

3.2.4. Evolution des contraintes avec le temps

La figure 24 présente l'évolution de la contrainte effective et de la pression interstitielle sous l'action de la consolidation au milieu de la couche compressible considérée.

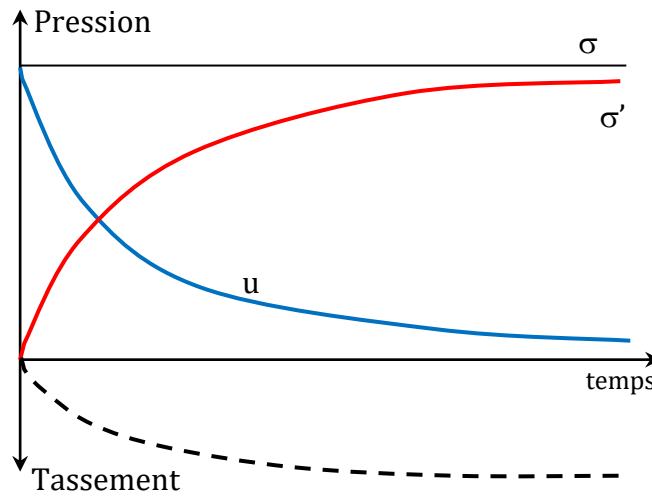


Figure 24. Evolution des contraintes et des déformations en phase de consolidation

Si on note s_∞ et σ'_∞ respectivement le tassement primaire final et la contrainte effective primaire finale, on définit le degré de tassement U_s et le degré de consolidation U à t donné par :

$$U_s = \frac{s_t}{s_\infty} \cdot 100 \quad \text{et} \quad U = \frac{\sigma'_t}{\sigma'_\infty} \cdot 100$$

où s_t est le tassement à t et σ'_t la contrainte effective à t .

Remarque

Pour une couche de sol compressible comprise en deux couches drainantes, le maximum de surpression interstitielle se situera, tout au long de la phase de consolidation, au centre de la couche compressible (Figure 25). Il est donc important, lorsque l'on mesure les variations de pressions interstitielles dans une couche de sol compressible, de placer les capteurs au milieu de la couche considérée.

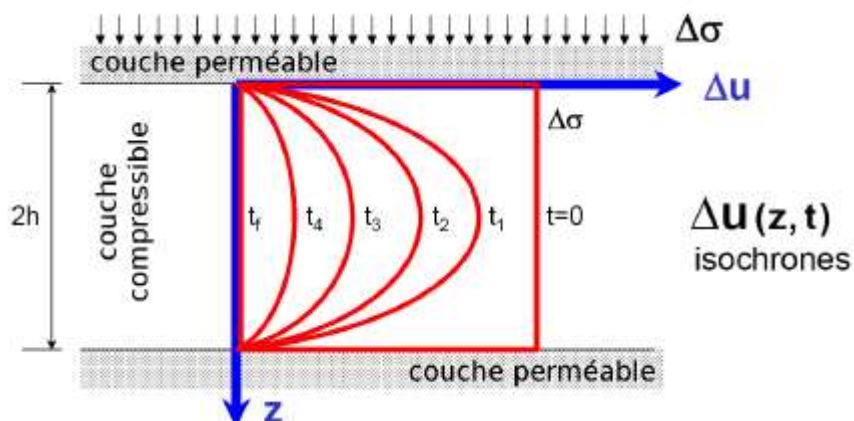


Figure 25. Isochrone de surpression interstitielle pour une couche drainée sur ces deux faces

3.2.5. Evolution des contraintes avec la charge

Lorsque l'on applique une charge en condition œdométriques, en schématisant, dans les coordonnées $(e, \lg \sigma'_v)$, on obtient une première droite de faible pente et une seconde droite de pente beaucoup plus grande. L'intersection des 2 droites indique la pression de préconsolidation σ'_{pa} , c'est à dire son état initial (Figure 26.a). Si, à partir de cette situation actuelle on recharge l'échantillon de sol sous une contrainte σ'_v supérieure à σ'_{pa} on obtient une nouvelle pression de préconsolidation σ'_{pb} égale à σ'_v . Enfin le chemin de déchargement à partir de σ'_{pb} est parallèle au chemin de déchargement à partir de σ'_{pa} (Figure 26b).

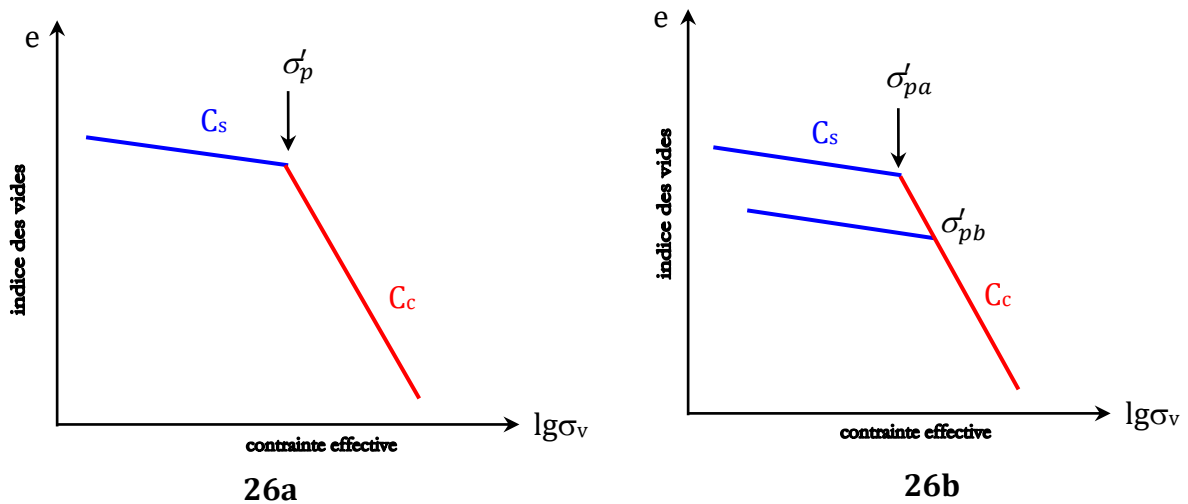


Figure 26. Courbes œdométriques schématisées de compressibilité en coordonnées semi logarithmiques

Cette représentation de la courbe œdométrique n'est pas valable pour les argiles sensibles et les argiles gonflantes.

3.2.6. Appareil de mesure des paramètres de tassement d'un sol : l'odomètre

Le principe de l'essai consiste à mesurer le tassement s_1 d'une éprouvette de sol cylindrique soumise à une compression uniaxiale σ_1 croissante en empêchant toute déformation latérale $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$.

L'appareil est constitué d'une cellule contenant l'échantillon et d'un bâti de chargement (Figure 27).

La cellule est composée de :

- un cylindre rigide contenant l'échantillon,
- deux pierres poreuses assurant le drainage de l'échantillon,
- un dispositif d'arrivée d'eau assurant la saturation de l'échantillon,
- un piston coulissant dans le cylindre et venant charger l'échantillon,
- un ou deux capteurs mesurant les déplacements du piston.

En général, l'épaisseur de l'échantillon est de 20 mm et un diamètre de 70 mm.

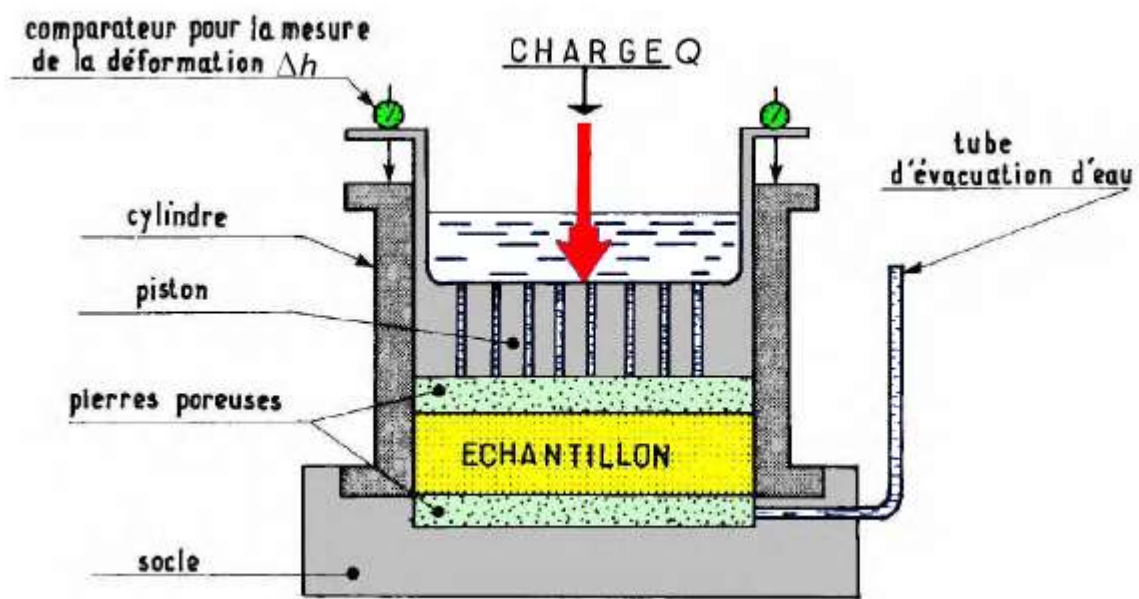


Figure 27. Photo et schéma d'un appareil œdométrique

3. Calcul des tassements

4.1- Généralités

Le tassement des terrains sous l'action des charges est un phénomène absolument général qui peut parfois prendre des proportions spectaculaires.

Lorsqu'on charge un sol non saturé, les efforts se transmettent instantanément aux grains et la déformation est quasi immédiate. On peut estimer que le sol se comporte comme un milieu pseudo-élastique.

En milieu complètement saturé, après un chargement rapide, c'est l'eau même qui prend tout l'effort. Cette eau se met en mouvement et, dans la transmission des charges, les grains se substituent progressivement à l'eau qui s'écoule à une vitesse fonction de la perméabilité du milieu. Au bout d'un certain temps, toutes les charges se transmettent directement de grain à grain, l'eau interstitielle a repris en chaque point la pression initiale qui existait avant la mise en charge du milieu. On dit alors que le milieu est **consolidé** sous l'action des forces extérieures considérées.

L'équilibre final en milieu saturé se produit au bout d'un certain temps, qui peut varier de quelques secondes ou minutes dans les milieux sablo-graveleux perméables, à plusieurs années ou dizaines d'années dans les argiles très peu perméables.

La variation du volume des grains argileux est pratiquement nulle sous l'action des contraintes relativement faibles que l'on rencontre généralement en mécanique des sols et par conséquent toute diminution de volume d'un échantillon d'argile saturé ne peut être obtenue qu'au prix d'une expulsion d'eau. Ceci met bien en évidence le rapport très étroit qui lie compressibilité et perméabilité dans ce type de sol.

Les méthodes de calcul des tassements couramment utilisées se rattachent à quatre groupes :

- Les méthodes utilisant la théorie de l'élasticité ;
- Les méthodes indirectes séparant le calcul des variations de contraintes dans le massif de sol et le calcul des tassements qu'elles produisent ;
- Les méthodes empiriques, fondées sur des corrélations ;
- Les méthodes numériques, qui permettent d'utiliser des lois de comportement plus complexes.

4.2. Méthode élastique :

Pour certaines configurations simples (milieu élastique homogène semi-indéfini), l'application directe de la théorie de l'élasticité permet de déterminer analytiquement le tassement (Figure 28). Les formules (1) et (2) donnent la valeur du tassement pour les configurations non ancrées et ancrées :

$$s = c_f \frac{1-(\nu')^2}{E'} B \cdot q' \text{ ----- 1}$$

$$s = c_f \frac{1-(\nu')^2}{E'} B \cdot (q' - \sigma'_0) \text{ ----- 2}$$

Où :

S : est le tassement au point considéré,

B : le diamètre ou la largeur de la semelle,

q' : la contrainte effective moyenne appliquée au sol par la semelle,

c_f : un coefficient de forme fonction du rapport L/B et du type de semelle (Tableau 1),

σ'_0 : la contrainte effective initiale régnant au niveau de la semelle (pour les semelles ancrées).

Tableau 1. Détermination du coefficient de forme c_f en fonction du rapport L/B

| L/B | | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 |
|--------------------|--------|------|------|------|------|------|
| Fondations rigides | | 0,88 | 1,21 | 1,43 | 1,72 | 2,18 |
| Fondations souples | Bord | 0,56 | 0,76 | 0,89 | 1,05 | 1,27 |
| | Centre | 1,12 | 1,53 | 1,78 | 2,10 | 2,58 |



Figure 28. Semelles rigides fondées dans un milieu élastique semi-indéfini.

4.3. Méthode pressiométrique :

Cette évaluation n'est valable qu'en dehors du cas de consolidation et ne s'applique qu'aux fondations dont la largeur B est faible par rapport à l'épaisseur H des couches compressibles.

Le tassement déterminé par la méthode pressiométrique est la combinaison d'un tassement de consolidation et d'un tassement déviatoire. Le tassement de consolidation s_c est le tassement dans la zone située directement sous la semelle, où les contraintes normales sont élevées, qui peut être considérée comme demi-sphérique pour une fondation isolée ou demi-cylindrique pour une fondation continue. Le tassement s_d est dû à des déformations de cisaillement qui se développent dans le domaine déviatoire (Figure 29).

Le tassement de la semelle s'écrit : $s = s_c + s_d$

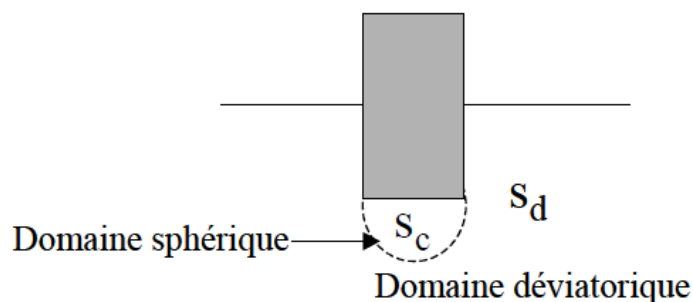


Figure 29. Domaines déviatoires et sphériques

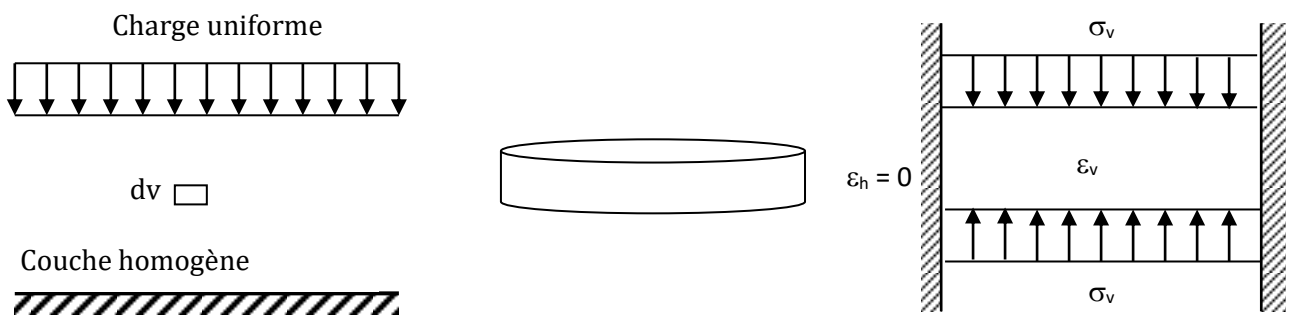
4.4. Méthode classique (œdométrique) de calcul

4.4.1- Introduction

Lorsque le sol support est composé de plusieurs couches de compressibilité différente, la méthode élastique ne peut plus être appliquée. Le plus souvent, la charge appliquée est limitée à la surface d'une fondation, de telle sorte que la surcharge transmise dans le milieu n'est pas uniforme, mais varie avec la profondeur. Pour déterminer cette surcharge à chaque niveau, on admet en première approximation que le sol est élastique, homogène et isotrope, et on est ramené à un calcul d'élasticité linéaire. Pour déterminer le tassement dans ce cas, il faut déterminer la répartition de contrainte en profondeur et calculer le tassement de chaque couche en fonction de la contrainte transmise à la profondeur concernée et de la compressibilité du sol à cette profondeur. Pratiquement lorsque les couches de sol sont épaisses, on les divise en sous-couche de même épaisseur. Le tassement total se calcule en suite par sommation du tassement de chaque sous-couche.

4.4.2- Principe de la méthode

Cette méthode est la plus courante des méthodes de calcul des tassements qui séparent le calcul des variations de contraintes et le calcul des tassements. Elle est exacte lorsque le problème analysé est strictement unidimensionnel : cas d'un massif à surface horizontale soumis à une pression uniforme en surface. En effet la déformation ne peut être que verticale puisqu'il n'y a pas de variations horizontales des contraintes. L'essai œdométrique, qui consiste à charger le sol en bloquant les déformations horizontales, est dans ce cas une représentation exacte des conditions de chargement sur le terrain.



a. Conditions unidimensionnelles de terrain

b. Représentation en laboratoire (odomètre)

La méthode œdométrique est étendue au cas des distributions non uniformes de charges à la surface du massif en tenant compte de la répartition dans le massif des incréments de contrainte verticale créés par le chargement.

La méthode classique du calcul des tassements se décompose en trois parties :

- L'analyse des caractéristiques (module œdométrique $(E'_1, E'_2, E'_3, \dots, E'_n)$ des différentes couches de hauteur $H_1, H_2, H_3, \dots, H_n$ mises en évidence par les sondages de

reconnaissance et la détermination des contraintes régnant aux diverses profondeurs avant l'application des surcharges.

- b) La détermination mathématique des contraintes effectives $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n$ au sein du massif. Pour ce faire, on utilisera la formule de Boussinesq qui permet de calculer, sur chaque facette horizontale, la pression verticale, c'est-à-dire la composante normale σ de la contrainte effective due aux surcharges.
- c) L'évaluation des déformations résultant des pressions verticales exercées, compte tenu de la compressibilité des couches sous-jacentes intéressées.

De façon plus précise, on assimile le massif compressible à un assemblage d'échantillons en forme de galettes disposées en piles verticales jointives. On connaît par le calcul effectué en b la pression appliquée sur chaque échantillon élémentaire. On admet alors que le tassement de ces échantillons est identique à celui qu'on aurait mesuré à l'odomètre en laboratoire sous l'action de la même pression.

Il ne reste plus qu'à sommer les tassements élémentaires de la pile ou de la fraction de pile verticale intéressée, pour obtenir le tassement en un point du massif.

4.4.3. Calcul du tassement produit par la variation de la contrainte verticale

La seconde étape de la méthode œdométrique consiste à calculer le tassement induit par la variation de contrainte. Ce calcul s'effectue au moyen de la courbe de compressibilité œdométrique.

La courbe de compressibilité œdométrique représente la variation de l'indice des vides en fonction de la contrainte effective verticale. Le choix de l'indice des vides comme paramètre de déformation au lieu de la déformation (relative) elle-même permet d'utiliser une seule courbe de compressibilité pour des états initiaux différents. La courbe de compressibilité est représentée en général en fonction du logarithme de la contrainte effective. Ce choix traditionnel conduit à définir les paramètres de compressibilité notés sur la figure 30.

- C_s : indice de gonflement,
- C_c : indice de compression,
- σ'_p : pression de préconsolidation

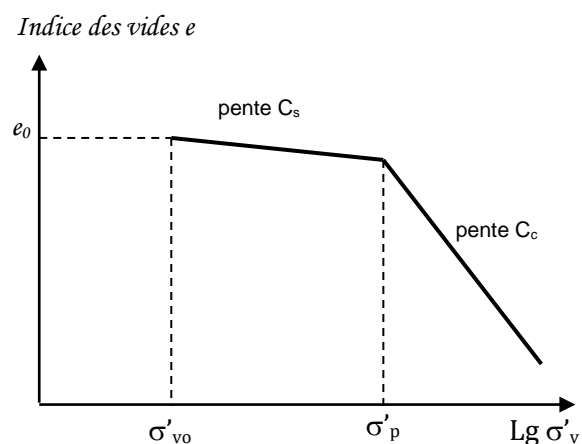


Figure 30. Courbe de compressibilité

Il faut connaître en plus l'état initial du sol, c'est-à-dire l'indice des vides initial e_0 et la contrainte effective verticale initiale σ'_{v0} .

Les courbes expérimentales sont tracées par les points correspondant aux déformations à la fin de chaque palier de chargement à charge constante (pendant 24h). La forme théorique des courbes œdométrique est souvent difficile à retrouver au voisinage de la pression de préconsolidation. Néanmoins, le calcul du tassement se fait toujours sur la courbe linéarisée.

Sur la courbe œdométrique, on peut établir facilement la formule de calcul de la variation de l'indice des vides à partir de e_0 quand la contrainte effective verticale passe de σ'_{v0} à $\sigma'_{vf} = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma_v$. Si l'on reste en dessous de la pression de préconsolidation la formule comporte un seul terme logarithmique :

$$e = e_0 - C_s \lg \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}}. \text{ Sinon, il y a deux termes : } e = e_0 - C_s \lg \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} - C_c \lg \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_p},$$

dont le premier disparaît quand $\sigma'_{v0} = \sigma'_p$ (sol normalement consolidé).

La contrainte effective initiale traduit l'état des contraintes effectives en place et n'est donc pas lié au déroulement de l'essai. Suivant les positions respectives de σ'_{v0} et σ'_p , on utilise le vocabulaire suivant :

- Si $\sigma'_{v0} < \sigma'_p$ on dit que le sol est surconsolidé ;
- Si $\sigma'_{v0} = \sigma'_p$ on dit que le sol est normalement consolidé.

Le cas $\sigma'_{v0} > \sigma'_p$ (pour les sols que certains appellent « sous-consolidés ») ne peut normalement pas se produire. Si l'on est dans cette situation, il faut rechercher si la valeur de la pression de préconsolidation a été sous-estimée, ou si la contrainte effective en place a été surestimée. En effet, la pression de préconsolidation doit être la plus forte pression verticale subie par le sol dans le passé et le présent.

Connaissant la variation de l'indice des vides, on peut calculer la déformation verticale ε_v qui est associé localement (dans chaque couche élémentaire) à la variation de la contrainte verticale effective. La formule reliant ε_v à Δe est la suivante :

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

Une couche élémentaire d'épaisseur initiale H_0 tassera donc, dans le cas général, de :

$$s = \Delta H = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H_0 = \frac{H_0}{1 + e_0} \left[C_s \lg \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} + C_c \lg \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_p} \right]$$

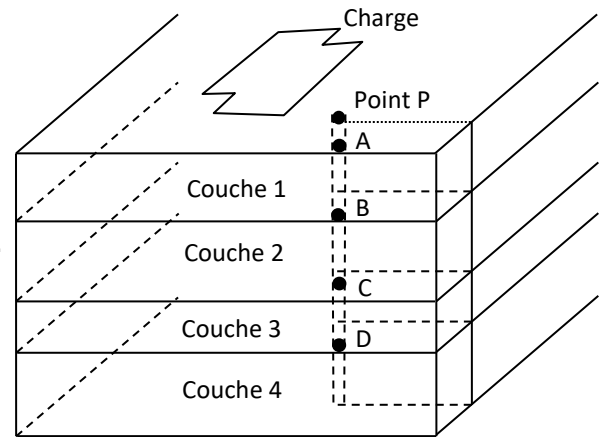
La procédure de calcul des tassements par la méthode œdométrique est résumée sur la figure ci-dessous.

Étape 1 : définir la géométrie du problème et les points dont on calculera le tassement (point P sur la figure). Déterminer les points situés au milieu des couches à la verticale de ces points (points A à D sous le point P).

Étape 2 : Calculer l'augmentation de la contrainte verticale au point choisis, en utilisant l'abaque adéquat.

Étape 3 : calculer le tassement de chaque couche au niveau du point choisis.

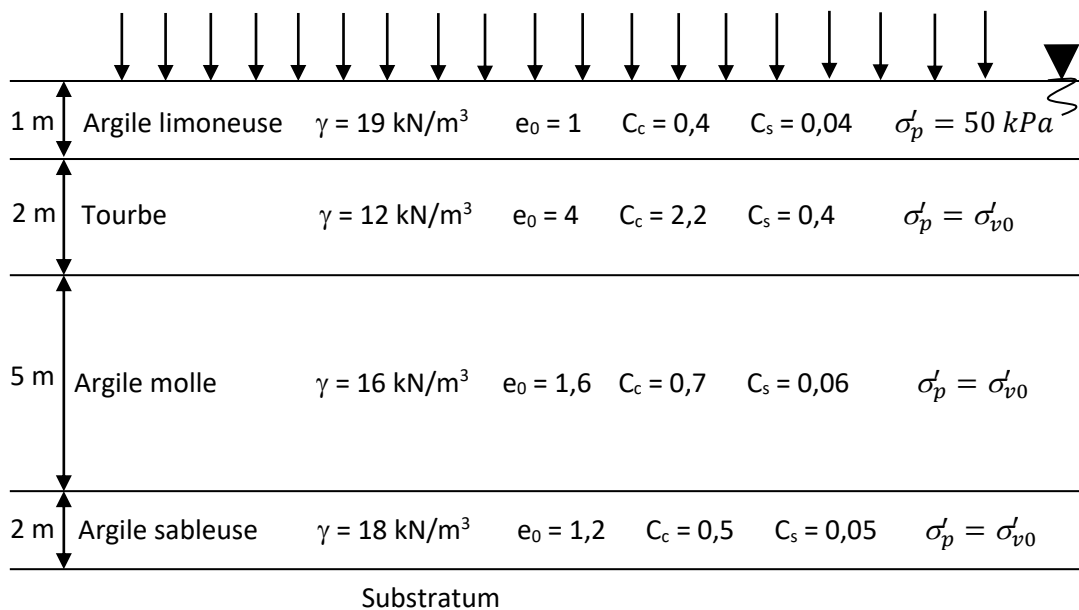
Étape 4 : additionner les tassements des couches pour obtenir le tassement en surface.



Exemple : Tassement d'un multicouche sous charge uniforme.

Une zone de sols compressible est recouverte de 5m de remblai, qui appliquent une pression uniforme de 100 kPa à la surface du sol. La nappe phréatique est au niveau du terrain naturel.

Calculer le tassement final de la couche compressible en utilisant les valeurs des paramètres indiquées sur la figure ci-contre.



Solution

Le tassement total final est la somme des tassements des quatre couches. Pour calculer le tassement d'une couche, on utilise l'état des contraintes effectives au milieu de la couche suivant la formule générale de calcul.

$$s_i = \frac{H_i}{1 + e_{0i}} \left[C_s \lg \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} + C_c \lg \frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma}{\sigma'_p} \right]$$

On obtient les résultats suivants :

S_1 (couche 1) = 0,085m ; S_2 (couche 2) = 0,883m ; S_3 (couche 3) = 0,889m ; S_4 (couche 4) = 0,214m

Le tassement total est donc égal à $s = 2,071\text{m}$. On observe que le tassement vient d'abord des couches normalement consolidées à fort indice des vides (tourbe, puis argile molle, puis argile sableuse).