



## NOTE TECHNIQUE

### APPLICATION WEB – DÉPOUILLEMENT DES ESSAIS DE COMPRESSIBILITÉ À L'ŒDOMÈTRE PAR PALIERS

Le 01/12/2025

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. RAPPEL SUR L'ESSAI DE COMPRESSIBILITÉ PAR PALIERS

L'essai œdométrique est un essai effectué en laboratoire. Il permet de reproduire les conditions de déformation des sols, dans le cas d'un massif à la surface horizontale, chargé par une pression uniforme, et où le sol ne peut se déplacer que verticalement.

Il existe plusieurs types d'œdomètre et d'essai œdométrique. Le présent document ne traite que de l'**essai de compressibilité par paliers**, sans application d'une contre-pression.

Il s'agit d'un essai effectué sur les sols fins et saturés. Il fournit des indications à la fois sur la compressibilité du sol (les tassements en fonction de la charge appliquée) et sur sa vitesse de consolidation (les tassements pour une charge donnée, en fonction du temps).

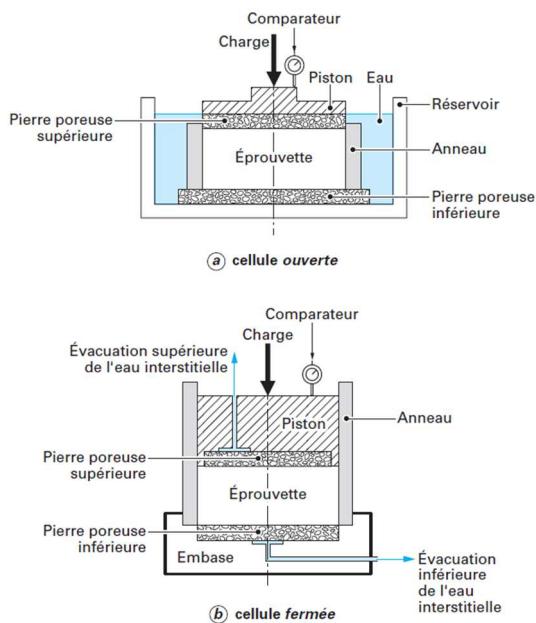
Pour réaliser cet essai, un échantillon de sol est prélevé à partir d'un carottage et est placé dans l'appareil, que nous allons décrire brièvement ci-dessous :

L'appareil œdométrique comporte deux parties :

- Une cellule contenant l'éprouvette de sol.
- Un système de mise en charge.

Les cellules œdométriques comportent entre autres :

- Une bague annulaire rigide contenant l'éprouvette de sol,
- Deux pierres poreuses assurant le drainage des deux faces inférieures et supérieures de l'éprouvette,
- Un piston coulissant à l'intérieur de l'anneau et venant charger l'éprouvette,
- Un ou deux comparateurs pour mesurer les déplacements verticaux du piston,



Cellules oedométriques (Magnan J.P. (2015). Déformabilité des sols. Tassemements. Consolidation. Techniques de l'Ingénieur.)[2]

L'essai se déroule de la manière suivante : On applique une charge sur l'échantillon de sol et on mesure la déformation jusqu'à ce qu'elle se stabilise, puis on applique une charge plus forte et on recommence les observations, etc.

Pour appliquer les charges nécessaires sur le piston de l'oedomètre, on utilise principalement des systèmes mécaniques de chargement par poids, ou des systèmes pneumatiques ou hydrauliques.

## 1.2. NÉCESSITÉ DE LA CRÉATION D’UN APPLICATION WEB POUR LE DÉPOUILLEMENT DES ESSAIS OEDOMÉTRIQUES

Un audit de Camille Chagnon avait relevé plusieurs interrogations sur l’outil de dépouillement actuellement utilisé dans nos laboratoires, à la suite de quoi nous sommes venus le 14/05/2025 au laboratoire de Fontaines et nous avons bénéficié des enseignements de Vincent Tetu sur les procédés de suivi et de dépouillement de l’essai à l’œdomètre par paliers de chargement.

Lors de cet après-midi, nous avons relevé plusieurs axes d’amélioration qui devront être intégrés dans l’application web en développement :

1. Pouvoir importer automatiquement les mesures contenues dans les fichiers Excel en sortie des bâts œdo. À ce jour, les données de sortie des bâts œdo sont copiés-collés dans la feuille de dépouillement :



Programme	Tassement (mm)	Time (S)	Changement augmentatif (mm)	Force (N)	Pression (kPa)	Charges	
						σ'vo	σ'vo immergé
7,467	0	0,4559999	0,03000021	449	115	0	0
7,497	6	0,4860001	0,03499985	449	115	0,25	248
7,502	12	0,4909997	0,03499985	449	115	1	439
7,507	24	0,4939998	0,03999996	451	116	2	686
7,519	60	0,5079999	0,05200005	452	116	4	1034
7,531	120	0,52	0,06400013	450	115	2	1003
7,544	240	0,533	0,07700014	449	115	0,25	869
7,563	480	0,552	0,09600019	451	116	2	976
7,57	600	0,559	0,1030002	448	115	4	1070
7,593	1200	0,5819998	0,1259999	448	115	8	1457
7,616	2400	0,605	0,1490002	450	115	16	1970
7,645	6000	0,6339998	0,178	449	115	32	2473
7,662	12000	0,651	0,1950002	449	115	0,25	1886
7,679	24000	0,6679997	0,2119999	449	115	0	0
7,681	36000	0,6700001	0,2140002	448	115		
7,686	48000	0,6749997	0,2189998	450	115		
7,687	60000	0,6759996	0,219998	450	115		
7,688	72000	0,678	0,2210002	449	115		
7,689	86400	0,678	0,2220001	448	115		

*Exemple illustrant la manipulation actuellement effectuée en laboratoire.*

Nos laboratoires sont équipés à la fois d’œdomètres à chargement mécanique, conçus en interne, et d’œdomètres à chargement hydraulique automatique (bâti ACONS).

Actuellement, les déformations de l’éprouvette sont enregistrées dans des fichiers .xlsx. La disposition des résultats dans ces fichiers .xlsx varie selon le bâti utilisé (mécanique ou hydraulique). Toutefois, une évolution est en cours : les systèmes d’acquisition des appareils mécaniques seront prochainement adaptés afin de fournir des résultats dans des fichiers ressemblant aux fichiers en sortie des bâti automatique. Cette homogénéisation est favorable à la création d’un outil de dépouillement automatisé, tant il simplifie l’importation des résultats contenus dans le fichier .xlsx vers l’outil de dépouillement.

Un premier objectif de notre projet est de créer un outil permettant l’importation automatique des résultats d’un essai dans l’application de développement, à partir des fichiers .xlsx.

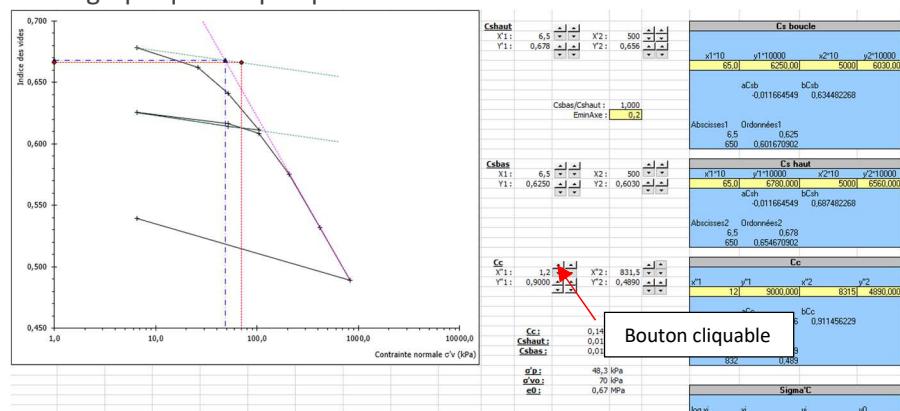
2. La feuille de dépouillement actuelle ne dispose pas de notice. Certains calculs sont obscurs tant les formules Excel contenues dans les cellules peuvent parfois être longues. Une case peut être cochée pour indiquer un sol gonflant à la mise en eau. Cependant, il n’y a aucune incidence sur les résultats. Notre objectif est alors ici de proposer un nouvel outil de dépouillement accompagné d’une notice, qui retrace tous les principes théoriques utilisés pour mener à bien les calculs.
3. Les pas de temps de mesure des tassements pour chaque palier sont figés.

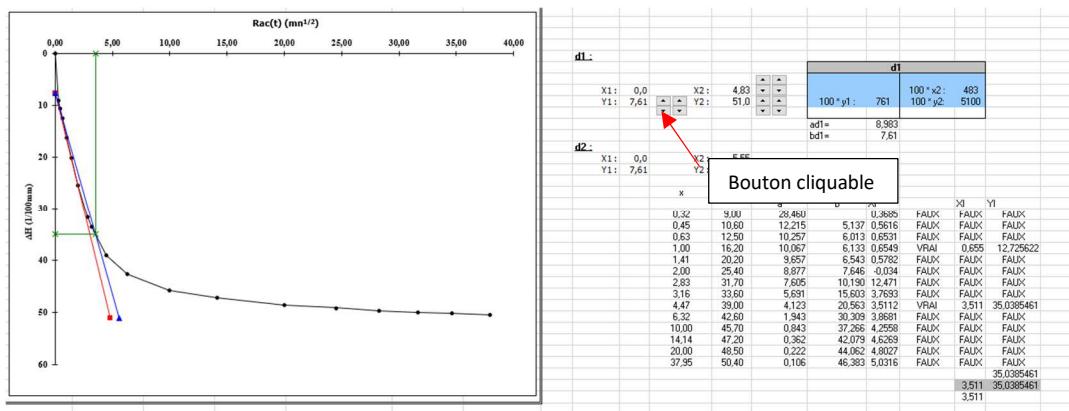


Lecture Direct			
	104	200	416
0	208	416	832
0,1	1077	1462	1975
0,2	1118	1526	2046
0,4	1128	1541	2062
1	1141	1559	2081
2	1164	1593	2118
4	1190	1630	2158
8	1223	1679	2210
10	1265	1742	2273
20	1279	1764	2292
40	1327	1827	2346
100	1366	1871	2382
200	1403	1906	2413
400	1422	1924	2428
600	1437	1937	2441
800	1447	1947	2453
1000	1452	1950	2456
1200	1455	1952	2457
24h	1457	1956	2460
48h		1965	2470
72h		1970	2473
96h		1970	2473

Pourtant, certains paliers sont poursuivis (pour des essais de fluage par exemple), l’acquisition peut alors se poursuivre pendant un week-end. Il aurait été préférable de pouvoir modifier le temps final d’acquisition et d’entrer le tassement correspondant. L’objectif est ici de proposer un outil qui ne limite pas les temps d’acquisition des paliers de charge.

4. La feuille de dépouillement actuelle permet la visualisation des courbes de consolidation « tassement-temps » sur les 3 charges les plus élevées uniquement. Il est quelques fois utile de pouvoir observer ces courbes de consolidation pour une plus large gamme de contraintes. Le nouvel outil de dépouillement devra permettre la visualisation et le dépouillement des courbes de consolidations pour tous les paliers de chargement, hors cycle de décharge – recharge.
5. Le dépouillement des résultats nécessite un dépouillement graphique, qui est peu ergonomique avec l’outil actuel. Nous souhaitons proposer un outil permettant le dépouillement graphique en quelques clics.





6. La répartition des résultats dans les différents onglet du classeur Excel est peu cohérente. Nous souhaitons proposer un outil présentant les résultats d'un manière ordonnée et cohérente.

Nous récapitulons ci-dessous les principaux objectifs du nouvel outil de dépouillement :

- Importation automatique des résultats des bâtis œdo contenu dans un fichier .xlsx vers l'outil de dépouillement,
  - Transparence : Rédiger une trace écrite de tous les calculs effectués par l'outil de dépouillement.
  - Permettre la lecture des essais dont le temps d'acquisition est long,
  - Permettre la visualisation et le dépouillement de toutes les courbes de consolidation pour tous les paliers de chargement, hors cycle de décharge / recharge,
  - Améliorer l'ergonomie du dépouillement : Permettre un dépouillement graphique quelques clics.

L'objectif de ce projet est le développement d'un outil permettant d'améliorer l'ergonomie et la transparence du dépouillement des données de sortie des œdomètres. Pour suivre la tendance actuelle de modernisation des outils informatiques du groupe Hydrogéotechnique qui se traduit entre autres par la création d'outils en ligne, et compte tenu des faibles capacités d'Excel pour réaliser des dépouilements graphiques, il nous a paru plus adapté d'orienter le projet vers la création d'une nouvelle application web. Dans cette optique, nous avons souhaité mettre une priorité sur l'ergonomie, la clarté du procédé et la qualité des résultats. Le projet s'est aussi quelque peu orienté vers une sophistication du procédé de dépouillement en s'aidant des outils numériques. Ce document retrace étape par étape le procédé de dépouillement contenu dans l'application web, les choix techniques, ainsi que les calculs détaillés.

## 2. IMPORTATION DES DONNÉES

## **2.1. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS EN SORTIE DES BÂTIS OEDOMÉTRIQUES**

Une fois l'essai réalisé, les résultats sont disponibles sur un fichiers Excel .xlsx. Ce classeur est composé de feuilles (ou « onglets »). Les deux premières feuilles contiennent des informations générales. Les suivantes correspondent aux paliers de charges :

Description Echantillon	
Nom	E1 13.40m
Profondeur	
Type d'échar	
Mémo	
Détails de l'essai	
&Client	hydrogeo
Référence di	
Fichier	Le Havre
Nom	SC1302
Nom de l'ess	A4 SC1302 13.40m
Type d'essai	csoedo
Norme	France
Version d'es	0
Test Plan Ve	113
Echantillons	False
Mémo	
Opérateur Andre Aurore/ Wintenberger Anthony	
Vérifié	Tomasi Simon
Approuvé	Tomasi Simon
Laboratoire	Fontaines HYDROGEOTECHNIQUE
Date	03/04/2025 08:44:45
Données d'essai	
Données communes (1)	
(1;1)Loading 01_ 9 (kPa)	(1;1)Loading 02_ 77 (kPa)
(1;1)Loading 03_ 115 (kPa)	(1;1)Loading 04_ 154 (k ...

Présentation général du fichier de résultats en sortie des bâtis oedo



Regardons l'onglet du palier « 03-115 (kPa) » :

Programme	Tassement (mm)	Time (S)	Changement augmentatif (mm)	Force (N)	Pression (kPa)
7,467	0	0	0,4559999	0	77
7,497	6	6	0,4860001	0,03000021	449 115
7,502	12	12	0,4909997	0,03499985	449 115
7,507	24	24	0,4959998	0,03999996	451 116
7,519	60	60	0,5079999	0,05200005	452 116
7,531	120	120	0,52	0,06400013	450 115
7,544	240	240	0,533	0,07700014	449 115
7,563	480	480	0,552	0,09600019	451 116
7,57	600	600	0,559	0,1030002	448 115
7,593	1200	1200	0,5819998	0,1259999	448 115
7,616	2400	2400	0,605	0,1490002	450 115
7,645	6000	6000	0,6339998	0,178	449 115
7,662	12000	12000	0,651	0,1950002	449 115
7,679	24000	24000	0,6679997	0,2119999	449 115
7,681	36000	36000	0,6700001	0,2140002	448 115
7,686	48000	48000	0,6749997	0,2189999	450 115
7,687	60000	60000	0,6759996	0,2199998	450 115
7,688	72000	72000	0,677	0,2210002	449 115
7,689	86400	86400	0,678	0,2220001	448 115

Données nécessaires à la courbe de consolidation

Données nécessaire à la courbe de compressibilité

#### Présentation du tableau « tassements-temps » contenus dans les onglets du fichier

La colonne « tassement » n'est pas à considérer car elle ne prend pas en compte la hauteur réelle de départ de l'éprouvette. Nous nous intéressons à la colonne « Augmentation de la hauteur », et à la colonne « Temps », qui nous permettront de tracer les courbes de consolidation (tassement – temps)

La méthode LCPC [1] propose d'appliquer chaque charge pendant une période de 24h. « Il s'agit d'une valeur conventionnelle justifiée par plus de cinquante années d'usage courant pour ce type d'essai ».

Lorsqu'une charge est appliquée sur l'éprouvette, la hauteur de l'éprouvette est mesurée grâce au comparateur, aux temps suivants :

0 – 15s – 30s – 1min – 2min – 4min – 8min – 15min – 30min – 60min – 2h – 4h – 8h – 24h.

La durée d'un palier peut être prolongée si la consolidation n'est pas achevée au bout de 24h, ou pour des essais de fluage.

La force finale ainsi que le tassement final à chaque palier de chargement nous permettront de tracer la courbe de compressibilité (tassement - contrainte).



## 2.2. IMPORT DU FICHIER EXCEL

Nous présentons dans les parties qui suivent le dépouillement de l'essai de compressibilité par paliers de chargement à l'oedomètre avec l'outil le nouvelle outil en ligne développé par Eli.

À l'ouverture de cette application web, nous observons une page ressemblant à la suivante :

En 1, nous voyons des boutons nous permettant de créer une nouvelle session, d'en importer une ou d'exporter celle en cours. Lorsque vous enregistrez une session, vous générerez un fichier .json qui contient toutes les informations renseignées lors de votre dépouillement. Vous pouvez réimporter le fichier .json pour reprendre le dépouillement là où vous en étiez.

On peut voir en 2 en entête déjà rempli. Il s'agit ici d'une session importée dont les informations générales ont déjà été remplies. Si vous ouvrez une nouvelle session, cette entête indiquera la mention « En attente des informations générales ».

L'outil de dépouillement est guidé et avance étape par étape. En 3, on peut voir qu'on se situe à l'étape de l'importation des données. Il s'agit de notre « fil d'Ariane », ou « breadcrumb » en anglais.

En 4, un bouton nous permet d'importer les fichiers .xlsx en sortie des bâtis oedo.

Après importation des données, on peut lire la valeurs des contraintes des paliers de chargement en 5. La procédure de l'essai oedométrique diffère selon si le sol gonfle à la mise en eau ou pas. L'application détecte quelle est la procédure qui a été effectué et nous l'indique avec la mention « Cas type sols 'non gonflant' détecté ». La détection est faite de la manière suivante :

- Phase croissante suivie d'une phase décroissante = sols gonflants (un point de retournement).
- Phase croissante → Phase décroissante → Phase croissante → Phase décroissante = sols non gonflants (3 points de retournement).

Dans le cas où le fichier importé ne matcherait aucun de ces deux schémas, l'application laisse alors le choix à l'utilisateur.

Enfin en 6, nous voyons les différents onglets que l'opérateur du laboratoire devra renseigner lors de la première étape du dépouillement. Nous détaillons ces onglets ci-après.



## 2.3. INFORMATIONS GÉNÉRALES

**Informations générales**

Nom du client Nantes Métropole	Température du laboratoire (°C) 20
Nom de la commune Nantes	$f_1 : 0.825$
Numéro de département 44	Date de réalisation du forage 01/12/2025
Nom du forage SC1	Date de prélèvement au laboratoire 02/12/2025
Profondeur de l'échantillon (m) 7,6	Numéro de dossier C.25.35.012

Département : Loire-Atlantique (44) • Zone climatique : H2b •  $T_{sol} : 12.6 °C$

Dans cette onglet sont renseignées les informations générales. Le renseignement de ces informations est obligatoire pour passer aux étapes suivantes.

## 2.4. MATÉRIEL DU LABORATOIRE

**Matériel du laboratoire**

Diamètre de la bague / de l'échantillon (mm) 70	Surface de la bague / de l'échantillon (mm <sup>2</sup> ) 3848.451
Hauteur de la bague (mm) 20	Volume de la bague (mm <sup>3</sup> ) 76969.020
Hauteur de l'échantillon (mm) 17	Volume de l'échantillon (mm <sup>3</sup> ) 65423.667
Masse à vide de la bague (g) 132.2	

Nous voyons ici des cellules grisées pour lesquelles les calculs sont effectués automatiquement.

## 2.5. ÉCHANTILLON TESTÉ

Les premières données dont nous avons besoin pour nos calculs sont celles intrinsèques à l'éprouvette de sol testée. Nous présentons ci-dessous le protocole de préparation de l'éprouvette :

L'échantillon de sol est prélevé à partir d'un échantillon de sol intact (EI). L'échantillon est placé dans une bague cylindrique qui mesure en général 70mm de diamètre et 20mm de hauteur. L'échantillon de sol est arasé à la hauteur de l'éprouvette, ou, s'il est suspecté que l'échantillon argileux se mette à gonfler en début d'essai à la mise en eau, l'échantillon est arasé à une hauteur légèrement inférieure à la hauteur de la bague, à 16mm en général. L'ensemble échantillon+bague est pesé. Le poids de la bague seule doit être connu et renseigné.

Nous retiendrons à ce stade les premières données d'entrée :

- **S** la diamètre de la bague
- **H<sub>0</sub>** la hauteur initial de l'échantillon
- **PTH** le Poids Total Humide de l'ensemble échantillon+bague.
- **P<sub>bague</sub>** le poids de la bague seule



L'essai de compressibilité à l'oedomètre est effectué. À la fin de l'essai, l'échantillon de sol est saturé, et consolidé.

On place l'ensemble échantillon+bague dans une tare (une petite coupelle) et on réalise une première pesée avec l'échantillon saturé. L'ensemble est ensuite placé dans une étuve, puis est pesé à nouveau. Les données à renseigner sont les suivantes :

- $P_{T\text{sat}}$  le poids total à saturation de l'ensemble échantillon+bague+tare à la fin de l'essai
- $PTS$  le poids total sec de l'ensemble échantillon+bague+tare après séchage à l'étuve
- $P_{tare}$  le poids de la tare.

On peut ainsi directement déterminer une teneur en eau à la fin de l'essai :

$$W_{n,\text{fin essai}} = \frac{\text{Masse d'eau}}{\text{Masse du sol sec}}$$

$$W_{n,\text{fin essai}} = \frac{(PTH - P_{bague}) - (PTS - P_{bague} - P_{tare})}{PTS - P_{bague} - P_{tare}}$$

Echantillon testé	
Masse initiale humide (échantillon, bague, mais pas de tare) avant essai (g)	256,2
Tare de fin d'essai (g)	34,4
Teneur en eau initiale de l'échantillon testé (%)	26,531
Masse totale saturée (échantillon, bague et tare) en fin d'essai (g)	291,2
Masse totale sèche (échantillon, bague et tare) en fin d'essai (g)	264,6
Lithologie	Limons argileux bleu 20/80 caractères

## 2.6. ÉCHANTILLON DE CONTRÔLE

En parallèle, on place une chute de matériau dans une tare, on réalise une pesée à la teneur en eau initiale, on place l'ensemble chute+tare à l'étude, et on réalise une seconde pesée. On obtient alors les données suivantes :

- $PTH_{\text{chute}}$  le poids total humide de l'ensemble chute+tare,
- $P_{tare\_chute}$  le poids de la tare utilisé sur la chute,
- $PTS_{\text{chute}}$  le poids total sec de l'ensemble chute+tare.

On peut déterminer ici la teneur en eau initiale de l'échantillon :

$$W_{n,\text{chute}} = \frac{(PTH_{\text{chute}} - P_{tare\_chute}) - (PTS_{\text{chute}} - P_{tare\_chute})}{PTS_{\text{chute}} - P_{tare\_chute}}$$

$$W_{n,\text{chute}} = \frac{PTH_{\text{chute}} - PTS_{\text{chute}}}{PTS_{\text{chute}} - P_{tare\_chute}}$$



Échantillon de contrôle (essais en parallèle sur une "chute" de matériau)	
Massé humide (échantillon, tare, mais pas de bague) de contrôle (g)	Tare pour l'échantillon de contrôle (g)
161,6	32,6
Massé sèche (échantillon, tare, mais pas de bague) de contrôle (g)	Teneur en eau initiale de l'échantillon de contrôle (%)
134,3	26,844

## 2.7. RÉSULTATS DE L'ESSAI

### POIDS VOLUMIQUES

À l'aide de ces premières mesures, nous pouvons en déduire les paramètres suivants :

Densité humide initiale :

$$\rho_{h,i} = \frac{PTH - P_{bague}}{S * H_0}$$

Densité sèche initiale :

$$\rho_{d,i} = \frac{PTS - P_{bague} - P_{tare}}{S * H_0}$$

Afin de poursuivre les calculs, nous avons besoin d'estimer le poids volumique du squelette de notre échantillon testé. Pour cela, nous considérons la méthode suivante :

Nous considérerons la masse volumique du squelette dans le cas de silice pure  $\rho_s = 2,7 \text{ KN/m}^3$ .

Nous considérerons la masse volumique du squelette de la matière organique  $\rho_s = 1,4\text{KN/m}^3$ .

La masse volumique du squelette de l'échantillon sera estimé à partir du pourcentage de matière organique qui devra avoir été mesuré en laboratoire.

On a alors :

$$\rho_s = MO * 1,4 + (1 - MO) * 2,7$$

Avec :

**MO** le pourcentage de matière organique mesurée en laboratoire.

### INDICE INITIAL DES VIDES

Une fois le poids volumique du squelette déterminé, nous pouvons calculer l'indice des vides initial avec la relation suivante :

$$e_0 = \frac{\rho_s}{\rho_{d,i}} - 1$$



On détermine la teneur en eau à saturation théorique de l'éprouvette par la relation suivante :

$$W_{sat} = \frac{1}{\rho_{d,i}} - \frac{1}{\rho_s}$$

Si la masse volumique du squelette a été déterminée par la méthode n°2, on peut ici juger de la pertinence de cette méthode par comparaison entre la teneur en eau à saturation théorique  $W_{sat}$  et la teneur en eau réelle de l'échantillon déterminée à partir des chutes  $W_{n, chute}$ .

Il est possible en raison des imprécisions de mesure, que la teneur en eau de l'échantillon, déterminée avec les chutes, soit légèrement supérieure à la teneur en eau à saturation. Nous retiendrons donc la teneur en eau initiale suivante :

$$W_{n, initiale} = MIN(W_{sat}; W_{n, chute})$$

On détermine alors le degré de saturation de l'échantillon :

$$S_r(\%) = \frac{W_{n, initiale}}{W_{sat}}$$

#### CONTRAINTE VERTICALE INITIALE :

Pour poursuivre le dépouillement, il est nécessaire de renseigner la contrainte verticale initiale  $\sigma'_{v0}$ . Nous avons proposé un outil de calcul de  $\sigma'_{v0}$  intégré à la feuille de commande du laboratoire. L'ingénieur peut alors communiquer cette donnée au moment de la commande d'un essai de compression par palier à l'oedomètre au laboratoire. La présentation de cette outil et les principes de calculs sont donnés en annexe 1.

Nous présentons ci-dessous le dernier onglet de la page « Importation des données » de l'application web :

Résultats de l'essai	
$\sigma'_{v0}$ (kPa)	164
	Masse volumique sèche initiale ( $\text{T/m}^3$ )
Teneur en MO (%)	2,51
	Indice des vides initial (sans unité)
Masse volumique du squelette solide estimée ( $\text{T/m}^3$ )	2,667
	Teneur en eau à saturation (%)
Masse de l'échantillon sec seul (g)	98,000
	Degré de saturation (%)
Masse volumique humide initiale ( $\text{T/m}^3$ )	1,895
<a href="#">→ Accéder à l'analyse graphique</a>	

Nous pouvons maintenant passer à l'analyse graphique en cliquant sur le bouton « Accéder à l'analyse graphique ».



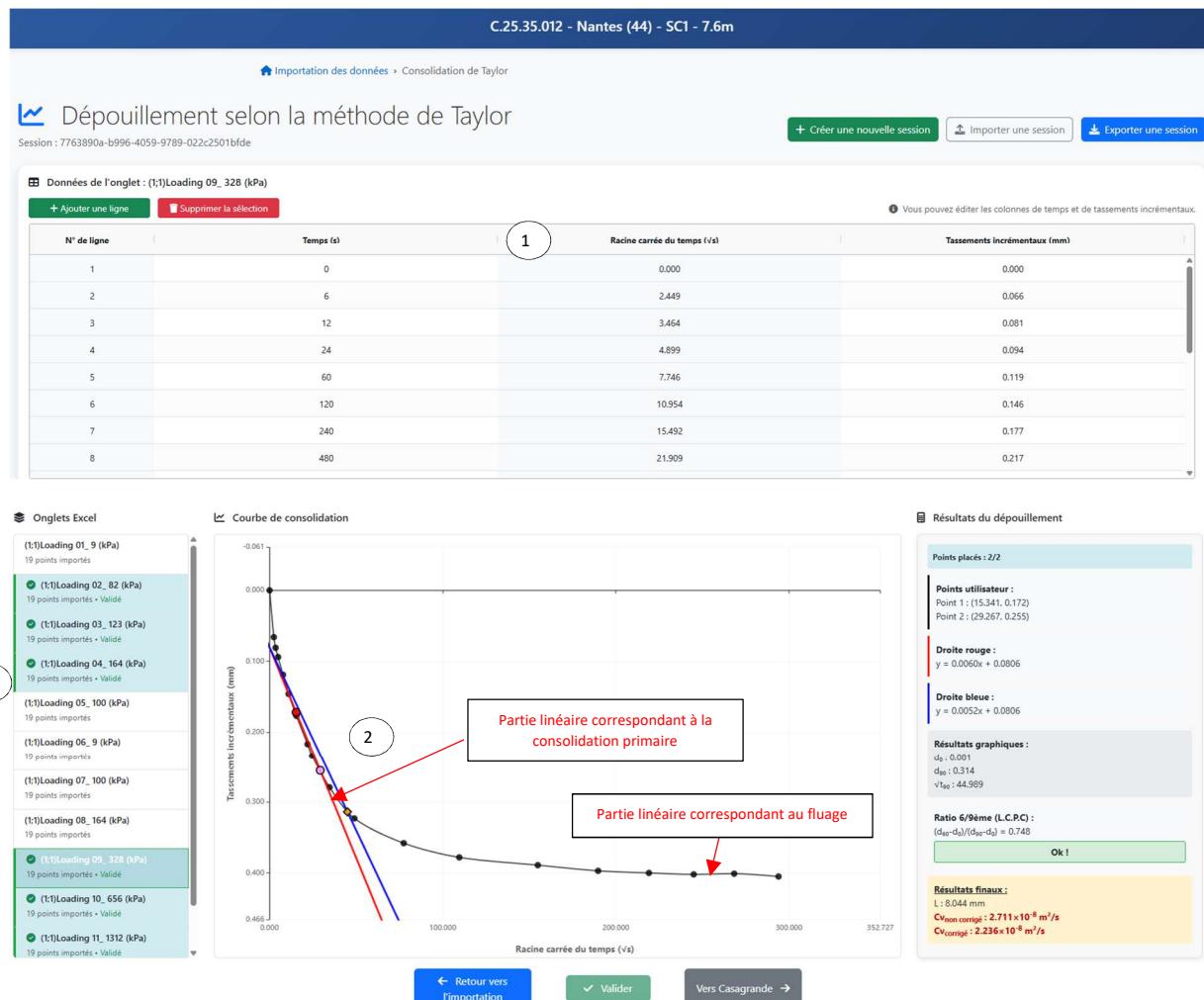
## 3. COURBES DE CONSOLIDATION

### 3.1. COURBE DE CONSOLIDATION SELON LA MÉTHODE DE TAYLOR

La courbe de consolidation est obtenue en traçant l'évolution des tassements en fonction du temps pour une charge donnée. Il existe deux méthodes quant au dépouillement des courbes de consolidation tassement-temps. La première est la méthode de Taylor que nous détaillons ci-après. La seconde méthode est celle de Casagrande qui sera détaillée en partie suivante.

Notons ici que les contraintes inférieures à la contrainte verticale initiale  $\sigma'_{v0}$  ainsi que les cycles de déchargement-rechargement sont exclus de l'étude des tassements en fonction du temps au sens du la norme.

Les tassements incrémentaux sont tracés en fonction de la racine carrée du temps exprimé en minutes. Un tableau de donnée en 1 est présenté :



La courbe est tracée en 2. La première partie linéaire de la courbe correspond à la consolidation primaire, due à la dissipation des pressions interstitielles. La seconde partie linéaire correspond à un tassement nettement plus lent, correspondant à la consolidation secondaire, ou fluage, due au réarrangement des grains. L'intersection entre les deux droites correspond à la fin de la consolidation primaire t<sub>100%</sub>.

L'exploitation des courbes de consolidation permet principalement de déterminer un coefficient de consolidation C<sub>v</sub>. Ce coefficient de consolidation correspond à une diffusivité des surpressions interstitielles, exprimé en m<sup>2</sup>/s.

La méthode de Taylor pour déterminer le coefficient de consolidation est la suivante [1] :

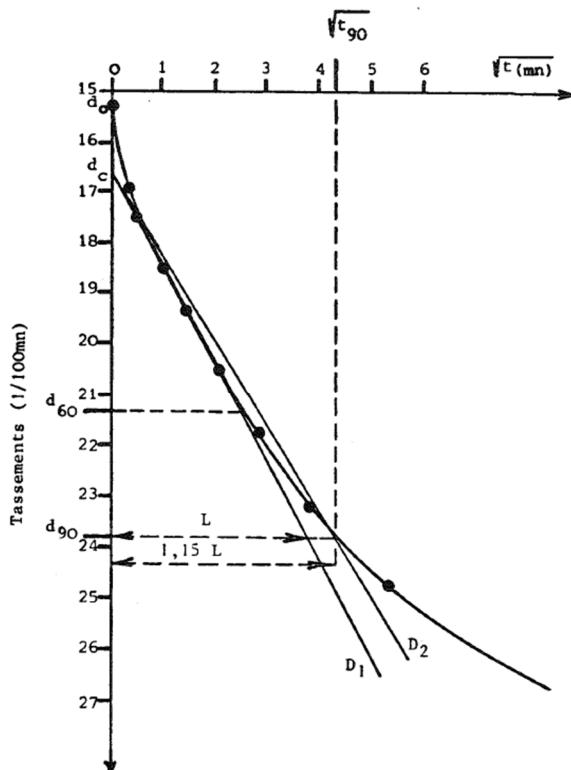
« Tracer la droite D<sub>1</sub> correspondant à la partie quasi linéaire du début de la courbe de tassement (consolidation primaire). Cette droite coupe l'axe des ordonnées en un point d<sub>c</sub> qui est le zéro corrigé.

De ce point d<sub>c</sub>, on trace la droite D<sub>2</sub> de pente 1.15 fois plus faible que celle de D<sub>1</sub>. L'intersection avec la courbe donne le point correspondant à 90% de la consolidation primaire (point d'ordonnée d<sub>90</sub>).

Vérifier que la fin de la partie linéaire de la courbe de tassement est proche de 60% de consolidation (point d'ordonnée d<sub>60</sub>) :

$$\frac{d_{60} - d_c}{d_{90} - d_c} \approx \frac{6}{9}$$

Le temps correspondant à 90% de consolidation est noté t<sub>90</sub>. »



Notre outil de développement est graphique. L'utilisateur est invité à cliquer sur deux points de la première partie linéaire de la courbe, et à ajuster le second point pour qu'il corresponde au point de « décollement de la courbe ». L'ordonnée de ce point sera notée d<sub>60</sub> et elle sera considérée comme le tassement incrémental pour lequel 60% de la consolidation primaire est effectuée. L'ordinateur calcule



alors une droite de pente 1.15 fois inférieure à la première, détermine le temps à 90% de la consolidation primaire  $t_{90}$ , et vérifie le ratio proposé par le LCPC.

Au point 3 : Si le ratio est correct à +/- 1/9, alors le résultat est affiché en vert. Sinon, il est affiché en rouge pour inviter l’utilisateur à ajuster ses points. Les points sont ajustables par un simple cliquer-glisser. Le dépouillement est alors ergonomique et rapide.

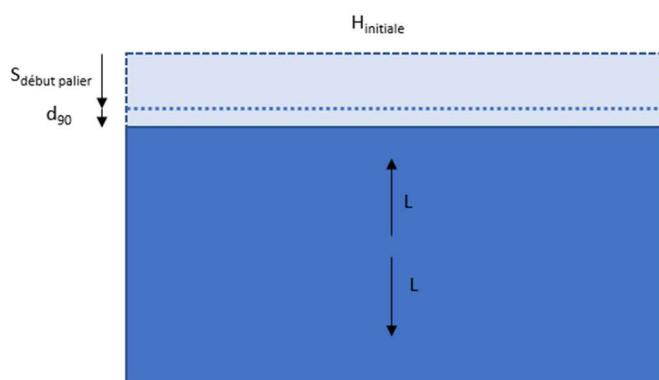
La valeur de  $c_v$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) est alors calculée à partir de l’équation suivante :

$$c_v = \frac{0.848 * L^2}{t_{90}} * f_T$$

Avec :

- $L$  : la longueur du chemin de drainage. Il s’agit, pour une éprouvette drainée par le haut et le bas, de la moitié de la hauteur de l’éprouvette. En pratique, nous déterminons cette hauteur de la façon suivante :

$$L = \frac{\text{Hauteur initiale de l'éprouvette} - \text{Tassement}_{\text{début palier}} - d_{90}}{2}$$



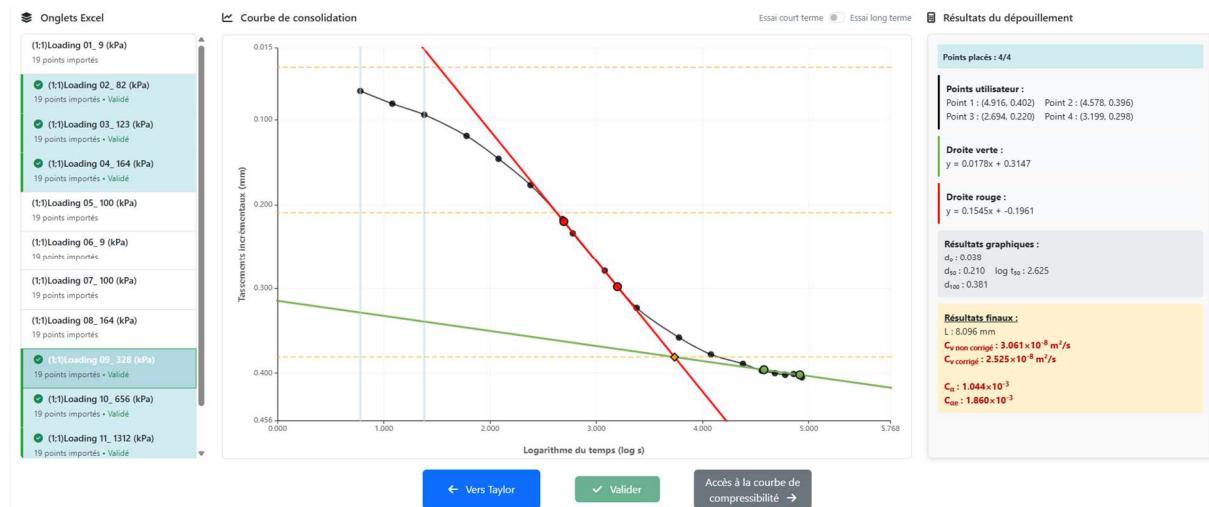
- $t_{90}$  : le temps de consolidation primaire à 90
- $f_T$  le facteur de correction de la température (voir partie 3.3).

L’outil propose un calcul du coefficient de consolidation  $C_v$  en 4, avec application du coefficient de correction de la température, et un calcul sans ce coefficient de correction.

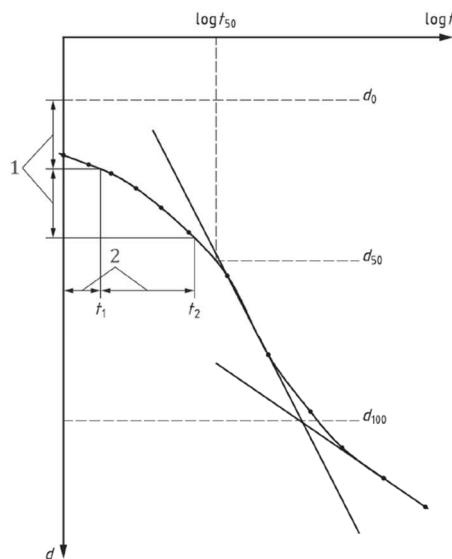
Enfin, l’utilisateur peut valider le dépouillement de sa courbe de consolidation pour enregistrer les données dans le fichier .json de l’essai, ce qui lui permettra de réimporter les données dans l’application et/ou de les transmettre. En 5, les courbes de consolidation ayant été dépouillées et validées sont affichées en vert, avec une coche. Lorsque l’opérateur en a terminé avec le dépouillement des courbes de consolidation de Taylor, il peut passer aux courbes de Casagrande.

## 3.2. COURBE DE CONSOLIDATION SELON LA MÉTHODE DE CASAGRANDE

La courbe de consolidation selon Casagrande représente les tassements incrémentaux en fonction du logarithme base 10 du temps exprimé en minutes :



« Le point zéro corrigé est localisé en marquant la différence sur l’axe des ordonnées entre deux points de la partie initiale (convexe) de la courbe dont le temps est indiqué selon le rapport 1 :4, et en instaurant une distance égale au-dessus du point supérieur. »[1]



Légende  
1 rapport 1:1  
2 rapport 1:4

Courbe de consolidation selon la méthode de Casagrande [3]



L'outil de dépouillement permet de faire glisser sur la première partie convexe de la courbe une droite verticale (en bleu-clair). Une seconde droite bleu-clair est tracée automatiquement, respectant un rapport d'abscisse ¼.

L'origine corrigée  $d_0$  est calculée automatiquement.

« Les tangentes aux deux parties linéaires de la courbe de laboratoire sont tracées et étendues, autrement dit au point d'inflexion et à la partie secondaire de compression. Leur intersection donne la compression correspondant à la compression primaire théorique à 100%, noté  $d_{100}$ .

À partir des points 0 et 100%, le point de compression primaire à 50% noté  $d_{50}$  est localisé sur la courbe de laboratoire et son temps  $t_{50}$  (en s) est obtenu. »

Le coefficient de consolidation  $c_v$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) est calculé à partir de l'équation suivante :

$$c_v = \frac{0.197 * L^2}{t_{50}} * f_T$$

Avec :

- $L$  : la longueur du chemin de drainage.
- $t_{90}$  : le temps de consolidation primaire à 90
- $f_T$  le facteur de correction de la température (voir partie suivante).

La longueur du chemin de drainage est analogue à celle considérée dans la méthode de Taylor :

$$L = \frac{\text{Hauteur initiale de l'éprouvette} - \text{Tassement}_{\text{début palier}} - d_{50}}{2}$$

La méthode d'essai LCPC [1] émet toutefois quelques réserves sur la méthode de Casagrande :

« Dans bien des cas la méthode de Casagrande n'est pas utilisable, la forme de la courbe ne se prêtant pas à la construction graphique :

- cas des sols présentant une forte compression secondaire
- faibles incrément de charge
- fortes valeur de  $c_v$  ( $c_v > 10^{-7}$  à  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

L'emploi de la méthode de Taylor est préférable dans le cas des sols présentant une forte compression secondaire.



### 3.3. COEFFICIENT DE CORRECTION DE LA TEMPÉRATURE

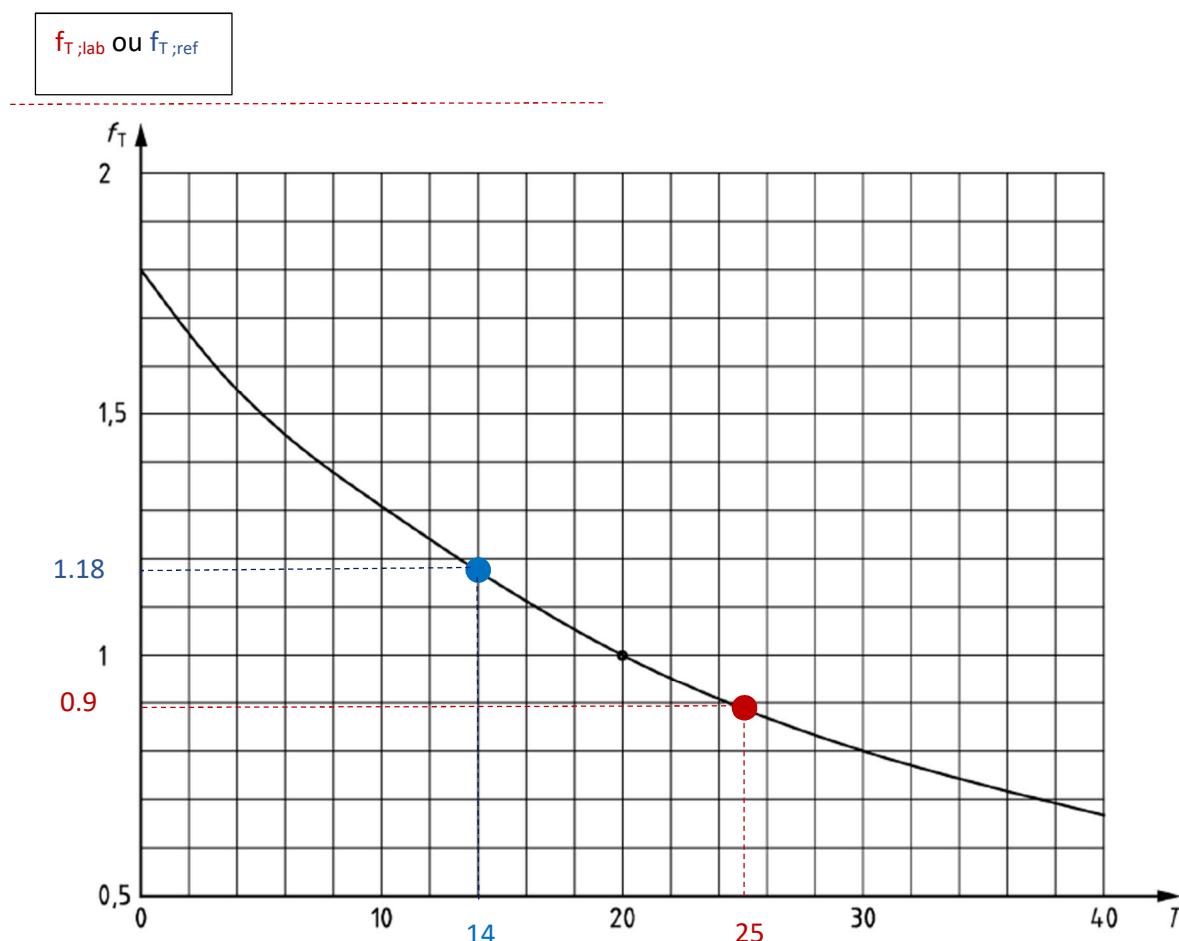
La viscosité de l'eau est fonction de la température. La norme en vigueur [3] indique :

« La correction de la température est nécessaire si la température d'essai diffère de façon significative de la température du sol. En effet, la viscosité de l'eau varie en fonction de sa température. À une certaine profondeur en dessous de sa surface, les températures du sol sont souvent plus ou moins constantes tout au long de l'année, c'est pourquoi il est utile de sélectionner une valeur adaptée de température de terrain pour les grandes régions. »

Le calcul du coefficient de consolidation  $c_v$  intègre une correction due à la température par un coefficient de correction global  $f_T$ . Le facteur de correction global  $f_T$  contient en réalité deux sous-facteurs de correction de la température :

- Un facteur de correction  $f_{T,lab}$  pour convertir la température du laboratoire à 20°C (si cette dernière diffère de façon significative à 20°C),
- Un facteur de correction  $f_{T,ref}$  pour convertir la température réelle du sol à 20°C.

La norme [3] donne un outil graphique pour déterminer ces facteurs :



Le facteur de correction global est alors déterminé comme suit :



$$f_T = \frac{f_{T;lab}}{f_{T;ref}}$$

Par exemple pour un laboratoire fonctionnant à 25°C, et une température moyenne du sol à la profondeur de prélèvement de l'échantillon de 14°C :

- $f_{T;lab} = 0.8$
- $f_{T;ref} = 1.35$

$$f_T = \frac{f_{T;lab}}{f_{T;ref}} \approx 0.60$$

On voit ici que le facteur de correction de la température peut abaisser considérablement la vitesse de consolidation  $c_v$ .

Pour simplifier l'intégration de ce facteur de correction dans nos calculs, nous avons trouvé sur Internet l'expression de la viscosité relative de l'eau fonction de la température. L'expression est la suivante :

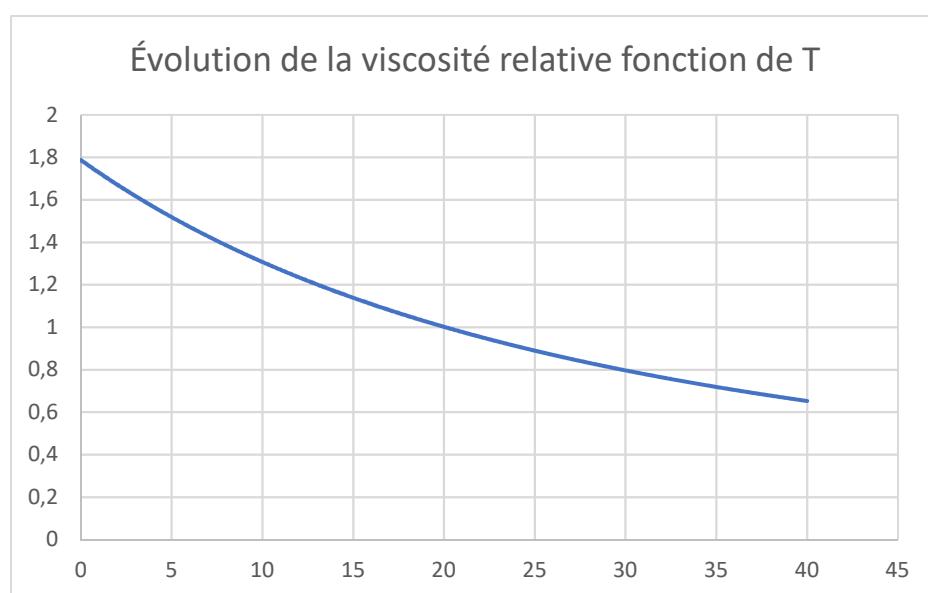
$$\mu(T) = \exp\left(A + \frac{B}{T+D}\right)$$

avec  $T$  en °C et  $\mu$  en mPa·s.

Coefficients ajustés (obtenus par régression sur les points tabulés) :

- $A = -3.295631$
- $B = 441.895432$
- $D = 114.000000$

Si on trace cette fonction sur Excel, on obtient bien quelque chose de similaire à ce qui est présenté dans la norme. Nous restons alors là-dessus :



La norme actuelle [3] mentionne une température relativement constante du sol tout au long de l'année fonction des grandes régions de France, sans citer de source.



Une étude du BRGM [4] a été réalisée dans le but de fournir une température moyenne par « zone climatique » (huit zones de France). Nous présentons ci-dessous les principales conclusions de ce rapport :

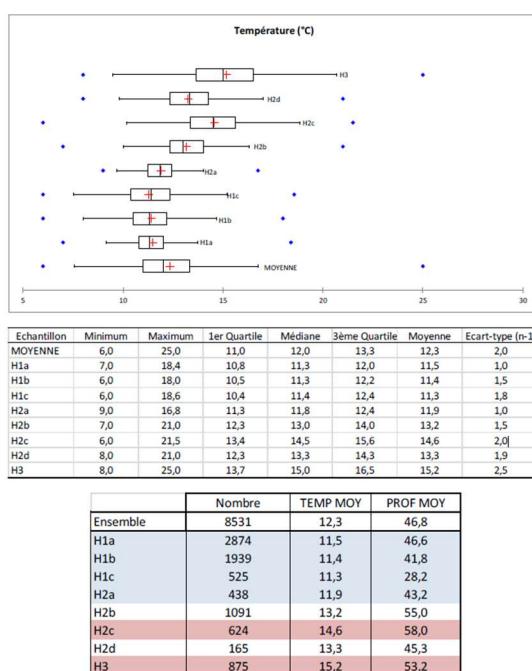
« Un échantillon de 8531 couples température / profondeur a été sélectionné, sur lequel a porté l'étude de données de température qui a permis de dresser un bilan du gradient géothermique de la tranche 0 à 200 m, en différenciant chacune des huit zones climatiques.

Le premier constat est, qu'à l'échelle de toute la France, les températures sont relativement constantes sur les 100 premiers mètres. Ce n'est qu'à partir d'une centaine de mètres que l'on voit une légère inflexion des gradients de température. Dans la tranche de 0 à 200m, les températures sont comprises pour l'essentiel entre 11 et 15°C, sans qu'il soit possible d'affirmer que l'augmentation de température ne dépend de la profondeur.

Le second constat, auquel l'étude aboutit, est de mettre en évidence des zones climatiques « froides », situées principalement sur la partie Nord de la France, et des zones climatiques « chaudes » situées sur la partie la plus méridionale. L'écart de température entre ces zones « froides » et « chaudes » est important puisqu'il atteint près de 4°C.

Cet écart reflète l'influence climatique sur la température du sous-sol. La température des 100 ou 200 premiers mètres du sous-sol reflète la température moyenne annuelle extérieure, le gradient géothermique n'apparaissant qu'au-delà de cette profondeur. »

On propose ci-dessous l'analyse statistiques, par la méthode des boîtes à moustache de Tukey, des couples température/profondeur groupés par zone géographique :



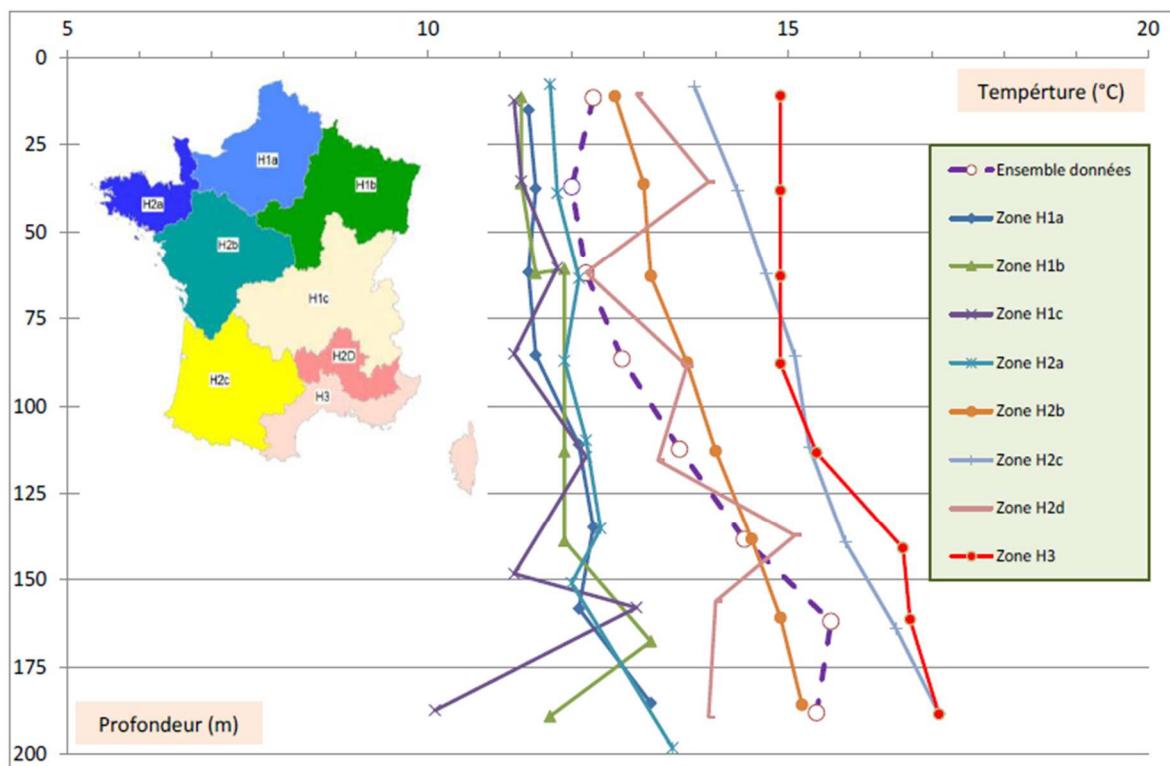
L'analyse statistiques, par la méthode des boites à moustache de Tukey, des couples température/profondeur groupés par zone géographique.

On peut voir sur certaines zones géographiques des écart-type des température acceptables, de l'ordre de 1.0°C. Cela signifie que l'on pourra considérer aisément une température pour ces zones (H1a, H2a).



Cependant d'autres zones ont un écart-type plus élevé, proche de 2.0 ou supérieur (H2c, H3), moins satisfaisant.

Les écart-type les plus forts s'explique par une influence de la profondeur sur la température du sous-sol sur certaines zones de France uniquement. Nous proposons ci-dessous un graphique des évolution des températures moyennes en fonction de la profondeur, par zones climatiques :



*Diagramme température/profondeur selon la zone climatique considérée [4]*

On retrouve les plus fortes variations de température avec la profondeur dans les zones où l'écart-type des température était grand (H2c, H3).

Nous proposons alors d'intégrer à notre outil de développement une aide au calcul du facteur de correction de la température, qui prendra en compte :

- La région de France via le département du projet,
- La profondeur de l'échantillon.

Ces deux informations sont renseignées dans la première partie intitulée « Importation des données ».

Le facteur de correction  $f_T$  est calculé automatiquement et présenté à l'utilisateur. Nous rappelons ci-dessous l'onglet « Informations générales » de la partie « Importation des données ». Vous pouvez y voir la zone climatique correspondant à la Loire Atlantique (44), une température du sol estimée en fonction de la profondeur de l'échantillon et de la zone climatique, ainsi que le facteur  $f_T$  prenant en compte la température du laboratoire :

Informations générales	
Nom du client	Nantes Métropole
Nom de la commune	Nantes
Numéro de département	44
Nom du forage	SC1
Profondeur de l'échantillon (m)	7,6
Température du laboratoire (°C)	20 f <sub>T</sub> : 0.825
Date de réalisation du forage	01/12/2025
Date de prélèvement au laboratoire	02/12/2025
Numéro de dossier	C.25.35.012
Département : Loire-Atlantique (44) - Zone climatique : H2b - T <sub>sol</sub> : 12.6 °C	

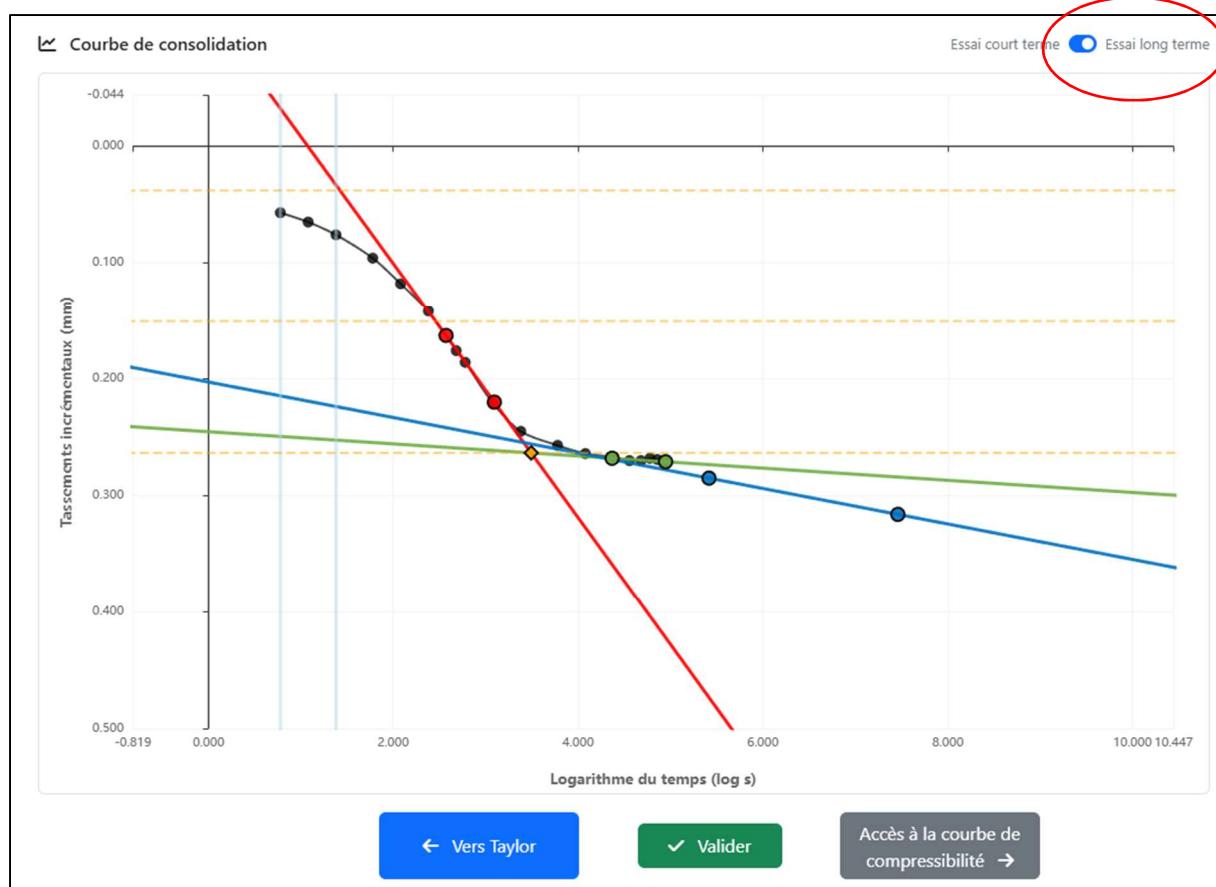
Nous avons pris soin de trier chaque département en zone climatique, et de fournir un tableau des température de chaque zone climatique par tranche de 25m de profondeur. Ce tableau est donné en annexe 3.

### 3.4. ESSAI DE FLUAGE

L'essai de fluage consiste à laisser l'éprouvette de sol sous la charge suffisamment longtemps pour mesurer un « taux de consolidation secondaire », noté  $c_\alpha$ . Il s'agit des essais notés « LT » pour « Long Terme » sur la feuille de commande labo. Le taux  $c_\alpha$  est déterminé à partir de la pente de la partie finale de la courbe de Taylor ou de Casagrande, généralement linéaire.

Le nouvel outil de dépouillement propose un bouton bascule pour activer le dépouillement long terme. Deux points supplémentaires peuvent alors être placés (en bleu ci-dessous) afin de tracer la tangente au fluage et obtenir  $c_\alpha$ .





Le coefficient de consolidation secondaire, ou fluage  $c_\alpha$  est déterminé de la façon suivante :

On choisit sur la partie finale, linéaire de la courbe de Taylor ou de Casagrande, deux points correspondant aux temps  $t_1$  et  $t_2$  et aux tassements  $\Delta H_1$  et  $\Delta H_2$ .

$$c_\alpha = \frac{\Delta H_1 - \Delta H_2}{H_0} * \frac{1}{\lg(\frac{t_2}{t_1})}$$

Avec  $H_0$  la hauteur initiale de l'éprouvette. Attention, les temps  $t_2$  et  $t_1$  doivent être donné en minutes.

Le coefficient  $c_\alpha$  est donc sans dimension.

L'indice de fluage  $c_{ae}$  est égal pour sa part à :

$$c_{ae} = \frac{\Delta e}{\Delta \lg t} = (1 + e_0) * c_\alpha$$

$e_0$  étant l'indice des vides initial de l'essai.

La méthode LCPC indique que « le nombre de paliers de chargement sera normalement de trois, pour les charges  $\sigma'_{v0}$ ,  $\sigma'_p$ , et  $\sigma'_{vf}$  » ( $\sigma'_{vf}$  étant la contrainte effective verticale finale sous l'ouvrage terminé).

La méthode LCPC [1] indique que « les valeurs de  $c_\alpha$  et  $c_{ae}$  peuvent varier de façon sensible d'un palier à l'autre ». Cependant le taux de fluage est théoriquement constant avec la charge appliquée. « On retiendra comme résultat de l'essai la moyenne des valeurs obtenues sous  $\sigma'_p$ , et  $\sigma'_{vf}$  ».



## 4. COURBES DE COMPRESSIBILITÉ

### 4.1. PRÉSENTATION DE LA COURBE DE COMPRESSIBILITÉ

On obtient la courbe de compressibilité en traçant l'évolution de l'indice des vides en fonction du logarithme (base 10) de la contrainte.

L'indice des vides d'un palier de chargement  $i$  est déterminé à partir du tassement obtenu au bout de 24h, avec la formule suivante :

$$e_i = \frac{\rho_s}{\rho_{d,i}} - 1$$

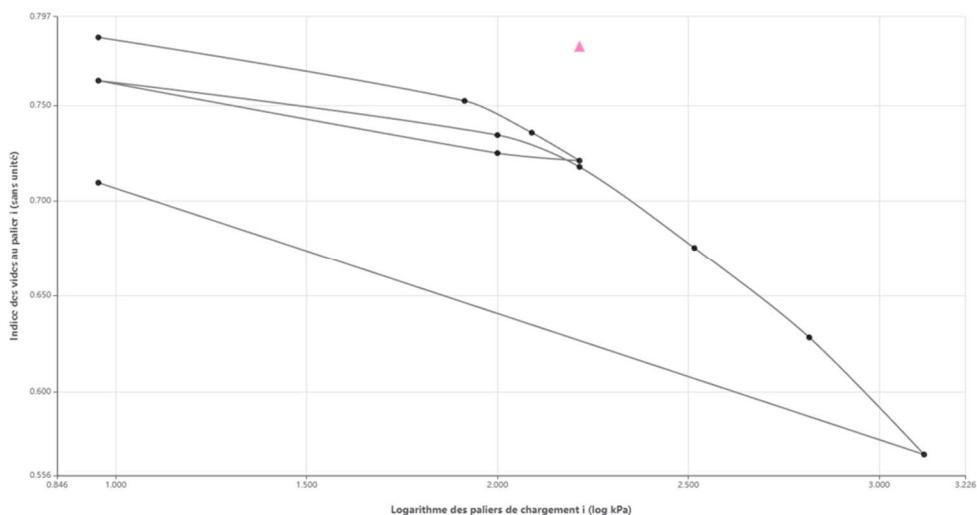
$$\rho_{d,i} = \frac{M_d}{S * (H_0 - \Delta H_i)}$$

Avec :

$M_d$  la masse sèche de l'échantillon déterminée à la fin de l'essai,

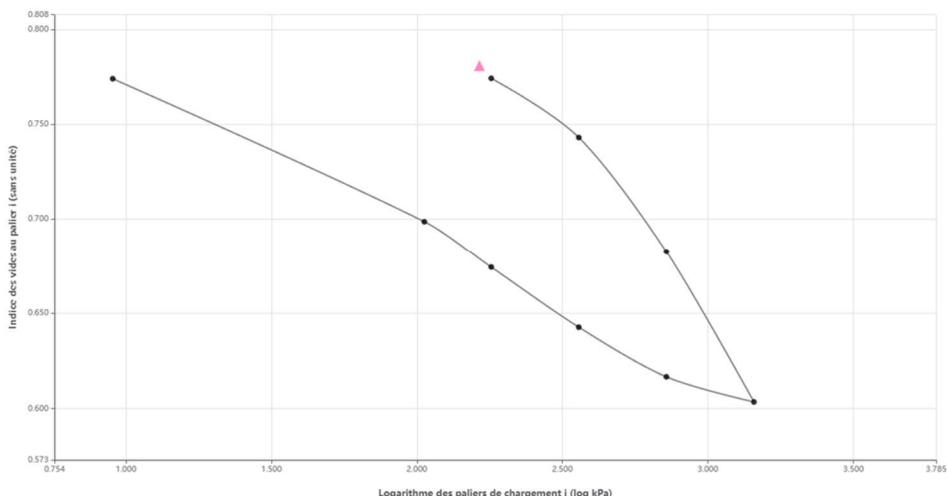
$\Delta H_i$  l'augmentation du tassement au palier  $i$ , au bout de 24h,

On obtient la courbe de compressibilité  $e$ - $Lg\sigma$ . Le protocole de l'essai est différent selon si l'échantillon gonfle à la mise en eau ou pas. Nous proposons les deux courbes type obtenues selon chaque cas :



Courbe de compressibilité type d'un sol non gonflant à la mise en eau





Courbe de compressibilité type d'un sol gonflant à la mise en eau

On note les différences suivantes :

- Pour un sol gonflant à la mise en eau, la contrainte initiale est augmentée de façon à éviter le gonflement, jusqu'à l'obtention d'un tassement. On observe alors un premier palier plus « tardif » que pour un sol non gonflant.
- Le cycle de décharge-recharge sur un sol non gonflant à la mise en eau est effectué autour de la contrainte de préconsolidation  $\sigma'_p$ , c'est-à-dire autour du point d'inflexion maximal de la courbe de compressibilité. Dans le cas d'un sol gonflant, le déchargement est effectué en fin d'essai uniquement, en partant de la plus forte contrainte appliquée.

## 4.2. DÉPOUILLEMENTS GRAPHIQUES DE LA COURBE DE COMPRESSIBILITÉ

La norme européenne [3] indique qu' « il existe diverses méthodes qui peuvent être utilisées pour l'estimation de la contrainte de préconsolidation (également appelée résistance du matériau) à partir des résultats de l'essai à l'œdomètre. La méthode la plus connue est la méthode de Casagrande [...]. D'autres méthodes sont fréquemment utilisées et s'avèrent tout aussi acceptables ».

Magnan [1][2], mentionne les méthodes de Burmister, Casagrande, Schmertmann, et LCPC.

Bien d'autres méthodes, parfois plus récentes, sont proposées dans la bibliographie (Burmister, Butterfield, Senol, Srhidaran, Tavenas).

J.F. Serratrice, dans un manuel du Cerema [7] recommande de mettre en œuvre simultanément au moins trois méthodes d'interprétation différentes pour garantir des choix pertinents des paramètres.

Nous avons choisi d'étudier les méthodes LCPC, de Casagrande et de Schmertmann.

Enfin, la méthode n°13 du LCPC souligne que « toutes les méthodes pour déterminer  $\sigma'_p$  sont imparfaites et, en particulier, que la valeur de la pression de consolidation peut être plus affectée par la durée de l'essai et le choix de l'incrément de charge que par le principe de détermination.



## MÉTHODE L.C.P.C

La méthode LCPC est détaillée dans la méthode n°13 du LCPC [1] ainsi que dans l’ancienne norme française [6] :

### Cas des sols non gonflants à la mise en eau

- Tracer la droite AB selon la pente moyenne de la courbe de déchargement – rechargement,
- À partir du point D origine de la courbe expérimentale, tracer la droite DL parallèle à AB,
- Tracer ensuite la droite MN issue de l’ajustement, sur la courbe de compressibilité, des trois derniers points expérimentaux des paliers de chargement.

L’indice de recompression  $C_s$  est la pente de la droite DL.

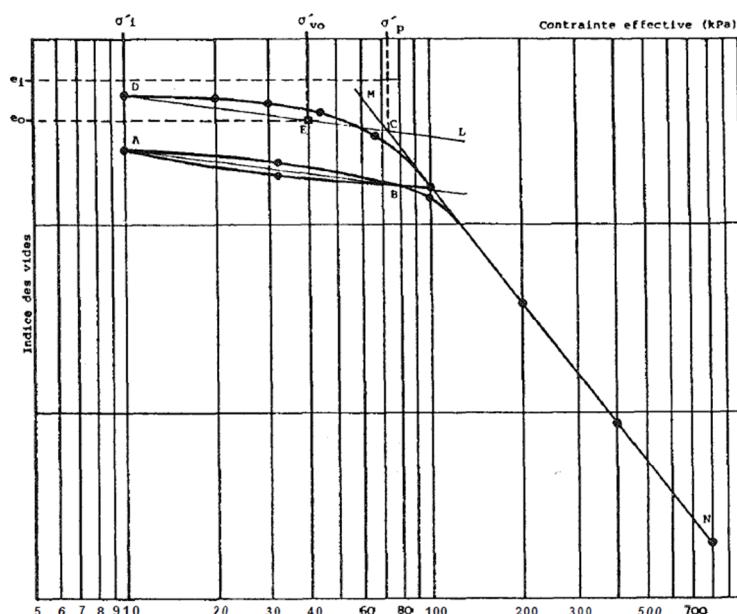
$$C_s = \frac{\Delta e}{\Delta \lg \sigma'_v}$$

De la même manière, l’indice de compression  $C_c$  est la pente de la droite MN :

$$C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \lg \sigma'_v}$$

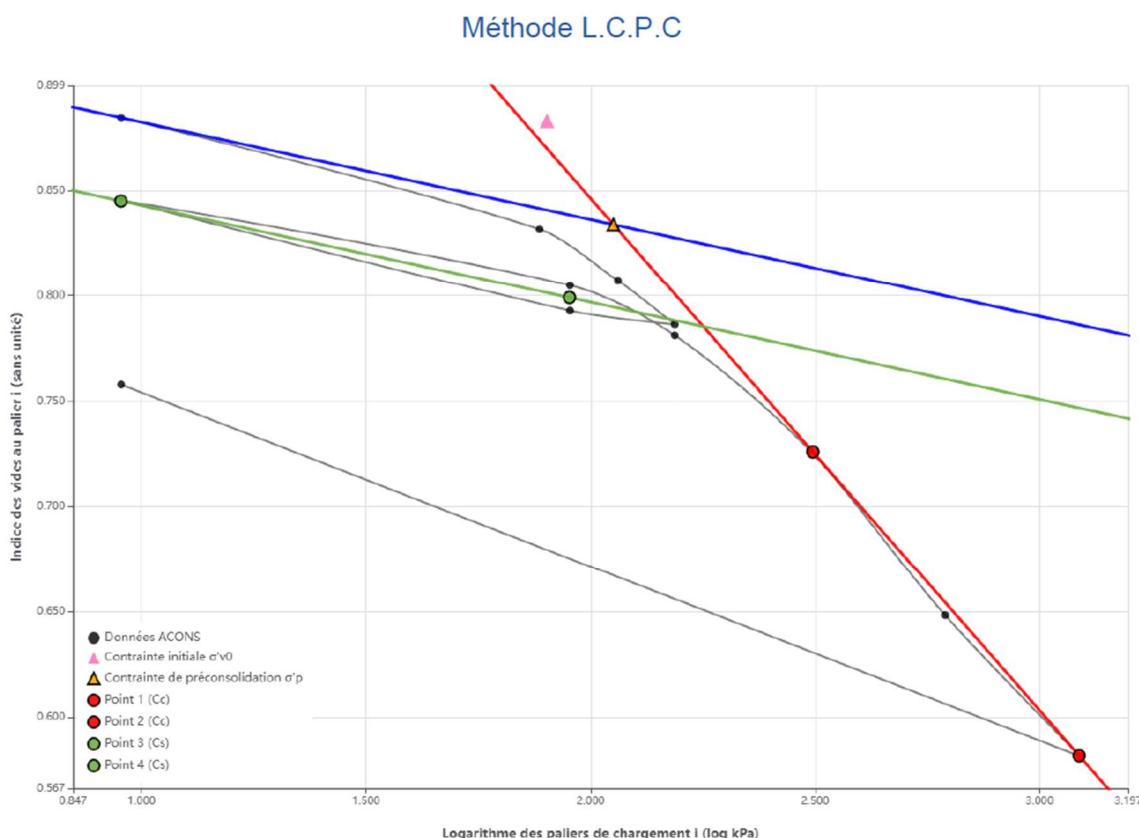
Par définition, la contrainte verticale effective de préconsolidation  $\sigma'_p$  correspond au point C résultant de l’intersection des droites DL et MN.

La valeur approchée de l’indice des vides du sol en place  $e_0$  est l’ordonnée de la courbe correspondant à l’abscisse  $\lg \sigma'_{v0}$ .



Détermination graphique de  $\sigma'_p$  [1]

On propose ci-dessous une capture d'écran d'un dépouillement de compressibilité par la méthode L.C.P.C issue du nouvel outil de dépouillement proposé :



L'opérateur est invité à cliquer sur l'écran pour placer deux points et tracer la droite rouge. Ensuite, il, par simples clics, placer deux autres points qui définiront la droite verte. Les points sont ajustables par un simple cliquer-glisser. Les pentes  $C_c$ ,  $C_s$  ainsi que la contrainte de préconsolidation  $\sigma'_p$  sont calculés automatiquement.

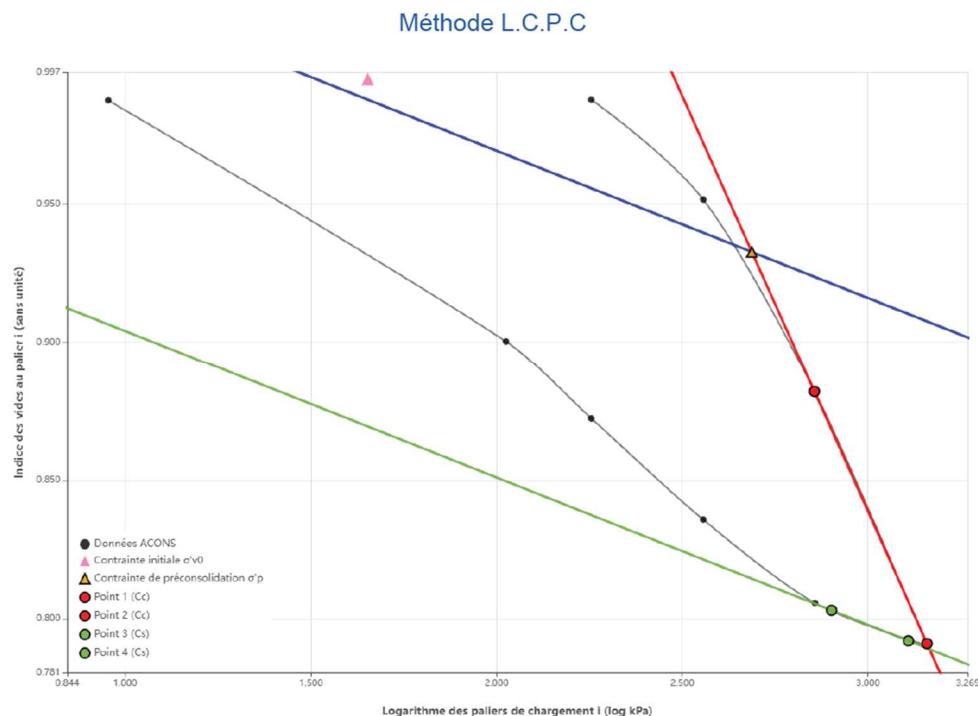
### Cas des sols gonflants à la mise en eau

On note les différences suivantes dans le cas d'un sol gonflant à la mise en eau :

- La droite AB est tracée selon la pente du déchargement final. Il est important de noter que les points du déchargement ne sont pas toujours alignés, le phénomène de gonflement intervenant au fur et à mesure que la pression se réduit. Il est donc préférable de tracer la droite AB selon les premiers points de déchargement, selon les plus fortes pression.
- La parallèle DL à la droite AB « colle » la courbe de compressibilité non pas sur le premier point, mais autour de l'abscisse  $\lg\sigma'_{v0}$ .

Nous présentons ci-dessous un extrait issu du nouvel outil informatique proposé :





La méthode de dépouillement L.C.P.C est la méthode utilisée dans l’ancien outil de dépouillement Excel. Elle présente l’avantage d’être relativement simple. « Elle a pour inconvénient de dépendre du choix de la première charge [...]. Le résultat dépend aussi de la valeur de la charge à partir de laquelle s’effectue le cycle de déchargement-rechargement. » [1].

De plus, on peut penser que cette méthode est sensible au caractère « remanié » de l’échantillon. En théorie, la pente moyenne du cycle de déchargement-rechargement doit être parallèle à celle de la courbe de compressibilité obtenue entre  $\sigma'_{v0}$  et  $\sigma'_p$ . Une différence importante entre ces deux pentes peut laisser penser que le sol a subi un remaniement (prélèvement, transport et/ou échantillonnage).

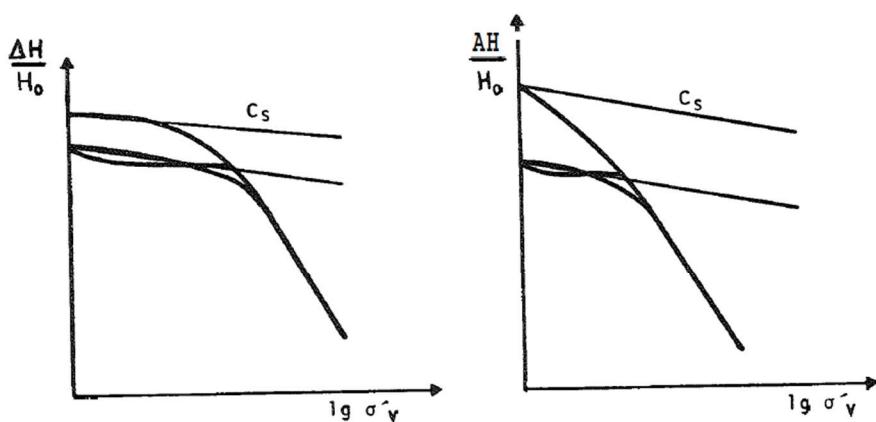


Fig. 21.2 Critère de remaniement  
a) Echantillon peu remanié      b) Echantillon très remanié

#### Difference entre échantillon non remanié et remanié [1]

Un sol remanié peut mener à une sous-estimation de la contrainte de préconsolidation  $\sigma'_p$ .

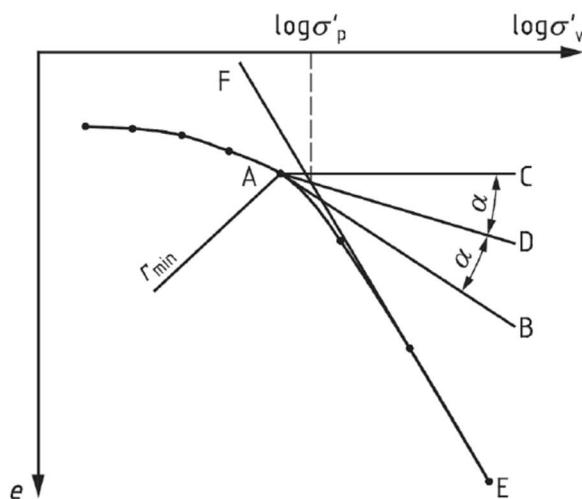
Il est donc intéressant de comparer les contraintes de préconsolidation  $\sigma'_p$  obtenues selon plusieurs méthodes.



## MÉTHODE DE CASAGRANDE

La méthode de Casagrande est détaillée dans la norme actuellement en vigueur [4] :

« L'estimation de la contrainte de préconsolidation est déterminée comme suit :

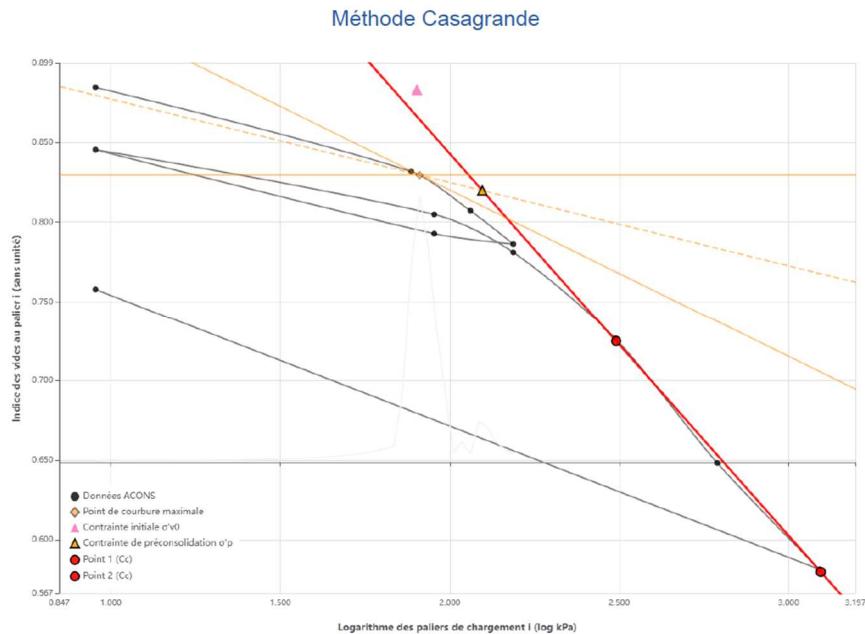


### Détermination de la contrainte de préconsolidation par la méthode de Casagrande [3]

1. Déterminer le point de courbure maximal (Point A) sur la courbe de l'indice des vides par rapport au logarithme de la contrainte effective verticale.
2. Tracer la droite AB, tangente à la courbe au Point A.
3. Tracer la droite AC horizontale qui passe par A.
4. Tracer la droite AD bissectrice de l'angle BAC.
5. Tracer la droite EF afin qu'elle représente la partie droite de la courbe pour une contrainte effective verticale élevée et poursuivre son tracé en arrière jusqu'à ce qu'elle coupe la droite AD.
6. La contrainte à l'intersection des droites AD et EF est considérée comme la contrainte de préconsolidation  $\sigma'_p$  (kPa). »

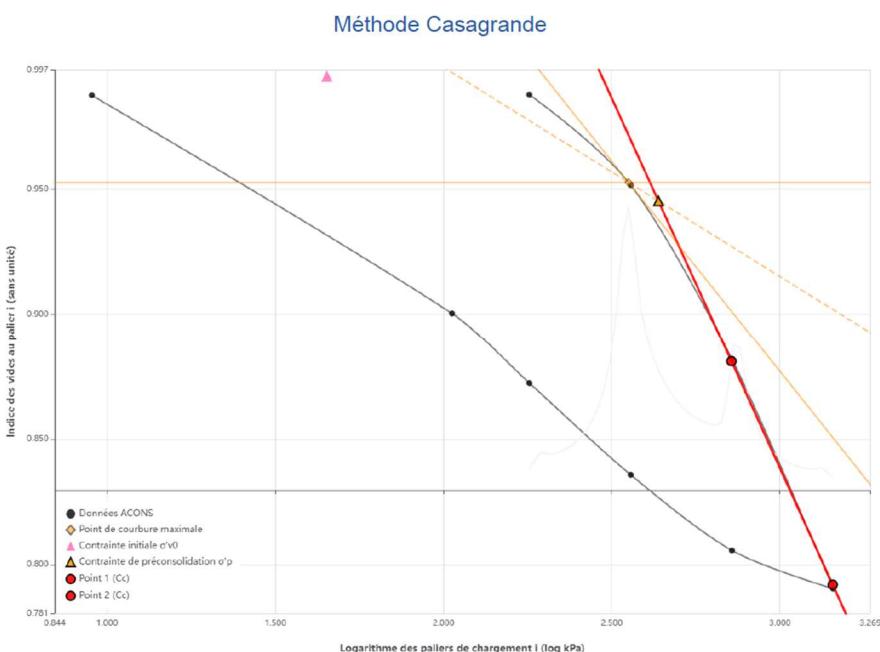


Nous présentons ci-dessous un extrait de l'outil numérique proposé :



L'utilisateur est simplement invité à cliquer sur l'écran pour placer deux points définissant la droite rouge. Le point d'inflexion maximale de la courbe est calculé automatiquement, d'ailleurs on peut voir en fin tracé gris, en arrière-plan, la dérivée seconde de la courbe. Le point d'inflexion maximal correspond au maximum de la dérivée seconde. La tangente est tracée automatiquement ainsi que l'horizontale et la bissectrice. L'utilisateur n'a plus qu'à lire le résultat.

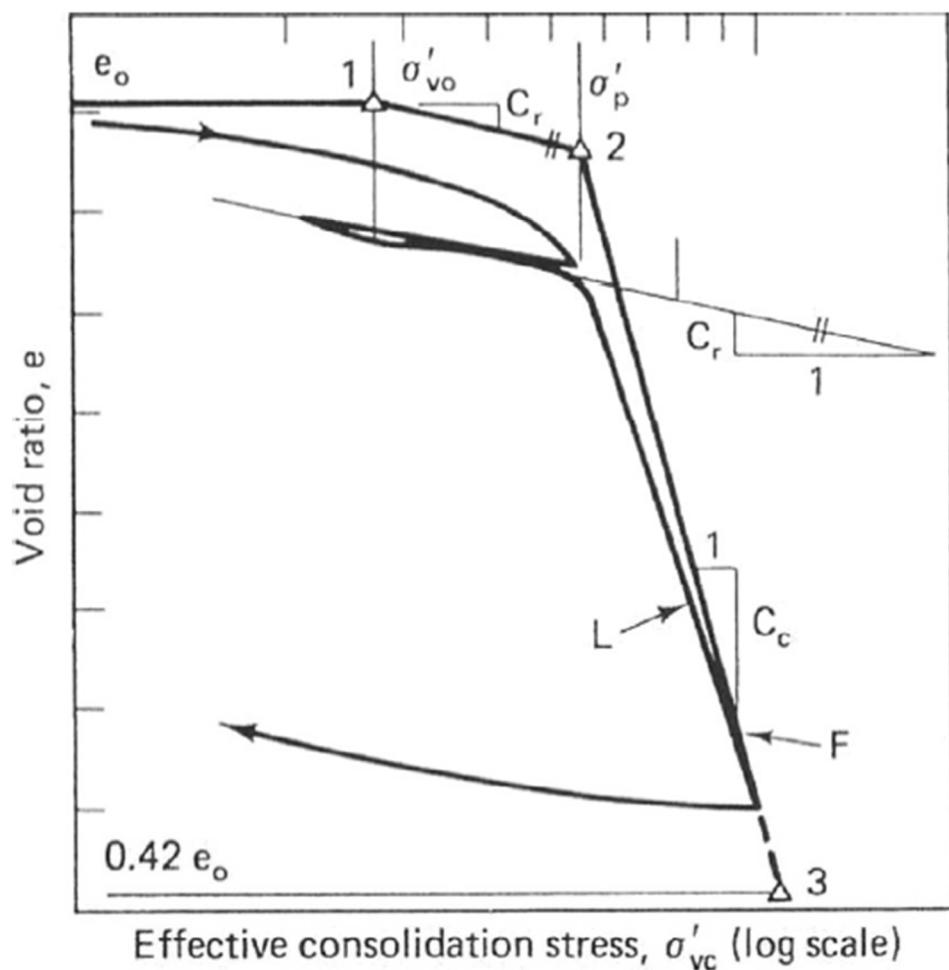
Nous proposons ci-dessous un exemple d'un dépouillement effectué avec la méthode de Casagrande sur un sol gonflant :



## MÉTHODE DE SCHMERTMANN

Le détail des dépouillements des courbes de compressibilité selon les méthodes de Schmertmann a été trouvé dans le mémoire de L. Arabet [8] :

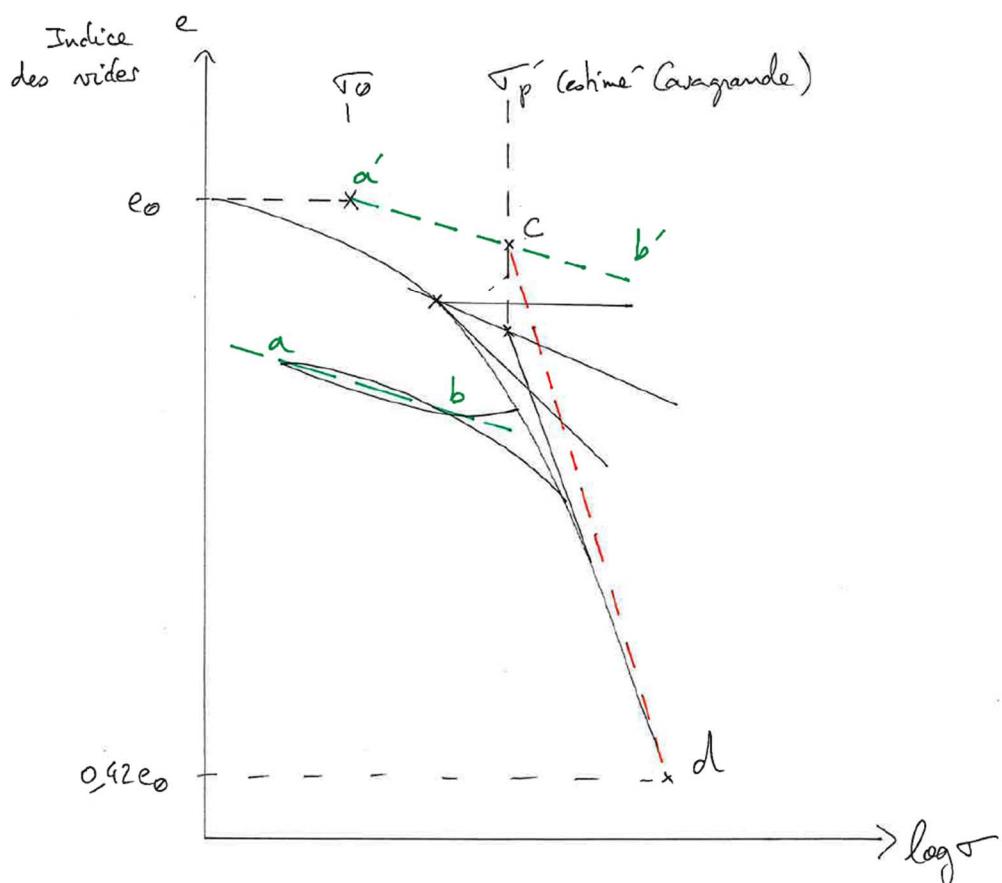
La préparation de l'échantillon pour effectuer un essai de compression à l'oedomètre se termine toujours par le déchargement de la structure, l'échantillon est dit alors remanié. Par conséquent, la consolidation au laboratoire ne présente pas réellement la consolidation du sol à l'état naturel. L'effet du remaniement du sol est la réduction de la pente de la ligne droite de la courbe ( $e - \log s'$ ). La méthode proposée par Schmertmann permet de remédier à ces erreurs et de construire une courbe qui correspondent à la courbe réelle œdométrique d'un échantillon *in situ* sans aucun remaniement (figure I-23). On obtient ainsi par la procédure graphique de Schmertmann une estimation beaucoup plus réaliste de la compression du sol *in situ*. Le processus préconisé par Schmertmann comporte quatre étapes :

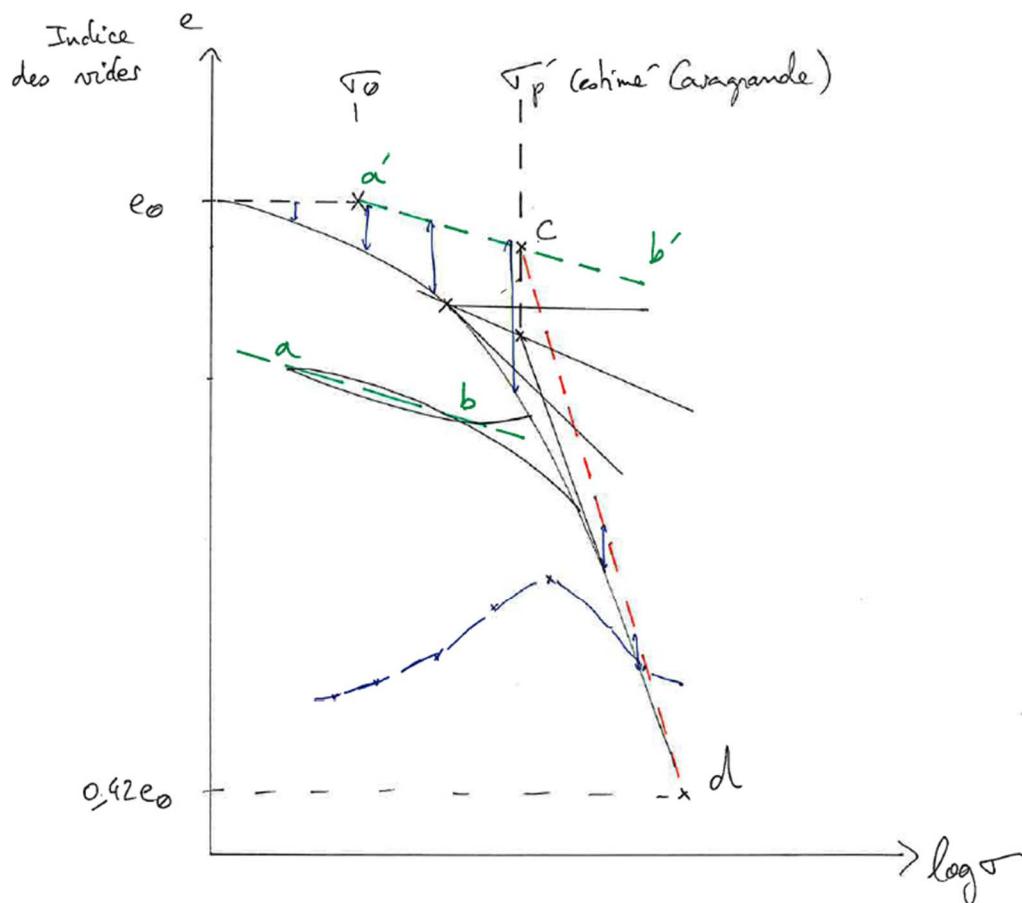


**Fig. 2** Schmertmann method for predicting sample disturbance.

1. Effectuer l'essai œdométrique classique avec cycles de charge et de décharge ; dès que l'on approche de la partie rectiligne de la courbe, on décharge l'échantillon jusqu'à la contrainte initiale  $s'0$  qui correspond au point des terres sus-jacentes, on recharge ensuite progressivement.
  2. Tracer une droite  $a'b'$  parallèle à la droite de recompressions  $ab$  à partie du point représentatif des conditions initiales  $in situ e0$  et  $s'0$ .
  3. Déterminer une valeur approchée  $s'p$  par la méthode de Casagrande,
  4. Soit  $c$  le point de la droite  $a'b'$  qui a pour abscisse  $\log s'p$  ; soit  $d$  le point de la courbe expérimental d'ordonnée  $0.42 e0$ . tracer la droite  $cd$ .
  5. La courbe  $a'cd$  peut être considérée comme la « courbe œdométrique  $in situ$  reconstituée ».

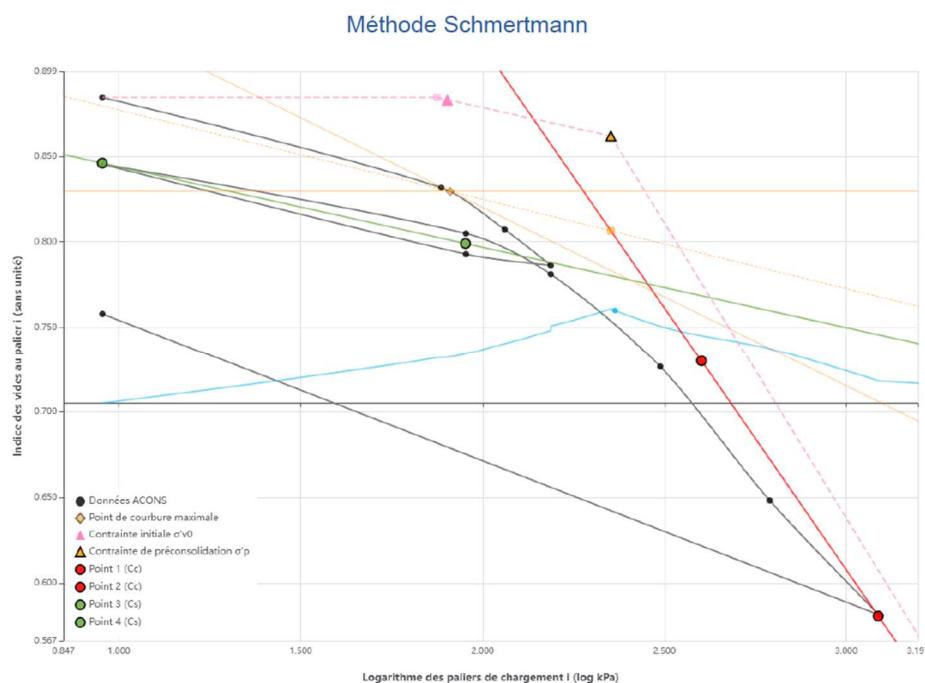
On peut calculer pour chaque palier l'écart entre l'indice des vides de la courbe reconstituée et l'indice des vides de la courbe d'origine. Si on trace ces écarts  $\Delta e = f(\sigma)$ , on devrait avoir une courbe avec un maximum proche de  $s'p$  :





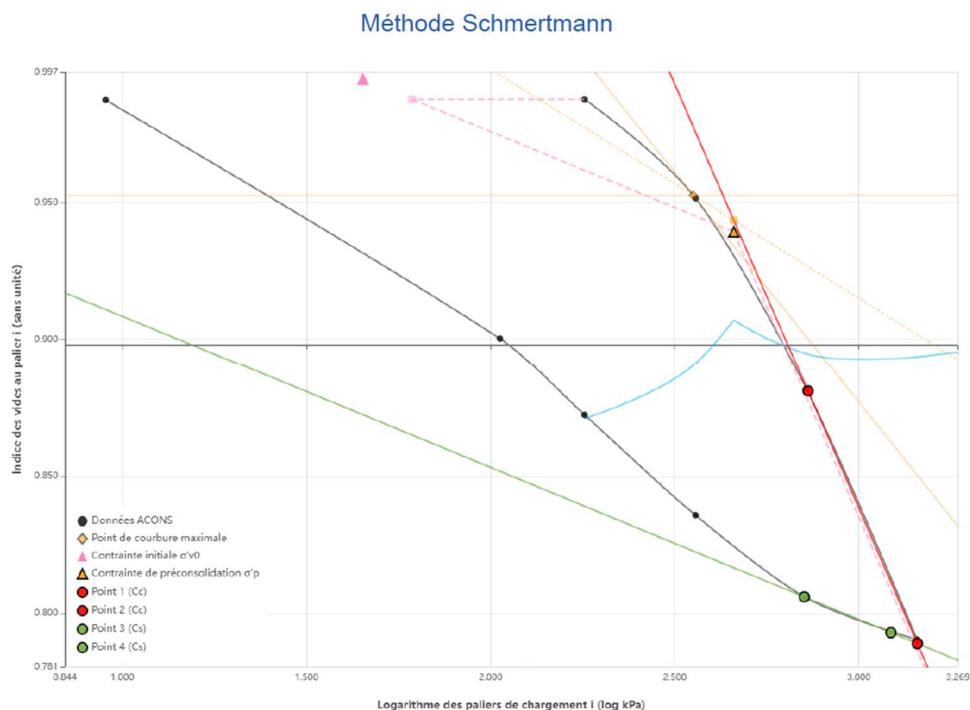
L'opération consiste à bouger  $\sigma'_p$  de façon à ce que la courbe des  $\Delta e$  soit la plus symétrique possible par rapport à la droite verticale d'abscisse  $\sigma'_p$ .

Nous présentons ci-dessous un extrait de l'outil numérique proposé :



L’utilisateur est invité à cliquer pour placer les points définissant la droite rouge, puis à cliquer pour placer les points définissant la droite verte. Il peut ensuite ajuster ces droites de façon à ce que la courbe bleue soit la plus symétrique possible. Un point a été créé, correspondant au point pour lequel l’aire de la droite bleue est identique à sa gauche et à sa droite.

Attention, la méthode de Schmertmann est plutôt bien adaptée au sol non-gonflant, mais elle présente quelques limites dans le cas des sols gonflants. Nous montrant ci-dessous un exemple d’un dépouillement réalisé avec la méthode de Schmertmann sur les sols gonflants. On voit que la courbe œdométrique reconstituée en rose paraît discutable.



#### Remarque théorique :

La pression de préconsolidation est la pression maximale historiquement connue par l’échantillon de sol. Si la contrainte initiale avant prélèvement  $\sigma'_{v0}$  est inférieure à  $\sigma'_p$ , on dit que le sol est surconsolidé. Si  $\sigma'_{v0} = \sigma'_p$ , alors on dit que le sol est normalement consolidé.

Dans son document *Technique de l’ingénieur* [2], Magnan écrit : « La pression de préconsolidation  $\sigma'_p$  n’est pas nécessairement égale à la contrainte effective initiale  $\sigma'_{v0}$  existant actuellement dans le sol où l’on a prélevé l’échantillon testé. Au cours de son histoire, le sol a pu être soumis au poids de couches de terrain ou de glace qui ont disparu par la suite. Le vieillissement du sol sous son propre poids peut aussi avoir produit un effet comparable. Lorsque la pression de préconsolidation est supérieure à la contrainte effective verticale  $\sigma'_{v0}$ , on dit que le sol est **surconsolidé**. Si les deux contraintes sont égales, le sol est dit **normalement consolidé**. La pression de préconsolidation ne peut être inférieure à la contrainte effective verticale actuelle  $\sigma'_{v0}$ . Si l’on se trouve dans ce cas, l’un des deux termes (ou les deux) est erroné (sont erronés) : il se peut, par exemple, que l’essai œdométrique ait été réalisé sur une éprouvette de sol perturbée par les opérations de prélèvement et de taille de l’éprouvette. Il se peut aussi que la contrainte effective verticale sur le site de prélèvement ait été mal évaluée, en général parce que l’on s’est trompé sur la valeur réelle de la pression interstitielle dans le sol ».



Le **rapport de surconsolidation** caractérise l'état initial du sol. Il est égal à :

$$R_{oc} = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}}$$

« Le rapport de surconsolidation est souvent noté OCR, mais la notation  $R_{oc}$  est préférable. »

La surconsolidation peut également être calculée sous la forme d'une surcharge, cette **surcharge de consolidation** est définie par le paramètre :

$$POP = \sigma'_p - \sigma'_{v0}$$



## 5. CALCULS SUPPLÉMENTAIRES

### 5.1. MODULES OEDOMÉTRIQUES

« Ce module varie avec la contrainte effective  $\sigma'$  et il est nécessaire de préciser pour chaque valeur la variation de contraintes à laquelle il correspond [...]. À partir d'un essai de compressibilité par palier, on peut définir des modules sécants entre deux points de la courbe de compressibilité ».

$$E_{oed} (\sigma'_n, \sigma'_{n+1}) = \frac{\sigma'_{n+1} - \sigma'_n}{(H_n - H_{n+1})/H_0} = \frac{(\sigma'_{n+1} - \sigma'_n)(1 + e_0)}{e_n - e_{n+1}}$$

### 5.2. COEFFICIENTS DE PERMÉABILITÉ

Pour l'incrément de charge  $\sigma'_n$  à  $\sigma'_{n+1}$ , le coefficient de perméabilité  $k_{vn}$  est donné par la relation [1] :

$$k_{vn} = c_{vn} * m_{vn} * \gamma_w$$

où :

- $c_{vn}$  est le coefficient de consolidation déterminé pour l'incrément  $\sigma'_n$  à  $\sigma'_{n+1}$ ,
- $m_{vn}$  est le coefficient de compressibilité et est calculé par la formule suivante :

$$m_{vn} = -\frac{1}{1 + e_{mn}} * \left( \frac{e_n - e_{n+1}}{\sigma'_n - \sigma'_{n+1}} \right)$$

avec :

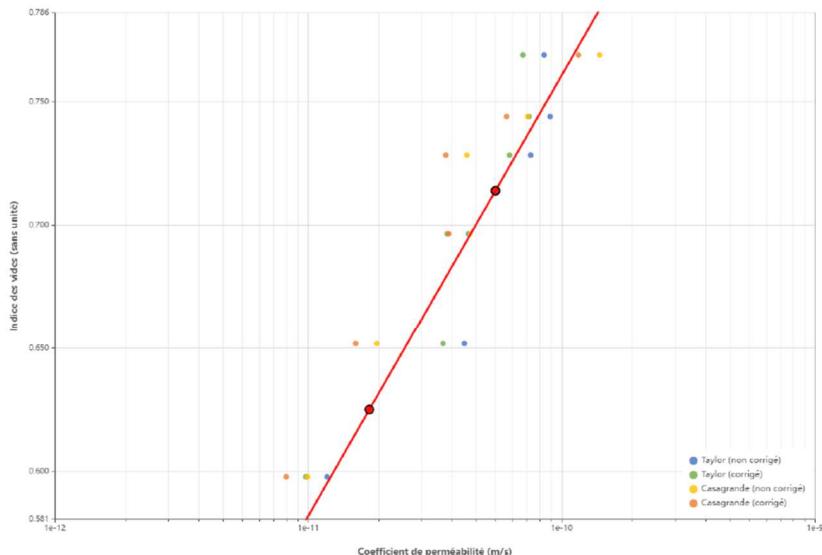
- $e_n$  est l'indice des vides pris sur la courbe de compressibilité pour  $\sigma' = \sigma'_n$ ,
- $e_{mn} = \frac{e_n + e_{n+1}}{2}$  est l'indice des vides moyen.

On reporte sur un diagramme semi-logarithmique l'indice des vides  $e_{mn}$  en fonction du logarithme de la perméabilité  $k_{vn}$ . On fait passer une droite par les points représentés en excluant ceux de la plage  $(\sigma'_{v0}, \sigma'_{p0})$ , fréquemment dispersés. On obtient ainsi les coefficients  $e_k$  et  $C_k$  de l'équation :

$$e = e_k + C_k * \lg(k_v)$$



### DÉTERMINATION DU $C_k$ :



### Résultats graphiques proposés :

$$C_k = 0.179$$

$$e_k = 2.548$$

Dans le nouvel outil proposé, l’utilisateur trace la droite de régression linéaire qui lui convient le mieux en plaçant deux points par simples clics.

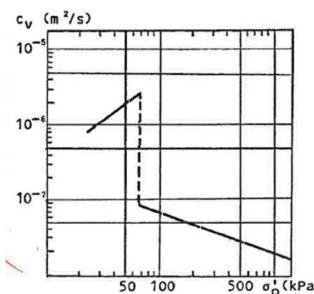
Attention ici, seules les valeurs calculées les contraintes  $\sigma' > \sigma'_p$  sont fiables. Il convient donc de caler cette droite sur les points les plus bas du graphique. Cela donne une indication sur la valeur réelle de  $\sigma'_p$ .

Cette évolution de la perméabilité en fonction de l’indice des vides permet in fine le calcul des tassements avec une perméabilité variable, et par conséquent un coefficient de consolidation  $c_{vn}$  variable au cours de la consolidation. Pour cela, l’emploi d’un outil de calcul numérique est nécessaire.

Nous présentons ci-dessous la courbe type de l’évolution de coefficient de consolidation  $c_{vn}$  en fonction de la contraintes effective du sol, déterminée à partir des  $c_v$  corrigés :

$$c_v = \frac{k_v(1+e)}{0.454 * C_s * \gamma_w} \sigma' \text{ pour } \sigma'_{v0} < \sigma' < \sigma'_p$$

$$c_v = \frac{k_v(1+e)}{0.434 * C_c * \gamma_w} \sigma' \text{ pour } \sigma'_p < \sigma'$$



Coefficient de consolidation corrigé en fonction de la charge



« C'est l'utilisation du diagramme  $c_v = f(\sigma')$  qui permettra de retenir la valeur adéquate ou mieux la Loi expérimentale de variation à introduire dans un programme de calcul » [1]

## 5.3. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Avant d'exporter les résultats au format .pdf, nous pouvons entrer l'opérateur de l'essai ainsi que des observations. Ces observations peuvent par exemple être : « suspicion d'échantillon remanié » ; « échantillon présentant une teneur en eau faible » ; etc. Ces observations peuvent aiguiller le destinataire sur la pertinence des résultats.

Importation des données > Consolidation de Taylor > Consolidation de Casagrande > Courbes de compressibilité > Perméabilités > Procès-verbal

Procès-verbal de l'essai en .pdf

Session : b7dcec09-6b7e-494b-ac07-33a1352d5685

**C'est fini !** Vous êtes arrivé au bout du dépouillement de l'essai oedométrique. Ci-dessous, vous pouvez :

- Mentionner l'opérateur qui a traité cet essai (cela ne concerne que le laboratoire).
- Ajouter des commentaires libres sur lesquels vous souhaitez attirer l'attention.

Les informations saisies apparaîtront sur le procès-verbal qui sera généré grâce au bouton [**Exporter**] situé en bas de page.

Pour revenir en arrière et modifier tels ou tels points du dépouillement, utilisez le breadcrumb en haut de la page.

Opérateur de l'essai :  
Vincent TETU

Observation(s) du laboratoire :  
J'ai une observation.

Exporter

Enfin, en cliquant sur exporter, nous un fichier .pdf sera généré contenant :

- Les tableaux récapitulatifs des données d'entrée, en p.1,
- Les tableaux des résultats calculés, en p.2,
- Les graphiques, pages suivantes.

CONTRAINTE DE PRÉCONSOLIDATION, INDICES DE COMPRESSION ET DE RECOMPRESSION :					
Méthode utilisée	$\sigma'_p$ (en kPa)	$C_c$ (sans unité)	$C_s$ (sans unité)	POP (en kPa)	ROC (sans unité)
L.C.P.C	486.8	0.300	0.053	441.810	10.818
Casagrande	435.3	-	-	390.271	9.673
Schmertmann	457.6	-	-	412.608	10.169

COEFFICIENTS DE CONSOLIDATION ET DE PERMÉABILITÉ :											
Variations des paliers [n à n+1]	$C_v$ non corrigé (Taylor, m <sup>2</sup> /s)	$C_v$ corrigé (Taylor, m <sup>2</sup> /s)	$C_v$ non corrigé (Casagrande, m <sup>2</sup> /s)	$C_v$ corrigé (Casagrande, m <sup>2</sup> /s)	$C_a$ (sans unité)	$C_{ce}$ (sans unité)	$k_{vn}$ non corrigé (Taylor, m/s)	$k_{vn}$ corrigé (Taylor, m/s)	$k_{vn}$ non corrigé (Casagrande, m/s)	$k_{vn}$ corrigé (Casagrande, m/s)	$E_{ped}$ (MPa)
180 kPa → 360 kPa	$1.410 \times 10^{-9}$	$1.163 \times 10^{-9}$	$1.145 \times 10^{-9}$	$9.441 \times 10^{-9}$	$1.022 \times 10^{-3}$	$2.039 \times 10^{-3}$	$1.433 \times 10^{-11}$	$1.182 \times 10^{-11}$	$1.163 \times 10^{-11}$	$9.594 \times 10^{-12}$	10.0
360 kPa → 720 kPa	$8.079 \times 10^{-9}$	$6.663 \times 10^{-9}$	$6.680 \times 10^{-9}$	$5.492 \times 10^{-9}$	$3.342 \times 10^{-3}$	$6.668 \times 10^{-3}$	$8.167 \times 10^{-12}$	$6.735 \times 10^{-12}$	$6.733 \times 10^{-12}$	$5.552 \times 10^{-12}$	10.3
720 kPa → 1440 kPa	$5.737 \times 10^{-9}$	$4.732 \times 10^{-9}$	$4.416 \times 10^{-9}$	$3.642 \times 10^{-9}$	$5.801 \times 10^{-3}$	$1.157 \times 10^{-2}$	$3.967 \times 10^{-12}$	$3.271 \times 10^{-12}$	$3.053 \times 10^{-12}$	$2.518 \times 10^{-12}$	15.7
1440 kPa → 720 kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
720 kPa → 360 kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
360 kPa → 180 kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
180 kPa → 106 kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
106 kPa → 9 kPa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Note : selon la méthode L.C.P.C, dans le cas où l'incrément de charge  $i$  est inférieur à 0.5 ET que les coefficients de consolidation  $C_v$  dépassent  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s, la méthode de Taylor est considérée comme "préférable" à celle de Casagrande pour déterminer les coefficients de consolidation. Il est important de noter que cette préférence n'implique pas une réciproque systématique.

## 6. CONCLUSION

Le développement de cet outil numérique de dépouillement des essais œdométriques s'inscrit dans une volonté de moderniser et de fiabiliser les pratiques de laboratoire. Là où les feuilles de calcul Excel actuellement utilisées montraient leurs limites en termes d'ergonomie, de traçabilité et de transparence des calculs, l'application web proposée permet de franchir un cap significatif.

Le présent document a détaillé pas à pas l'ensemble des calculs nécessaires, depuis la préparation de l'échantillon jusqu'à l'interprétation finale des résultats. Chaque étape a été replacée dans le cadre des méthodes reconnues (LCPC n°13, norme ISO, et autres approches bibliographiques), puis confrontée aux contraintes pratiques rencontrées au laboratoire. Les choix de mise en œuvre dans l'outil de dépouillement ont ainsi été justifiés, permettant à tout utilisateur curieux de comprendre la logique interne du programme.

Au-delà de la simple transcription des normes, ce travail a cherché à apporter des améliorations concrètes :

- automatisation de l'import des données d'essais,
- ergonomie graphique pour le dépouillement (droites ajustables, validation visuelle des points),
- prise en compte des différentes méthodes de consolidation et de détermination de la contrainte de préconsolidation,
- intégration de correctifs (effet de la température, sols gonflants),
- possibilité de comparer plusieurs approches d'interprétation pour fiabiliser les résultats.

Pour les laborantins, l'outil offre un gain de temps et une meilleure lisibilité des résultats ; pour les ingénieurs, il garantit une plus grande transparence et une traçabilité complète des choix de calculs.

En définitive, ce projet constitue une étape importante vers une exploitation plus robuste, plus transparente et plus efficace des essais œdométriques, au service des laboratoires et des bureaux d'études.



## 7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Magnan, Mieussens, Soyez, Vautrain. Essais oedométriques – Méthodes d’Essai LCPC n°13
- [2] Magnan J.P. (2015). Déformabilité des sols. Tassemens. Consolidation. Techniques de l’Ingénieur.
- [3] NF EN ISO 17892-5 : Reconnaissance et essais géotechniques – Essais de laboratoire sur les sols – Partie 5 : Essai de chargement par palier à l’oedomètre
- [4] J-C. MARTIN. (2013). Carte de France des profils de température 0-200m selon les zones climatiques – Rapport final -BRGM/RP-62281-FR
- [5] D 2435-03 : Standard Test methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading
- [6] XP P 94-090-1 (1997) – Essai de compressibilité sur matériaux fins quasi-saturés avec chargement par paliers
- [7] Serratrice J.F., 2020. Un bilan des pratiques courantes de mesure des propriétés de compressibilité des sols fins au laboratoire. Rapport Cerema Méditerranée, Février 2020, 166 p.
- [8] L. Arabet (2010). Modélisation numérique du tassemement et de la consolidation des sols sous l’oedomètre
- [9] BS 1377-5 :1990 – Methods of test for Soils for Civil engineering purposes – Part5 : Compressibility, permeability ans durability tests



## ANNEXES



**ANNEXE 1 :**  
**PRESENTATION DE L’OUTIL DE**  
**CALCUL DE LA CONTRAINTE**  
**VERTICALE INITIALE**



Les contraintes appliquées au sol durant l'essai sont fonction de la contrainte verticale initiale  $\sigma'_0$ .

Nous avons convenu que le choix de cette donnée d'entrée revenait à l'ingénieur en charge de l'étude.  
Nous avons développé un outil Excel intégré à la feuille de commande labo existante.

L'outil se présente de cette façon. Lorsque l'ingénieur réalise sa commande au laboratoire, il apercevra dans l'encadré « Mécanique des sols » les données à renseigner au laboratoire avant la réalisation d'un essai de compressibilité à l'œdomètre :

- La profondeur de l'échantillon
  - La profondeur de la nappe
  - La contrainte verticale initiale de l'échantillon

Nous avons intégré un bouton « Assistant  $\sigma'_{v0}$  » à droite des colonnes permettant le renseignement des valeurs précédemment citées :

*Extrait de la feuille de commande labo modifiée pour le calcul de  $\sigma'_{vo}$*

En cliquant sur l'assistant, un nouvel onglet apparaît et s'affiche à l'écran directement. L'ingénieur peut y renseigner plusieurs couches de sol, les poids volumiques humides et saturés de ces couches, le niveau de la nappe :

Extrait de la feuille de commande labo modifiée pour le calcul de  $\sigma'_{vo}$

Un bouton permet le calcul automatique de  $\sigma'_{\text{vo}}$ . Les calculs sont détaillés ci-après :

Le code additionne les contributions de chaque couche entre la surface et la profondeur de l'échantillon  $z_{\text{ech}}$ :

$$\sigma_{v0}(z_{\text{ech}}) = \sum_i h_i \cdot \gamma_{n,i}$$

Le code ajoute ensuite un terme correctif si la nappe traverse les couches considérées :

Ton code ajoute ensuite un **terme correctif** si la nappe traverse les couches considérées :

$$\Delta\gamma = \sum_i h_{eau,i} \cdot (\gamma_{sat,i} - \gamma_{n,i})$$

avec

$$h_{eau,i} = \max(0, \min(z_{\text{ech}}, z_i) - \max(z_{\text{nappe}}, z_{i-1}))$$

C'est l'épaisseur de sol sous la nappe, dans la couche *i*.

La pression interstitielle à la profondeur de l'échantillon est calculée somme suit :



$$u(z_{\text{ech}}) = \gamma_w \cdot \max(0, z_{\text{ech}} - z_{\text{nappe}})$$

Le code complet est fourni en annexe.

L'ingénieur peut ensuite cliquer sur le bouton transférer. Une fenêtre de dialogue lui indique de cliquer sur la ligne sur laquelle il souhaite inscrire les résultats des calculs. Un débogage a été fait pour éviter les inscriptions dans les cellules qui ne sont pas prévues à cet effet.



**ANNEXE 2 :**  
**CODE VBA POUR LE CALCUL DE**  
**LA CONTRAINTE VERTICALE**  
**EFFECTIVE INITIALE**

```

Sub Calcul_sigma()
    Dim sigma_v0 As Double, sigma_prm_v0 As Double, u As Double, delta_gamma As Double
    Dim i As Integer, compteur As Integer
    Dim prof_ech As Double, prof_nappe As Double, gamma_eau As Double
    Dim prof As Double

    ' Vérification des cellules B17 à B19
    If Not IsNumeric(Cells(17, 2).Value) Or Cells(17, 2).Value = "" Then
        MsgBox "Veuillez entrer un nombre dans la cellule B17 (?eau).", vbExclamation
        Exit Sub
    End If

    If Not IsNumeric(Cells(18, 2).Value) Or Cells(18, 2).Value = "" Then
        MsgBox "Veuillez entrer un nombre dans la cellule B18 (Profondeur nappe).", vbExclamation
        Exit Sub
    End If

    If Not IsNumeric(Cells(19, 2).Value) Or Cells(19, 2).Value = "" Then
        MsgBox "Veuillez entrer un nombre dans la cellule B19 (Profondeur de l'échantillon).",
vbExclamation
        Exit Sub
    End If

    ' Affectation des valeurs après validation
    prof_ech = Cells(19, 2).Value
    prof_nappe = Cells(18, 2).Value
    gamma_eau = Cells(17, 2).Value

    ' Vérification ligne par ligne des données du tableau A2:D...
    i = 2
    Do While Cells(i, 1).Value <> ""
        ' Vérifie que la profondeur est un nombre ou vide
        If Cells(i, 2).Value <> "" And Not IsNumeric(Cells(i, 2).Value) Then
            MsgBox "Erreur : la cellule " & Cells(i, 2).Address & " doit contenir un nombre.", vbExclamation
            Exit Sub
        End If

        ' Vérifie que ?n est bien un nombre
        If Not IsNumeric(Cells(i, 3).Value) Then
            MsgBox "Erreur : la cellule " & Cells(i, 3).Address & " (?n) doit contenir un nombre.", vbExclamation
            Exit Sub
        End If

        ' Vérifie que ?sat est bien un nombre
        If Not IsNumeric(Cells(i, 4).Value) Then
            MsgBox "Erreur : la cellule " & Cells(i, 4).Address & " (?sat) doit contenir un nombre.", vbExclamation
            Exit Sub
        End If

        i = i + 1
    Loop
    compteur = compteur - 1 ' dernière couche avec données

```



```

prof = prof_ech
sigma_v0 = 0
delta_gamma = 0
u = 0
Do While compteur > 1
    If prof > Cells(compteur, 2).Value Then
        Dim epaisseur As Double
        epaisseur = prof - Cells(compteur, 2).Value
        sigma_v0 = sigma_v0 + epaisseur * Cells(compteur, 3).Value

        If prof_nappe < prof Then
            Dim z_base As Double
            z_base = WorksheetFunction.Max(prof_nappe, Cells(compteur, 2).Value)
            Dim ep_eau As Double
            ep_eau = prof - z_base
            delta_gamma = delta_gamma + ep_eau * (Cells(compteur, 4).Value - Cells(compteur,
3).Value)
            u = u + ep_eau * gamma_eau
        End If
        prof = Cells(compteur, 2).Value
    End If
    compteur = compteur - 1
Loop

sigma_prm_v0 = sigma_v0 + delta_gamma - u

Cells(17, 4).Value = sigma_v0
Cells(18, 4).Value = u
Cells(19, 4).Value = sigma_prm_v0
End Sub

```



**ANNEXE 3 :**

**TABLEAU DES DEPARTEMENTS  
METROPOLITAINS CLASSES PAR  
ZONES CLIMATIQUES, ET  
TEMPERATURES PAR TRANCHE  
DE 25M**



N°	Département	Zone climatique	[0 - 25[	[25 - 50[	[50 - 75[	[75 - 100[	[100 - 125[	[125 - 150[	[150 - 175[	[175 - 200]
01	Ain	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
02	Aisne	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
03	Allier	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
04	Alpes-de-Haute-Provence	H2d	12,7	12,9	13,1	13,3	13,5	13,7	13,9	14,1
05	Hautes-Alpes	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
06	Alpes-Maritimes	H3	14,8	14,8	14,8	14,8	15,2	15,8	16,4	17,0
07	Ardèche	H2d	12,7	12,9	13,1	13,3	13,5	13,7	13,9	14,1
08	Ardennes	H1b	11,2	11,3	11,4	11,6	11,9	12,0	12,2	12,4
09	Ariège	H2c	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	15,9	16,3	16,7
10	Aube	H1b	11,2	11,3	11,4	11,6	11,9	12,0	12,2	12,4
11	Aude	H3	14,8	14,8	14,8	14,8	15,2	15,8	16,4	17,0
12	Aveyron	H2c	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	15,9	16,3	16,7
13	Bouches-du-Rhône	H3	14,8	14,8	14,8	14,8	15,2	15,8	16,4	17,0
14	Calvados	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
15	Cantal	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
16	Charente	H2b	12,6	13,0	13,2	13,6	13,9	14,3	14,8	15,1
17	Charente-Maritime	H2b	12,6	13,0	13,2	13,6	13,9	14,3	14,8	15,1
18	Cher	H2b	12,6	13,0	13,2	13,6	13,9	14,3	14,8	15,1
19	Corrèze	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
21	Côte-d'Or	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
22	Côtes-d'Armor	H2a	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5
23	Creuse	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
24	Dordogne	H2c	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	15,9	16,3	16,7
25	Doubs	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
26	Dôme	H2d	12,7	12,9	13,1	13,3	13,5	13,7	13,9	14,1
27	Eure	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
28	Eure-et-Loir	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
29	Finistère	H2a	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5
30	Gard	H3	14,8	14,8	14,8	14,8	15,2	15,8	16,4	17,0
31	Haute-Garonne	H2c	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	15,9	16,3	16,7
32	Gers	H2c	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	15,9	16,3	16,7
33	Gironde	H2c	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	15,9	16,3	16,7
34	Hérault	H3	14,8	14,8	14,8	14,8	15,2	15,8	16,4	17,0
35	Ille-et-Vilaine	H2a	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5
36	Indre	H2b	12,6	13,0	13,2	13,6	13,9	14,3	14,8	15,1
37	Indre-et-Loire	H2b	12,6	13,0	13,2	13,6	13,9	14,3	14,8	15,1
38	Isère	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
39	Jura	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
40	Landes	H2c	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	15,9	16,3	16,7
41	Loir-et-Cher	H2b	12,6	13,0	13,2	13,6	13,9	14,3	14,8	15,1
42	Loire	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
43	Haute-Loire	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
44	Loire-Atlantique	H2b	12,6	13,0	13,2	13,6	13,9	14,3	14,8	15,1
45	Loiret	H1b	11,2	11,3	11,4	11,6	11,9	12,0	12,2	12,4
46	Lot	H2c	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	15,9	16,3	16,7
47	Lot-et-Garonne	H2c	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	15,9	16,3	16,7
48	Lozère	H2d	12,7	12,9	13,1	13,3	13,5	13,7	13,9	14,1
49	Maine-et-Loire	H2b	12,6	13,0	13,2	13,6	13,9	14,3	14,8	15,1
50	Manche	H2a	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5
51	Marnes	H1b	11,2	11,3	11,4	11,6	11,9	12,0	12,2	12,4
52	Haute-Marne	H1b	11,2	11,3	11,4	11,6	11,9	12,0	12,2	12,4
53	Mayenne	H2b	12,6	13,0	13,2	13,6	13,9	14,3	14,8	15,1
54	Meurthe-et-Moselle	H1b	11,2	11,3	11,4	11,6	11,9	12,0	12,2	12,4
55	Meuse	H1b	11,2	11,3	11,4	11,6	11,9	12,0	12,2	12,4
56	Morbihan	H2a	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5
57	Moselle	H1b	11,2	11,3	11,4	11,6	11,9	12,0	12,2	12,4
58	Nièvre	H1b	11,2	11,3	11,4	11,6	11,9	12,0	12,2	12,4
59	Nord	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
60	Oise	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
61	Orne	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
62	Pas-de-Calais	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
63	Puy-de-Dôme	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
64	Pyrénées-Atlantiques	H2c	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	15,9	16,3	16,7
65	Hauts-Pyrénées	H2c	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	15,9	16,3	16,7
66	Pyrénées-Orientales	H3	14,8	14,8	14,8	14,8	15,2	15,8	16,4	17,0
67	Bas-Rhin	H1b	11,2	11,3	11,4	11,6	11,9	12,0	12,2	12,4
68	Haut-Rhin	H1b	11,2	11,3	11,4	11,6	11,9	12,0	12,2	12,4
69	Rhône	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
70	Haute-Saône	H1b	11,2	11,3	11,4	11,6	11,9	12,0	12,2	12,4
71	Saône-et-Loire	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
72	Sarthe	H2b	12,6	13,0	13,2	13,6	13,9	14,3	14,8	15,1
73	Savoie	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
74	Haute-Savoie	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
75	Paris	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
76	Seine-Maritime	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
77	Seine-et-Marne	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
78	Yvelines	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
79	Deux-Sèvres	H2b	12,6	13,0	13,2	13,6	13,9	14,3	14,8	15,1
80	Somme	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
81	Tarn	H2c	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	15,9	16,3	16,7
82	Tarn-et-Garonne	H2c	13,9	14,3	14,7	15,1	15,5	15,9	16,3	16,7
83	Var	H3	14,8	14,8	14,8	14,8	15,2	15,8	16,4	17,0
84	Vaucluse	H2d	12,7	12,9	13,1	13,3	13,5	13,7	13,9	14,1
85	Vendée	H2b	12,6	13,0	13,2	13,6	13,9	14,3	14,8	15,1
86	Vienne	H2b	12,6	13,0	13,2	13,6	13,9	14,3	14,8	15,1
87	Haute-Vienne	H1c	11,2	11,3	11,4	11,5	11,6	11,7	11,8	12,0
88	Vosges	H1b	11,2	11,3	11,4	11,6	11,9	12,0	12,2	12,4
89	Yonne	H1b	11,2	11,3	11,4	11,6	11,9	12,0	12,2	12,4
90	Territoire de Belfort	H1b	11,2	11,3	11,4	11,6	11,9	12,0	12,2	12,4
91	Essonne	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
92	Hauts-de-Seine	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
93	Seine-Saint-Denis	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
94	Val-de-Marne	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
95	Val-d'Oise	H1a	11,3	11,4	11,5	11,6	11,9	12,1	12,3	12,5
2A	Corse-du-Sud	H3	14,8	14,8	14,8	14,8	15,2	15,8	16,4	17,0
2B	Haute-Corse	H3	14,8	14,8	14,8	14,8	15,2	15,8	16,4	17,0