

Chapitre 5. Lois de comportement des sols. Couplage hydro-mécanique. Postulat de Terzaghi.	2
.....	2
5.1 Généralités .....	2
5.2 Comportement des sols suivant leur degré de saturation.....	2
5.3 Comportement des sols en fonction de leur viscosité.....	3
5.4 Comportement des sols saturés. Principe des contraintes effectives.	
Postulat de Karl Terzaghi.....	3
5.4.1 Comportement d'un sol grenu saturé .....	3
5.4.2 Comportement d'un sol fin saturé.....	4
5.4.3 Postulat de Terzaghi .....	6
5.4.4 Applications du Postulat de Terzaghi.....	7

# Chapitre 5. Lois de comportement des sols. Couplage hydro-mécanique. Postulat de Terzaghi.

## 5.1 Généralités

Après avoir étudié les déformations et les contraintes nous avons besoin de connaître les relations entre les deux et plus généralement les lois de comportement des sols soumis à des forces extérieures quel que soit l'état du sol et la vitesse de chargement.

Nous illustrerons l'ensemble de ce chapitre par un problème classique mais très complet en mécanique des sols de la construction des remblais sur des massifs d'argile molle.

L'exemple choisi est forcément simplifié, il représente un remblai limoneux non saturé reposant sur une argile compressible saturée (Fig.5.1).

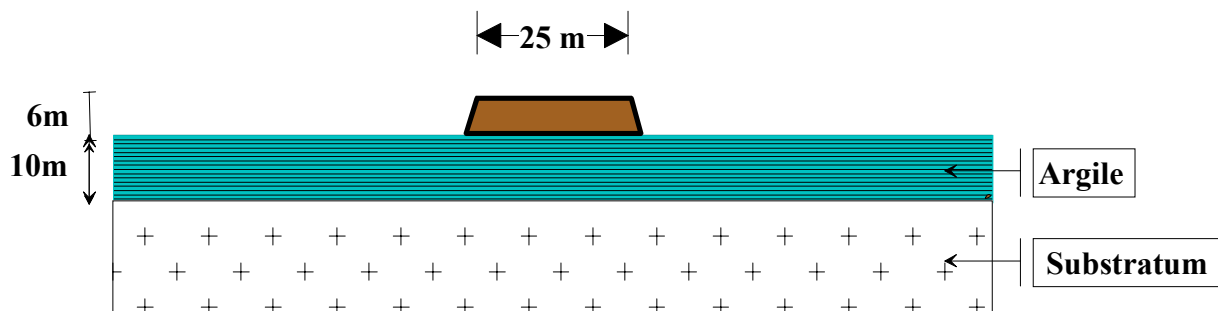


Fig.5.1. Remblai sur massif d'argile saturée

Les problèmes posés au géotechnicien sont :

- Le massif argileux saturé est-il assez résistant pour supporter le poids du remblai ?
- Quels vont être les déplacements du massif argileux, à l'exécution du remblai, et plusieurs années après ?
- Quels va être l'évolution des déplacements dans le temps ?
- La pente du remblai non saturé est-elle compatible avec sa stabilité ? Que devient cette stabilité si le degré de saturation augmente ?

C'est à toutes ces questions que le constructeur doit répondre. Il a donc besoin de lois capables de prédire avec une réalité suffisante le comportement des sols avec les outils habituels de l'ingénieur que sont les essais de laboratoire, les essais in situ ainsi que les méthodes de calcul accompagnées des moyens informatiques.

## 5.2 Comportement des sols suivant leur degré de saturation.

Suivant leur degré de saturation, sec, non saturé et saturé les sols ont des comportements différents. In situ on rencontre rarement des sols secs. Toutefois les sols à faible surface spécifique tels que les graviers et jusqu'aux sables moyens peuvent atteindre quasiment cet état dans la nature.

A l'autre extrême les sols sous la nappe sont saturés y compris généralement les argiles.

Entre les deux on a les sols non saturés, particulièrement répandus dans les pays arides, on les rencontre aussi dans les pays tempérés au-dessus de la nappe pour les sols naturels et dans les

digues, barrages, remblais, pour les sols rapportés. Ce sont les sols fins non saturés qui présentent les comportements les plus complexes.

On étudiera successivement suivant le degré de saturation :

- Le comportement des **sols saturés** dans les chapitres à 10;
- Le comportement des **sols non saturés** dans le chapitre 11.

### 5.3 Comportement des sols en fonction de leur viscosité

Comme tous les matériaux le sol est visqueux, pour certains types de sol il sera nécessaire de prendre en compte sa viscosité qui peut être un paramètre important vis à vis des contraintes et des déplacements et déformations.

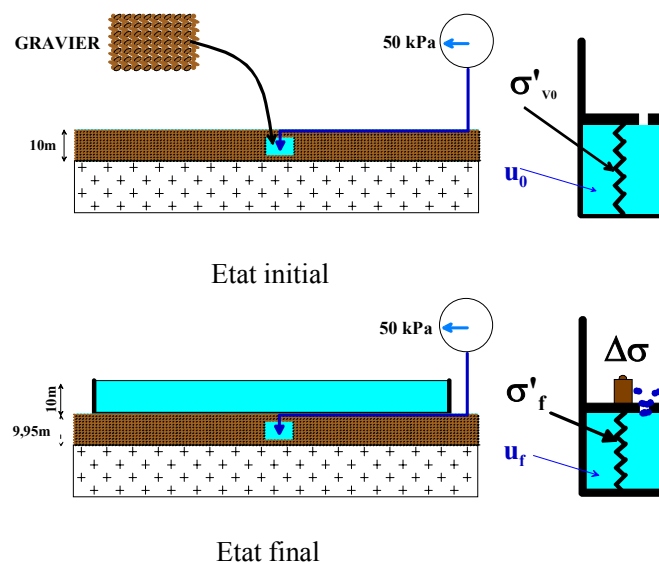
La viscosité des sols sera étudiée dans le chapitre 10.

### 5.4 Comportement des sols saturés. Principe des contraintes effectives. Postulat de Karl Terzaghi

On considère un sol totalement saturé ( $S_r = 100\%$ ) constitué donc de 2 phases : solide (squelette de grains ou de particules) et eau. Le sol est sous la nappe, la pression interstitielle  $u$  est positive (convention de la mécanique des sols). Le comportement d'un sol saturé dépend à la fois de sa perméabilité et de la vitesse de chargement. Il est donc nécessaire de distinguer les sols à **forte perméabilité**  $k$  (m/s), comme les sols **grenus**, des sols à **faible perméabilité**  $k$ (m/s), comme les sols **fins** et de tenir compte de la **durée** d'application des charges : **très courte**, en phase de **chantier** par exemple, **très longue**, en phase de service de l'ouvrage, **plusieurs années** après sa construction, par exemple.

#### 5.4.1 Comportement d'un sol grenu saturé

Quand on applique une contrainte sur un sol grenu quelle que soit la durée de chargement, sa perméabilité  $k$  est assez grande pour que l'eau en surpression s'évacue pratiquement instantanément. La contrainte est transmise immédiatement aux grains (contrainte intergranulaire  $\sigma'$ ) et l'eau n'est pas mise en surpression. Le tassement se produit instantanément. On peut illustrer le comportement d'un sol grenu par l'exemple de la figure 5.2 .



**Fig.5.2 Illustration de la notion de contrainte effective dans un massif de gravier saturé**

A l'état initial on a une couche de gravier de 10m d'épaisseur, reposant sur un substratum incompressible; la nappe est affleurante.

On suppose que la couche de sol est semi – infinie et que la charge à laquelle il sera soumis est également semi-infinie. Dans ces conditions **oedométriques**, pour lesquelles les déformations latérales sont nulles, le sol aura un comportement unidimensionnel, il ne subit que des déformations verticales. On peut représenter, dans ces conditions, le sol saturé dans un cylindre à paroi infiniment rigide (pas de déplacement latéral) fermé par un piston percé d'un orifice important représentatif d'une très forte perméabilité  $k$  du gravier. Le sol est modélisé par un **ressort** simulant la raideur du **squelette** des grains en simplifiant dans un premier temps le comportement du squelette du sol. Ce ressort sera d'autant plus raide que le sol sera compact. Le cylindre est entièrement rempli d'eau puisque le sol est saturé (Fig.5.2).

Au milieu de la couche de gravier, à l'**état initial** la pression interstitielle est  $u_0$  et la contrainte du ressort  $\sigma'_{v0}$ . Si on place un capteur de pression interstitielle au milieu de la couche de gravier le manomètre affichera 50kPa.

On met en place un réservoir, de très grand diamètre par rapport à l'épaisseur de sol, rempli de 10m d'eau qui transmet donc une contrainte verticale de 100 kPa. L'analogie concernant le modèle consiste à mettre un poids apportant une contrainte  $\Delta\sigma$  sur le piston. On comprend facilement que le poids est immédiatement équilibré par le ressort qui se comprime et se raccourcit. L'orifice du piston est assez grand pour permettre à l'eau qui a tendance à être en surpression, puisque le squelette de sol se comprime, de s'évacuer immédiatement; la pression interstitielle ne varie donc pas la pression interstitielle finale est égale à la pression interstitielle initiale,  $u_f = u_0$ . La couche de gravier saturé est immédiatement **drainée**. On a instantanément un état stable. Sur le chantier on constatera que la pression au manomètre est restée constante et que la couche de gravier a tassé instantanément, dans cet exemple de 0,05m, dès qu'on a mis en place le réservoir rempli d'eau (Fig.5.2).

En conclusion, dans le cas des sols grenus, la contrainte extérieure  $\Delta\sigma$  qu'on appellera **totale** est immédiatement équilibrée par les contraintes entre les grains de gravier, qu'on appellera contrainte intergranulaire  $\Delta\sigma'$  et plus généralement **effective**.

#### 5.4.2 Comportement d'un sol fin saturé

Quand on applique une contrainte sur un sol fin, **parfaitement saturé**, sans bulles d'air, de faible perméabilité, également dans des conditions **oedométriques**, on doit distinguer **2 cas**.

➤ Si la durée de **chargement** est **courte**, ou si on est au début du chargement, l'eau ne peut pas s'évacuer instantanément, le module de l'eau étant généralement beaucoup plus grand ( $K_w = 2000$  MPa) que le module du squelette du sol, surtout si c'est une argile molle ( $K_s \approx 1$  MPa). L'eau se met en **surpression** et reprend la contrainte appliquée. Il n'y a pas de tassement instantané. Le comportement du sol fin saturé fait intervenir à la fois le comportement de l'eau et du squelette (phase de chantier rapide). Ce comportement sera qualifié de **court terme, non drainé**.

➤ Si la vitesse de **chargement** est très **lente**, ou si la durée de **chargement** est **longue**, c'est à dire si on attend assez longtemps après l'application du chargement pour que l'eau en surpression se soit évacuée (ce peut être des années pour l'argile), la contrainte, comme pour les sols grenus, est transmise aux particules solides. Ce comportement sera qualifié de **long terme, drainé**.

On peut également illustrer le comportement d'un sol fin par l'exemple de la figure 5.3. A l'état initial on a une couche d'argile de 10m d'épaisseur sous la nappe affleurante. Avec les mêmes hypothèses que le cas précédent on considère qu'on est en conditions oedométriques. On peut reprendre le même modèle analogique avec les remarques suivantes : la raideur du ressort peut être très faible (argile molle), l'orifice du piston, représentant la perméabilité de l'argile  $k$  sera infiniment petit, 5 à 8 ordres de grandeur plus petit que celui du gravier.

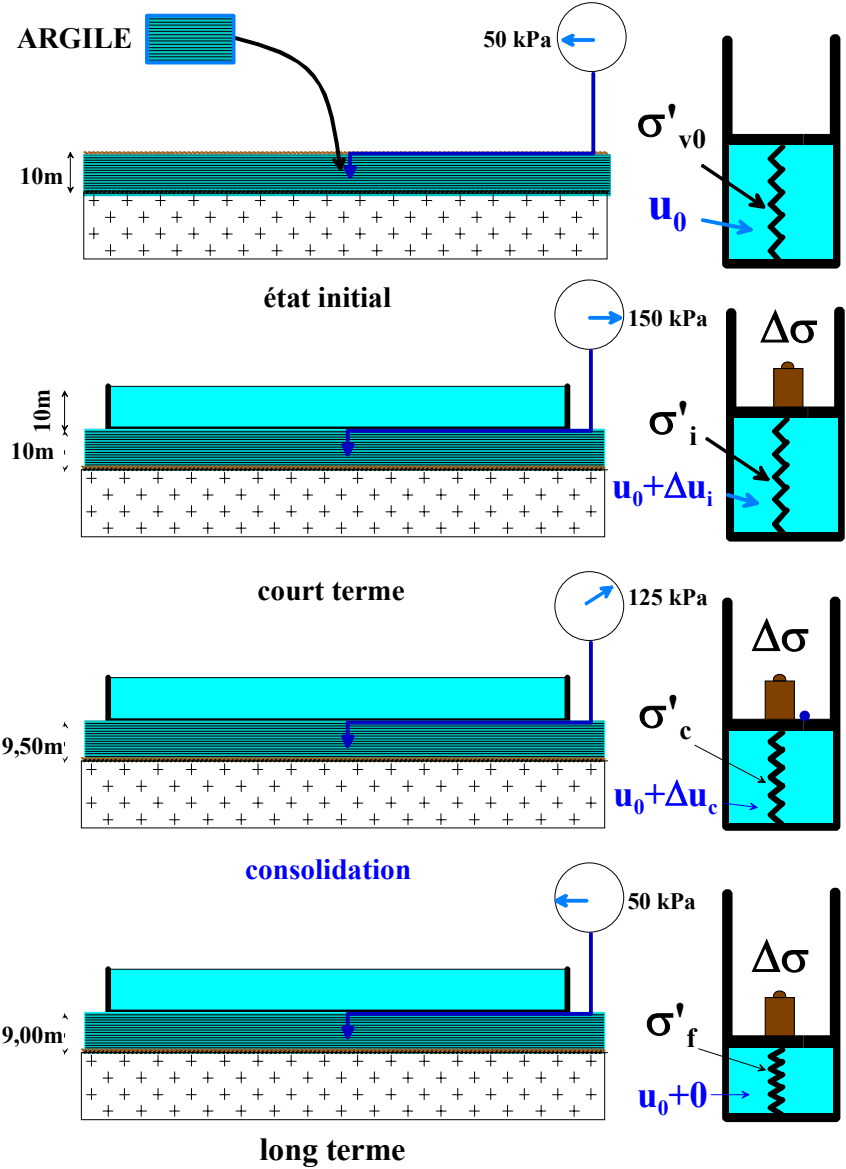


Fig.5.3 Illustration de la notion de contrainte effective dans un massif d'argile saturé

Au milieu de la couche d'argile, à l'état initial la pression interstitielle est  $u_0$  et la contrainte du ressort  $\sigma'_{v0}$ . Si on place un capteur de pression interstitielle au milieu de la couche d'argile le manomètre affichera 50 kPa.

Quand on place le réservoir d'eau sur la couche d'argile ou le poids  $\Delta\sigma$  sur le piston du modèle on ne constate pas de tassement mais par contre une brusque augmentation de la pression interstitielle. L'orifice du piston est trop petit pour permettre à l'eau qui a tendance à être en surpression, puisque le squelette de sol se comprime, de s'évacuer immédiatement (Fig.5.3).

Cette augmentation transitoire de la pression interstitielle est nommée **surpression interstitielle**  $\Delta u_i$ . Cet état du squelette et de l'eau sera qualifié de comportement ou d'état à **court terme, non drainé**. La pression interstitielle est passée instantanément de  $u_0$  à la pression interstitielle initiale,  $u_i = u_0 + \Delta u_i$ .

Cet état va évoluer ensuite puisqu'on observe une phase **transitoire**, souvent très longue, de **consolidation, en cours de drainage**. Au cours de cette phase l'eau en surpression va s'évacuer très lentement par l'orifice du piston. Durant la consolidation on constate une **diminution** de la **surpression** interstitielle en même temps qu'un **tassement** de l'argile (Fig.5.3).

Au bout d'un certain temps, qui peut être très long, la **surpression** interstitielle se sera **dissipée**, le **tassement final** sera atteint, le réservoir ou le poids sur le piston seront entièrement repris par le ressort donc par le squelette de l'argile. Ce nouvel état d'équilibre, stable, du squelette et de l'eau sera qualifié d'état ou de comportement à **long terme, drainé** (Fig.3).

En conclusion la contrainte extérieure totale (le poids, le réservoir plein d'eau) étant évidemment constante, elle se répartit entre les 2 phases : la phase solide, le squelette et la phase liquide, l'eau. A la mise en place du réservoir l'eau étant beaucoup moins compressible que l'argile molle (module de compressibilité  $K_w$  de l'eau : 2000 MPa, module de compressibilité  $K_s$  d'un sol mou : 1 MPa) toute la contrainte passe pratiquement sur l'eau qui se met en surpression  $\Delta u$ . Ensuite au cours de la consolidation, qui peut durer des années, voire des dizaines d'année, la contrainte extérieure totale se répartit à la fois sur l'eau, qui reste partiellement en surpression  $\Delta u$  et sur le squelette qui subit des contraintes effectives et tasse. Enfin quand la consolidation est terminée la contrainte extérieure totale est intégralement reprise par les contraintes effectives du squelette, qui a terminé de tasser (dans cet exemple de 1m) la pression interstitielle est revenue à l'état initial, l'argile est consolidée (Fig.5.3).

### 5.4.3 Postulat de Terzaghi

C'est à la suite d'essais de laboratoire du type décrit dans ces exemples que Karl Terzaghi, dans les années 1920 a postulé la relation la plus importante en mécanique des sols.

La **contrainte totale**,  $\sigma$ , est égale à la somme de la **contrainte effective** notée  $\sigma'$  et de la **pression interstitielle**  $u$ .

*Postulat de Terzaghi*

$$\sigma = \sigma' + u$$

$$\tau = \tau'$$

La contrainte totale,  $\sigma$ , est constante, la contrainte normale effective,  $\sigma'$ , agit sur le squelette du sol, elle varie au cours de la consolidation  $\sigma' = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma'$ , la pression interstitielle,  $u$ , pression de l'eau à l'intérieur des pores du sol varie également au cours de la consolidation,

en phase transitoire cette pression est égale à la pression initiale augmentée de la surpression temporaire  $u = u_0 + \Delta u_c$ .

La contrainte de cisaillement totale est évidemment égale à la contrainte de cisaillement effective.

On peut généraliser ces résultats sur un comportement unidimensionnel à un comportement plus général tridimensionnel avec les relations tensorielles suivantes :

**Postulat de Terzaghi généralisé**

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\sigma'}} + \underline{\underline{u}} \underline{\underline{1}}$$

*Le postulat de TERZAGHI structure toute la mécanique des sols saturés. Connaissant la contrainte totale qui correspond à la charge transmise au sol par l'ouvrage (réservoir d'eau, poids) et la pression interstitielle  $u$  déterminée par les lois de l'hydrostatique, de la consolidation ou de l'hydrodynamique on en déduit directement la contrainte effective qui s'applique sur le squelette du sol et le déforme.*

#### 5.4.4 Applications du Postulat de Terzaghi

##### 5.4.4.1 Application au sol grenu saturé

On a vu que le comportement d'un sol **grenu** saturé est simple puisqu'il n'y pas de phase transitoire pour atteindre l'équilibre final, il a un comportement immédiatement **drainé**.

En reprenant l'exemple précédent (Fig.5.2) avec  $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$ , poids volumique du gravier dans l'état actuel saturé.

*L'état **initial** à mi-couche, dans l'axe de la charge, est :*

Contrainte **totale** initiale due au poids du sol

$$\sigma_{v0} = 5.21 = 105 \text{ kPa}$$

Pression **interstitielle** initiale de l'eau due à la présence de la nappe statique

$$u_0 = 5 \gamma_w \text{ (cas hydrostatique) avec } \gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3 = 50 \text{ kPa}$$

Contrainte **effective** initiale due au poids du sol et à la nappe statique

$$\sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0 = 5 (\gamma - \gamma_w), \text{ cas hydrostatique} = 55 \text{ kPa}$$

*L'état **final** à mi-couche, dans l'axe de la charge, est :*

Contrainte **totale** finale due au poids du sol et au poids du réservoir

$$\sigma_f = \sigma_{v0} + \Delta\sigma = 105 + 100 = 205 \text{ kPa}$$

Pression **interstitielle** finale de l'eau due à la présence de la nappe statique

$$u_f = u_0 = 5 \gamma_w \text{ (pas de surpression)} = 50 \text{ kPa}$$

Contrainte **effective** finale due au poids du sol, au poids du réservoir et à la nappe statique

$$\sigma'_f = \sigma_f - u_f = 205 - 50 = 155 \text{ kPa.}$$

#### 5.4.4.2 Application au sol fin saturé

On a vu également que le comportement d'un sol fin **saturé** est beaucoup plus complexe puisqu'il passe par une **phase transitoire** pour atteindre l'équilibre stable final. On pourra donc distinguer pour simplifier un comportement à **court terme, non drainé** et un comportement à **long terme, drainé**. Cependant les moyens de calcul actuels permettent, en application du postulat de Terzaghi, de calculer à tout instant  $\sigma'$  et  $u$ .

En reprenant l'exemple précédent (Fig.5.3) avec  $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$ , poids volumique de l'argile dans l'état actuel saturé.

*L'état **initial** à mi-couche, dans l'axe de la charge, est :*

Contrainte **totale** initiale due au poids du sol

$$\sigma_i = \sigma_{v0} = 5.16 = 80 \text{ kPa}$$

Pression **interstitielle** initiale de l'eau due à la présence de la nappe statique

$$u_0 = 5 \gamma_w \text{ (cas hydrostatique) avec } \gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3 = 50 \text{ kPa}$$

Contrainte **effective** initiale due au poids du sol et à la nappe statique

$$\sigma'_i = \sigma'_{v0} = \sigma_{v0} - u_0 = 5 (\gamma - \gamma_w), \text{ cas hydrostatique} = 30 \text{ kPa}$$

*Phase **court terme**, couche d'argile **non drainée** (à la mise en place du réservoir), à mi-couche, dans l'axe de la charge :*

Contrainte **totale** due au poids du sol et au poids du réservoir

$$\sigma_i = \sigma_{v0} = 80 + 100 = 180 \text{ kPa}$$

Pression **interstitielle** de l'eau due à la présence de la nappe statique et à la surpression interstitielle

$$u_i = u_0 + \Delta u = 50 + 100 = 150 \text{ kPa}$$

Contrainte **effective** initiale due au poids du sol et à la pression interstitielle

$$\sigma'_i = \sigma_{v0} - u_i = 180 - 150 = 30 \text{ kPa}$$

Le squelette de l'argile ne reprend aucune contrainte transmise par le réservoir, il n'y a donc pas de tassement instantané. La contrainte de 100 kPa transmise par le réservoir est reprise par l'eau qui se met en surpression.

*Phase **transitoire de consolidation**, un certain temps après la mise en place du réservoir, couche d'argile **en cours de drainage**, à mi-couche, dans l'axe de la charge :*

Contrainte **totale** due au poids du sol et au poids du réservoir, qui est constante

$$\sigma_i = \sigma_{v0} = 80 + 100 = 180 \text{ kPa}$$

Pression **interstitielle** de l'eau due à la présence de la nappe statique et à la surpression interstitielle en cours de dissipation (les calculs seront développés dans le chapitre 10)

$$u_c = u_0 + \Delta u_c = 50 + 75 = 125 \text{ kPa}$$

Contrainte **effective** initiale due au poids du sol et à la pression interstitielle

$$\sigma'_i = \sigma_{v0} - u_i = 180 - 125 = 55 \text{ kPa}$$

A cette phase, la contrainte de 100kPa transmise par le réservoir au sol est reprise en partie par l'eau dont la surpression  $\Delta u = 75\text{kPa}$  a diminué et en partie par le squelette de particules d'argile qui encaisse maintenant une contrainte  $\Delta\sigma' = 25\text{kPa}$  et se déforme. Dans cet exemple le tassement de l'ensemble de la couche d'argile est de 0,5m. Le calcul des surpressions interstitielles, tassement et temps de tassement seront développés au chapitre 10.

*Phase **long terme**, couche d'argile **drainée**, à mi-couche, dans l'axe de la charge :*

Contrainte **totale** due au poids du sol et au poids du réservoir, qui est constante

$$\sigma_i = \sigma_{v0} = 80 + 100 = 180 \text{ kPa}$$

Pression **interstitielle** de l'eau due à la présence de la nappe statique (la surpression interstitielle est nulle)

$$u_f = u_0 + \Delta u = 50 + 0 = 50 \text{ kPa}$$

Contrainte **effective** initiale due au poids du sol et à la pression interstitielle

$$\sigma'_f = \sigma_{v0} - u_f = 180 - 50 = 130 \text{ kPa}$$

A long terme, la contrainte de 100 kPa transmise par le réservoir au sol est reprise entièrement par le squelette de particules d'argile qui équilibre la totalité de la charge  $\Delta\sigma' = 100\text{kPa}$  et se déforme, le tassement final de l'ensemble de la couche d'argile est de 1m. La surpression interstitielle s'est complètement dissipée  $\Delta u = 0$  et la pression interstitielle est redevenue stable à 50 kPa .

Les calculs du tassement final et des temps de tassement seront développés au chapitre 10 .

***En conclusion, en application du principe des contraintes effectives on peut étudier d'une part le comportement du squelette du sol  $\sigma'$  et d'autre part les pressions interstitielles  $u$ . Le champ de pressions interstitielles  $u$  sera déterminé pour un état permanent dans la chapitre sur l'hydraulique des sols ou dans un état transitoire dans la chapitre sur la consolidation.***