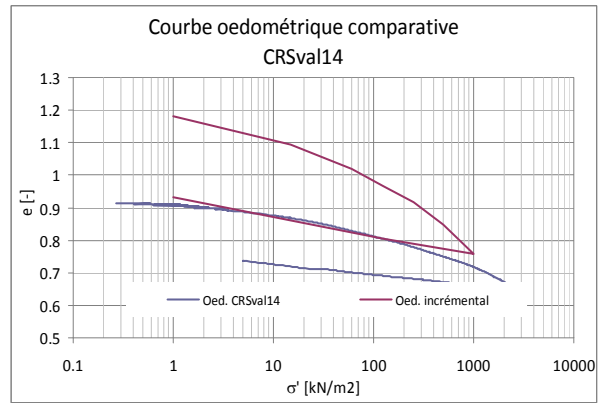
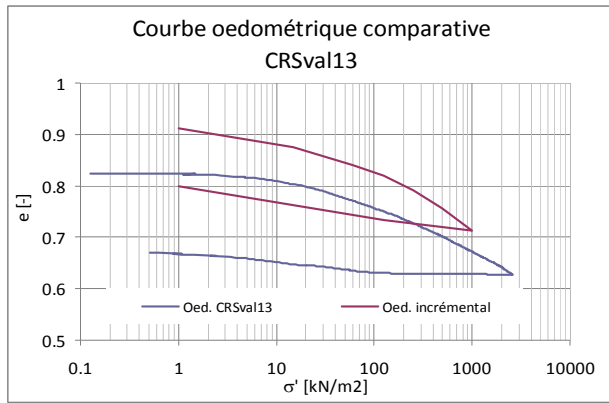
Il faut également remarquer, sur la plupart des essais CRS que l'évolution de l'indice de compression ( $C_c$ ) avec la contrainte effective ( $\sigma'$ ) montre que la courbe œdométrique n'est pas rectiligne dans la zone de déformations plastiques. Ce phénomène est contraire à la théorie de Cam Clay (développée dans les années 60) qui veut que  $C_c$  est une constante pour un sol donné et qu'il ne dépend pas de la contrainte  $\sigma'$ . Il est à l'origine de quelques difficultés rencontrées pour déterminer précisément la contrainte de consolidation par la méthode de Terzaghi.

#### 7.3.1 Concordance entre le CRS et l'œdomètre classique

La superposition de toutes les courbes œdométriques effectuées sur les types matériaux testés est donnée à la figure 8.5.







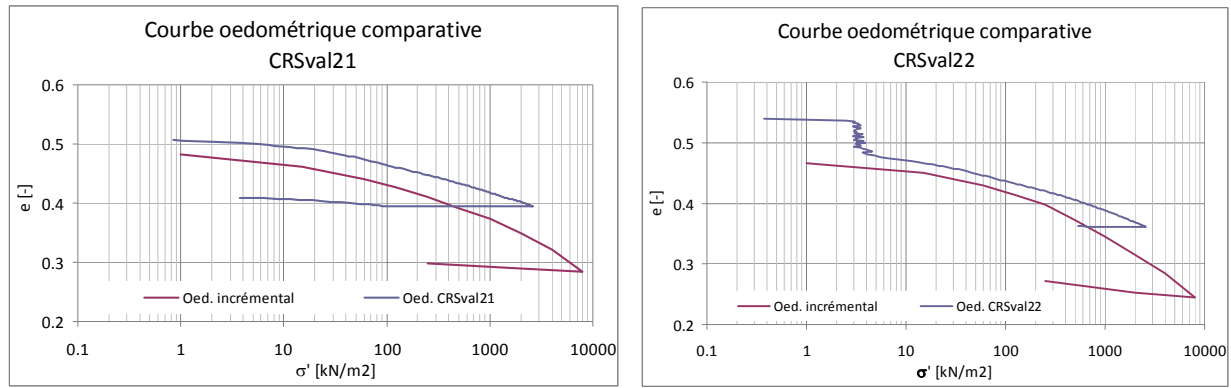


Figure 8.6: Comparaison entre les différentes courbes œdométriques.

### 7.3.2 Commentaire sur la concordance entre les types d'essai

La principale cause des différences observées sur ces graphiques provient principalement de la valeur de l'indice de vide initial ( $e_0$ ). Elle est donc probablement due à l'hétérogénéité des échantillons d'une part et probablement également au mode de conservation des éprouvettes qui pourrait aussi être la cause d'un changement d'humidité, donc de compacité du matériaux. Sont principalement concernés par cet état de fait les essais n°:

CRSval1\_1  
 CRSval4  
 CRSval7\_2  
 CRSval8\_1  
 CRSval10  
 CRSval14  
 CRSval19

Ceci d'autant que la plupart des essais CRS n'a été réalisée qu'après la remise du rapport d'essai de l'oedomètre incrémental, soit souvent dans un délai de plusieurs semaines. Il en a été de même entre les essais CRS.

Cependant pratiquement toutes les courbes ont la même allure, donc un calcul de déformation, pour des mêmes valeurs de contrainte va donner sensiblement le même résultat, qu'il soit effectué avec la courbe de l'oedomètre standard ou avec celle de l'oedomètre CRS.

## 8 Remarques concernant l'exécution des essais

### 8.1 Saturation des éprouvettes

Toute la théorie de la consolidation primaire est basée sur l'hypothèse que les essais sont réalisés sur des éprouvettes saturées. En réalité, il est difficile d'obtenir une saturation parfaite. La consolidation d'un sol non saturé va se traduire par un tassement instantané dû à la compressibilité de l'air au moment de l'application d'une surcharge. Dans un œdomètre

incrémental, cette non saturation va influencer les indices des vides. De plus les autres grandeurs calculées à partir des courbes de consolidation ( $c_v$ ,  $k$ , etc.) vont être affectées.

Pour l'oedomètre CRS, la non saturation de l'éprouvette de sol est encore plus gênante. En effet, au moment de l'application de la surcharge, comme l'air est compressible, la déformation de l'éprouvette peut avoir lieu dans un premier temps sans que la pression de l'eau augmente de manière significative. Ce n'est qu'une fois l'air suffisamment comprimé et partiellement évacué que la contrainte neutre  $u$  se développe. Les mesures sur de tels sols montrent encore que la pression interstitielle se développe de manière assez irrégulière au cours de l'essai (figure 9.1).

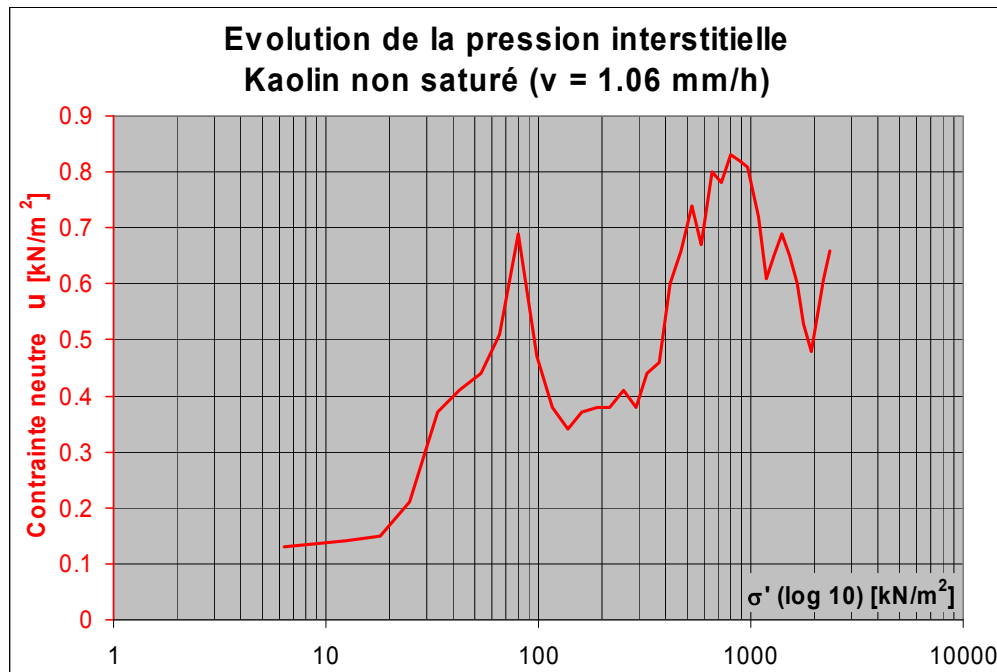


Figure 9.1: Evolution de la pression interstitielle dans un sol non saturé (essai CRS).

## 8.2 Saturation du matériel

Pour minimiser l'influence de l'air dans l'essai, tout l'appareillage de l'oedomètre CRS doit être parfaitement purgé de l'air qu'il pourrait contenir avant la mise en route de l'essai, comme précisé dans le mode opératoire. Cette opération doit impérativement être effectuée très soigneusement et de manière systématique par de l'eau désaérée sur les éléments illustrés à la figure 9.2.

- saturation des pierres poreuses et des filtres en papier
- purge des micro tubes (attention aux raccords dans lesquels des bulles d'air peuvent rester accrochées)
- purge complète de la tuyauterie l'embase, sans oublier les rainures du joint O'ring
- purge de la partie mesure de la pression du capteur.

Ce n'est qu'une fois ces opérations effectuées que l'éprouvette d'essai peut être montée sur son embase.

Il faut remarquer que la présence d'air dans l'appareillage entraîne le même genre d'erreur qu'une saturation incomplète de l'éprouvette de sol.



*Figure 9.2: Détail des micro tubes, de l'embase inférieure et de la pierre poreuse inférieure du pot œdométrique CRS*

### 8.3 Préparation des éprouvettes

La préparation de l'éprouvette de sol a également une très grande importance. Ces opérations doivent être effectuées avec le plus grand soin, que se soit pour l'œdomètre incrémental ou CRS. Il peut en effet arriver, lors du carottage du sol au moyen de la bague de confinement que des vides soient créés entre les parois de la bague et le sol (figures 9.3 et 9.4). Cet état de fait arrive lorsque la bague n'est pas enfoncée régulièrement et/ou verticalement dans l'échantillon (présence de points durs, irrégularités...).

En conséquence, la partie initiale du chargement se rapproche davantage d'un essai de compression simple et non d'un état de déformation uniaxiale (œdométrique). L'interprétation est donc faussée.



*Figure 9.3: Eprouvette carottée correctement, le sol rempli complètement la bague de l'œdomètre*



*Figure 9.4: Un vide, dû à un carottage moins soigné de l'échantillon de sol apparaît au bord de la bague.*

Lors du calcul de l'indice de vide, l'espace non rempli par le sol va être considéré comme des vides supplémentaires. La surface  $S$  de l'éprouvette devient:

$$S = S_{\text{sol}} + S_{\text{vide}} \quad (9.1)$$

Finalement, la détermination de la hauteur du squelette minéral  $h_s$  donne:

$$h_s = \frac{M_s}{S \cdot \rho_s} = \frac{M_s}{(S_{\text{sol}} + S_{\text{vide}}) \cdot \rho_s} < h_{s \text{ réel}} \quad (9.2)$$

Si la valeur de la hauteur du squelette minéral  $h_s$  est sous-estimée, l'indice de vide  $e$  augmentera de manière significative, ce qui implique un décalage vers le haut de la courbe œdométrique.

Pour rappel:

$$e = \frac{h}{h_s} - 1 \quad (9.3)$$

L'illustration ci-après (figure 9.5) montre deux courbes œdométriques effectuées sur le même échantillon de sol, avec une augmentation, probablement d'origine artificielle, des vides sur la courbe supérieure.

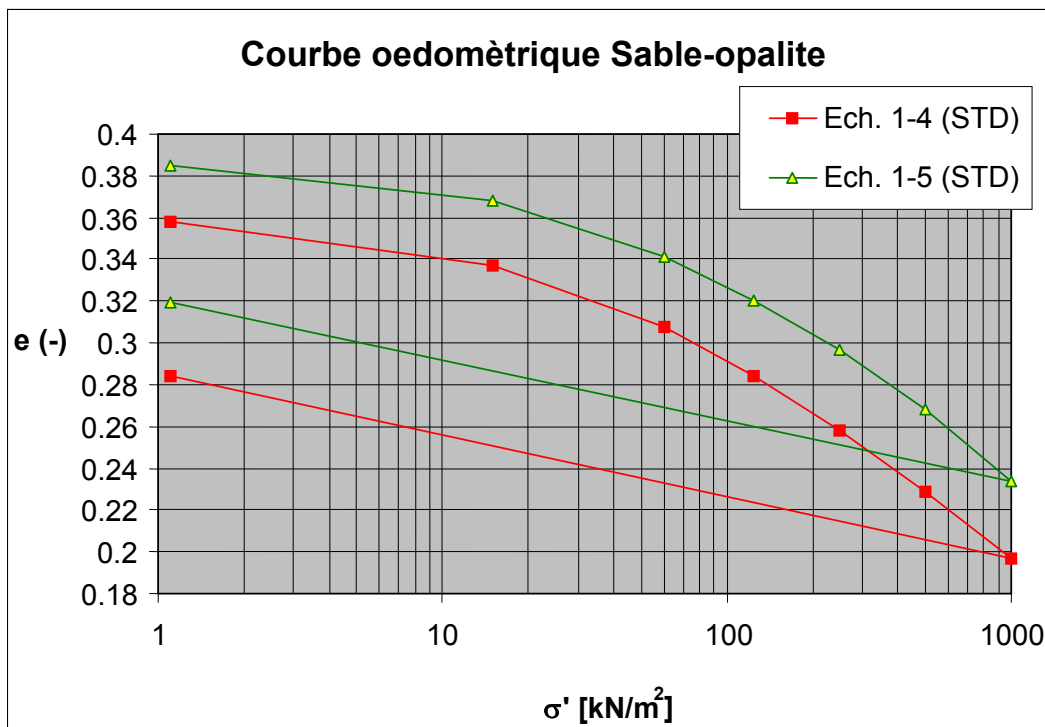


Figure 9.5: Ecart entre deux courbes œdométriques obtenues sur un même échantillon du mélange sable-opalite.

La préparation des éprouvettes, pour les deux types d'oedomètres (standard ou CRS), étant effectuée selon pratiquement le même mode opératoire, ces irrégularités pourraient indifféremment se produire sur l'un ou l'autre.

## 8.4 Consolidation primaire et secondaire

Dans un essai œdométrique, la variation de l'indice de vide en fonction de la contrainte effective est principalement causée par deux types de consolidation:

- La consolidation primaire; elle évolue avec la variation de la pression interstitielle
- La consolidation secondaire; elle correspond à un réarrangement des particules du sol par fluage

Dans un œdomètre standard, le phénomène de la consolidation primaire se manifeste sitôt après l'application de la surcharge. La figure 9.6 illustre la détermination graphique de ces deux types de consolidation, développée par Casagrande (1936).

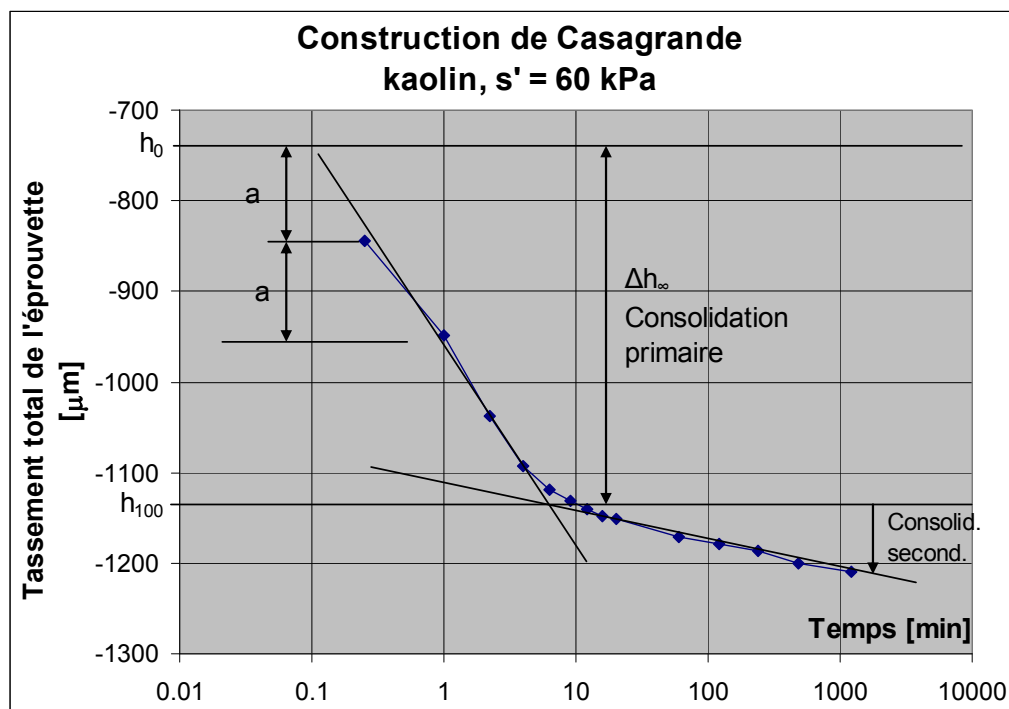


Figure 9.6: Détermination de la consolidation primaire dans un œdomètre incrémental par la méthode graphique de Casagrande.

### Remarques:

- $h_0$  représente la hauteur initiale de l'éprouvette au moment de l'application de la surcharge ( $u = \sigma$ ;  $\sigma' = 0$ ). Cette valeur est recalculée (équation de la parabole)
- $h_{100}$  correspond à la hauteur consolidée de l'éprouvette ( $u = 0$ ;  $\sigma' = \sigma$ )
- les deux phénomènes de consolidation sont identifiables, même s'ils évoluent en parallèle depuis l'instant  $t_0$  (début du chargement).
- Le tassement de l'éprouvette peut être remplacé par les valeurs calculées de l'indice de vide  $e$ . Dans ce cas  $\Delta h_{\infty}$  devient  $\Delta e_{\infty}$

Une recharge effectuée sans avoir pris le temps de laisser toute la pression interstitielle se dissiper, a l'inconvénient, dans un œdomètre standard, de faire redémarrer le processus de la

consolidation primaire avec une pression interstitielle initiale non nulle. La détermination de la hauteur consolidée ( $h_{100}$ ) est alors inexacte. Cette erreur peut par la suite fausser les calculs de la perméabilité  $k$ , du coefficient de consolidation  $c_v$  et de l'indice de compression  $C_c$  (pente de la courbe œdométrique).

La détermination de la consolidation secondaire est plus compliquée. Gibson et Lo ont à cet effet développé une méthode qui implique la réalisation d'essais avec une durée de chargement d'environ 10 jours par palier. Avec un essai standard, comme celui représenté à la figure 9.6, la consolidation secondaire n'est pas reproduite de manière complète, mais une évaluation de son ordre de grandeur est possible.

Il faut encore noter que le tassement qui se développe pendant la consolidation secondaire est principalement dû au réarrangement des particules du sol (fluage); il est donc irréversible.

### 8.5 Influence de la vitesse

La plupart du temps, lors de l'exploitation d'un œdomètre standard, la courbe œdométrique est établie à partir des valeurs du tassement obtenues à la fin de chaque palier. La consolidation secondaire est souvent négligée, ce qui peut parfois induire des résultats erronés, comme le montre la figure 9.7 avec des courbes œdométriques tracées avec des durées de chargement de 0.1 jour, 1 jour et 10 jours. Ce phénomène est principalement ressenti sur les sols sensibles à la consolidation secondaire, tels l'argile et le limon très argileux.

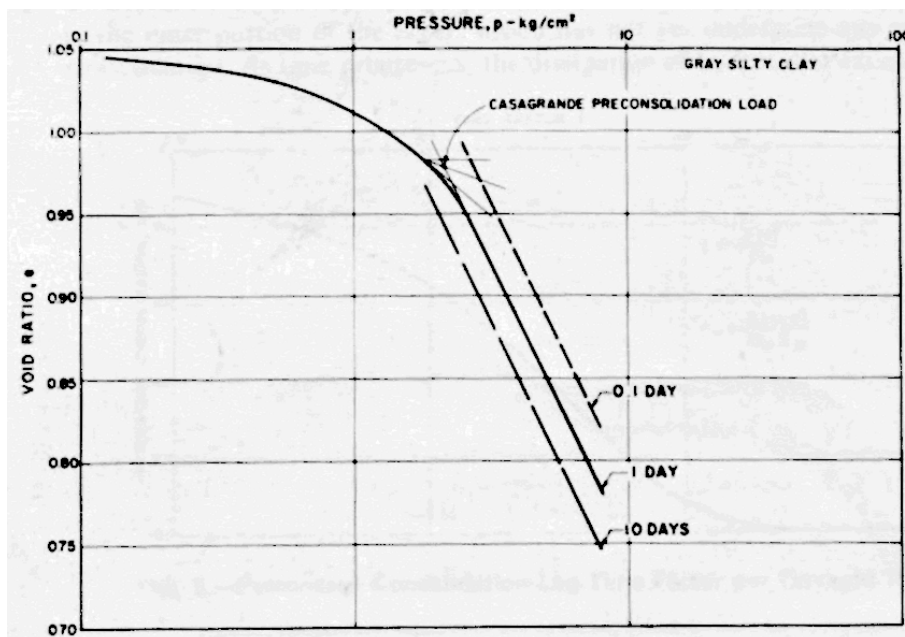


Figure 9.7: Effet de la durée de chargement sur la courbe œdométrique d'un essai standard (d'après J. Lowe, 1974).

Dans le cas de l'œdomètre CRS, le sol est soumis à une contrainte qui évolue constamment. La consolidation primaire et la consolidation secondaire évoluent simultanément. Il y a donc, comme avec l'œdomètre standard, superposition de ces deux phénomènes, qui ne peuvent pas dans ce cas être identifiés séparément.

Le taux de consolidation secondaire dépend de la nature de l'échantillon de sol et de la vitesse à laquelle est effectuée l'expérience. Plus cette dernière est lente, plus le taux de consolidation secondaire est important dans les sols sensibles. La courbe œdométrique peut donc dans ce cas également présenter un décalage vers la gauche, comme présenté à la figure 9.7 pour un essai lent.

De ce fait, le choix de la vitesse à laquelle sera effectué l'essai CRS est donc primordial. En effet, au vu de ce qui précède, celle-ci ne doit pas être trop lente, ni trop rapide afin d'éviter des pressions interstitielles trop importantes.

La norme ASTM D4186 (1996) précise encore que la vitesse à laquelle l'essai est réalisé devrait engendrer des pressions interstitielles comprises entre 5 et 30 % de la contrainte totale  $\sigma_v$  appliquée à l'éprouvette de sol.

Dans la littérature, ce phénomène a déjà été étudié. Il faut toutefois remarquer qu'il n'a vraiment été mis en évidence de manière rigoureuse que pour des argiles sensibles et/ou des sols organiques, très sensibles aux phénomènes de la consolidation secondaire. Pour les autres sols moins argileux, son observation est nettement plus délicate, du fait notamment des imprécisions rencontrées lors des différentes manipulations ou de l'homogénéité de terrain par exemple. Ces perturbations vont influencer les résultats de manière tout aussi significative que la variation des vitesses de chargement habituellement prises en considération.

L'influence de la vitesse de l'essai CRS avait été mise en évidence par les essais de notre étude précédente. Cependant il avait été démontré que cette influence avait des effets insignifiants par rapport aux autres sources d'erreur que l'on peut rencontrer lors de la réalisation de l'oedomètre CRS (hétérogénéité, saturation, préparation d l'éprouvette, etc.).

## 8.6 Commentaires sur les essais œdométrique CRS

### 8.6.1 *Avantages*

La réalisation d'un œdomètre CRS est relativement aisée, de plus la détermination des différents paramètres à partir des données à disposition est bien définie. La plupart des étapes de l'essai peuvent être automatisées.

La principale qualité de l'essai CRS est sa rapidité comparée à l'essai œdométrique incrémental. En effet, l'essai CRS peut prendre de 4h à exceptionnellement 72h, y compris un cycle complet de charge - décharge. L'essai classique prend lui au minimum dix jours pour un sol classique avec 8 paliers, (7 charges et 1 décharge) alors que pour une argile très compressible, ce temps peut être considérablement augmenté.

De plus l'essai CRS permet d'avoir une courbe œdométrique continue. En effet les mesures de  $\sigma'$  et de l'indice des vides  $e$  sont déterminées en continu tout au long de l'essai. L'espace entre les points de la courbe œdométrique ne va donc dépendre que de la fréquence d'auscultation.

La détermination des différents paramètres ( $k$ ,  $c_v$ ,  $C_c$ , par exemple) est donc plus précise car elle peut être calculée sur un nombre de points beaucoup plus important (une dizaine de segments au maximum pour l'essai standard).

L'oedomètre CRS prévoit une méthode simple pour la détermination du point de préconsolidation qui peut s'affranchir des méthodes graphiques traditionnelles. Ce point de préconsolidation est atteint dans l'essai CRS lorsque la courbe montrant l'évolution de la pression interstitielle présente un changement important de pente.

### 8.6.2 *Inconvénients*

L'essai CRS, tout comme l'essai standard, donne des valeurs influencées par l'effet de vitesse pour les sols très compressibles et très sensibles à la consolidation secondaire.

Cet effet induit dans les sols sensibles un décalage de la courbe œdométrique vers les contraintes effectives plus élevées : plus la vitesse est grande, plus la courbe est décalée vers la droite, soit vers de plus grandes contraintes effectives

Un grand soin doit être apporté lors de toutes les phases de réalisation d'un essai œdométrique CRS, en ce qui concerne:

- la préparation de l'éprouvette (carottage)
- sa mise en place dans la cellule œdométrique
- la saturation de l'appareillage
- l'étalonnage des différents capteurs.

## 8.7 Améliorations possibles de l'essai CRS

### 8.7.1 *Fabrication de l'éprouvette*

Un grand soin doit être apporté lors de la fabrication de l'éprouvette, notamment lors de sa conservation et du carottage. Ces opérations sont essentielles pour avoir un bon essai car des négligences lors de ces phases conduisent à des erreurs considérables.

### 8.7.2 *Saturation de l'éprouvette de sol*

La saturation de l'éprouvette d'essai peut être effectuée par circulation d'eau avant la mise en place de la bague dans le dispositif. Cette opération permettrait de ne plus rencontrer les problèmes liés à la non-saturation de l'échantillon, l'eau ayant remplacé les bulles d'air entraînées hors du sol.

C'est une méthode délicate et difficile à contrôler, principalement du point de vue de la maîtrise des contraintes effectives au sein de l'éprouvette, qui sont induites par la circulation de l'eau.

### 8.7.3 *Saturation du matériel et du sol*

La non-saturation des sols ou du matériel (tubulures, cellule œdométrique) peut poser des problèmes car elle fausse les valeurs obtenues avec le capteur de pression. De ce fait, si les valeurs de pression ne sont pas fiables, l'essai CRS ne peut pas être très bon.

L'application d'une contre pression (back pressure) dans l'éprouvette, telle qu'elle est couramment employée dans l'essai triaxial, permettrait de saturer le sol par dissolution des bulles d'air encore présentes. Cette méthode exige l'utilisation d'un dispositif assez compliqué qui n'est pas disponible sur l'appareillage du LMS utilisé lors de cette étude.

#### 8.7.4 Effet de vitesse

La correction de l'effet de vitesse pour les sols très sensibles à la consolidation secondaire pourrait être envisagée. Dans ce cas il s'agirait tout d'abord de déterminer l'importance de cet effet (rapport  $C_{ae}/C_c$  par exemple), puis de calculer une nouvelle courbe œdométrique qui serait décalée par rapport à la courbe d'essai afin de compenser l'effet de la vitesse. Cependant l'application de cette méthode, qui a déjà fait l'objet de quelques publications, nécessiterait encore un investissement important en temps et en recherche, qui sort du cadre de cette étude.

Pour des sols éventuellement sujets à une consolidation secondaire importante, la mise en évidence d'un éventuel effet de la vitesse peut être démontrée par les méthodes suivantes:

- Réalisation de 2 essais CRS avec des taux de déformation très différents (facteur de 10 par exemple), tout en restant dans les limites du mode opératoire en ce qui concerne le développement des pressions interstitielles. La comparaison entre le décalage des deux courbes œdométriques obtenues va montrer si cet effet est significatif. Dans ce cas, il vaut mieux effectuer un essai standard.
- Il est également possible de s'inspirer d'une expérience déjà réalisée par Leroueil et al. (1985), qui consiste à faire varier régulièrement la vitesse de l'oedomètre CRS en cours d'essai. L'application de cette méthode montre (figure 9.12) qu'il est possible de restituer des courbes d'essais effectués à des vitesses différentes et de ce fait mettre en évidence un éventuel effet de la vitesse.

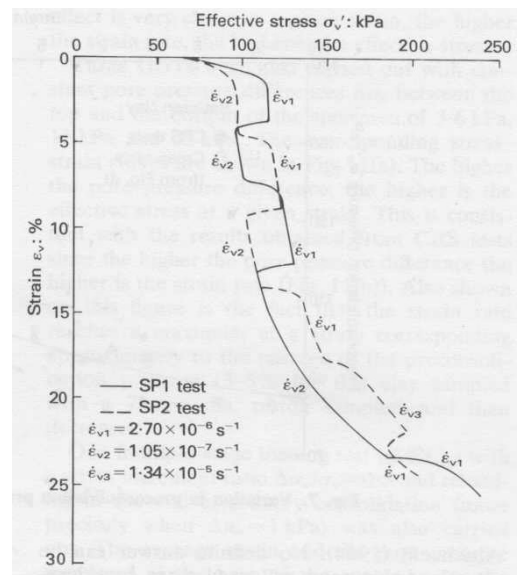


Figure 9.12: Essais CRS effectués à des taux de déformation différents (Leroueil et al. 1985).

## 9 Conclusions

Il existe de nombreuses raisons de vouloir normaliser l'essai CRS. Cet essai présente essentiellement l'avantage d'être beaucoup plus rapide que l'essai classique. De plus, lors de sa réalisation, les mesures sont prises en continu, ce qui permet une détermination plus précise des paramètres œdométriques. Avec l'acquisition automatique des données, le CRS n'est pas plus difficile à utiliser que l'œdomètre incrémental et de nombreuses recherches préalablement effectuées montrent la validité du CRS.

Les essais comparatifs effectués sur des sols argileux, limoneux, voire sableux montrent que les paramètres  $C_c$ ,  $C_s$ ,  $c_v$ ,  $m_v$ ,  $k$  avec le CRS sont tout à fait comparables et très semblables à ceux obtenus avec l'œdomètre incrémental classique.

Avec les sols reconstitués utilisés dans cette étude, quelques difficultés ont été mises en évidence lors de la détermination du point de préconsolidation avec la méthode de Casagrande. Cependant la détermination de la préconsolidation à partir de la courbe de variation de la pression interstitielle au cours de l'essai offre une bonne alternative.

Un soin tout particulier doit être apporté lors de la préparation des éprouvettes pour éviter toute variation des résultats. En outre, une saturation minutieuse et complète des petits conduits et autres parties de la cellule œdométrique CRS doit impérativement être effectuée. Pour des essais plus précis, il faudrait envisager la mise en place d'un dispositif à contre pression.

Une inconnue persiste pour les sols très sensibles à la consolidation secondaire et les sols de consistance très molle à visqueuse. En effet sur ces matériaux, la courbe œdométrique obtenue va être influencée par l'effet de vitesse. Avec les œdomètres standards, ce problème existe aussi et il n'est également pas résolu. Des pistes existent en vue de la correction de cet effet de vitesse et de plus amples recherches, notamment sur la viscosité des sols, doivent encore être entreprises afin de mieux connaître leur comportement lors de leur consolidation.

Au vu des résultats obtenus sur tous ces échantillons intacts, l'œdomètre CRS donne globalement des résultats corrects. De ce fait nous recommandons la rédaction d'une norme VSS pour la réalisation de cet essai en Suisse.

## ANNEXES

Remerciements

Symboles et abréviations

Bibliographie

Equation de la consolidation

Essais de laboratoire

- essais œdométriques incrémentaux
- essais œdométriques CRS

## Remerciements

Nos remerciements vont tout particulièrement à:

- Steve Tschäppät, étudiant à l'EIVD, pour la mise au point et la rédaction du mode opératoire de l'essai CRS. Il a également conçu et réalisé le montage d'un système d'arrêt automatique en cas de surcharge du capteur de force sur l'appareillage. Il a aussi effectué les premiers essais.
- Alice Brax, stagiaire du LCPC qui avait réalisé une grande partie des essais CRS de la première étude. Elle a également rédigé un premier jet du rapport sur l'oedomètre CRS et mis au net les résultats.
- Serge Leroueil, professeur invité au LMS, pour son aide dans l'analyse des résultats, notamment pour son éclairage sur les effets de la vitesse dans les essais oedométriques.
- Alvaro Gutierrez, professeur invité au LMS qui a contribué au développement de la partie théorique de la consolidation dans l'oedomètre CRS.
- Patrick Dubey laborant et les apprentis du LMS pour leurs aides aux stagiaires et la réalisation des essais standards indispensables à la comparaison entre les deux méthodes d'essai.
- Emile Martin, Bachelor of Science HES-SO en génie-civil, diplômé de l'Ecole d'Ingénieurs et d'Architectes de Fribourg (EIAFR) qui effectue son Service Civil au sein du LMS qui a réalisé un grand nombre d'essais sur des échantillons intacts, mis au net les résultats et effectué une première synthèse de ces derniers.
- Aux donateurs d'échantillon intacts, notamment:
  - Dr W. Steiner du bureau B+S à Berne
  - M. J. – L. Amiguet du bureau Geotest au Mont-sur-Lausanne
  - LMS.

## Symboles et abréviations

H ou h	généralement, la hauteur courante de l'échantillon [m]
M	masse [kg ou g]
Ms	masse sèche [kg ou g]
h <sub>s</sub>	hauteur sèche [m]
e	indice des vides [-]
e <sub>0</sub>	indice des vides initial [-]
v	généralement, la vitesse de tassement de l'oedomètre CRS [m/s]
ρ	masse volumique [t/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>eau</sub>	masse volumique de l'eau [t/m <sup>3</sup> ]
γ <sub>eau</sub>	poids volumique de l'eau [kN/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>s</sub>	masse volumique sèche de l'échantillon [t/m <sup>3</sup> ]
w	teneur en eau [%]
Δu	pression interstitielle moyenne dans un échantillon [kPa]
u <sub>b</sub>	pression interstitielle à la base [kPa]
u	pression interstitielle, dépendant du temps t et de la hauteur z [kPa]
σ	contrainte totale appliquée à l'échantillon [kPa]
σ'	contrainte effective dans l'échantillon, dépendant de t et de z [kPa]
σ' <sub>p</sub>	contrainte de préconsolidation [kPa]
K	perméabilité [m/s]
C <sub>c</sub>	indice de compression [-]
C <sub>s</sub>	indice de gonflement [-]
c <sub>v</sub>	coefficient de perméabilité [m <sup>2</sup> /s]
m <sub>v</sub>	module de compressibilité [m <sup>2</sup> /kN]
C <sub>αe</sub>	pente de la partie consolidation secondaire de la courbe log(t)-e

Formules courantes:

$$e = \frac{V_{\text{eau}}}{V_{\text{matière_sèche}}} = \frac{h - h_s}{h_s}$$

$$c_v = \frac{k}{\gamma_{\text{eau}} \cdot m_v} = \frac{k \cdot (1 + e_0) \cdot \Delta\sigma'}{\gamma_{\text{eau}} \cdot \Delta e}$$

$$m_v = \frac{\Delta H_{\infty}}{H} \cdot \frac{1}{\Delta\sigma'}$$

## Bibliographie

- Aboshi H., Yoshikumi H., Maruyama S. (1970), Constant loading rate consolidation test. *Soils and Foundations*, (10). 1, pp. 43-56.
- ASTM (1996), Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils using controlled-strain loading. D4186-89, pp. 515-519.
- ASTM (1990). Standard test method for one-dimensional consolidation properties of soils using controlled-strain loading. D2435-90, pp. 204-213.
- Crawford C.B. (1964), Interpretation of the consolidation test. *Proc. ASCE*, (90), SM5, pp. 87-102.
- Degen W. (1994), Sekundärsetzung in reinen Tonen, *Mitteilungen des Institutes für Geotechnik der ETHZ, Band 206 2/94*.
- Geiser F., (mars 1999), Comportement mécanique d'un limon non saturé. Etude expérimentale et modélisation constitutive. Thèse de doctorat EPFL no 1942, , 244 p.
- Gilboy G. (1936), Improved soil testing methods. *Engineering News Record*, May 21.
- Gorman, Hopkins, Deen, Drnevich (1978), Constant rate of strain and controlled gradient consolidation testing. *Geotechnical Testing Journal*, pp. 3-15,
- Janbu N., Tokheim O., Senneset K. (1981), Consolidation test with continuous loading. *Proc. of the X ICSMFE, Stockholm*, Vol 1, pp. 645-654.
- Laloui L., Hutter K., Vulliet L, (sept. 1998), Thermodynamics of Saturated and Unsaturated Soils. *Biot conference on poromechanics*. Louvain-La-Neuve., pp. 93-97
- Leroueil, Tavenas, Kabbaj, Bouchard (1985), Stress-strain, strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays. *Geotechnique*, vol. 35, N° 32, pp. 159-180,
- Leroueil, Tavenaz, Kabbaj, Bouchard (2002), Characterisation and engineering properties of Natural Soils.
- Lowe J., Jonas E., Obrician V. (1969), Controlled gradient consolidation test. *Proc. ASCE*, (95), SM1, pp. 77-97.
- Lowe J. (Juin 1974), New concepts in consolidation and settlement analysis. GT6, p 574.
- Recordon Ed. (1985), Cours de mécanique des sols, EPFL
- Recordon Ed. (1984), Cours technologie des sols, EPFL
- Sandbækken G., Berre T., Lacasse S. (1884), Oedometer testing at the Norwegian Geotechnical Institute.
- Schmertmann, J. H. (1955), The Undisturbed Consolidation Behavior of Clay. *Transactions*, Vol 120, pp 1201-1233.

Sheahran, Watters (1996), Using an automated rowe cell for constant rate of strain consolidation testing. *GTJODJ*, p 354,

Smith R.E., Wahls H.E. (1969), Consolidation under constant rates of strain. *Proc. ASCE*, (95), SM2, pp. 519-539.

Terzaghi K. (1925), Principles of soil mechanics: IV, Settlement and consolidation of clay. *Engineering News Record*, vol. 95, No 22, p. 874.

Wissa A.E.Z., Christian J.T., Davis E.H., Heiberg S. (1971), Consolidation at constant rate of strain. *Proc. ASCE*, (97), SM10, pp. 1393-1413.

Wissa, Christian, Davis, Heiberg (Octobre1971), Consolidation at constant rate of strain, *ASCE Soil mechanics and foundations division*, p. 8447.

### Equation de la consolidation

Lorsqu'une surcharge est appliquée sur une couche de sol, il y a création d'une surpression interstitielle  $\Delta u$ , variable en fonction de la hauteur  $z$ . Appelons  $h$  la charge hydraulique :

$$h = u / \gamma_w \quad (1)$$

La loi de Bernoulli donne :

$$dh = \frac{1}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial \Delta u}{\partial z} \cdot dz \quad (2)$$

La loi de Darcy est supposée applicable, avec  $v$ , la vitesse d'écoulement de l'eau,  $k$ , la perméabilité et  $i$  le gradient hydraulique  $dh/dz$  :

$$v = k \cdot i = -k \frac{1}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial \Delta u}{\partial z} \quad (3)$$

En introduisant  $V$  le volume et  $v$  la vitesse d'écoulement,

$$dV = S \cdot dv \cdot dt \quad (4)$$

$$dV = S \cdot dz \cdot d(\Delta n) \quad (5)$$

avec  $d(\Delta n)$  la variation de volume de la couche entre le temps  $t_0$  et le temps  $t_{\infty}$ . Soit:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial(\Delta n)}{\partial t} \quad (6)$$

Avec et en substituant:

$$\Delta n = m_v \cdot \Delta \sigma' \quad (7)$$

d'où:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = m_v \cdot \frac{\partial \Delta \sigma'}{\partial t} \quad (8)$$

Avec la loi de Terzaghi,  $\sigma' = \sigma - \Delta u$  et comme, dans ce cas, la charge totale ne varie pas dans le temps:

$$\frac{\partial \Delta \sigma'}{\partial t} = - \frac{\partial \Delta u}{\partial t} \quad (9)$$

ce qui, avec (8), donne :

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -m_v \cdot \frac{\partial \Delta u}{\partial t} \quad (10)$$

En dérivant l'équation (3) et en utilisant (10), on obtient :

$$-k \frac{1}{\gamma_{\text{eau}}} \cdot \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} = -m_v \cdot \frac{\partial \Delta u}{\partial t} \quad (11)$$

d'où l'équation de la consolidation:

$$c_v \cdot \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} = \frac{\partial \Delta u}{\partial t} \quad (12)$$

Avec:

$$c_v = \frac{k}{\gamma_{\text{eau}} \cdot m_v} \quad (13)$$

**Résultats des essais de laboratoire**  
Versuchsergebnisse

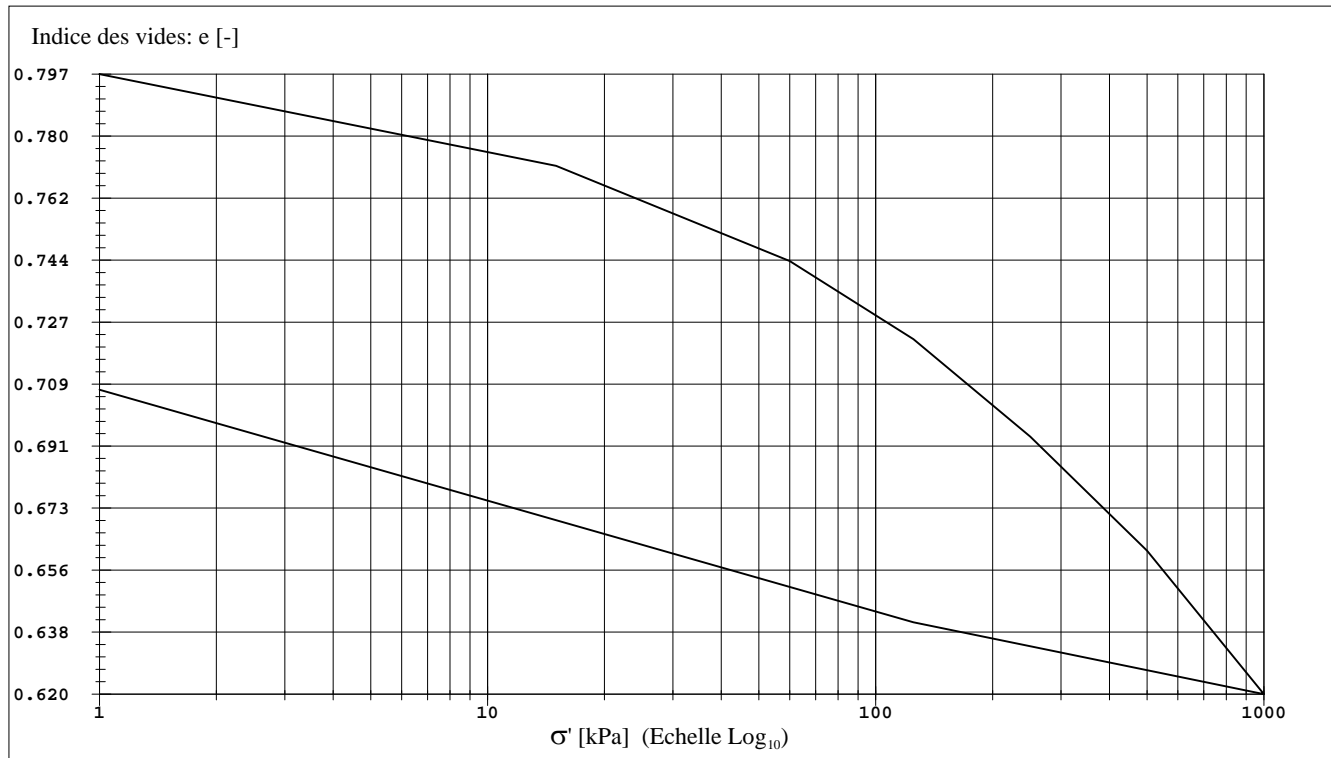
**Essais œdométriques incrémentaux**  
Standard-œdometerversuche



# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
SX102-1	L+A Grand Canal							
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
	20	carotte	Limon sableux		Faible	01.05.08		
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
Chambre humide				18.11.09	Nom	Signature		
				Gst			EM	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.92	60.00	0.80	2.70	1.95	1.95	29.9	29.5	26.2



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.797	0.771	0.744	0.722	0.694	0.661	0.620	0.641	0.707		[-]
$E_{oed} * 10^3$	0.96	2.93	5.08	7.74	13.00	20.28	69.08	3.07			[kPa]
Pente	0.022	0.045	0.070	0.092	0.108	0.136	0.023	0.032			[-]
$C_v$	----	----	----	----	----	----	----	----			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	----	----	----	----	----	----	----	----			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^3$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

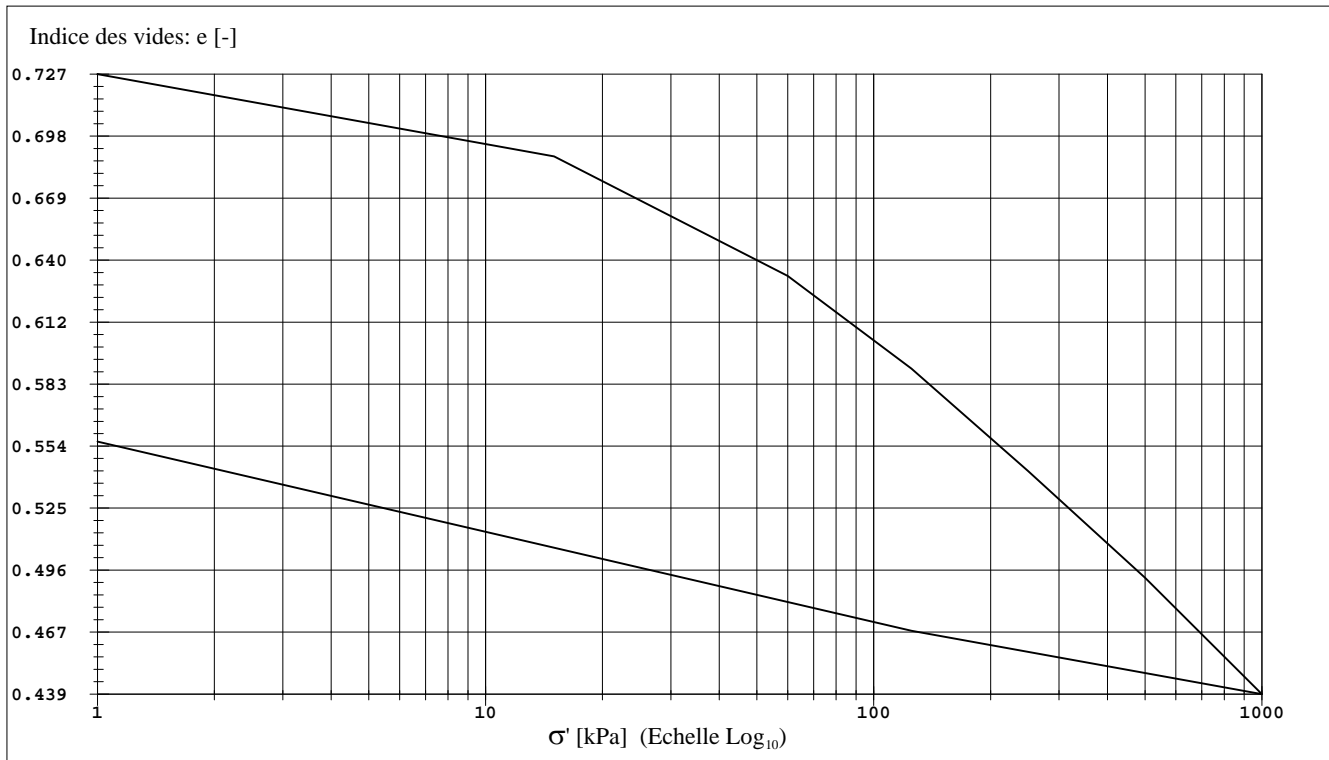
Observations:



# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
SX102-2	28764							
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
F1	18.65-18.9	Carotte	Limon argileux		Faible			
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
Chambre humide				18.11.09	Nom	Signature		
				Gst			EM	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.78	60.00	0.73	2.70	2.00	1.98	28.0	26.9	20.6



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.727	0.689	0.633	0.590	0.542	0.493	0.439	0.468	0.556		[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	0.63	1.37	2.47	4.16	7.78	13.80	42.75	2.07			[kPa]
Pente	0.033	0.092	0.135	0.159	0.165	0.180	0.033	0.042			[-]
$C_v$	1.15E-07	1.48E-07	1.71E-07	2.42E-07	2.89E-07	3.33E-07	2.82E-07	3.18E-08			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	1.79E-09	1.06E-09	6.79E-10	5.70E-10	3.64E-10	2.37E-10	6.46E-11	1.51E-10			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

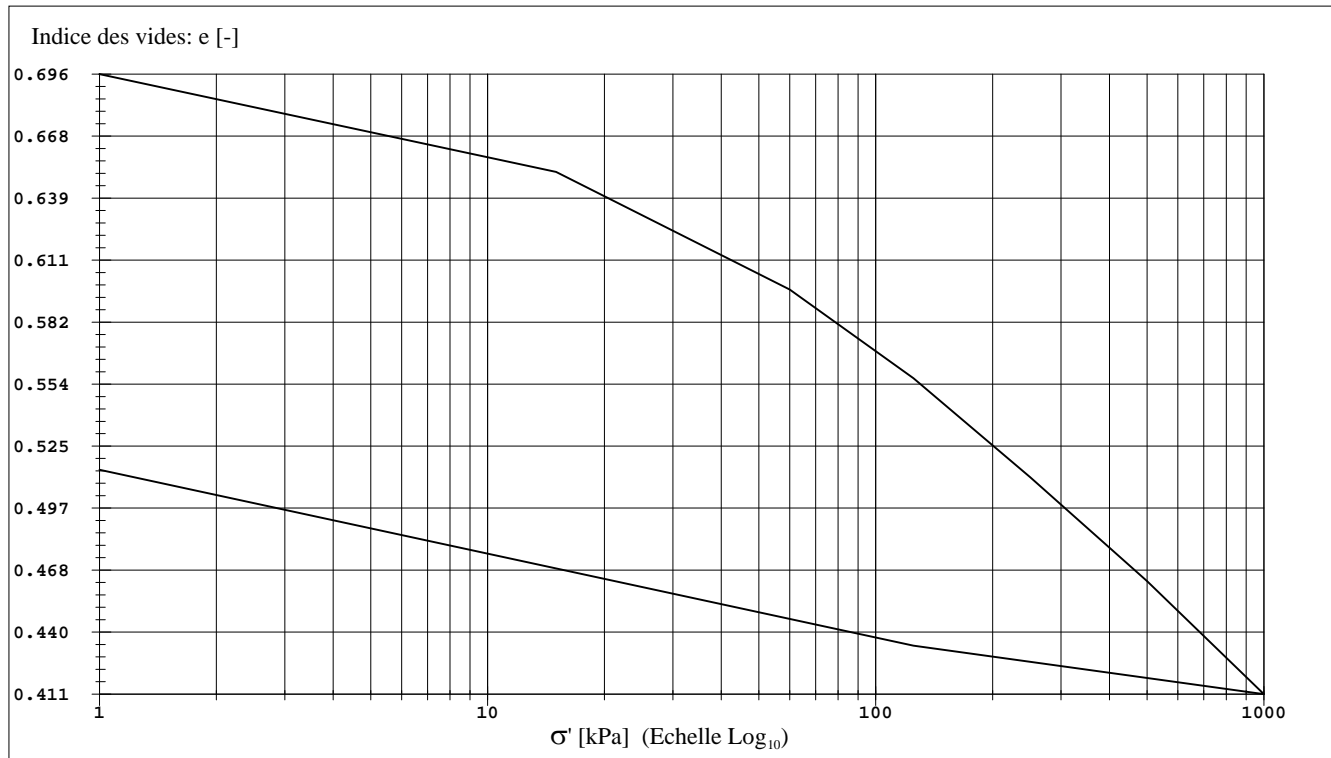
Observations:



# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom	Adresse		
SX102-3	28768							
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
F2	14.2-14.5	Carotte	Limon argileux		Faible			
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
				18.11.09	Nom	Signature		
					Gst		EM	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.77	60.00	0.70	2.70	2.02	2.00	26.8	25.9	19.1



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.696	0.651	0.597	0.557	0.511	0.463	0.411	0.434	0.515		[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	0.53	1.37	2.55	4.27	7.92	14.09	55.36	2.20			[kPa]
Pente	0.038	0.090	0.128	0.151	0.159	0.173	0.025	0.039			[-]
$C_v$	1.40E-07	1.96E-07	2.02E-07	2.52E-07	2.92E-07	1.51E-07	3.31E-07	3.23E-08			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	2.60E-09	1.40E-09	7.76E-10	5.78E-10	3.62E-10	1.05E-10	5.86E-11	1.44E-10			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

Observations:

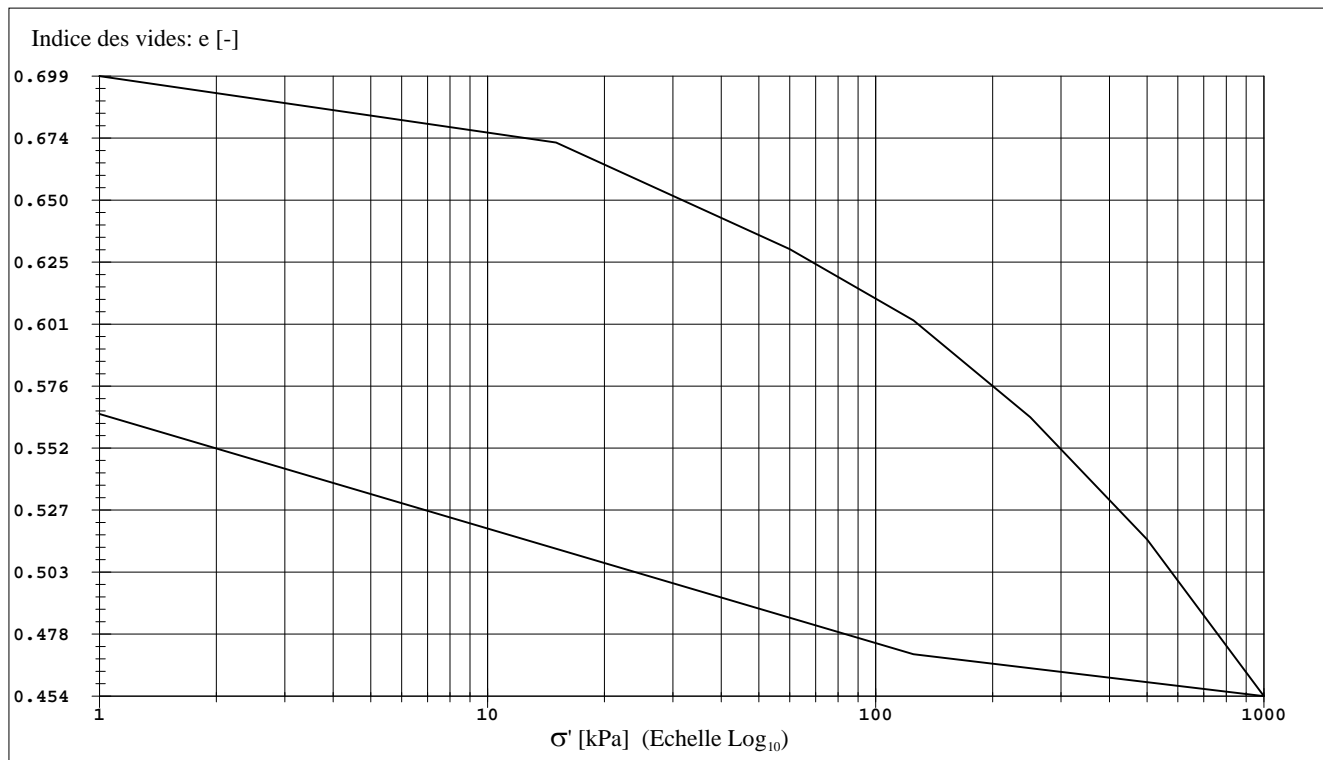


# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

## CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
SX102-4	C0813							
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
CH24	20.43-20.3	Carotte	Limon + graviers		fort			
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
Chambre humide				25.11.09	Nom	Signature		
				Gst			EM	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.92	60.00	0.69	2.70	1.94	2.01	21.1	25.5	20.9



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.699	0.672	0.630	0.602	0.564	0.516	0.454	0.470	0.565		[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	0.91	1.79	3.77	5.23	8.10	12.24	76.86	1.92			[kPa]
Pente	0.022	0.070	0.088	0.127	0.160	0.206	0.018	0.045			[-]
$C_v$	----	----	----	----	----	----	----	1.81E-07			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	----	----	----	----	----	----	----	9.25E-10			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

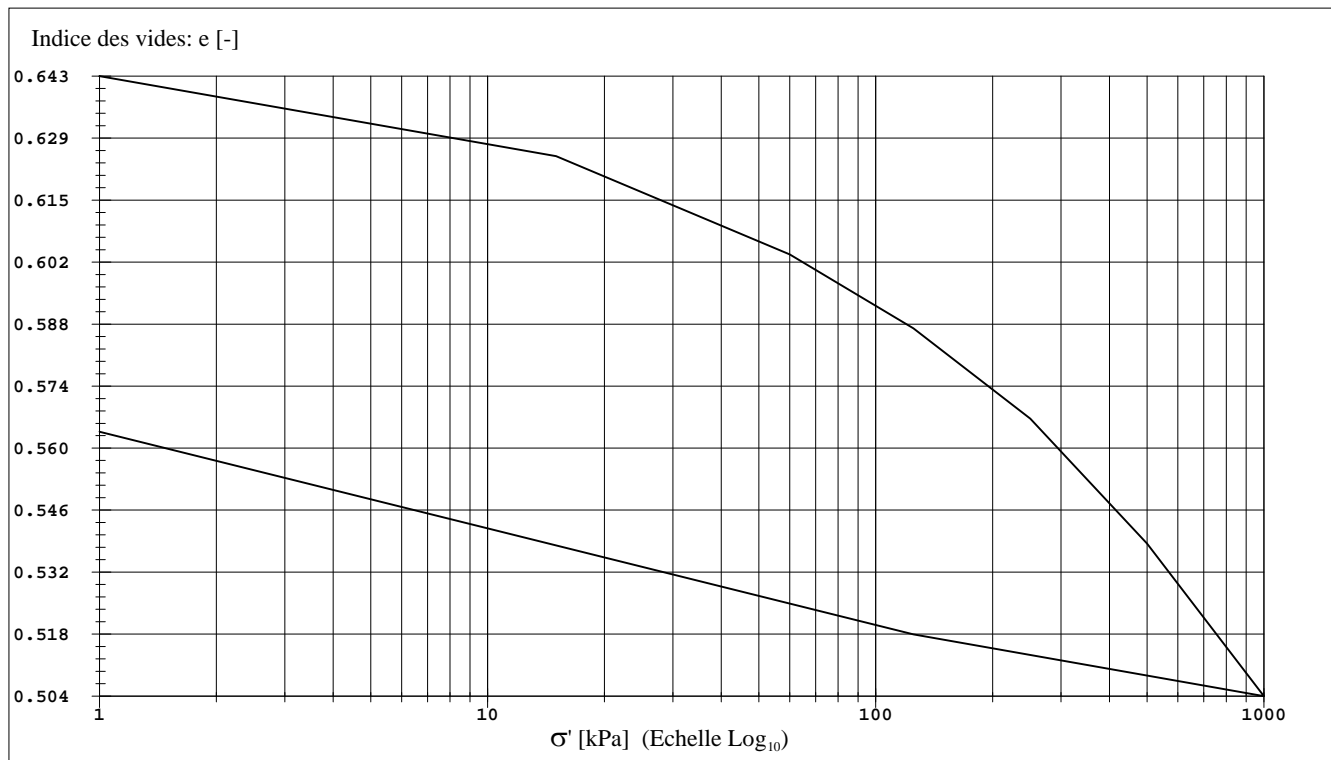
Observations:



# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
SX102-5	Casa Grand							
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
CH19	21.95-22.1	carotte	Limon peu sableux		faible			
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
Chambre humide				30.11.09	Nom	Signature		
				Gst			EM	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat init}$ [%]	$w_{sat final}$ [%]
14.86	60.00	0.64	2.70	2.01	2.03	22.7	23.8	20.9



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.643	0.625	0.603	0.587	0.567	0.539	0.504	0.518	0.564		[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	1.28	3.33	6.30	9.83	13.99	22.55	95.20	4.15			[kPa]
Pente	0.015	0.037	0.052	0.067	0.093	0.113	0.015	0.022			[-]
$C_v$	----	----	----	2.59E-09	----	----	----	----			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	----	----	----	2.58E-12	----	----	----	----			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

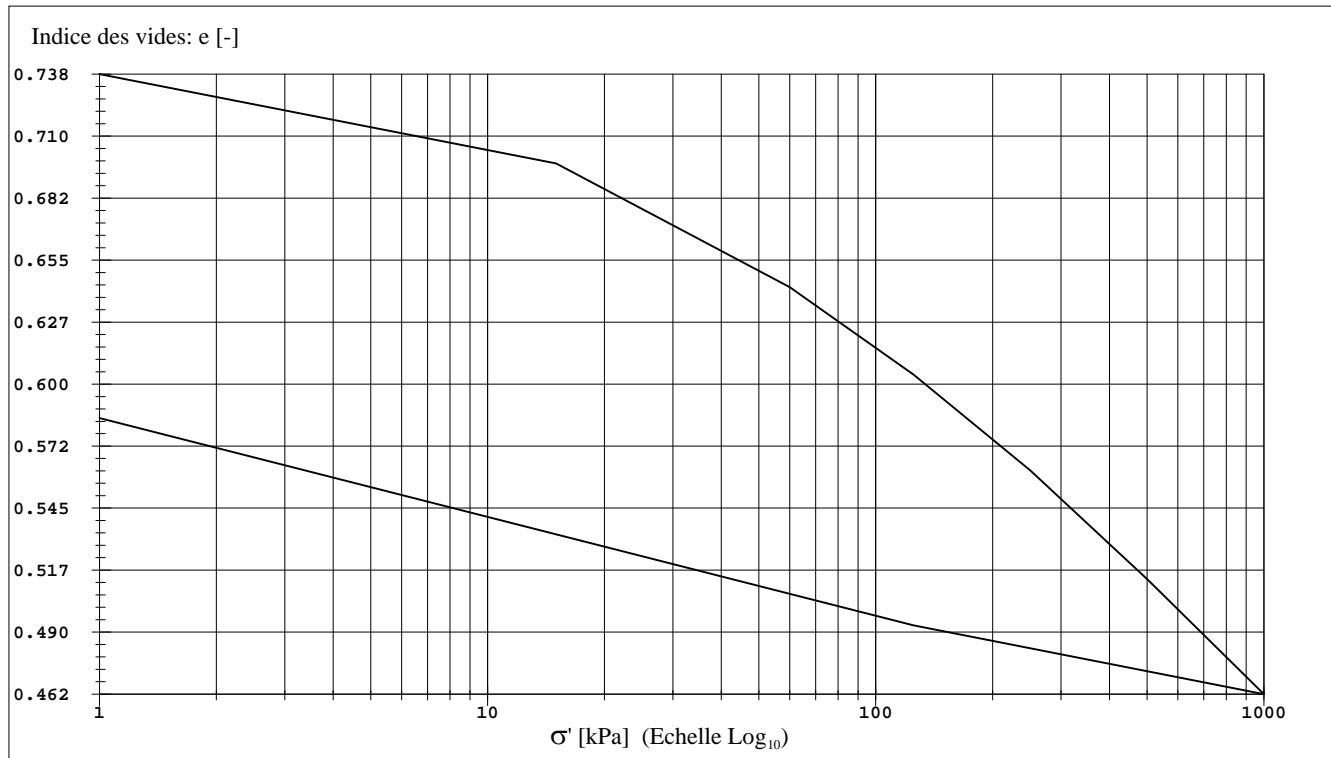
Observations:



# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
SX102-6	Ech 4 soud							
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
	15.6-16.3	Carotte			Faible	03.02.10		
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
Chambre froide				08.12.09	Nom	Signature		
				Gst			EM	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.83	60.00	0.74	2.70	1.99	1.98	28.5	27.4	21.7



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.738	0.698	0.643	0.604	0.561	0.513	0.462	0.493	0.585		[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	0.61	1.39	2.75	4.71	8.08	14.79	41.84	2.01			[kPa]
Pente	0.034	0.091	0.122	0.141	0.160	0.170	0.034	0.044			[-]
$C_v$	3.86E-08	7.00E-08	9.46E-08	1.05E-07	1.89E-07	2.06E-06	2.31E-07	1.71E-08			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	6.18E-10	4.94E-10	3.38E-10	2.18E-10	2.29E-10	1.36E-09	5.42E-11	8.36E-11			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

Observations:

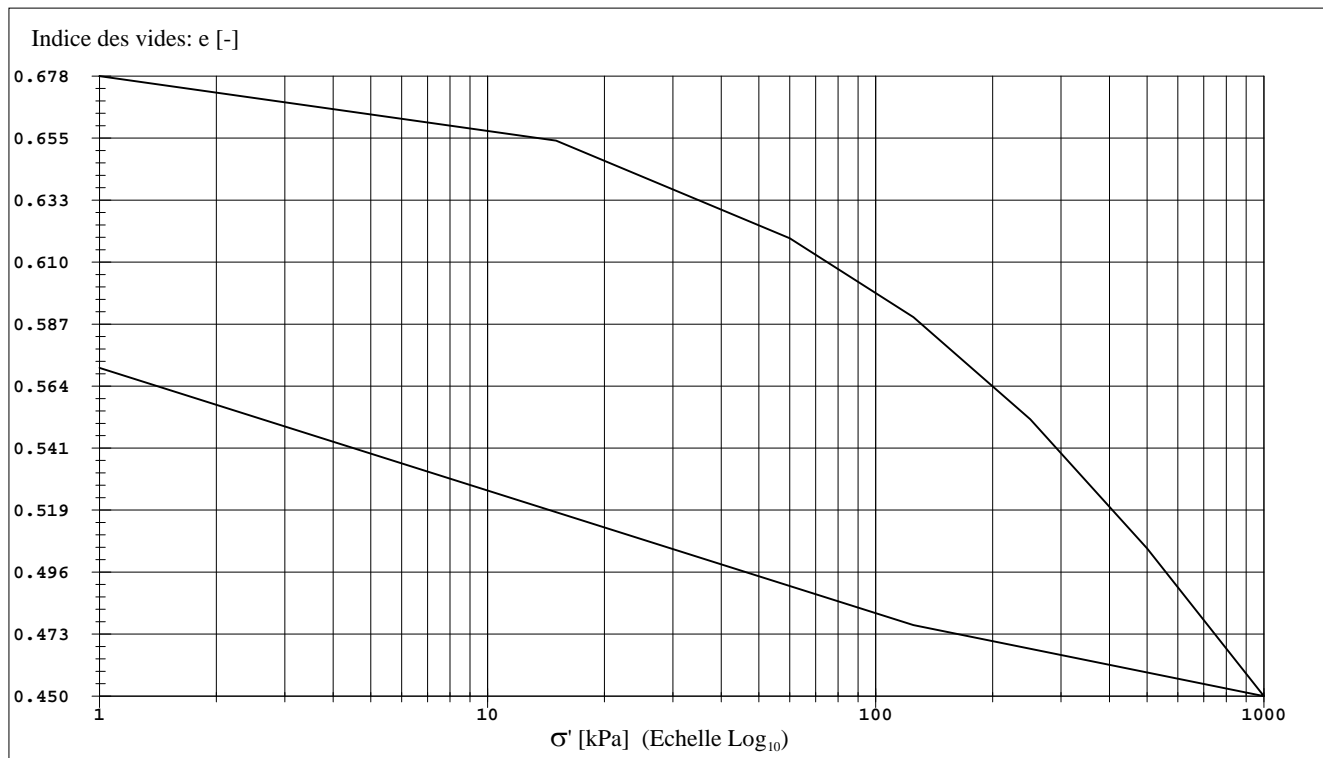


# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL

## CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
SX102-7								
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
	8.4-8.7	Carotte	Limon argileux		Faible			
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
Chambre humide				08.12.09	Nom	Signature		
				Gst			EM	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.79	60.00	0.68	2.70	2.02	2.01	25.5	25.1	21.1



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.678	0.654	0.619	0.590	0.552	0.505	0.450	0.476	0.571		[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	0.99	2.08	3.63	5.30	8.18	13.86	48.56	1.94			[kPa]
Pente	0.020	0.060	0.091	0.124	0.158	0.180	0.029	0.045			[-]
$C_v$	1.29E-07	2.18E-07	2.36E-07	2.95E-07	2.87E-07	3.00E-07	2.52E-07	2.42E-08			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	1.27E-09	1.03E-09	6.38E-10	5.46E-10	3.45E-10	2.13E-10	5.09E-11	1.22E-10			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

Observations:

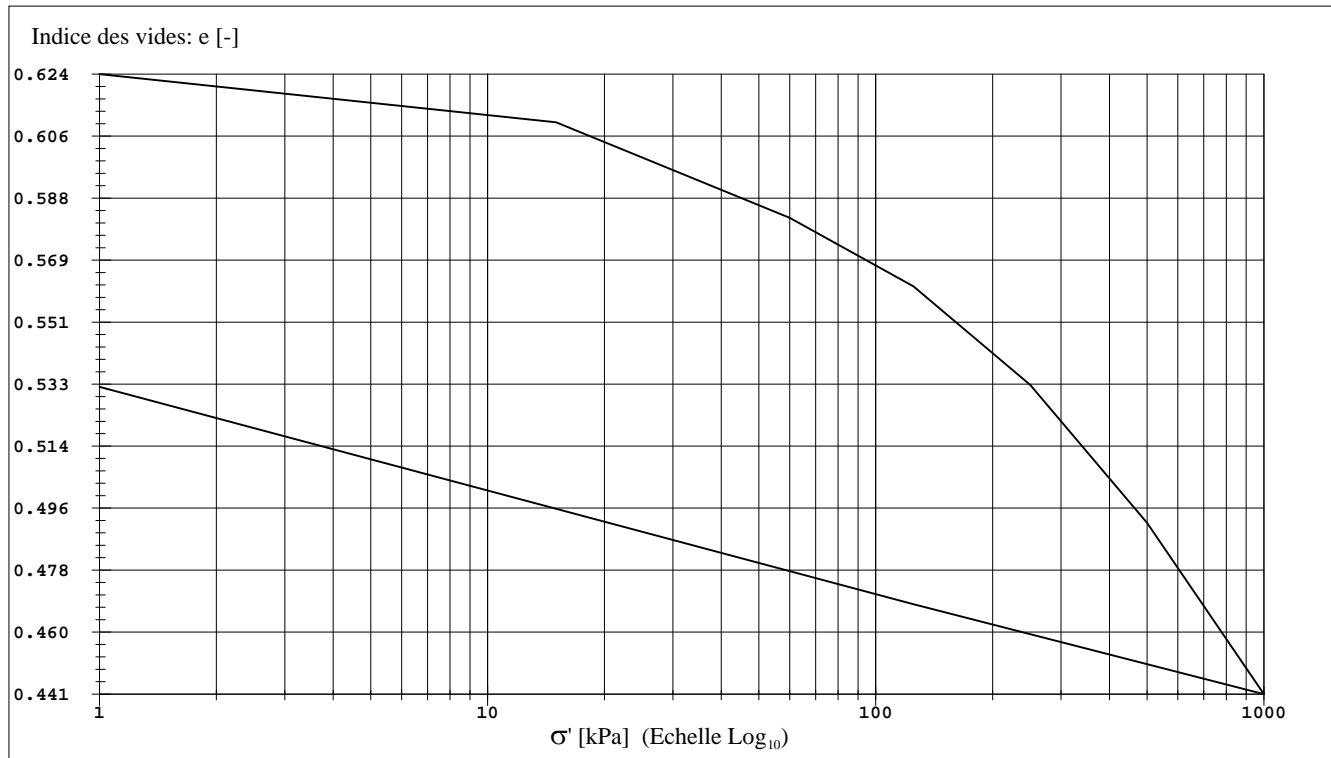
Ce protocole ne peut être reproduit partiellement et son contenu ne concerne que l'échantillon (éprouvette) testé.  
 En outre, il peut faire partie d'une série d'essais, voir page: "Rapport d'essais"



# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
SX102-8	Lutry 09-603 Gedina							
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
Ech 1b		Motte	Limon sableux hétér		Moyen			
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
Chambre humide				08.12.09	Nom	Signature		
				Gst			EM	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.96	60.00	0.62	2.70	2.01	2.05	20.8	22.9	19.7



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.624	0.610	0.582	0.561	0.532	0.492	0.441	0.468	0.532		[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	1.60	2.57	5.08	6.72	9.42	14.78	47.58	2.84			[kPa]
Pente	0.012	0.047	0.063	0.096	0.135	0.168	0.029	0.031			[-]
$C_v$	----	----	2.26E-07	2.88E-07	2.82E-07	2.89E-07	1.62E-07	2.26E-08			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	----	----	4.36E-10	4.21E-10	2.93E-10	1.92E-10	3.34E-11	7.81E-11			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

Observations:



# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
SX102-9	S6015 - Collège de Renens							
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
	3.50-3.90	Motte	Argile		Faible			
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
Chambre humide		carotte		07.01.10	Nom	Signature		
							EM	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.72	60.00	0.78	2.70	1.99	1.96	30.7	28.8	21.5



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.764	0.708	0.649	0.606	0.559	0.510	0.445	0.480	0.581		[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	0.45	1.29	2.54	4.21	7.97	11.68	36.14	1.82			[kPa]
Pente	0.047	0.099	0.133	0.158	0.162	0.215	0.039	0.048			[-]
$C_v$	3.77E-08	----	----	----	----	----	----	----			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	8.31E-10	----	----	----	----	----	----	----			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

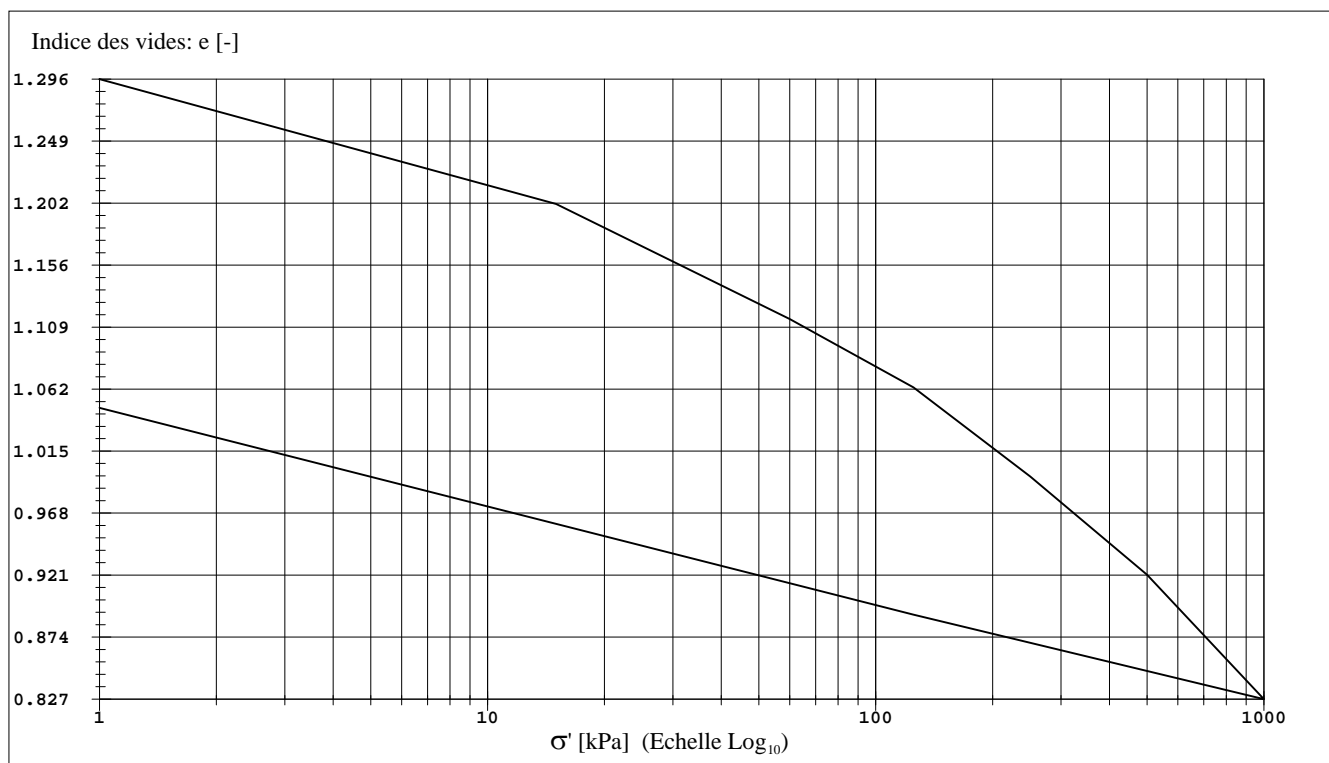
Observations:



# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
S6209-26	Deposito materiale di risulta Sigirino				Stump Fora Tec SA		6512 Giubiasco	
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
B09-11 IND2	19.0-19.7	Tube paroi m.	limon peu argileux		moyen	18.11.09		
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
Standard		Standard		06.01.10	Nom	Signature		
					G. Gruaz		PD	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.51	60.00	1.34	2.82	1.80	1.77	50.0	47.8	37.2



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	1.296	1.202	1.115	1.063	0.996	0.921	0.827	0.891	1.048		[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	0.34	1.14	2.65	3.83	6.71	10.21	25.02	1.50			[kPa]
Pente	0.080	0.145	0.162	0.224	0.247	0.312	0.071	0.075			[-]
$C_v$	2.02E-07	4.34E-07	----	----	4.85E-07	----	4.18E-07	1.19E-07			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	5.82E-09	3.74E-09	----	----	7.10E-10	----	1.64E-10	7.80E-10			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

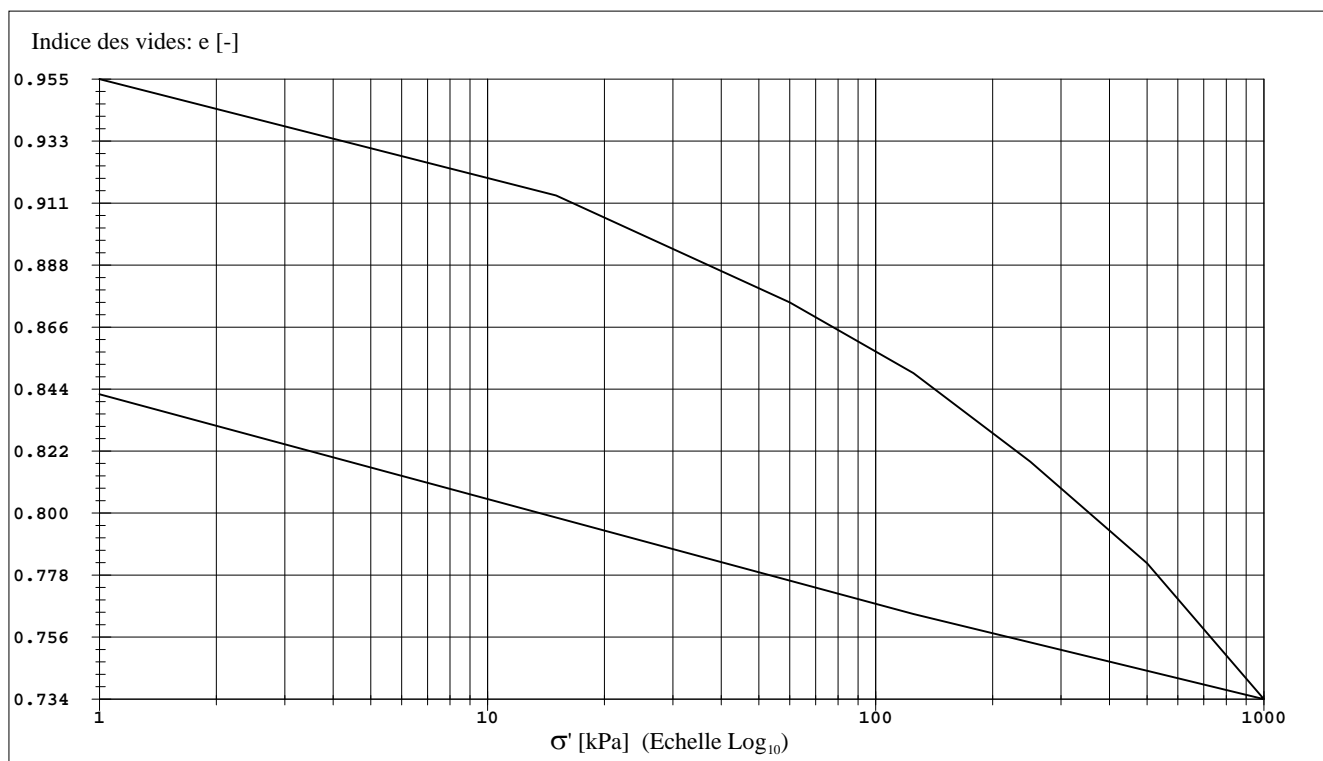
Observations:



# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
S6209-13	Deposito materiale di risulta Sigirino				Stump Fora Tec SA		6512 Giubiasco	
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
B09-09 IND1	16.0-16.4	Tube paroi m.	Limon peu argileux		faible	18.11.09		
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
Standard		Standard		06.01.10	Nom	Signature		
					G. Gruaz		PD	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.53	60.00	0.96	2.77	1.93	1.90	36.8	34.8	30.4



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.955	0.913	0.875	0.850	0.819	0.782	0.734	0.764	0.843		[-]
$E_{oed} * 10^3$	0.66	2.27	4.84	7.35	12.58	18.45	50.16	2.80			[kPa]
Pente	0.035	0.063	0.079	0.104	0.120	0.161	0.033	0.037			[-]
$C_v$	6.01E-07	7.51E-07	7.56E-07	7.65E-07	7.07E-07	----	----	3.38E-07			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	8.93E-09	3.25E-09	1.53E-09	1.02E-09	5.51E-10	----	----	1.18E-09			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^3$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

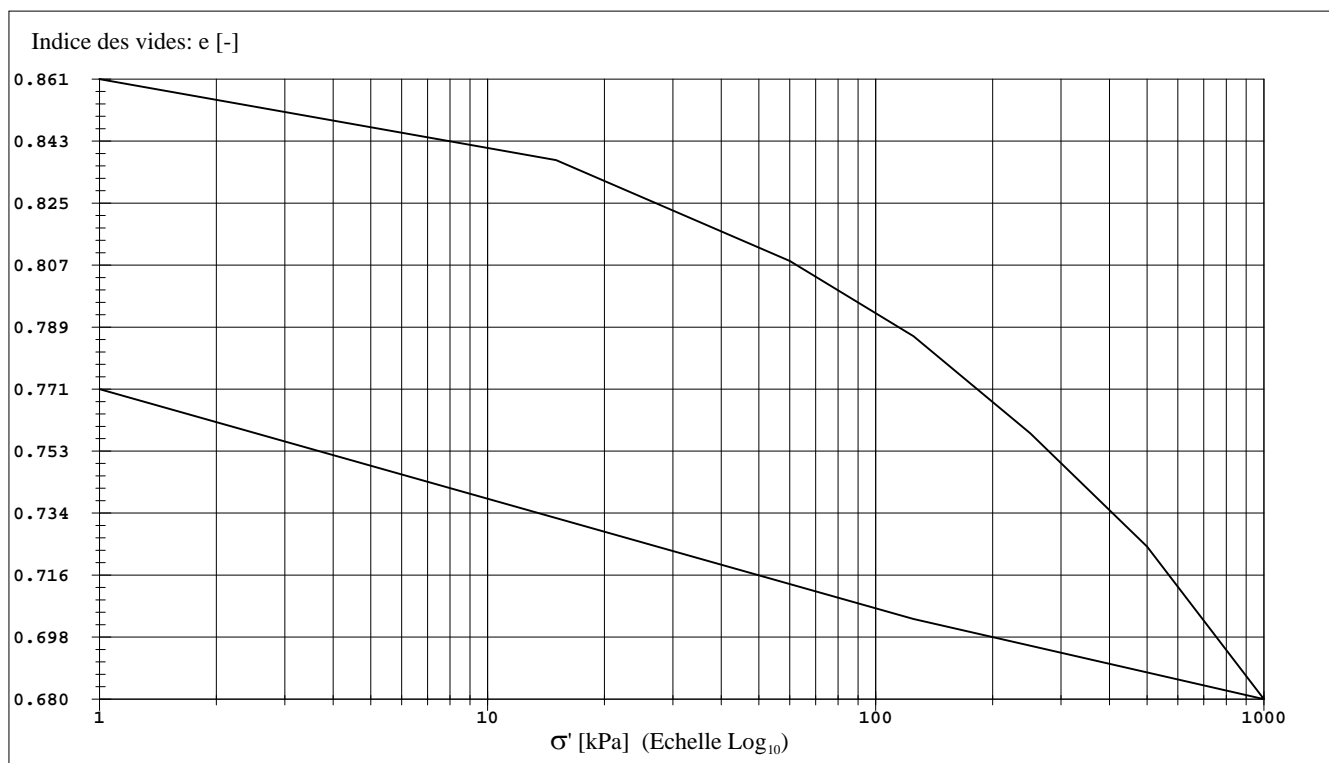
Observations:



# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
S6209-14	Deposito materiale di risulta Sigirino				Stump Fora Tec SA		6512 Giubiasco	
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
B09-09 IND2	19.3-19.9	Tube paroi m.	Limon peu argileux		faible	18.11.09		
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
Standard		Standard		05.01.10	Nom	Signature		
					G. Gruaz		PD	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.79	60.00	0.86	2.76	1.95	1.95	31.6	31.1	27.9



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.861	0.837	0.808	0.786	0.758	0.725	0.680	0.704	0.771		[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	1.10	2.81	5.35	7.87	13.28	19.39	62.88	3.15			[kPa]
Pente	0.020	0.049	0.069	0.094	0.110	0.148	0.026	0.032			[-]
$C_v$	----	----	----	9.97E-07	8.56E-07	----	----	3.26E-07			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	----	----	----	1.24E-09	6.32E-10	----	----	1.01E-09			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

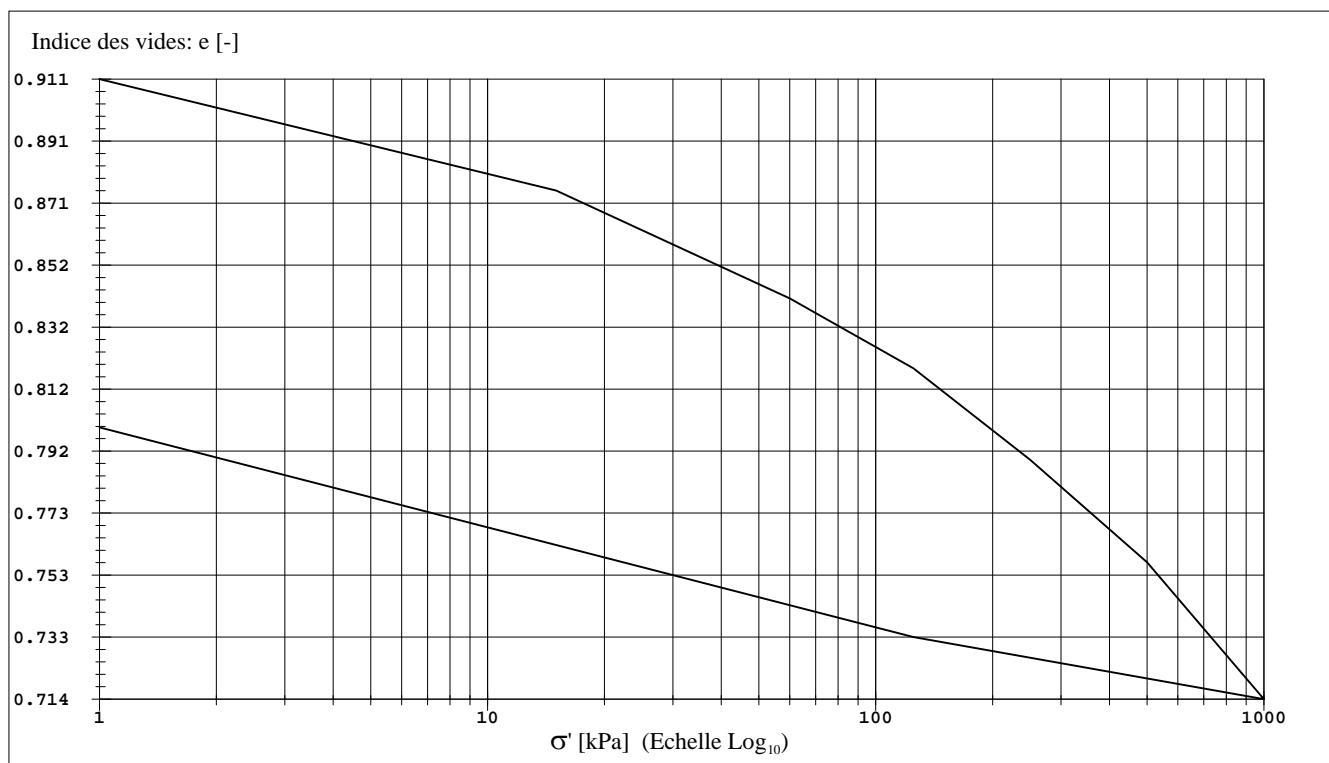
Observations:



# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
S6209-25	Deposito materiale di risulta Sigirino				Stump Fora Tec SA		6512 Giubiasco	
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
B09-11 IND1	13.5-14.2	Tube paroi m.	imon peu sableux		moyen	18.11.09		
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
Standard		Standard		06.01.10	Nom	Signature		
					G. Gruaz		PD	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat init}$ [%]	$w_{sat final}$ [%]
14.50	60.00	0.91	2.78	1.93	1.93	32.3	32.7	28.7



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.911	0.875	0.841	0.819	0.790	0.757	0.714	0.733	0.800		[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	0.76	2.46	5.37	7.83	13.74	20.19	76.02	3.23			[kPa]
Pente	0.030	0.057	0.070	0.096	0.108	0.145	0.022	0.032			[-]
$C_v$	----	----	----	----	----	----	----	----			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	----	----	----	----	----	----	----	----			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

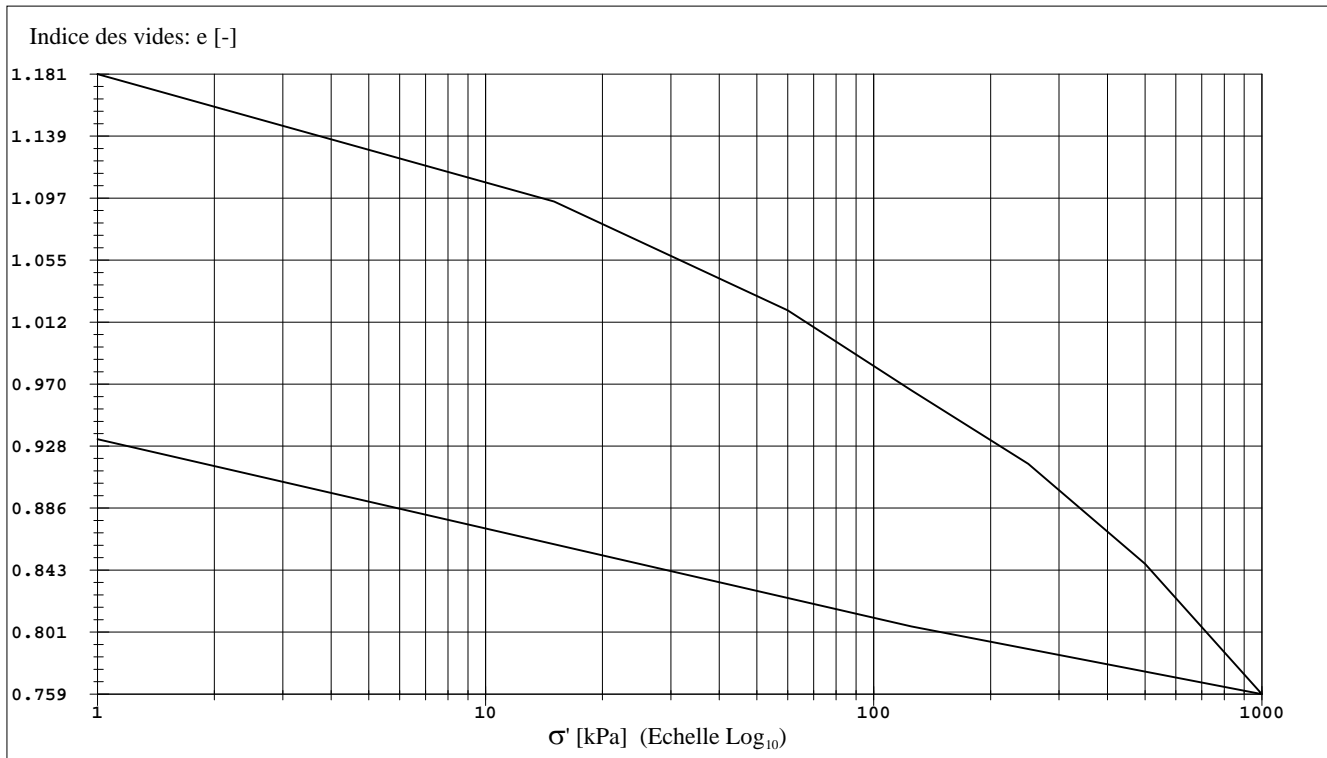
Observations:



# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
S6209-38	Deposito materiale di risulta Sigirino				Stump Fora Tec SA		6512 Giubiasco	
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
B09-12 IND2	18.7-19.3	Tube paroi m.	limon peu argileux		moyen	18.11.09		
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
Standard		Standard		06.01.10	Nom	Signature		
					G. Gruaz		PD	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.62	60.00	1.25	2.81	1.82	1.80	45.8	44.5	33.2



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	1.181	1.094	1.020	0.966	0.916	0.848	0.759	0.805	0.933		[-]
$E_{oed} * 10^3$	0.35	1.27	2.41	4.91	7.03	10.40	33.38	1.75			[kPa]
Pente	0.074	0.123	0.171	0.166	0.226	0.295	0.051	0.061			[-]
$C_v$	3.60E-07	----	----	----	----	1.10E-07	4.58E-07	8.60E-08			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	1.01E-08	----	----	----	----	1.03E-10	1.35E-10	4.81E-10			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^3$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

Observations:

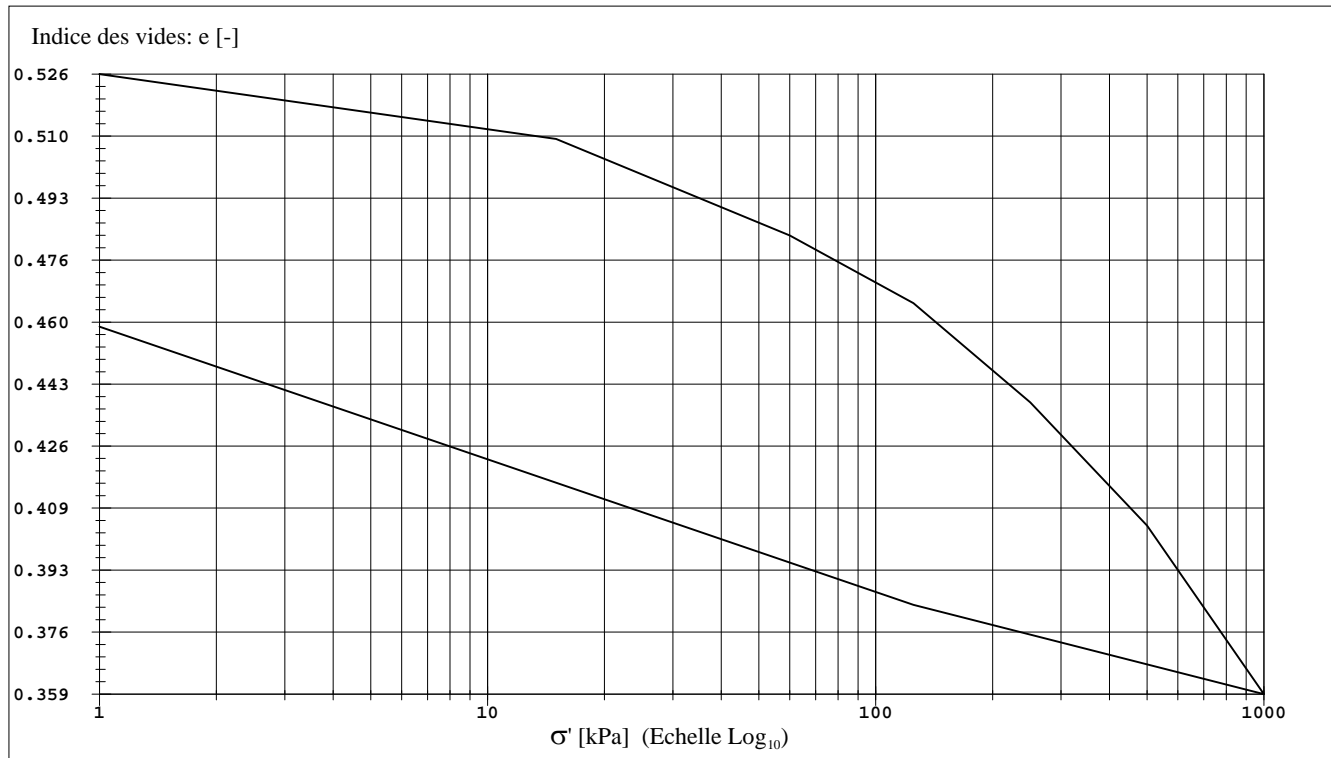


# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

STS 224

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
SX102-2	Rennaz							
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
FS 28775	18.25-18.5		L-a		faible			
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
		Standard		28.01.09	Nom	Signature		
					G. Steinmann		JG	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.63	60.00	0.52	2.70	2.14	2.12	20.8	19.4	17.0



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.526	0.509	0.483	0.465	0.438	0.405	0.359	0.383	0.458		[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	1.22	2.61	5.27	6.85	10.81	15.44	49.34	2.29			[kPa]
Pente	0.015	0.043	0.057	0.089	0.110	0.151	0.027	0.036			[-]
$C_v$	----	5.22E-07	3.25E-11	----	----	----	----	8.90E-08			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	----	1.97E-09	6.04E-14	----	----	----	----	3.82E-10			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

Observations: Essai comparatif pour CRS

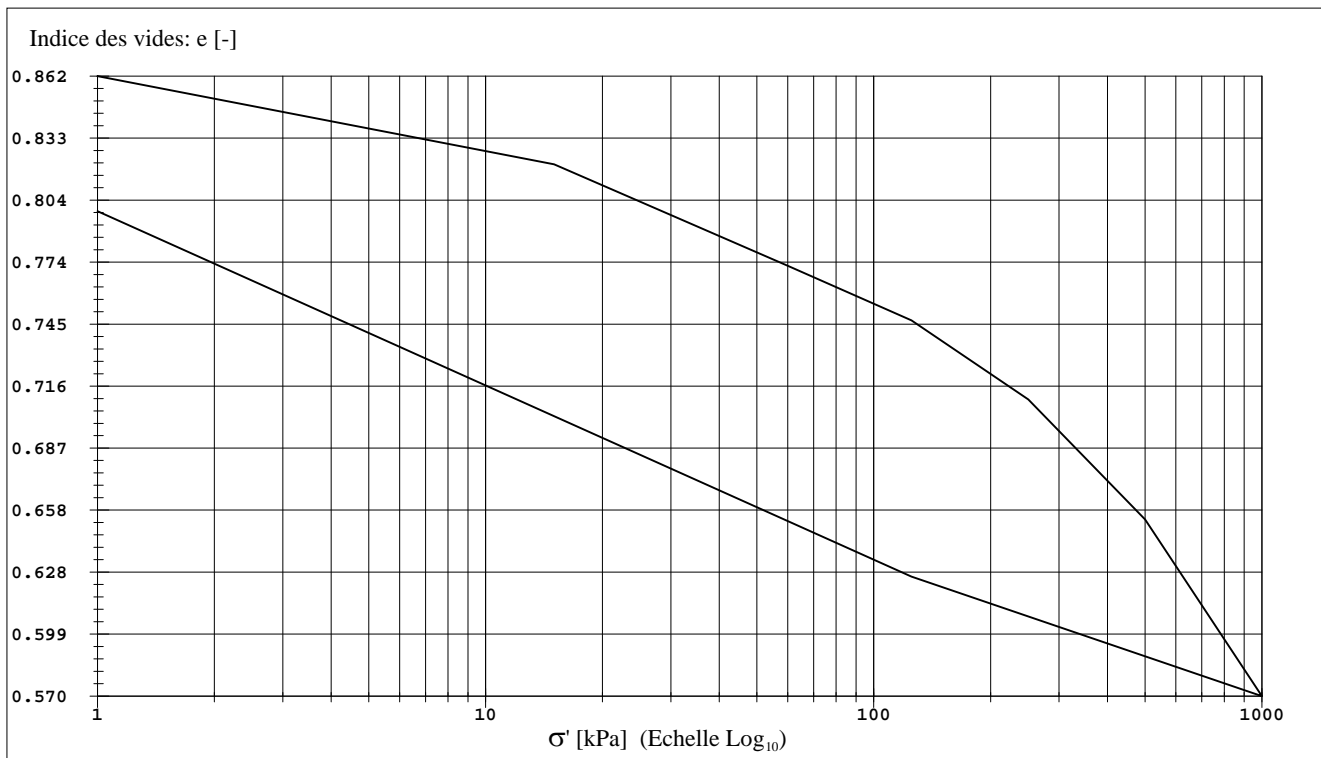


# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

STS 224

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
SX102-1	Jordi AG Mechenhaus Belp							
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
2764/2	25.10-25.3		Argile		faible			
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
		Standard		28.01.09	Nom	Signature		
					G. Steinmann		JG	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.69	60.00	0.82	2.70	1.95	1.94	30.9	30.2	29.6



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.862	0.820	0.773	0.747	0.710	0.653	0.570	0.626	0.798		[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	0.63	1.71	4.47	5.87	7.56	9.93	24.40	1.17			[kPa]
Pente	0.035	0.079	0.081	0.123	0.188	0.277	0.062	0.082			[-]
$C_v$	4.32E-08	1.20E-07	2.11E-07	3.48E-07	3.22E-07	2.67E-07	2.39E-07	1.60E-08			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	6.75E-10	6.88E-10	4.64E-10	5.81E-10	4.18E-10	2.64E-10	9.63E-11	1.34E-10			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

Observations: Essai comparatif pour CRS

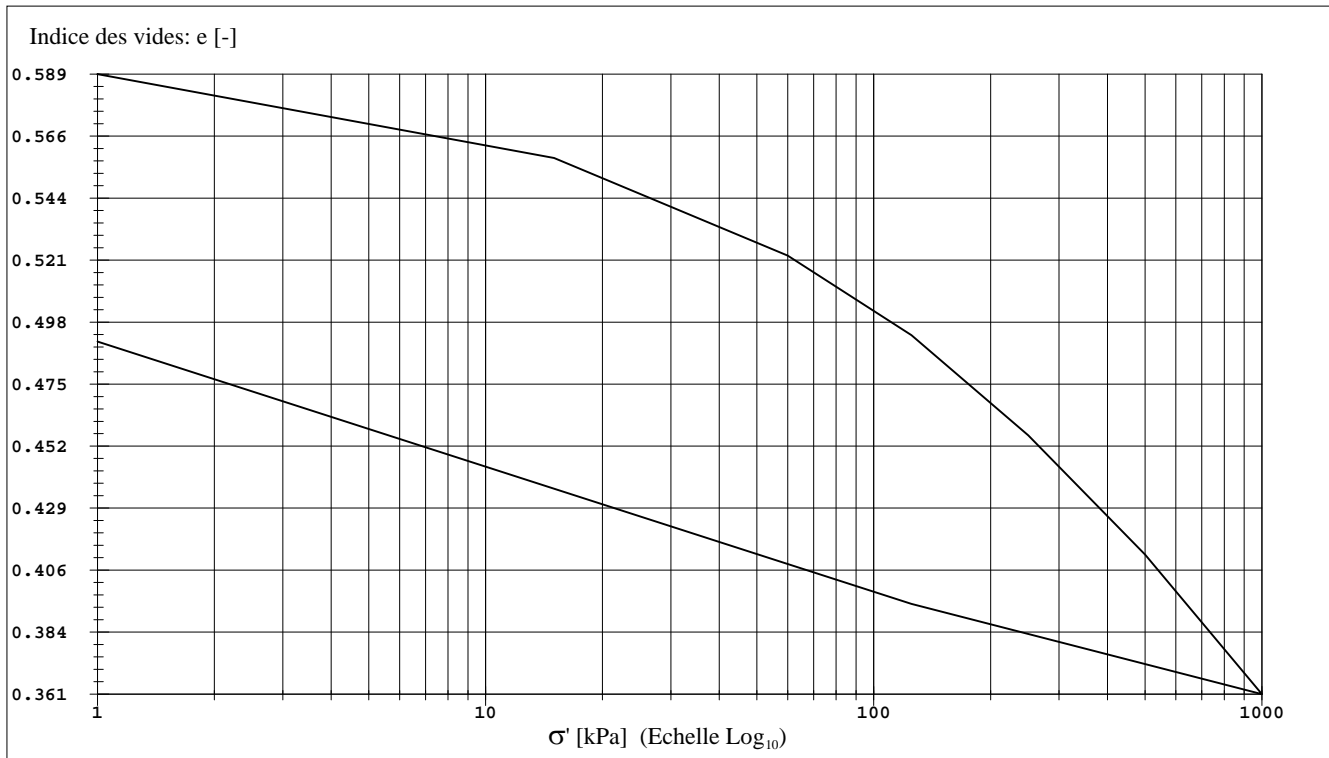


# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

STS 224

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
SX102-3	Genève							
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
	6.90-7.10		A--g--l		faible			
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
					Nom	Signature		
		Standard		05.02.09	G. Steinmann			PD
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.73	60.00	0.59	2.70	2.09	2.07	23.1	21.8	18.2



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.589	0.558	0.522	0.493	0.456	0.412	0.361	0.394	0.491		[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	0.72	1.95	3.37	5.05	8.28	13.73	35.78	1.79			[kPa]
Pente	0.026	0.060	0.092	0.123	0.146	0.171	0.037	0.046			[-]
$C_v$	2.63E-08	5.60E-08	7.05E-08	1.00E-07	1.41E-07	1.84E-07	1.45E-07	1.02E-08			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	3.58E-10	2.82E-10	2.05E-10	1.94E-10	1.68E-10	1.32E-10	3.98E-11	5.58E-11			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

Observations: Essai comparatif pour CRS

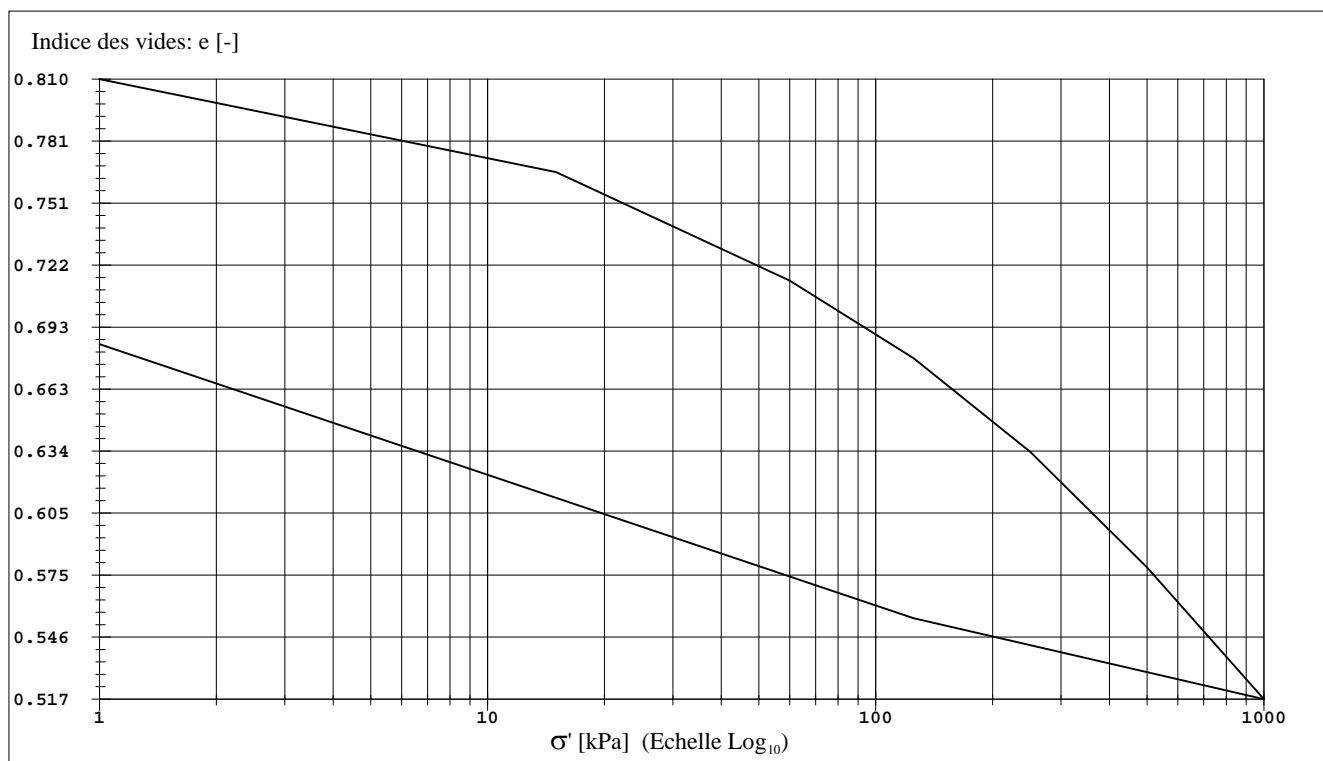


# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

STS 224

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
SX102-4	Belp (essai 9)							
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
	36.60-36.8		A+1		faible			
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
					Nom	Signature		
		Standard		11.02.09	G. Steinmann		JG	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.93	60.00	0.81	2.70	1.95	1.94	31.1	30.1	25.4



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.810	0.766	0.715	0.678	0.634	0.579	0.517	0.555	0.684		[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	0.58	1.55	3.04	4.73	7.46	12.69	34.64	1.49			[kPa]
Pente	0.037	0.085	0.115	0.147	0.182	0.207	0.042	0.062			[-]
$C_v$	4.69E-08	1.01E-07	1.45E-07	1.88E-07	2.42E-07	2.86E-07	2.65E-07	1.81E-08			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	7.97E-10	6.41E-10	4.67E-10	3.90E-10	3.18E-10	2.21E-10	7.50E-11	1.19E-10			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

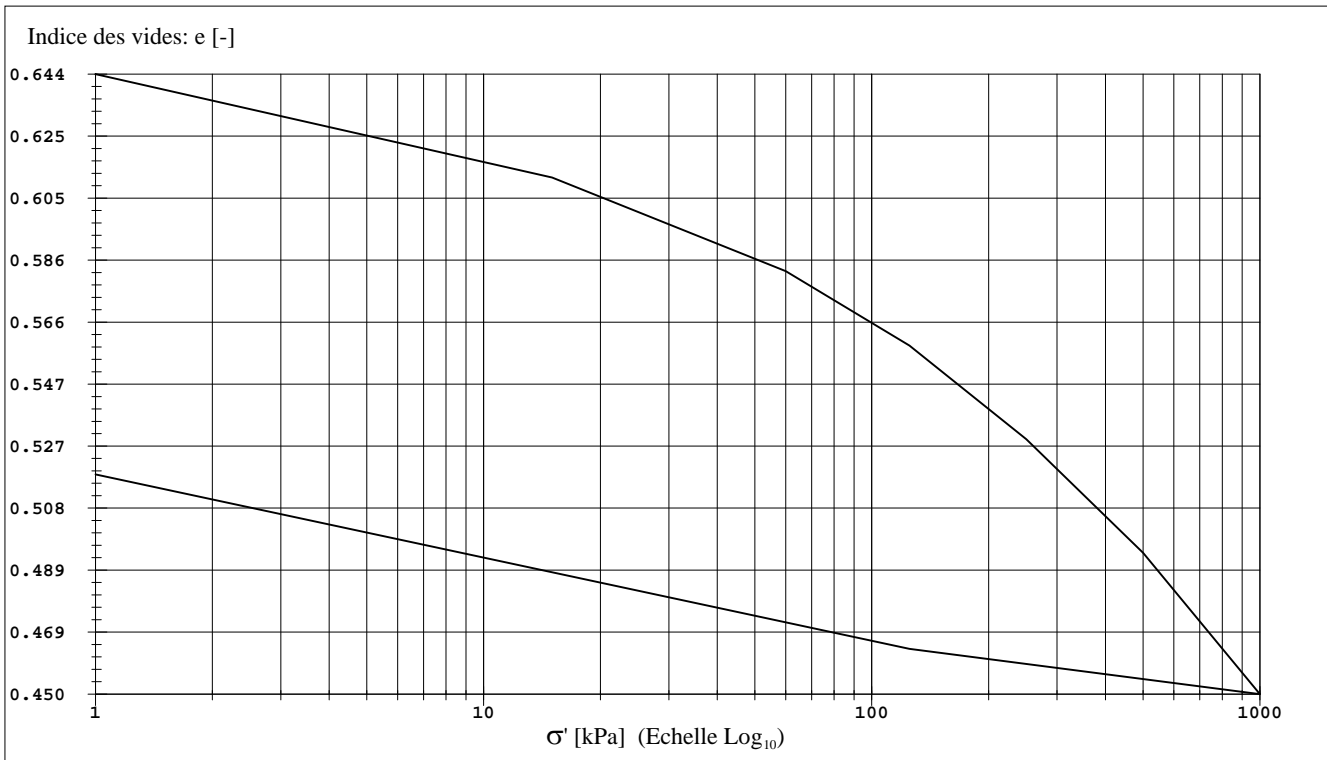
Observations: Essai comparatif pour CRS



# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
S6176-6	Pfyngut TC (VS) Route Nationale A9				BG Ing. Conseils SA		Lausanne	
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
S03B	3.50-4.00	Tube parois e	S - l - mo		moyen-fort	19.11.08		
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
					Nom	Signature		
Standard		Standard		06.01.09	G. Gruaz		PD	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.80	60.00	0.65	2.47	1.90	1.89	26.1	26.1	21.0



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	125.0	1.0		[kPa]
e	0.644	0.612	0.582	0.559	0.530	0.494	0.450	0.464	0.519		[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	0.71	2.47	4.41	6.64	10.73	16.88	89.15	3.32			[kPa]
Pente	0.028	0.049	0.073	0.098	0.118	0.147	0.016	0.026			[-]
$C_v$	----	----	----	----	----	----	----	----			[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	----	----	----	----	----	----	----	----			[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$											[kPa]
e											[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$											[kPa]
Pente											[-]
$C_v$											[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k											[m.s <sup>-1</sup> ]

Observations: Courbe de consolidation inexplotable pour déterminer les valeurs de  $C_v$ .

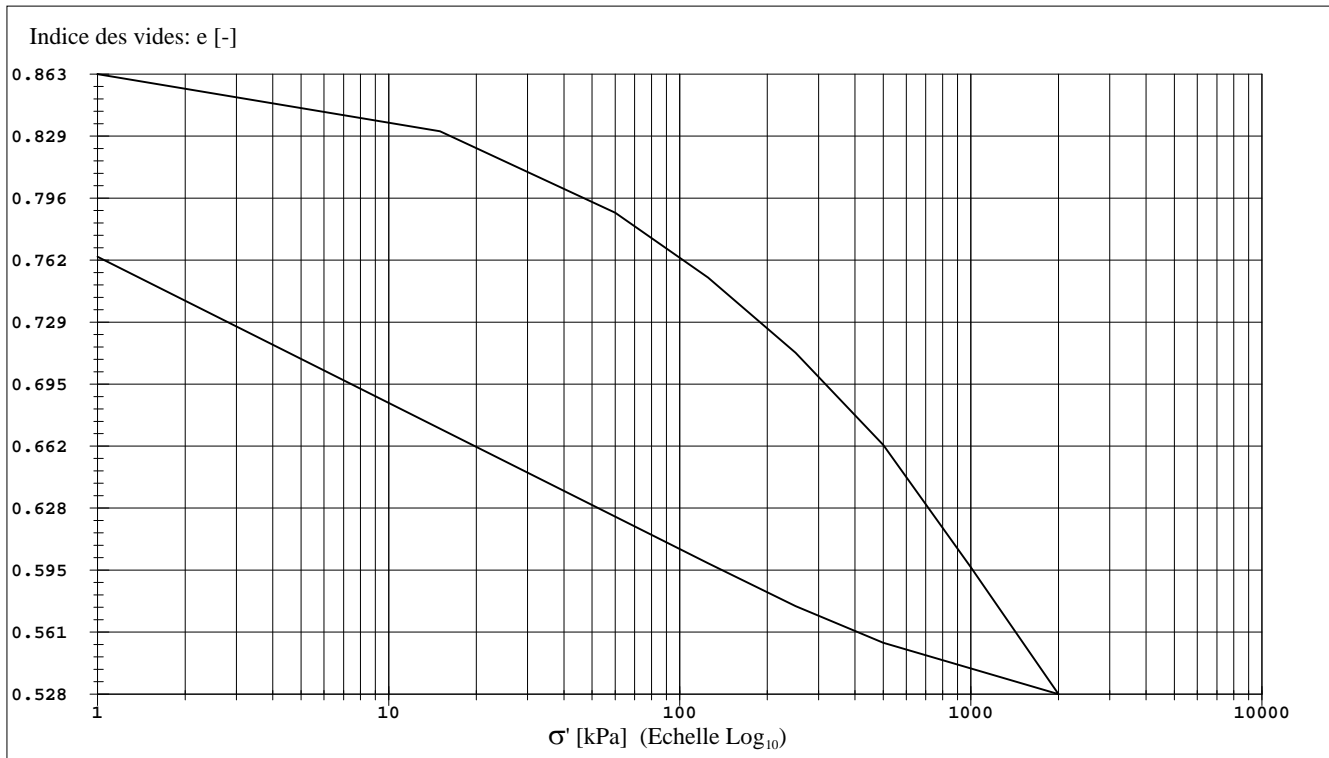


# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

STS 224

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude			Commettant				
				Nom	Adresse			
S6191-1	Anschluss ARA Belp - an ARA Bern			B+S Ingenieur AG	Bern			
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon	Remaniement	Date réception			
1	10.50-11.0	Tube paroi m.	A-1	Très faible	04.03.09			
Mode conservation		Mode préparation		Date essai		Ingénieur responsable		Opérateur
Standard		Standard		16.03.09		Nom	Signature	
				G. Gruaz				PD
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	e <sub>init</sub> [-]	ρ <sub>s</sub> [t.m <sup>-3</sup> ]	ρ <sub>init</sub> [t.m <sup>-3</sup> ]	ρ <sub>sat init</sub> [t.m <sup>-3</sup> ]	w <sub>init</sub> [%]	w <sub>sat init</sub> [%]	w <sub>sat final</sub> [%]
14.72	60.00	0.85	2.74	1.94	1.94	31.1	31.1	27.9



σ'	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	2000.0	500.0	250.0	[kPa]
e	0.863	0.832	0.788	0.753	0.712	0.663	0.597	0.528	0.556	0.575	[-]
E <sub>oed</sub> * 10 <sup>-3</sup>	0.84	1.87	3.31	5.40	8.59	12.60	23.27	82.65	19.65		[kPa]
Pente	0.026	0.073	0.110	0.135	0.166	0.219	0.228	0.046	0.066		[-]
C <sub>v</sub>	5.15E-08	8.04E-08	9.79E-08	1.10E-07	1.08E-07	1.36E-07	1.08E-07	1.28E-07	9.82E-08		[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	5.98E-10	4.21E-10	2.90E-10	1.99E-10	1.24E-10	1.06E-10	4.57E-11	1.52E-11	4.90E-11		[m.s <sup>-1</sup> ]

σ'	250.0	125.0	1.0								[kPa]
e	0.575	0.599	0.764								[-]
E <sub>oed</sub> * 10 <sup>-3</sup>	8.47	1.20									[kPa]
Pente	0.077	0.079									[-]
C <sub>v</sub>	6.95E-08	1.33E-08									[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	8.05E-11	1.09E-10									[m.s <sup>-1</sup> ]

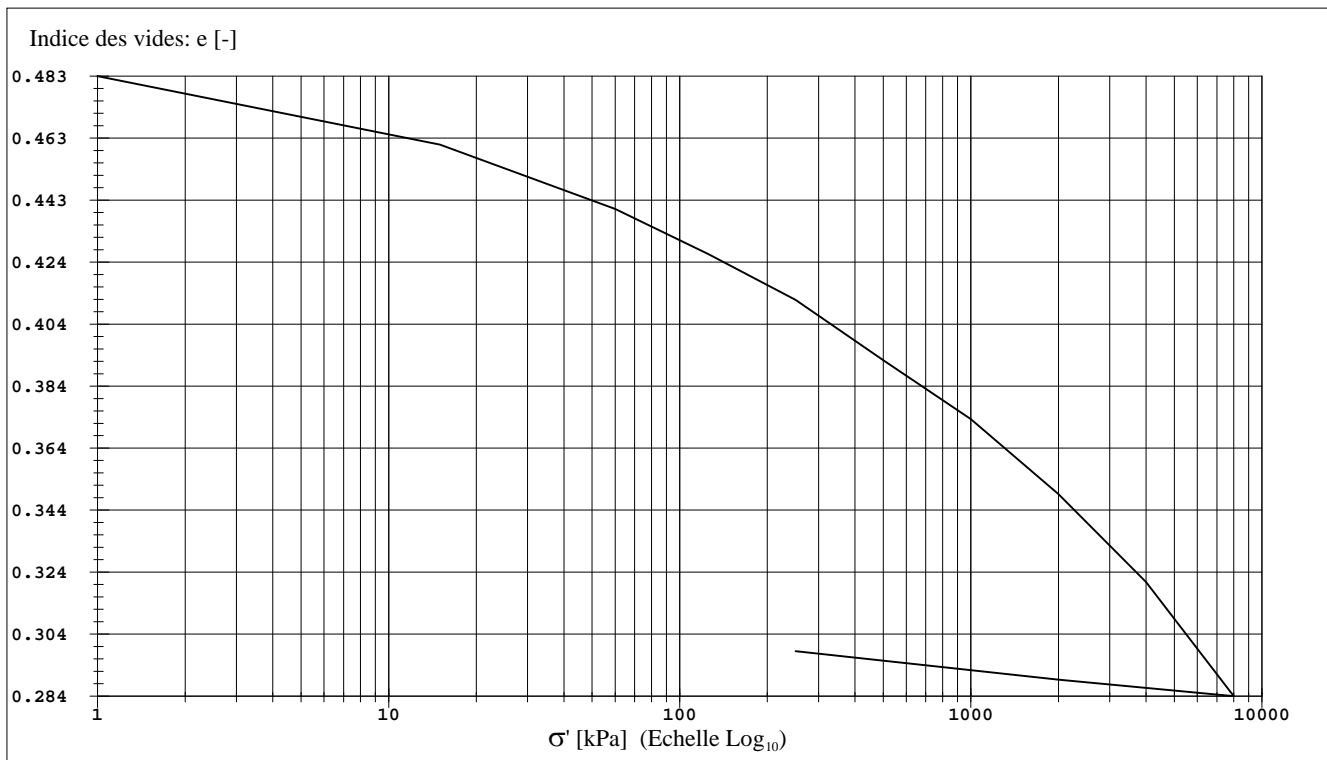
Observations:



# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom	Adresse		
S6192-1	Kunstmuseum Bern Erweiterung Gegenwart				B+S Ingenieur AG	Bern		
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
SB12	11.3-11.45	Tube paroi m.	L - a		faible	30.03.09		
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
Standard		Standard		14.04.09	Nom	Signature		
					G. Gruaz		PD	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	$e_{init}$ [-]	$\rho_s$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$\rho_{sat\ init}$ [t.m <sup>-3</sup> ]	$w_{init}$ [%]	$w_{sat\ init}$ [%]	$w_{sat\ final}$ [%]
14.84	60.00	0.49	2.70	2.15	2.14	18.7	18.2	11.0



$\sigma'$	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	2000.0	4000.0	8000.0	[kPa]
e	0.483	0.461	0.441	0.426	0.411	0.392	0.373	0.349	0.321	0.284	[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	0.94	3.18	6.47	12.06	18.21	36.67	56.81	95.45	143.89		[kPa]
Pente	0.019	0.034	0.045	0.049	0.064	0.063	0.080	0.094	0.122		[-]
$C_v$	----	5.84E-07	1.37E-07	2.58E-07	3.61E-08	7.43E-08	1.24E-07	0.00E+00	----		[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	----	1.80E-09	2.08E-10	2.10E-10	1.94E-11	1.99E-11	2.15E-11	0.00E+00	----		[m.s <sup>-1</sup> ]

$\sigma'$	8000.0	2000.0	250.0								[kPa]
e	0.284	0.289	0.298								[-]
$E_{oed} * 10^{-3}$	1447.83	246.50									[kPa]
Pente	0.009	0.010									[-]
$C_v$	----	----									[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	----	----									[m.s <sup>-1</sup> ]

Observations:

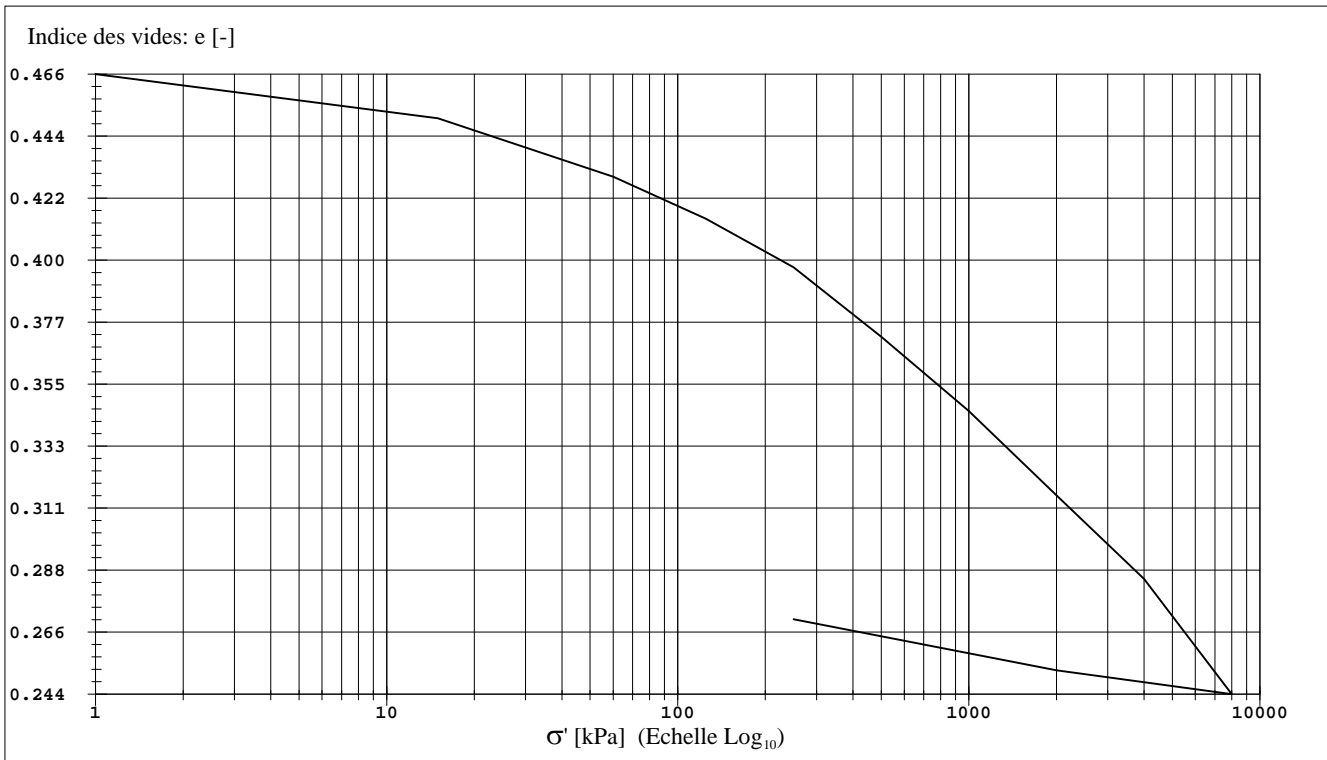


# LABORATOIRE DE MECANIQUE DES SOLS DE L'EPFL CONSOLIDATION A L'OEDOMETRE INCREMENTAL

STS 224

Exécuté selon la norme SIMSTF ETC5-D1.97 et LMS+R ES.410

No Etude-éch.	Titre de l'étude				Commettant			
					Nom		Adresse	
S6192-2	Kunstmuseum Bern Erweiterung Gegenwart				B+S Ingenieur AG		Bern	
No sondage / profil	Profondeur	Type échantillon	Nature échantillon		Remaniement	Date réception		
SB12	19.55-19.7	Tube paroi m.	L+s		faible	30.03.09		
Mode conservation		Mode préparation		Date essai	Ingénieur responsable		Opérateur	
Standard		Standard		14.04.09	Nom	Signature		
					G. Gruaz		PD	
Hauteur [mm]	Diametre [mm]	e <sub>init</sub> [-]	ρ <sub>s</sub> [t.m <sup>-3</sup> ]	ρ <sub>init</sub> [t.m <sup>-3</sup> ]	ρ <sub>sat init</sub> [t.m <sup>-3</sup> ]	w <sub>init</sub> [%]	w <sub>sat init</sub> [%]	w <sub>sat final</sub> [%]
14.72	60.00	0.47	2.70	2.16	2.16	17.4	17.3	10.0



σ'	1.0	15.0	60.0	125.0	250.0	500.0	1000.0	2000.0	4000.0	8000.0	[kPa]
e	0.466	0.450	0.429	0.414	0.397	0.372	0.345	0.315	0.285	0.244	[-]
E <sub>oed</sub> * 10 <sup>-3</sup>	1.30	3.12	6.15	10.18	14.06	25.73	44.46	88.02	124.44		[kPa]
Pente	0.013	0.035	0.047	0.058	0.083	0.089	0.101	0.099	0.137		[-]
C <sub>v</sub>	6.26E-07	3.25E-07	1.60E-07	2.55E-07	2.81E-07	2.33E-08	8.71E-08	----	----		[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	4.73E-09	1.02E-09	2.55E-10	2.46E-10	1.96E-10	8.86E-12	1.92E-11	----	----		[m.s <sup>-1</sup> ]

σ'	8000.0	2000.0	250.0								[kPa]
e	0.244	0.253	0.271								[-]
E <sub>oed</sub> * 10 <sup>-3</sup>	871.81	119.67									[kPa]
Pente	0.014	0.020									[-]
C <sub>v</sub>	----	----									[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
k	----	----									[m.s <sup>-1</sup> ]

Observations:

# **Résultats des essais de laboratoire**

Versuchsergebnisse

## **Essais œdométriques CRS**

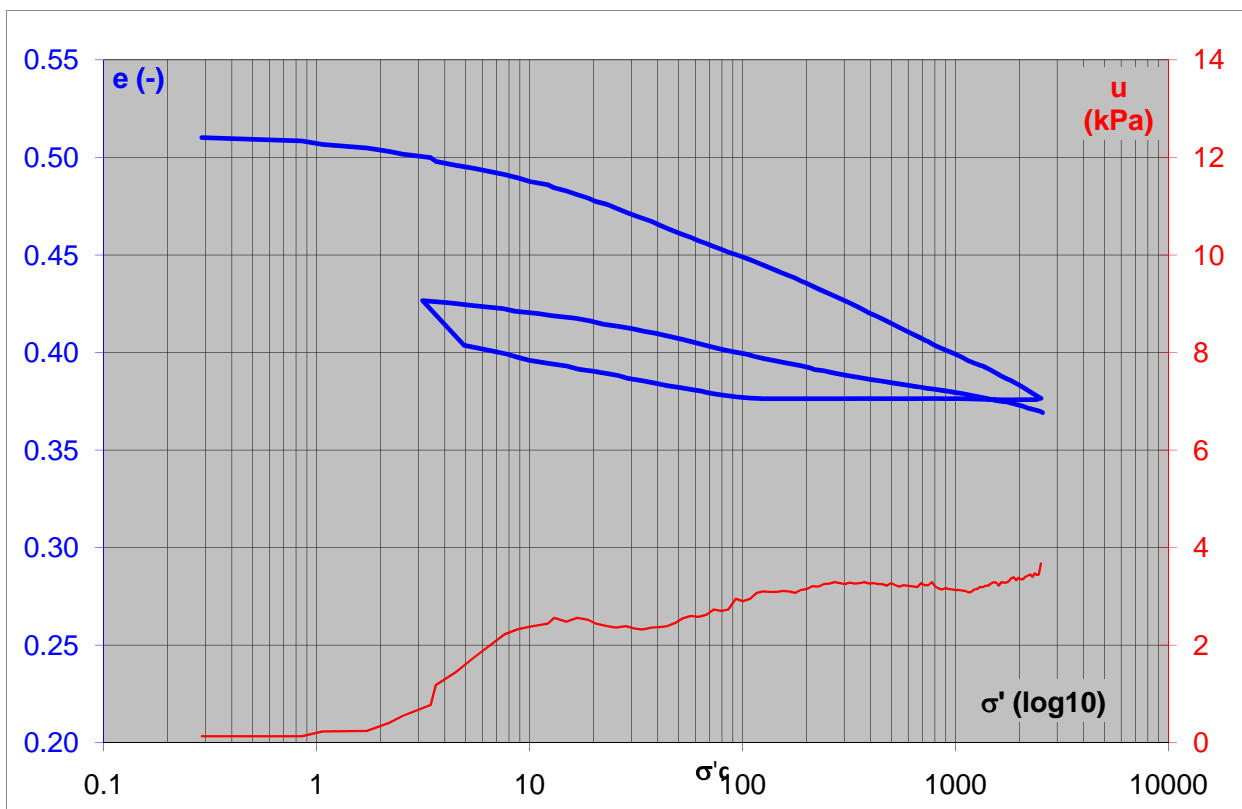
CRS-œdometerversuche

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102					
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval1	20	Limon-sableux			#REF!
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide			GSt		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.833	2.700	0.912	0.514	2.13	20.3	19.0	13.7	0



### Charge

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.502	0.489	0.472	0.459	0.446	0.431	0.415	0.399	0.376
$E_{oed}$ [kPa]	7.03E+02	1.59E+03	3.16E+03	6.64E+03	1.19E+04	2.23E+04	4.61E+04	9.66E+04	
Pente [-]	0.0224	0.0347	0.0425	0.0416	0.0465	0.0522	0.0523	0.0565	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	2.33E-06	2.43E-06	4.47E-06	6.95E-06	1.04E-05	1.61E-05	2.48E-05	3.74E-05	
k [m/s]	3.15E-09	1.52E-09	1.45E-09	1.08E-09	8.91E-10	7.33E-10	5.71E-10	4.01E-10	

### Recharge

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

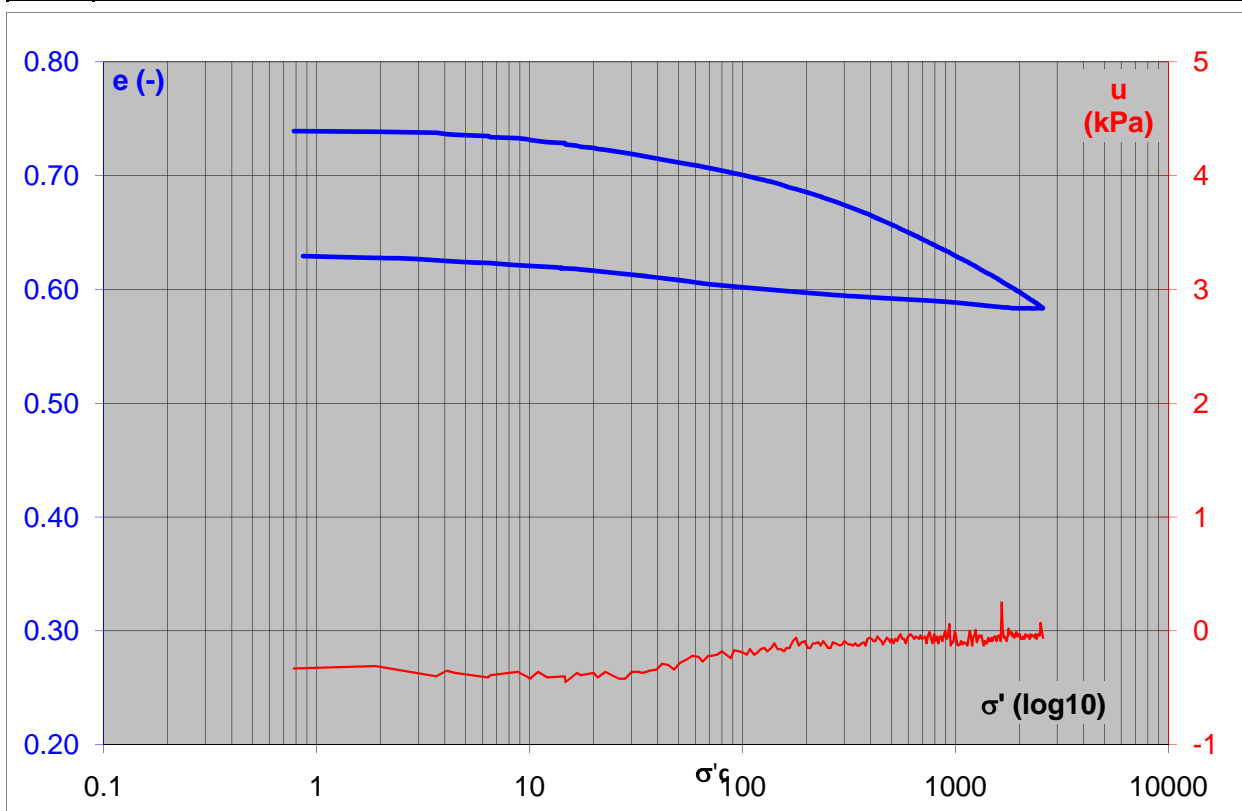
Observations: Problèmes avec la pression interstitielle pour des contraintes $\sigma'$ supérieures à 260 kN/m <sup>2</sup>	Essai accrédité	
	oui	non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS				
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval1	20	Limon-sableux			07.12.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide			GSt		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.694	2.700	0.916	0.741	1.99	28.5	27.5	23.3	0



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.739	0.732	0.720	0.710	0.697	0.680	0.658	0.630	0.584
$E_{oed}$ [kPa]		2.60E+03	4.87E+03	8.46E+03	1.26E+04	1.87E+04	3.03E+04	5.70E+04	
Pente [-]	0.0091	0.0264	0.0327	0.0402	0.0549	0.0736	0.0918	0.1115	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.33E-03	4.49E-03	
k [m/s]	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	3.59E-08	8.67E-08	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Problèmes avec la pression interstitielle

Essai accrédité

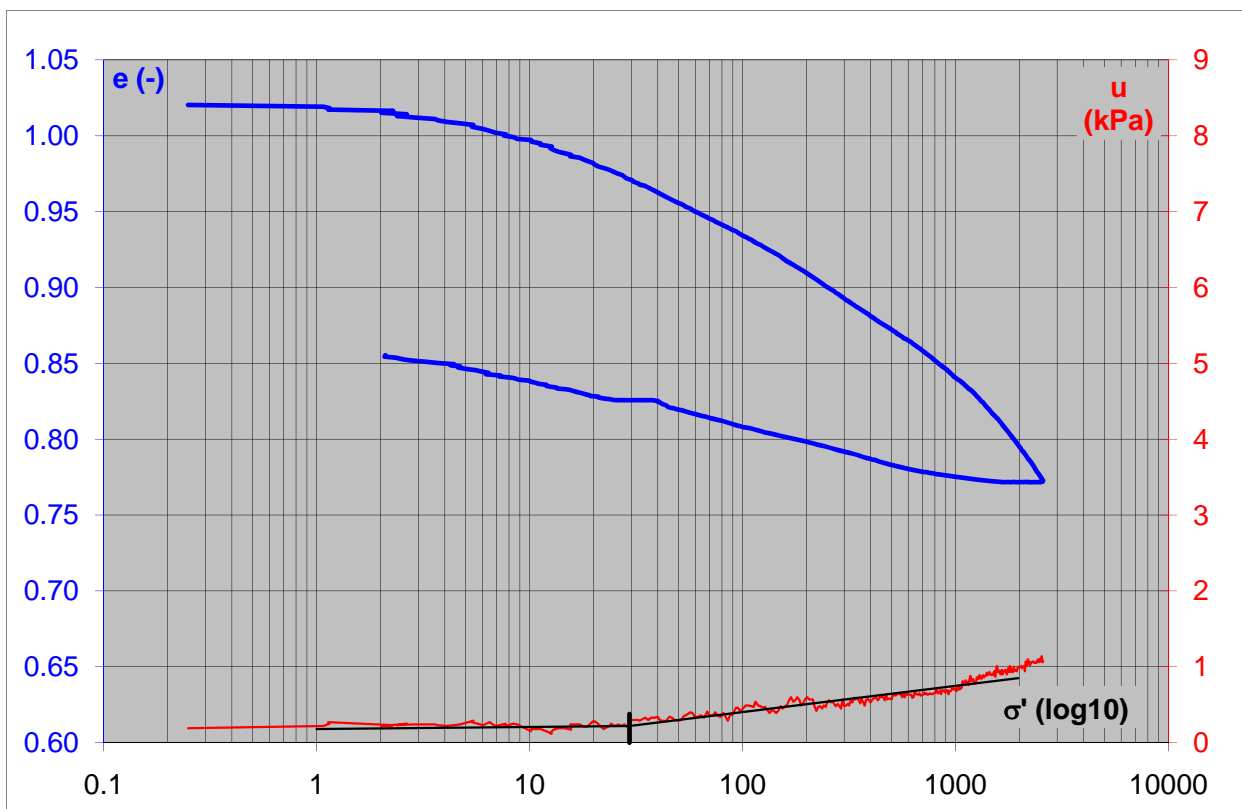
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS				
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval10	19.00-19.70	Limon peu argileux			28.01.2010
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Carotte		Gst		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.659	2.820	0.876	1.022	1.90	38.6	36.3	30.3	29



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	1.012	0.998	0.972	0.950	0.927	0.901	0.873	0.841	0.773
$E_{oed}$ [kPa]	9.11E+02	1.60E+03	2.76E+03	5.51E+03	8.88E+03	1.74E+04	2.99E+04	4.32E+04	
Pente [-]	0.0288	0.0509	0.0681	0.0719	0.0886	0.0926	0.1058	0.1641	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	1.29E-05	2.51E-05	2.63E-05	3.60E-05	4.54E-05	6.01E-05	7.51E-05	8.08E-05	
k [m/s]	1.40E-08	1.66E-08	9.91E-09	6.88E-09	5.25E-09	3.71E-09	2.62E-09	1.94E-09	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon faiblement remanié

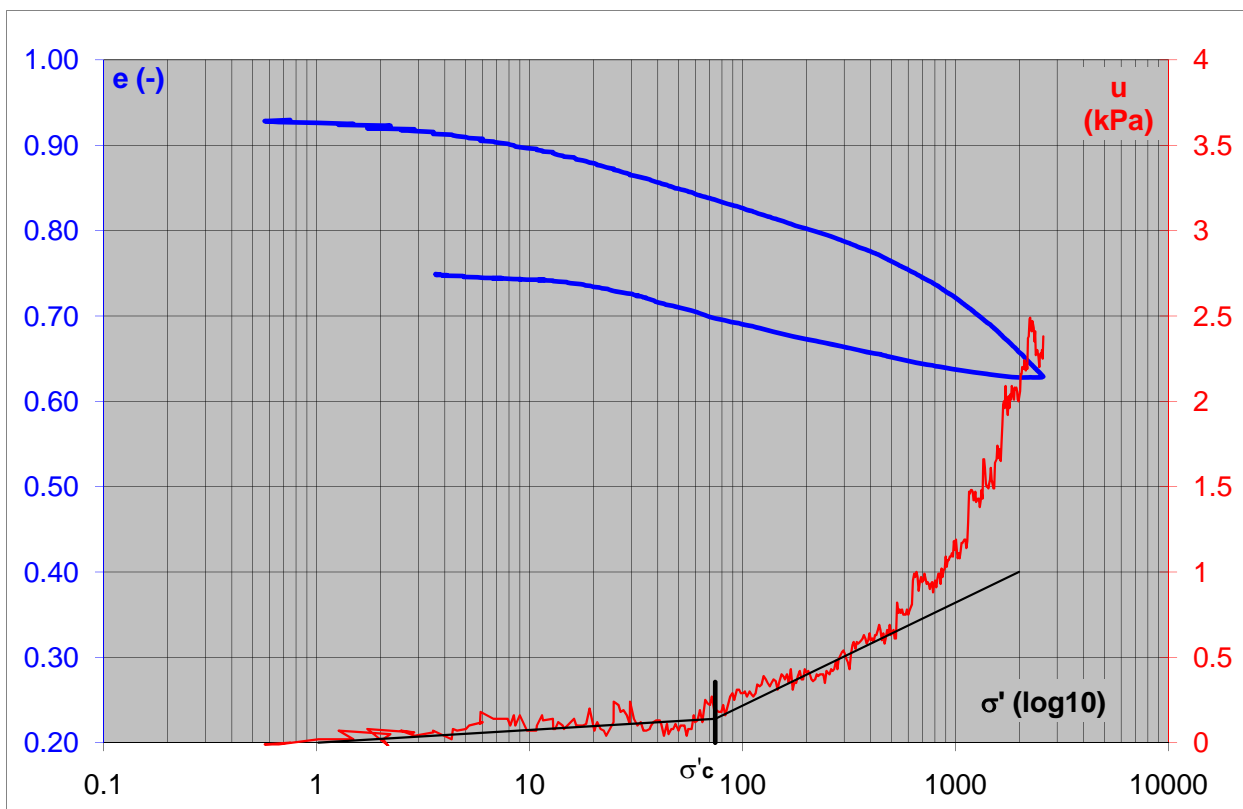
Essai accrédité	
oui	non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS				
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval11	16.00-16.40	Limon peu argileux			29.01.2010
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Carotte		Gst		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	18.931	2.700	0.965	0.932	1.94	38.8	34.5	27.7	74



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.917	0.897	0.865	0.843	0.819	0.795	0.764	0.722	0.629
$E_{oed}$ [kPa]	7.49E+02	1.23E+03	2.52E+03	4.79E+03	9.76E+03	1.48E+04	2.11E+04	2.91E+04	
Pente [-]	0.0383	0.0647	0.0730	0.0769	0.0783	0.1014	0.1410	0.2244	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	3.07E-05	3.44E-05	7.53E-05	4.69E-05	4.78E-05	5.02E-05	4.66E-05	3.64E-05	
k [m/s]	3.89E-08	2.88E-08	2.99E-08	1.07E-08	5.16E-09	3.51E-09	2.33E-09	1.33E-09	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon faiblement remanié

Essai accrédité

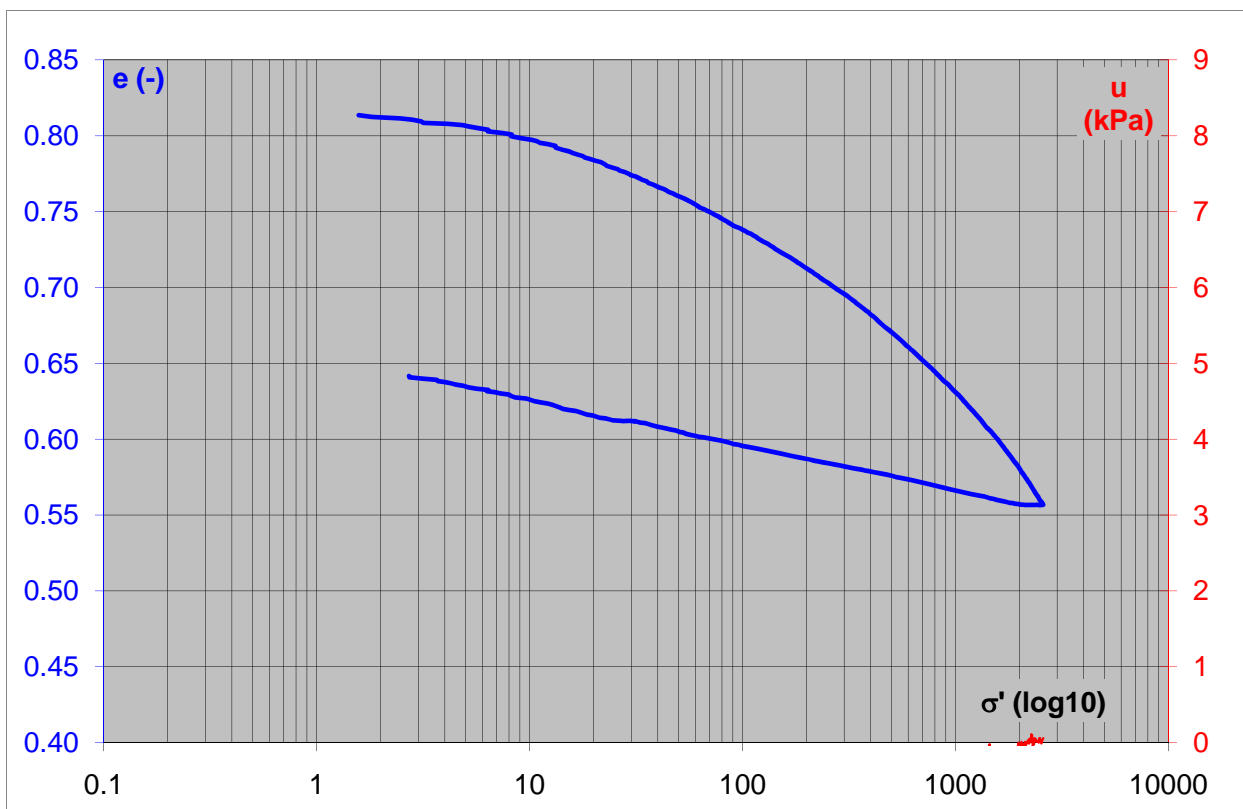
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS				
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval12	19.30-19.90	Limon peu argileux			01.02.2010
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Carotte		Gst		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	18.667	2.700	1.054	0.722	2.04	31.0	26.7	23.8	-



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.811	0.798	0.775	0.755	0.731	0.704	0.671	0.631	0.557
$E_{oed}$ [kPa]	9.74E+02	1.54E+03	2.68E+03	4.58E+03	7.93E+03	1.31E+04	2.12E+04	3.49E+04	
Pente [-]	0.0239	0.0464	0.0644	0.0766	0.0888	0.1085	0.1318	0.1794	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	4.01E-03
k [m/s]	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	9.68E-08

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon faiblement remanié

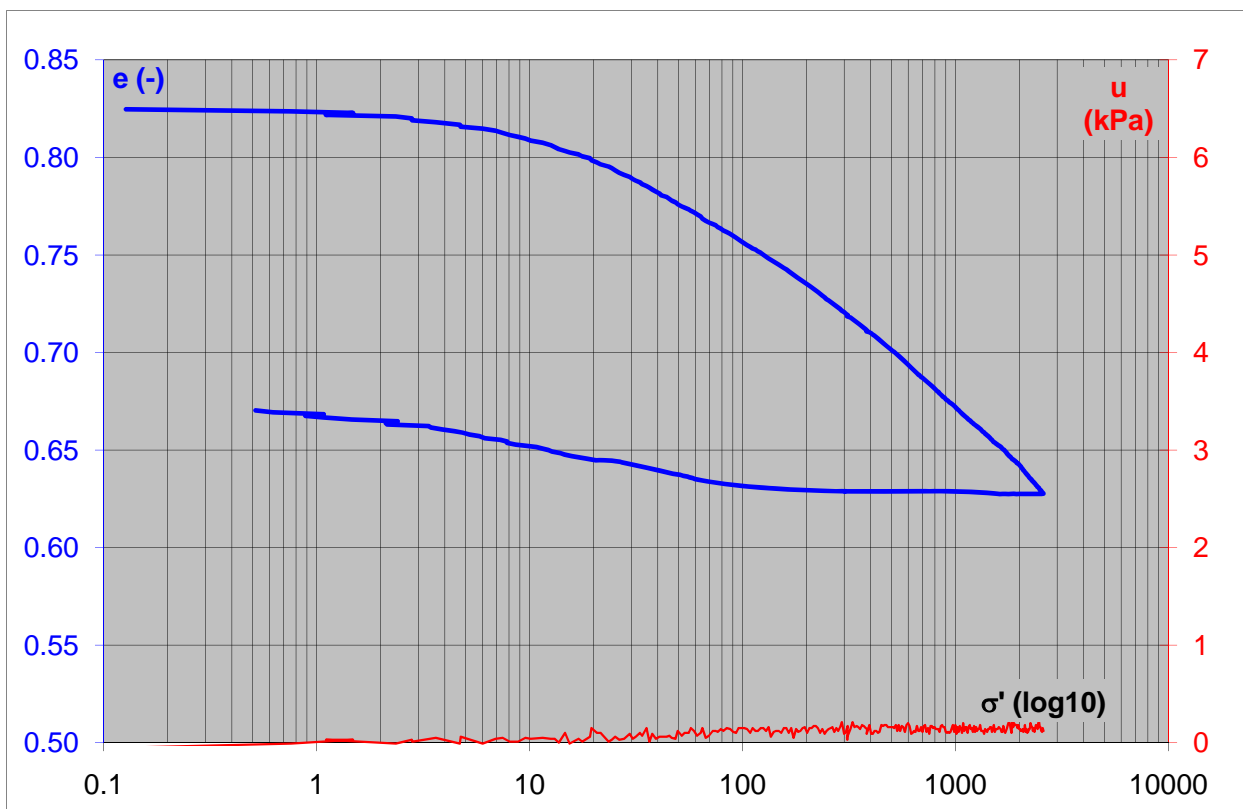
Essai accrédité	
oui	non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS				
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval13	16.50-14.20	Limon peu sableux			01.02.2010
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Carotte		Gst		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.754	2.700	0.894	0.826	1.93	32.3	30.6	24.8	-



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.819	0.810	0.790	0.772	0.751	0.727	0.702	0.672	0.628
$E_{oed}$ [kPa]	1.20E+03	1.81E+03	2.95E+03	5.50E+03	9.35E+03	1.73E+04	2.99E+04	6.55E+04	
Pente [-]	0.0175	0.0402	0.0604	0.0660	0.0771	0.0849	0.0981	0.1070	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	1.60E-04	2.06E-04	1.56E-04	1.42E-04	2.22E-04	2.84E-04	4.31E-04	6.30E-04	
k [m/s]	1.79E-07	1.05E-07	5.86E-08	2.79E-08	2.45E-08	1.75E-08	1.51E-08	1.08E-08	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon faiblement remanié

Essai accrédité

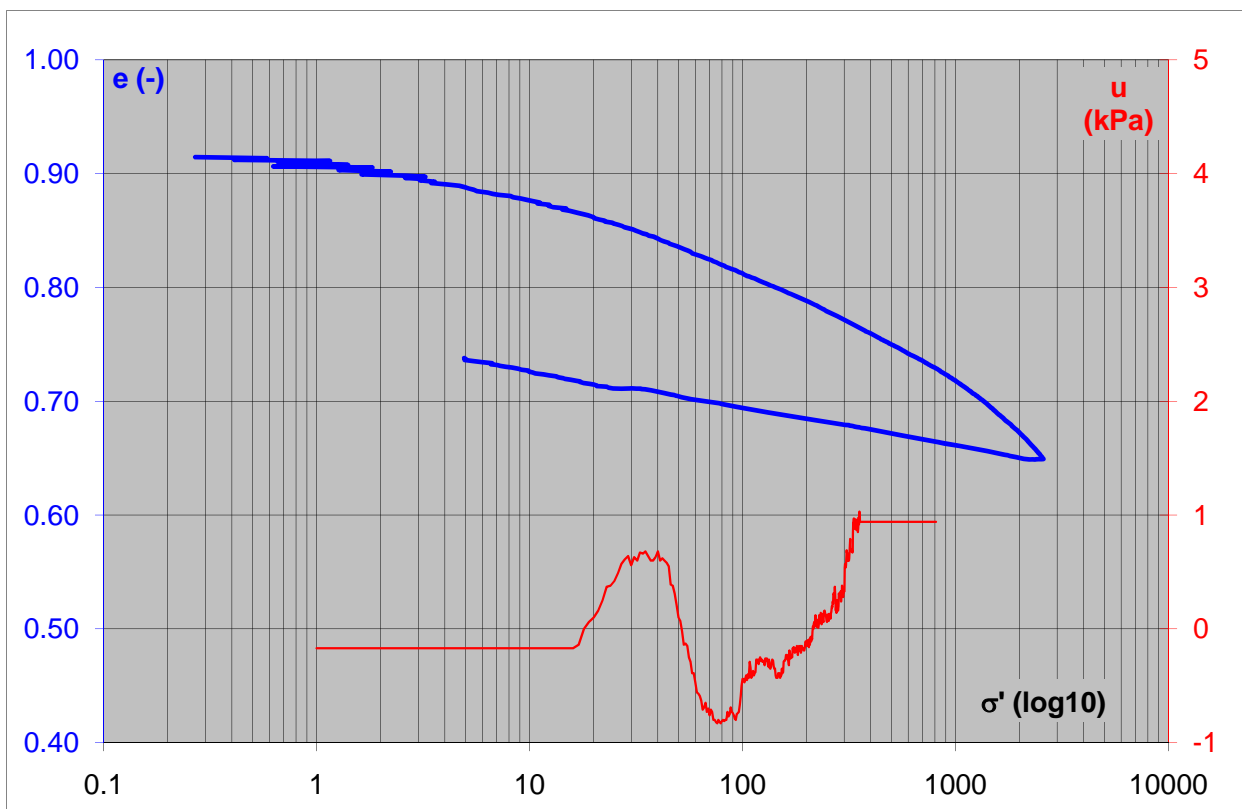
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS				
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval14	18.7-19.30	Limon peu argileux		18.11.2009	01.02.2010
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Carotte		Gst		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.648	2.810	0.976	0.918	1.94	34.2	32.7	26.3	-



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.898	0.877	0.852	0.830	0.806	0.779	0.750	0.719	0.649
$E_{oed}$ [kPa]	8.57E+02	1.56E+03	2.45E+03	4.67E+03	8.64E+03	1.56E+04	2.80E+04	3.99E+04	
Pente [-]	0.0376	0.0525	0.0735	0.0766	0.0845	0.0957	0.1058	0.1664	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	1.10E-05	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1.09E-03	2.14E-04	
k [m/s]	1.14E-08	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	3.85E-08	5.98E-09	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon faiblement remanié

Essai accrédité

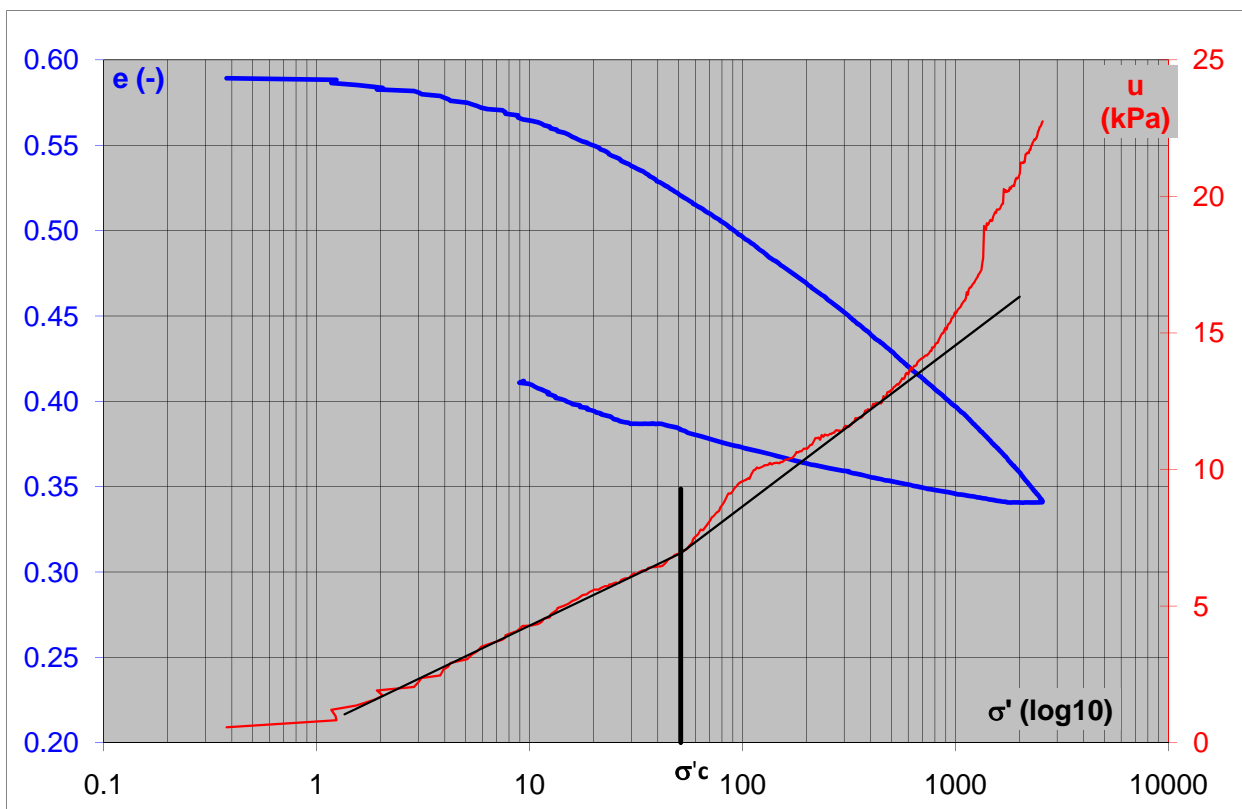
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Rennaz		OFROU	Berne	
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval15	18.25-18.5	Limon -argileux, varvé de S fin			26.01.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide			GSt		

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.745	2.700	0.517	0.609	2.07	21.9	22.5	15.3	51



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.582	0.565	0.539	0.516	0.488	0.460	0.429	0.397	0.341
$E_{oed}$ [kPa]	6.93E+02	1.17E+03	1.96E+03	3.54E+03	6.82E+03	1.21E+04	2.24E+04	4.08E+04	
Pente [-]	0.0326	0.0526	0.0771	0.0856	0.0917	0.1015	0.1080	0.1354	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	5.04E-07	4.30E-07	5.16E-07	6.17E-07	8.53E-07	1.16E-06	1.55E-06	1.89E-06	
k [m/s]	6.24E-10	3.53E-10	2.61E-10	1.75E-10	1.29E-10	1.00E-10	7.27E-11	4.99E-11	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations:

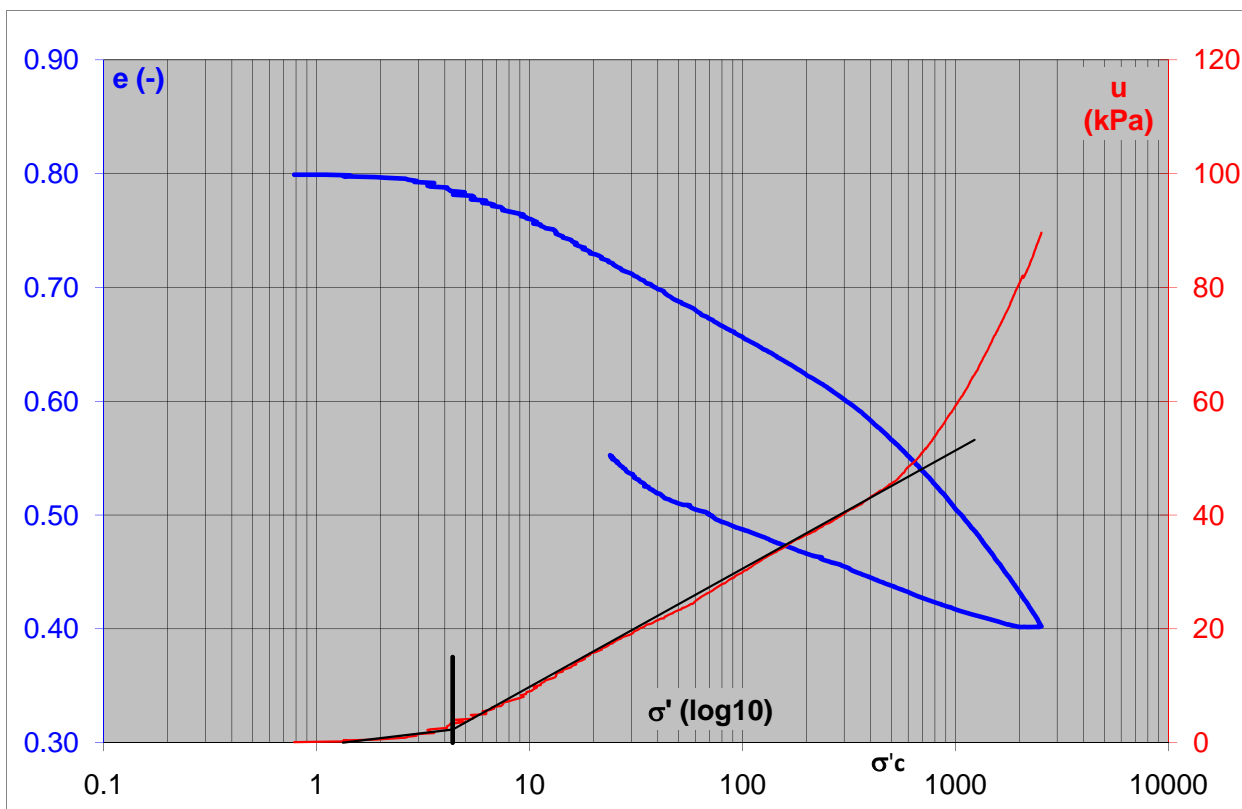
Essai accrédité	
oui	non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	JORDI SA - Mechenhaus - Belp		OFROU	Berne	
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
Crsva16	25.1-25.3	Argile limoneuse			27.01.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide			GSt		

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.468	2.700	0.553	0.799	1.97	29.8	29.6	20.5	4



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.793	0.761	0.712	0.681	0.646	0.612	0.566	0.506	0.402
$E_{oed}$ [kPa]	5.68E+02	8.25E+02	1.63E+03	3.14E+03	6.11E+03	8.79E+03	1.30E+04	2.21E+04	
Pente [-]	0.0609	0.0987	0.1058	0.1086	0.1114	0.1532	0.2015	0.2556	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	2.90E-07	1.36E-07	1.43E-07	1.90E-07	2.44E-07	2.77E-07	2.70E-07	2.96E-07	
k [m/s]	4.45E-10	1.41E-10	8.05E-11	5.87E-11	3.99E-11	3.19E-11	2.14E-11	1.39E-11	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations:

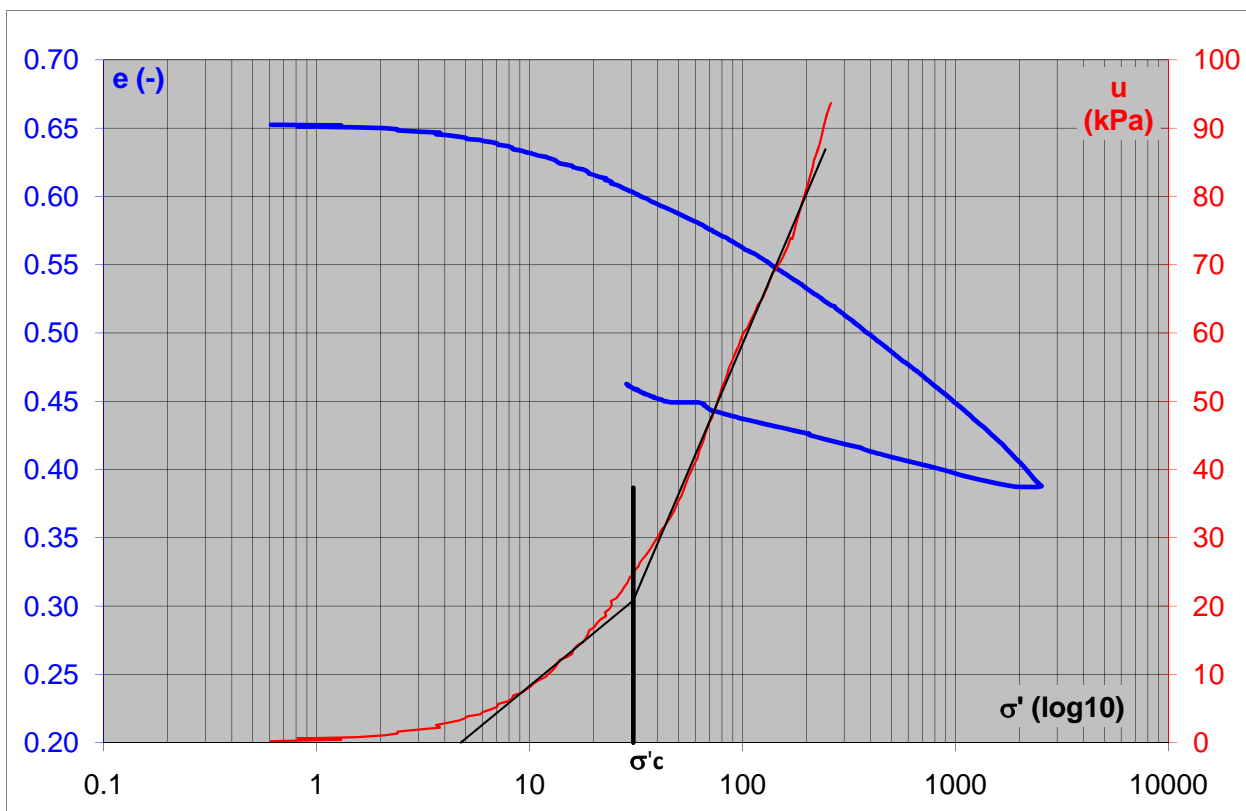
Essai accrédité	
oui	non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Genève		OFROU	Berne	
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
Crsva17	6.90-7.10	Argile limoneuse avec graviers			05.02.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide			GSt		

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.630	2.700	0.514	0.663	2.10	21.1	24.6	17.1	31



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.648	0.632	0.604	0.582	0.555	0.522	0.487	0.449	0.388
$E_{oed}$ [kPa]	7.76E+02	1.20E+03	2.14E+03	3.83E+03	6.09E+03	1.08E+04	1.97E+04	3.72E+04	
Pente [-]	0.0264	0.0582	0.0732	0.0856	0.1062	0.1185	0.1253	0.1505	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	5.18E-07	2.05E-07	1.55E-07	1.29E-07	1.18E-07	2.44E-07	2.78E-07	4.46E-07	
k [m/s]	4.70E-10	1.23E-10	5.48E-11	2.84E-11	1.78E-11	2.27E-11	1.44E-11	1.25E-11	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations:

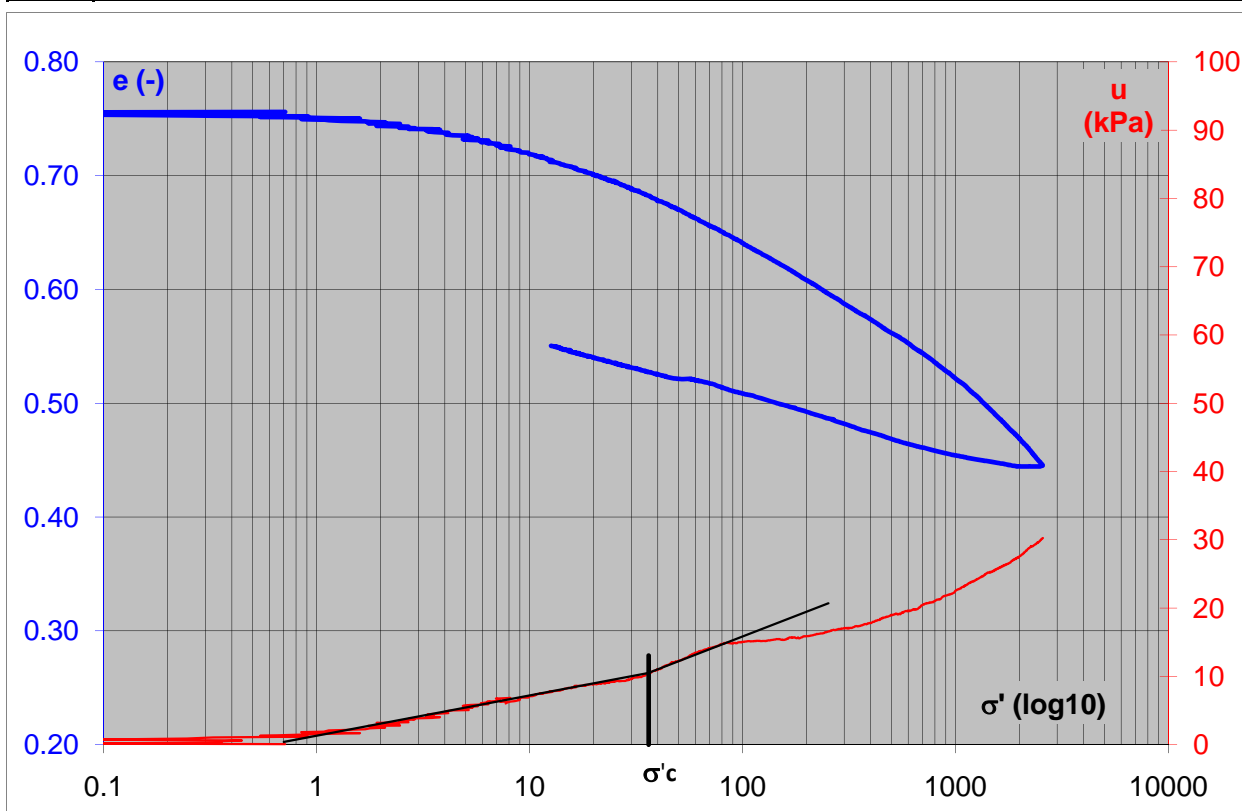
Essai accrédité	
oui	non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Belp (BE)		OFROU	Berne	
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval18	36.6 - 36.8	Argile limoneuse peu compacte			11.02.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide			GSt		

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\varnothing$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.604	2.700	0.258	0.756	1.98	27.2	28.0	20.4	36



### Charge

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.741	0.719	0.689	0.663	0.631	0.597	0.562	0.522	0.445
$E_{oed}$ [kPa]	1.30E+03	1.66E+03	2.12E+03	3.59E+03	6.42E+03	1.29E+04	2.33E+04	3.49E+04	
Pente [-]	0.0394	0.0638	0.0849	0.1001	0.1116	0.1166	0.1326	0.1863	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	2.18E-07	1.58E-07	1.51E-07	1.71E-07	2.52E-07	3.52E-07	4.68E-07	6.11E-07	
k [m/s]	1.63E-10	1.01E-10	7.13E-11	5.15E-11	4.22E-11	3.15E-11	2.43E-11	2.04E-11	

### Recharge

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Problèmes avec la pression interstitielle pour des contraintes  $\sigma'$  supérieures à 260 kN/m<sup>2</sup>

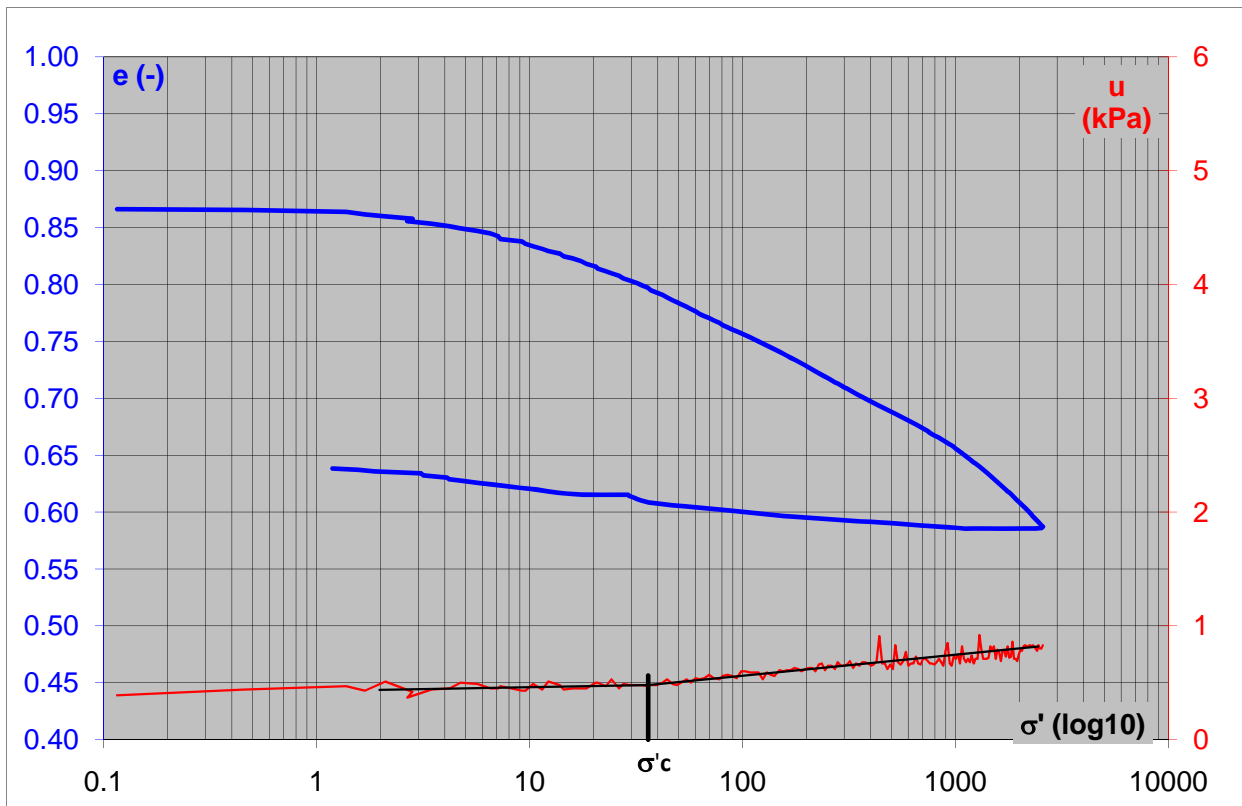
Essai accrédité	
oui	non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	S6176 - Pfyngut		OFROU	Berne	
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval19	3.50 - 4.00	Limon crayeux +sableux avec MO			21.01.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide			GSt		

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.718	2.600	1.004	0.867	1.75	29.8	33.4	13.7	36



### Charge

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.856	0.836	0.803	0.779	0.748	0.719	0.689	0.657	0.587
$E_{oed}$ [kPa]	5.99E+02	1.09E+03	1.99E+03	3.88E+03	7.19E+03	1.44E+04	2.62E+04	3.70E+04	
Pente [-]	0.0361	0.0658	0.0872	0.0898	0.0990	0.0995	0.1053	0.1676	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	5.04E-06	8.30E-06	1.37E-05	2.12E-05	3.18E-05	4.51E-05	6.72E-05	9.68E-05	
k [m/s]	8.50E-09	7.76E-09	6.98E-09	5.63E-09	4.54E-09	3.28E-09	2.61E-09	2.67E-09	

### Recharge

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations:

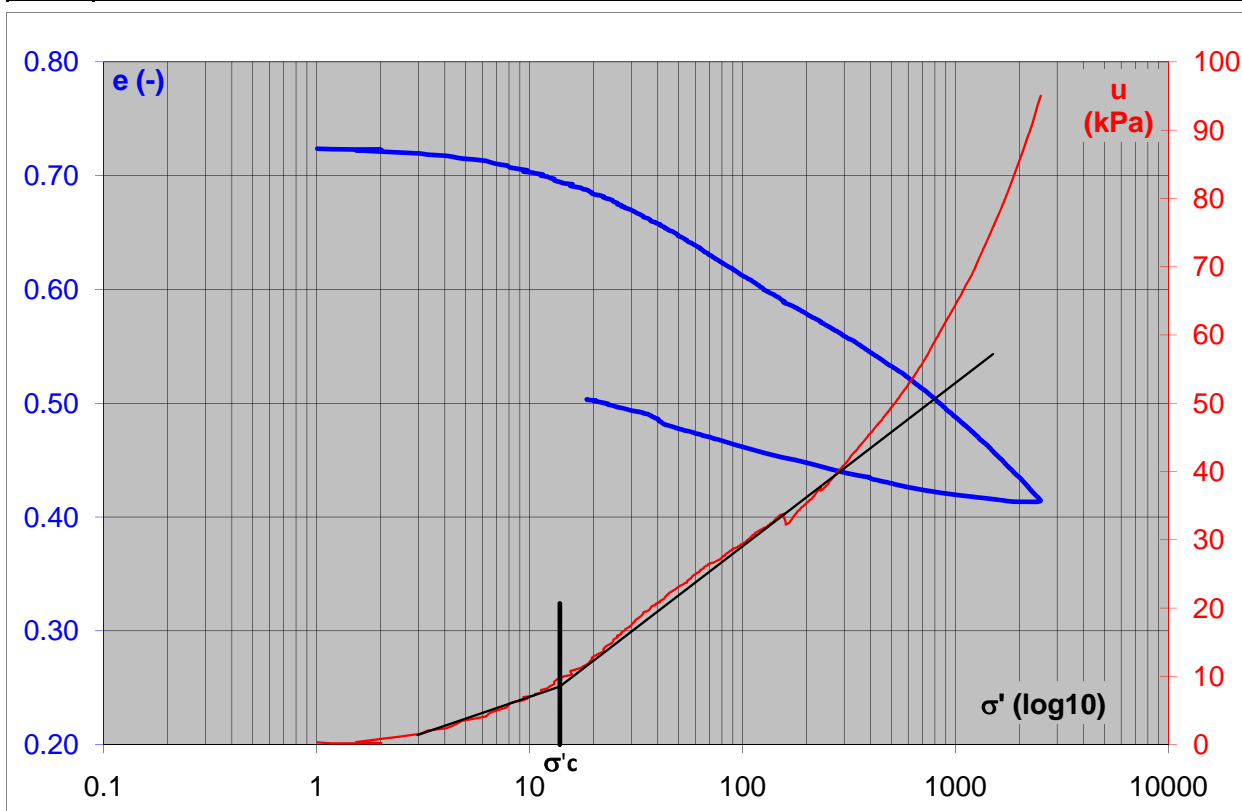
Essai accrédité	
oui	non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS				
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval2	18.7	Limon faiblement argileux			02.12.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Carotte		GSt		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.539	2.700	0.989	0.724	2.00	26.7	26.8	18.6	14



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.720	0.704	0.670	0.639	0.601	0.569	0.533	0.488	0.415
$E_{oed}$ [kPa]	8.14E+02	1.14E+03	1.60E+03	2.86E+03	6.44E+03	1.11E+04	1.74E+04	3.06E+04	
Pente [-]	0.0291	0.0663	0.1040	0.1185	0.1093	0.1177	0.1482	0.1828	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	1.27E-06	3.69E-07	2.49E-07	2.80E-07	3.90E-07	5.21E-07	6.84E-07	8.47E-07	
k [m/s]	1.01E-09	2.79E-10	1.36E-10	9.69E-11	6.10E-11	4.74E-11	4.01E-11	2.87E-11	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon faiblement remanié

Essai accrédité

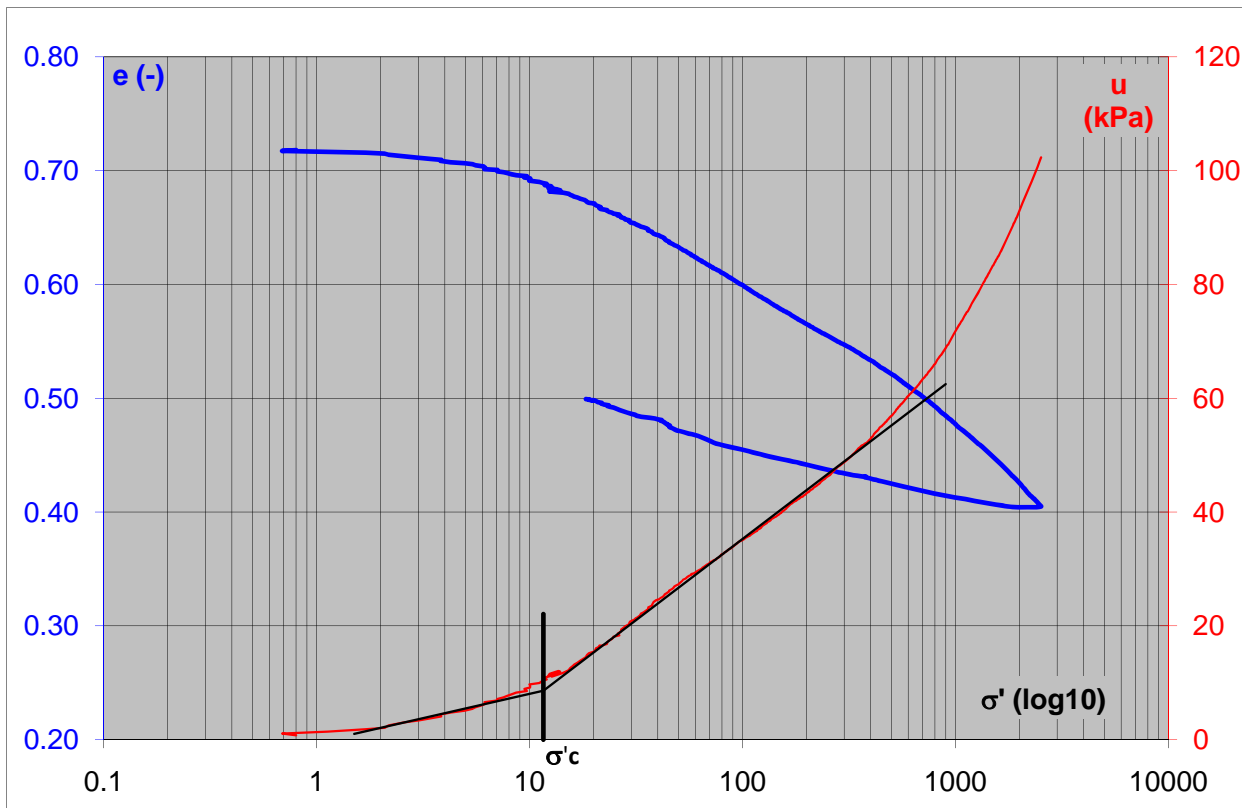
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS				
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval2_"	18.7	Limon faiblement argileux			02.12.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Carotte		GSt		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.624	2.700	1.021	0.715	2.01	27.6	26.5	18.5	12



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.713	0.691	0.655	0.624	0.588	0.555	0.522	0.477	0.405
$E_{oed}$ [kPa]	6.93E+02	1.31E+03	1.63E+03	2.86E+03	6.02E+03	1.15E+04	1.72E+04	3.09E+04	
Pente [-]	0.0365	0.0774	0.1004	0.1130	0.1094	0.1116	0.1460	0.1798	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	6.03E-07	3.09E-07	2.26E-07	2.54E-07	3.36E-07	4.63E-07	6.27E-07	7.95E-07	
k [m/s]	6.30E-10	2.12E-10	1.20E-10	8.38E-11	5.59E-11	4.02E-11	3.67E-11	2.65E-11	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon faiblement remanié

Essai accrédité

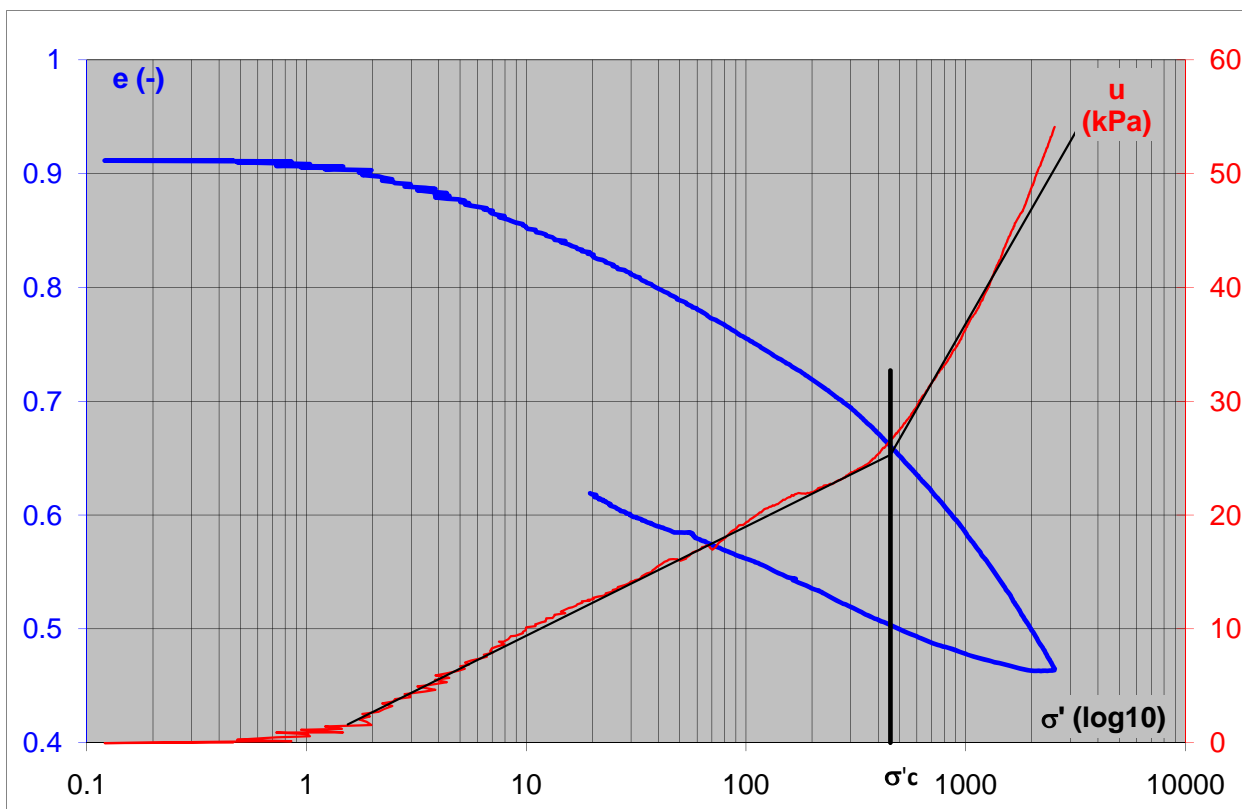
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Belp Medienhaus		OFROU	Berne	
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
Ech. 1	19.1	Argile limoneuse			02.12.2008
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide			GSt		

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\varnothing$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.789	2.700	0.550	0.912	1.90	32.8	33.8	22.9	455



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.889	0.853	0.812	0.782	0.745	0.707	0.652	0.585	0.465
$E_{oed}$ [kPa]	6.85E+02	1.02E+03	1.73E+03	3.15E+03	5.67E+03	7.91E+03	1.24E+04	2.00E+04	
Pente [-]	0.0652	0.0863	0.0998	0.1170	0.1266	0.1777	0.2230	0.2959	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	2.14E-07	1.60E-07	1.94E-07	2.68E-07	3.59E-07	4.03E-07	4.01E-07	4.83E-07	
k [m/s]	2.74E-10	1.51E-10	1.07E-10	8.49E-11	6.41E-11	5.16E-11	3.36E-11	2.52E-11	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations:

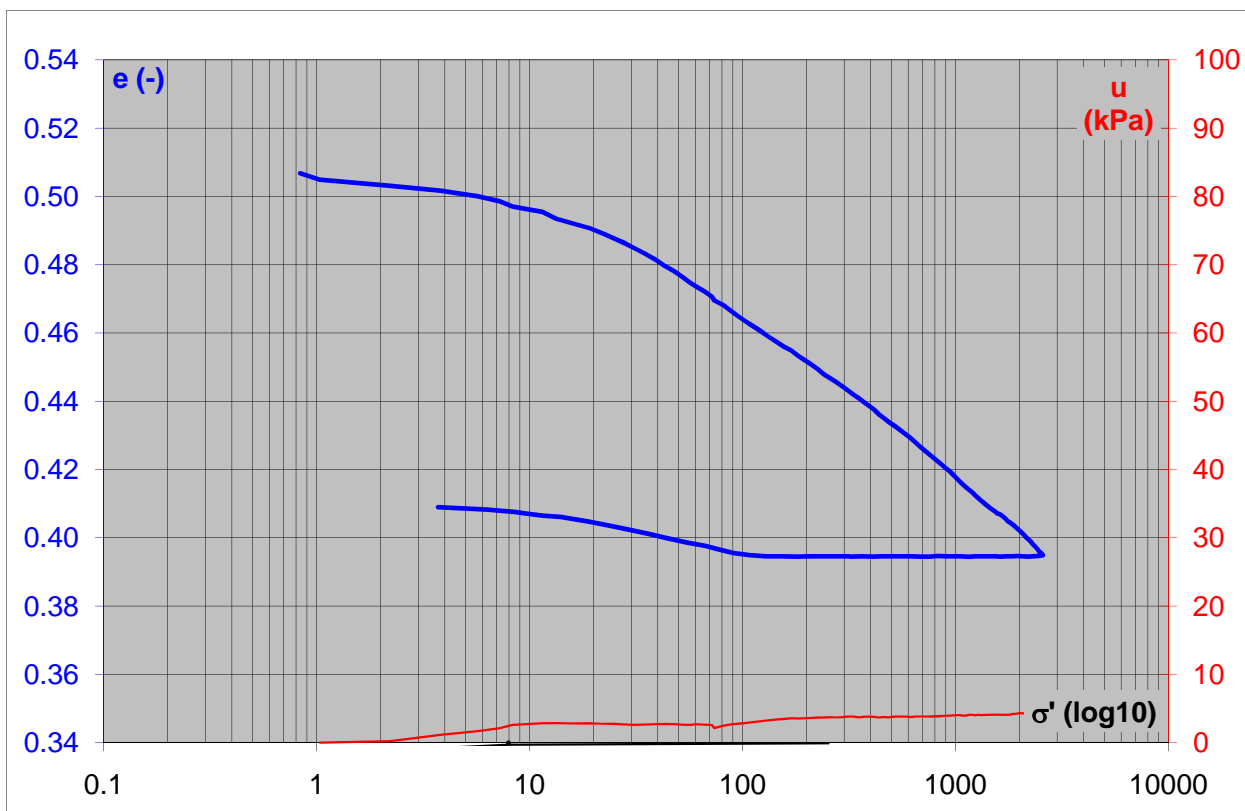
Essai accrédité	
oui	non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Kunstmuseum - Bern		OFROU	Berne	
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
SB12/Ech. n°1	11.45-11.60	Limon-sableux			16.04.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide			GSt		

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.694	2.700	0.845	0.523	2.11	18.7	19.4	15.1	-



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.503	0.497	0.486	0.475	0.460	0.448	0.434	0.419	0.395
$E_{oed}$ [kPa]	1.40E+03	2.59E+03	3.61E+03	6.36E+03	1.34E+04	2.46E+04	4.48E+04	1.01E+05	
Pente [-]	0.0106	0.0203	0.0376	0.0428	0.0427	0.0459	0.0509	0.0560	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	6.69E-06	2.91E-06	4.51E-06	7.06E-06	1.08E-05	1.55E-05	2.21E-05	3.01E-05	
k [m/s]	4.86E-09	1.14E-09	1.25E-09	1.12E-09	8.20E-10	6.42E-10	5.02E-10	3.25E-10	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations:

Essai accrédité

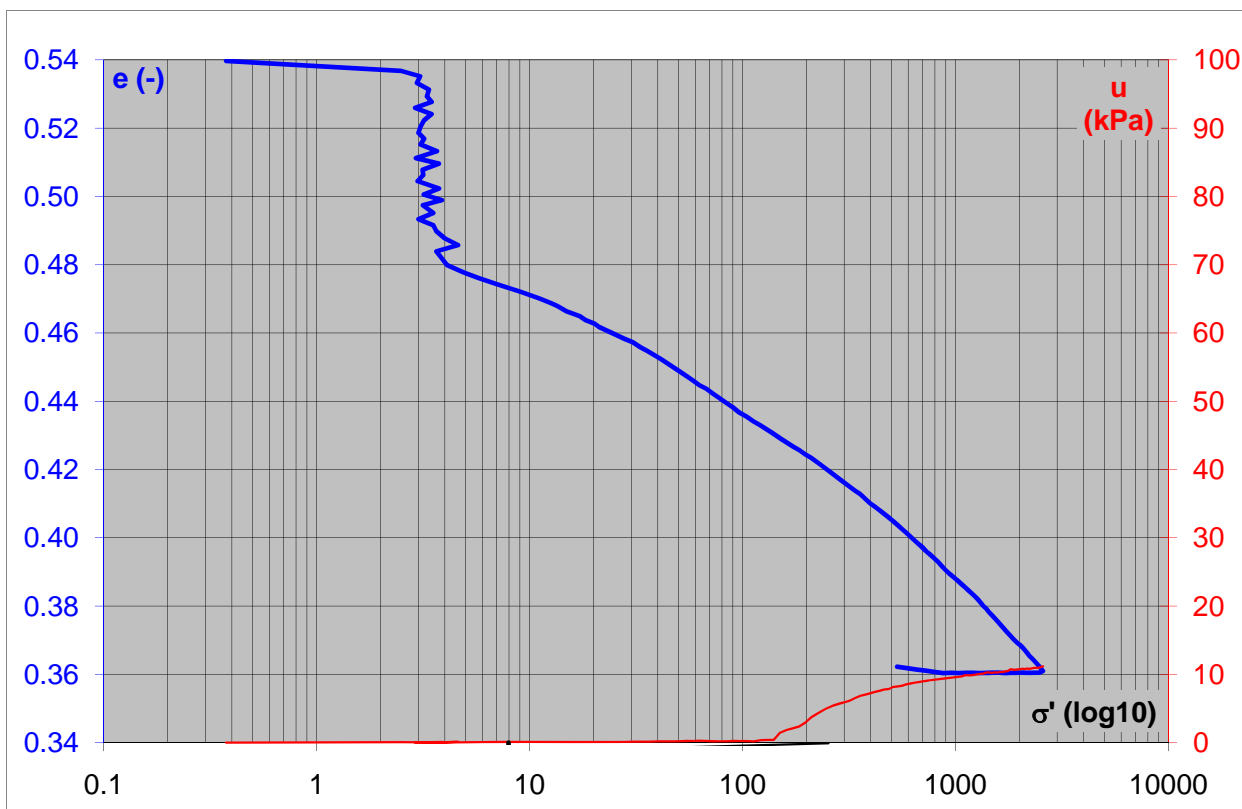
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Kunstmuseum - Bern		OFROU	Berne	
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
SB12/Ech. n°2	19.85-20.00	Sable+fin, limoneux			29.04.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide			GSt		

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.922	2.700	0.985	0.540	2.18	16.8	20.0	13.4	-



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.526	0.471	0.458	0.446	0.433	0.421	0.406	0.388	0.361
$E_{oed}$ [kPa]	4.77E+02	2.02E+03	3.59E+03	6.64E+03	1.38E+04	2.33E+04	4.01E+04	8.06E+04	
Pente [-]	0.1034	0.0286	0.0378	0.0419	0.0405	0.0485	0.0574	0.0657	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	4.25E-05	5.73E-05	5.82E-05	7.58E-05	2.84E-05	8.07E-06	9.05E-06	1.18E-05	
k [m/s]	1.02E-07	2.93E-08	1.67E-08	1.16E-08	2.40E-09	3.60E-10	2.32E-10	1.52E-10	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations:

Essai accrédité

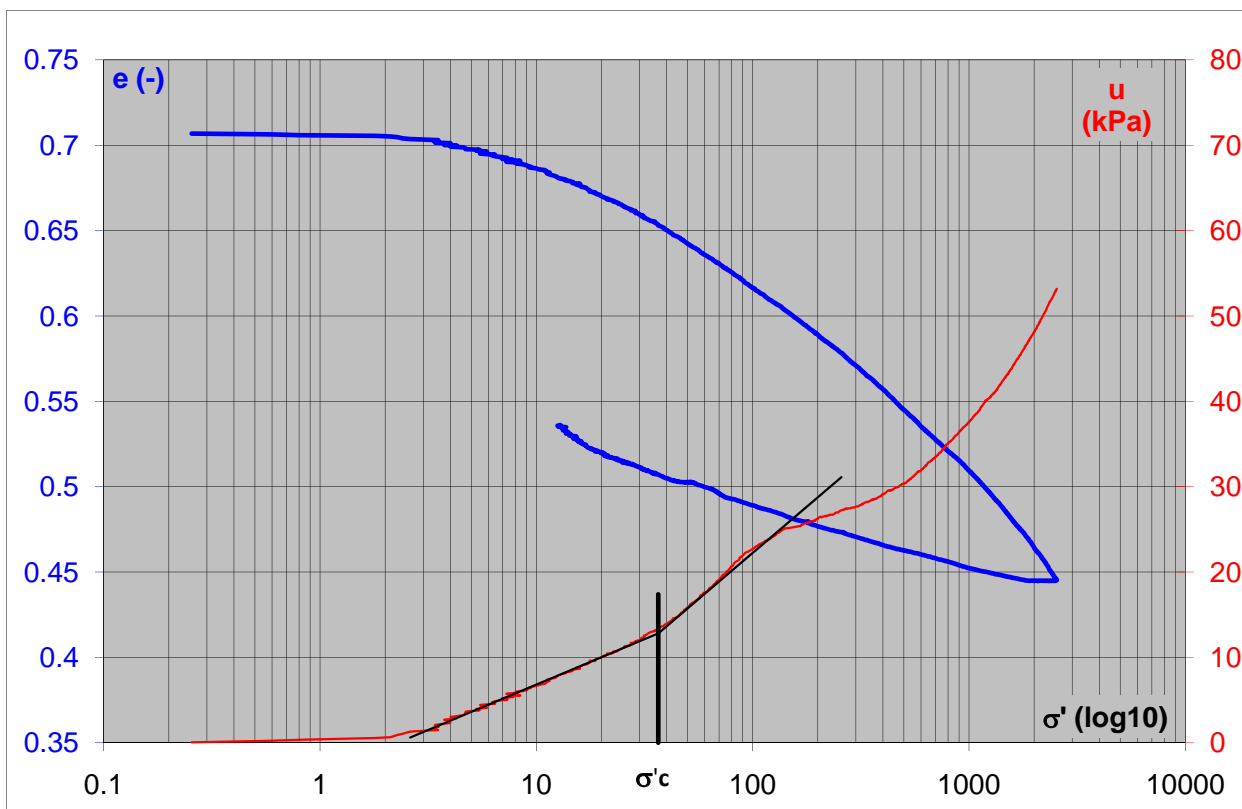
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Gallerie de Chouly - GE		OFROU	Berne	
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
Ech. 2	5.10 - 5.20	Argile limoneuse			17.11.2008
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide			GSt		

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.989	2.700	0.249	0.707	1.99	26.0	26.2	19.9	37



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.704	0.686	0.660	0.636	0.608	0.580	0.545	0.510	0.445
$E_{oed}$ [kPa]	1.53E+03	1.51E+03	2.28E+03	4.05E+03	7.80E+03	1.23E+04	2.47E+04	4.75E+04	
Pente [-]	0.0295	0.0559	0.0792	0.0870	0.0944	0.1147	0.1178	0.1582	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	4.05E-07	1.61E-07	1.49E-07	1.52E-07	1.88E-07	2.50E-07	3.13E-07	3.73E-07	
k [m/s]	2.69E-10	1.01E-10	6.34E-11	3.87E-11	2.69E-11	2.22E-11	1.47E-11	1.07E-11	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations:

Essai accrédité

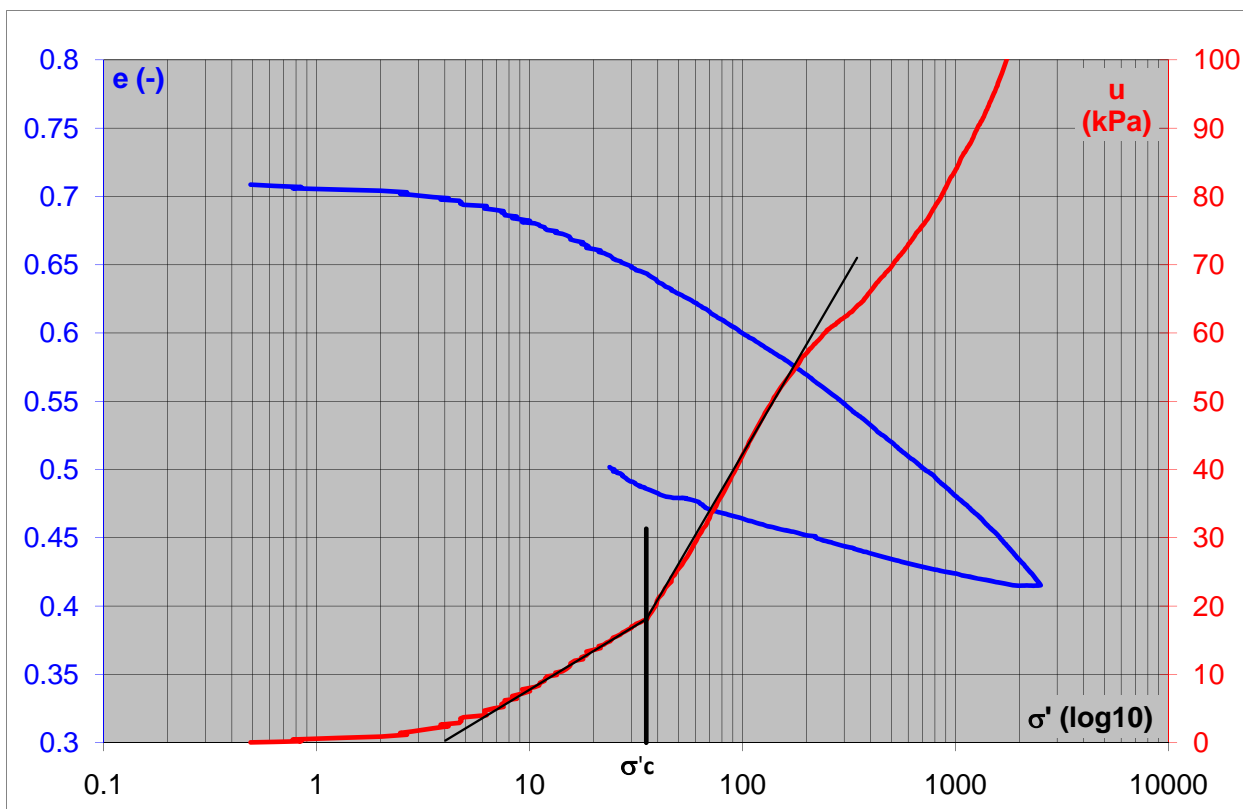
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Gallerie de Chouly (GE)		OFROU	Berne	
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
Ech. 2	5.10 - 5.20	Argile limoneuse			13.11.2008
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide			GSt		

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.789	2.700	0.525	0.709	2.02	26.4	26.2	18.6	35



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.701	0.683	0.650	0.623	0.591	0.558	0.520	0.481	0.415
$E_{oed}$ [kPa]	7.89E+02	1.21E+03	1.82E+03	3.35E+03	5.96E+03	1.06E+04	1.98E+04	3.44E+04	
Pente [-]	0.0350	0.0666	0.0875	0.0987	0.1093	0.1244	0.1313	0.1633	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	4.88E-07	2.29E-07	1.85E-07	1.68E-07	1.66E-07	2.06E-07	2.62E-07	3.23E-07	
k [m/s]	4.77E-10	1.60E-10	8.27E-11	4.48E-11	2.64E-11	2.00E-11	1.38E-11	9.71E-12	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations:

Essai accrédité

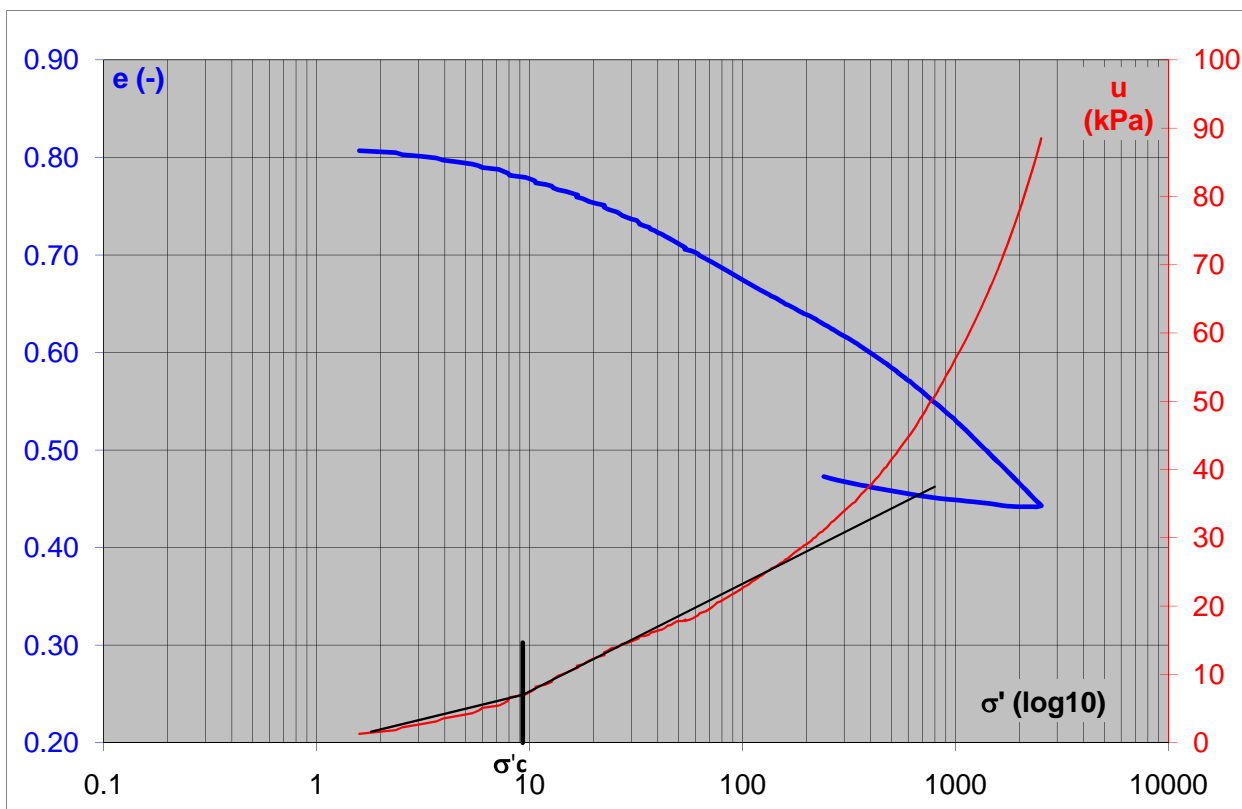
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS		-	-	
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval3	14.3	Limon	-	-	01.12.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Carottage		GSt		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.824	2.700	1.073	0.770	1.96	26.5	28.5	17.5	9



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.803	0.779	0.737	0.703	0.663	0.627	0.585	0.532	0.443
$E_{oed}$ [kPa]	5.08E+02	9.04E+02	1.56E+03	2.73E+03	5.82E+03	9.45E+03	1.44E+04	2.61E+04	
Pente [-]	0.0405	0.0858	0.1137	0.1261	0.1177	0.1404	0.1785	0.2176	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	6.33E-07	3.23E-07	3.04E-07	3.68E-07	4.64E-07	6.18E-07	7.82E-07	9.30E-07	
k [m/s]	8.71E-10	3.06E-10	1.86E-10	1.31E-10	8.04E-11	6.48E-11	5.48E-11	3.72E-11	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon faiblement remanié

Essai accrédité

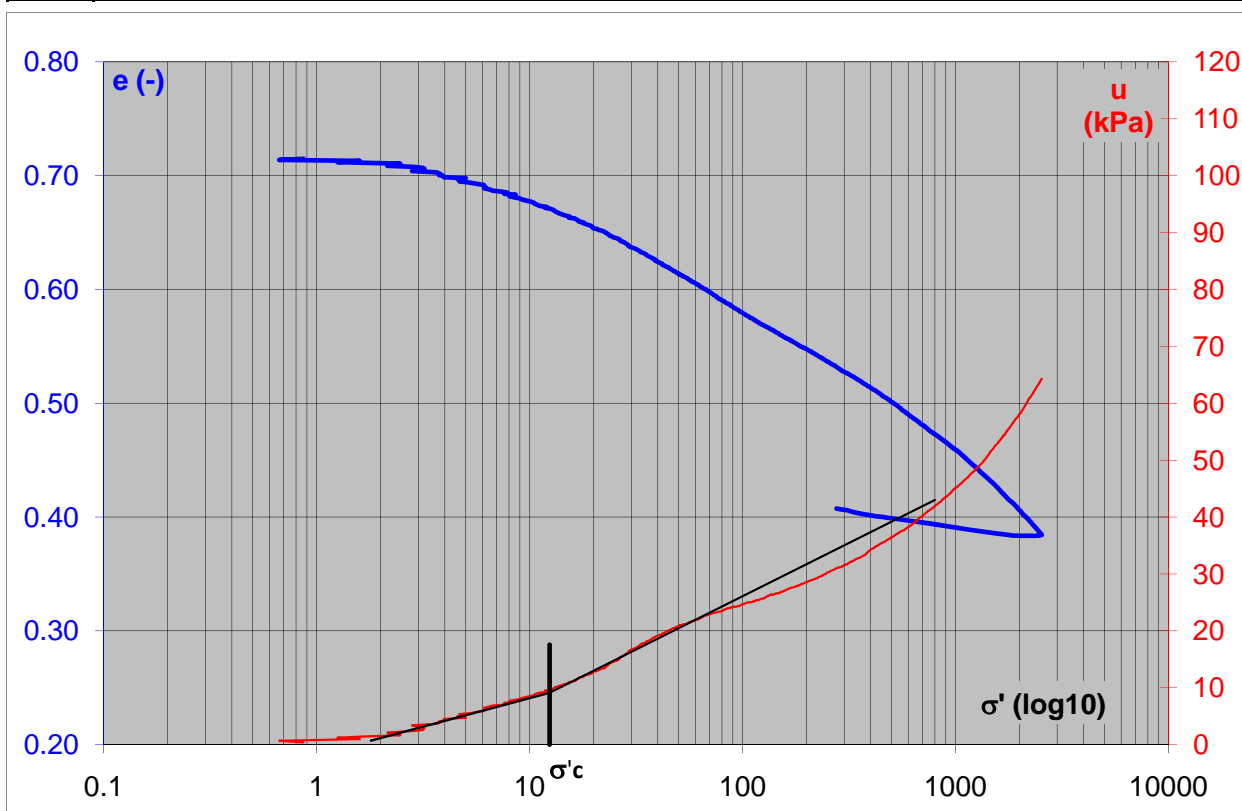
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS		-	-	
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval3_2	14.2-14.5	Limon	-	-	01.12.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Carottage		GSt		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.591	2.700	1.046	0.716	2.00	25.7	26.5	15.1	12



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.704	0.678	0.637	0.606	0.569	0.537	0.502	0.460	0.384
$E_{oed}$ [kPa]	6.65E+02	8.64E+02	1.55E+03	2.85E+03	6.25E+03	1.11E+04	1.79E+04	2.97E+04	
Pente [-]	0.0486	0.0833	0.1043	0.1164	0.1055	0.1176	0.1395	0.1845	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	4.82E-07	2.91E-07	2.69E-07	3.34E-07	4.86E-07	6.94E-07	9.36E-07	1.21E-06	
k [m/s]	6.58E-10	2.85E-10	1.59E-10	1.18E-10	7.96E-11	6.49E-11	5.45E-11	4.19E-11	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon faiblement remanié

Essai accrédité

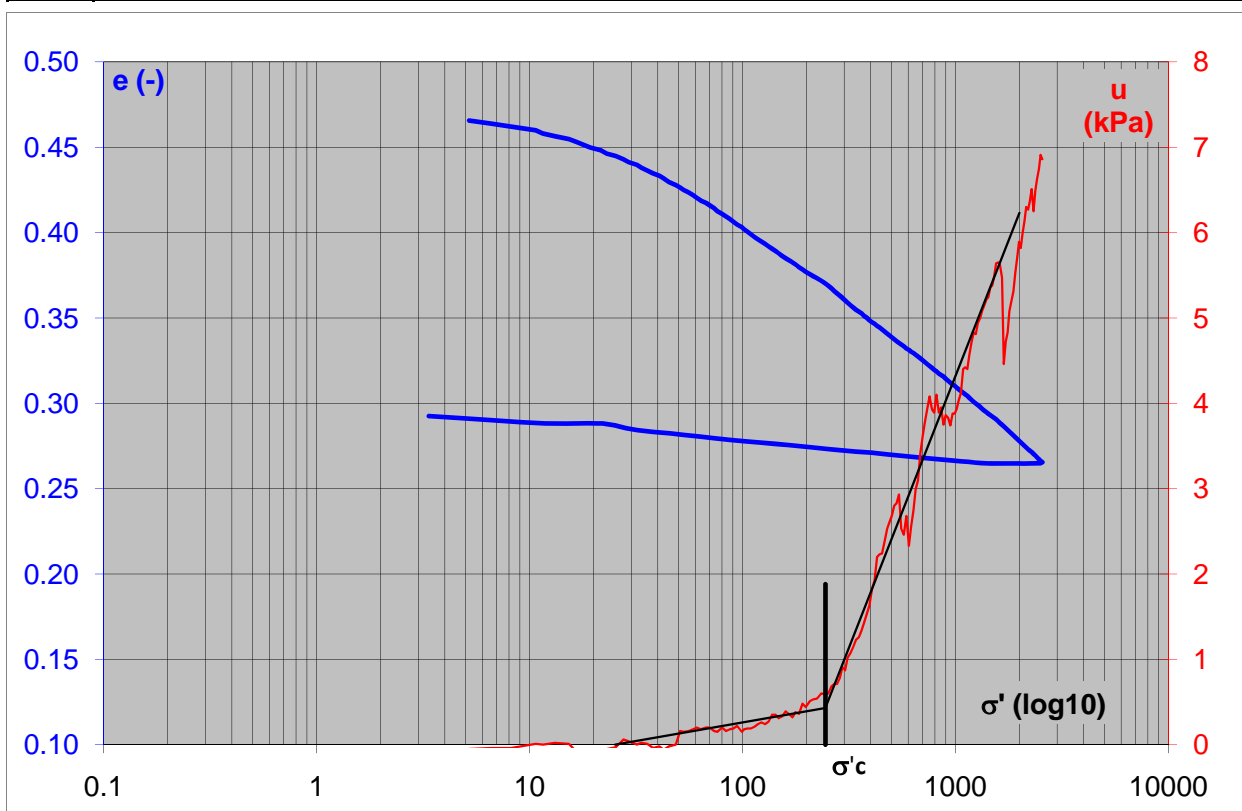
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation ordomètre CRS		-	-	
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval4	14.3	Limon	-	-	01.12.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Carottage à la presse hydraulique		GSt	-	EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.936	2.700	1.019	0.484	2.02	13.5	17.9	10.8	245



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	#N/A	0.462	0.441	0.422	0.395	0.370	0.340	0.310	0.265
$E_{oed}$ [kPa]	#N/A	1.48E+03	2.13E+03	3.30E+03	6.83E+03	1.11E+04	2.26E+04	4.55E+04	
Pente [-]	#N/A	0.0378	0.0638	0.0848	0.0816	0.1012	0.0962	0.1088	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	#N/A	3.99E-04	1.76E-04	5.53E-05	4.80E-05	2.34E-05	1.41E-05	1.59E-05	
k [m/s]	#N/A	2.34E-07	1.04E-07	1.71E-08	7.56E-09	2.41E-09	6.52E-10	3.65E-10	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon fortement remanié

Essai accrédité

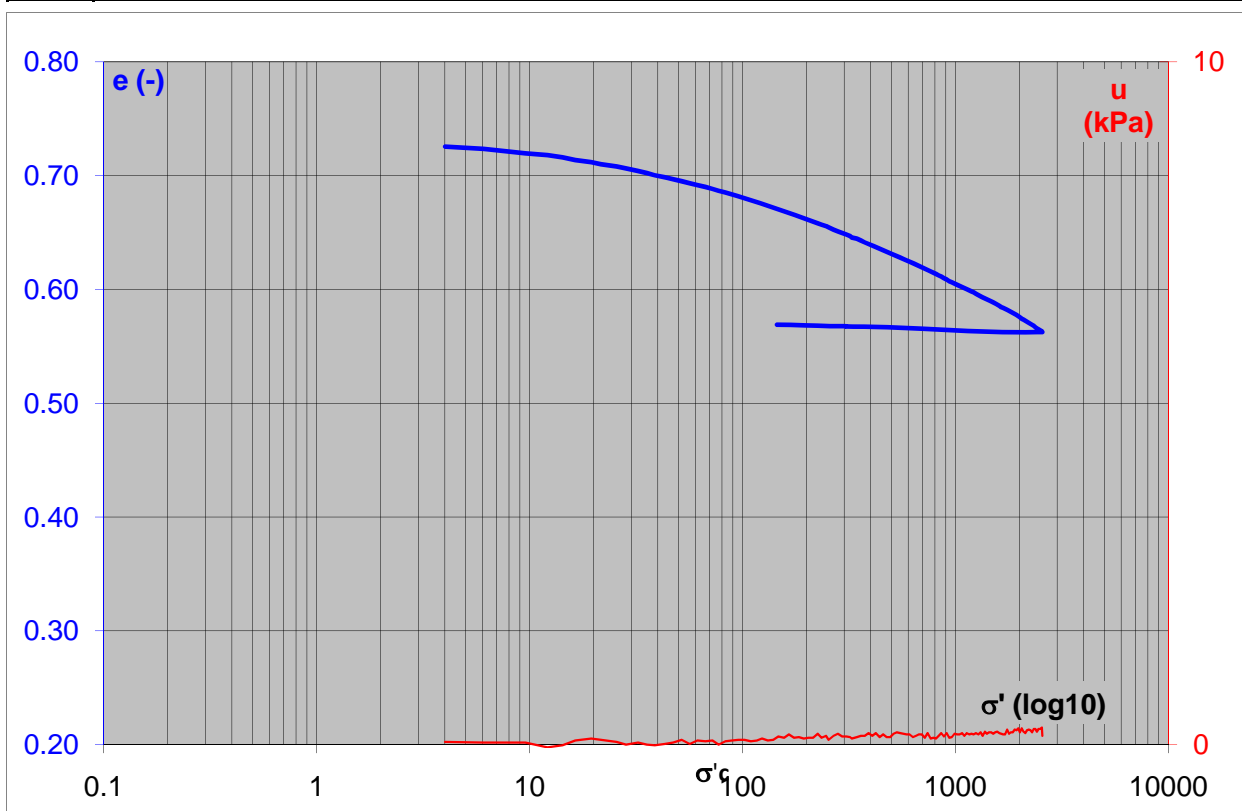
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation ordomètre CRS		-	-	
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval5	21.95	Limon peu sableux	-	-	30.11.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Carotte		GSt	-	EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.964	2.700	0.903	0.729	1.96	27.3	27.0	21.1	0



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	#N/A	0.720	0.706	0.693	0.675	0.656	0.632	0.605	0.563
$E_{oed}$ [kPa]	#N/A	2.35E+03	3.58E+03	6.10E+03	1.03E+04	1.73E+04	3.01E+04	5.90E+04	
Pente [-]	#N/A	0.0281	0.0434	0.0536	0.0652	0.0787	0.0886	0.1032	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	#N/A	1.68E-04	7.88E-04	4.29E-04	2.82E-04	3.49E-04	5.05E-04	5.33E-04	
k [m/s]	#N/A	7.61E-08	1.94E-07	7.74E-08	2.84E-08	2.08E-08	1.69E-08	9.44E-09	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Sol trop perméable pour mesurer des pressions interstielles

Essai accrédité

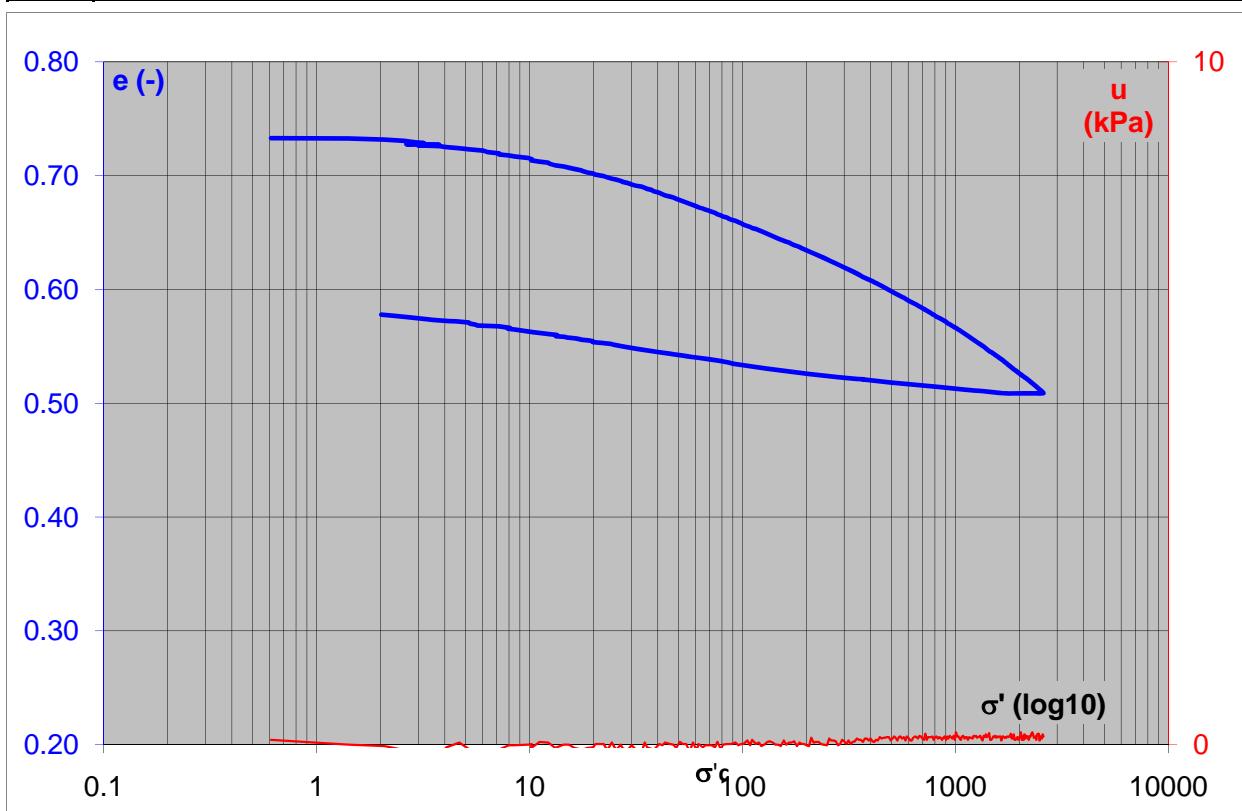
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation ordomètre CRS		-	-	
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval5_2	21.95	Limon peu sableux	-	-	30.11.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Carotte		GSt	-	EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.731	2.700	1.097	0.735	1.97	27.6	27.2	21.4	0



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.728	0.716	0.693	0.674	0.651	0.626	0.599	0.567	0.509
$E_{oed}$ [kPa]	1.64E+03	1.50E+03	2.65E+03	4.61E+03	8.43E+03	1.44E+04	2.50E+04	4.36E+04	
Pente [-]	0.0211	0.0474	0.0627	0.0722	0.0801	0.0928	0.1062	0.1390	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	1.40E-04	3.67E-04	7.82E-04	1.13E-03	1.19E-03	9.74E-04	6.48E-04	8.61E-04	
k [m/s]	1.11E-07	2.81E-07	2.60E-07	2.37E-07	1.39E-07	7.03E-08	2.67E-08	2.04E-08	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Sol trop perméable pour mesurer des pressions interstielles

Essai accrédité

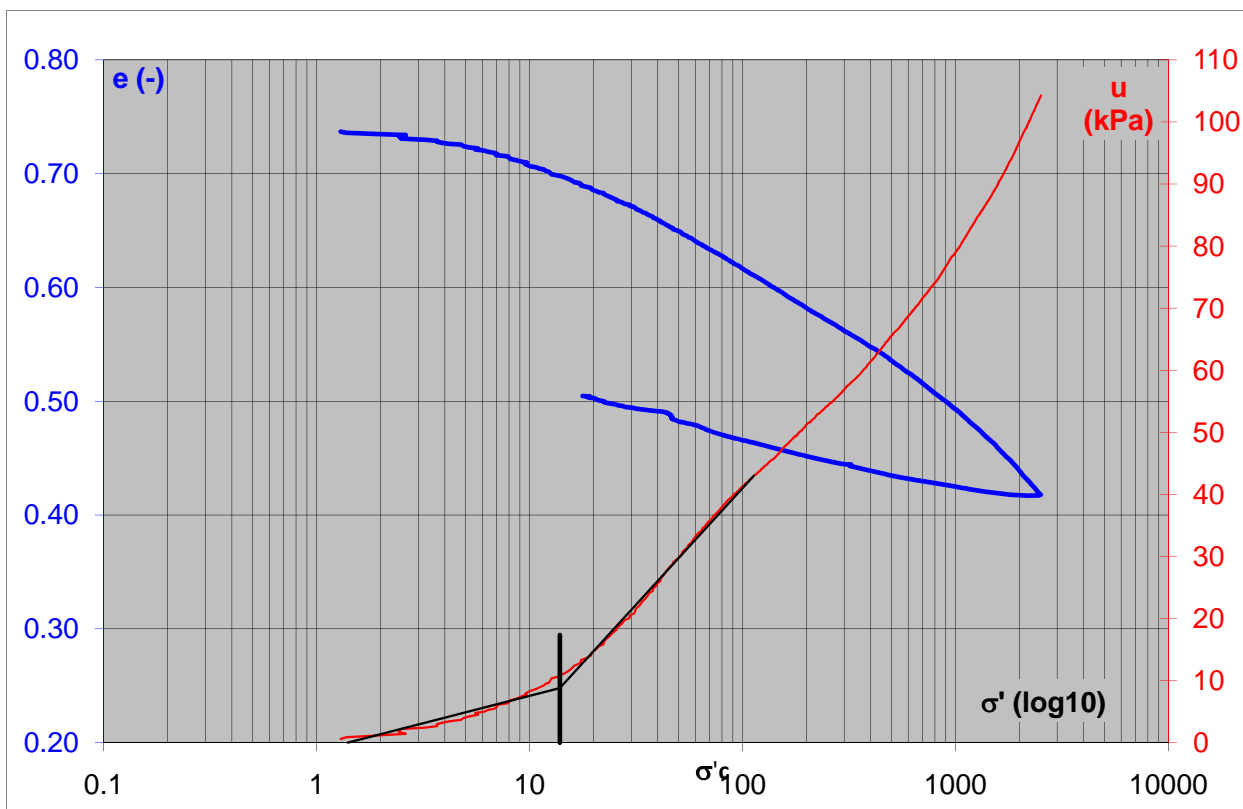
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS				
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval6	15.6-16.3	Limon argileux			14.12.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Carotte		Gst		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.606	2.700	1.047	0.738	2.00	28.1	27.3	18.7	14



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.731	0.708	0.672	0.641	0.607	0.571	0.536	0.494	0.418
$E_{oed}$ [kPa]	5.99E+02	9.45E+02	1.60E+03	2.98E+03	5.92E+03	1.13E+04	1.79E+04	2.97E+04	
Pente [-]	0.0392	0.0748	0.1001	0.1099	0.1151	0.1172	0.1424	0.1871	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	6.83E-07	3.37E-07	2.48E-07	2.40E-07	2.90E-07	3.91E-07	5.27E-07	7.21E-07	
k [m/s]	8.26E-10	2.73E-10	1.24E-10	7.42E-11	4.96E-11	3.51E-11	3.00E-11	2.49E-11	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon faiblement remanié

Essai accrédité

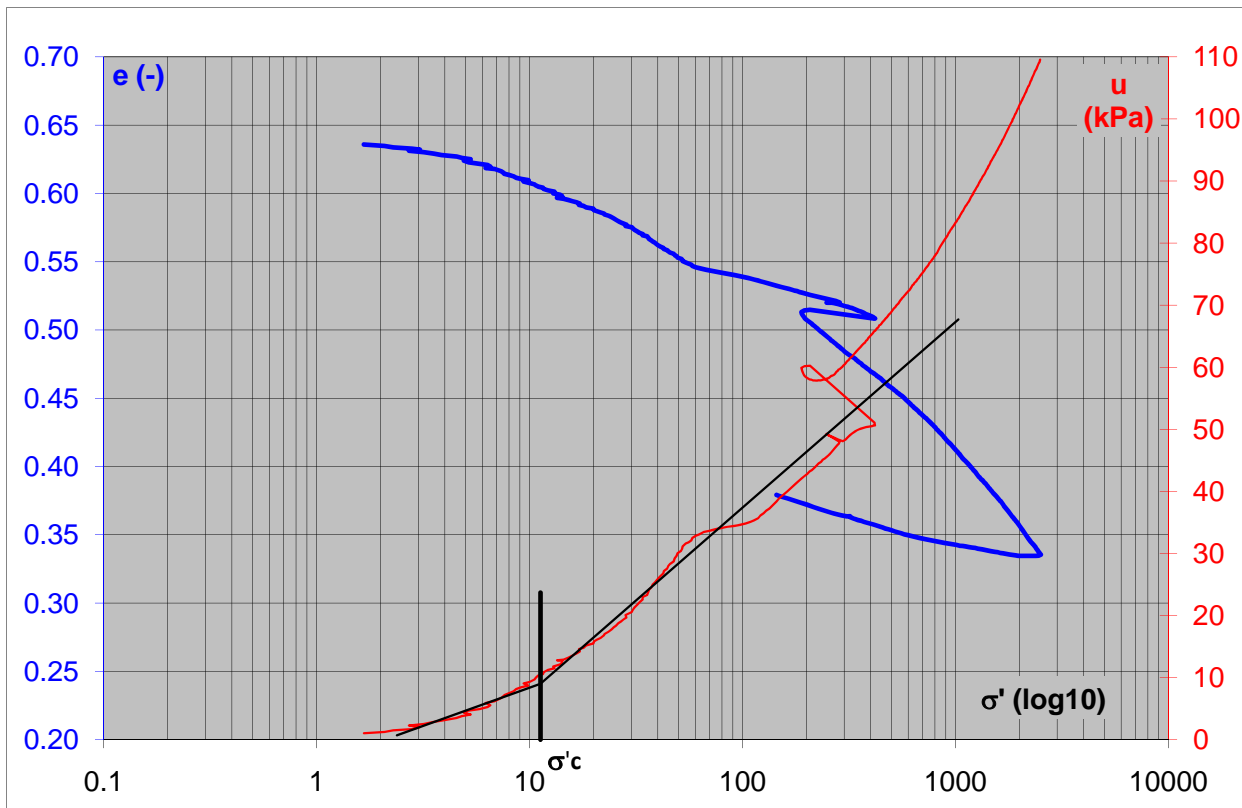
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS				
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval6_2	15.6-16.3	Argile limoneuse			14.12.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Carotte		Gst		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	18.601	2.700	0.983	0.649	2.11	28.0	24.0	14.0	11



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.631	0.608	0.576	0.547	0.536	0.523	0.458	0.413	0.336
$E_{oed}$ [kPa]	6.89E+02	1.09E+03	1.58E+03	8.21E+03	1.58E+04	1.33E+04	1.61E+04	2.75E+04	
Pente [-]	0.0416	0.0697	0.0934	0.0353	0.0413	0.2150	0.1503	0.1918	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	6.05E-07	2.92E-07	2.27E-07	6.47E-07	5.87E-07	6.18E-07	4.43E-07	6.01E-07	
k [m/s]	7.04E-10	2.21E-10	1.18E-10	7.74E-11	3.85E-11	4.00E-11	2.77E-11	2.26E-11	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon faiblement remanié

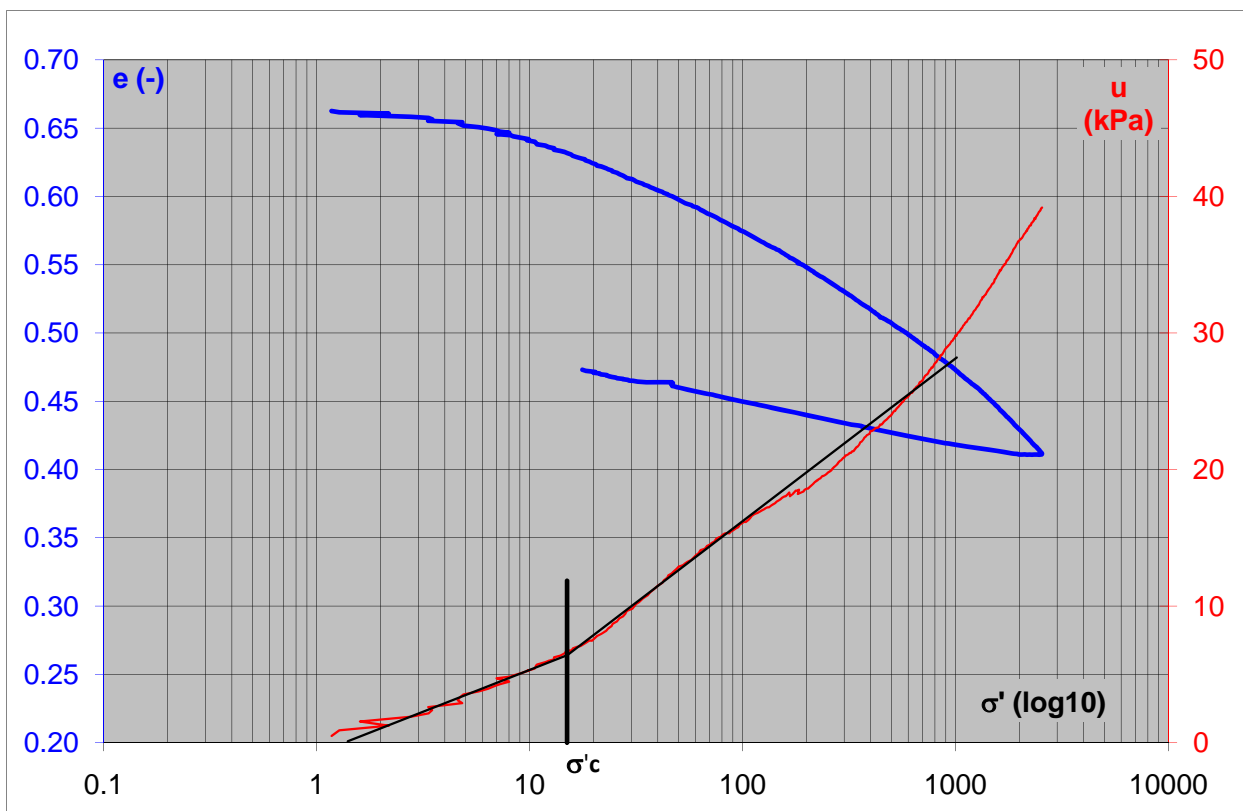
Essai accrédité	
oui	non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS				
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval7	8.5-8.7	Limon argileux			09.12.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Carotte		Gst		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.841	2.700	0.996	0.664	2.03	24.5	24.6	17.5	15



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.658	0.641	0.613	0.593	0.567	0.539	0.507	0.473	0.412
$E_{oed}$ [kPa]	9.80E+02	1.09E+03	2.31E+03	3.92E+03	7.29E+03	1.45E+04	2.24E+04	3.76E+04	
Pente [-]	0.0317	0.0591	0.0661	0.0806	0.0919	0.1037	0.1138	0.1509	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	1.21E-06	5.97E-07	6.58E-07	7.85E-07	1.04E-06	1.28E-06	1.62E-06	2.14E-06	
k [m/s]	1.07E-09	4.96E-10	2.68E-10	1.99E-10	1.44E-10	1.06E-10	7.51E-11	5.97E-11	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon faiblement remanié

Essai accrédité

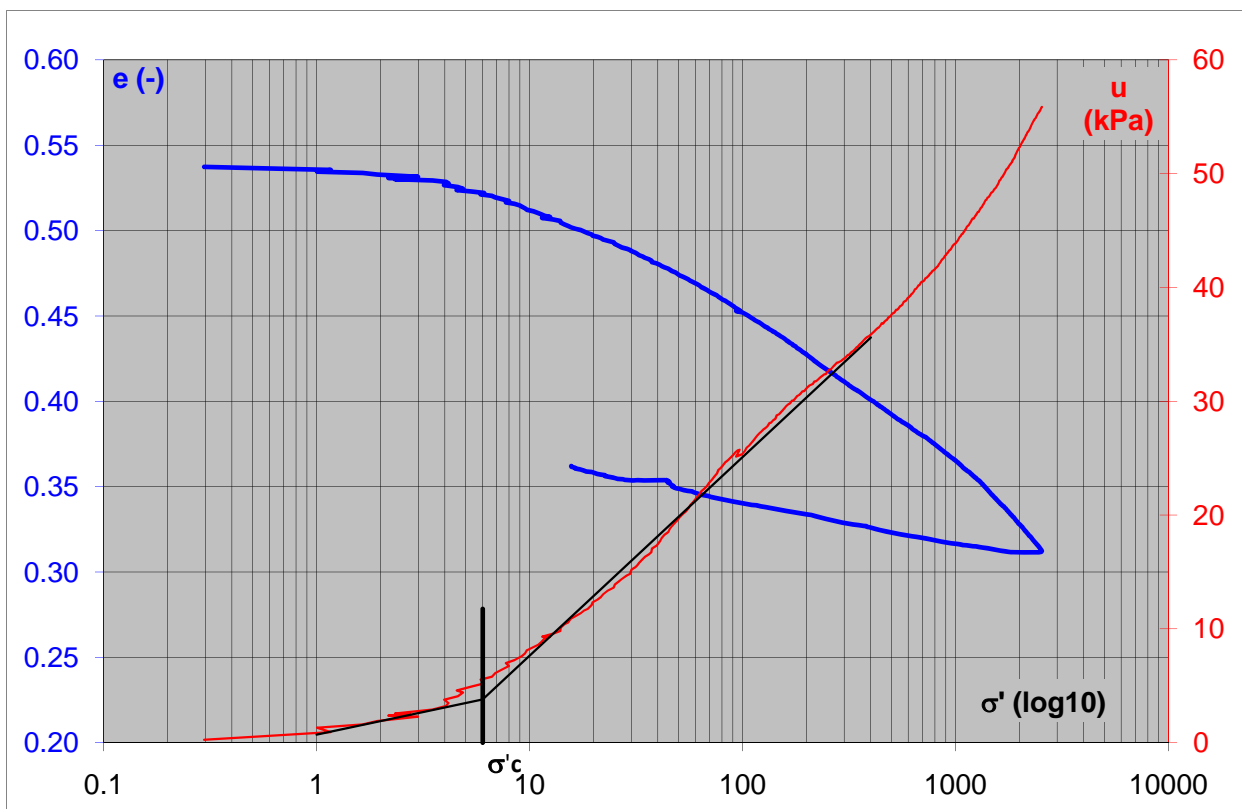
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS				
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval7_2	8.5-8.7	Limon argileux			09.12.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Carotte		Gst		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	18.589	2.700	0.947	0.538	2.17	23.4	19.9	13.4	6



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.530	0.512	0.489	0.470	0.445	0.419	0.393	0.365	0.312
$E_{oed}$ [kPa]	9.81E+02	1.43E+03	2.27E+03	4.52E+03	6.80E+03	1.38E+04	2.62E+04	4.00E+04	
Pente [-]	0.0290	0.0485	0.0637	0.0763	0.0870	0.0864	0.0897	0.1306	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	6.81E-07	4.45E-07	4.03E-07	5.01E-07	5.80E-07	7.67E-07	1.03E-06	1.41E-06	
k [m/s]	6.28E-10	2.78E-10	1.58E-10	1.12E-10	8.55E-11	5.76E-11	4.08E-11	3.66E-11	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon faiblement remanié

Essai accrédité

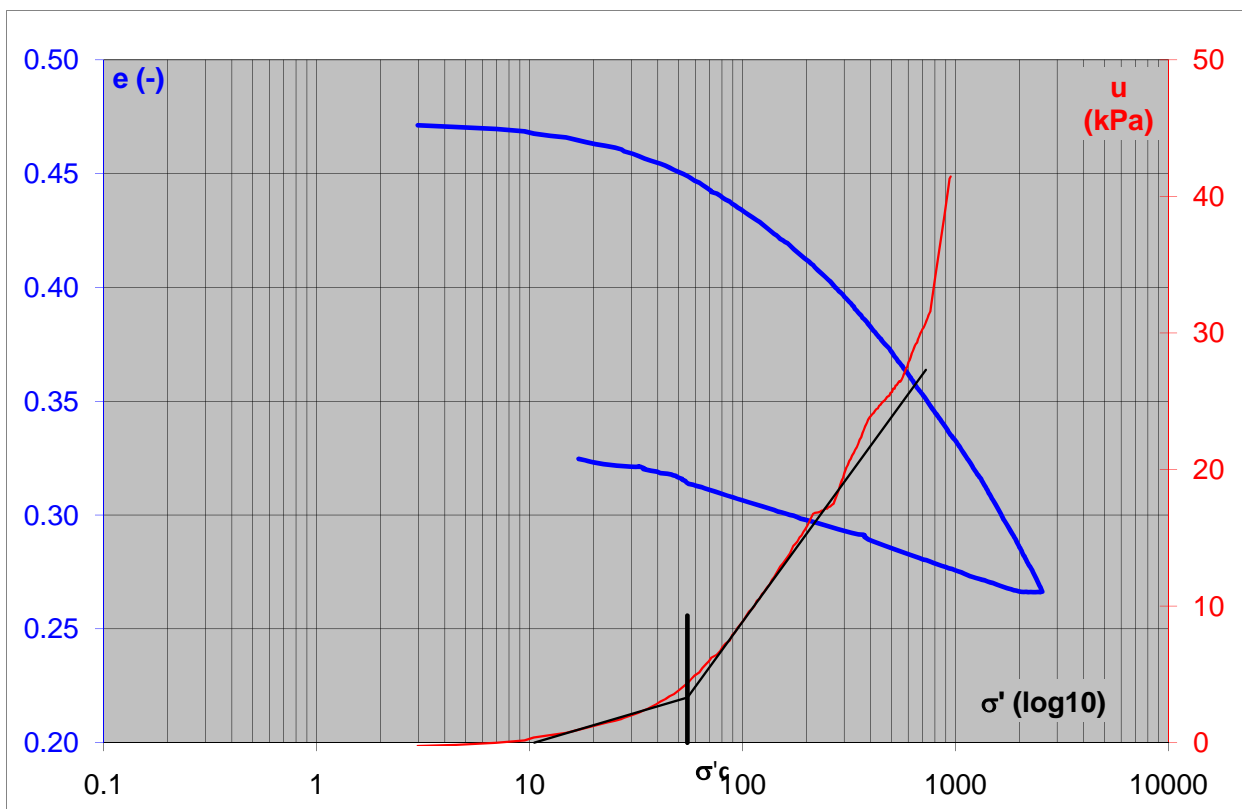
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS				
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval8	-	Limon argileux graveleux			09.12.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Motte		Gst		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	17.885	2.700	1.022	0.438	2.26	21.6	16.2	12.4	55



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.471	0.469	0.460	0.447	0.428	0.404	0.372	0.333	0.266
$E_{oed}$ [kPa]	#VALEUR!	3.22E+03	3.40E+03	4.77E+03	7.51E+03	1.11E+04	1.77E+04	3.11E+04	
Pente [-]		0.0052	0.0188	0.0390	0.0599	0.0787	0.1060	0.1301	0.1625
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]		9.13E-05	1.88E-05	4.11E-06	2.05E-06	1.46E-06	1.30E-06	1.22E-06	2.89E-06
k [m/s]		2.40E-08	5.70E-09	1.18E-09	4.23E-10	1.97E-10	1.20E-10	7.26E-11	9.52E-11

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon faiblement remanié

Essai accrédité

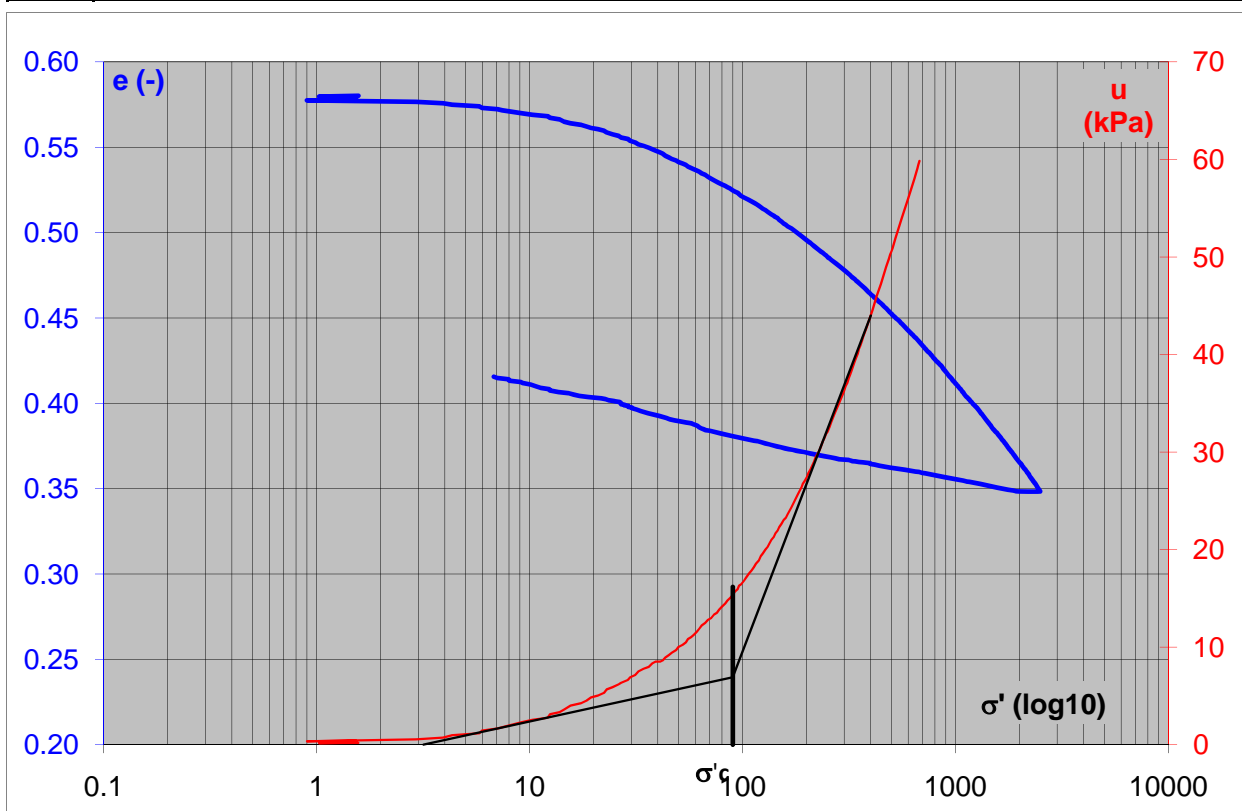
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS				
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval8_2	-	Limon argileux graveleux			09.12.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Motte		Gst		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	19.648	2.700	1.046	0.581	2.06	21.0	21.5	15.4	90



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.577	0.570	0.554	0.537	0.514	0.487	0.453	0.412	0.348
$E_{oed}$ [kPa]	1.70E+03	2.02E+03	2.66E+03	4.36E+03	6.70E+03	1.09E+04	1.78E+04	3.38E+04	
Pente [-]	0.0134	0.0319	0.0560	0.0711	0.0922	0.1113	0.1354	0.1591	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	7.43E-06	2.06E-06	1.19E-06	1.02E-06	9.01E-07	7.79E-07	7.00E-07	6.60E-07	
k [m/s]	3.23E-09	9.28E-10	4.21E-10	2.25E-10	1.31E-10	7.01E-11	3.97E-11	2.05E-11	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon faiblement remanié

Essai accrédité

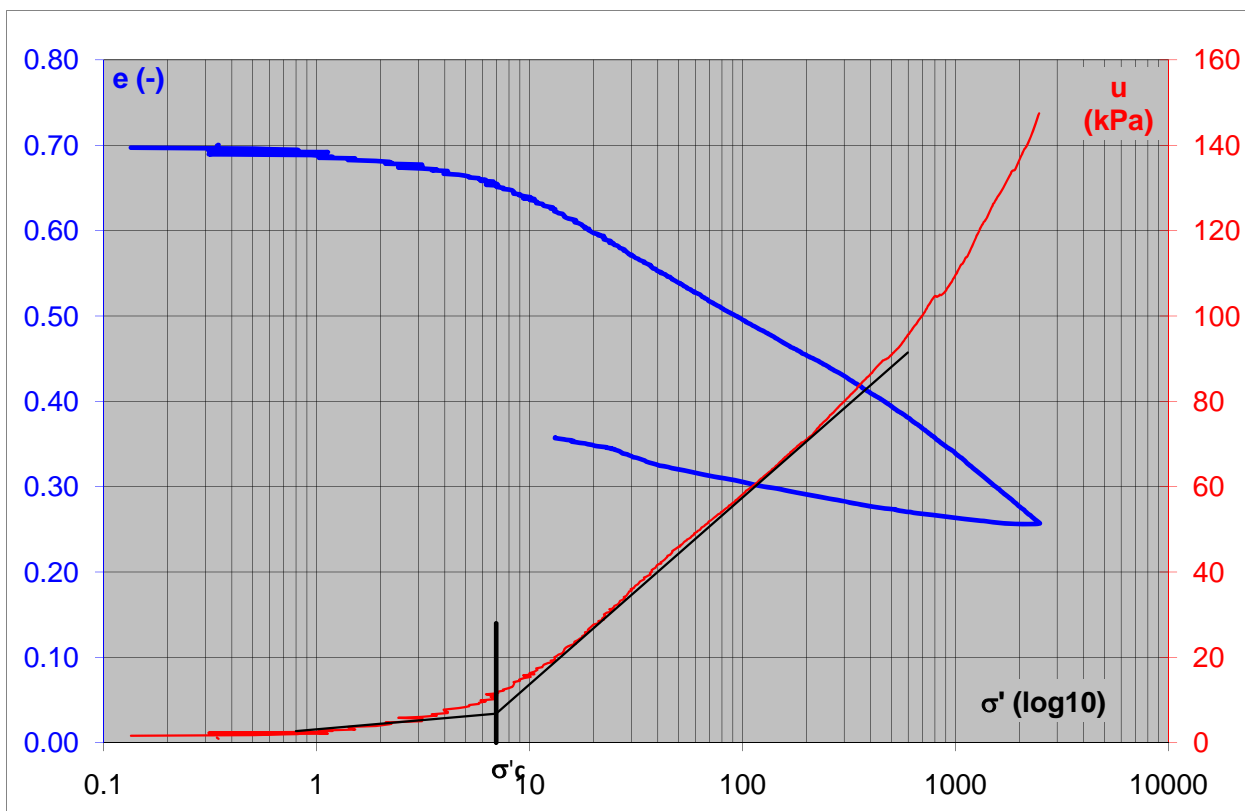
oui non

# Essai oedométrique CRS

Exécuté selon le mo LMS+R

No d'étude	Titre de l'étude		Commettant		
			nom	adresse	
SX102	Validation oedomètre CRS				
N° échantillon	Prof. (m)	Nature du terrain	Echantillon prélevé par	Date réception	Date essai
CRSval9	3.5-3.9	Argile			09.12.2009
Mode de conservation	Préparation de l'éprouvette		Ingénieur responsable		Opérateur
			Nom	Signature	
Chambre humide	Motte		Gst		EM

Éprouvettes		$\rho_s$ (t/m <sup>3</sup> )	Vitesse (mm/h)	e initial (-)	$\rho$ initial (t/m <sup>3</sup> )	W initiale (%)	W sat initiale (%)	W finale (%)	$\sigma'_c$ (kN/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$ (mm)	h (mm)								
50.4	18.674	2.700	1.109	0.703	2.03	28.5	26.0	13.2	7



**Charge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]	0.674	0.636	0.572	0.528	0.483	0.441	0.395	0.340	0.258
$E_{oed}$ [kPa]	6.38E+02	6.51E+02	1.11E+03	2.21E+03	4.56E+03	7.64E+03	1.27E+04	2.42E+04	
Pente [-]	0.0616	0.1364	0.1457	0.1395	0.1372	0.1557	0.1833	0.2068	
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]	2.64E-07	1.09E-07	8.65E-08	1.04E-07	1.42E-07	1.98E-07	2.84E-07	3.89E-07	
k [m/s]	3.42E-10	1.31E-10	6.49E-11	4.38E-11	3.04E-11	2.57E-11	2.29E-11	1.69E-11	

**Recharge**

$\sigma'$ [kPa]	3	10	30	60	125	250	500	1000	3000
e [-]									
$E_{oed}$ [kPa]									
Pente [-]									
$C_v$ [m <sup>2</sup> /s]									
k [m/s]									

Observations: Echantillon faiblement remanié

Essai accrédité

oui non