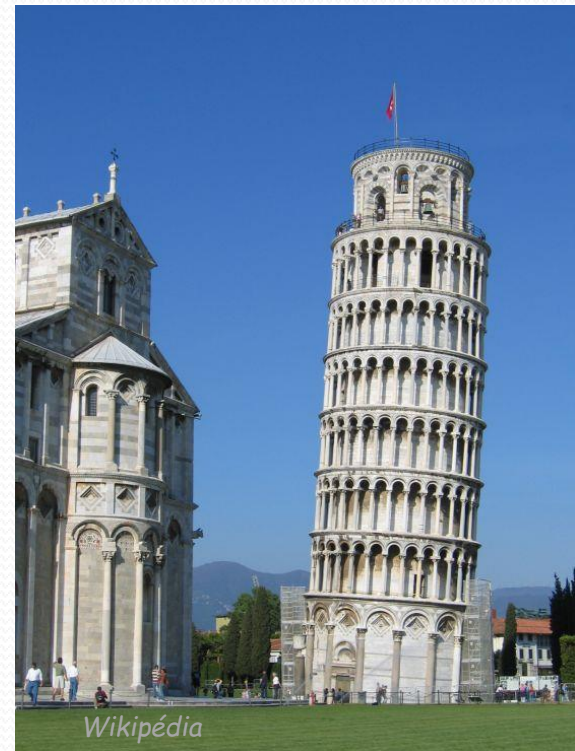


Tassements et consolidation des sols

Olivier Cuisinier
ENSG

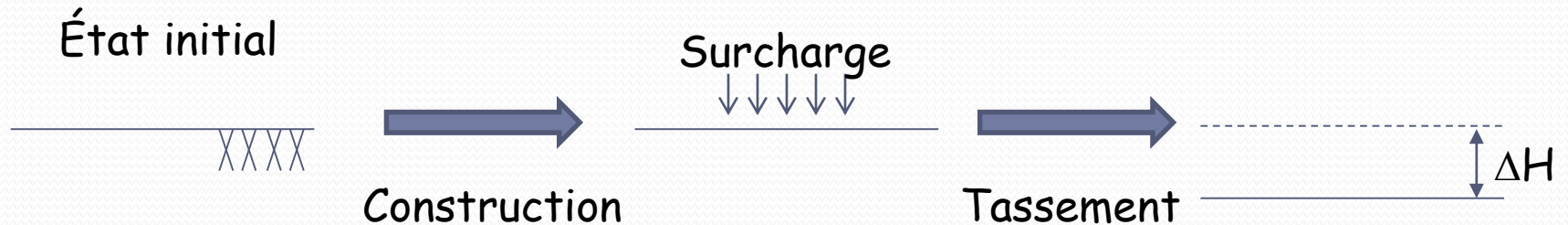
Objectifs du cours

- Estimer l'amplitude des tassements sous une structure
- Déterminer la vitesse de tassement



Deux exemples de tassements différentiels

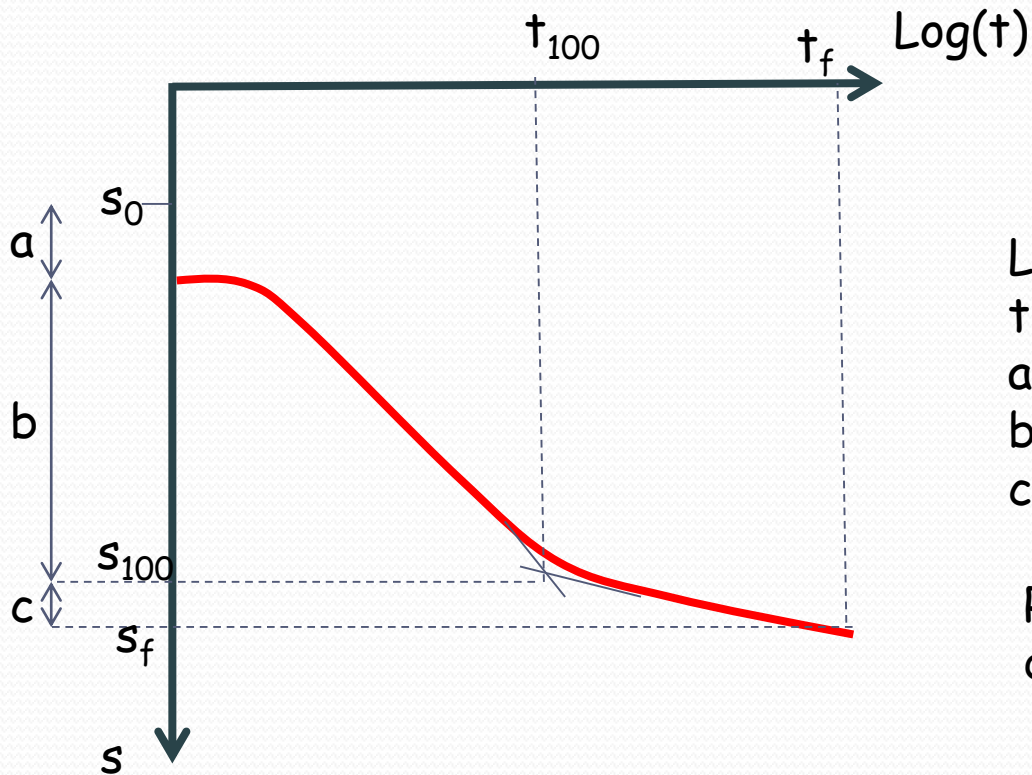
Problématique



- Deux questions principales pour le géotechnicien
 - Quelle est l'amplitude du tassement ?
 - Combien de temps pour stabiliser le tassement ?

Courbe type de chargement (définitions)

- A t_0 , on applique une surcharge mécanique $\Delta\sigma'_v$



Le tassement total comprend donc trois composantes :

a : instantanée

b : consolidation primaire

c : compression secondaire

Remarque : les composantes b et c dépendent du temps

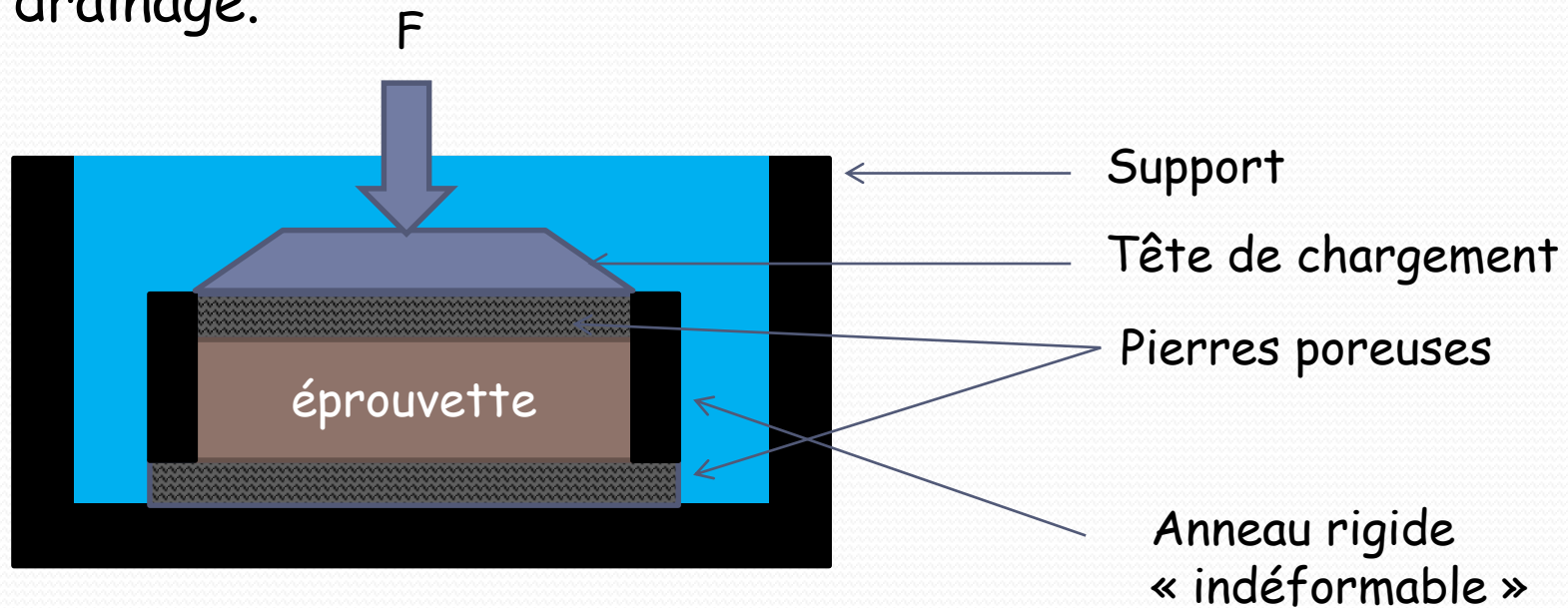
Origine des tassements :

- Facteurs possibles
 - Déformation de la phase solide
 - Compression eau / air
 - Expulsion d'eau et d'air
- En pratique :
 - Niveaux de contraintes assez faibles
 - La plupart du temps, on considère les sols saturés
- Conséquences
 - Hypothèse = eau et solide comme incompressibles
 - L'expulsion d'eau est donc la principale cause de déformation

Estimer l'amplitude des tassements

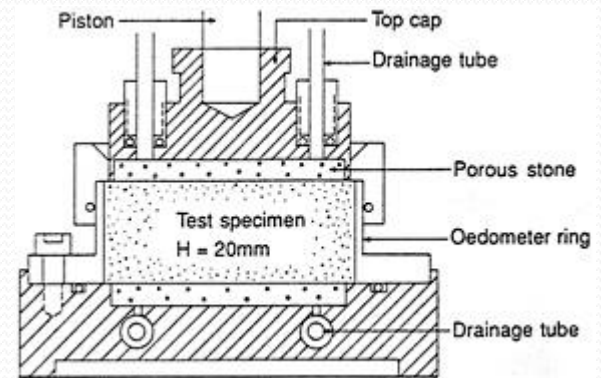
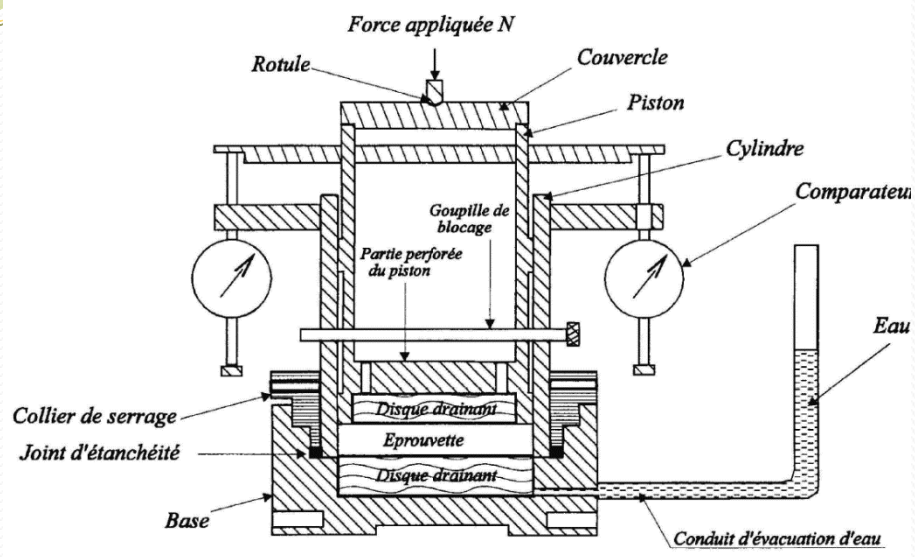
Essai oedométrique

- Principe : une surcharge mécanique est appliquée sur un échantillon de sol placé dans un anneau rigide, avec un drainage.



- Réalisation d'un essai :
 - Plusieurs paliers de charge
 - On note le tassement en fin de consolidation I
 - Courbe œdométrique : $e = f(\sigma'_v)$

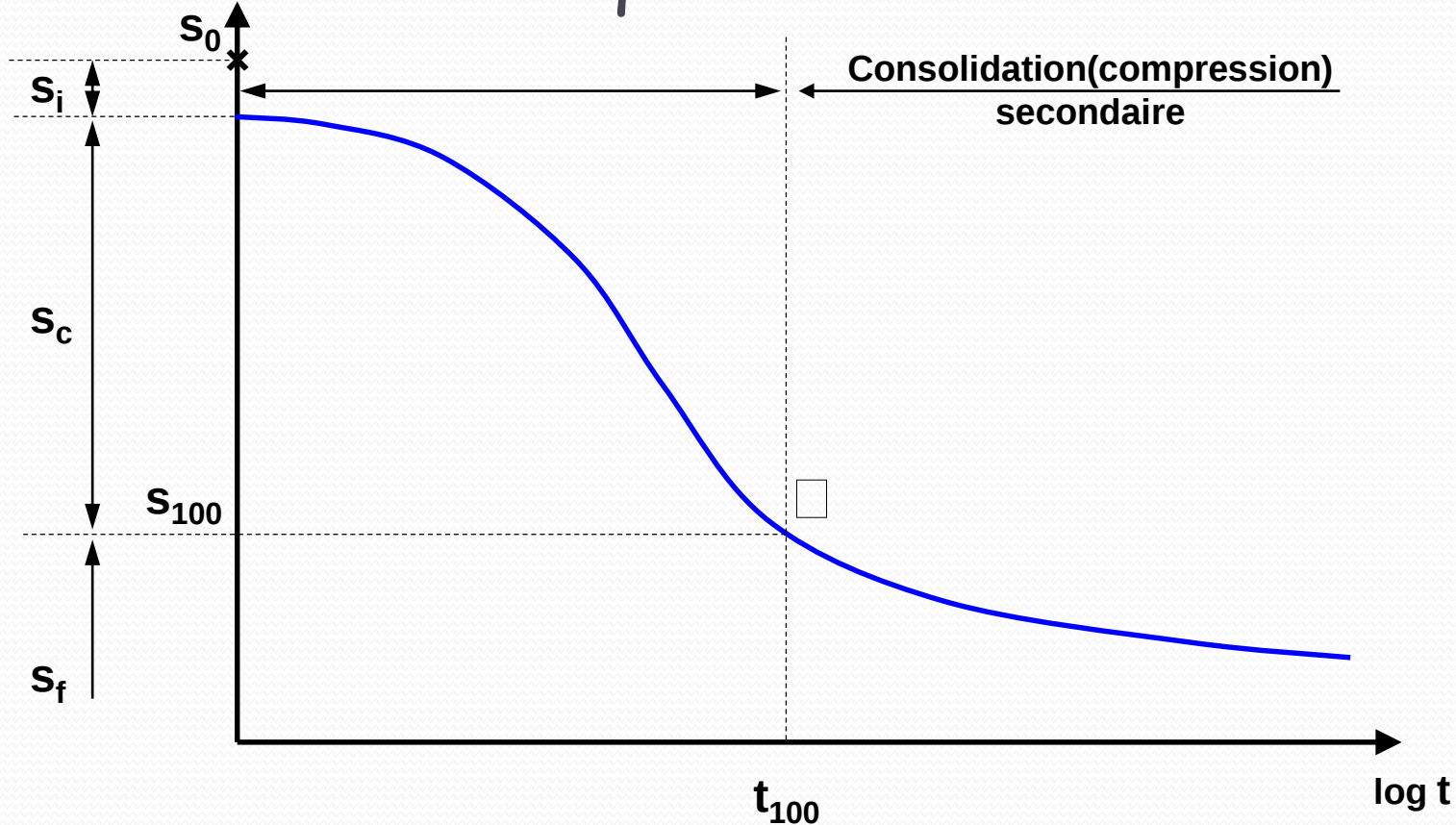
Oedomètres



Essai oedométrique

- On apporte des charges successives sur l'éprouvette de sol(évolution de la contrainte totale).
- Pour chacune de ces charges on mesure l'évolution du tassement en fonction du temps, ceci est régi par la théorie de la consolidation: **vitesse**.
- Lorsque le tassement est stabilisé on peut associer une valeur d'indice des vides à une valeur de contrainte effective.
- Enfin on trace la variation de l'indice des vides en fonction de la contrainte effective(courbe de compressibilité) qui permet de définir 2 grandeurs: **pression de consolidation et indice de compression**.

Essai oedométrique

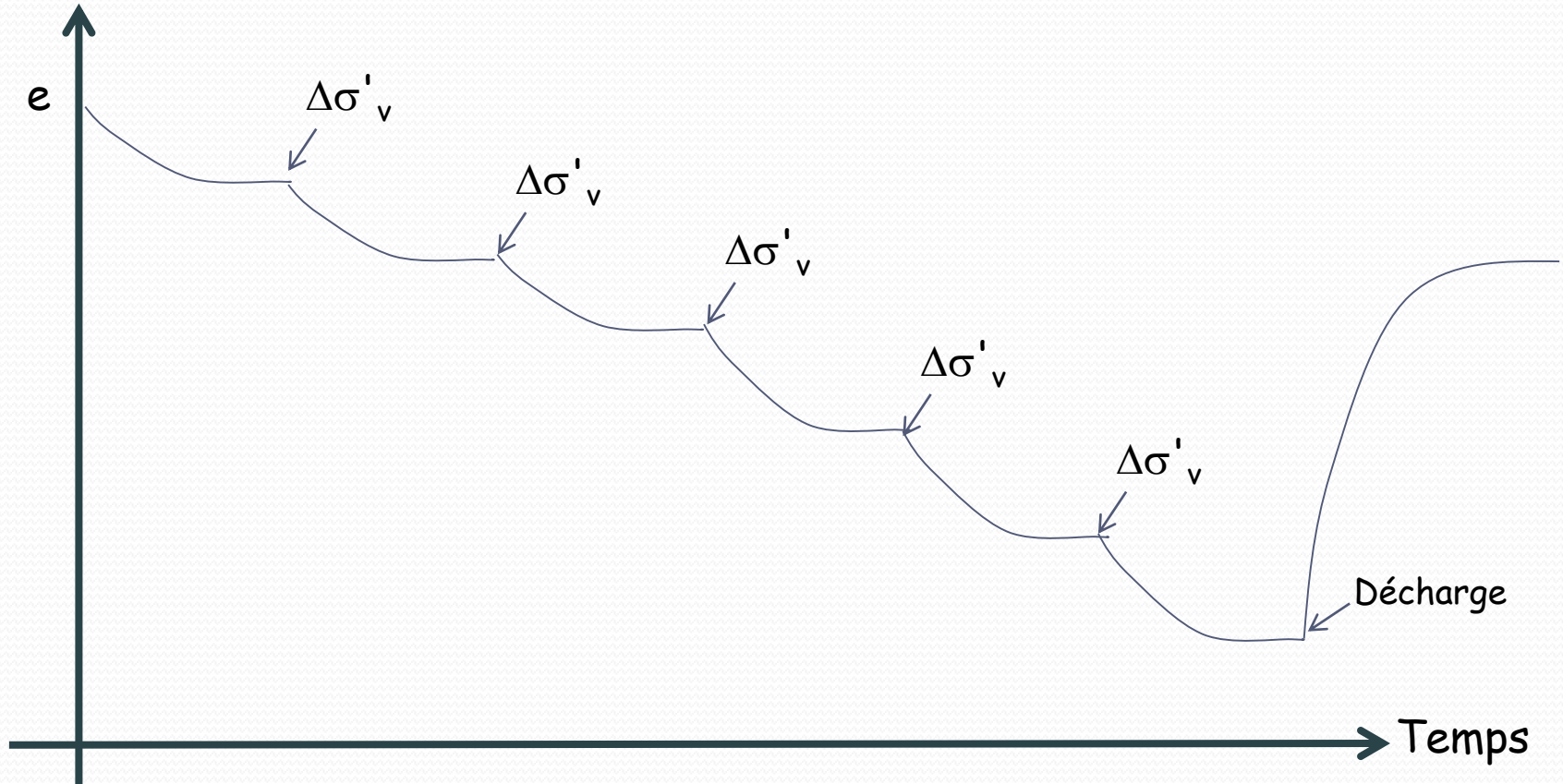


Courbe de consolidation d'un sol fin dans un diagramme S déformation en fonction du logarithme du temps ($\log t$).

On voit les 3 parties du tassement: - s_i tassement instantané ;
- s_c tassement de consolidation ;
- s_f tassement de fluage.

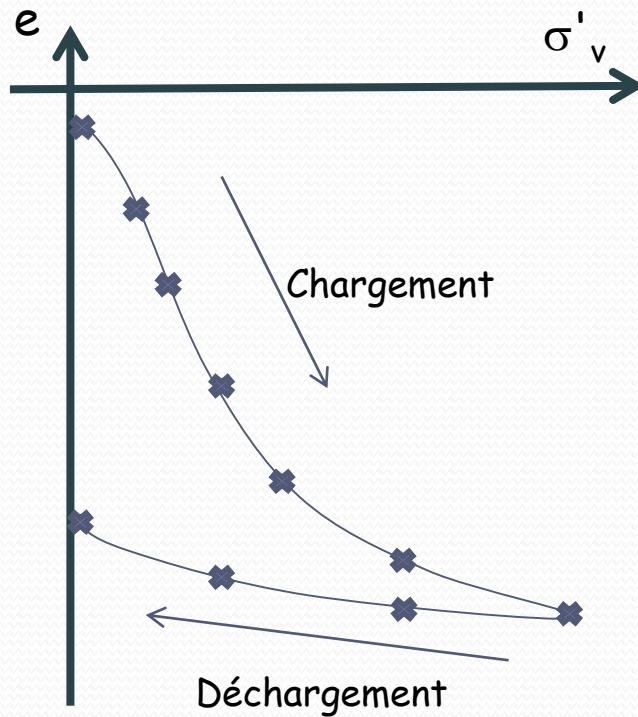
À la fin de la consolidation on définit une valeur de e associée à une valeur de s' .

Résultats brut de l'essai



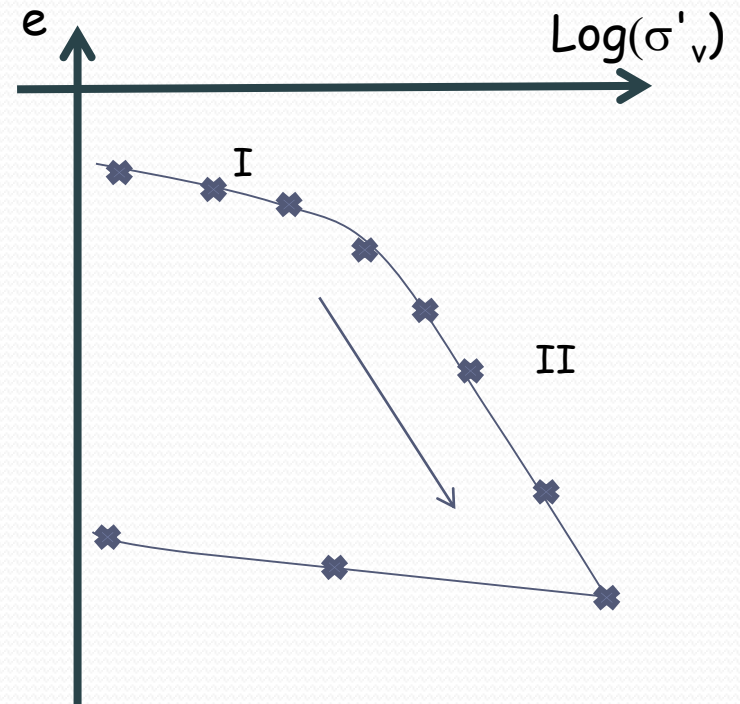
- Courbe de compressibilité = valeur de l'indice des vides en fin de palier de consolidation primaire en fonction de la charge appliquée au cours de chaque palier.

Courbe œdométrique type



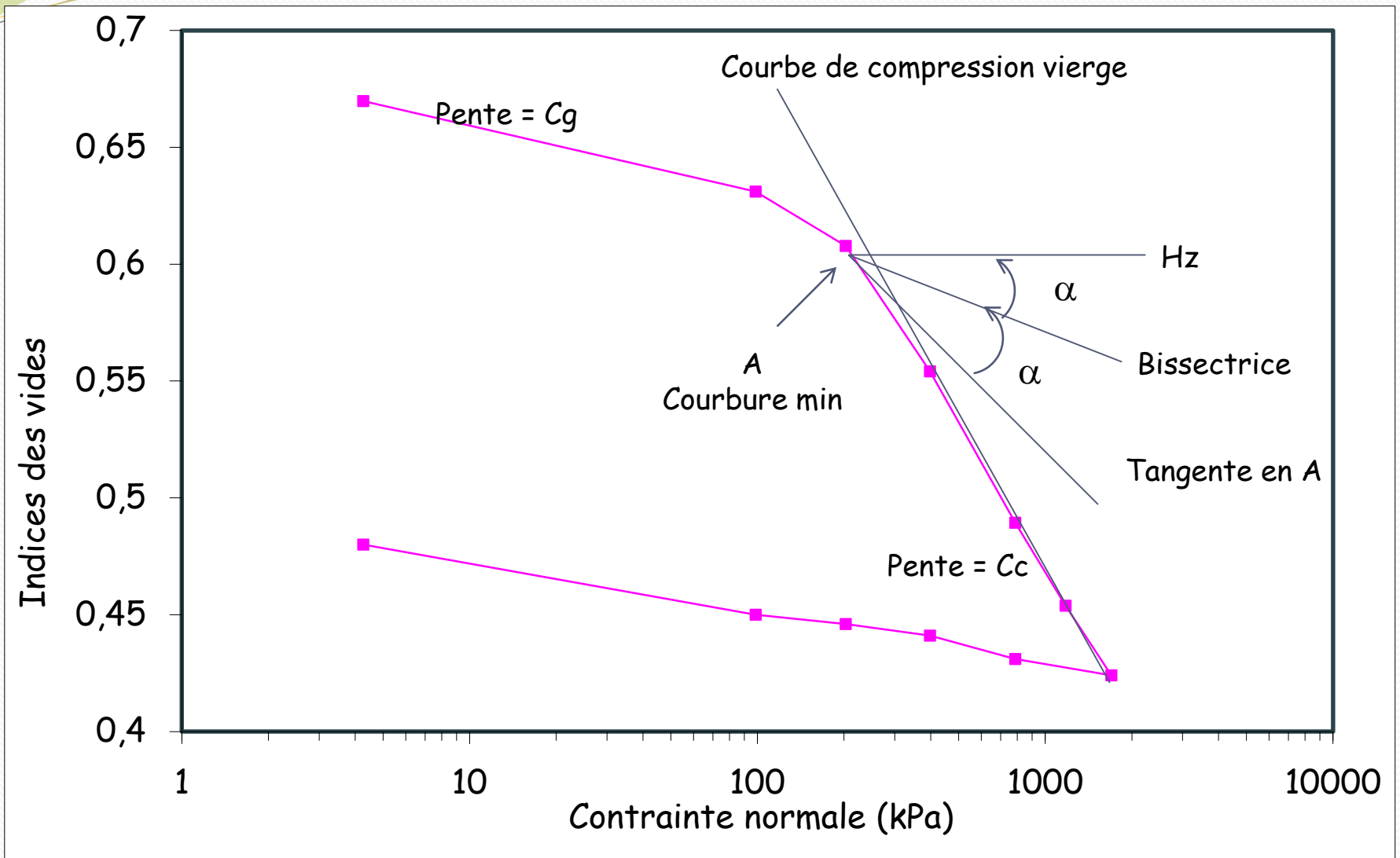
Pente en un point : coefficient de compressibilité

$$a_v = -\frac{de}{d\sigma'_v}$$



Partie I : indice de gonflement $C_g = -\frac{de}{d \log \sigma'_v}$

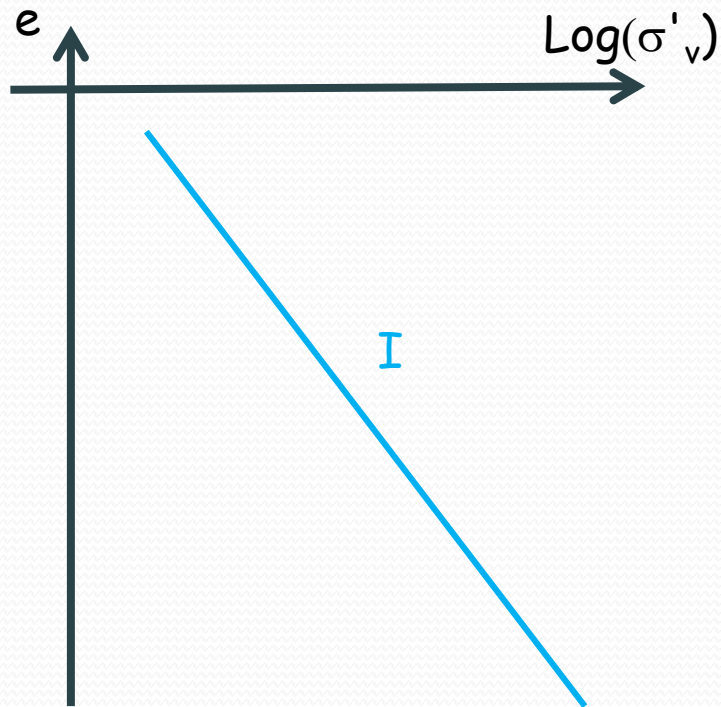
Partie II : indice de compression $C_c = -\frac{de}{d \log \sigma'_v}$



- Pression de préconsolidation = intersection bissectrice et courbe vierge !
- Quelles sont les valeurs de C_g et C_c ?

Contrainte de préconsolidation : origine

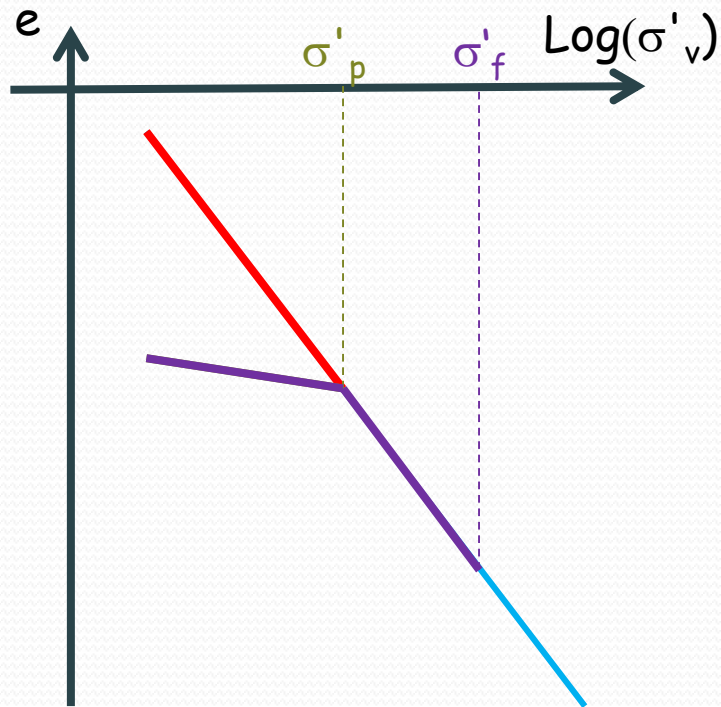
- La « mémoire » d'un sol



- I : sédimentation, enfoncement progressif ($\uparrow \sigma'_v$) $\rightarrow$ courbe vierge
= Courbe de référence, de pente C_c

Contrainte de préconsolidation

- La « mémoire » d'un sol



- « Histoire » réelle d'un sol :
 - **a: enfouissement**
 - **b: arrêt sédimentation, érosion avec pour conséquence une baisse de la contrainte**
 - **c: construction d'une structure = surcharge et augmentation de contrainte**

- Définition :

- σ'_p : contrainte de préconsolidation = contrainte maximale effective à laquelle le sol a été soumis au cours de son histoire

État de consolidation

- Définition de « l'OCR » : overconsolidation ratio

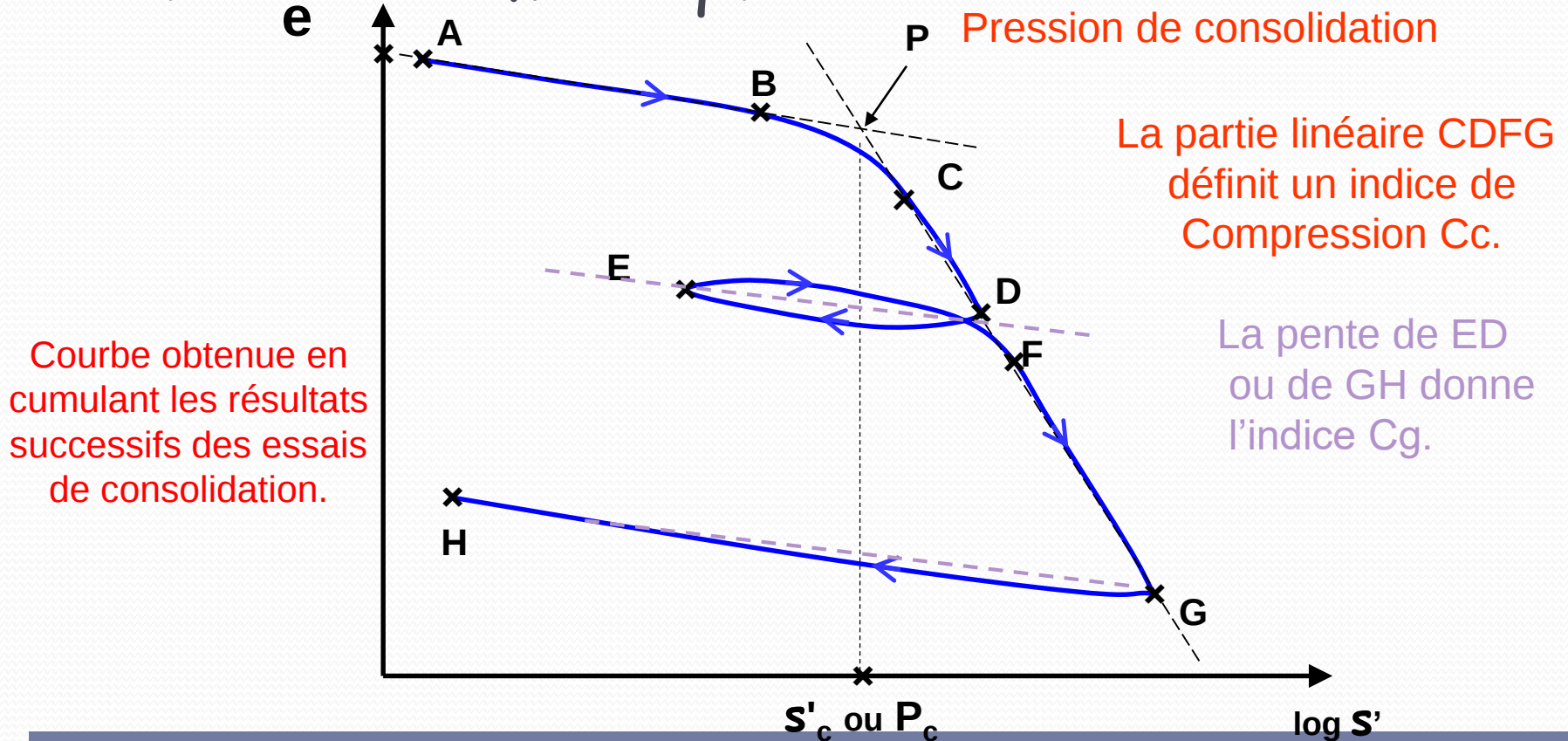
$$OCR = \sigma'_p / \sigma'_{v0}$$

- Cas 1 : la contrainte de préconsolidation est égale à la contrainte actuelle due au poids des terres
OCR = 1, sol normalement consolidé
- Cas 2 : la contrainte de préconsolidation est supérieure à la contrainte actuelle due au poids des terres
OCR > 1, sol surconsolidé
- Cas 3 : la contrainte de préconsolidation est inférieure à la contrainte actuelle due au poids des terres
OCR < 1, sol sousconsolidé (très rare)

Origines possibles de la préconsolidation

- Variation de la contrainte totale verticale
 - Érosion naturelle
 - Glaciation
 - Travaux
- Variation de la pression interstitielle
 - Variation du niveau de nappe
 - Pompage
- Processus physico-chimiques
 - Cimentation (quick clays)
 - pH, etc.

Courbe oedométrique



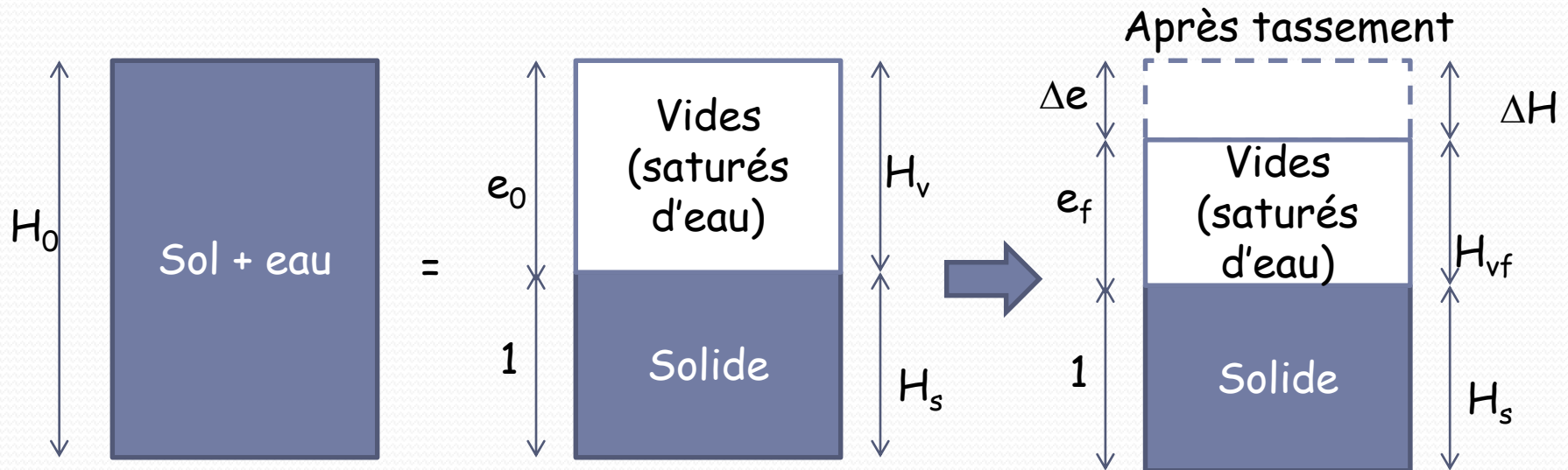
Courbe de compressibilité œdométrique

(e indice des vides en fonction de $\log s'$ logarithme de la contrainte effective)

partie ABCD	premier chargement
partie DE	déchargement partiel
partie EFG	deuxième chargement
partie GH	déchargement total

Le point P correspond au changement entre état surconsolidé et état normalement consolidé et son abscisse définit la pression de consolidation du sol.

Calcul des tassements (diagramme des phases)



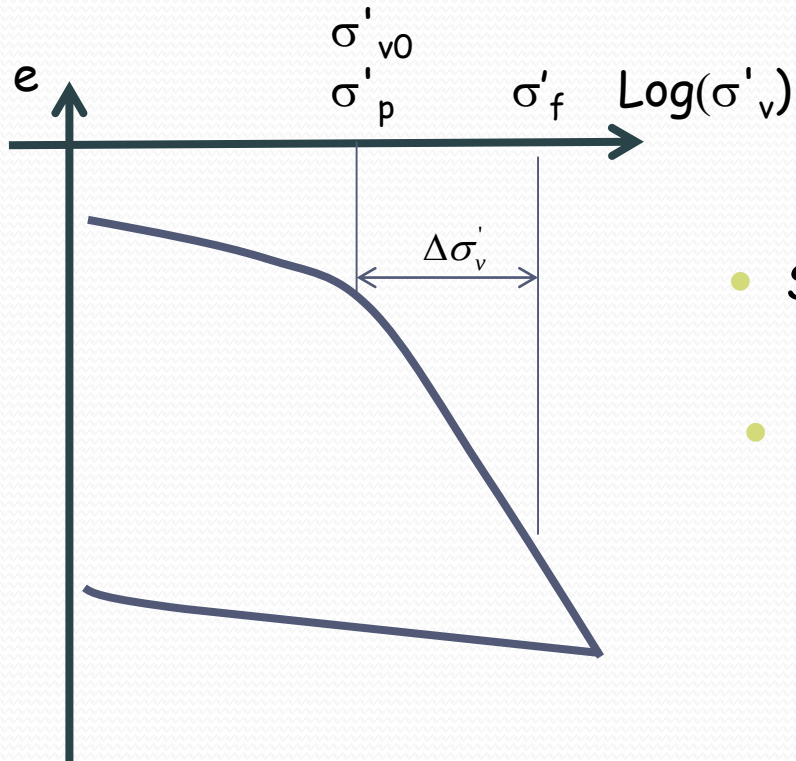
$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta V}{V_t} = \frac{\Delta V_v}{V_s + V_v}$$

Divise par V_s

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{s}{H_0} = \frac{\Delta e}{1 + e_0}$$

$$s = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H_0$$

Calcul des tassements (essai œdométrique)



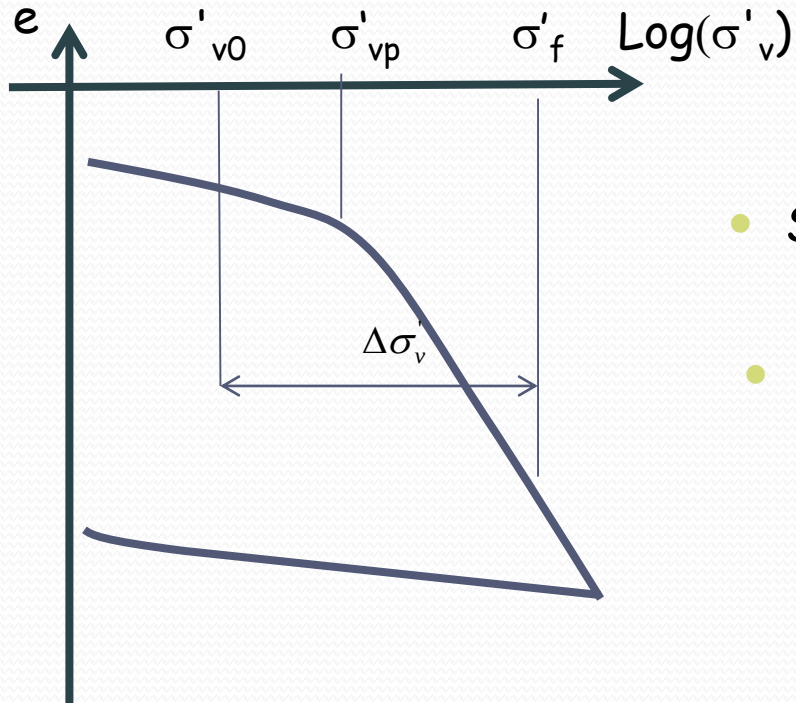
- Sol normalement consolidé $\sigma'_{vp} = \sigma'_{v0}$
- Application d'une surcharge $\sigma'_f = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v$

$$s = \frac{\Delta e}{1 + e_0} H_0 \quad C_c = - \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v}$$



$$s = C_c \frac{H_0}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_{vp} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{vp}} \right)$$

Calcul des tassements (essai œdométrique)



- Sol surconsolidé $\sigma'_{vp} > \sigma'_{v0}$
- Application d'une surcharge $\sigma'_f = \sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v$

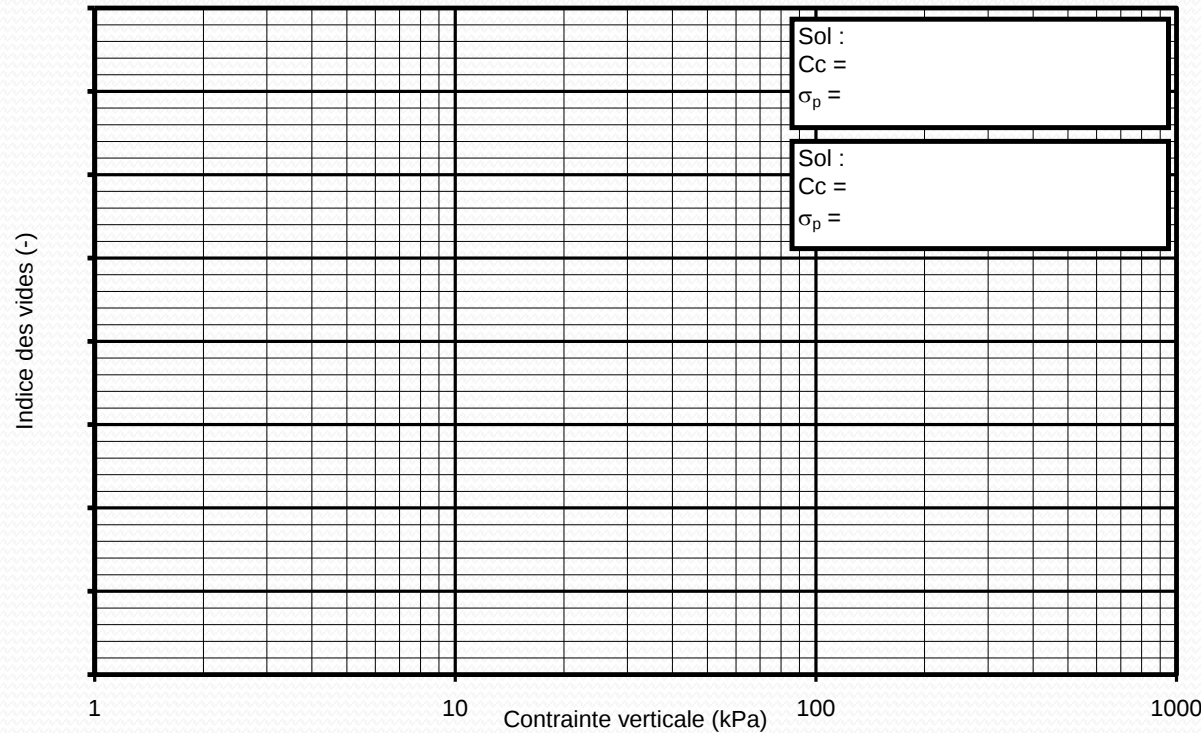
$$s = C_g \frac{H_0}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_{vp}}{\sigma'_{v0}}\right) + C_c \frac{H_0}{1 + e_0} \log\left(\frac{\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_{vp}}\right)$$

Construire une courbe œdométrique

- Résultats obtenus

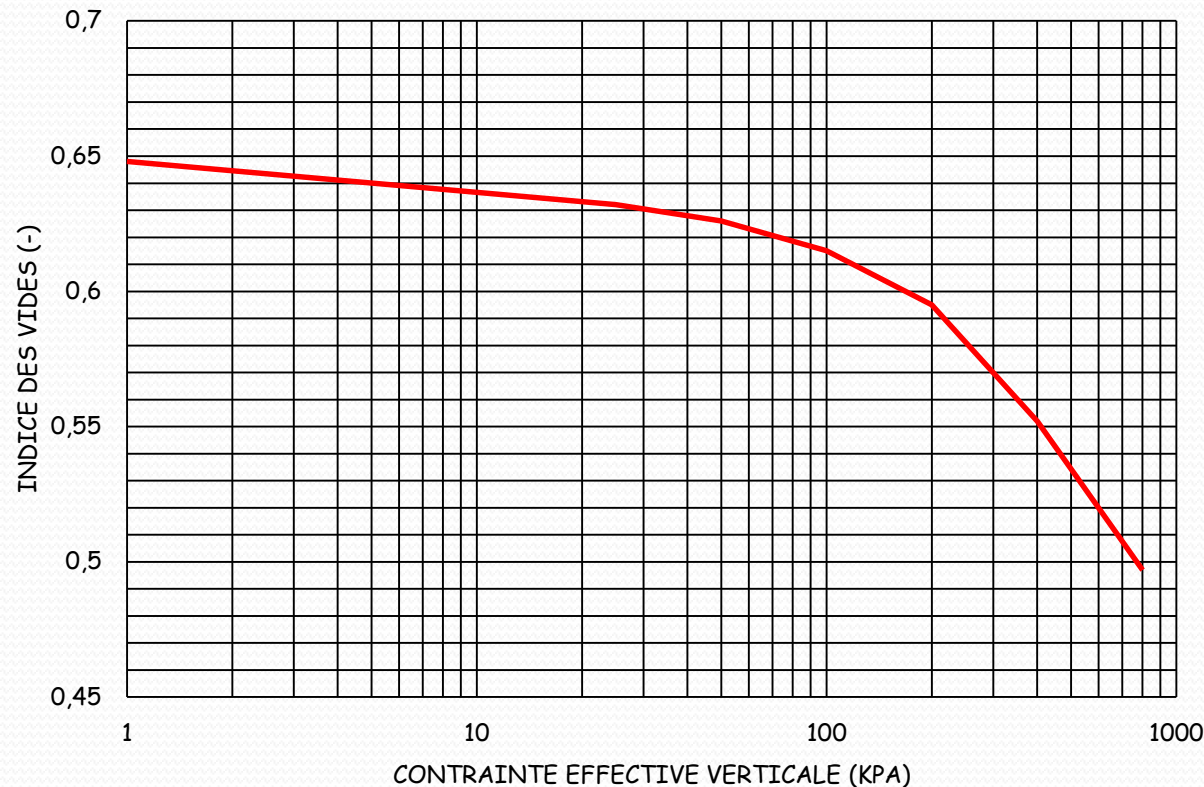
σ'_v kPa	H mm	ΔH mm	Δe	e
0	20	0	0	
25	19,806			
50	19,733			
100	19,600			
200	19,357			
400	18,835			
800	18,167			

Teneur en eau initiale	24,0%
Masse volumique des grains	2,70 Mg/m ³



Construire une courbe œdométrique

σ'_v kPa	H mm	ΔH mm	Δe	e
0	20	0	0	0,648
25	19,806	0,194	0,016	0,632
50	19,733	0,267	0,022	0,626
100	19,600	0,4	0,033	0,615
200	19,357	0,643	0,053	0,595
400	18,835	1,165	0,096	0,552
800	18,167	1,833	0,151	0,497



- L'éprouvette a été prélevée à 3 m de profondeur, la nappe affleure.
 - Quel est le degré de surconsolidation ?
 - Une construction induit une augmentation de contrainte verticale effective de 100 kPa ? Quel est le tassement total si la couche fait 6 mètres d'épaisseur ?

Calcul de tassement

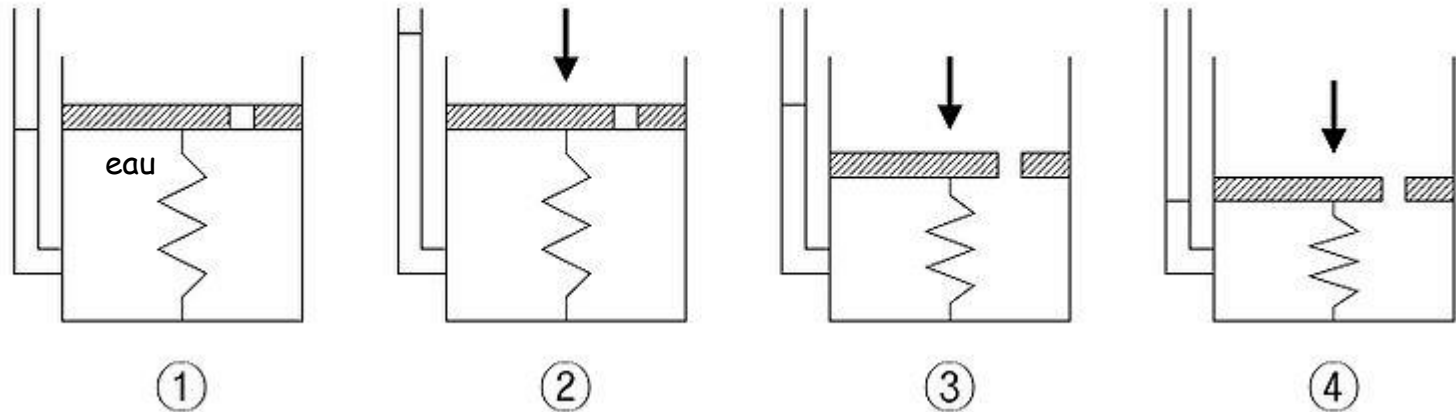
- Quelle est la contrainte initiale in situ
 - $\sigma'_{v0} = \gamma' z \rightarrow \sigma'_{v0} = (20,1 - 10) * 3 = 30,3 \text{ kPa}$
 - Le sol est surconsolidé
- ($C_c = 0,18$; $C_g = 0,018$, pression de préconsolidation de 120 kPa)

$$s = C_g \frac{H_0}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_{vp}}{\sigma'_{v0}} \right) + C_c \frac{H_0}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_{v0} + \Delta \sigma'_v}{\sigma'_{vp}} \right)$$

- On calcule le tassement au milieu de la couche
 - $s = 6,2 \text{ cm}$

Étude de la consolidation primaire

Phénomène de consolidation : analogie du ressort

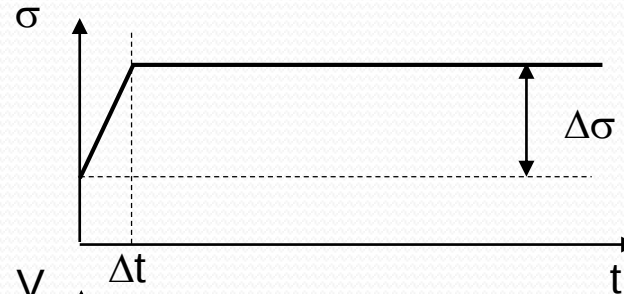


σ_v				
u_0				
σ'_v				
	①	②	③	④
	σ_{v0}	$\sigma_{v0} + \Delta\sigma_v$	$\sigma_{v0} + \Delta\sigma_v$	$\sigma_{v0} + \Delta\sigma_v$
	u_0	$u_0 + \Delta\sigma_v$	$u_0 + (1-x)\Delta\sigma_v$	$u_0 = u_f$
	$\sigma'_v = \sigma_{v0} - u_0$	$\sigma'_v = \sigma_{v0} - u_0$	$\sigma'_v = \sigma_{v0} - u_0 + x \Delta\sigma_v$	$\sigma'_v = \sigma_{v0} - u_0 + \Delta\sigma_v$

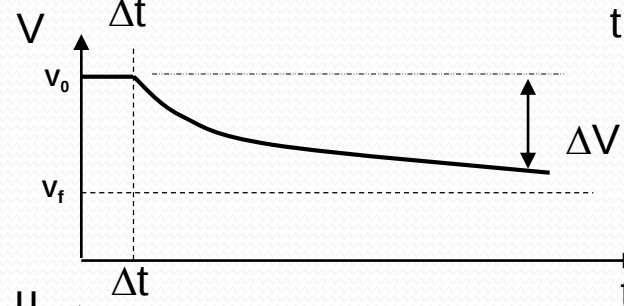
1. Ressort = squelette solide du sol, eau du sol (sol saturé), trou fermé
2. Application d'une surcharge $\Delta\sigma_v \rightarrow$ augmentation immédiate de la pression interstitielle $\Delta u = \Delta\sigma_v \rightarrow$ création de la surpression
3. Trou ouvert (drainage), l'eau sort du piston et l'effort se reporte sur le ressort ($x\%$ est dissipé)
4. $\Delta u = 0$, dissipation totale de la surpression. Le tassement est dû à l'expulsion d'eau du piston

Essai oedométrique

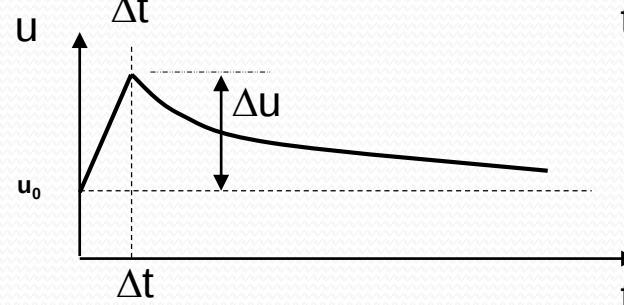
Contrainte
totale



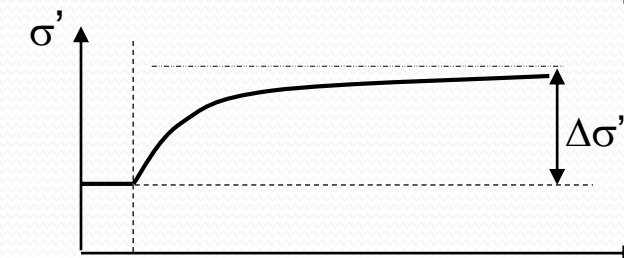
Volume



Pression
interstitielle



Contrainte
effective



L'augmentation de contrainte totale est très rapide et se traduit par une croissance équivalente de u .

À la fin du chargement (Δt), l'excès de u entraîne une expulsion progressive d'une partie de l'eau du sol: c'est le phénomène de la consolidation.

D'après J.-P. Tisot

Essai oedométrique : un palier

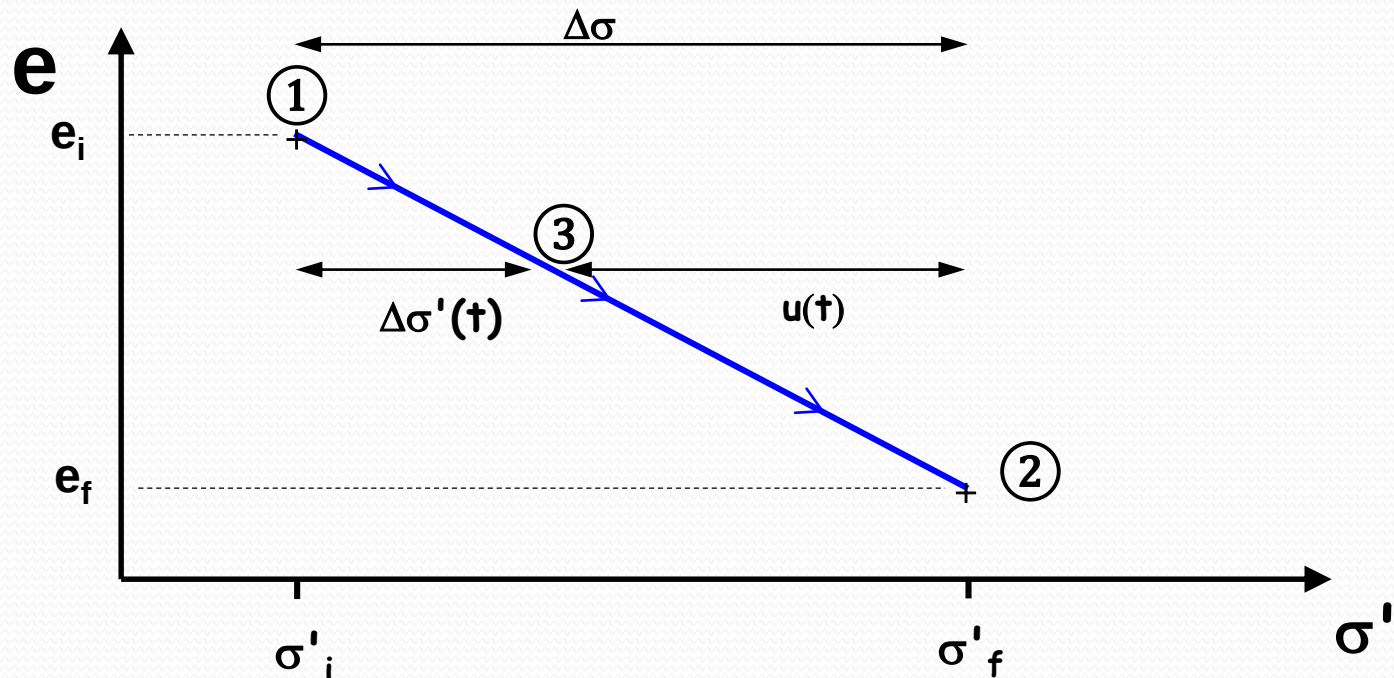
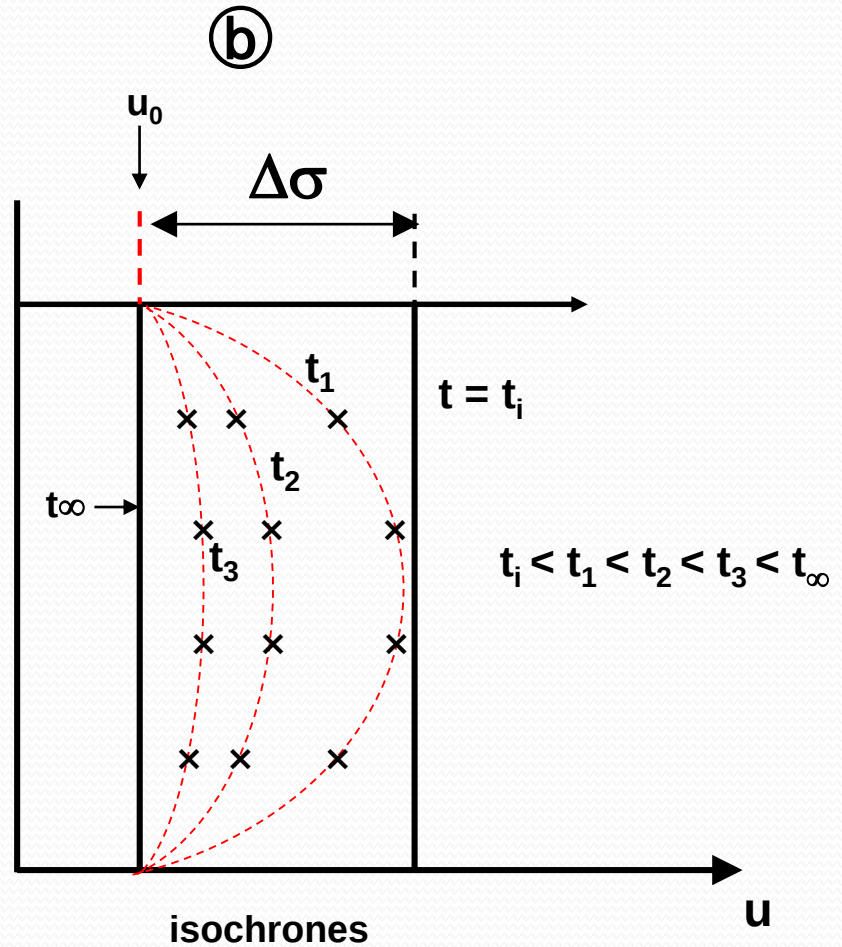
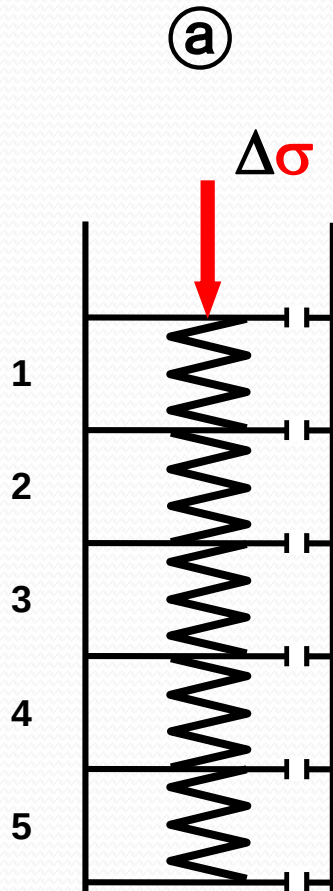


Diagramme schématisant d'évolution de l'indice des vides e en fonction de la contrainte effective σ' .

- A chaque instant $\Delta\sigma = \Delta\sigma'(t) + u(t)$
- Noter que en réalité le chemin ①② parcouru en fonction du temps n'est pas linéaire.

D'après J.-P. Tisot

Analogie avec une couche de sol

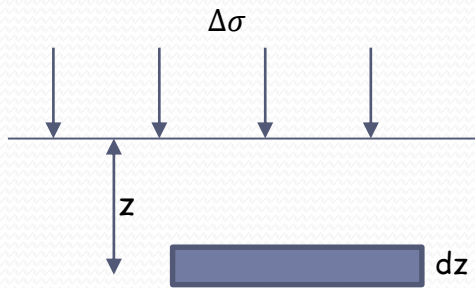


Théorie de consolidation unidimensionnelle

Terzaghi (1925) a analysé la consolidation avec les hypothèses suivantes :

- la couche de sol compressible est homogène et saturée complètement ;
- l'eau et les grains de sol sont incompressibles ;
- la loi de Darcy s'applique ;
- le drainage a lieu dans une seule direction ;
- les déplacements sont faibles ;
- le coefficient de compression a_v et le coefficient de perméabilité k sont constants pendant la consolidation ;
- l'absence de consolidation secondaire.

Théorie de consolidation unidimensionnelle



Élément dans une couche de sol
soumise à un supplément de
contrainte
Tassement 1D = dz

- L'état des contraintes en M s'écrit :

$$\sigma'_{v0} + \Delta\sigma' = (\sigma_{v0} + \Delta\sigma) - (\Delta u + u_0)$$

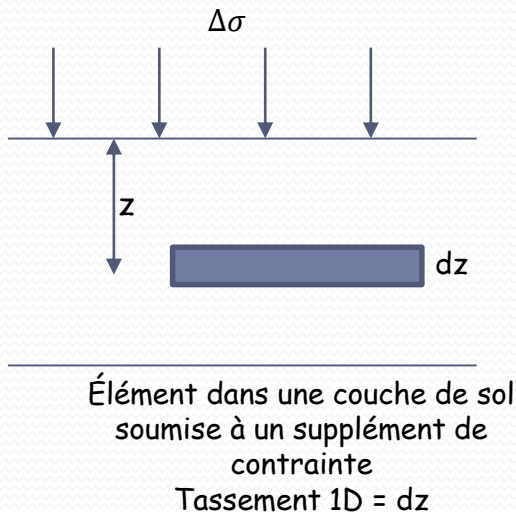
$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial \sigma'}{\partial t}$$

➔ l'augmentation de contrainte effective est égale à la diminution de pression interstitielle

- Le module œdométrique $E_{oed} = -\frac{\frac{\Delta\sigma'}{\frac{\Delta H}{H}}}{\frac{\Delta n}{\Delta n}} = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta n}$
- D'où: $\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = -E_{oed} \frac{\partial n}{\partial t}$ et $\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{E_{oed}} \frac{\partial \sigma'}{\partial t}$
- Soit : $\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{1}{E_{oed}} \frac{\partial u}{\partial t}$
- Le volume d'eau expulsée = $dQ = \frac{\partial n}{\partial t} dz$
- D'où :

$$dQ = -\frac{1}{E_{oed}} \frac{\partial u}{\partial t} dz$$

Théorie de consolidation unidimensionnelle



- À partir de l'écoulement $v = ki = -k \frac{\partial h}{\partial z}$
- D'où: $v = -k \frac{\partial \left(z + \frac{u}{\gamma_w} \right)}{\partial z}$
- Le volume d'eau expulsé pendant un temps unité est :
- $dQ = \frac{dv}{dzdt} = \frac{-k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} dz$
- En utilisant les deux expressions pour dQ , il vient:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \left(\frac{k}{m_v \gamma_w} \right) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

→ c'est l'équation de la consolidation

Équation de consolidation (Terzaghi)

$$\left(\frac{k}{\gamma_w} \frac{1+e_0}{a_v} \right) \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} \quad \longrightarrow \quad c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t}$$

- Avec :

- a_v : coefficient de compressibilité
- k : conductivité hydraulique
- e_0 : indice des vides initial du sol
- γ_w : poids volumique de l'eau
- z : position au sein de la couche
- t : temps
- u_e : surpression interstitielle $u = u_e + u_0$
- c_v : coefficient de consolidation

Solution de l'équation de Terzaghi

- Hypothèses :
 - Contrainte totale constante
 - u_e est uniforme sur toute la couche considérée
 - Double drainage
 - Absence de consolidation secondaire
 - Grains du sol incompressibles
- Changement de variables :

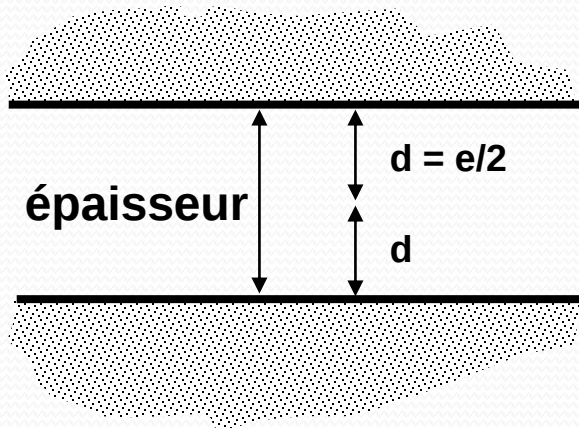


$$Z = \frac{z}{H} \quad T_v = \frac{c_v t}{H^2}$$

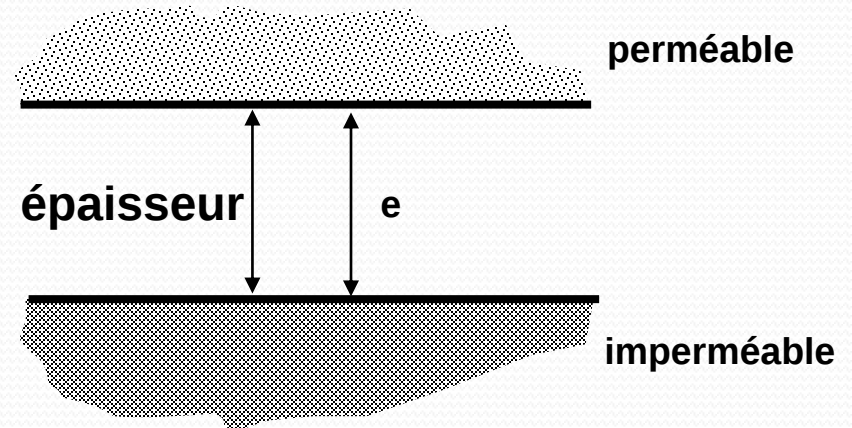
$$\frac{\partial^2 u_e}{\partial Z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial T}$$

Longueur du chemin de drainage

①



②



Conditions de drainage

Noter la notion de parcours
de drainage: attention!!!

① double drainage $H = e/2$

② simple drainage $H = e$

Solution de l'équation de Terzaghi

- Définition de Z et H



H = longueur du chemin de drainage

Solution de l'équation de Terzaghi

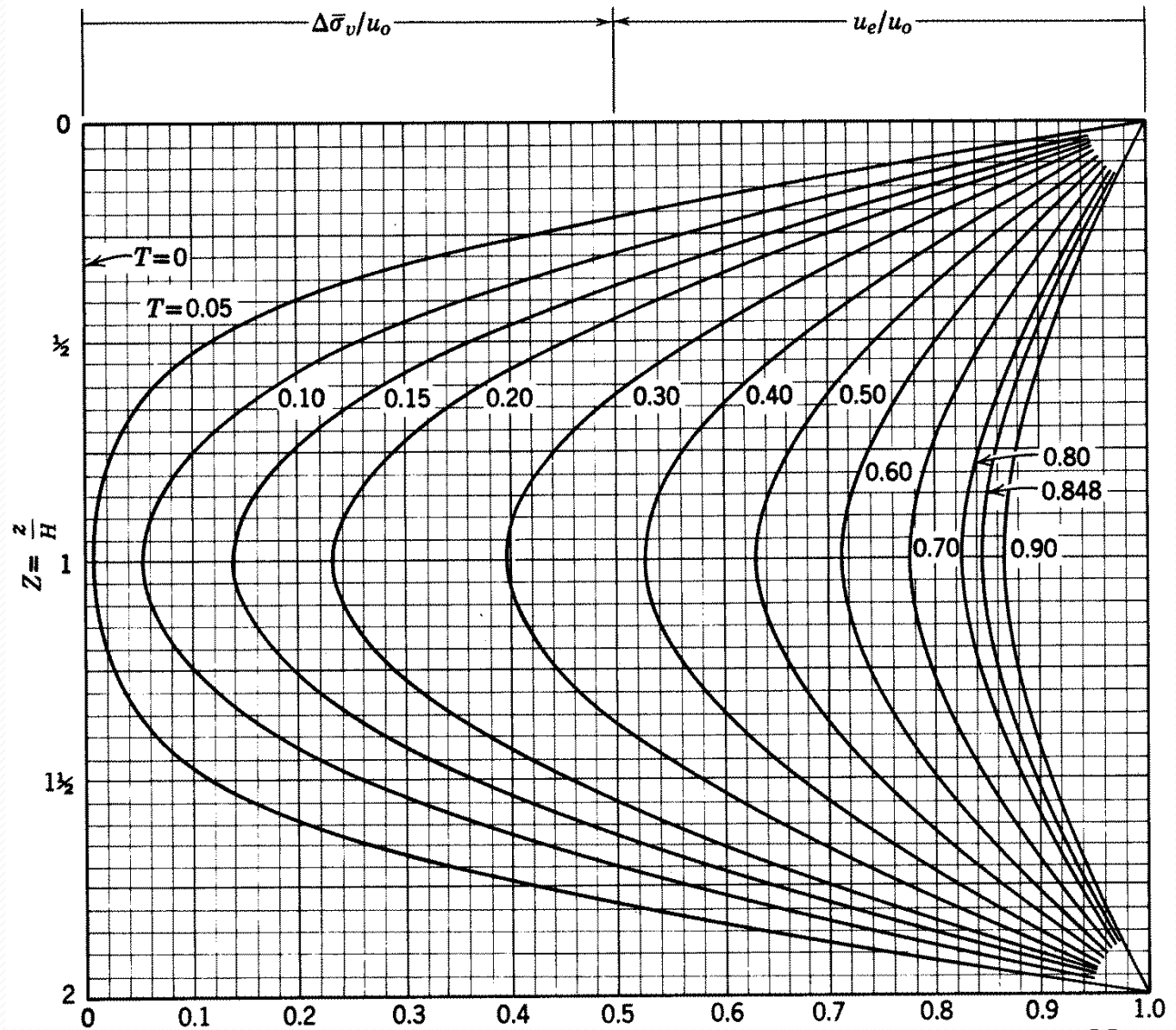
- Conditions
 - Initial : $u_e = u_0$ pour $0 \leq Z \leq 2$
 - A tout temps t : $u_e = u_0$ pour $Z = 0$ et $Z = 2$
- Solution de la forme suivante :

$$u_e = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2u_0}{M} \sin(MZ) e^{-M^2 T} \quad \text{avec} \quad M = \frac{\pi}{2} (2m+1)$$

Solution de l'équation de Terzaghi

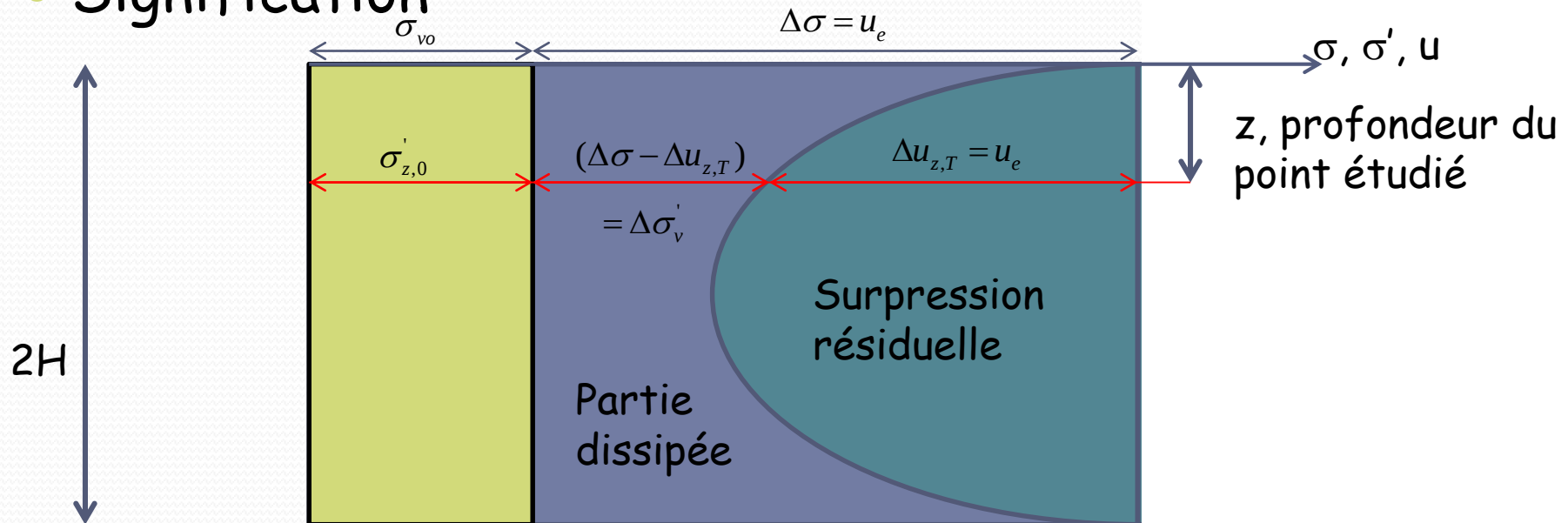
- Soit U_z le degré de consolidation local

$$U_z = 1 - \frac{u_e}{u_0}$$



Solution de l'équation de Terzaghi

- Signification

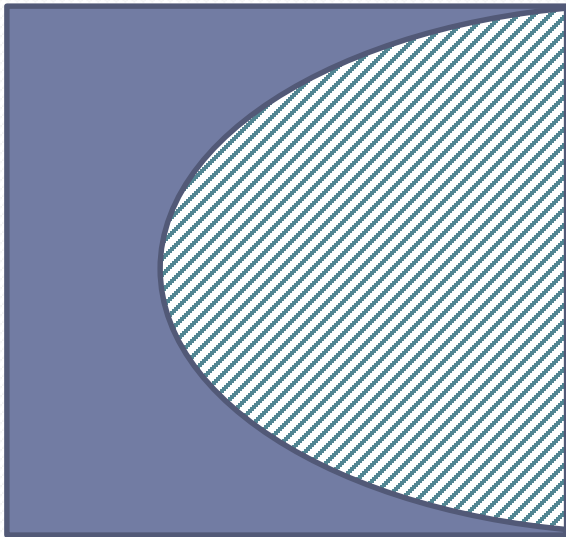


- État initial
- Après chargement mécanique : la zone violette = u_e ,
- Pour un temps t donné, seule une partie de u_e est dissipée, on a donc

$$\sigma'_{z,T} = \sigma'_{z,0} + (\Delta\sigma - \Delta u_{z,T})$$

Solution de l'équation de Terzaghi

- Définition du taux de consolidation moyen :
 - Pour un facteur T donné, on peut déterminer



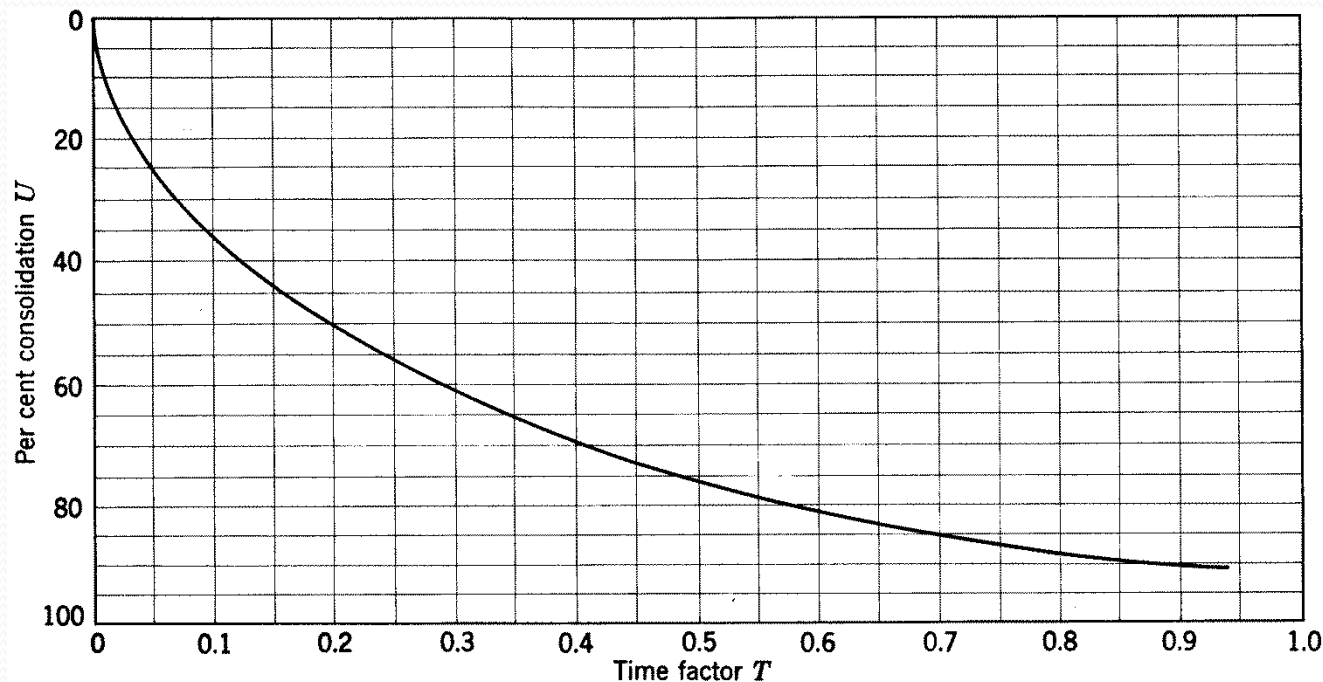
$$U_{moy}(\%) = \frac{\text{aire foncée}}{\text{aire totale}} \times 100$$

$$U_{moy} = \frac{s_t}{s_{\infty}} \times 100$$

Solution de l'équation de Terzaghi

- Valeur du taux de consolidation moyen

U_{moy} (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
T_v (-)	0,008	0,031	0,071	0,126	0,197	0,287	0,403	0,567	0,848	∞



Solution approchée

- Approximation des valeurs de T_v par les relations suivantes :

- Si $U < 60 \%$

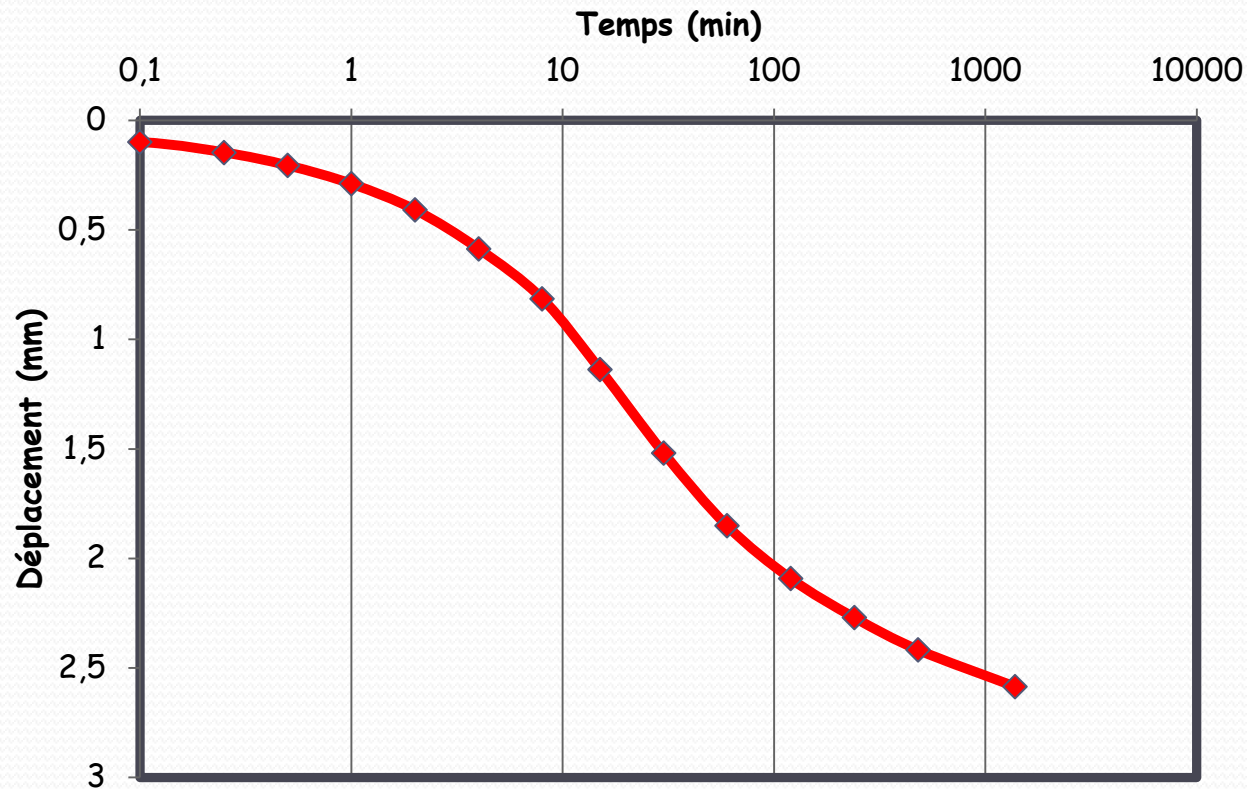
$$\rightarrow T_v = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{100} \right)^2$$

- Si $U > 60\%$

$$\rightarrow T_v = 1,781 - 0,933 \log(100 - U)$$

Détermination de C_v

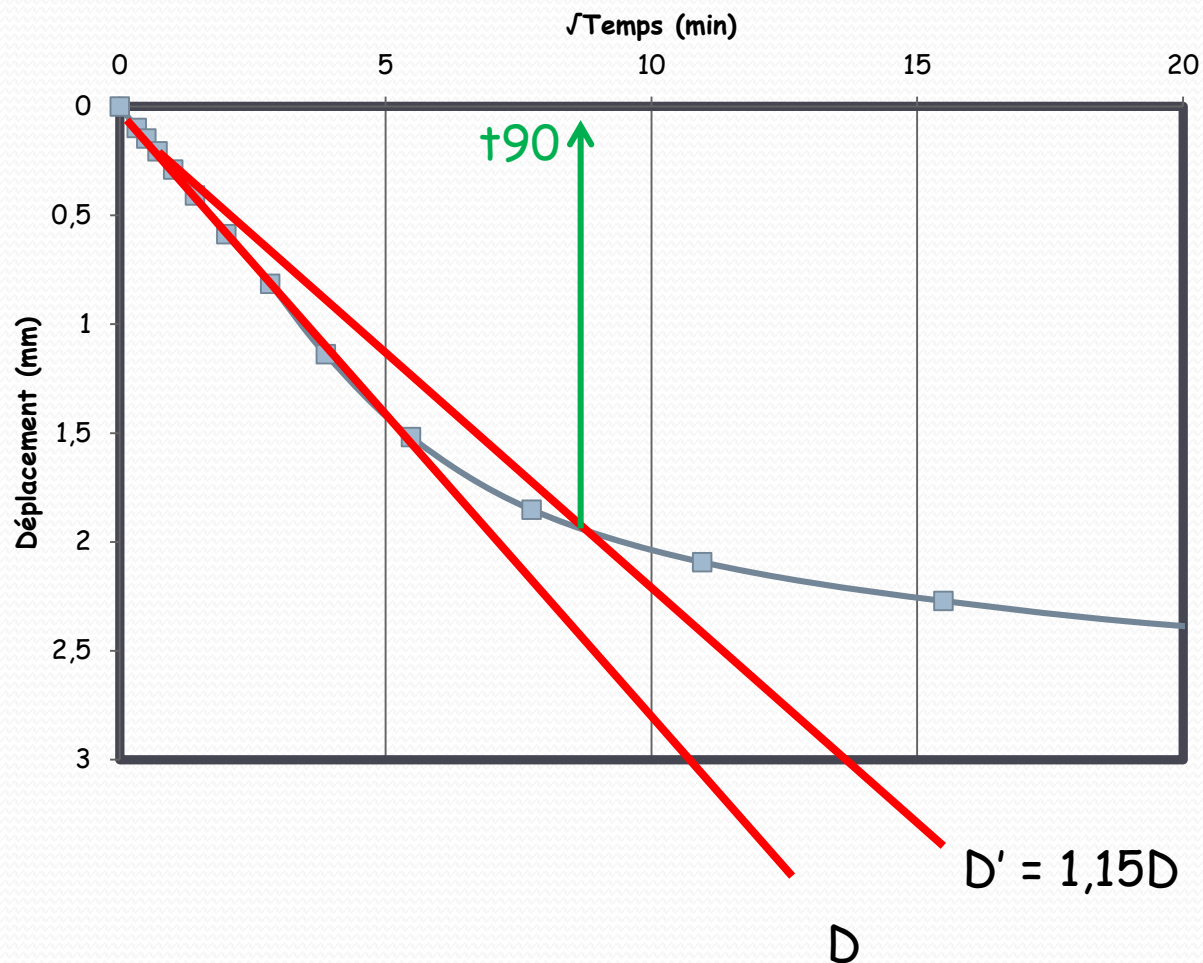
- Méthode de Casagrande : $\log t$



- But : localiser le $t_{50\%}$
- Localisation du t_{100} et du t_0 !

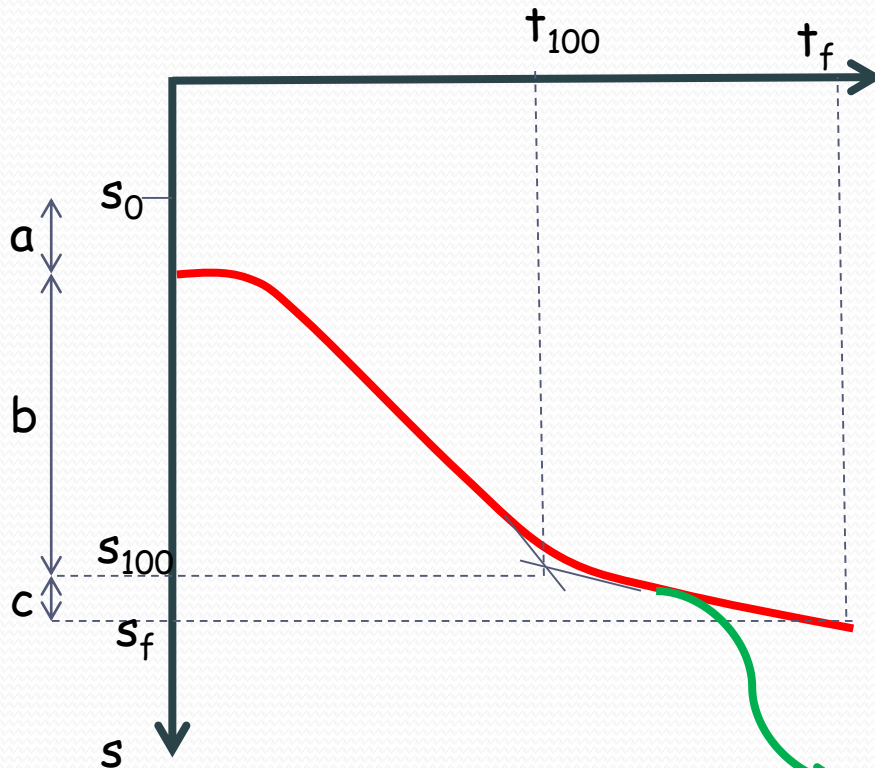
Détermination de C_v

- Méthode de Taylor : $\sqrt{t}$



Consolidation secondaire

- A t_0 , on applique une surcharge mécanique $\Delta\sigma'_v$



Consolidation secondaire = le tassement qui intervient à la fin de la consolidation primaire (partie c de la courbe ci-contre)

Point essentiel : la consolidation secondaire se déroule à contrainte effective constante !!

Hypothèse : processus linéaire en fonction de $\log t$

$$C_\alpha = \frac{\Delta e}{\Delta \log t}$$

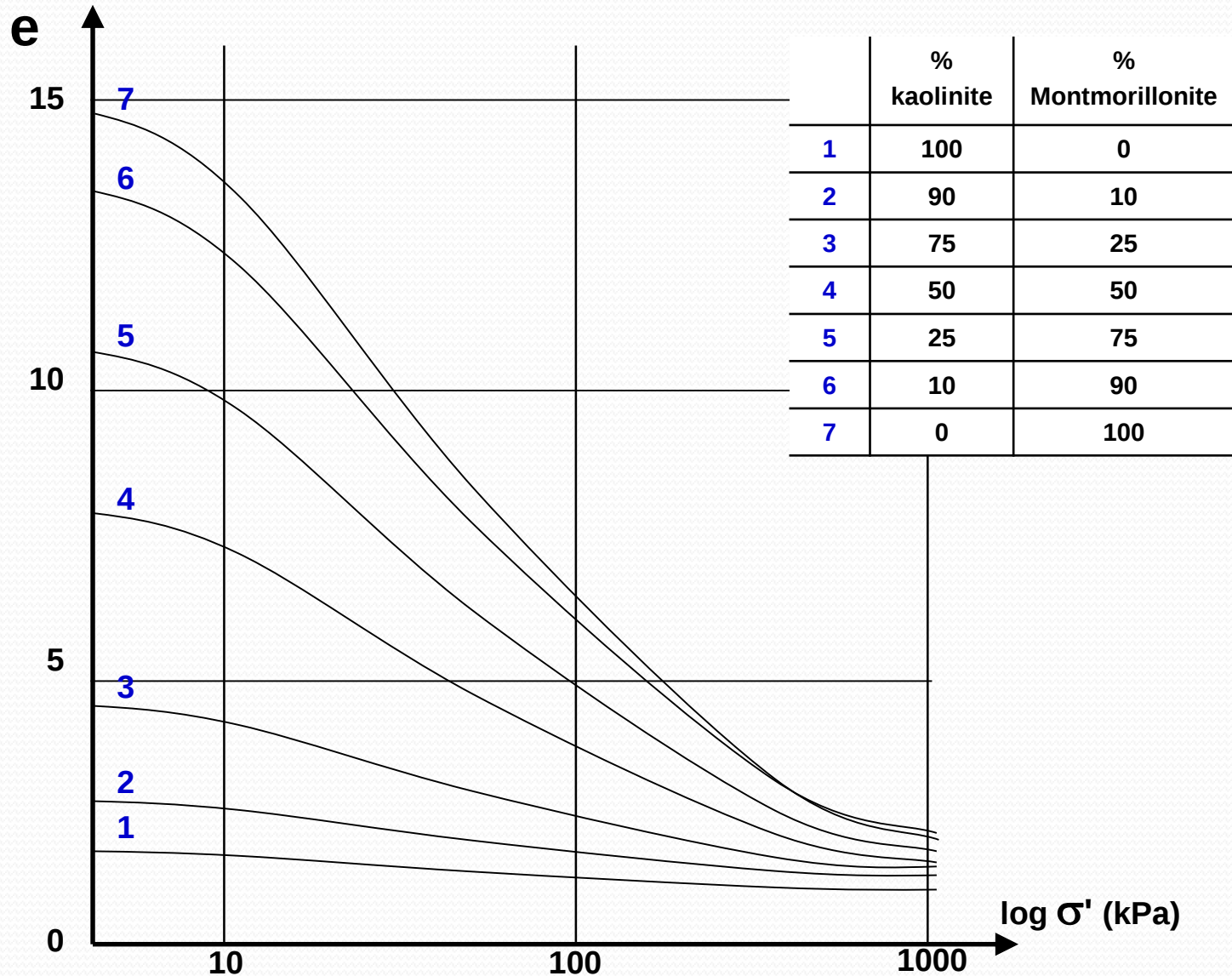
Quelques valeurs typiques (Sangl rat)

	C_v	C_c
Kaolinites	$4 \text{ � } 2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$	0,11
Illites	$2 \text{ � } \times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$	0,5
Montmorillonites	$0,2 \text{ � } 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$	2,5

	C_v	C_c
Sable Fontainebleau	-	-
Argile verte	$3 \times 10^{-4} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$	0,047
Limon d'Orly	$5 \times 10^{-2} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$	0,1
Vase de Martou	$8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$	1,2
Tourbe de Bourgoin	$4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$	1,8

Sable	$0,01 < C_c < 0,10$
Argile raide	$0,1 < C_c < 0,25$
Argile moyenne	$0,25 < C_c < 0,8$
Argile molle	$0,8 < C_c < 2,5$

Impact de la nature minéralogique



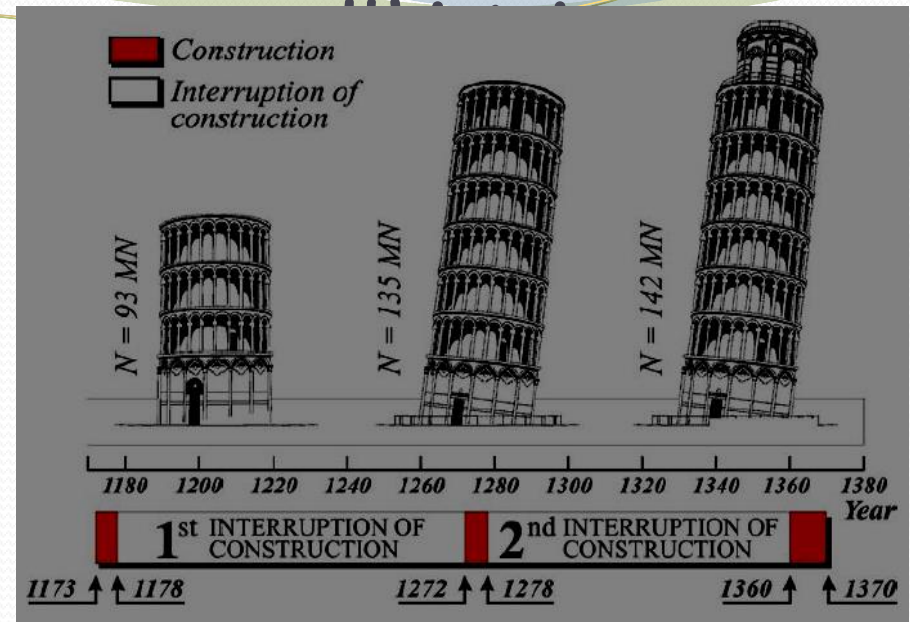
Estimer la valeur de C_c

- Relations empiriques : première approche et contrôle de résultats d'essais
- Argiles remaniées : Terzaghi et Peck (1967)
 - $C_c = 0,009(w_L - 10)$
- De très nombreuses corrélations existent
 - *ex: argiles de Chicago: $C_c = 1,15(e_0 - 0,27)$*

Une étude de cas

La tour de Pise

et



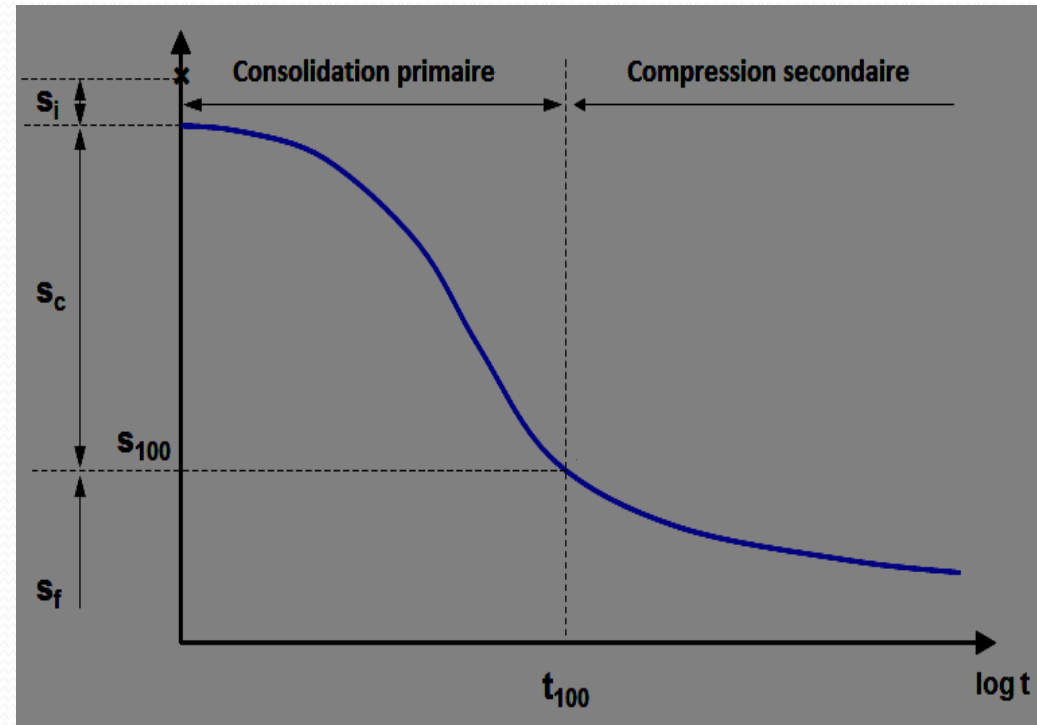
Année	Inclinaison (m)	Angle (en°)
1350	1,40	1,47
1827	3,80	3,99
1993	5,40	5,66
2006	4,50	4,72
2008	3,99	4,19

I. Calcul des tassements associés à chaque couche

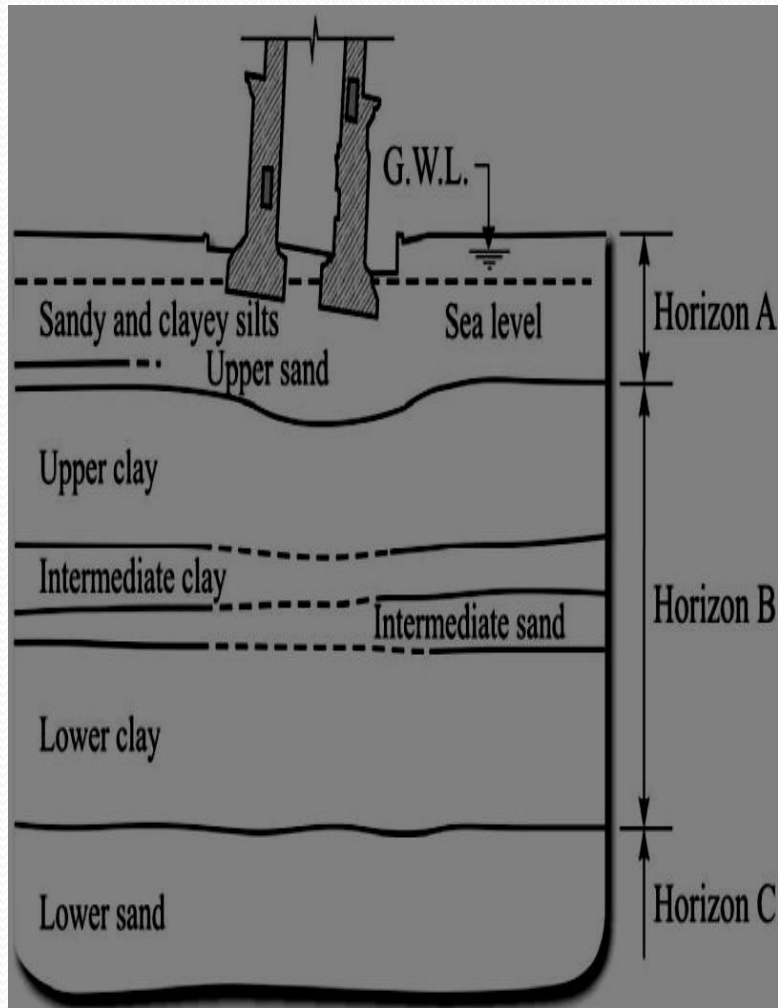
hauteur	masse	poids	diamètre	surface	pression
56 m	14 500 Mg	142 MN	19,6 m	300 m ²	470 kPa

$$S = H * \left(\frac{Cc}{1 + eo} \right) * \log \left(\frac{\sigma'_{o} + \Delta\sigma}{\sigma'_{o}} \right)$$

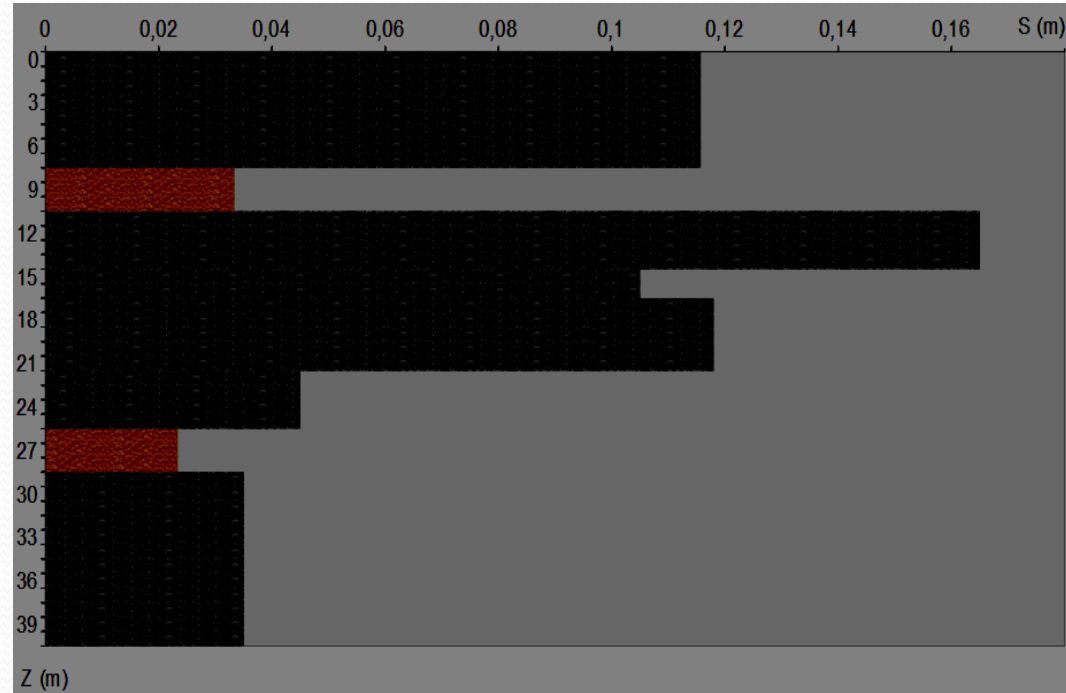
Sable	0,01 < Cc < 0,10
Argile raide	0,10 < Cc < 0,25
Argile moyenne	0,25 < Cc < 0,80
Argile molle	0,80 < Cc < 2,50



Quel est le lien entre la géologie et les tassements ?



Burland *et al.* 2009

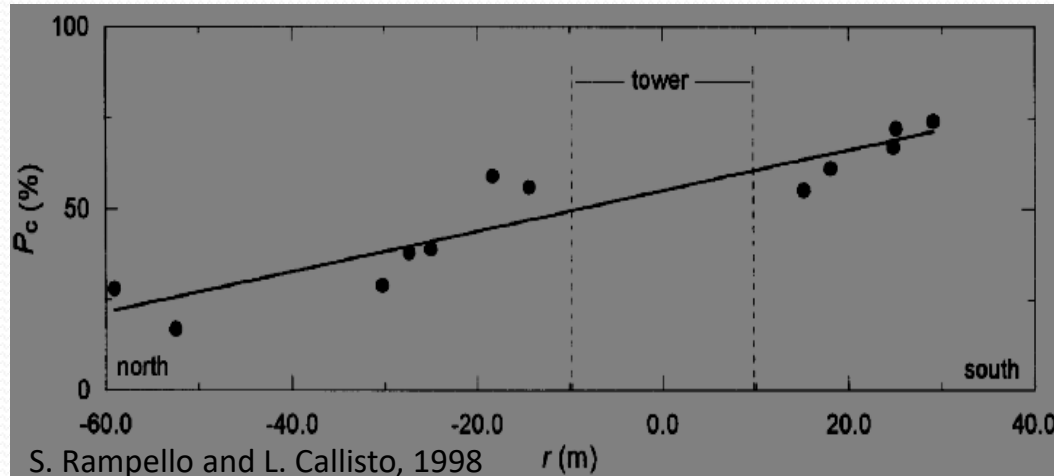


**Tassement en surface : $S = 2,9$
m**

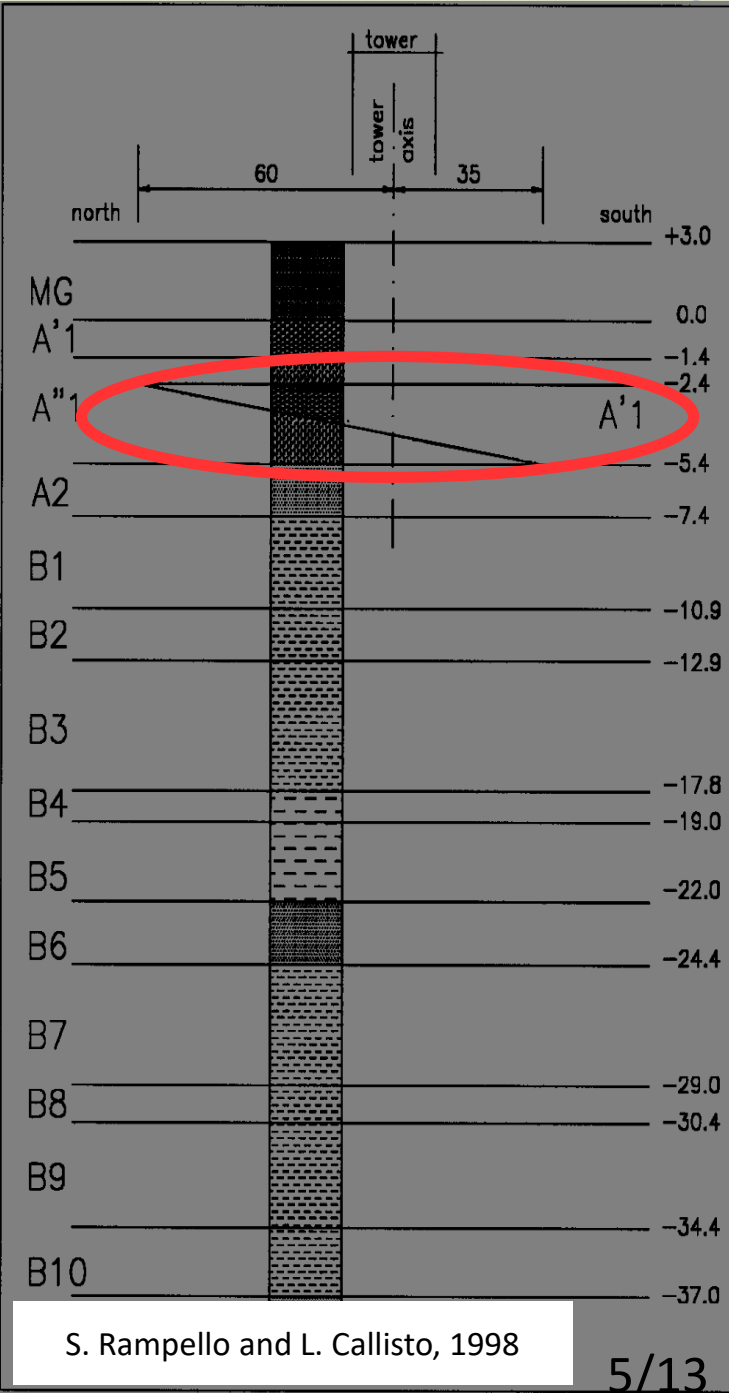
II. Explication de la différence N / S

Tassement observé au Nord	Tassement calculé au centre	Tassement observé au Sud
1,86 m	< 2,9 m <	3,75 m

Pourquoi ce tassement différentiel ?



Hétérogénéité latérale de l'horizon A



La géologie explique le tassement différentiel mais peut-elle justifier presque 2 m de différence entre N et S ?

Épaisseur de la couche hétérogène A1	Tassement différentiel entre N et S
$H \approx 3 \text{ m}$	$\Delta S \approx 2 \text{ m}$

100% de sables au Nord $\approx 0 \text{ m}$ de tassement

100% d'argiles au Sud $\approx 0,7 \text{ m}$ de tassement

Calculs	Observations
$\Delta S \approx 0,7 \text{ m}$	$\Delta S \approx 2 \text{ m}$

L'hétérogénéité latérale explique la direction mais non l'amplitude du tassement différentiel

III. Qu'est-ce qui pourrait expliquer une telle inclinaison ?

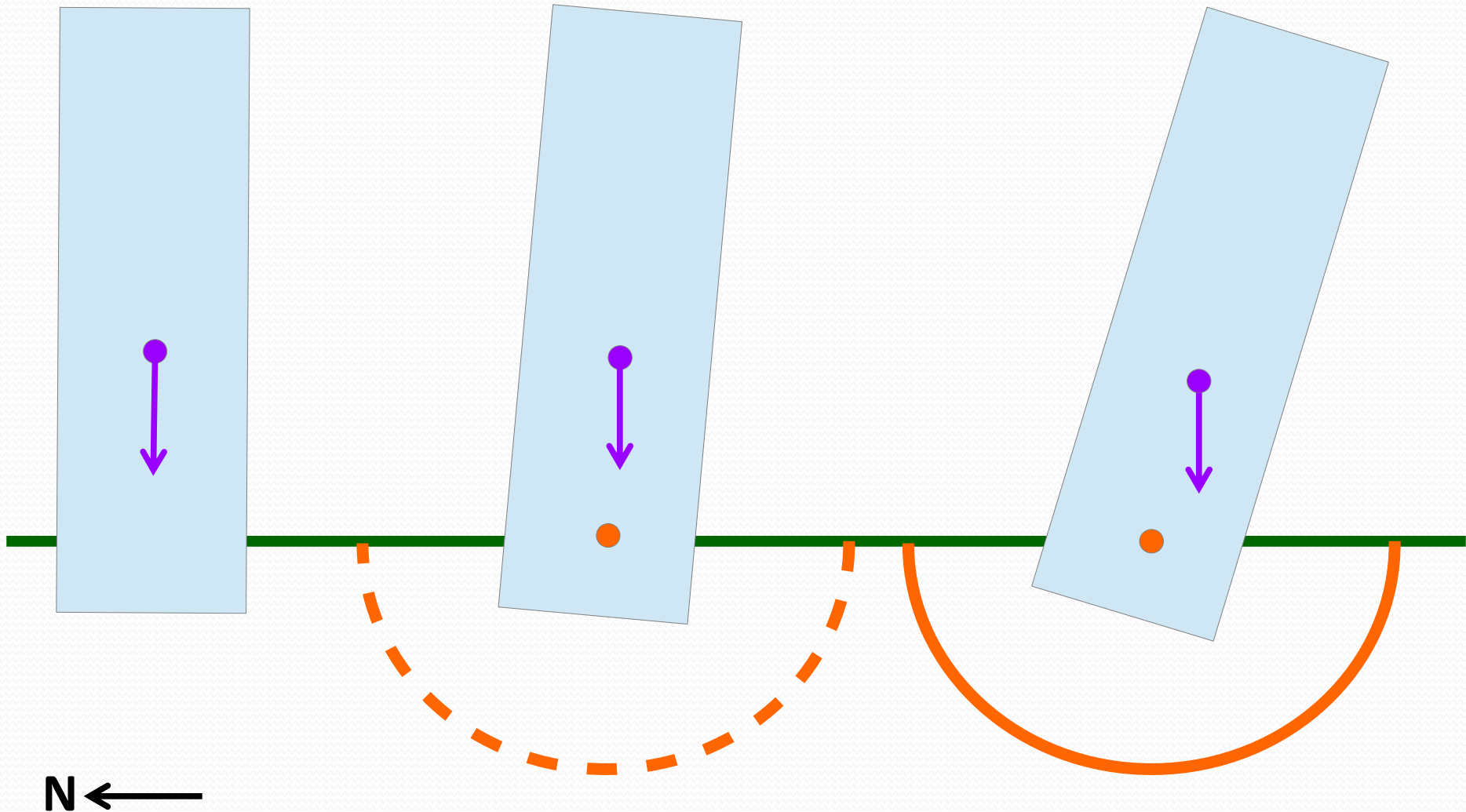
1) Construction



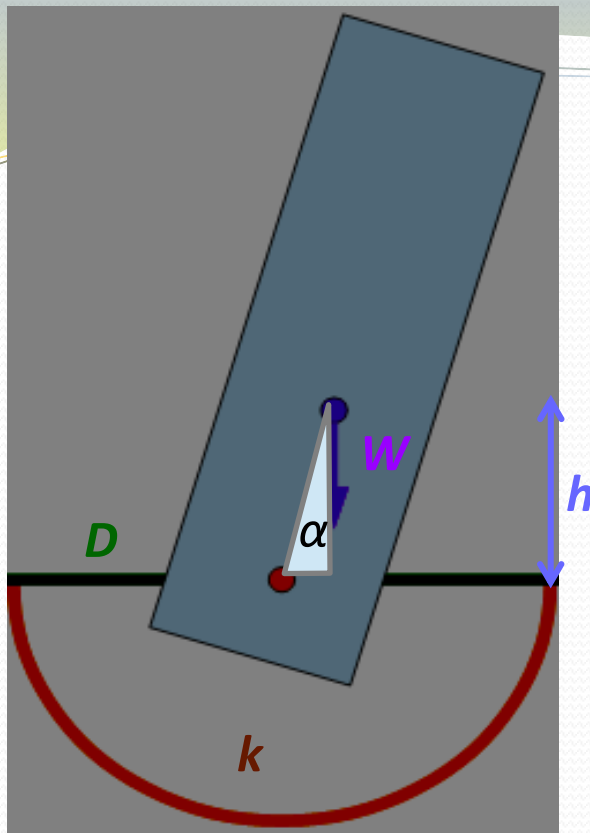
2) Tassement différentiel



3) Moment basculant



Peut-on calculer un facteur de sécurité ?



$$F = \frac{M_{résistant}}{M_{moteur}} = \frac{k * D^3 * \alpha}{W * h * \sin \alpha}$$

Avec $\sin(\alpha) \approx \alpha$ et $k = \frac{E}{6(1 - \nu^2)}$ en N/m²

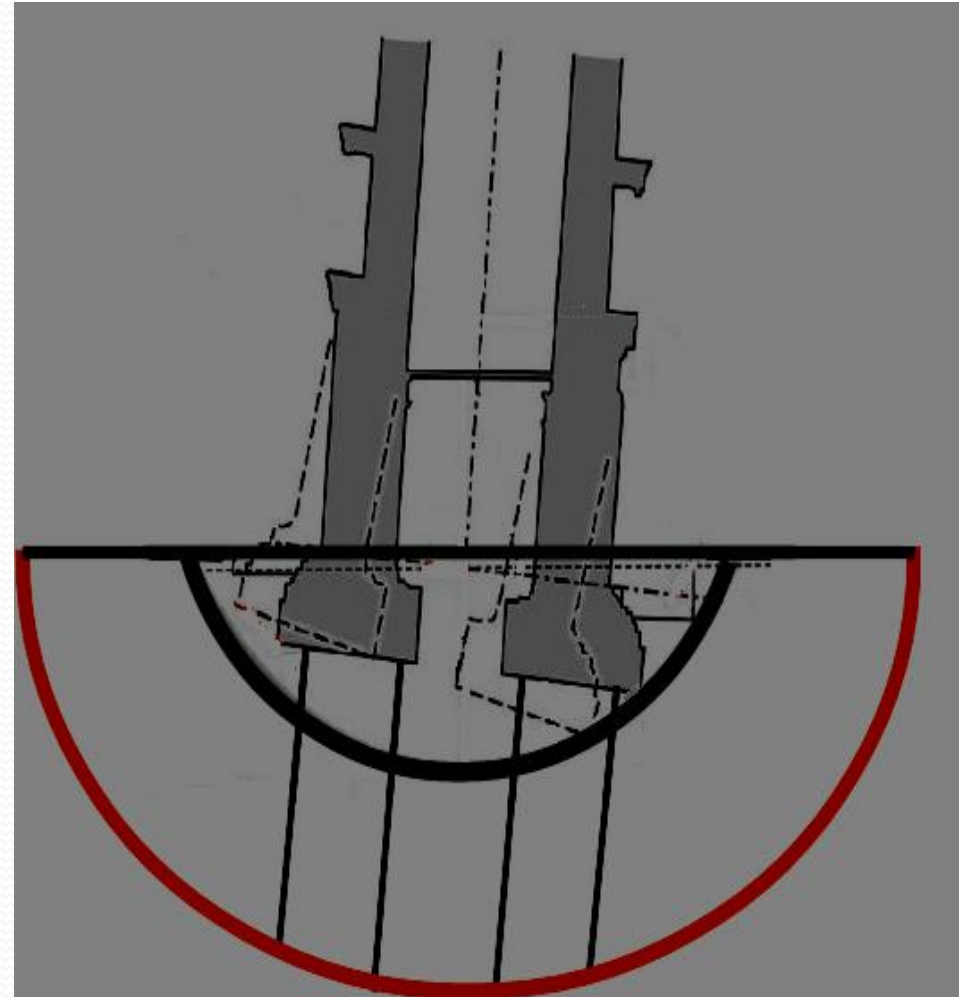
Pivate communication with C. Viggiani

Coefficient de résistance du sol	Diamètre de la sphère de rupture	Poids de la tour au centre de gravité	Hauteur du centre de gravité	Facteur de sécurité
$k = 0,475 \text{ MN/m}^2$	$D = 19,6 \text{ m}$	$W = 142 \text{ MN}$	$h = 22,6 \text{ m}$	$F = 1,1$

F ≈ 1 donc moment à l'équilibre mais très peu sécuritaire

IV. Comment augmenter le facteur de sécurité ?

$$F = \frac{M_{résistant}}{M_{moteur}} = \frac{k * D^3 * \alpha}{W * h * \sin \alpha}$$

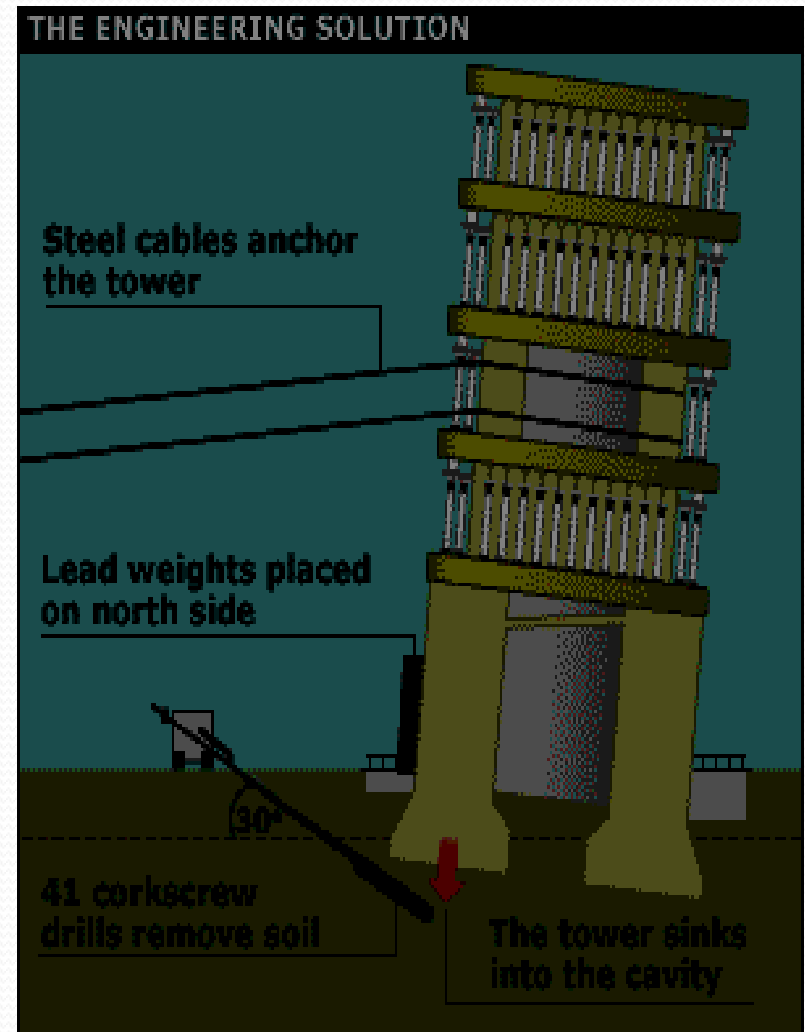


$\nearrow F$ $\nearrow M_R$ $\nearrow D$

=> micro-pieux

Chronologie du vaste projet de confortement

- **1990** : tour fermée au public
- **1993** : création d'un comité international et début des travaux
- **1998** : pose d'une armature et de câbles d'ancrage en acier
- **1999** : 60 m³ d'argile sont extraits et des micro-pieux sont ajoutés
- **2001** : tour ré-ouverte au public



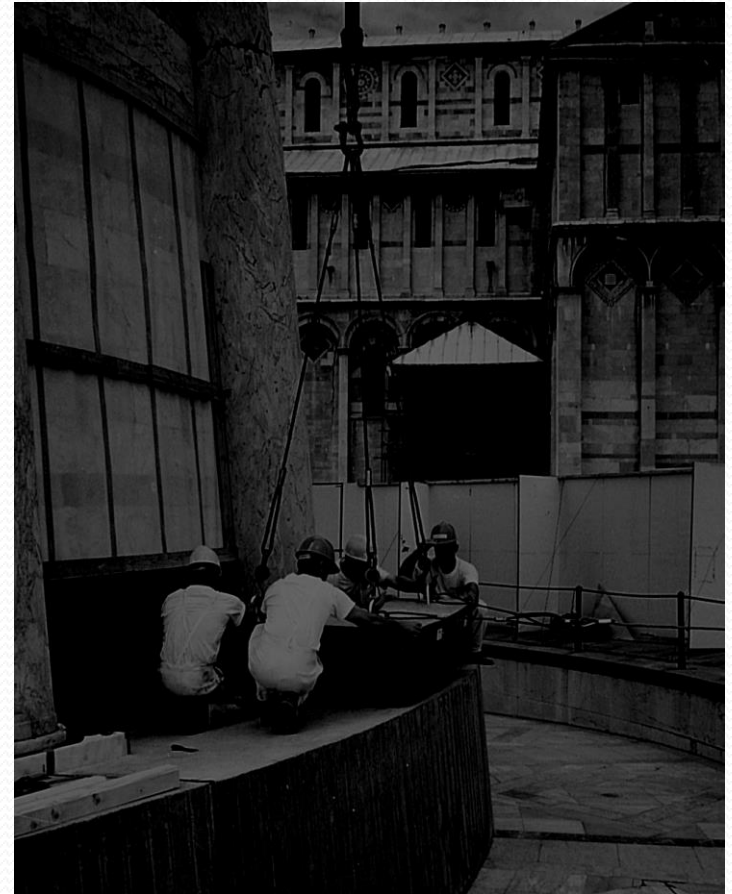
Private communication with C. Viggiani

Test et suivi sur modèle réduit (7 m)

Contre-poids au Nord (900 Mg)



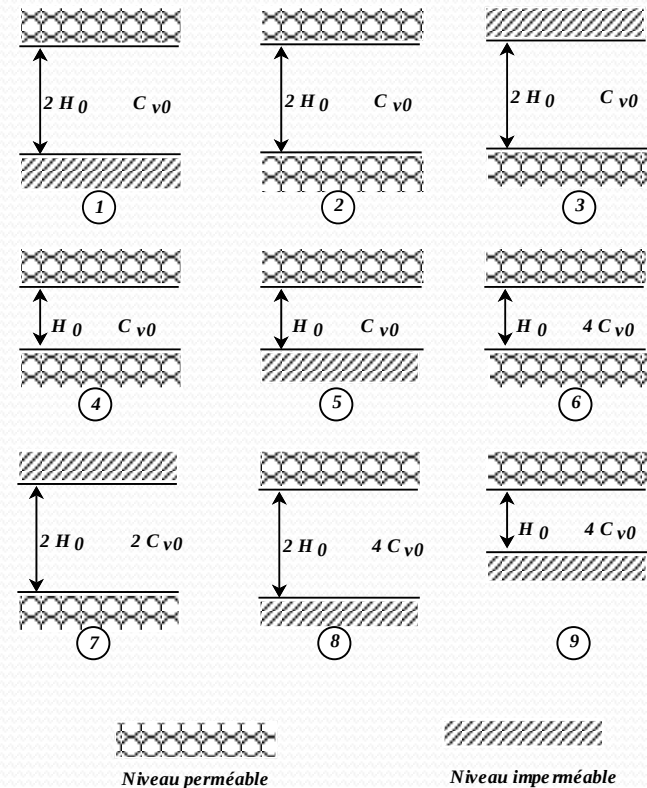
Burland *et al.* 1998



Burland *et al.* 1998

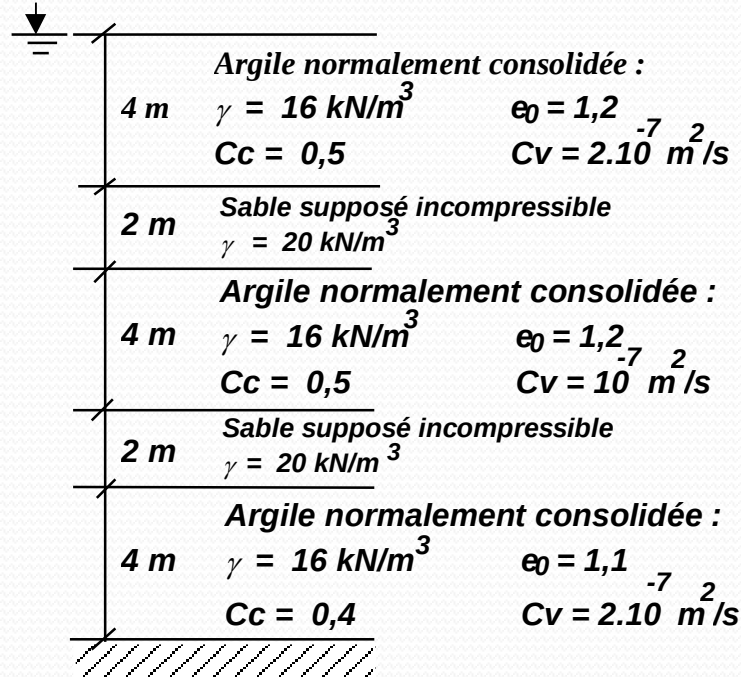
Redressée de $1,5^\circ$ soit 1,4 m la Tour est actuellement stabilisée mais pour combien de temps ?

- **Exercice 1** : Classer par ordre de vitesse de consolidation croissante les cas représentés sur la figure ci-contre.



- **Exercice 2** : Une couche d'argile de 6 m d'épaisseur est comprise entre deux couches de sable. Par suite d'un chargement en surface, il apparaît un supplément de pression interstitielle dans la couche d'argile engendrant un tassement. En supposant que $C_v = 5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$, au bout de combien de temps atteindra-t-on la moitié du tassement total ?
- **Exercice 3** : En supposant maintenant que la couche d'argile de l'exercice précédent contienne à l'interface supérieure une petite couche de sable qui permette le drainage, au bout de combien de temps atteindra-t-on la moitié du tassement total ?

- **Exercice 4** : Les résultats d'un essai de consolidation sur un échantillon d'argile de 2 cm d'épaisseur drainé sur ses deux faces montrent que la moitié de la compression totale se produit en 5 mn. Combien de temps faudra-t-il pour que le tassement d'un immeuble fondé sur une couche de la même argile de 4m d'épaisseur, dans les mêmes conditions de consolidation, atteigne la moitié du tassement total ?
- **Exercice 6** : Une couche d'argile de 8 m d'épaisseur est drainée des deux côtés. A l'instant initial, on impose une surcharge en surface qui génère une pression interstitielle de 100 kPa dans l'ensemble de la couche ($C_v = 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$).
- Tracez sur un diagramme les courbes décroissantes de la pression interstitielle en fonction du temps à 1 ; 2 et 4 m de profondeur dans la couche, tracez également la courbe donnant la valeur du degré de consolidation global de la couche.
- **Exercice 7** : La surface d'un dépôt de sols compressibles, dont la coupe est représentée sur la figure ci-dessous, reçoit une surcharge uniforme de 50 kPa, la nappe est à la surface du terrain naturel.
- 1) Calculez le tassement final à la surface du sol.
- 2) Tracez la courbe de tassement en fonction du temps.



Exercice 8 : On veut réaliser un remblaiement sur le site pour lequel la coupe du sol est représentée sur la figure ci-dessous. Calculer les contraintes effectives verticales existant dans la couche de vase à 4,5, 5,5, et 6,5 m de profondeur et les comparer avec les valeurs

- 1) En supposant que les tassements se produisent essentiellement dans la couche de vase, déterminez le tassement entraîné par un remblaiement de 4 m d'épaisseur avec un matériau dont le poids volumique $\gamma_{\text{sat}} = 21 \text{ kN/m}^3$ et le g (au-dessus de la nappe) = 20 kN/m^3 .
- 2) En supposant que la couche de vase possède un $C_v = 5.10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$, quelle sera la valeur du tassement au bout d'un an ?

