



Journée Scientifique et Technique du CFMS

12 MAI 2022



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Restitution du groupe de travail
« Rabattement de nappe »

*Incidence des rabattements
sur la stabilité des fonds de fouille*

JST CFMS
12 MAI 2022

0. Cadre général

- **Stabilité hydraulique des fonds de fouille – Un enjeu parmi d'autres :**
 - Enjeu réglementaire : nature de la procédure applicable, délai d'instruction, obtention de l'autorisation ;*
 - Enjeu « quantitatif » : estimation des débits nécessaires à l'obtention du rabattement visé ;*
 - Enjeu technologique : choix de la technique en fonction des terrains, etc.*
 - Enjeu mécanique (au sens de la mécanique des sols) : quelle incidence sur la stabilité des fouilles ?*

- **Les écoulements liés aux rabattement provisoires induisent :**
 - Des modifications des champs de pression (gradients hydrauliques, etc.)*
 - Des forces d'écoulement*
 - Des entrainement de matériaux (érosion interne, érosion régressive, renard liquide) ;*
 - Des instabilité mécaniques globales : Renard solide, UPL ;*

0. Cadre général

➤ Contenu de la présentation :

1. *Contenu du guide : notions élémentaires (glossaire et §8.1)*
2. *Contenu du guide : mécanismes d'instabilité des fouilles liés aux rabattements provisoires (§8.1)*
3. *Quelques exemples :*
 - *EOLE (secteur de la Défense) : UPL et incidences sur les avoisinants*
 - *L15S du GPE, Puits d'essais à Boulogne : risque d'UPL et boulanges*
 - *Fouille tirantée à Lille : effets des écoulements ascendants*
 - *Écoulement dans les pentes*
 - *Canal de Carentan*

1. Notions élémentaires

➤ Présentation des concepts de base liés à l'écoulement de l'eau dans les sols (glossaire du guide)

Charge hydraulique et pression interstitielle :

$$h_M = u_M / \gamma_w + Z_M (+ v^2 / (2 \cdot g))$$

gradient hydraulique :

$$i = \Delta h / L$$

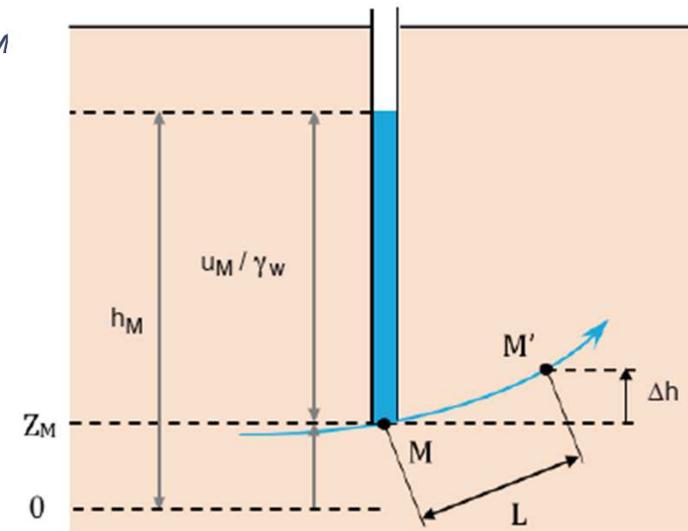
Force d'écoulement :

$$F_w = i \cdot \gamma_w$$

Équipotentielles / lignes de courant

Rabattement

Zone d'Influence Hydrogéologique (ZIH)



1. Notions élémentaires

Notions de mécanique des sols (rappelées au §8.1 du guide) :

➤ **Contraintes effectives :**

Postulat de Terzaghi :

$$s' = s - u$$
$$t' = t$$

➤ **Effet des gradients :**

Application au cas d'un écoulement vertical :

$$\sigma'_v = (\gamma' - i \cdot \gamma_w) \cdot z$$

Cas descendant ($i < 0$) :

si $|i| \nearrow$, $u \searrow$ et $\sigma'_v \nearrow \Rightarrow$ poids apparent des terrains $\nearrow \Rightarrow$ tassements

Cas ascendant ($i > 0$):

si $|i| \nearrow$, $u \nearrow$ et $\sigma'_v \searrow \Rightarrow$ poids apparent des terrains $\searrow \Rightarrow$ perte de résistance au cisaillement

Entrainement de matériaux : déstructuration des terrains

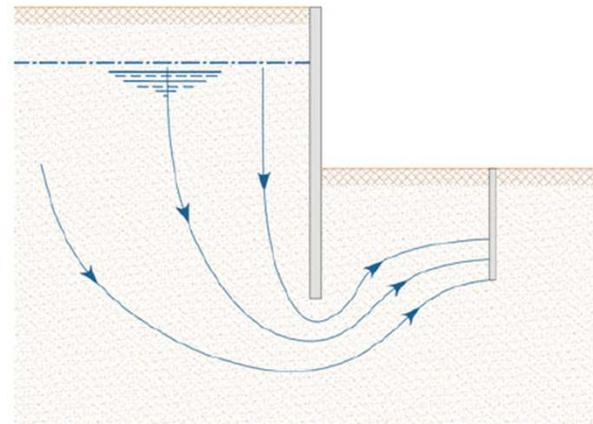
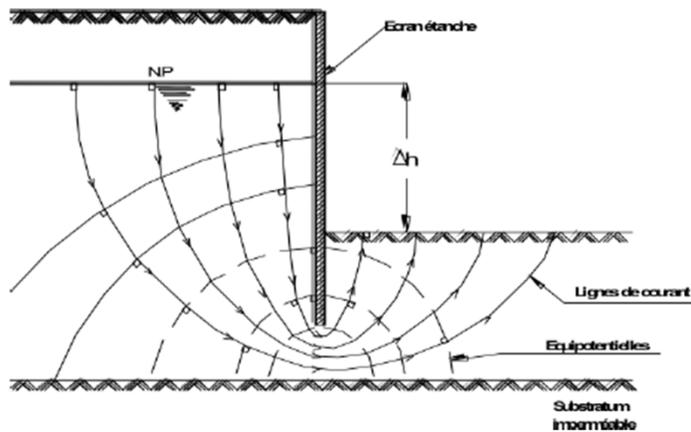
Concentration des écoulement dans les angles des fouilles \Rightarrow gradients les plus forts

2. Mécanismes

Présentation des mécanismes d'instabilité à envisager, et des disposition de bonne conception permettant de les maîtriser (§ 8.1 du guide) :

➤ **Ruptures liées directement aux forces d'écoulement**

Boulanges / Défaut de butée => prendre les dispositions pour rabattre les lignes de courant, plutôt que dimensionner les ouvrages en fonction d'une estimation des gradients ascendants

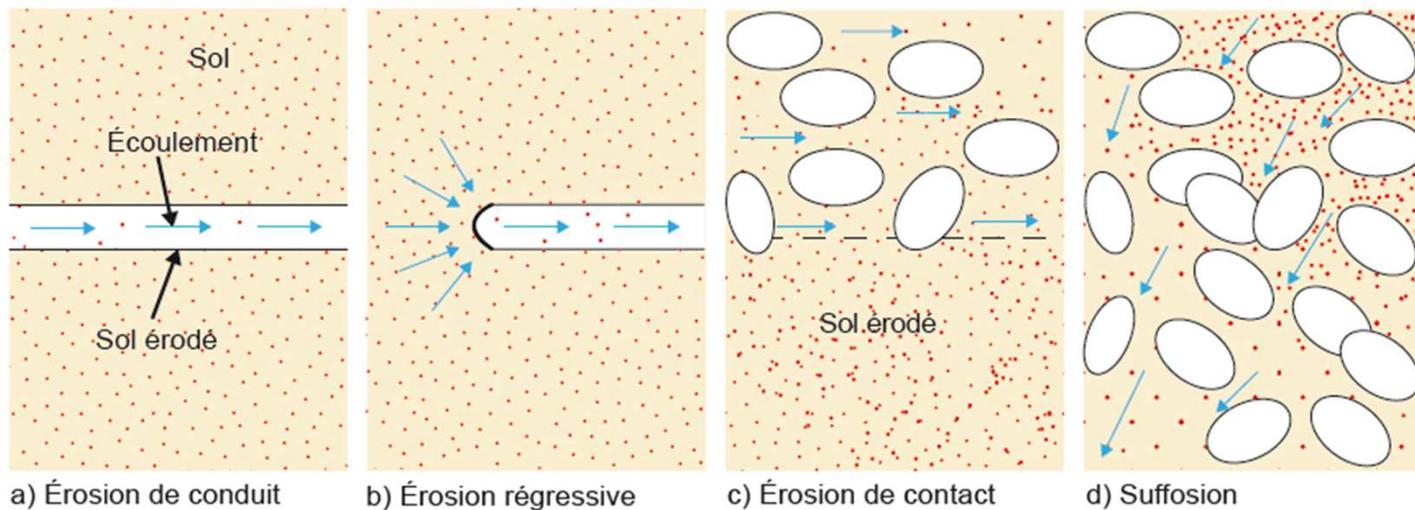


2. Mécanismes

Érosion interne

Arrachement puis transport de particules de sol provoqués par les écoulements.

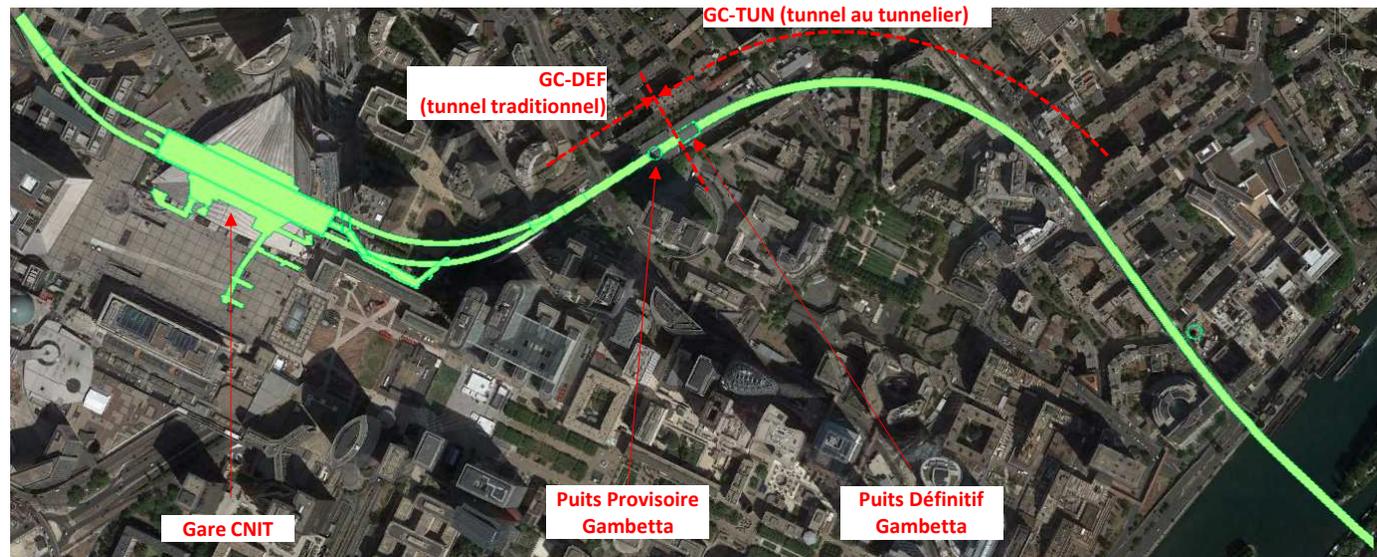
Mécanismes exponentiels pouvant déboucher sur des instabilités d'ensemble (défaut de butée...)



3. Exemples \ EOLE (secteur Défense)

- **Intervenants :** MOa : SCNF Réseau
MOE : setec (géotechnique : terrasol / rabattement : Antea)
Entreprises : Cotrasol (système de rabattement), groupe VINCI

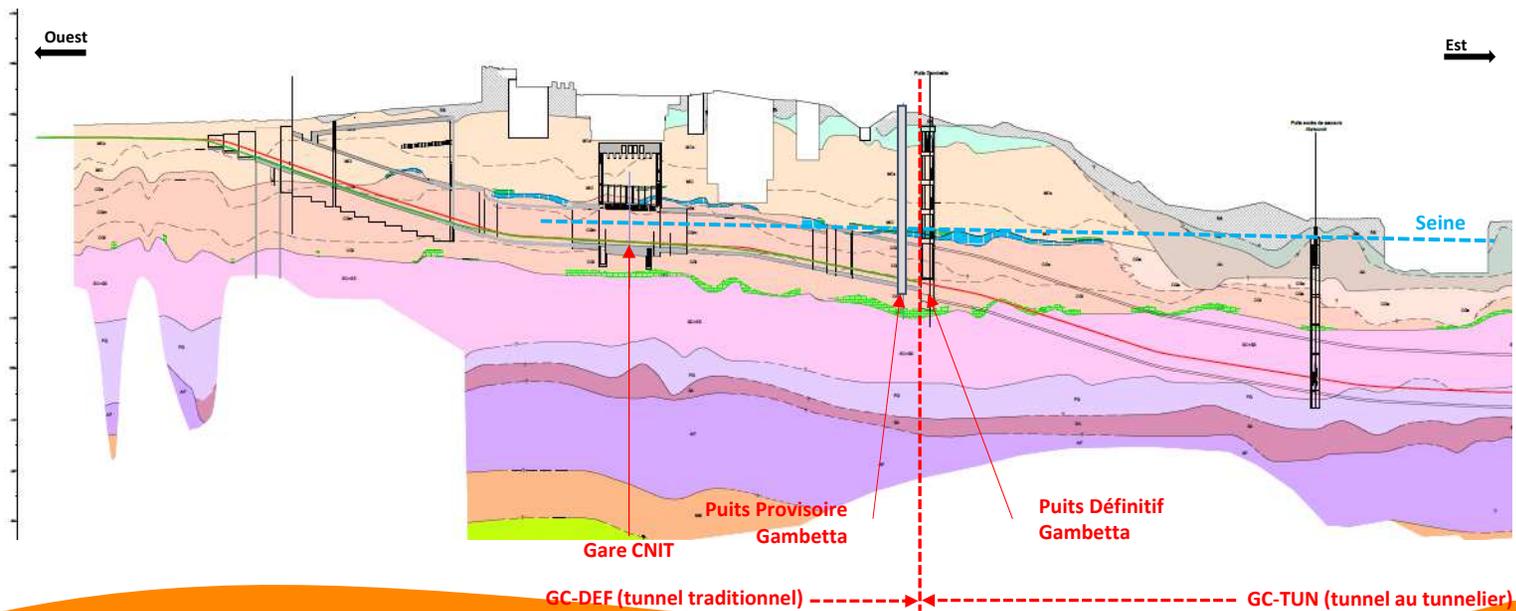
➤ **Objet :**



3. Exemples \ EOLE (secteur Défense)

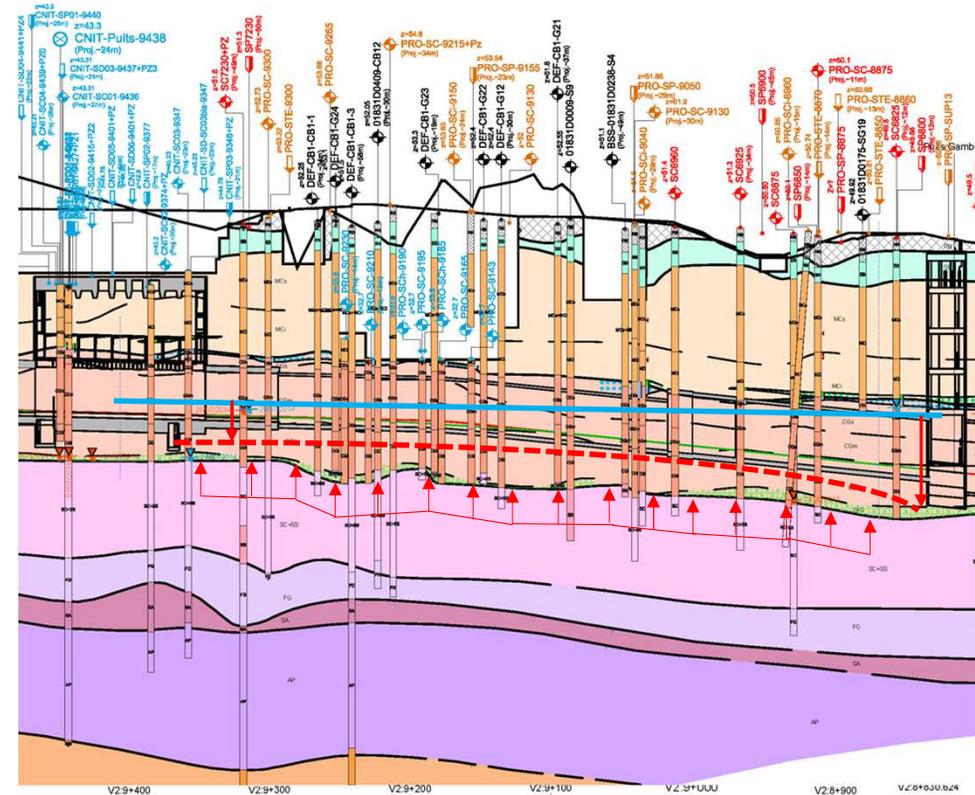
- **Intervenants :** MOa : SCNF Réseau
MOE : setec (géotechnique : terrasol / rabattement : Antea)
Entreprises : Cotrasol (système de rabattement), groupe VINCI

➤ **Objet :**



3. Exemples \ EOLE (secteur Défense)

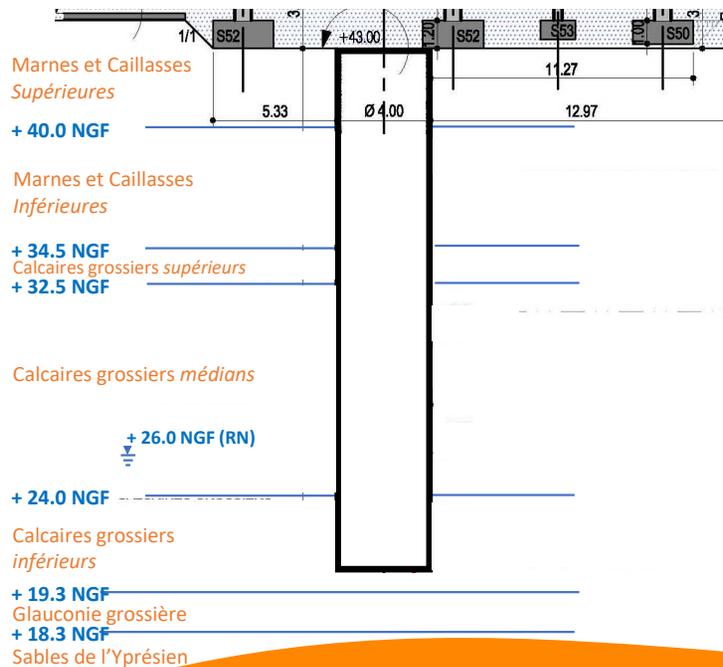
- **Ouvrages dans la nappe :**
Gare CNIT, tunnel traditionnel, puits Gambetta
- **Nappe baignant 2 aquifères :**
Equilibre hydrostatique des nappes
Séparation par une éponte semi-imperméable
- **Objectifs du rabattement :**
Mise hors d'eau des terrassements
Risque d'UPL : Contrôle des sous-pressions à la base du calcaire
⇒ *Rabattre la charge de ~ 10 m dans les sables*
- **Incidence sur les avoisinants à évaluer**
Zone fortement bâtie : nombreux IGH et bâtiments emblématiques



3. Exemples \ EOLE (secteur Défense)

Essais en grand en phase conception pour apprécier perméabilités et rayons d'action :

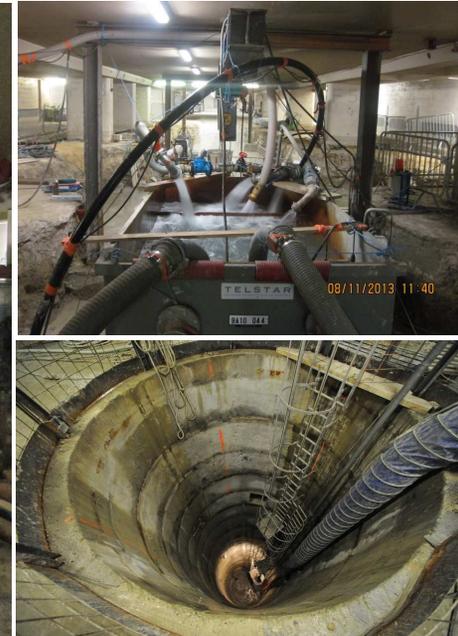
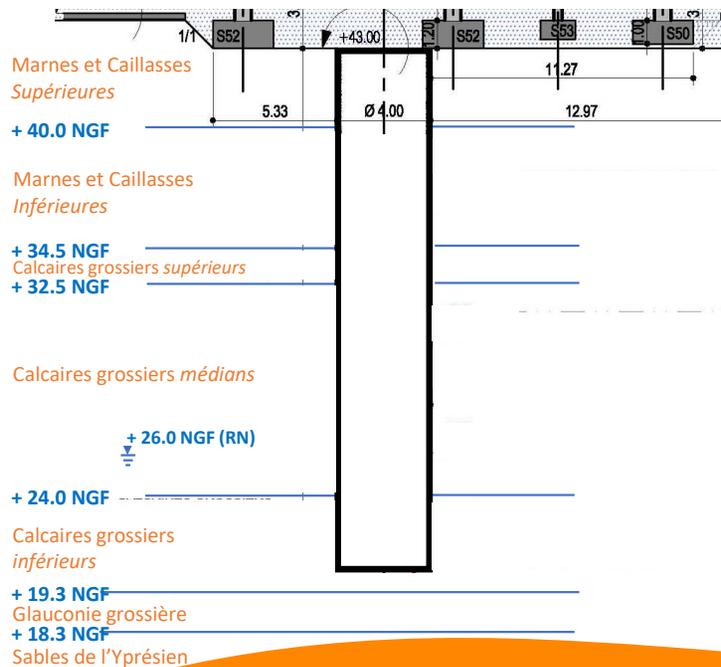
➤ Rabattement pour un puits d'essai sous le CNIT



3. Exemples \ EOLE (secteur Défense)

Essais en grand en phase conception pour apprécier perméabilités et rayons d'action

➤ Rabattement pour un puits d'essai sous le CNIT



3. Exemples \ EOLE (secteur Défense)

Essais en grand en phase conception pour apprécier perméabilités et rayons d'action :

➤ Rabattement pour un puits d'essai sous le CNIT

Objectif : rabattement à +18.3 NGF pour observation des sables

4 puits de rabattement descendus dans les sables, crépinés à la fois sur les calcaires et les sables

Débit cumulé constaté plafonné à 185 m³/h (pour un besoin estimé de 220 m³/h)

Rabattement maximal atteint : + 20,2 NGF

⇒ terrassement arrêté à +21 NGF (cote stable vis-à-vis de l'UPL), dans les Calcaires Grossiers inférieurs

Rayon d'action du pompage : plusieurs centaines de mètres

➤ Essais de pompage sélectifs, de longue durée

Dans les calcaires grossiers => $k_h \sim 2.E^{-4}$ m/s

Dans les sables de l'Yprésien => $k_h \sim 6.E^{-4}$ m/s

3. Exemples \ EOLE (secteur Défense)

Solution retenue pour l'exécution :

► Principe :

Pompage dans les sables productifs (Sables supérieurs et sables de Cuise)

⇒ *déchargement des sous-pressions ;*

⇒ *Rabattement induit dans la nappe du Lutétien, par égouttement vers la nappe des sables*

► Dispositif :

8 puits de pompage dans le secteur du puits travaux Gambetta

4 puits complémentaires dans le secteur de la gare CNIT pour compléments ponctuels;

Débit estimé de l'ordre de 500 m³/h dans la zone Gambetta pour un rabattement maximal à +13.5 NGF

Suivi des niveaux par des piézomètres sélectifs disposés le long du tracé

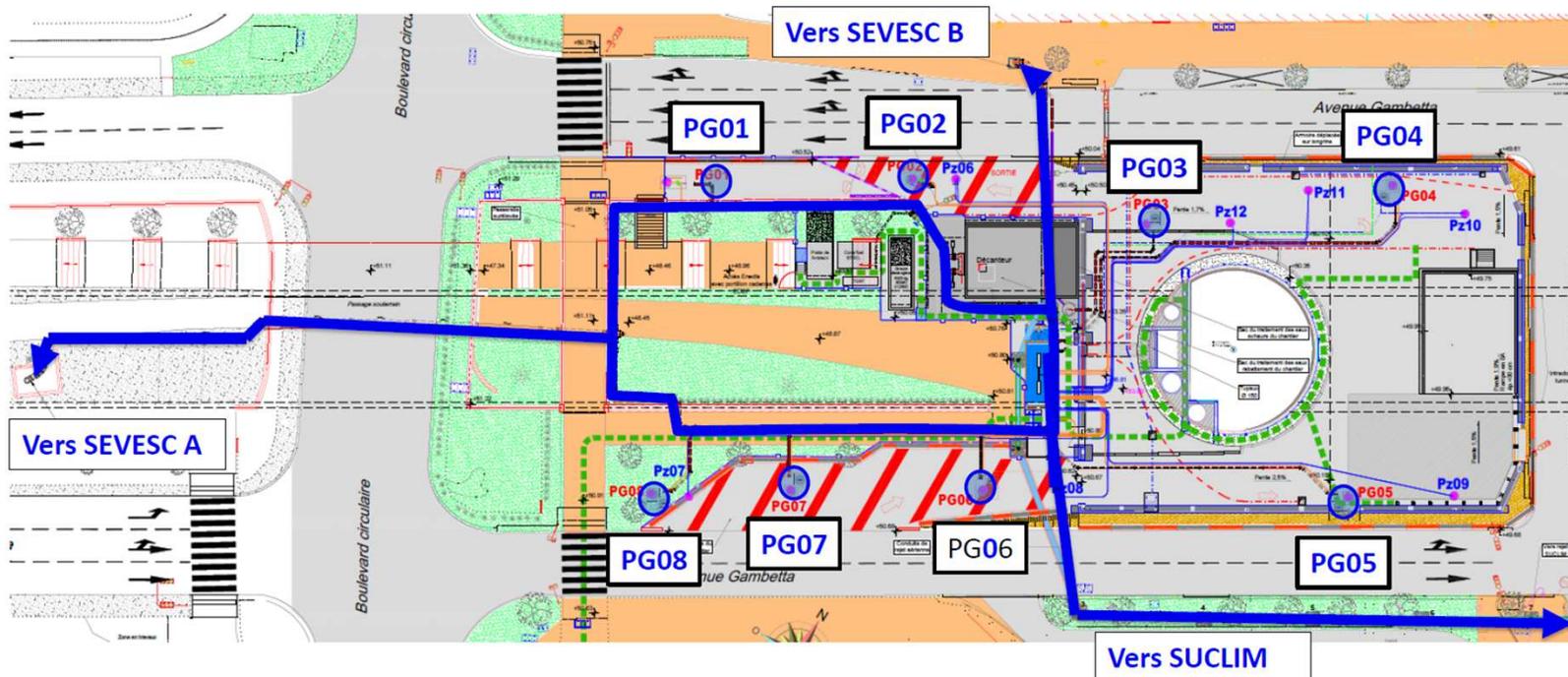
Suivi des tassements par topographie (suivi local) et par interférométrie radar satellitaire (régional)

⇒ *Rayon du cône de rabattement d'ordre kilométrique et effet masque de la dalle du Lutétien laissaient attendre des tassement absolus limités, et des tassement différentiels négligeables.*

Guide « Rabattements provisoires de nappe » \ Stabilité hydraulique des fonds de fouille

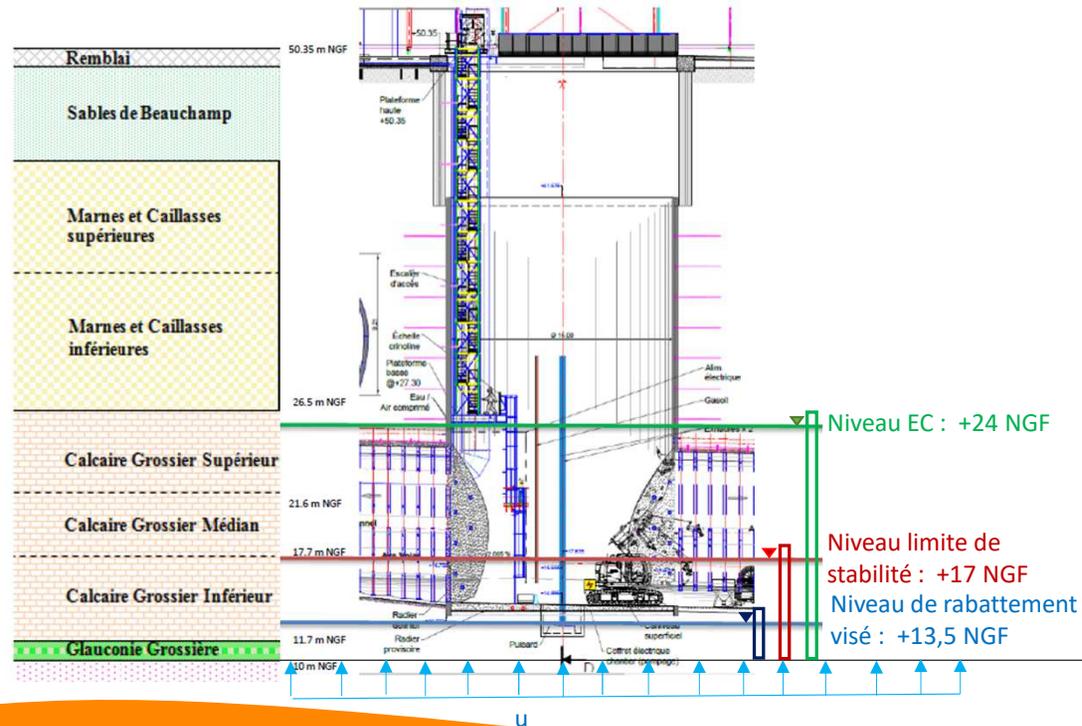
3. Exemples \ EOLE (secteur Défense)

Dispositif de rabattement



3. Exemples \ EOLE (secteur Défense)

➤ Stabilité UPL du fond de fouille du puits Gambetta



3. Exemples \ EOLE (secteur Défense)

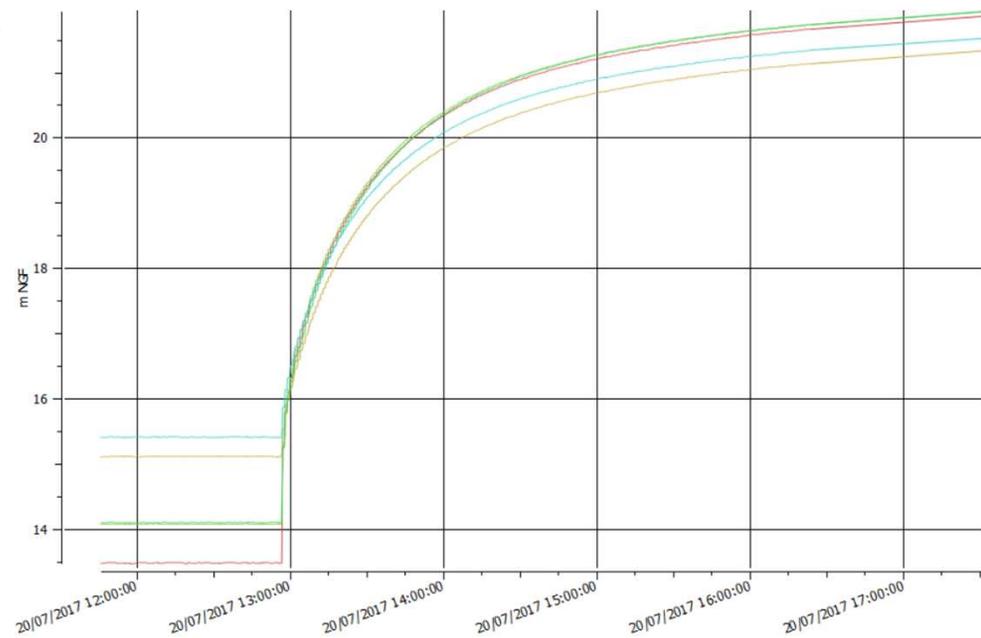
➤ **Estimation du niveau de sécurité en cas de panne du dispositif de rabattement**

Essai de remontée par arrêt de pompage

➤ **10 min pour atteindre le niveau critique**

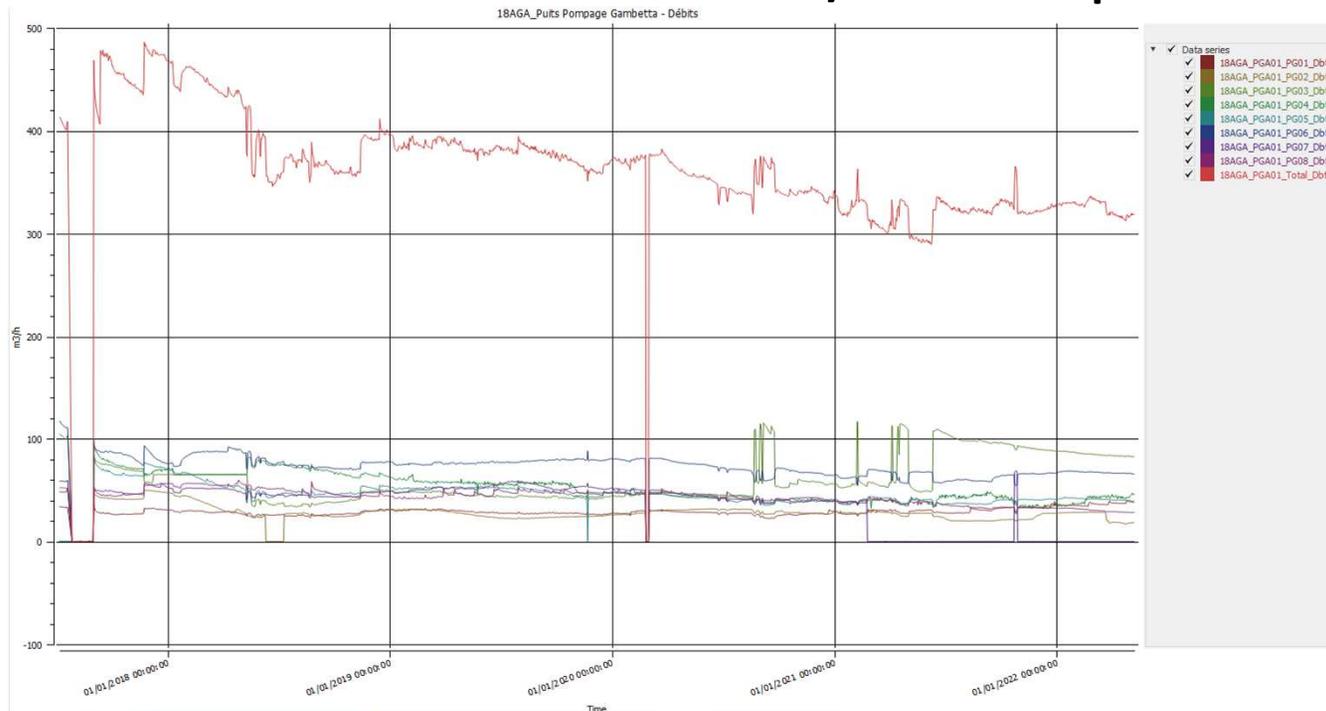
➤ **Mise en œuvre d'un dispositif de sécurité**

Colonne d'équilibre permettant d'éviter la mise en pression sous le radier



3. Exemples \ EOLE (secteur Défense)

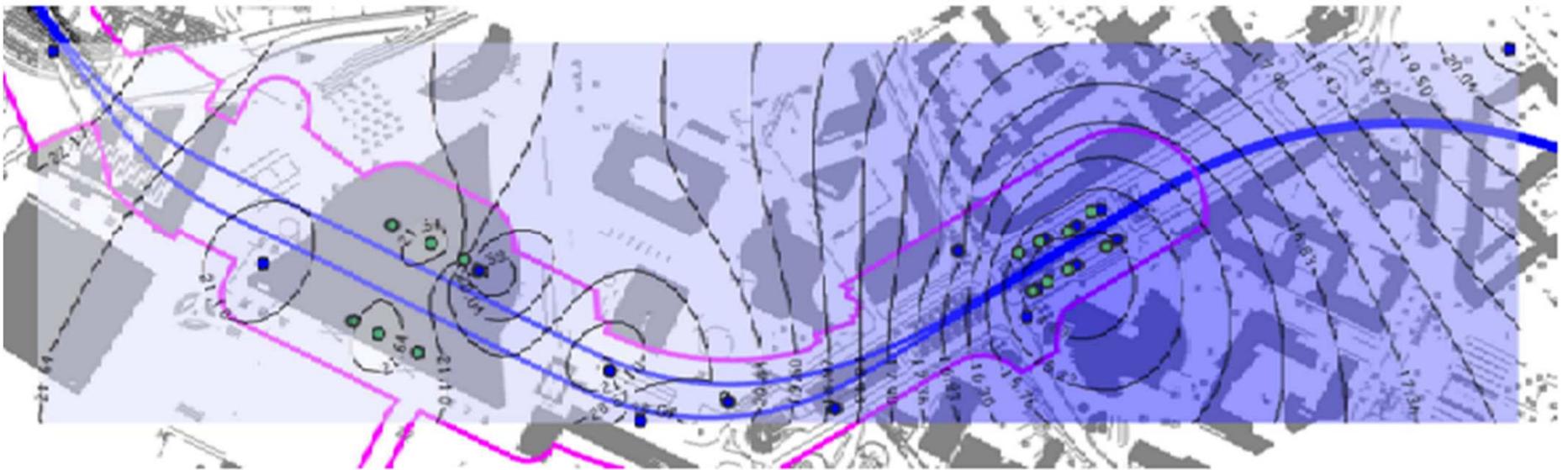
➔ Débits cumulés mis en œuvre: de 320 à 480 m³/h selon les phases de travaux



3. Exemples \ EOLE (secteur Défense)

Suivi :

➤ Isopièzes (mi-mai 2020)



3. Exemples \ EOLE (secteur Défense)

Suivi :

 **Déformations :**

Pas de tassement lié au rabattement mis en évidence par le suivi topographique

Pas de mouvement significatif mis en évidence par le suivi interférométrique radar satellitaire

3. Exemples \ Puits Boulogne (GPE L15s)



Intervenants :

MOA : SGP

MOE : INGEROP (géotechnique : GEOS)

ENT : Solétanche (Parois), SBT, Sade



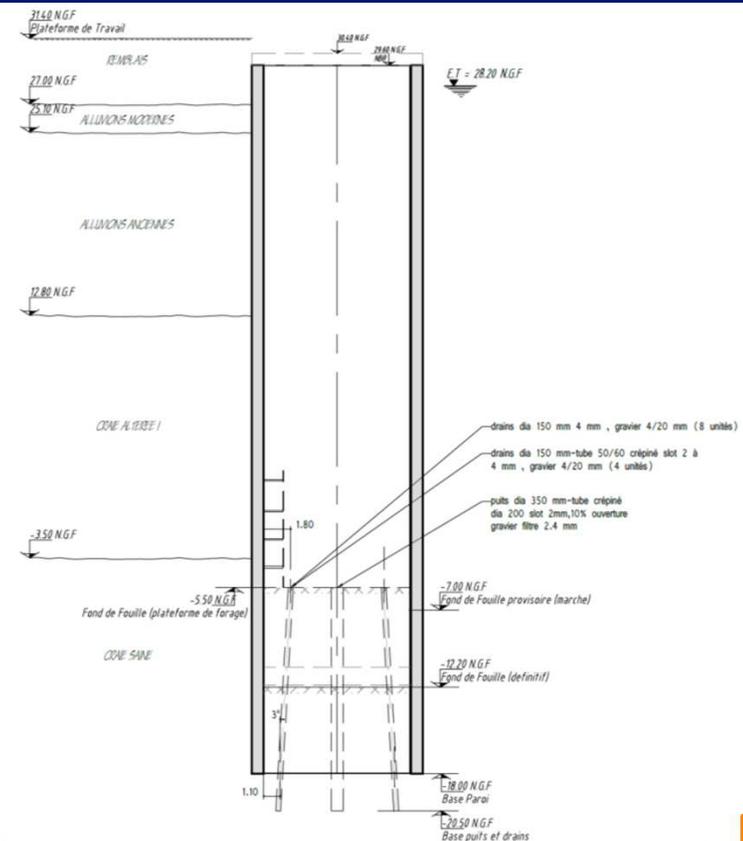
Risques d'UPL et Boulance dans la Craie :

Fiche courte / Hauteur d'eau importante (~40 m)

Fond de fouille provisoire à -7 NGF (stable)

Fond de fouille définitif à -12,2 NGF

1 puits de pompage central pour décharger la nappe

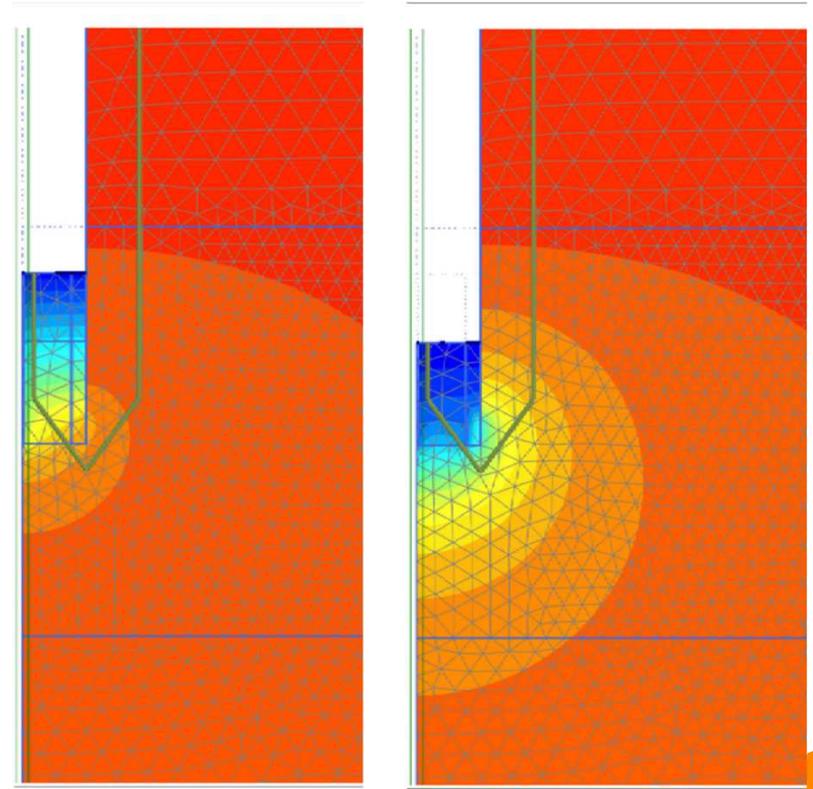


3. Exemples \ Puits Boulogne (GPE L15s)



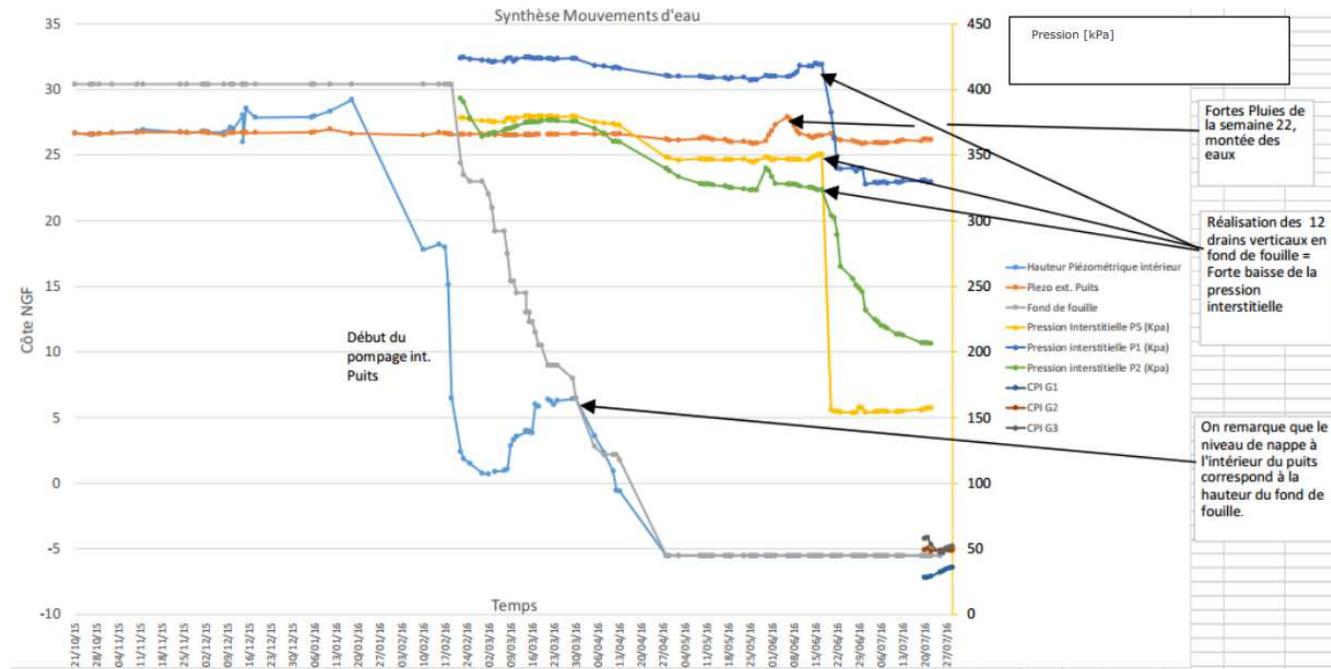
Modélisations :

- Le rayon d'action du puits central est très faible*
- ⇒ gradient ascendant persistant dans le bouchon*
- ⇒ bouchon instable pour le terrassement à -12,2 NGF*
- ⇒ Nécessité de réaliser des drains de décharge pour repousser les équipotentiels et casser les écoulements ascendants*



3. Exemples \ Puits Boulogne (GPE L15s)

➤ Suivi en phase travaux :



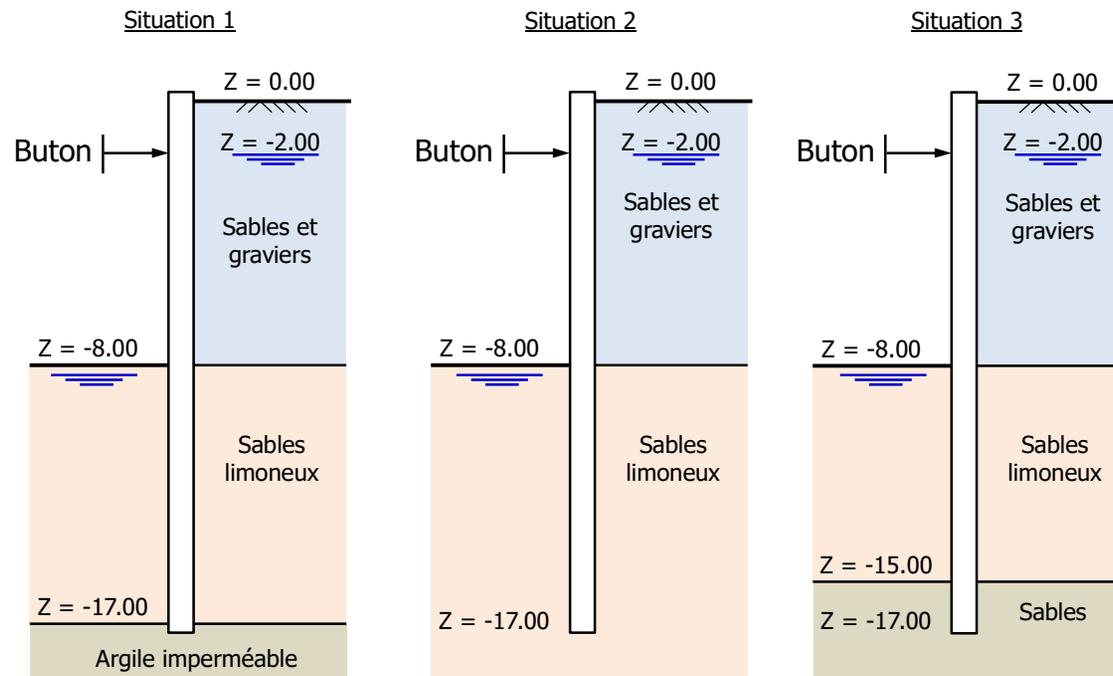
3. Exemples \ Fouille à Lille

➤ Influence des écoulements sur une fouille tirantée



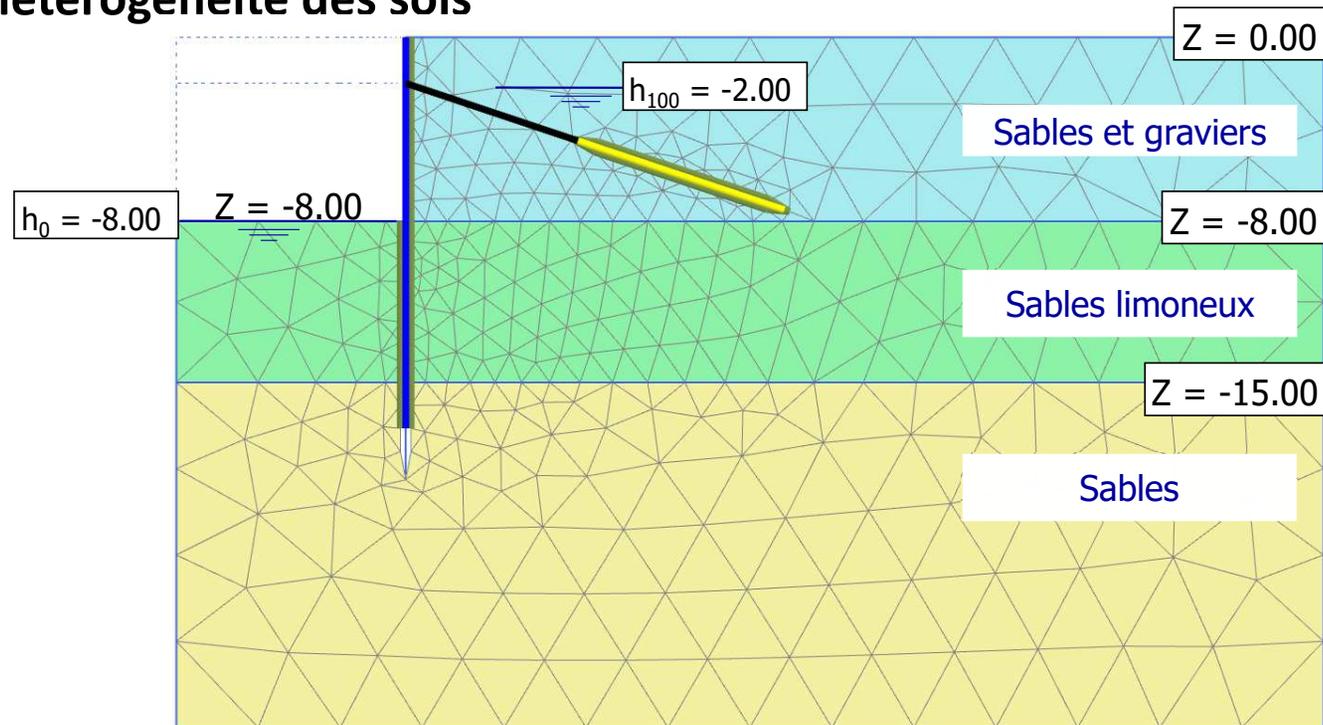
3. Exemples \ Fouille à Lille

Attention à l'hétérogénéité des sols



3. Exemples \ Fouille à Lille

➤ **Attention à l'hétérogénéité des sols**

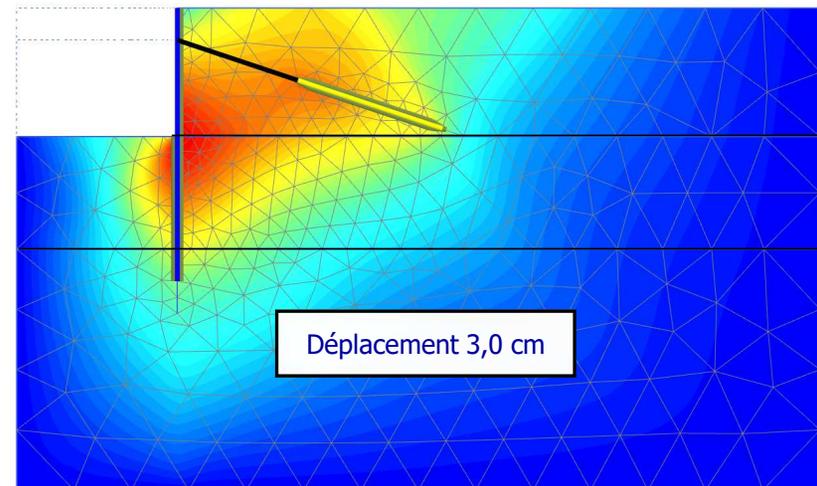
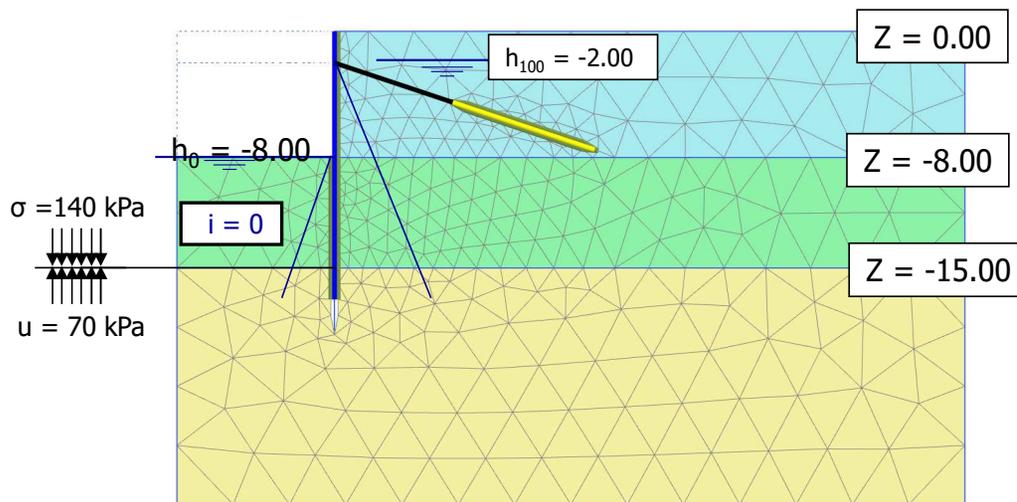


3. Exemples \ Fouille à Lille



Sans écoulement

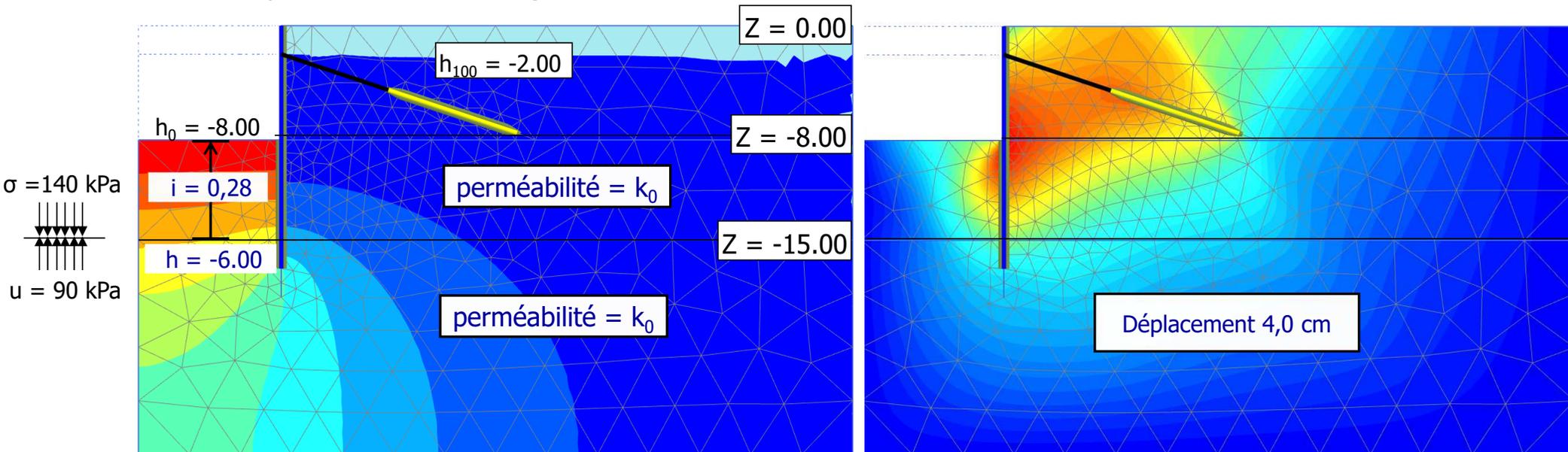
régime hydrostatique de part et d'autre de l'écran



3. Exemples \ Fouille à Lille

Prise en compte de l'écoulement

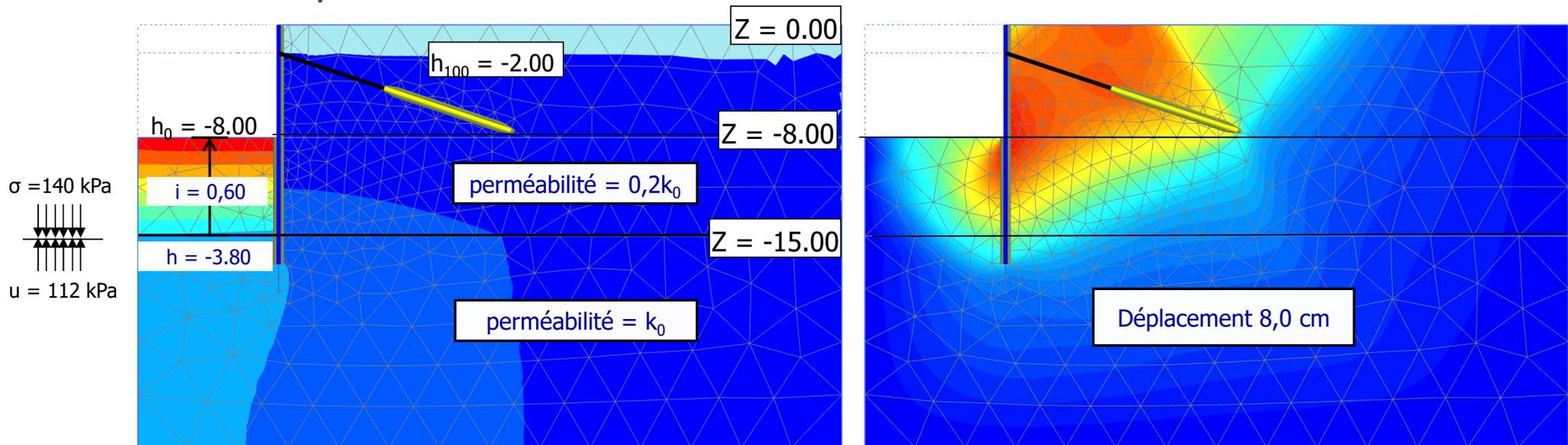
Milieu de perméabilité homogène



3. Exemples \ Fouille à Lille

Prise en compte de l'écoulement

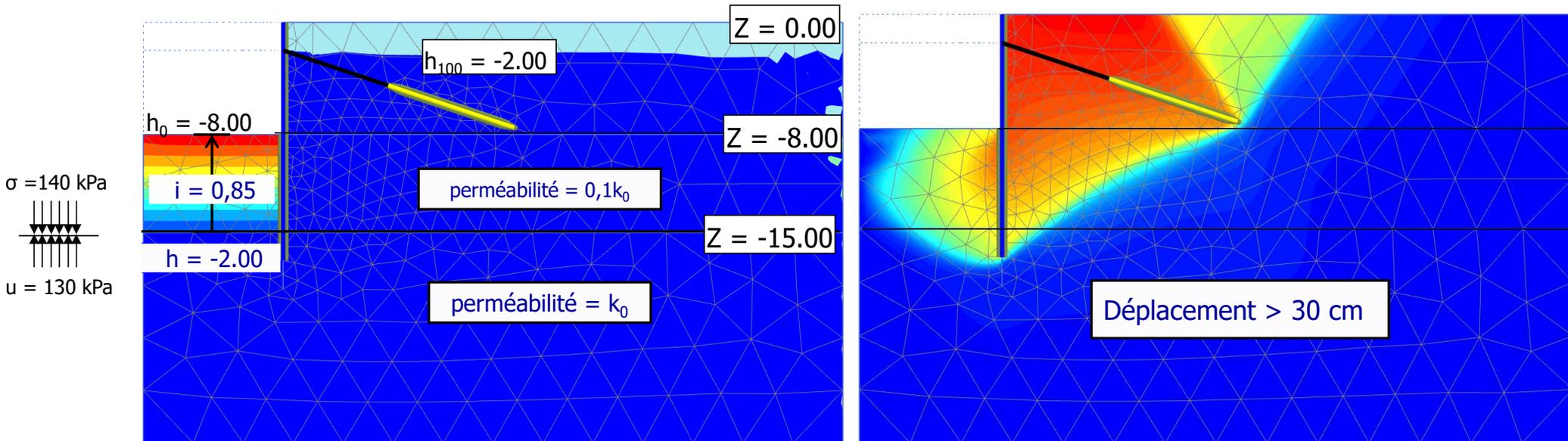
Contraste de perméabilité de 5



3. Exemples \ Fouille à Lille

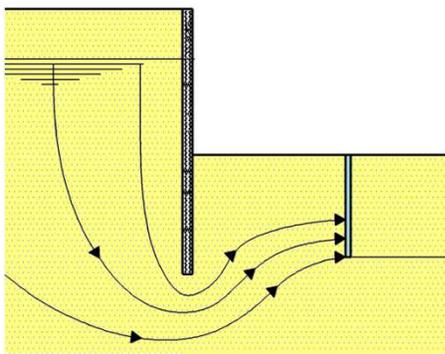
Prise en compte de l'écoulement

Contraste de perméabilité de 10

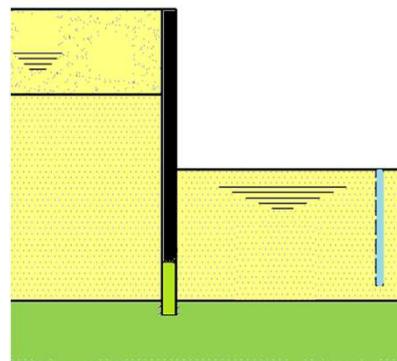


3. Exemples \ Fouille à Lille

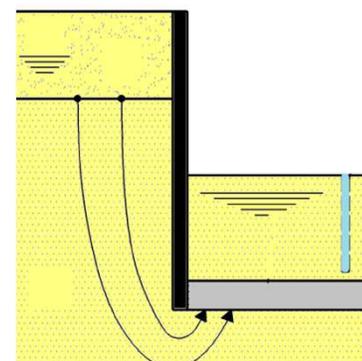
- L'épuisement en fond de fouille amorce des écoulements ascendants
- Les gradients côté fouille conduisent à une diminution de la contrainte effective pouvant aller jusqu'à la boullance
- Cela entraîne une diminution (voire une perte total) de butée, et l'instabilité de l'écran
- Il est fortement recommandé de d'éviter ces gradients ascendants :



Puits de décharge



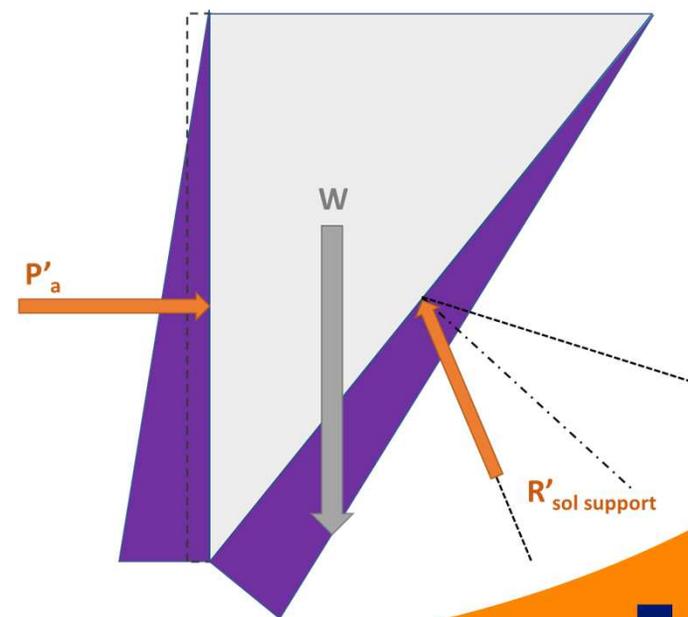
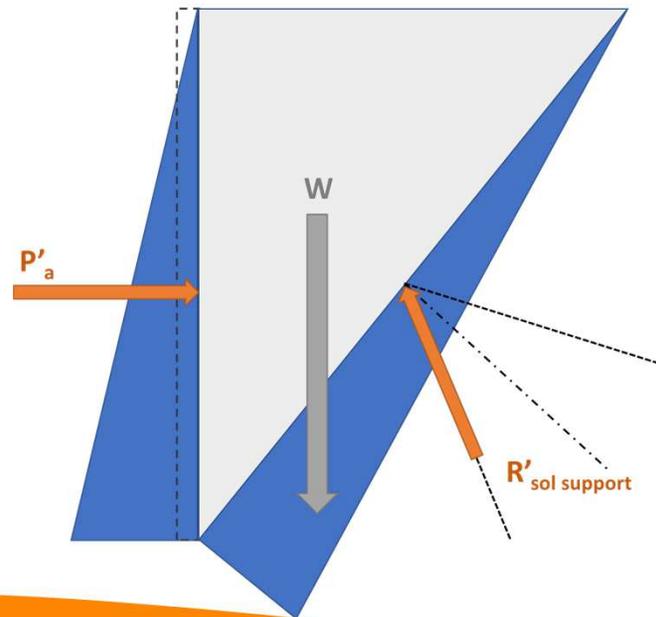
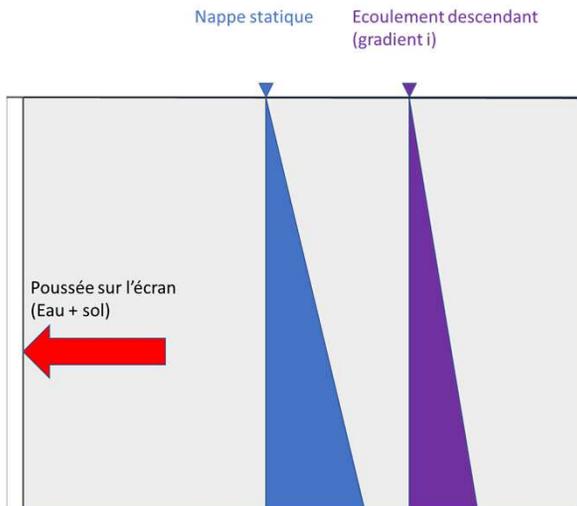
Jupe injectée



Fond étanche

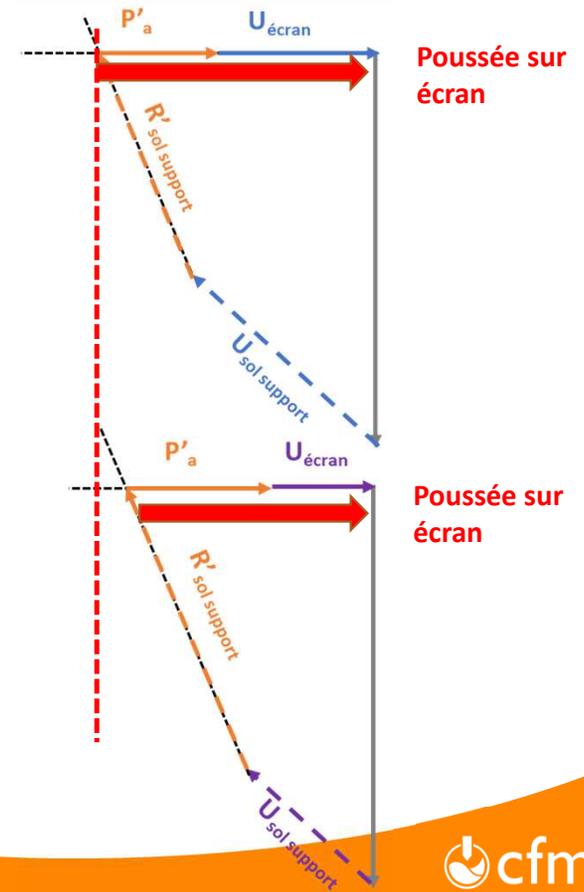
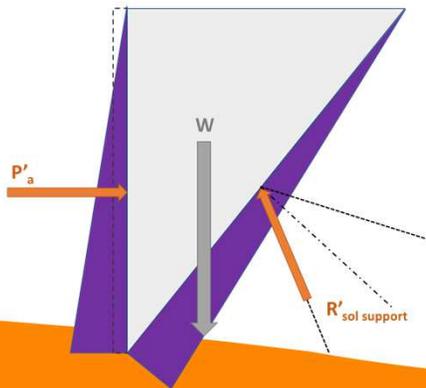
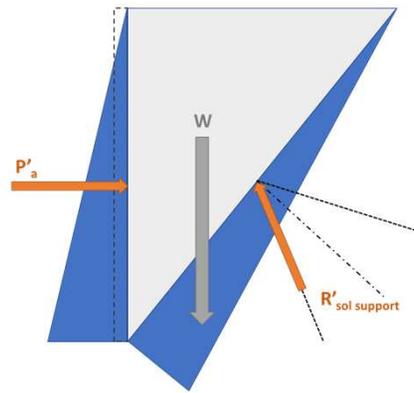
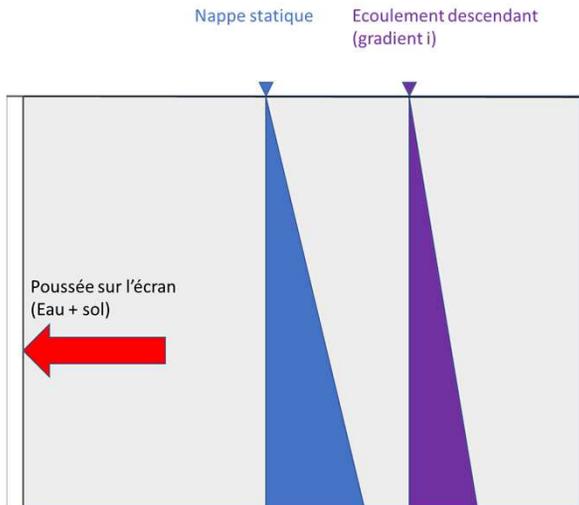
3. Exemples \ Effet des écoulements sur les écrans

➤ Ecoulements descendants en face amont de l'écran



3. Exemples \ Effet des écoulements sur les écrans

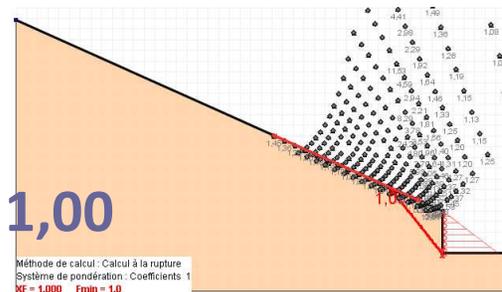
➡ Ecoulements descendants en face amont de l'écran



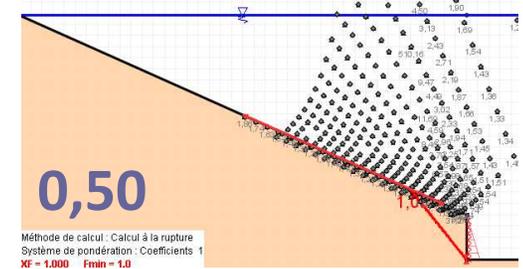
3. Exemples \ Effet des écoulements sur les écrans

Face amont de l'écran: surfaces piézométriques inclinées // évolution P'a

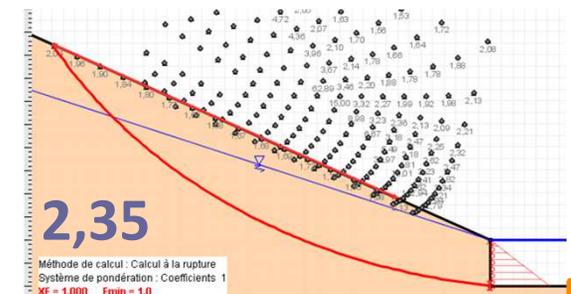
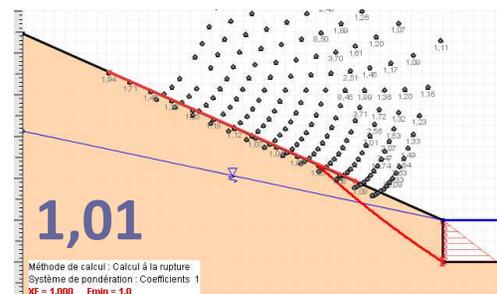
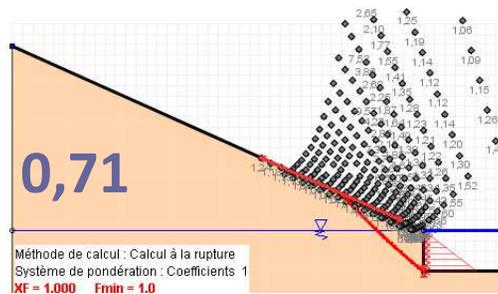
Talus émergé



Talus immergé

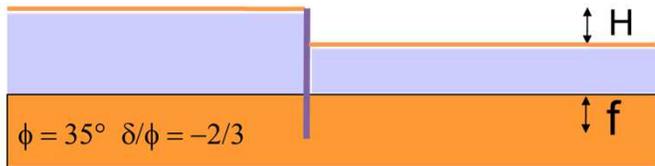


Inclinaison
surface
piézométrique

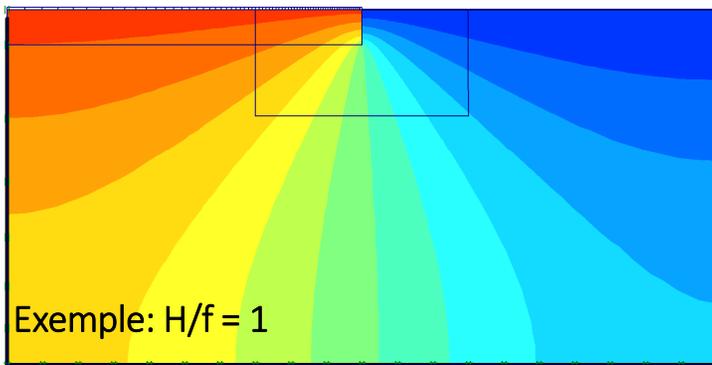


3. Exemples \ Effet des écoulements sur les écrans

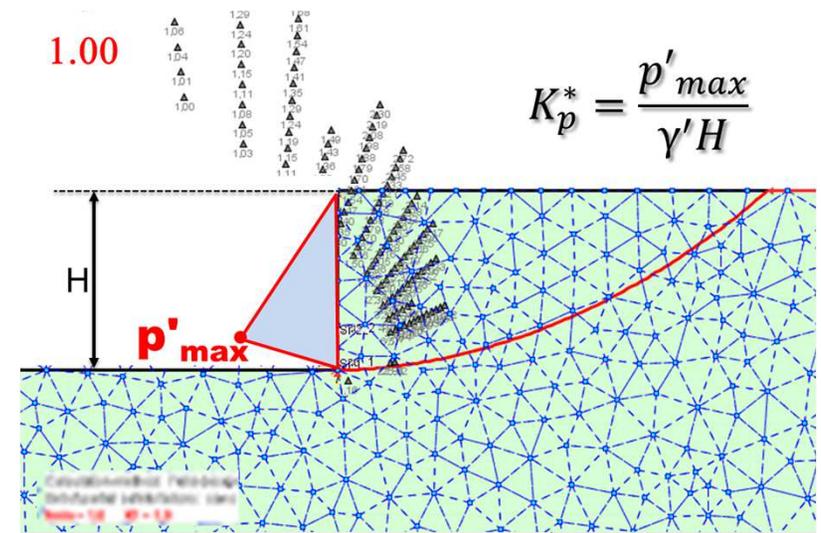
Face aval de l'écran: impact sur la butée (exemple batardeau)



Configuration hydro-géotechnique



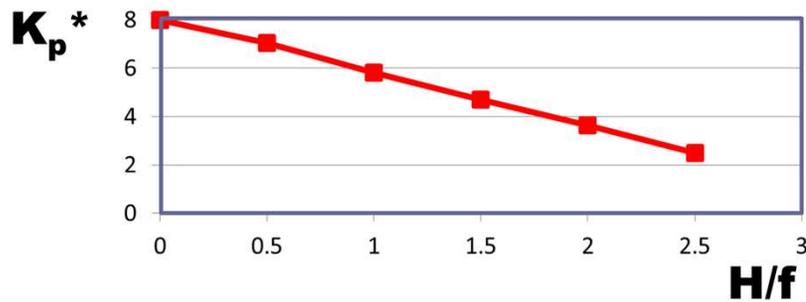
Charge hydraulique



Coefficient de butée équivalent
(tenant compte de l'écoulement)

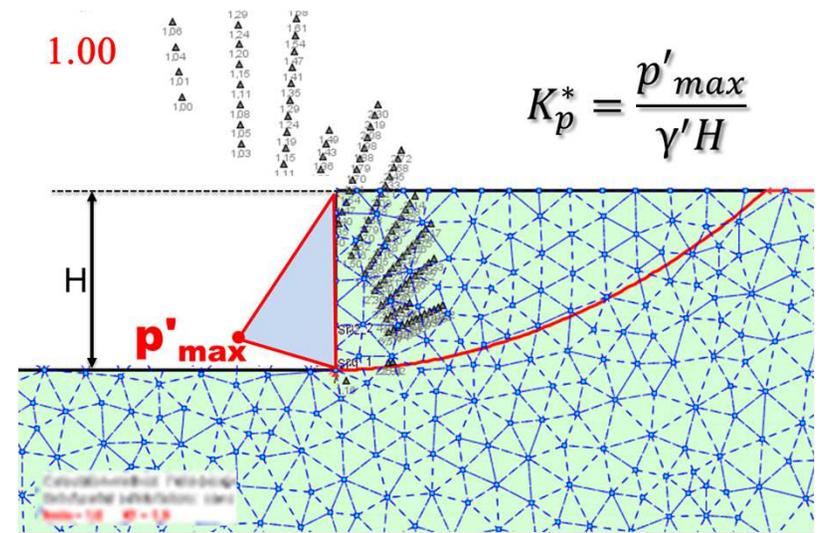
3. Exemples \ Effet des écoulements sur les écrans

Face aval de l'écran: impact sur la butée (exemple batardeau)



Très forte influence de la présence d'écoulements ascendants sur la butée

==> Préférer les dispositifs permettant d'orienter les écoulements côté fouille

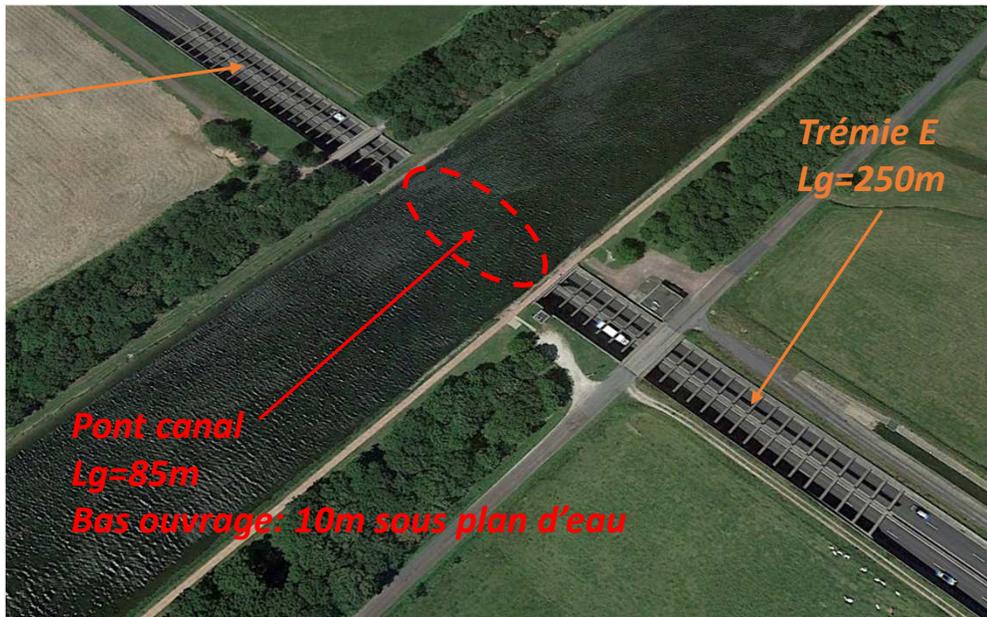


Coefficient de butée équivalent (tenant compte de l'écoulement)

3. Exemples \ Pont canal de Carentan

➤ Franchissement du canal du Haut-Dicq par la N13 en passage inférieur

Trémie W
Lg=280m



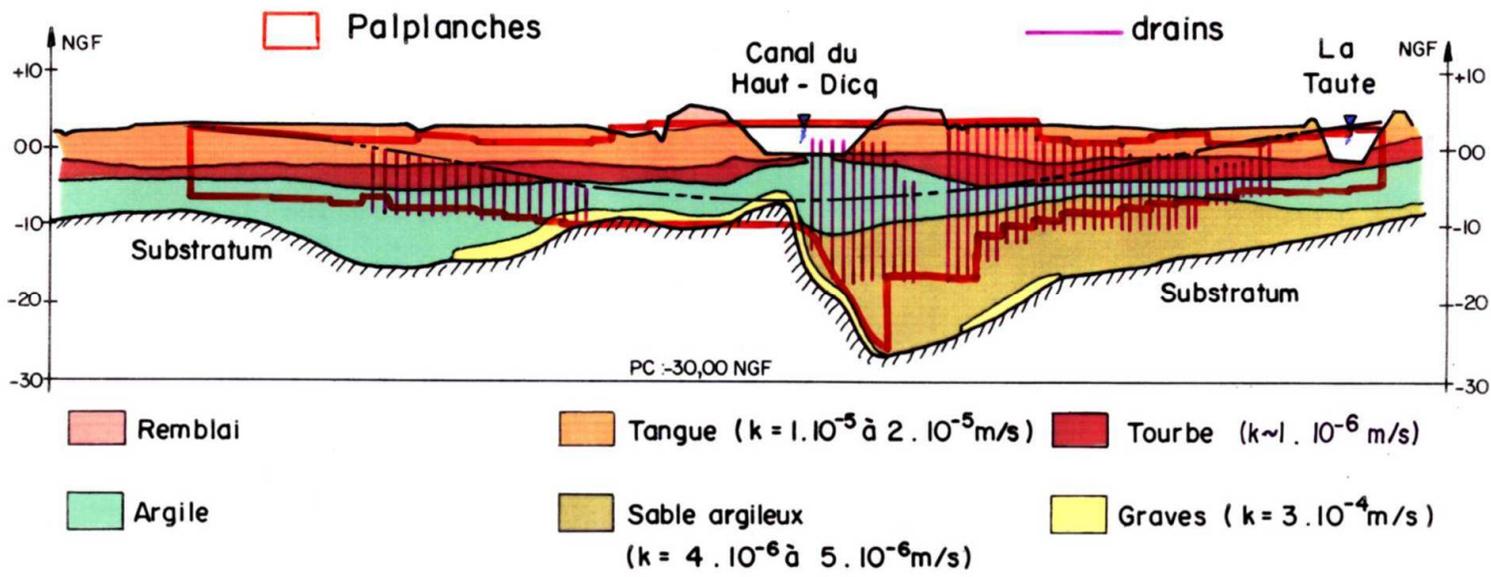
Trémie E
Lg=250m

Pont canal
Lg=85m
Bas ouvrage: 10m sous plan d'eau



3. Exemples \ Pont canal de Carentan

Contexte hydrogéologique



3. Exemples \ Pont canal de Carentan

Trémies – les dispositifs de rabattement

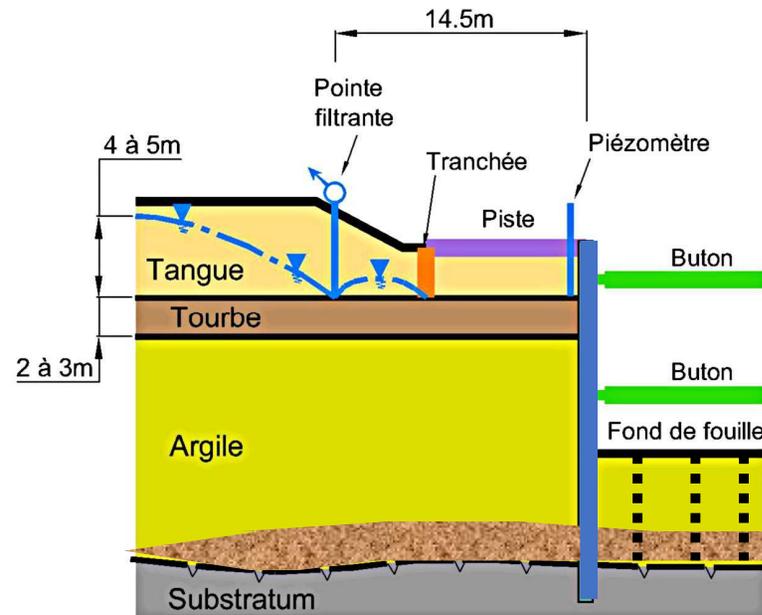
Côté terre:

Objectif: réduire la poussée sur le soutènement:

- Abaissement du TN
- Abaissement de la nappe

Rangée de pointes filtrantes + tranchées drainantes

Matériaux 'fins': attention au temps d'atteinte du régime permanent



Géologie trémie ouest

Côté fouille:

Contrôle des écoulements ascendants (UPL, HYD)

3. Exemples \ Pont canal de Carentan

▶ Trémie Est – le drainage du fond de fouille

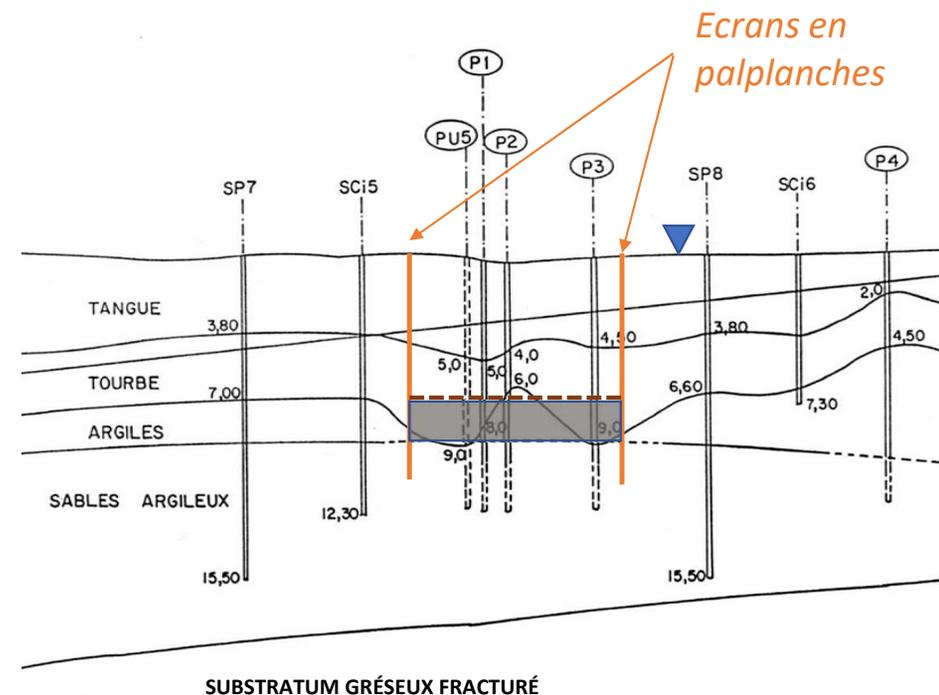
Solution initiale (UPL)

- *Pompage par puits imparfaits crépinés sables argileux*
- *Baisse de la charge hydraulique sous les tourbes & argiles*

Recos complémentaires

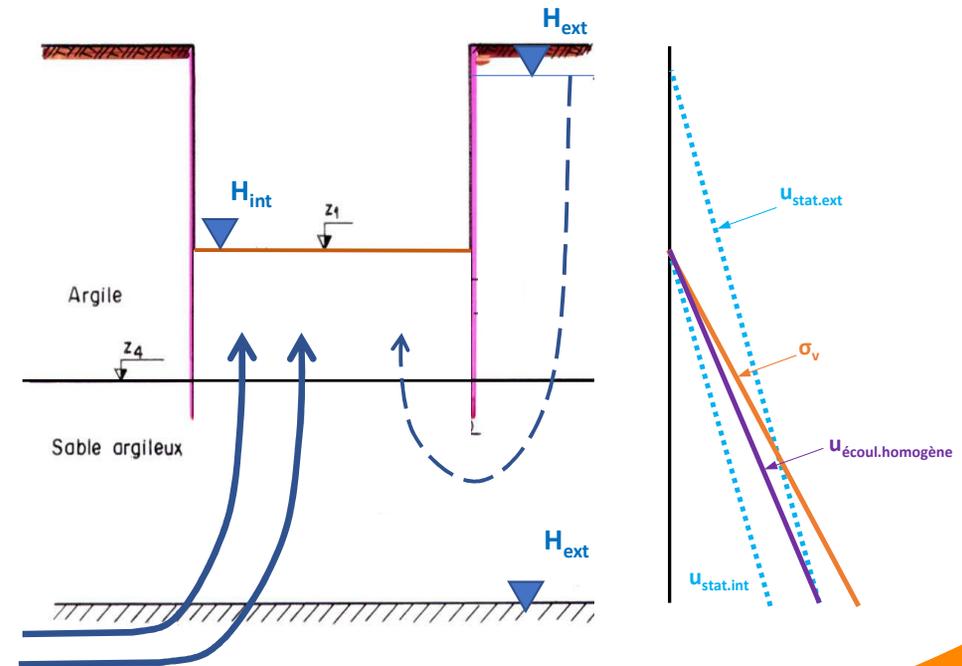
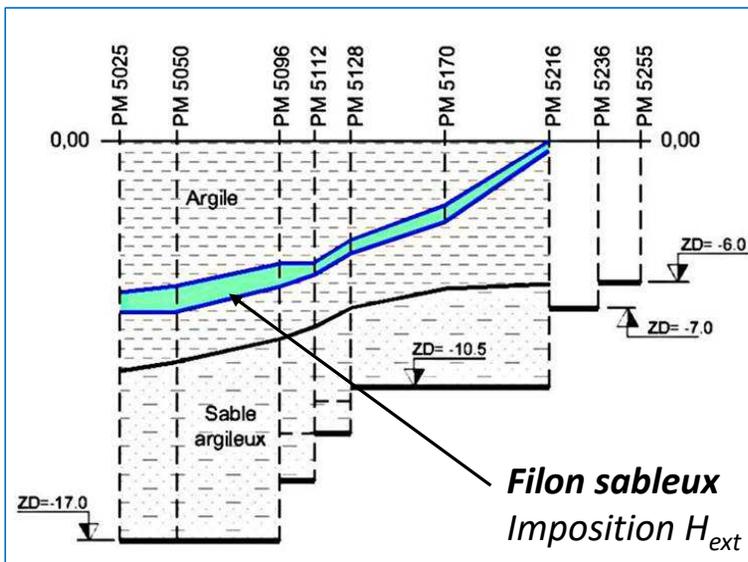
- *Essais de pompage sur dispositif final (puits imparfait)*
- $k \sim 5.10^{-6} \text{ m/s}$ $R_a < 50\text{m}$

Solution d'épuisement & puits de décharge



3. Exemples \ Pont canal de Carentan

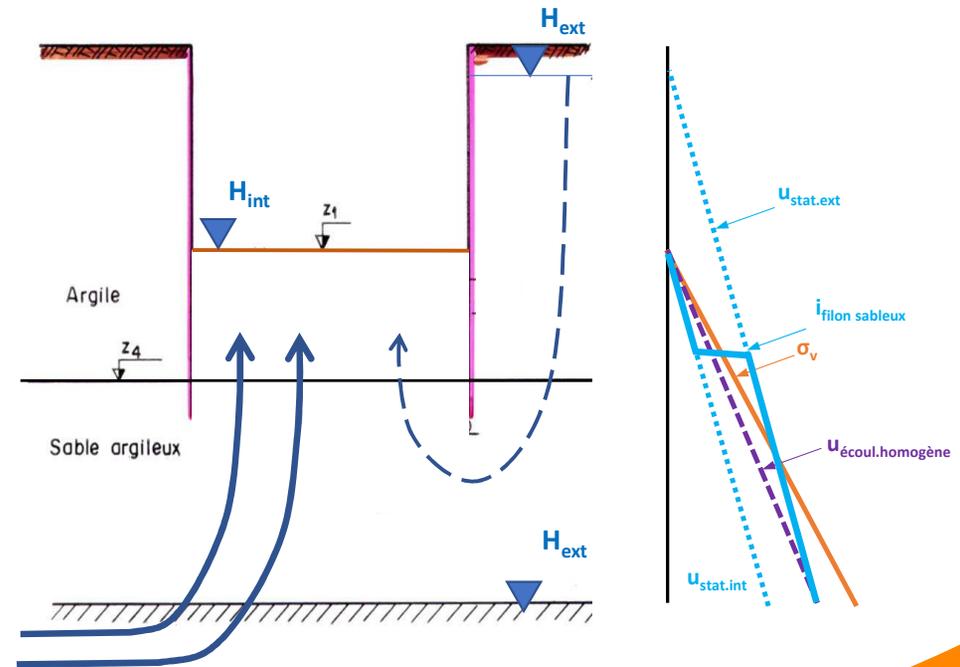
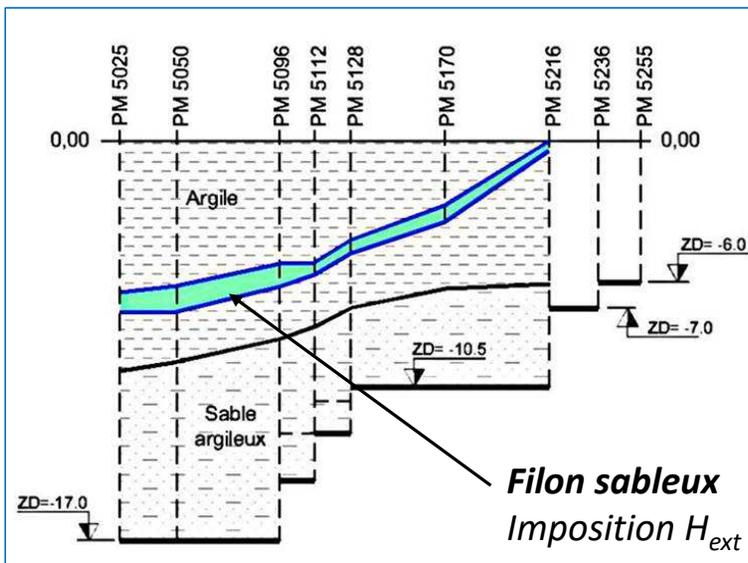
Trémie Est – le drainage du fond de fouille



SUBSTRATUM GRÉSEUX FRACTURÉ
RÉSERVOIR DE PRESSION

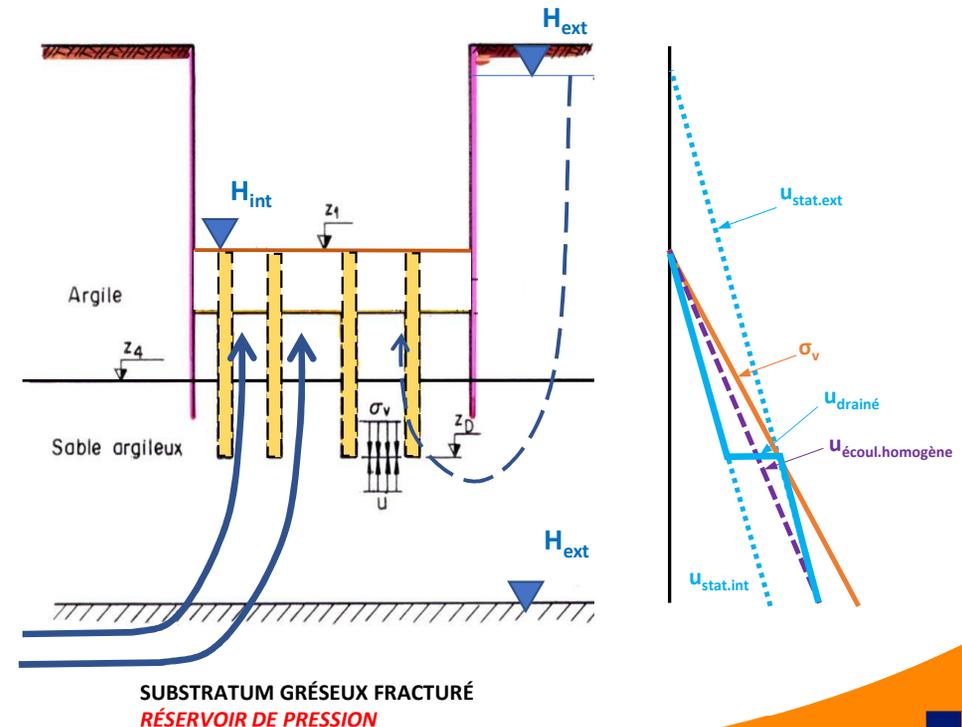
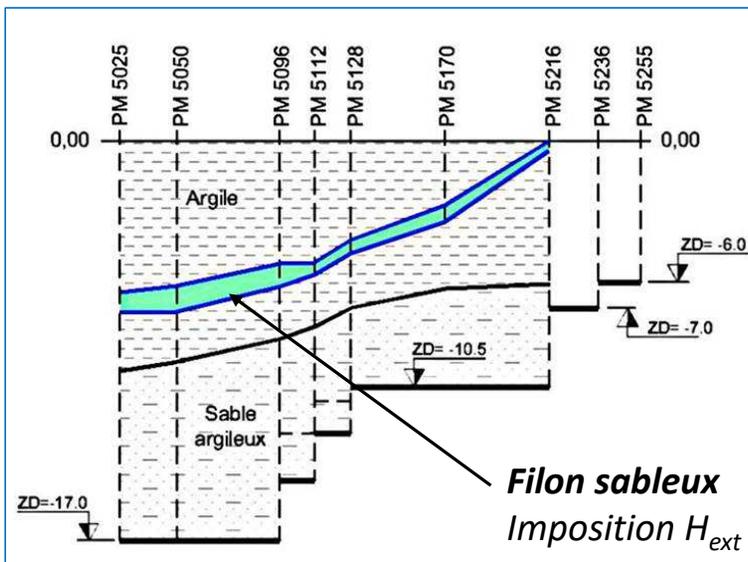
3. Exemples \ Pont canal de Carentan

Trémie Est – le drainage du fond de fouille



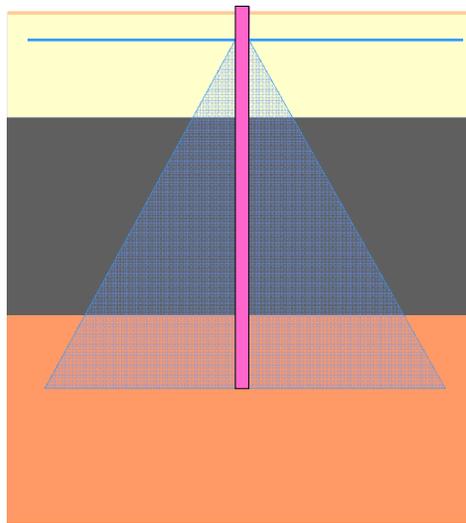
3. Exemples \ Pont canal de Carentan

Trémie Est – le drainage du fond de fouille

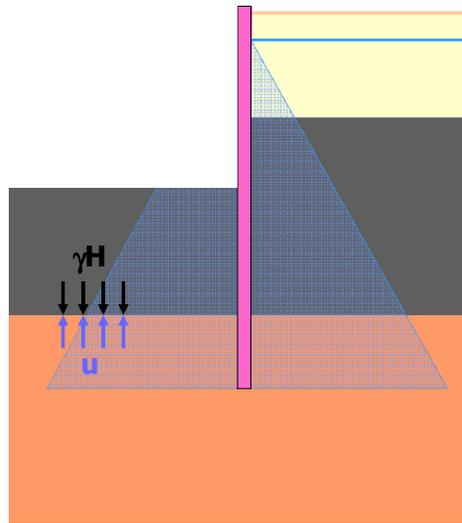


3. Exemples \ Pont canal de Carentan

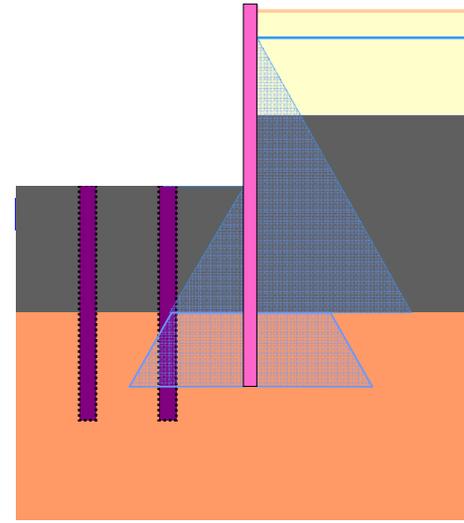
➤ Evolution des charges hydrauliques au cours du phasage



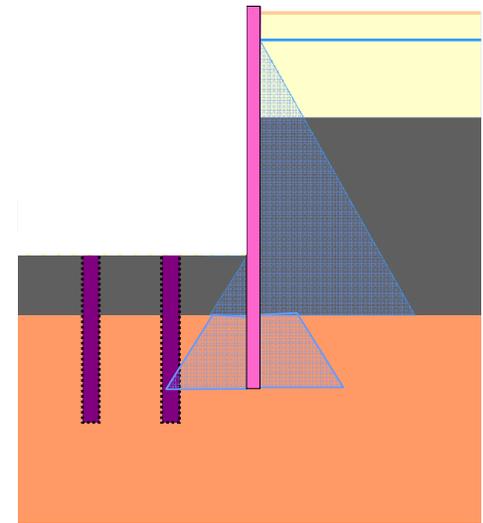
Etat initial



Terrassement pour mise en œuvre des drains



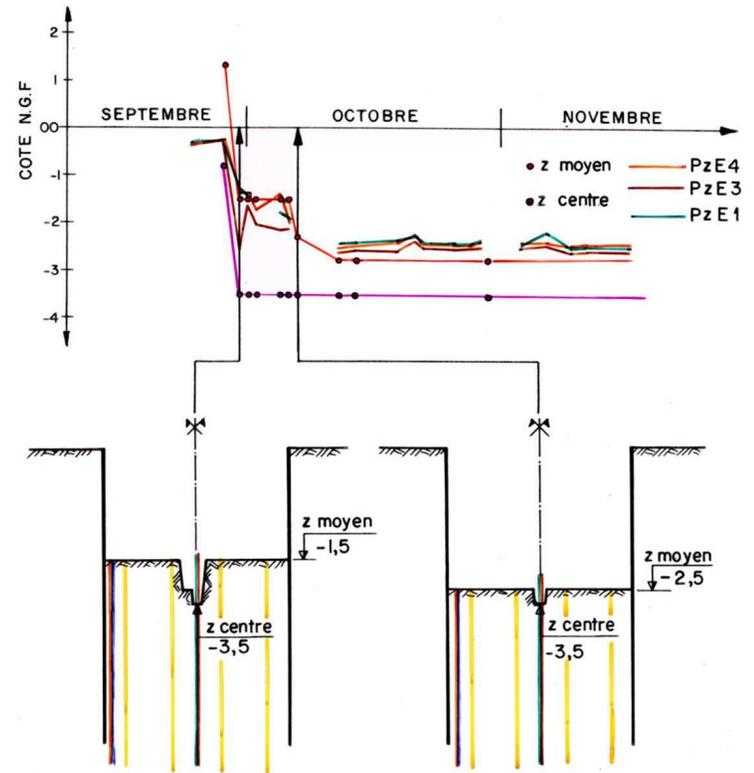
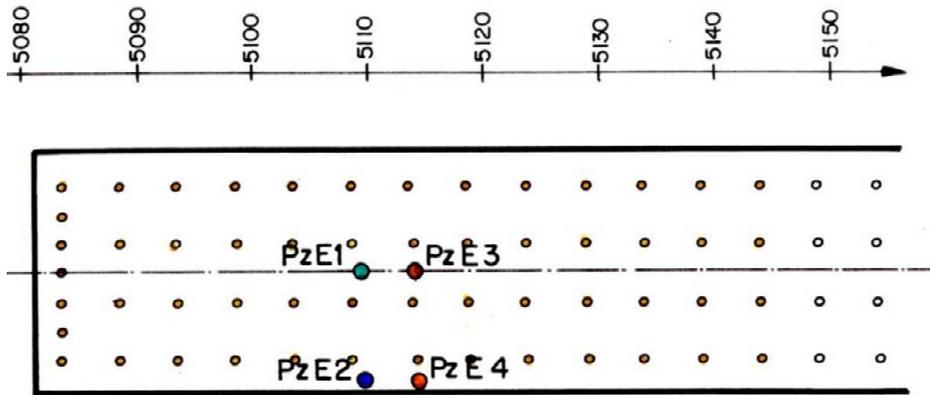
*Drains en place –
épaulement de la fouille*



*Drains en place –
épaulement // fond de fouille*

3. Exemples \ Pont canal de Carentan

➤ Nécessité d'un contrôle en cours de travaux



3. Exemples \ Pont canal de Carentan

➤ Incident sur un rideau transversal

Glissement palplanches
Déplacement tête 20 cm
Décollement extérieur



3. Exemples \ Pont canal de Carentan

➤ **Mise en œuvre de mesures d'urgence**

Dalle-buton

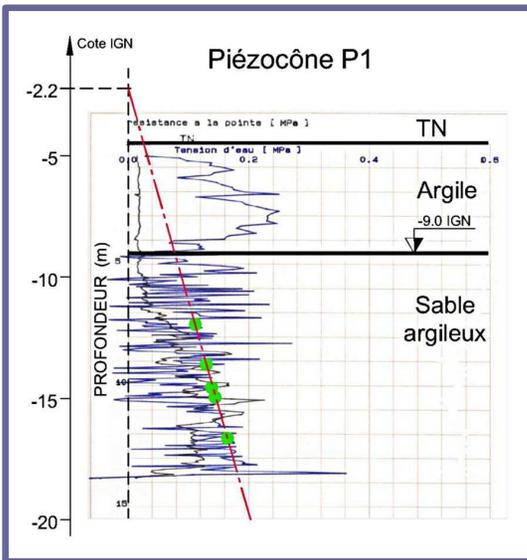
Drains forés

Pointes filtrantes



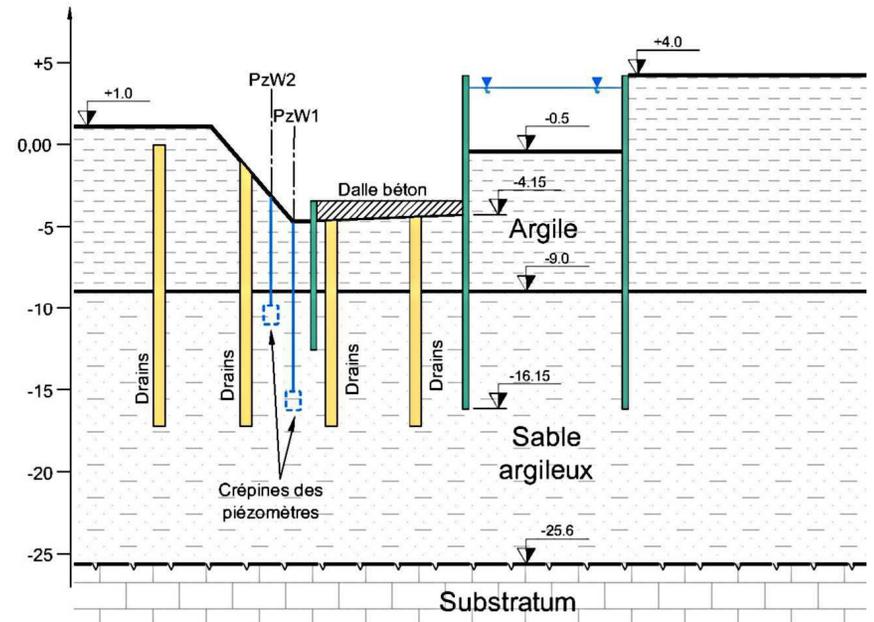
3. Exemples \ Pont canal de Carentan

Reconnaitances complémentaires



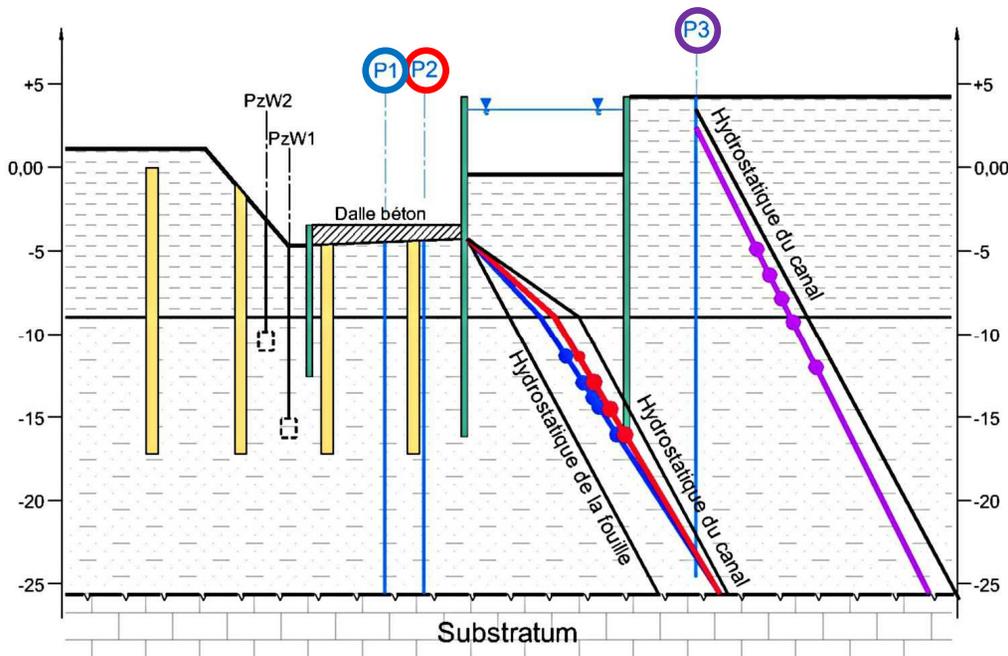
Lithologie confirmée

Compacité diminuant à proximité du rideau



3. Exemples \ Pont canal de Carentan

Reconnaitances complémentaires



Ecoulement ouest vers est

Gradient vertical ascendant dans les sables argileux (0.2m/m)

Tige de piézocône abandonnée incriminée dans le sinistre