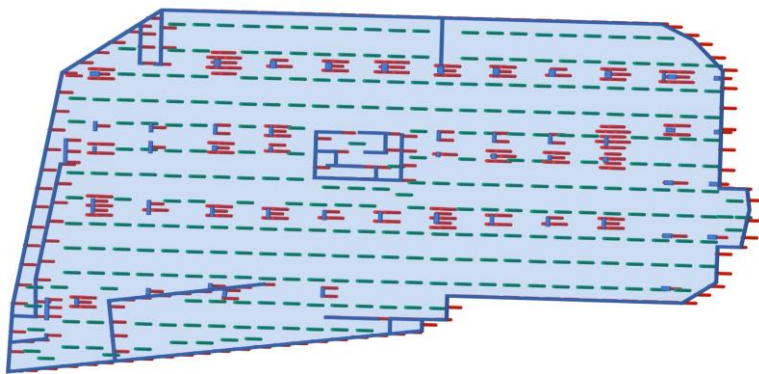


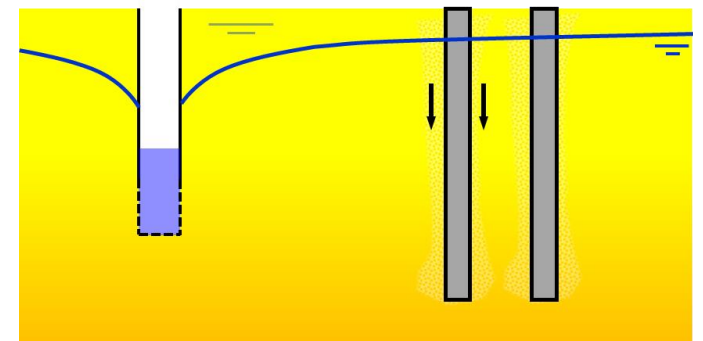
# Influence du rabattement de nappe sur fondations profondes réalisées avant terrassement des fouilles

Stéphane BRÛLÉ - MENARD

Lyon, 15 juin 2023



**menARD**



# Sommaire

- Évolution des documents
- Tendances chantier
- Rappels théoriques et exemple
- L'importance du phasage
- Élément de fondation profonde
- Conclusions

# Références

- [1] Recommandations pour la conception, l'exécution et le suivi des rabattements temporaires de nappes. CFMS et SFEG (2022).
- [2] NF P 94-262 (2012). Justification des fondations profondes – AFNOR.
- [3] Fascicule 62 titre V du CCTG – Dimensionnement des fondations – Ministère de l'Équipement.
- [4] Josseaume H. 1970. Essai de pompage, Bulletin de liaison des LPC - numéro spécial « Hydraulique des sols », 38-55.
- [5] Combarieu O. (1971). Effet d'accrochage et effet du frottement négatif, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussée n°91, 93-107.
- [6] Habert J., Landry B., Burlon S. (2014). Effets du frottement négatif appréhendés par une méthode au coefficient de réaction t-z.

# Évolution des documents

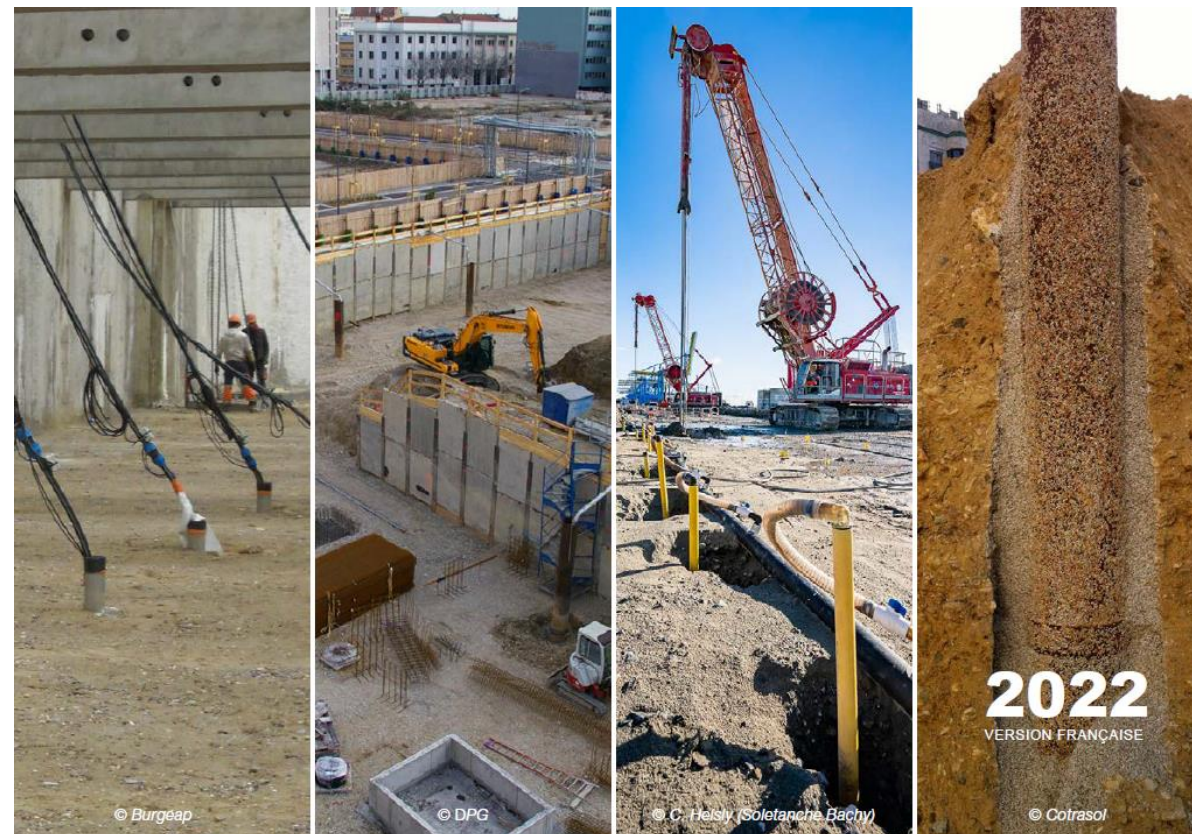
VERSION N°1

16 MAI 2022



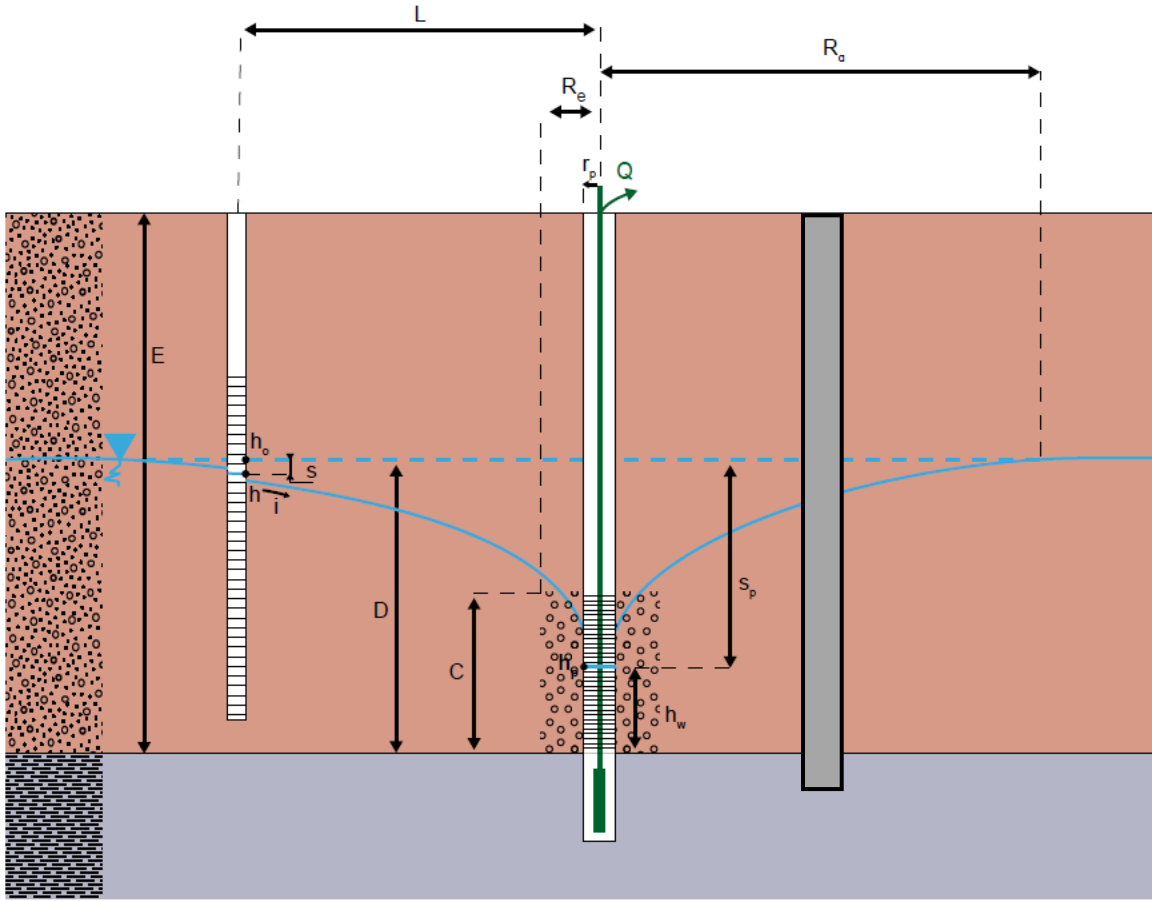
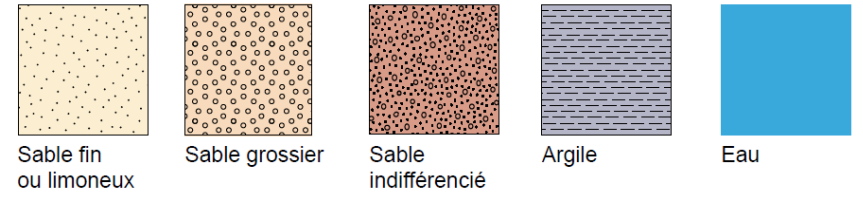
## RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION, L'EXÉCUTION ET LE SUIVI DES RABATTEMENTS TEMPORAIRES DE NAPPES

Sous l'égide  
du comité français de mécanique des sols (CFMS)  
et du syndicat français pour l'eau et la géothermie (SFEG)



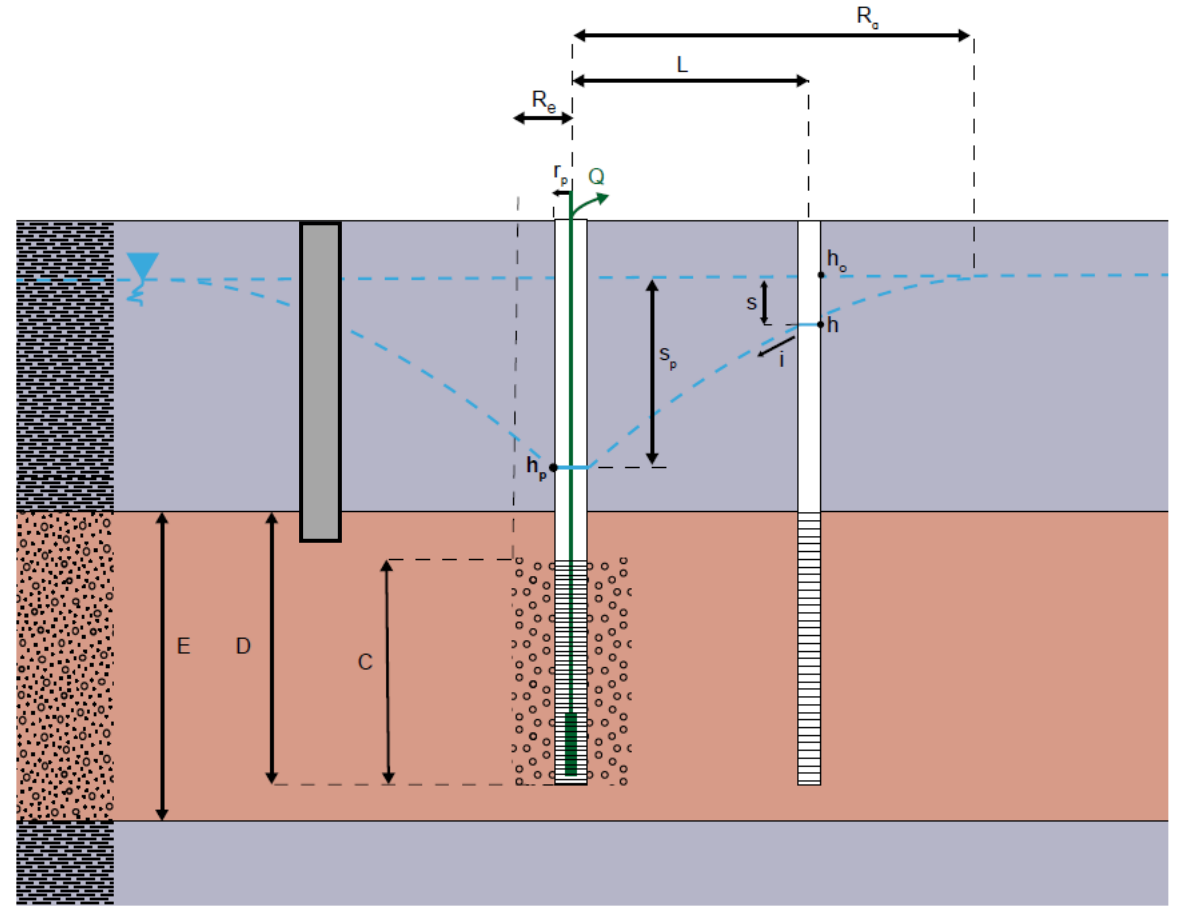
[1]

# Évolution des documents



D'après [1]

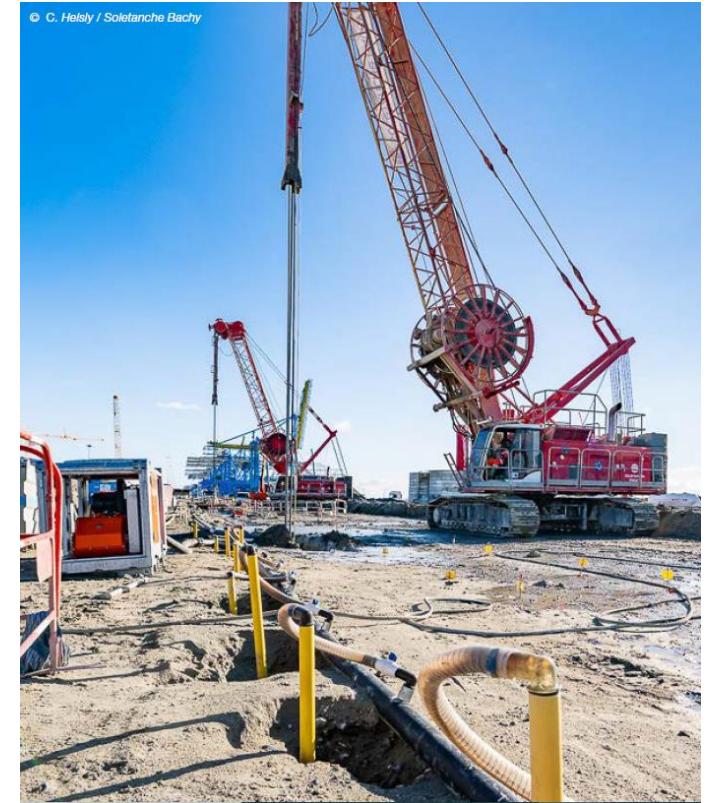
Nappe libre



Nappe captive

# Évolution des documents

- Le calcul du frottement négatif dans la norme NF P 94-262 [2] ne s'applique pas au rabattement de nappe (Annexe H), idem dans le fascicule 62 Titre V [3]. Les efforts dus aux frottements négatifs sont traités comme des actions permanentes dans les combinaisons d'actions.
- Les méthodes dans les documents de calcul français pour estimer le frottement négatif nécessitent le calcul du champ de contraintes effectives dans le sol, puis du frottement à l'interface sol-pieu.



[1]

# Évolution des documents

- La valeur de frottement négatif obtenue est comparée aux charges variables appliquées en tête de pieu et cumulée aux charges permanentes pour justifier à la fois la portance et la résistance structurelle du pieu [5].
- Cette méthode de calcul ne rend pas compte des mécanismes de déformation du terrain et du pieu lui-même.



[1]

# Tendance chantier



Une augmentation sensible du nombre de cas de bâtiment avec deux niveaux de sous-sol en conséquence de la pression foncière en zone urbaine dense (Lyon).

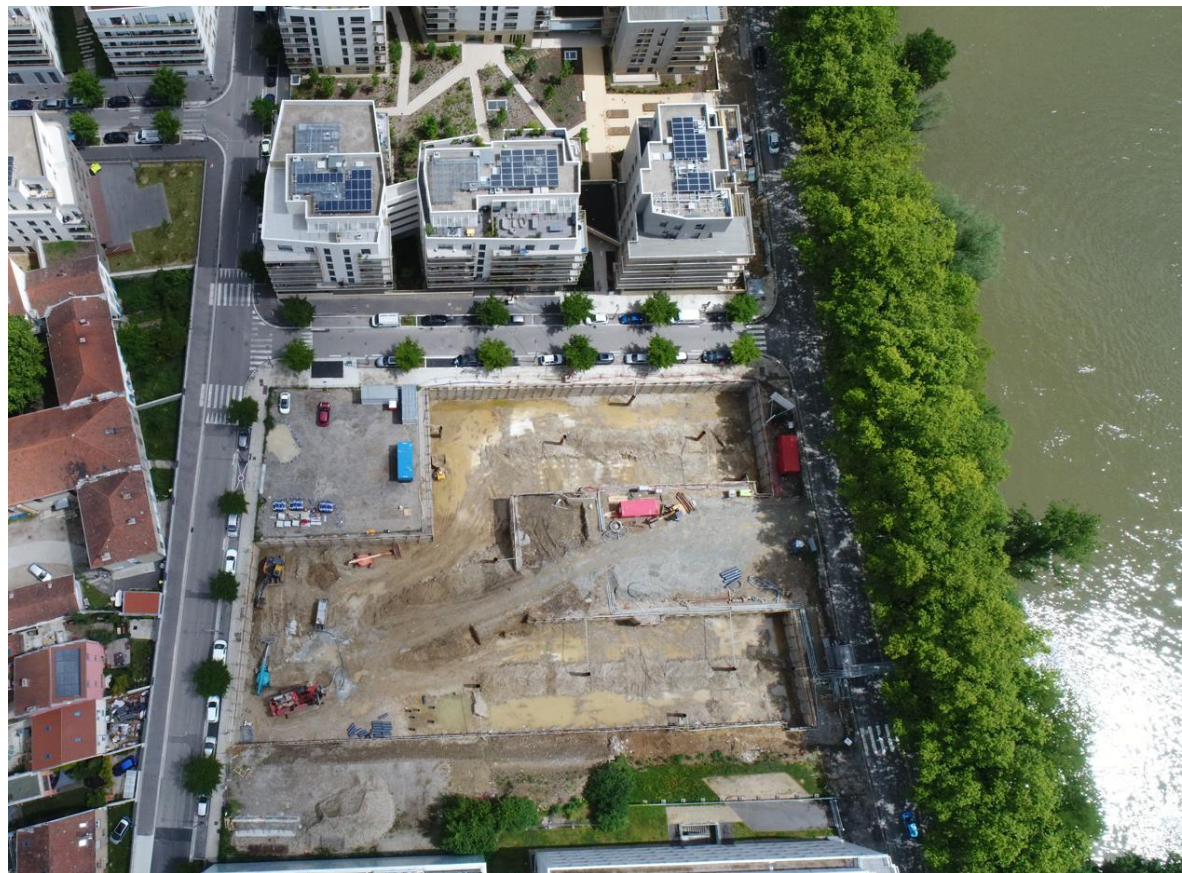
Parking en sous-sol : > 2 000 €/m<sup>2</sup>

Approfondissement des hauteurs soutenues par berlinoise.





# Tendance chantier



# Tendance chantier



Importance du suivi de pompage pendant la phase travaux

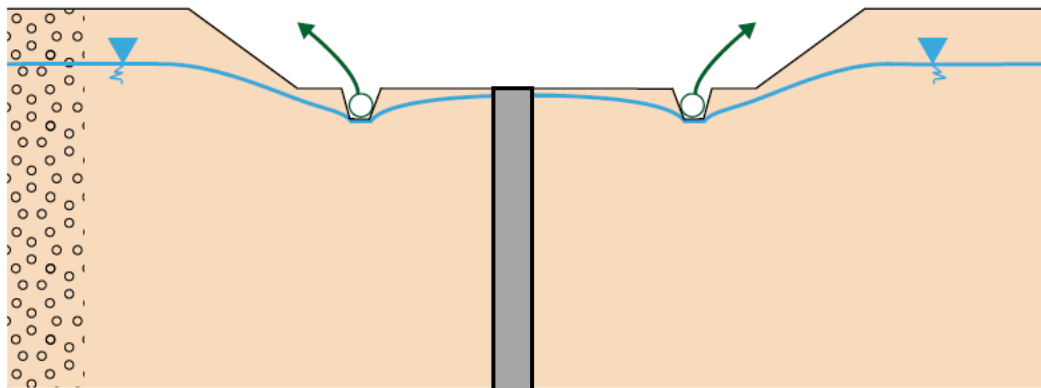


Sous-dimensionnement du dispositif de pompage



Cycles de pompage → ne pas oublier l'impact sur le « chemin des contraintes »

# Tendance chantier

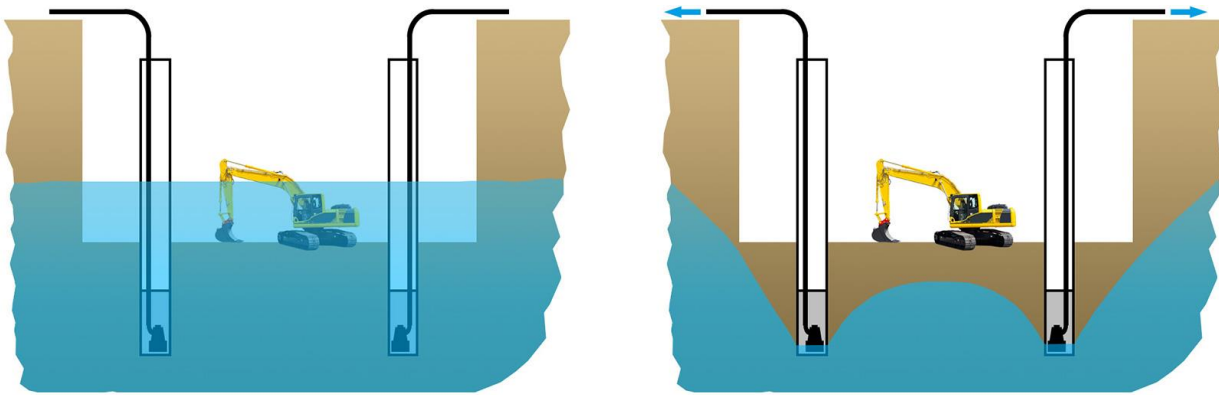


Principe de l'épuisement à l'aide de puisards  
et de tranchées drainantes

D'après [1]



# Tendance chantier



- Nécessité de rejeter les eaux (stockage limité sur des projets urbains, réinjection en nappe compliqué car cela implique de très faible débit, etc.).
- Le rejet des eaux peut se faire dans le réseau vers une station de traitement ou dans le milieu naturel (cours d'eau, mer).
- En cas de rejet (réseau ou milieu naturel), obligation de respecter les seuils (arrêté préfectoral ou convention) : traitement des eaux pour être conforme, suivi des eaux en interne (Entreprise des travaux ou Maitrise d'œuvre) et en externe (par le concessionnaire ou par la police de l'eau).



REMEA



MENARD

# Tendance chantier



Séparateur d'hydrocarbures

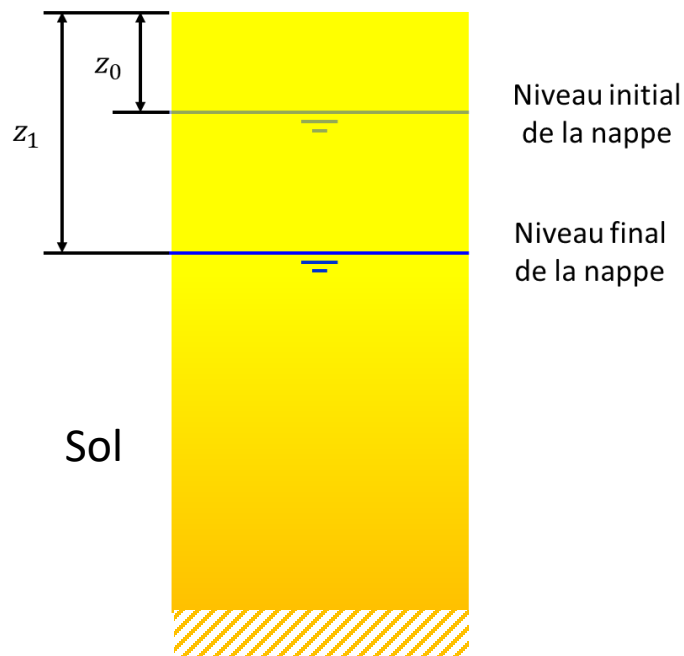


Décanteur lamellaire

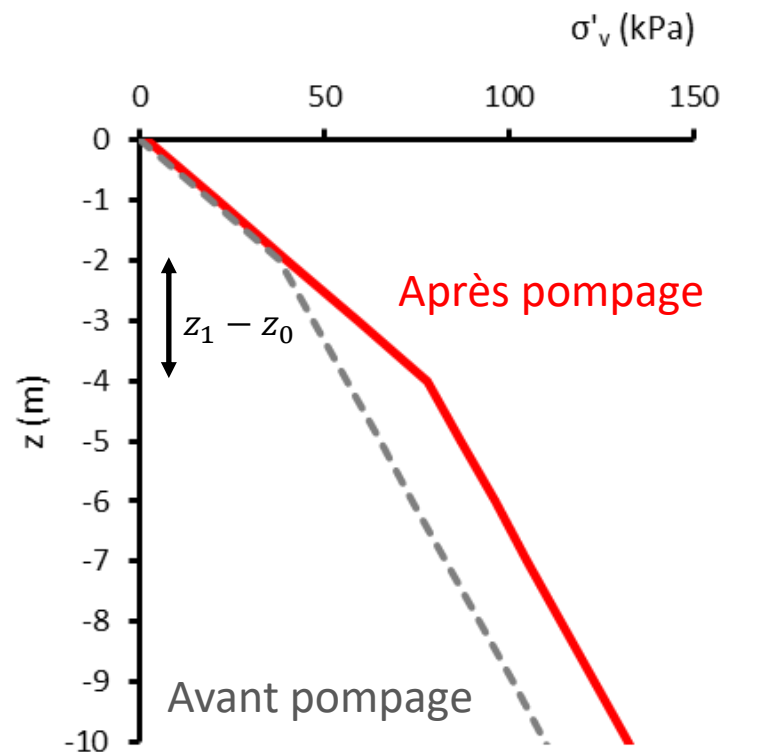


Décanteur

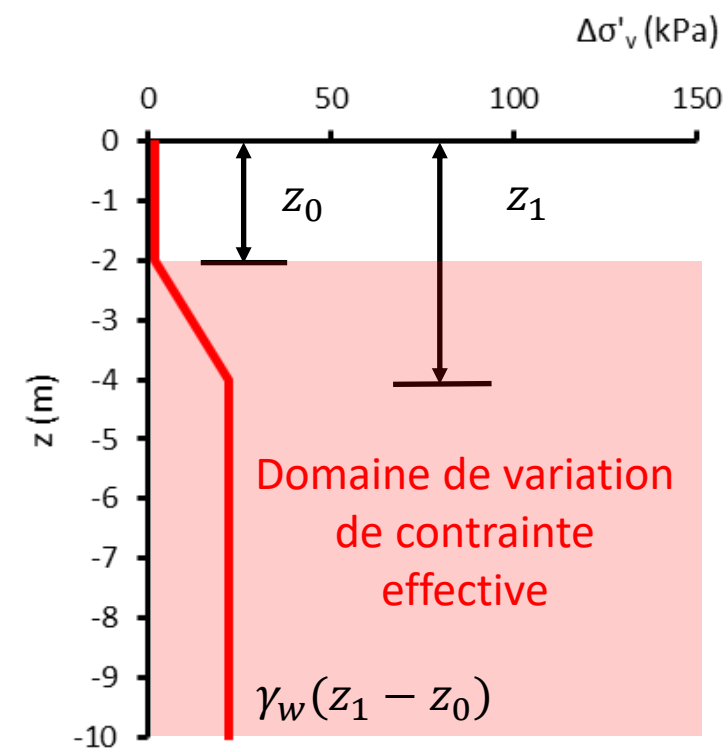
# Rappels théoriques



Substratum



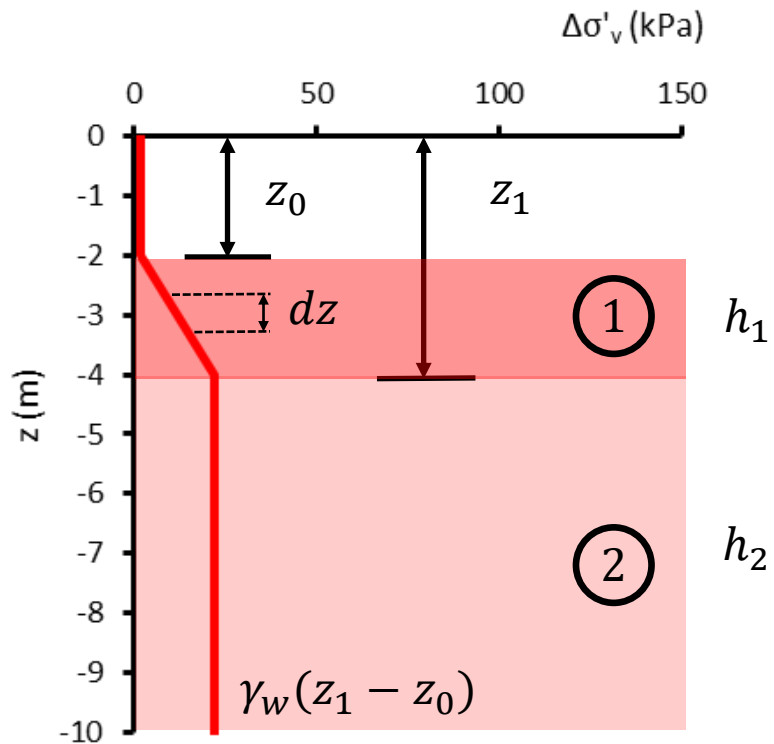
Contrainte verticale effective



Variation de contrainte verticale effective

[4]  $\gamma_w$  Poids volumique de l'eau ( $10 \text{ kN/m}^3$ )

# Rappels théoriques



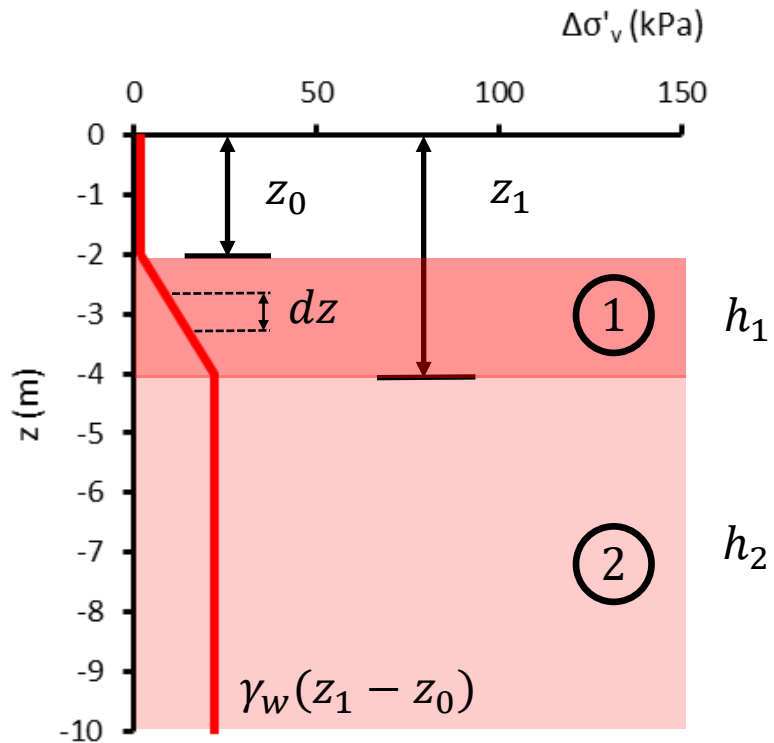
- $C_c$  Coefficient de compression
- $e_0$  Indice des vides initial
- $\sigma'_c$  Contrainte de préconsolidation

Sol compressible (cas normalement consolidé) : l'augmentation de contrainte effective verticale se traduit par deux zones de tassements :

- Le tassement  $w_1$  du sol entre  $z_0$  et  $z_1$  (1) : somme des tassements des couches élémentaires d'épaisseur  $dz$  situées à la profondeur  $z_i$  et sous contrainte  $\gamma_w(z_i - z_0) = \gamma_w dz_i$ .

$$\sum \frac{w_i}{h_i} = \sum \frac{C_c}{1 + e_0} \log \left( \frac{\sigma'_{v0i} + \gamma_w dz_i}{\sigma'_c} \right)$$

# Rappels théoriques



- $C_c$  Coefficient de compression  
 $e_0$  Indice des vides initial  
 $\sigma'_c$  Contrainte de préconsolidation

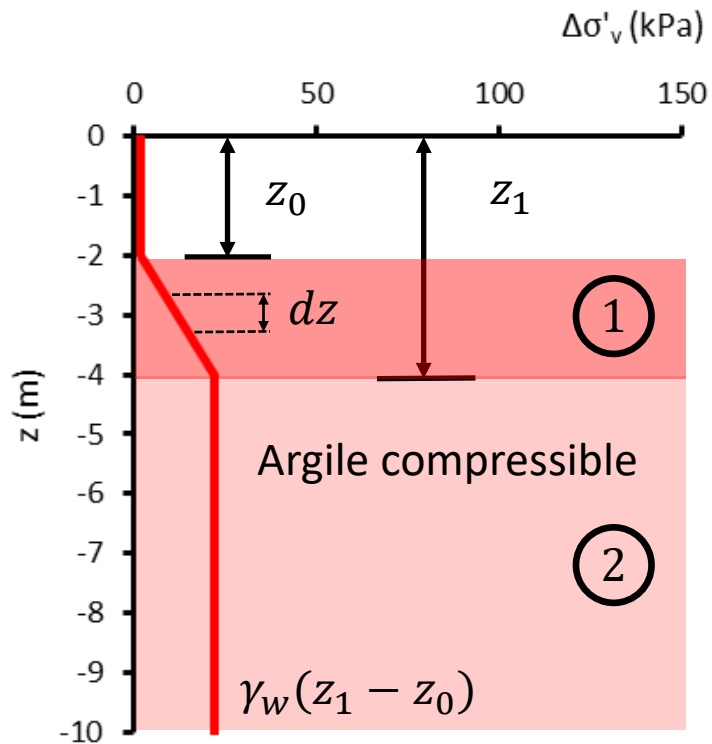
Sol compressible (cas normalement consolidé) :  
 l'augmentation de contrainte effective verticale se traduit par deux zones de tassements :

$$\frac{w_2}{h_2} = \frac{C_c}{1 + e_0} \log \left( \frac{\sigma'_{v0} + \gamma_w \Delta z}{\sigma'_c} \right)$$

- Le tassement  $w_2$  du sol situé au-dessous de  $z_1$  (2) : provoqué par une contrainte uniforme  $\gamma_w(z_1 - z_0)$ . Si le sol compressible est épais, **la sur-contrainte due à l'abaissement du niveau de nappe est transmise intégralement aux couches profondes.**



# Exemple



$$\gamma = 18 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3} \quad C_c = 0.3$$

$$e_0 = 1.5 \quad \sigma'_c = \sigma'_{v0}$$

$$h_1 = 2 \text{ m}$$

$$w_1 = 1.8 \text{ cm}$$

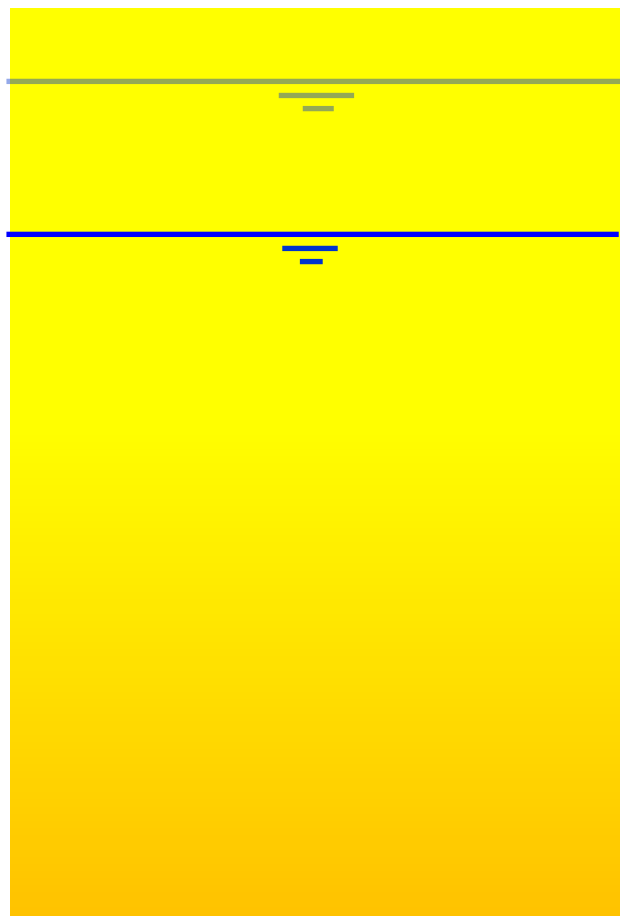
$$h_2 = 6 \text{ m}$$

$$w_2 = 6.9 \text{ cm}$$

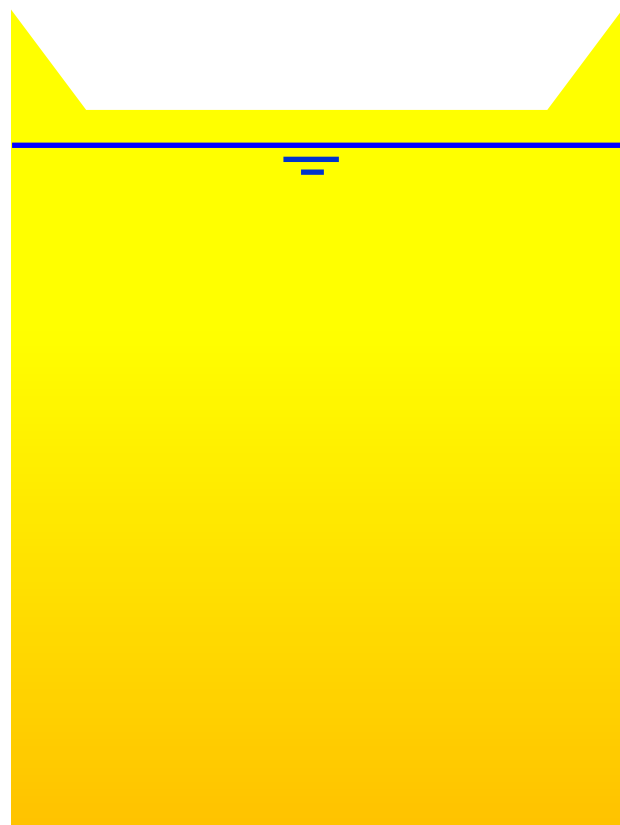
$$w_{total} = 8.7 \text{ cm}$$

En fin de consolidation, hors fluage.

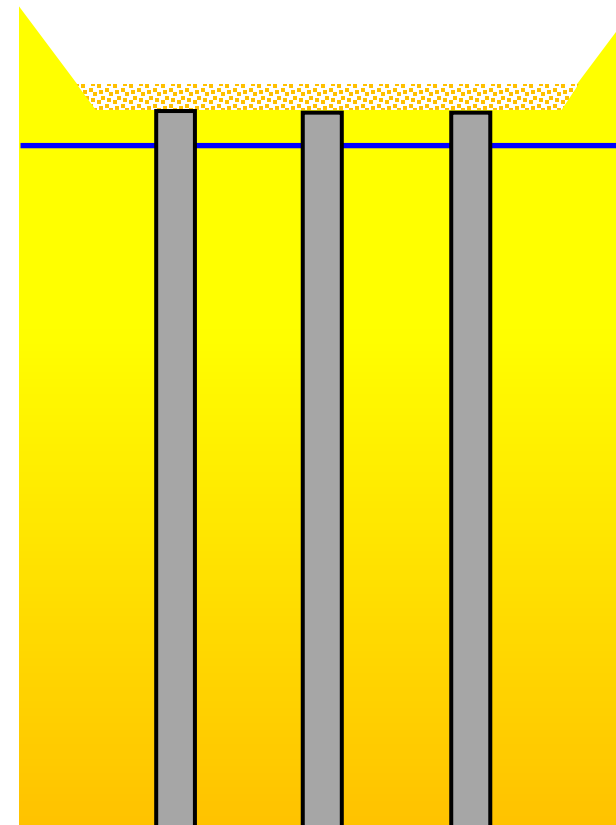
# L'importance du phasage



Rabattement

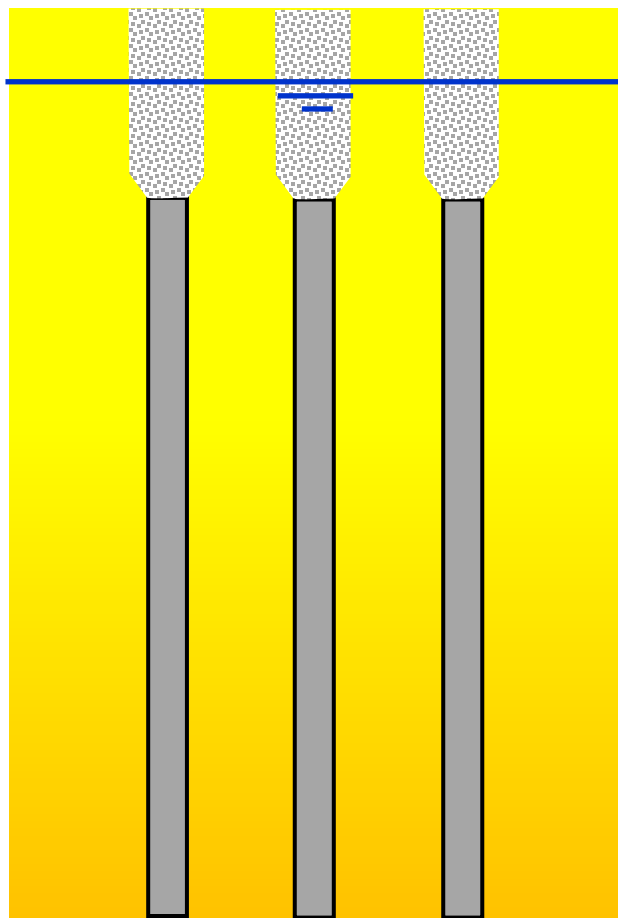


Terrassement + consolidation  
des sols si compressibles

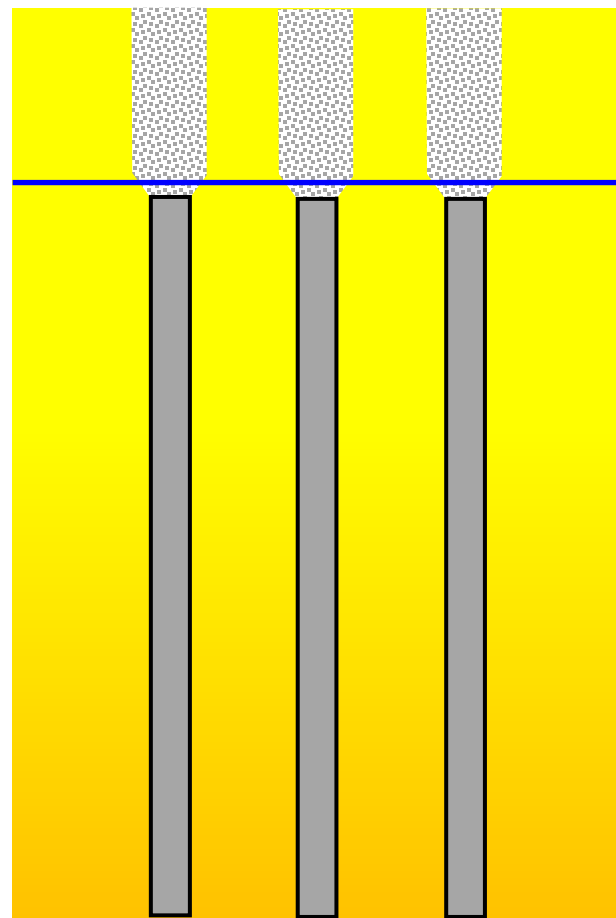


Fondations  
Risque d'entraînement des fines  
au pompage

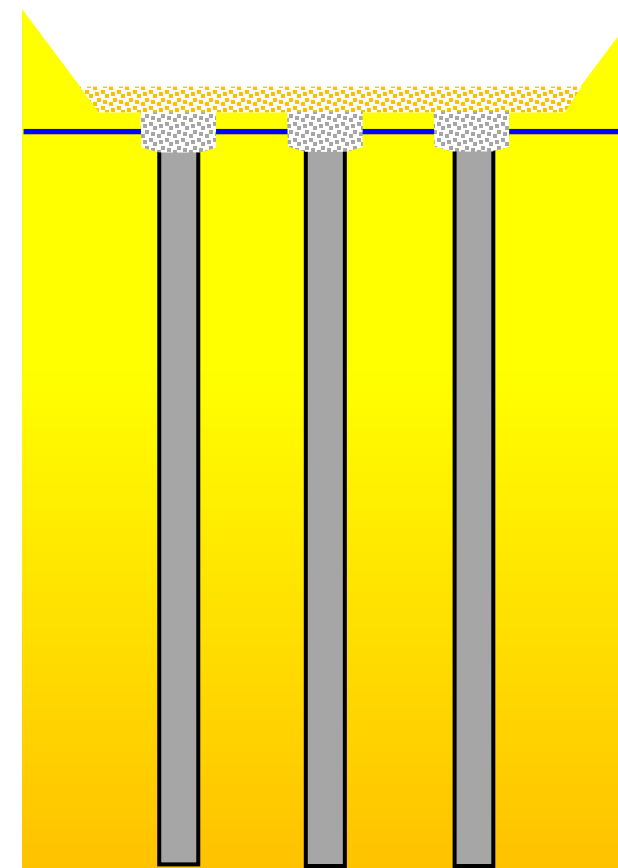
# L'importance du phasage



Réalisation de colonnes  
bi-module (CBM)

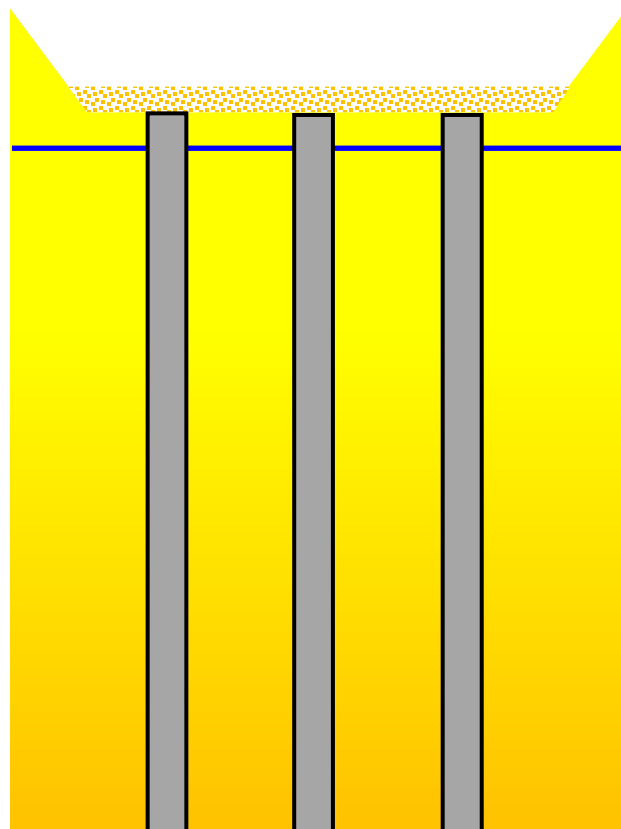


Rabattement

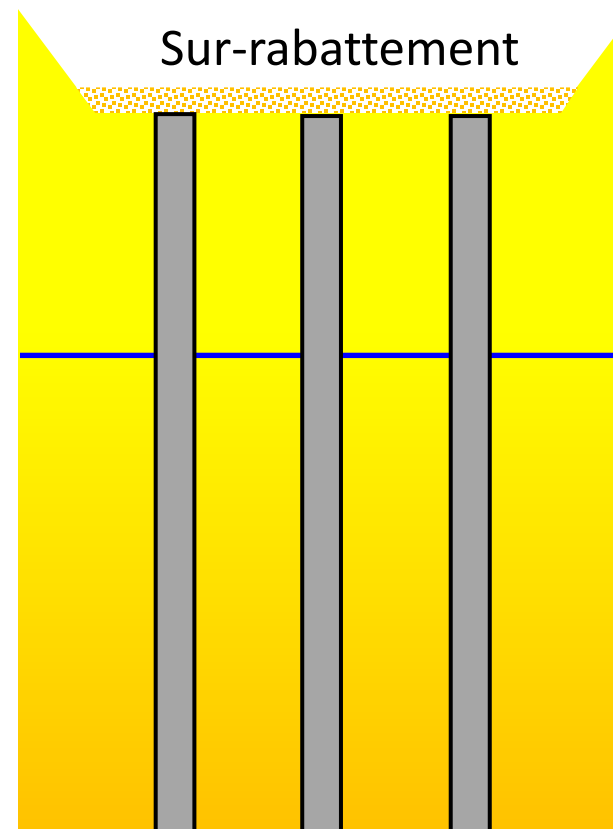


Terrassement

# L'importance du phasage et du contrôle du pompage

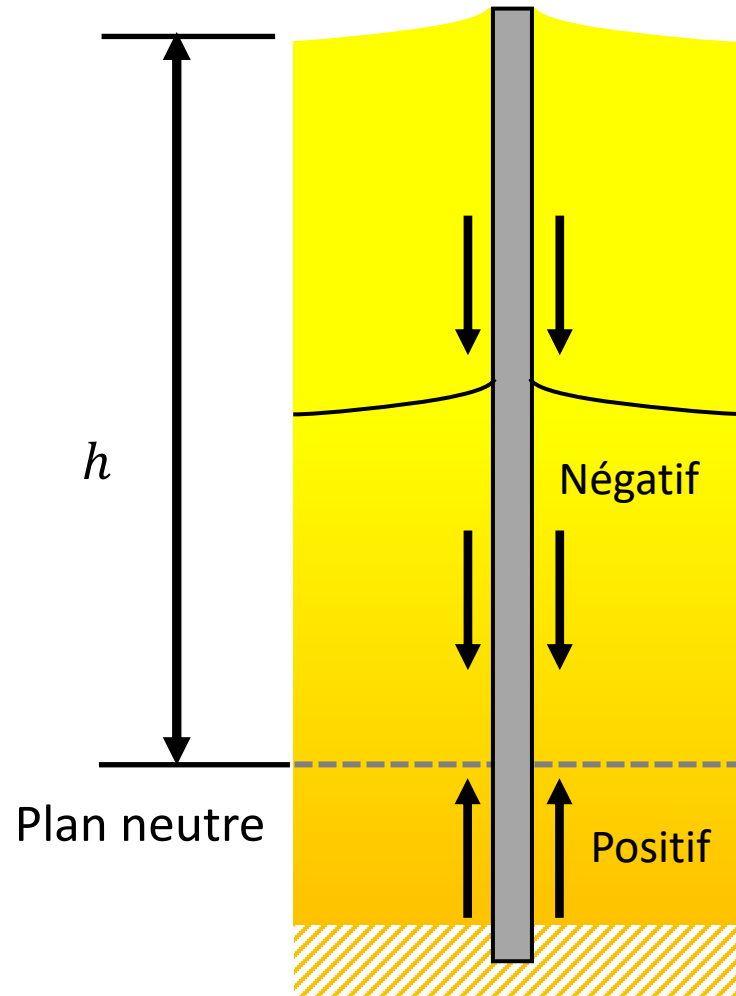
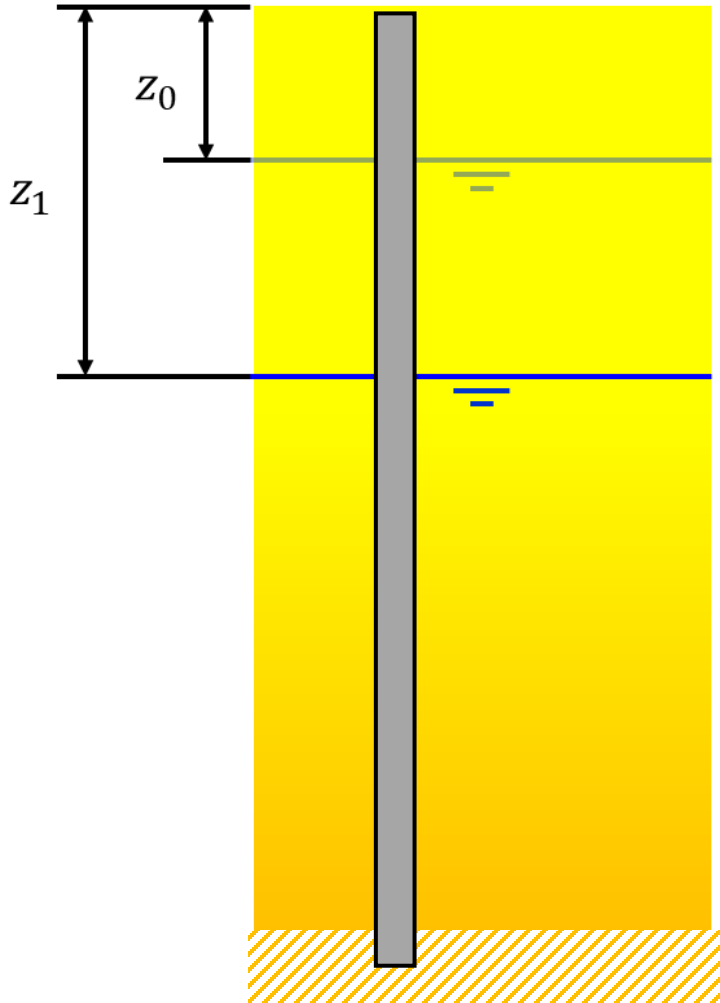


Niveau de rabattement attendu pour  
des sols compressibles



Niveau de rabattement réalisé !!!  
→ Consolidation importante et vérification de  
l'effort en pointe

# Élément isolé de fondation profonde



Le frottement négatif  $G_{sn}$  sur un élément isolé de fondation [2] :

$$G_{sn} = P \int_0^h K(z) \operatorname{tg} \delta(z) \sigma'_v(z) dz$$

- $P$  Périimètre de l'élément
- $K(z)$  Rapport entre la contrainte effective horizontale et  $\sigma'_v$  -  
Tableau H.2.2.1
- $\operatorname{tg} \delta(z)$  Coefficient de frottement

# Élément isolé de fondation profonde

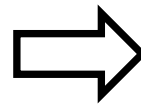
## Norme NF P 94-262

- La méthode employée pour évaluer les efforts dus au frottement négatif n'introduit pas explicitement de loi de mobilisation de ces efforts en fonction du déplacement relatif sol-élément de fondation.
- Il s'agit d'une méthode à la rupture basée sur l'hypothèse d'un déplacement relatif suffisant pour mobiliser le frottement négatif unitaire maximal sur toute la hauteur où il est supposé agir [5].

# Élément isolé de fondation profonde

- Approche alternative pour déterminer les effets du frottement négatif pour un pieu isolé, basée sur la mise en œuvre d'une modélisation de type t-z [6].
- Cette introduction directe du tassement du sol permet de considérer des déformations induites par différentes causes : surcharges (remblai, fondations, etc.), tassements résultant d'un rabattement de nappe, etc.
- Cette approche ne prend pas en compte l'effet d'accrochage puisque seul le tassement du sol en absence du pieu est considéré.

$$E_P S \frac{d^2 w_p}{dz^2} = f_{\text{pieu-sol}}(z, w_p) = 0$$



$$E_P S \frac{d^2 w_p}{dz^2} = f_{\text{pieu-sol}}(z, w_p - w_{\text{sol}}) = 0$$

# Conclusions

- Colonisation du sous-sol urbain avec effets d'interaction entre les ouvrages.
- L'importance de la caractérisation fine des sols compressibles pour le cas de rabattement de nappe.
- La pertinence des paramètres hydrauliques.
- La consolidation des sols lors du rabattement avant réalisation des fondations : prise en compte dans le dimensionnement ? Définition de raideurs  $K_v$  plus ajustées ?
- Maîtrise du phasage des opérations avec suivi.



# Merci pour votre attention



Notre équipe se tient à votre disposition

Stand G22

