

# **Hydraulique des sols**

Rupture hydraulique

Calculs en régime permanent autour d'ouvrages

Rabattement de la nappe autour des fouilles

Brice lecampion

**EPFL**



- 
1. Rappels / rupture d'origine hydraulique
  2. Calculs en régimes permanents
    - Ecoulement confiné / non-confiné (Dupuit)
  3. Exemple: rupture de barrage en terre
  4. Contrôle de la nappe
  5. Calculs autour de fouilles
  6. Défaut de portance en fond de fouille / Renard solide

# Hydraulique des sols (rappel)

---

- Conservation de la masse de fluide dans un REV de sol

$$\frac{\partial n}{\partial t} + n\beta_w \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0$$

Variation of porosity+  
Fluid compressibility

- Ecoulement stationnaire / régime permanent  
(et / ou fluide + squelette incompressible)

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0$$

- Loi de Darcy  $q_i = -k \frac{\partial h}{\partial x_i} = k \times i_i$   $h = \frac{u}{\gamma_w} + z$

- Equation d'écoulement

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( k(x) \frac{\partial h}{\partial x_i} \right) = 0$$

Sol homogène / isotrope



$$\frac{\partial^2 h}{\partial x_i \partial x_i} = 0$$

# Equilibre en contraintes effectives

- Contraintes > 0 en compression
- Equilibre (en contraintes totales)

$$\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \gamma = 0$$

- ... en contraintes effectives

$$\frac{\partial \sigma'_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'_{xz}}{\partial z} + \gamma_w \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma'_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'_{zz}}{\partial z} + \gamma_w \frac{\partial h}{\partial z} + (\gamma - \gamma_w) = 0$$

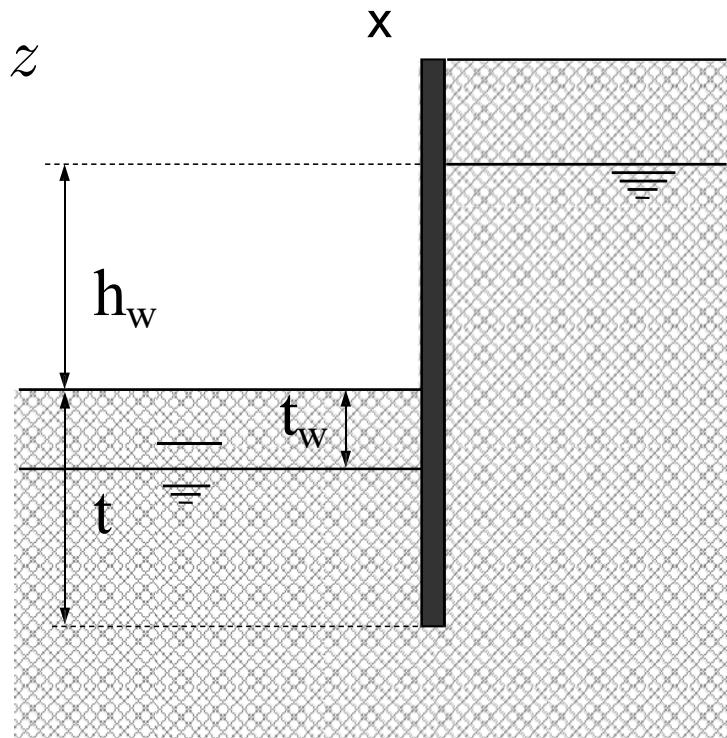
Composantes des forces d'écoulement:

$$\gamma_w \underline{i} = -\gamma_w \nabla h$$

Force de pesanteur déjaugée

$$-\gamma' \underline{e}_z$$

$$h = \frac{u}{\gamma_w} + z$$



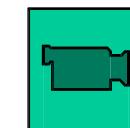
Risque de renard hydraulique lorsque la résultante des forces d'écoulement est > à la force de pesanteur déjaugée

-> gradient hydraulique critique (vers le haut) :

$$i_c = \gamma' / \gamma_w$$

# Mise en boulance de sable dans une colonne (renard hydraulique)

---



Laboratoire réalisé en 2011 par

- Alessandro d'Amario
- Raphaël Coquoz

# Mise en boulance au pied d'une paroi

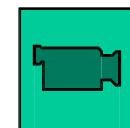
---

(renard hydraulique)



Paroi dont le  
déplacement  
est entravé sur  
toute la hauteur

→ *rupture  
très  
progressive*



Laboratoire réalisé en 2011 par  

- Alessandro d'Amario
- Raphaël Coquoz

# Défaut de butée et de portance au pied d'une paroi

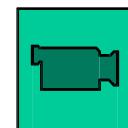
---

(renard solide)



Paroi libre de se déplacer, mais étayée au-dessus du fond de fouille

*→ rupture très brutale (défaut de butée et de portance)*

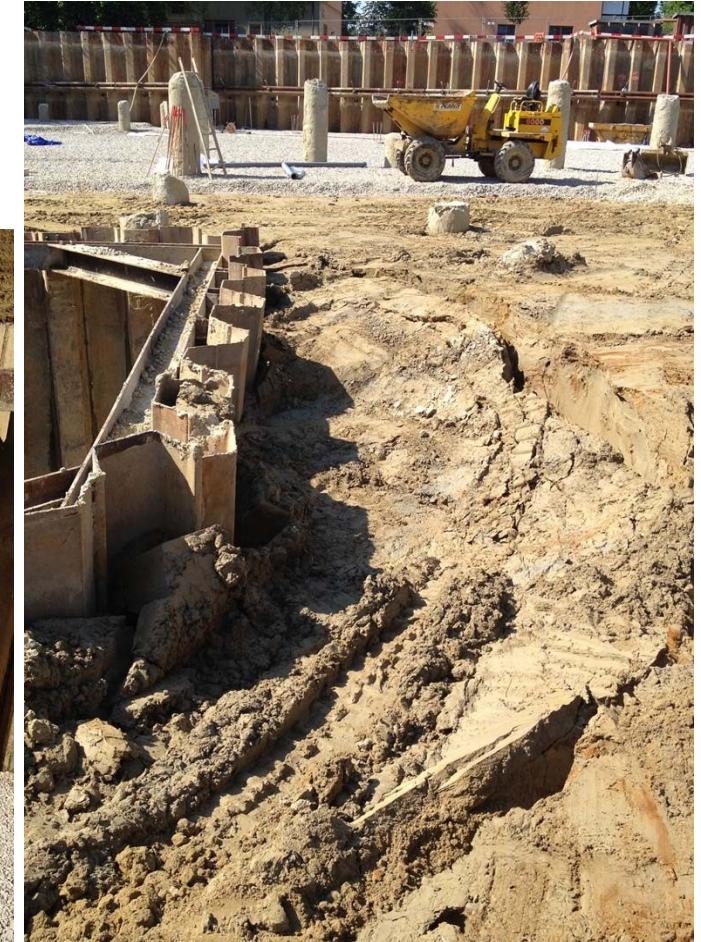


Laboratoire réalisé en 2011 par  

- Alessandro d'Amario
- Raphaël Coquoz

# Instabilité d'origine hydraulique

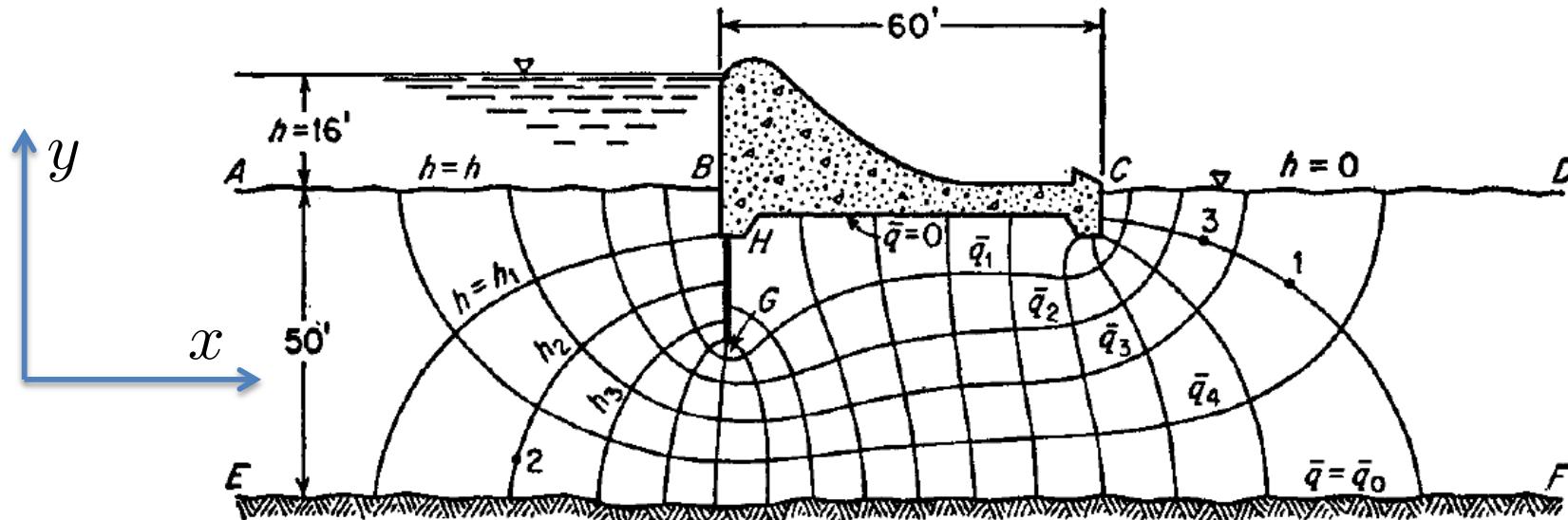
---



Pivotement de paroi par défaut de butée ayant une origine hydraulique

# **CALCULS HYDRAULIQUE**

# Calculs en régime permanent



Permeabilité uniforme - isotrope

3D

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

2D

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad h = u/\gamma_w + y$$

# Equipotentielles & Lignes de courant

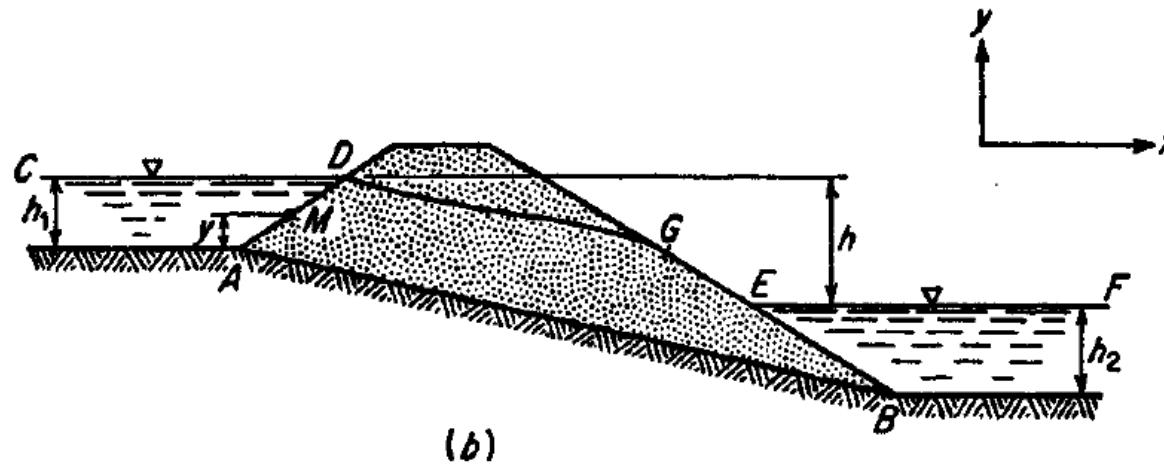
---

Au tableau

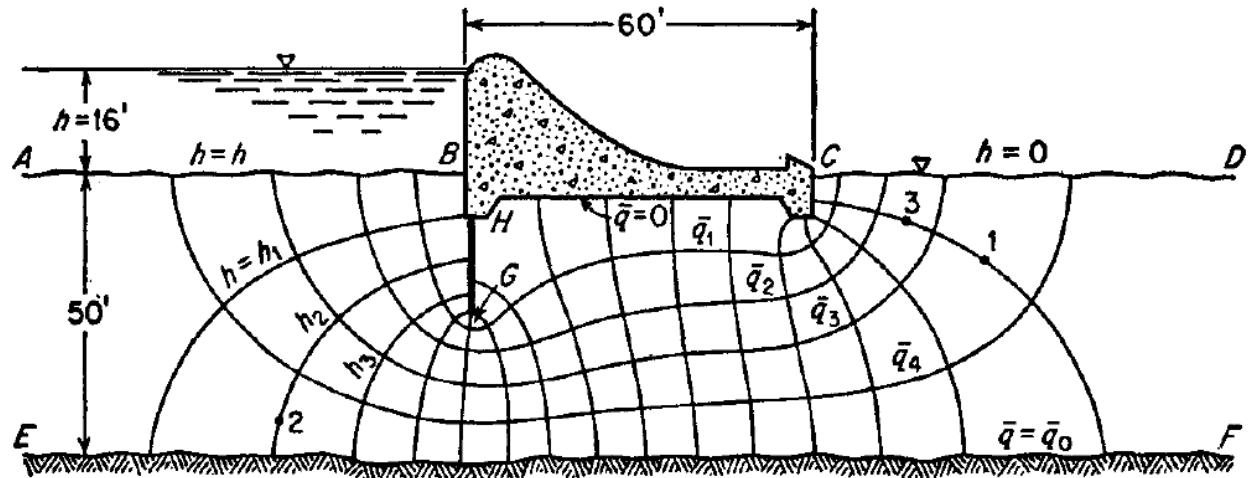
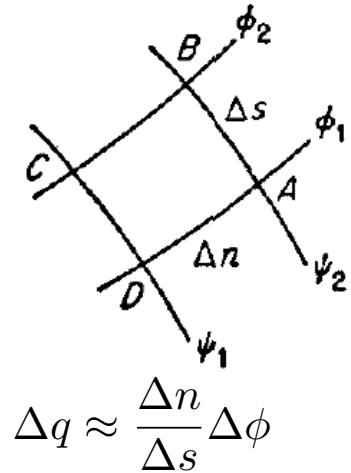
# Conditions aux limites

---

Au tableau



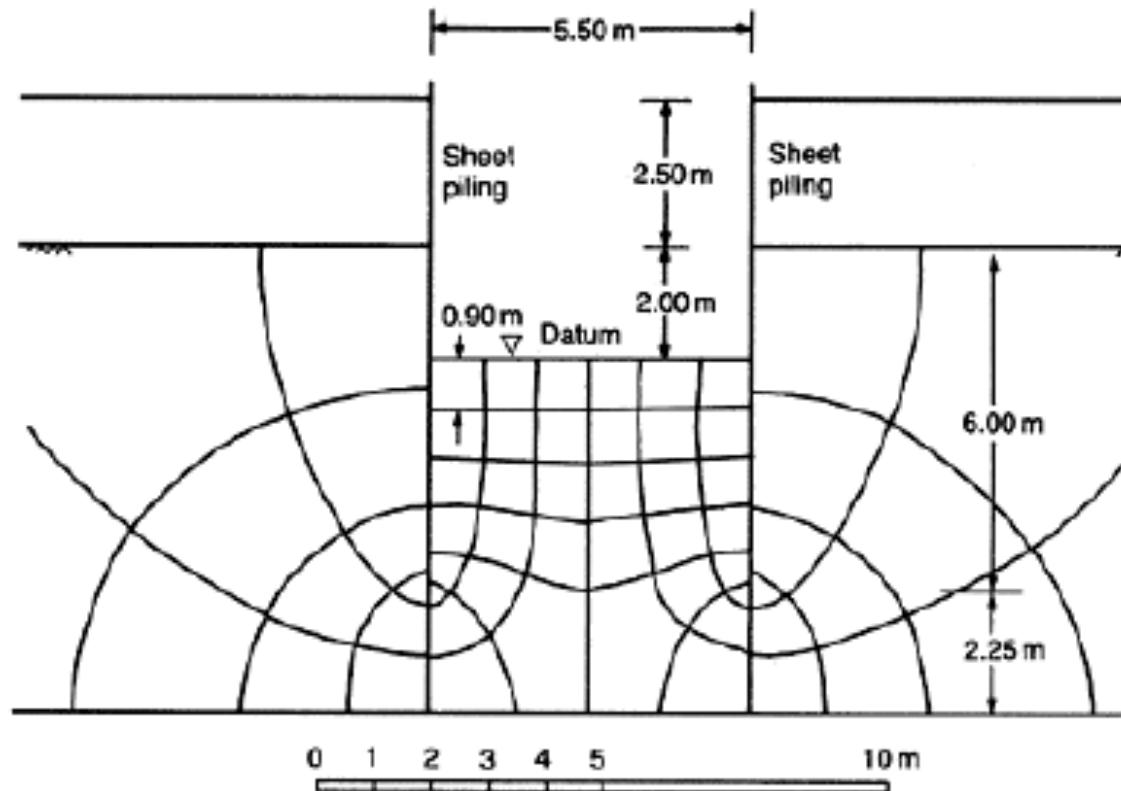
# Réseau d'écoulement / Flow net



1. Déssiner toutes les frontières du domaine
2. Déssiner 2-3 lignes de courant
3. Équipotentielle correspondantes (interceptant les lignes de courant perpendiculairement & essayant d'obtenir des carrés)
4. Raffiner 2-3
5. Vérifier que les diagonals des carrés sont ~ perpendiculaires

# Example

---



# Note - anisotropie

---

- Les sols ont souvent une anisotropie de perméabilité  $k_h > k_v$

$$k_h \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_v \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

$$\underbrace{\frac{\partial^2 h}{\partial (\underbrace{k_v/k_h}_X x)^2}}_{X^2} + k_v \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

$$X = \sqrt{k_v/k_h} x$$

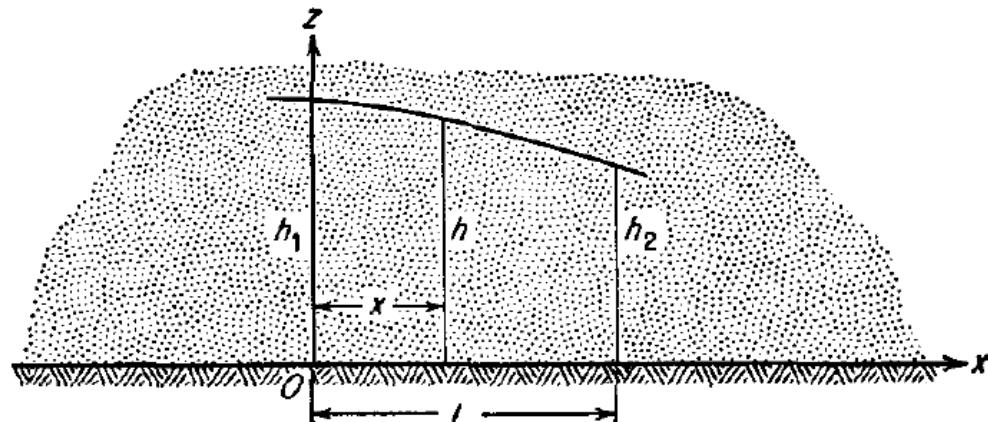
- Démarche identique après changement de variable

# Ecoulement non-confinés

---

Approximation de Dupuit

Écoulement ~1D après intégration sur la hauteur de la couche ayant la nappe libre  $h(x)$  comme frontière supérieure

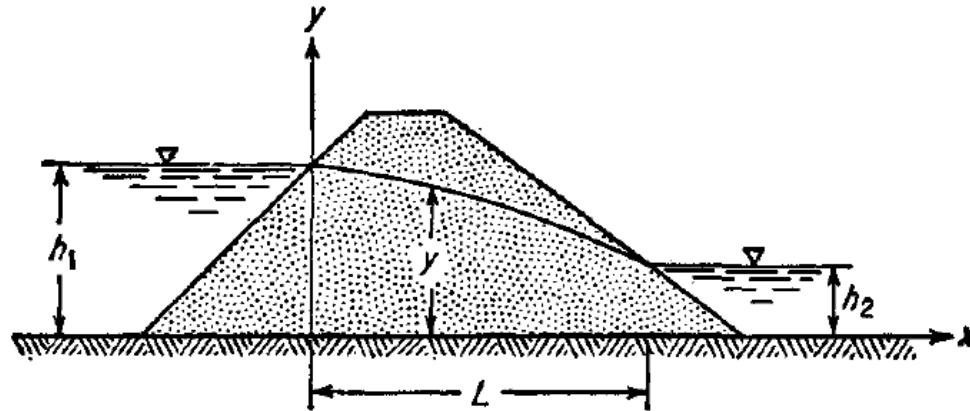


$$Q_x = \int_z q_x = -k \times h \frac{\partial h}{\partial x}$$

# Ecoulement à travers un barrage en terre

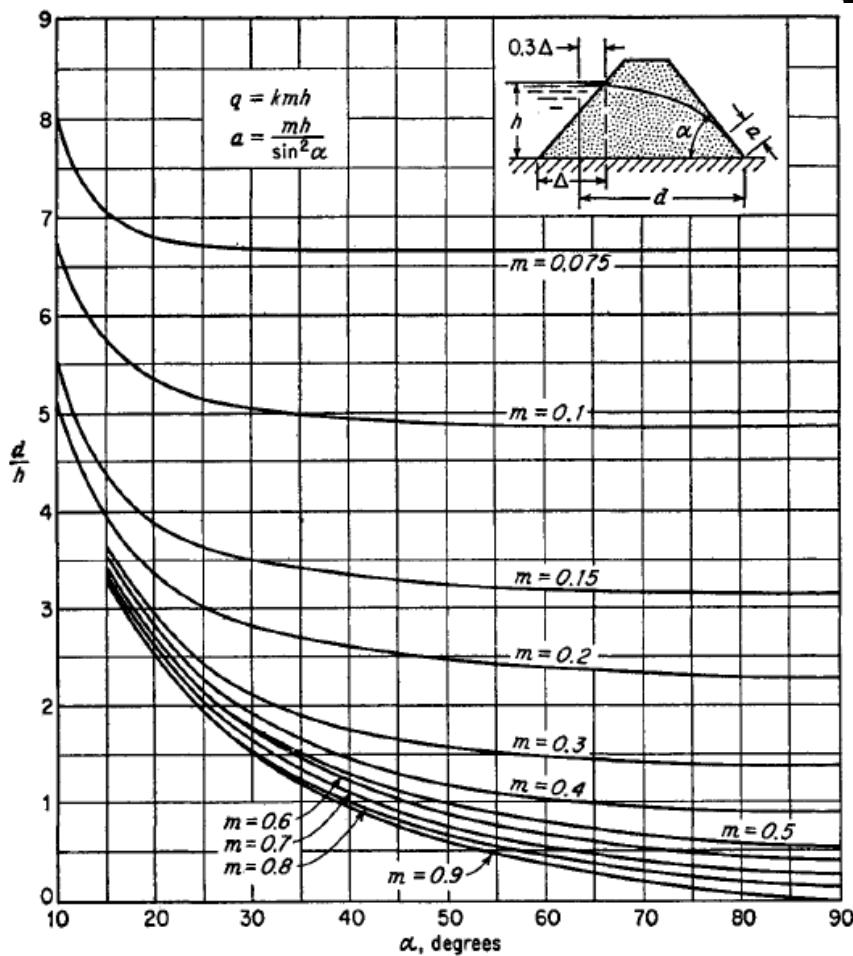
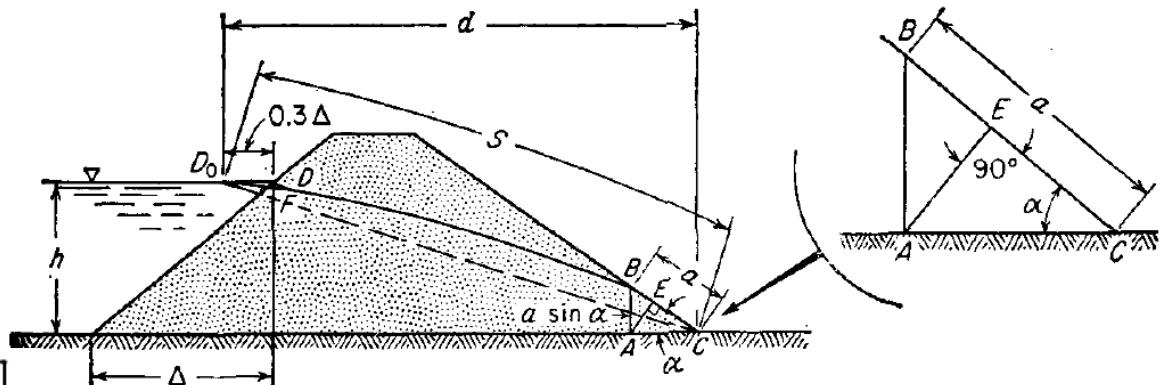
---

## 1. Dupuit



# Ecoulement à travers un barrage en terre

## 2. Casagrande

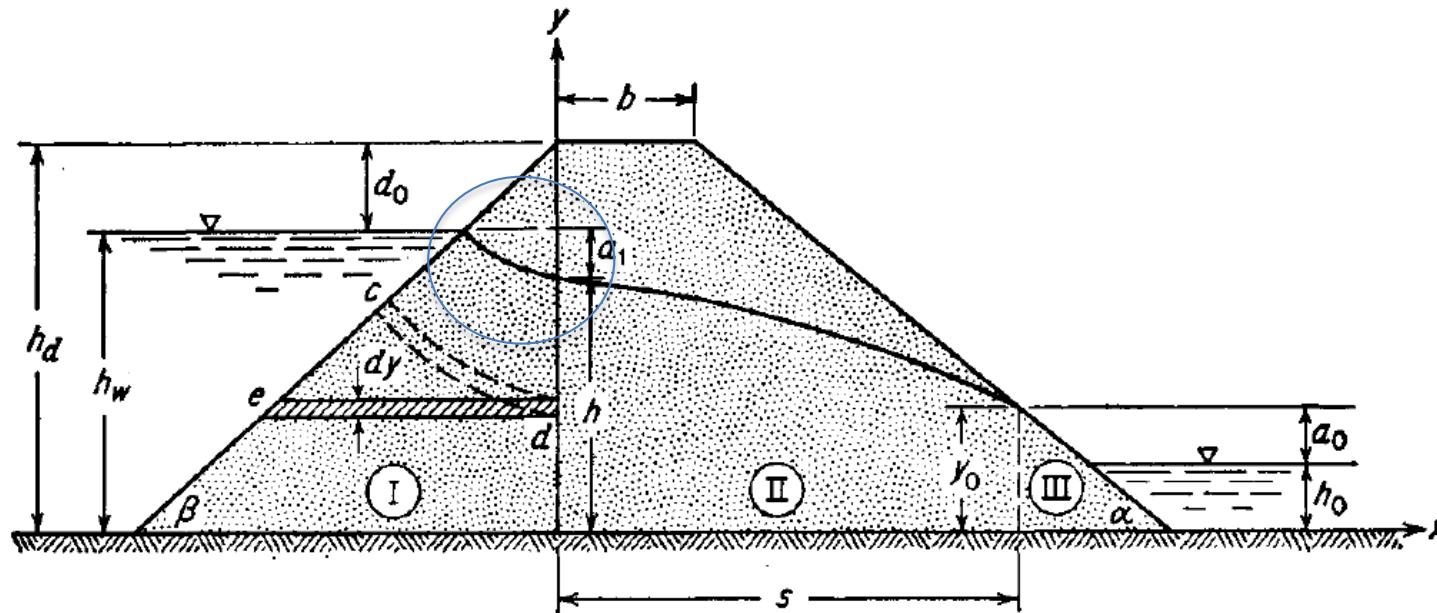


# Ecoulement à travers un barrage en terre

---

3. Pavlosky

Pour memoire



# Ecoulement autour d'un puit (rappel)

---

- En coordonnées polaires
- Nappe libre (Dupuit)

$$Q = \pi k \frac{h_\infty^2 - h_w^2}{\ln R_\infty / R_w}$$

$R_w$  Rayon du puits  
 $R_\infty$  Rayon d'influence (f (k) )

- Nappe confinée de hauteur  $m$

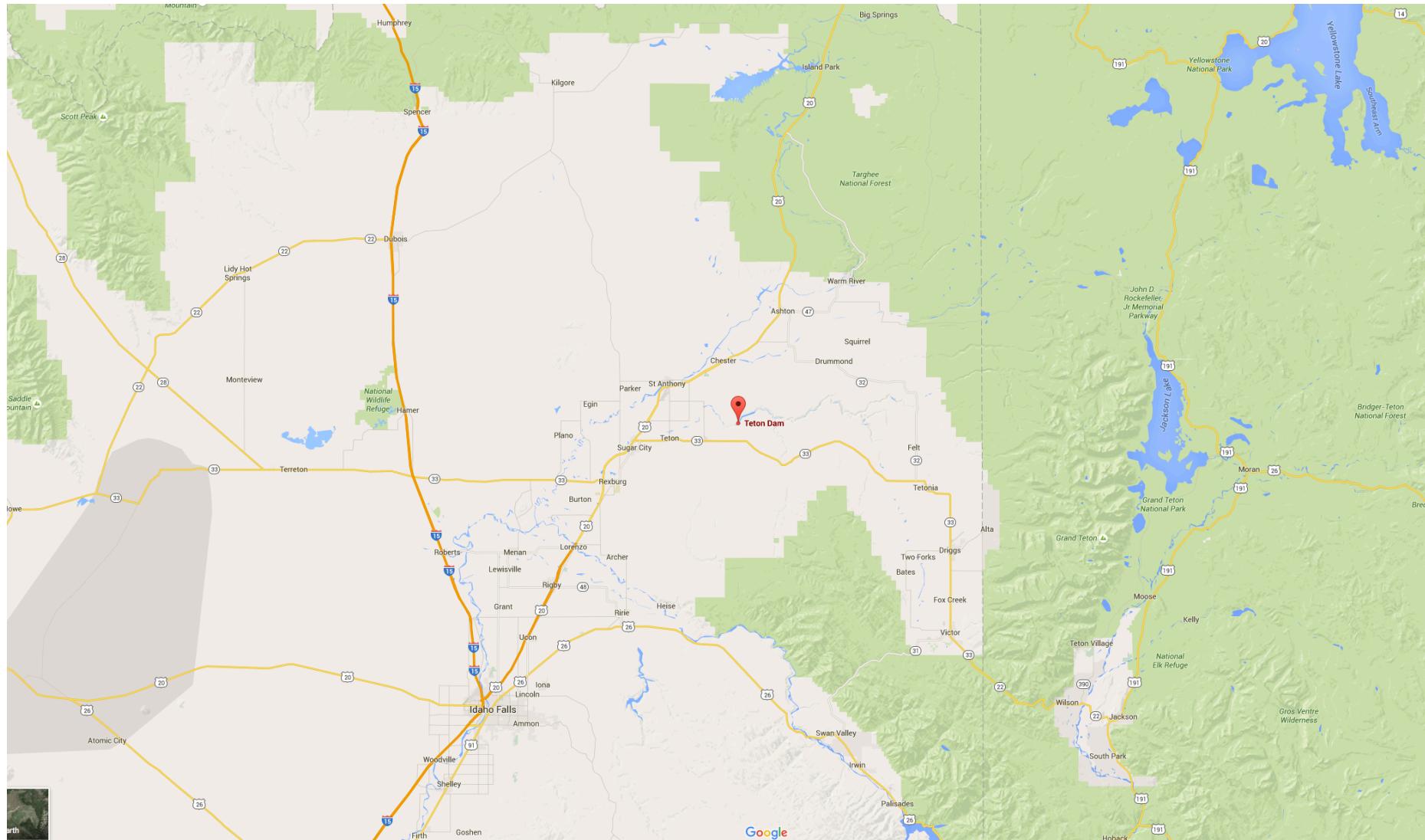
$$Q = 2\pi km \frac{h_\infty - h}{\ln R_\infty / R_w}$$

June 5, 1976

# **TETON DAM DISASTER**

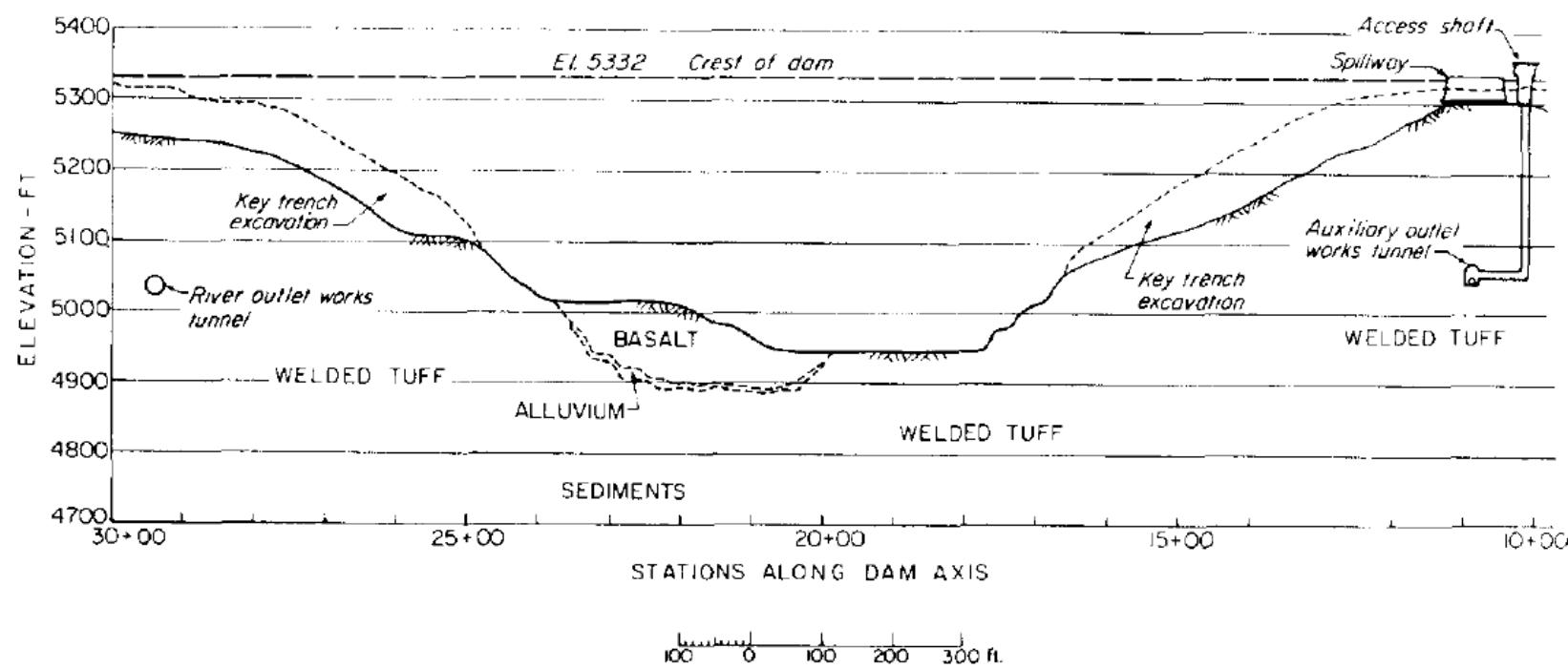
# 305-foot high earthfill dam across the Teton River in Madison County, southeast Idaho

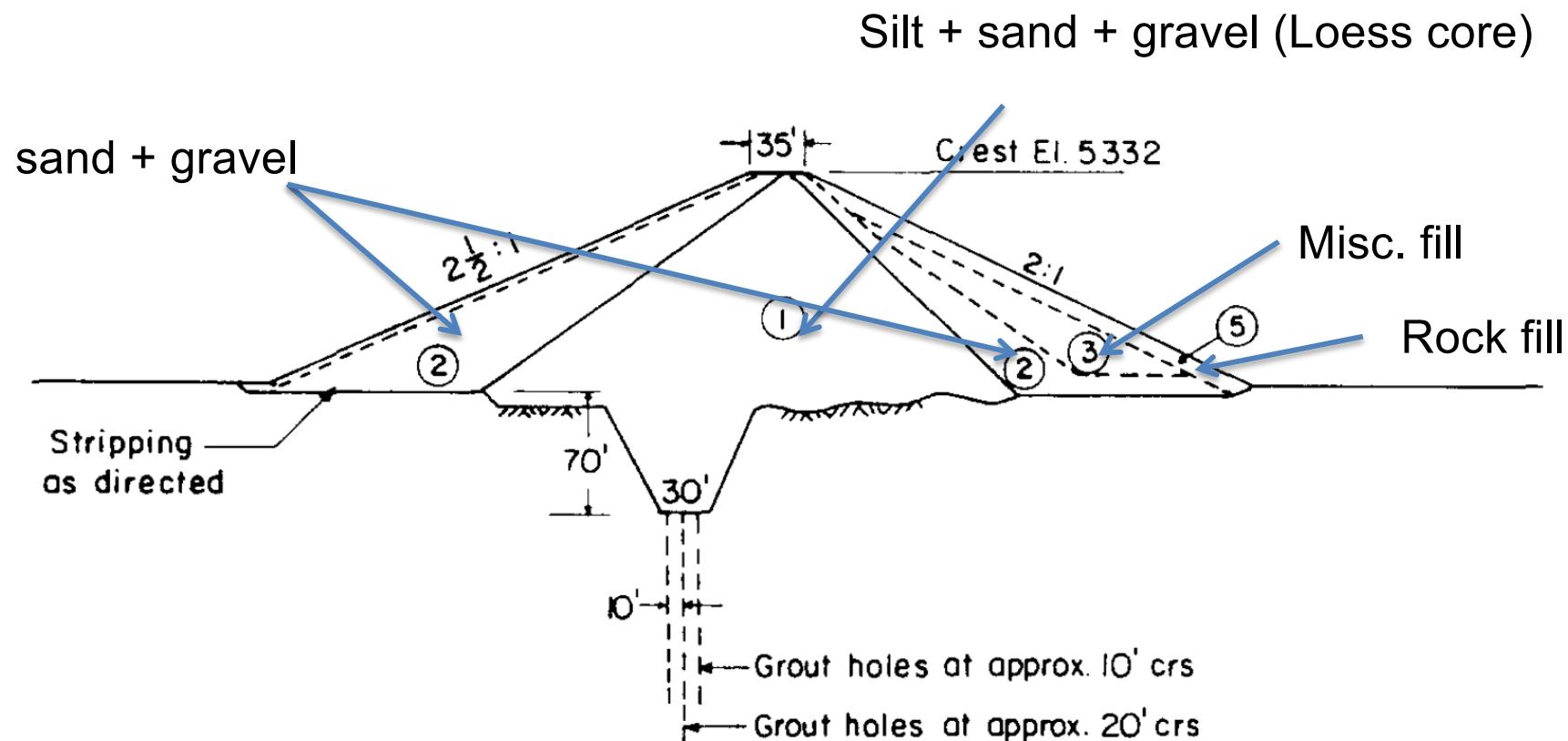
---



305-foot high earthfill dam across the Teton River  
in Madison County, southeast Idaho







# June 5, 1976

---

- Dam was nearly filled
- Eyewitnesses noticed the first major leak between 7:30 and 8:AM (from rock in the right abutment near the toe of the dam )
- Between 9:30 and 10 AM, a wet spot developed on the downstream face of the dam, 15 to 20 feet out from the right abutment at about the same elevation as the seepage coming from the right abutment rock. The water quantity increased continually as the hole grew. Efforts to fill the increasing hole in the embankment were futile during the following 2 to 2 1/2 hour period until failure.



# cted

---

- The sheriff of Fremont County (St. Anthony, Idaho) said that his office was officially warned of the pending collapse of the dam at 10:43 AM on June 5. The sheriff of Madison County, Rexburg, Idaho, was not notified until 10:50 AM on June 5. He said that he did not immediately accept the warning as valid but concluded that *while the matter was not too serious*, he should begin telephoning people he knew who lived in the potential flood path.



- 
- The dam breached at 11:57 AM when the crest of the embankment fell into the enlarging hole and a wall of water surged through the opening. By 8 PM the flow of water through the breach had nearly stabilized. Downstream the channel was filled at least to a depth of 30 feet for a long distance. About 40 percent of the dam embankment was lost, and the powerhouse and warehouse structure were submerged completely in debris.





- 
- 14 deaths
  - 13,000 cows...
  - 2 USD billions in damage



# Causes

---

- Initially at the core/tuff interface possibly
  - Fractured rocks in the abutments
- > allowed for the water to seep through the dam
- Ultimately: Hydraulic Failure of the core material
  - hydraulic fracturing then erosion
- Combination of geological factors + design decision
  - loess core was “too brittle”
  - observed fissures in the rock (right abutment) not all grouted
  - Filling rate was too high (taking advantages of snow melt)
  - Under-designed emergency release outlets ( $24\text{m}^3/\text{s}$  max), the main outlet was not yet in service (gates being painted !).

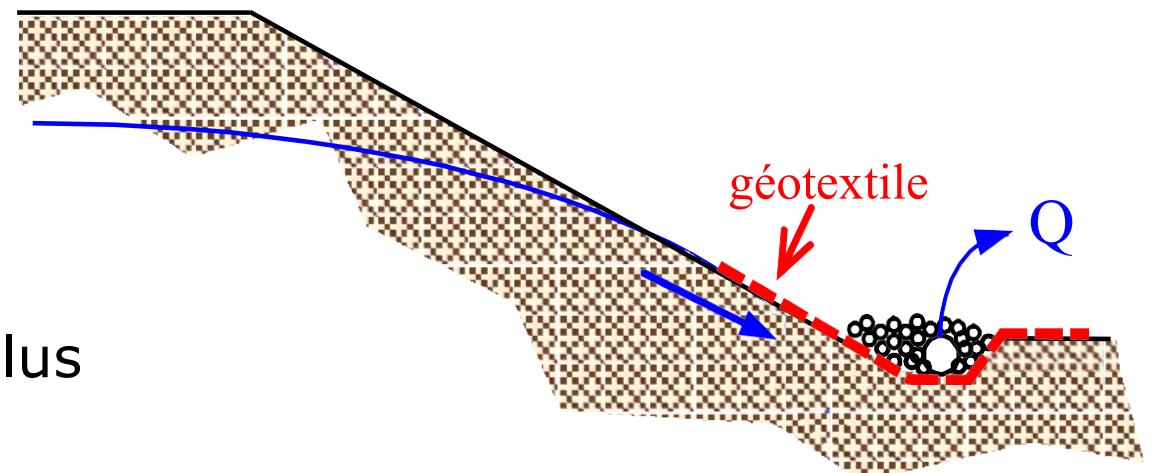
# **Contrôle de la nappe phréatique**

# Contrôle de la nappe phréatique

---

## Ecoulement gravitaire

Pompage de l'eau en pied de talus  
→ écoulement parallèle au talus



### Avantage:

- Technique économique

### Inconvénients:

- Risque d'entrainement de fines du terrain (érosion interne)  
→ prévoir un géotextile et un matériau filtre dans le fossé de drainage
- Stabilité des talus précaire
- Nappe proche du fond de fouille → terrassement plus difficile
- Rabattement de la nappe → tassements

# Contrôle de la nappe phréatique

---

## Ecran d'étanchéité

Ecran fiché dans une couche imperméable. Constitué de diverses manières :

palplanches, paroi (coulis, béton), injections

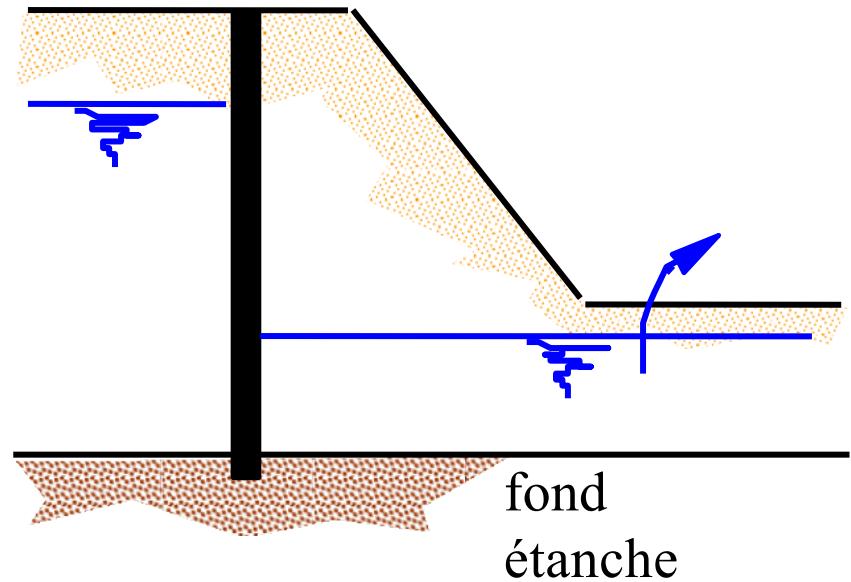
Une fois l'écran réalisé, on épouse l'eau dans la fouille.

### Avantages:

- Pas de rabattement de la nappe en dehors de la fouille → pas de tassement
- Pas de risque d'entrainement de fines du terrain
- Stabilité des talus bien meilleure
- Fond de fouille au-dessus de la nappe phréatique (terrassement à sec)

### Inconvénients:

- Technique onéreuse (coût moindre si palplanches)



# Contrôle de la nappe phréatique

## Rabattement

Rabattement par puits.

Divers dispositifs :

- puits filtrants
- micro-puits
- pointes filtrantes

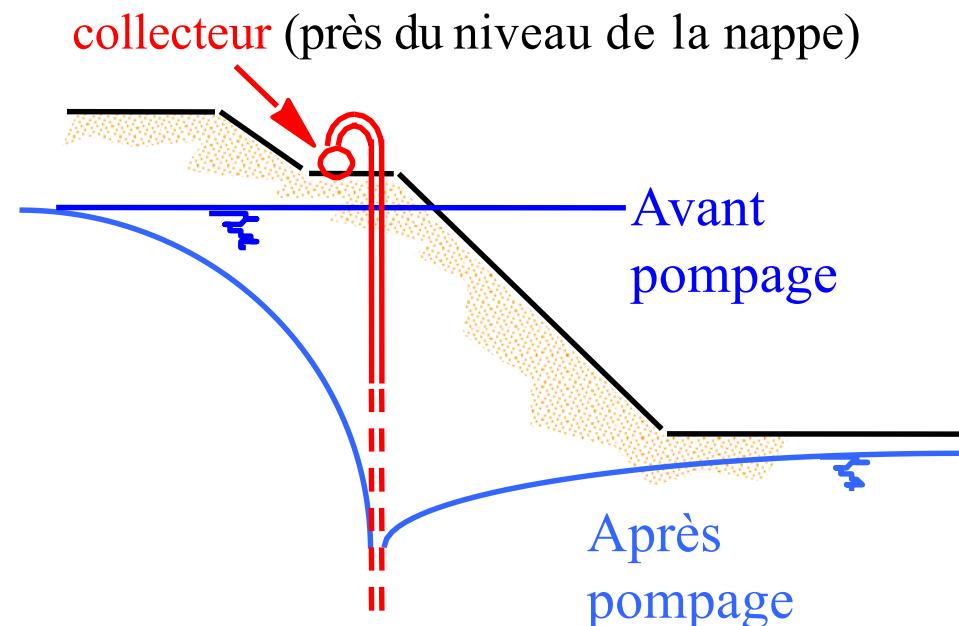
Avantages:

- Bonne stabilité des talus
- Non entraînement de fines du terrain (talus)
- Fond de fouille au-dessus de la nappe phréatique (terrassement à sec)

Inconvénients:

- Coûts supplémentaires
- Augmentation de la zone touchée par le rabattement

→ tassements plus importants et plus étendus



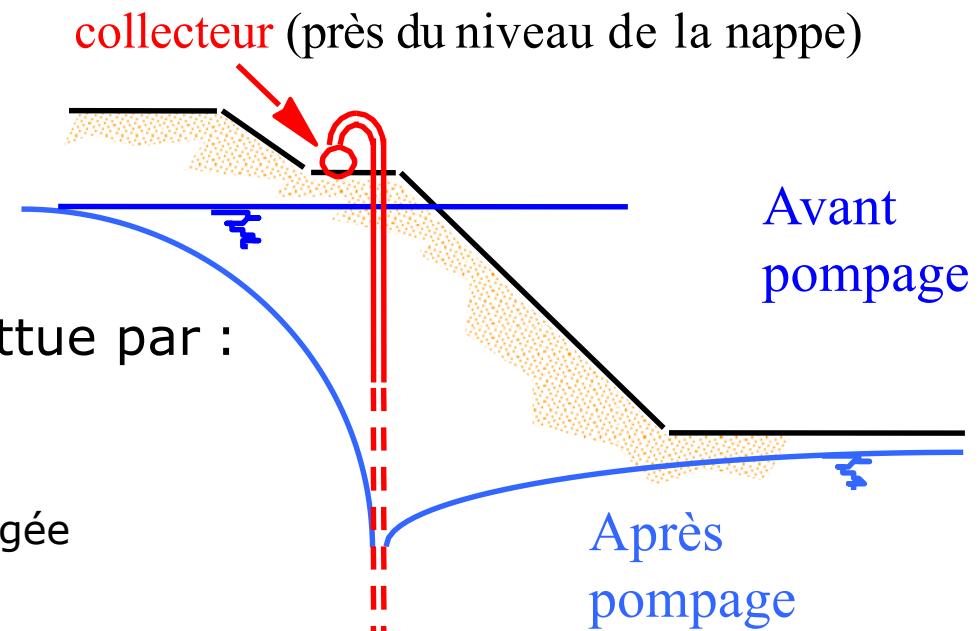
# Contrôle de la nappe phréatique

## Rabattement

La nappe phréatique peut être rabattue par :

- puits filtrants

tube crépiné contenant une pompe immergée



- micro-puits

aspiration de l'eau à la base d'un tube crépiné par un effet Venturi

- pointes filtrantes ("wellpoint")

pompage par aspiration sur une hauteur maximale d'environ 7 à 8 m (système à 1 étage  $\Rightarrow$  rabattement maximum 5 à 6 m)

# Contrôle de la nappe phréatique

---

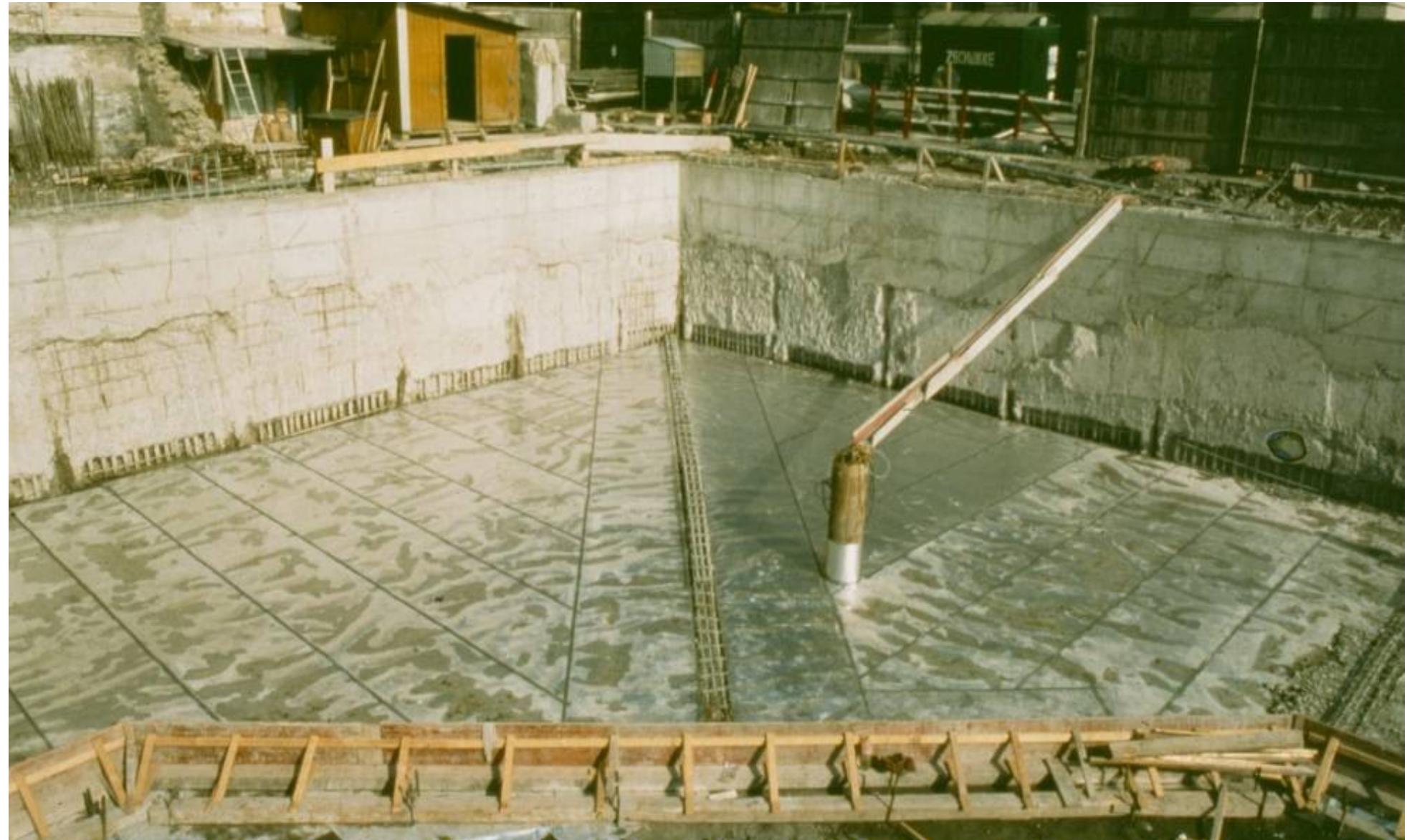
## Rabattement

Dispositif de rabattement essentiellement conditionné par la perméabilité du terrain  
Domaine d'utilisation et caractéristiques des dispositifs :

Sol	$k$ [m/s]	Dispositif	Mise en oeuvre	Equipement
Graviers Sables	$10^{-2}$	<b>Puits filtrants</b> $\phi_{int}$ : 200 - 300 mm Espacement: 10 - 20 m	Forage $\phi$ : 500 mm Profondeur: 30 - 60 m	Pompe immergée Débit: 10 - 150 m <sup>3</sup> /h
	$10^{-5}$			
Sables Sables fins	$10^{-4}$	<b>Micro-puits</b> $\phi_{int} \approx 100$ mm Espacement: 5 - 15 m	Forage $\phi$ : 200 mm Lançage Profondeur: 15 - 20 m	Hydro-éjecteur Débit $\approx 3$ m <sup>3</sup> /h
	$10^{-6}$			
Sables fins Limos	$10^{-5}$	<b>Pointes filtrantes</b> Wellpoints $\phi$ : 50 - 70 mm Espacement: 0.6 - 1.8 m	Lançage Profondeur: 7 m	Aspiration sous vide Débit unitaire: 0.5 - 1 m <sup>3</sup> /h Rabattement max: 5 - 6 m
	$10^{-7}$			

# Rabattement de nappe par puits filtrants

---



# Rabattement de nappe par puits filtrants

---



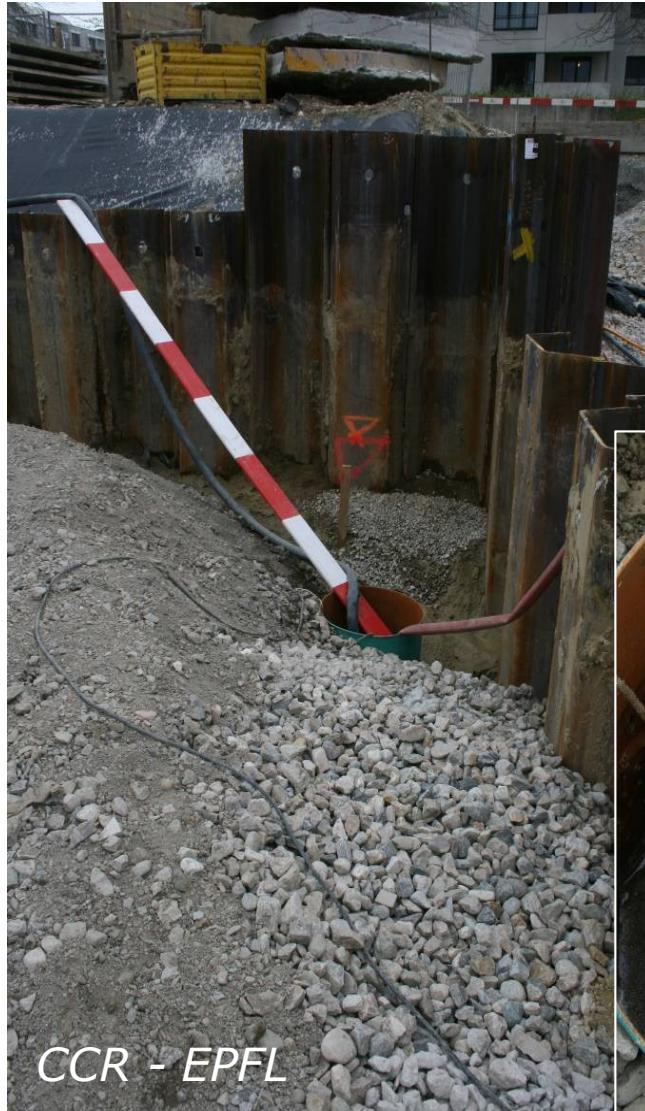
# Rabattement de nappe par pointes filtrantes

---



# Pompage de l'eau en fond de fouille

---



Puisard et pompe refoulante

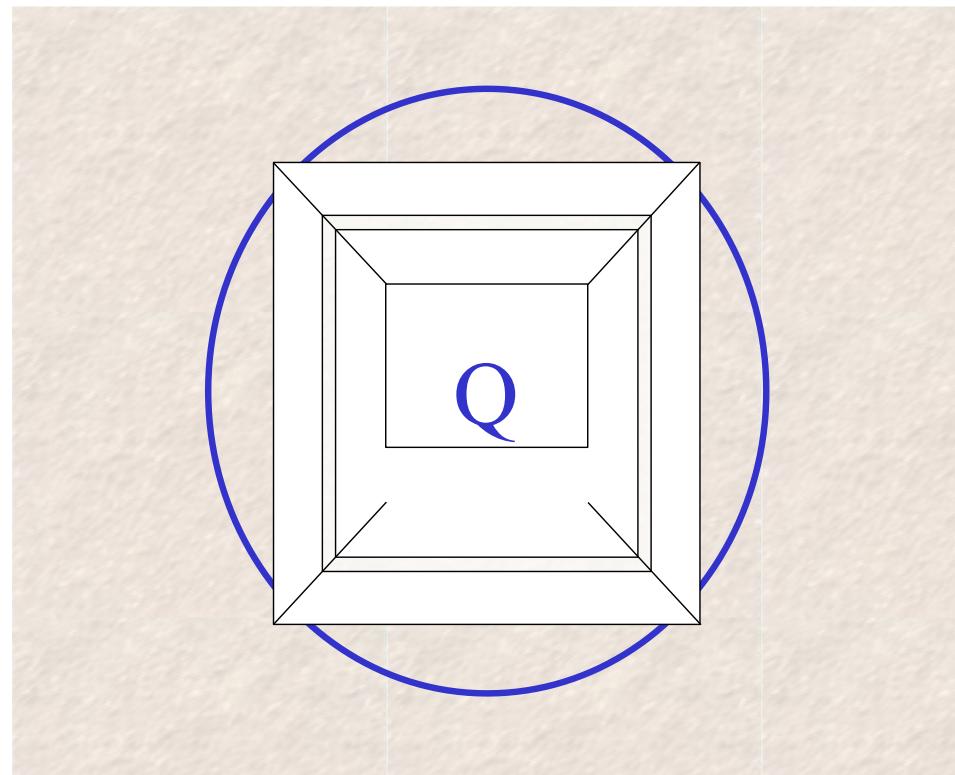
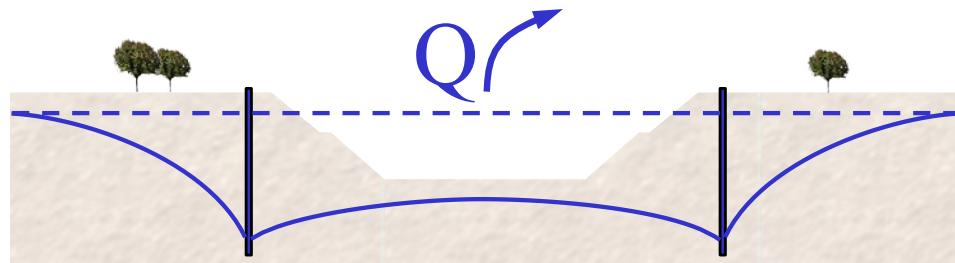
# Rabattement de la nappe phréatique - calcul

---

Principe:

1. Calcul du débit total à pomper

OUVRAGES  
GÉOTECHNIQUES



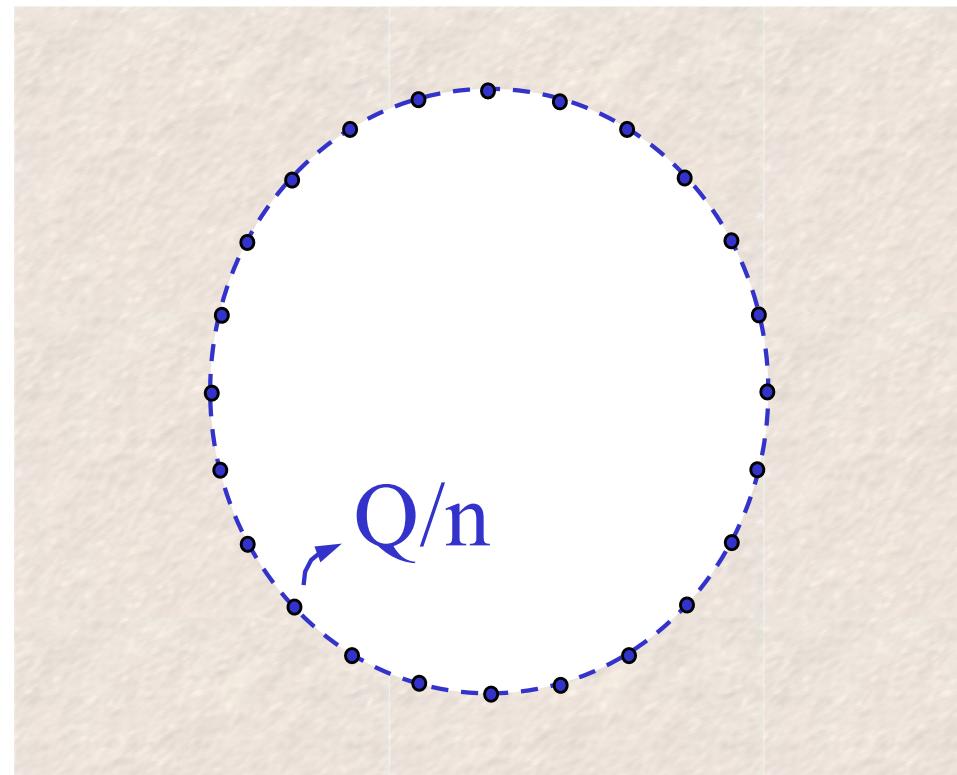
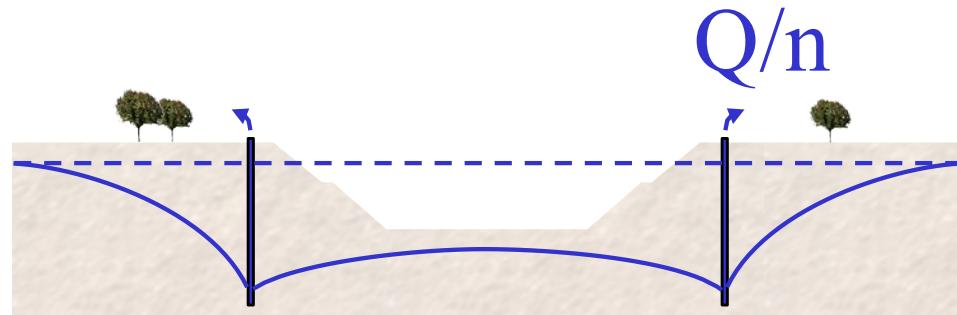
# Rabattement de la nappe phréatique - calcul

---

Principe:

1. Calcul du débit total à pomper

2. Calcul du nombre de puits



# Rabattement de la nappe phréatique - calcul

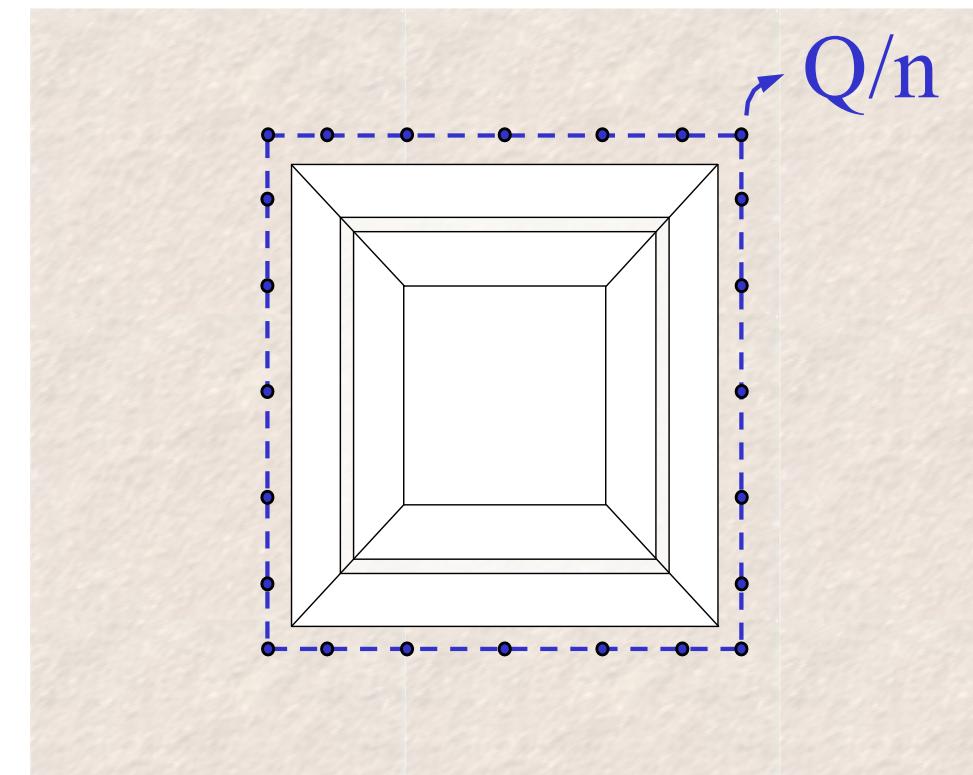
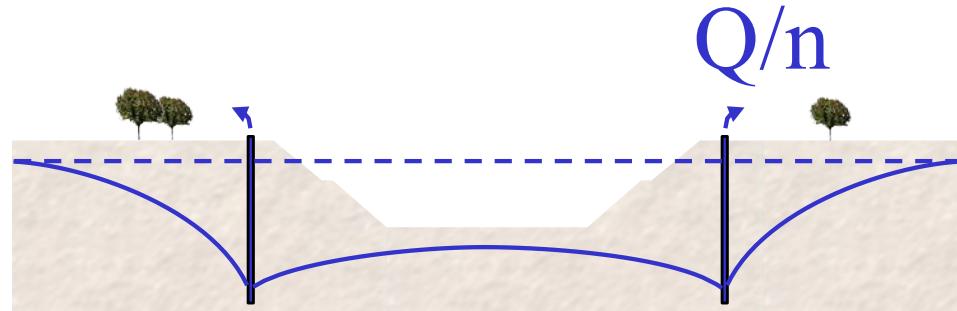
---

Principe:

1. Calcul du débit total à pomper

2. Calcul du nombre de puits

3. répartition spatiale des puits



# Rabattement de la nappe phréatique - calcul

## 1. Calcul du débit total à pomper

- pour une nappe libre ( $m > H$ )

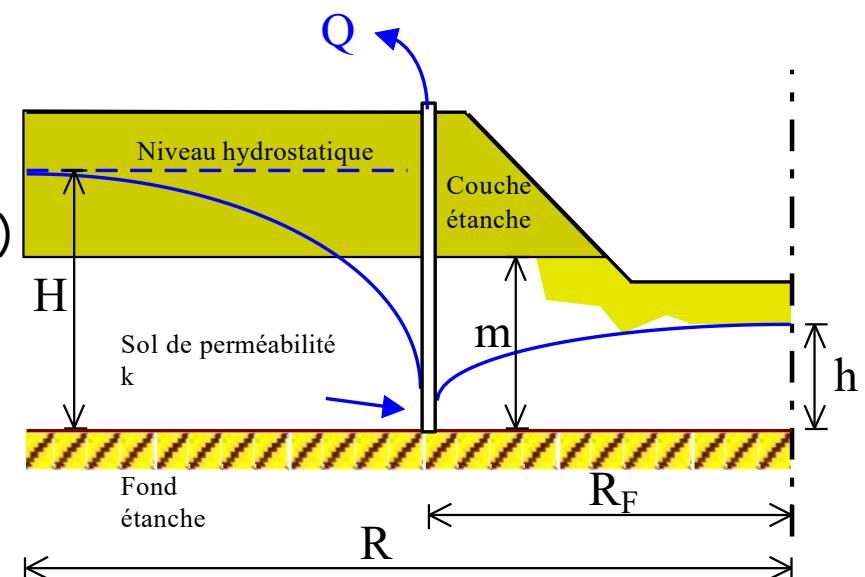
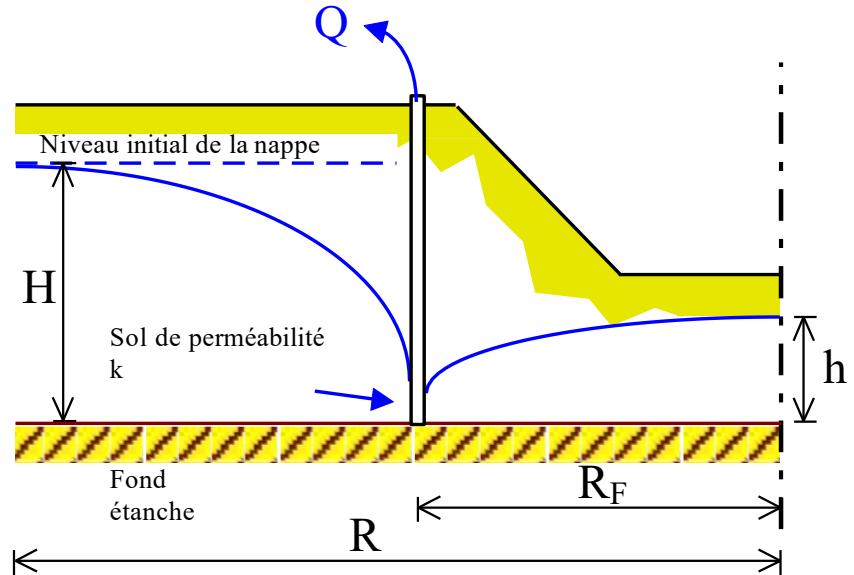
$$Q = \pi k \frac{H^2 - h^2}{\ln R/R_F}$$

- pour une nappe captive ( $H > h > m$ )

$$Q = 2\pi k \times m \frac{H - h}{\ln R/R_F}$$

- pour une nappe semi-captive ( $H > m > h$ )

$$Q = \pi k \frac{2mH - m^2 - h^2}{\ln R/R_F}$$



# Rabattement de la nappe phréatique - calcul

## Evaluation de R : Rayon d'action du pompage

- ordre de grandeur :

- sables et graviers	$R \approx 500 \div 3000 \text{ m}$
- sables grossiers	$R \approx 100 \div 1000 \text{ m}$
- sables fins	$R \approx 50 \div 200 \text{ m}$
- limons	$R \approx 30 \div 80 \text{ m}$

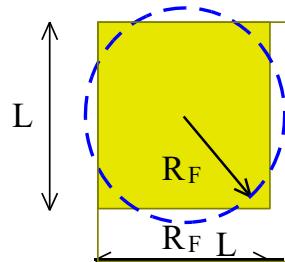
$(R > 30\text{m} \text{ au minimum})$

- Formule de Sichardt :  $R \approx 3000(H - h)\sqrt{k}$

expression empirique où R, H et h sont exprimés en [m] et k en [m/s]

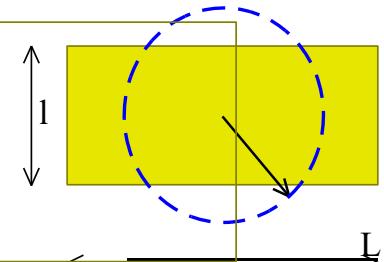
## Evaluation de $R_F$ : Rayon équivalent de la fouille

fouille carrée



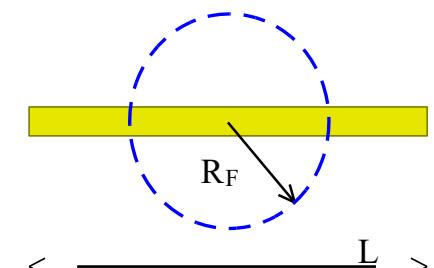
$$R_F = \frac{P}{6.8} = \frac{4L}{6.8} = \frac{L}{1.7}$$

fouille rectangulaire



$$R_F = \frac{P}{7.4} = \frac{L + l}{3.7}$$

fouille très allongée

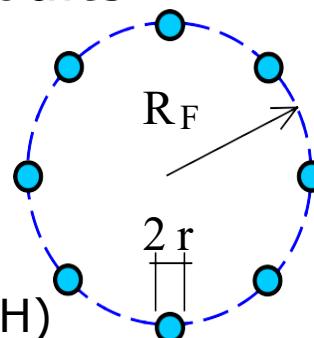


$$R_F \approx \frac{P}{8} \approx \frac{L}{4}$$

# Rabattement de la nappe phréatique - calcul

## 2. Calcul du nombre de puits

$$\ln\left(\frac{R_F}{N \times r}\right) \leq C \times N \times \ln\left(\frac{R}{R_F}\right)$$



- pour une nappe libre ( $m > H$ )

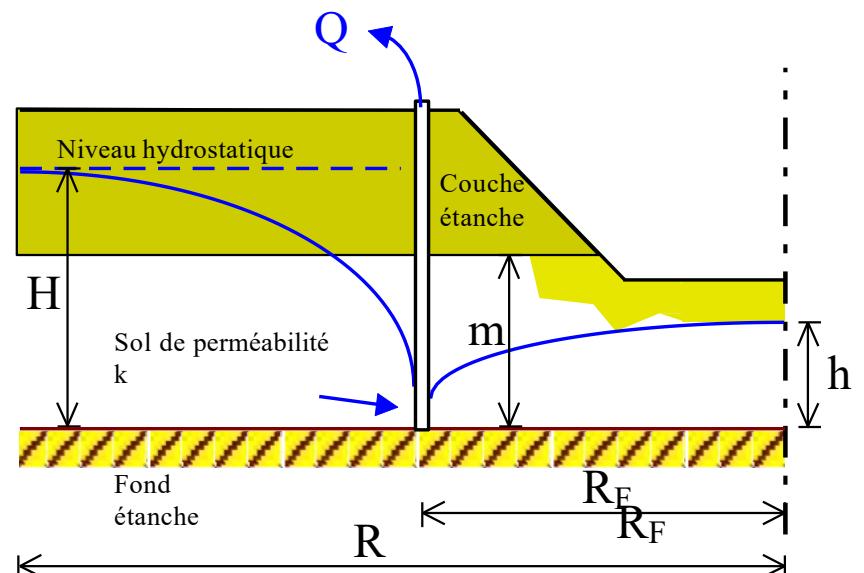
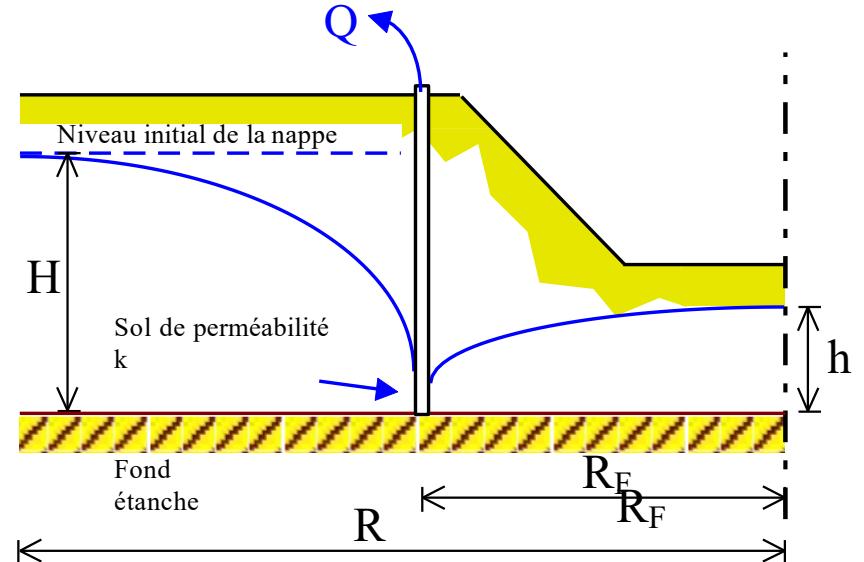
$$C = \frac{h^2}{H^2 - h^2}$$

- pour une nappe captive ( $H > h > m$ )

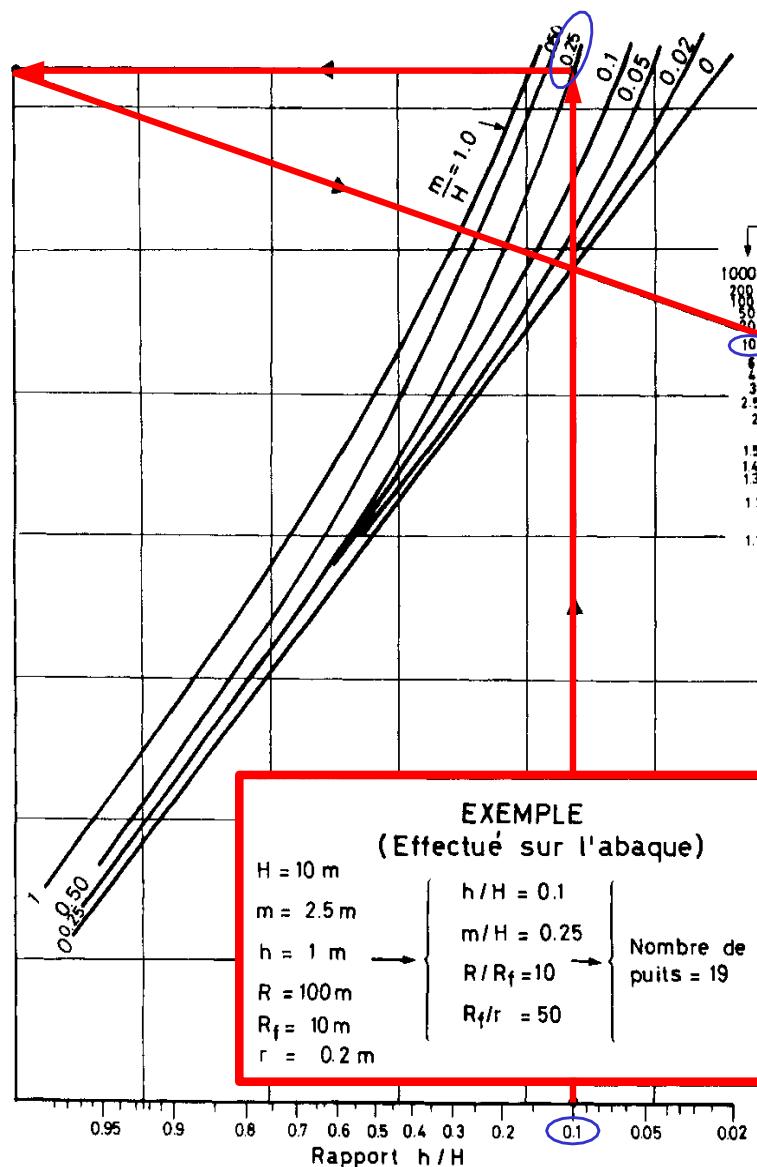
$$C = \frac{2h - m}{2(H - h)}$$

- pour une nappe semi-captive ( $H > m > h$ )

$$C = \frac{h^2}{2mH - m^2 - h^2}$$

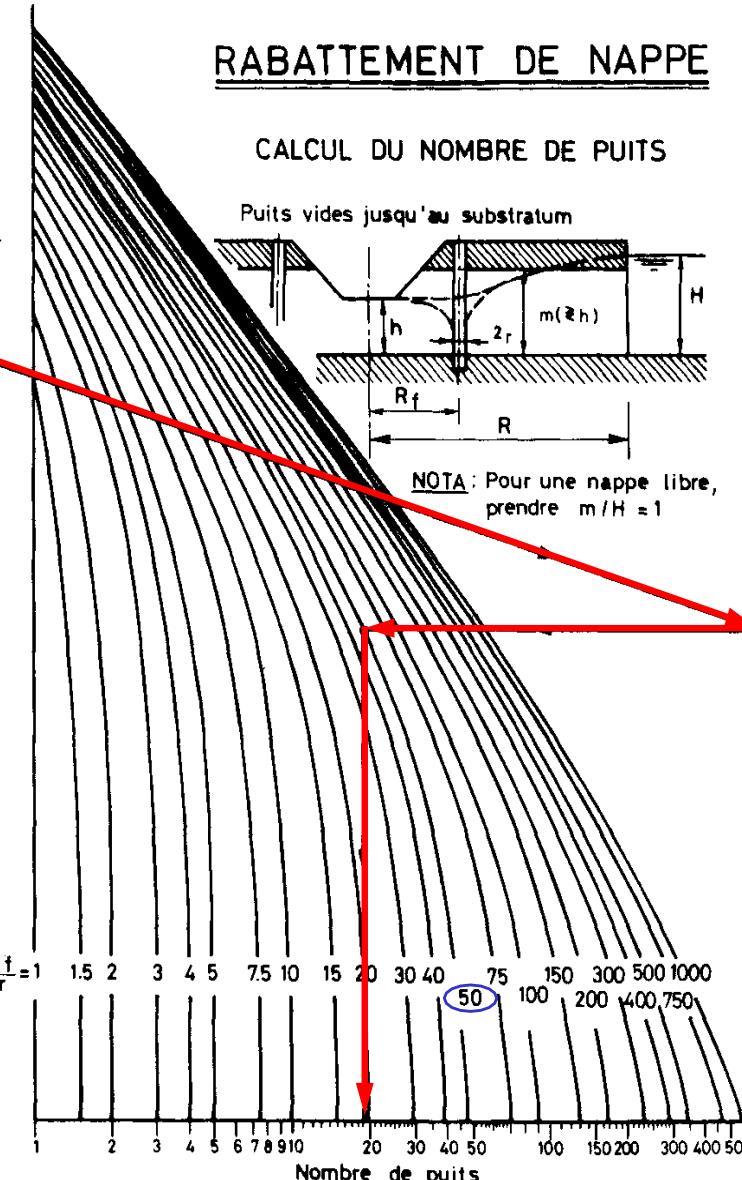
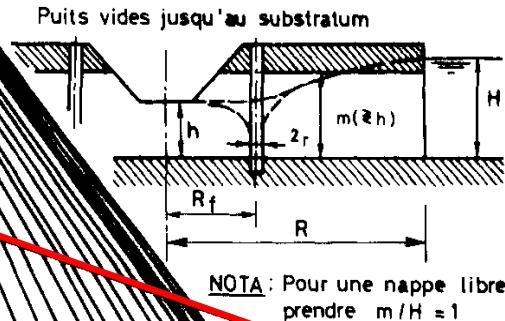


# Abaque pour le calcul du nombre de puits



## RABATTEMENT DE NAPPE

### CALCUL DU NOMBRE DE PUITS

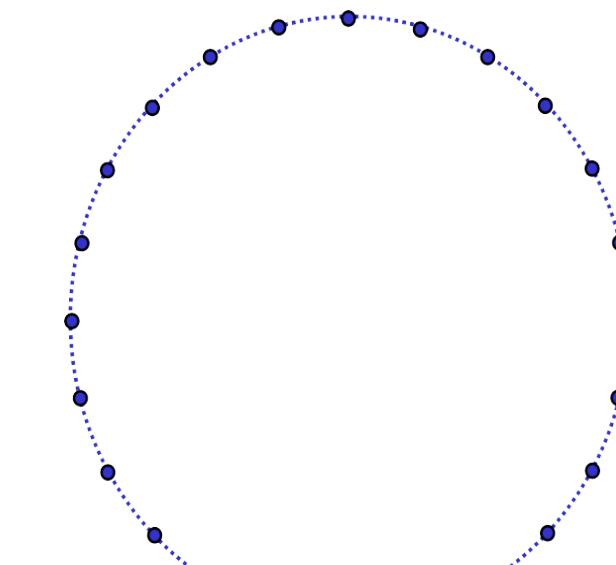
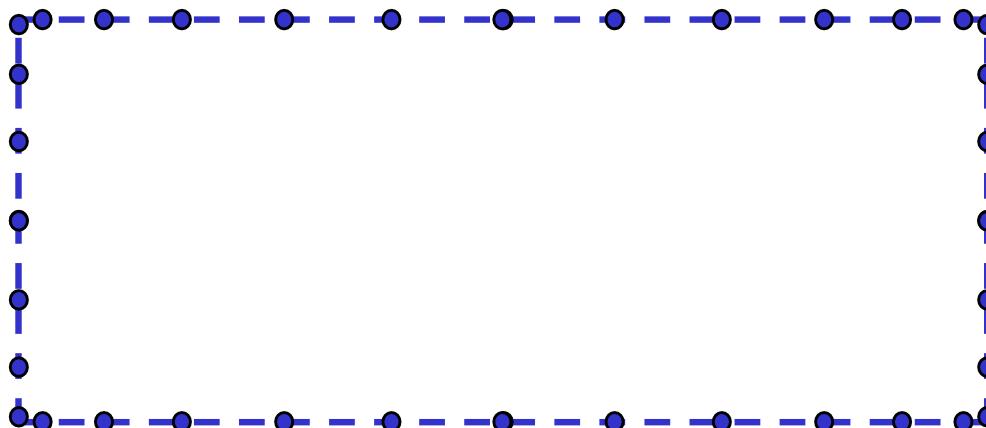


# Rabattement de la nappe phréatique - calcul

---

## 3. Répartition spatiale des puits autour de la fouille

- pour une fouille circulaire  
uniformément répartis
- pour une fouille rectangulaire  
concentrer les puits dans les  
angles



# Répartition spatiale des puits autour de la fouille

## REPARTITION NORMALE DE 100 PUISTS SUR UN PERIMETRE RECTANGULAIRE DE 100 CM

NOTA : - On a dessiné le quart du périmètre pour différentes formes d'enceintes, depuis le carré jusqu'à la fouille infiniment étroite (par rapport à sa longueur)



Les puits sont trois fois (carré) à dix fois (fouille très étroite) plus serrés aux angles qu'aux milieux des grands côtés

— Les puits doivent être un peu moins serrés aux angles dans trois cas :

- ① Puits nettement à l'extérieur de la fouille (disposition normale)
- ② Puits ne descendant pas jusqu'au substratum
- ③ Terrain très hétérogène

EXEMPLE D'APPLICATION: 36 puits sur un rectangle de 120 m x 45 m

1) - Périmètre :  $2 \cdot (120 \text{ m} + 45 \text{ m}) = 330 \text{ m}$  Le croquis est alors au 1 / 330

2) - Longueur du demi grand côté, AB sur le croquis :  $\frac{1}{2} \cdot \frac{120}{330} = 18.2 \text{ cm}$

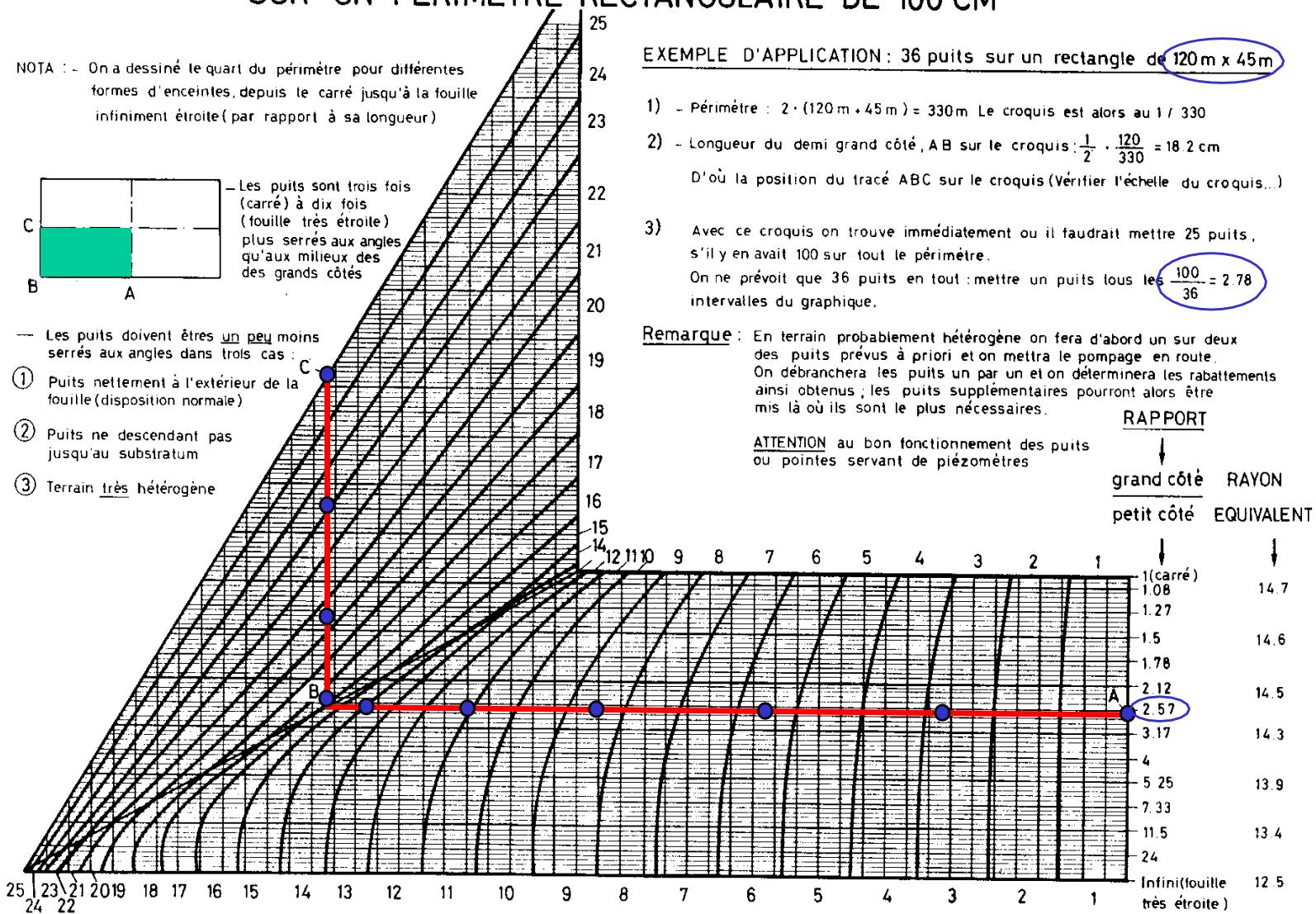
D'où la position du tracé ABC sur le croquis (Vérifier l'échelle du croquis...)

3) Avec ce croquis on trouve immédiatement ou il faudrait mettre 25 puits, s'il y en avait 100 sur tout le périmètre.

On ne prévoit que 36 puits en tout : mettre un puits tous les  $\frac{100}{36} = 2.78$  intervalles du graphique.

Remarque: En terrain probablement hétérogène on fera d'abord un sur deux des puits prévus à priori et on mettra le pompage en route. On débranchera les puits un par un et on déterminera les rabattements ainsi obtenus ; les puits supplémentaires pourront alors être mis là où ils sont le plus nécessaires.

RAPPORT	
grand côté	RAYON
petit côté	EQUIVALENT
1 (carré)	14.7
1.08	
1.27	
1.5	14.6
1.78	
2.12	
2.57	14.5
3.17	14.3
4	
5.25	13.9
7.33	
11.5	13.4
24	
Infini (fouille très étroite)	12.5



# **RENARD HYDRAULIQUE / FOUILLES**

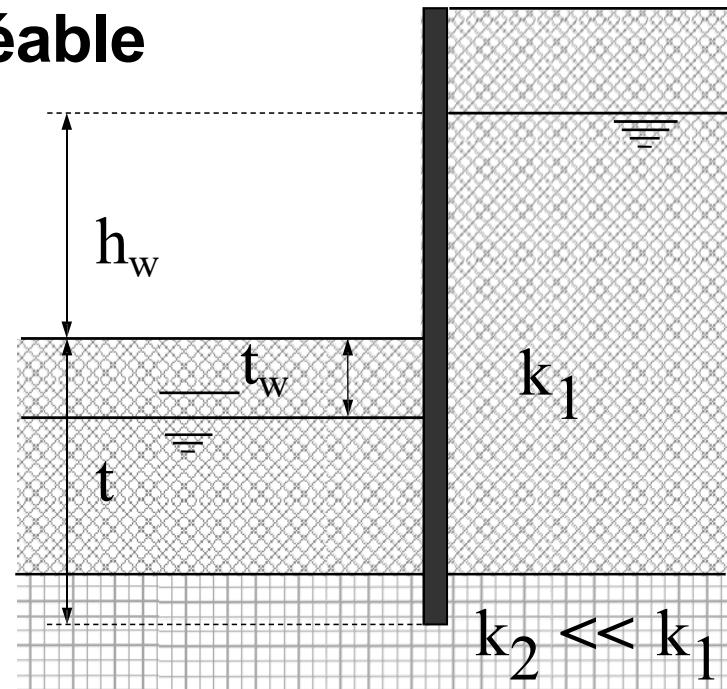
# 1<sup>ère</sup> méthode simplifiée

---

Terrain hétérogène

Paroi fichée dans une couche **peu perméable**

- pas (peu) d'écoulement
- gradient hydraulique nul :  $i = 0$
- aucun risque de renard



Une telle situation est avantageuse d'un point de vue de la sécurité hydraulique et économie de pompage. Elle est à préconiser si la couche « imperméable » se trouve à une profondeur raisonnable sous le fond de fouille. Attention à assurer une longueur suffisante de paroi dans la couche imperméable.

## 2<sup>ème</sup> méthode simplifiée

---

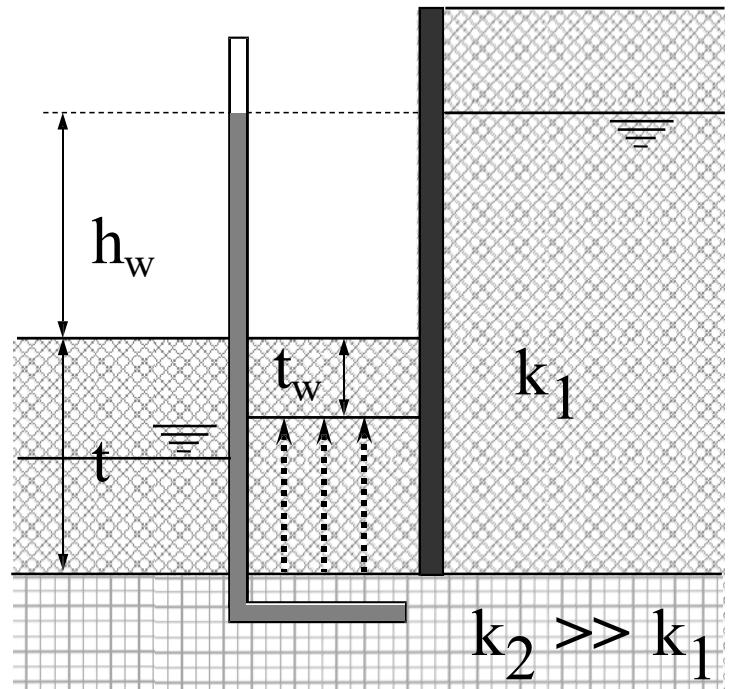
Terrain hétérogène et Paroi fichée dans une **couche très perméable**  
ou

Terrain stratifié avec perméabilité anisotrope ( $k_h \gg k_v$ )

- perte de charge uniquement à l'aval
- gradient hydraulique maximal :

$$i = \frac{h_w + t_w}{t - t_w}$$

- risque de renard maximal



Si la stabilité hydraulique n'est pas assurée, il est nécessaire de réduire la charge hydraulique dans la couche perméable en prévoyant des puits de décharge gravitaire ou un rabattement.

## 3<sup>ème</sup> méthode simplifiée

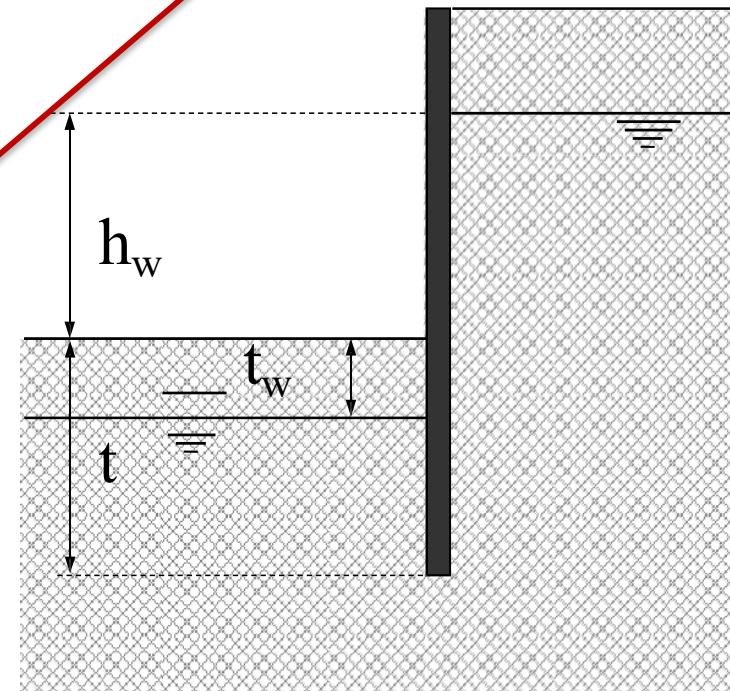
Terrain homogène et isotrope

et

hypothèse que le gradient hydraulique  
est constant le long de la paroi

→ gradient hydraulique :

$$i = \frac{h_w + t_w}{h_w + 2 \cdot t - t_w}$$



Il est à noter que cette hypothèse d'un gradient constant le long de la paroi n'est pas du côté de la sécurité. La force d'écoulement agissant sous le fond de fouille est en **effet sous-évaluée**.

# Solution de Mandel

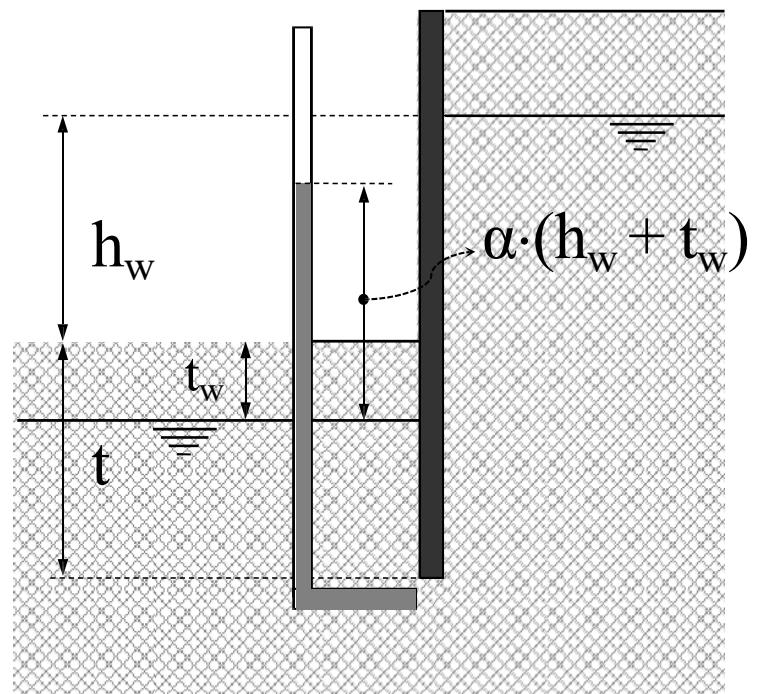
---

Couche homogène et isotrope, d'épaisseur infinie  
Fouille de largeur infinie

Mandel a résolu le problème analytiquement. La solution exacte pour la perte de charge due à l'écoulement s'écrit  
(attention perte de charge moyenne)

$$\tan(\pi \cdot \alpha) - \pi \cdot \alpha = \pi \cdot \frac{t - t_w}{h_w + t_w}$$

avec :  $\alpha = \frac{\text{perte de charge à l'aval}}{\text{perte de charge totale}}$



Equation implicite pour obtenir  $\alpha$

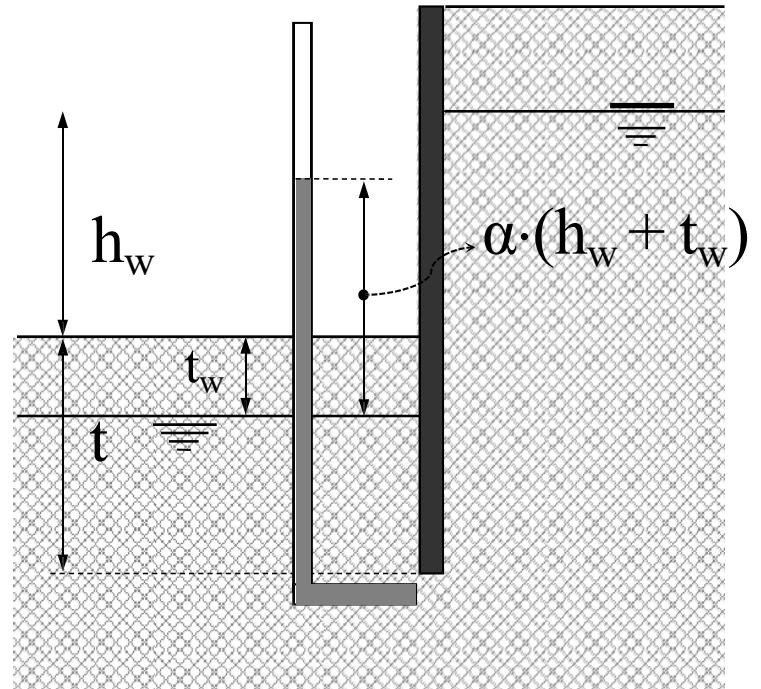
# Solution de Mandel

---

*Solution de l'équation pour diverses valeurs du rapport  $(h_w + t_w)/(t - t_w)$  :*

$\frac{h_w + t_w}{t - t_w}$	0	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	5.0
$\alpha$	0.5	0.46	0.43	0.41	0.39	0.36	0.33

→ perte de charge à l'aval :  $\alpha \cdot (h_w + t_w)$



→ gradient hydraulique à l'aval :  $i_{aval} = \frac{\alpha \cdot (h_w + t_w)}{t - t_w}$

→ gradient hydraulique à l'amont :  $i_{amont} = \frac{(1 - \alpha) \cdot (h_w + t_w)}{h_w + t}$

# Mandel

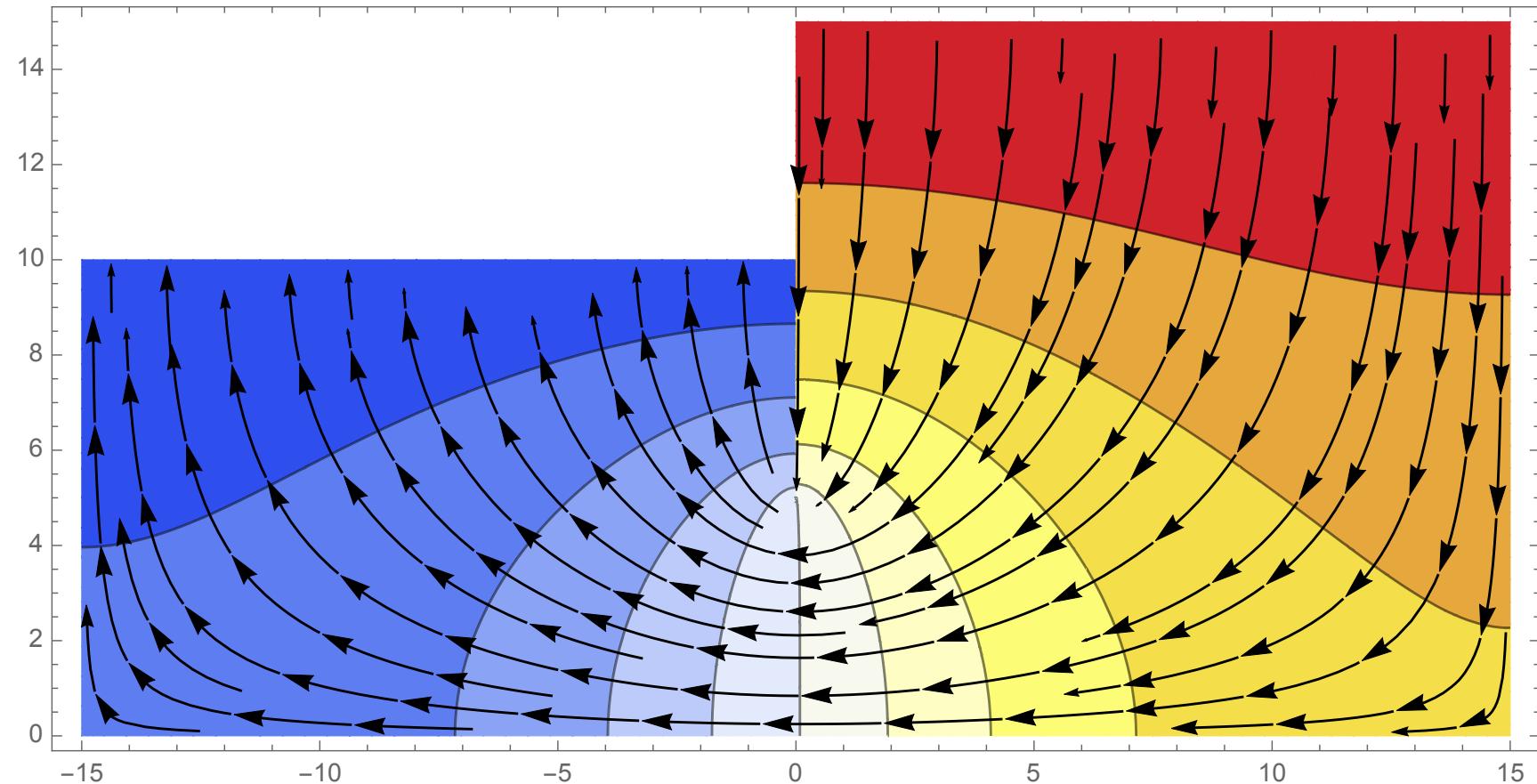
---

- Approximation pour  $(h_w + t_w)/(t - t_w) < 10$

$$\alpha \approx 0.095 + \frac{0.81}{1 + \sqrt{1 + (h_w + t_w)/(t - t_w)}}$$

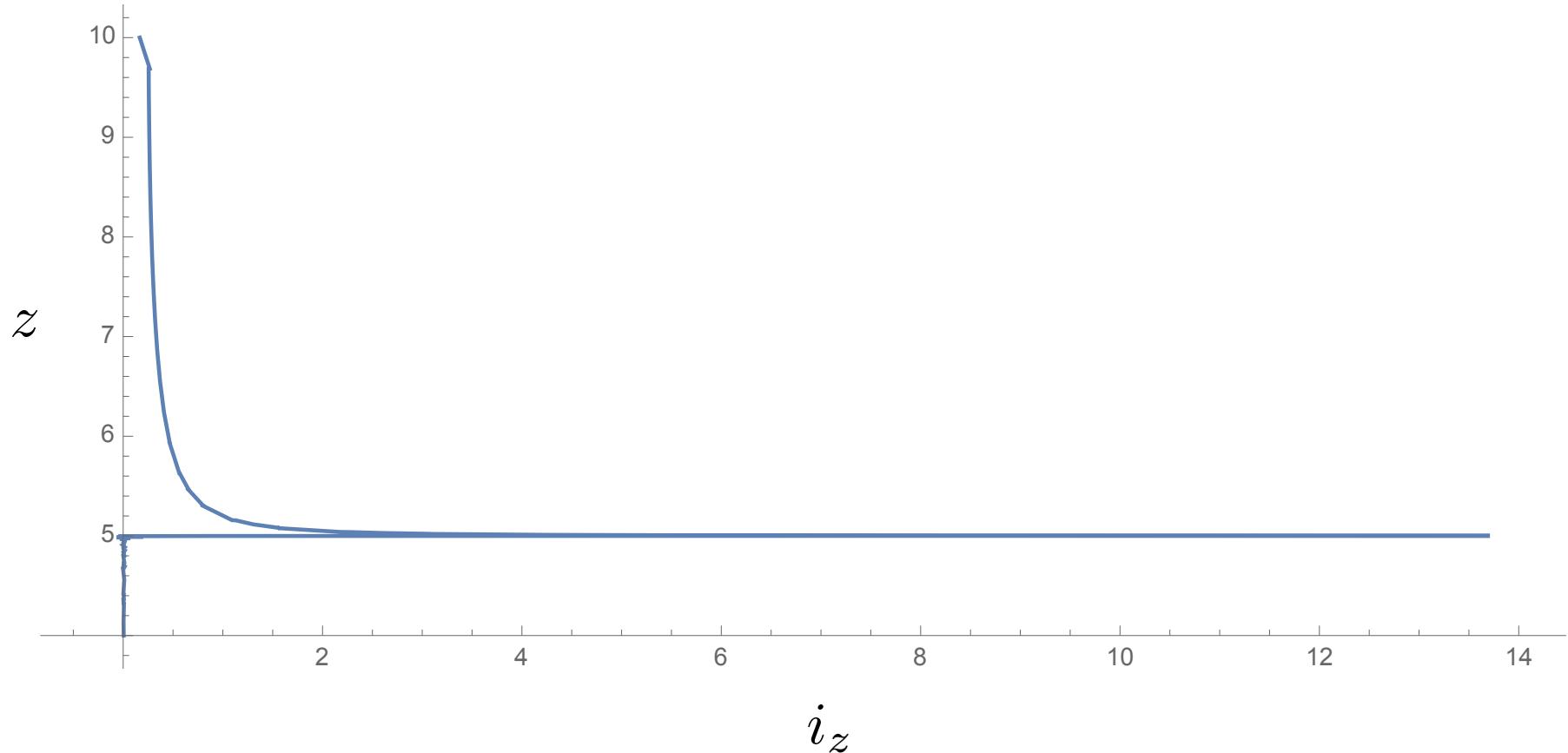
# Exemple numérique

---



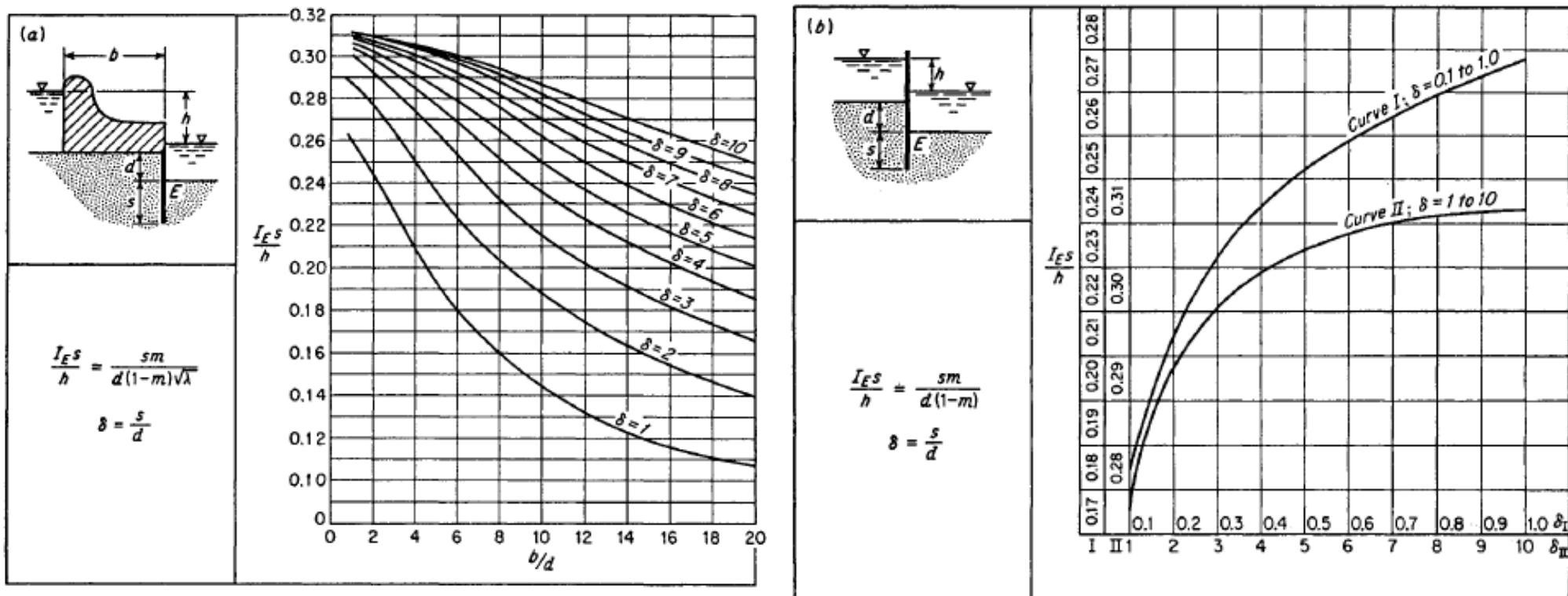
# Exemple numérique

---

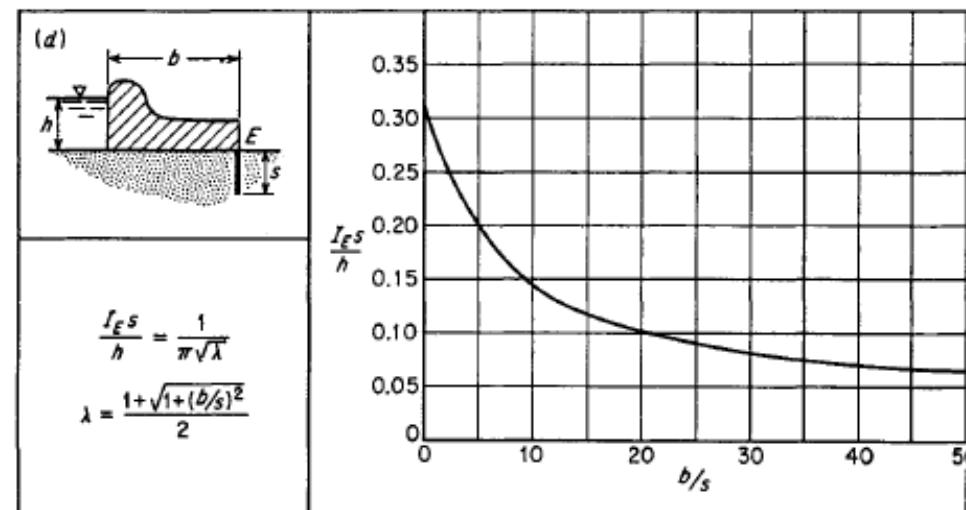


Mandel donne le gradient moyen  
Le gradient est le plus élevé en pied !

# Abaques pour le gradient de sortie (point E)



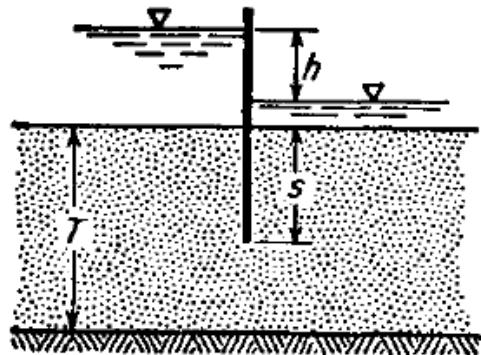
Tiré de Harr



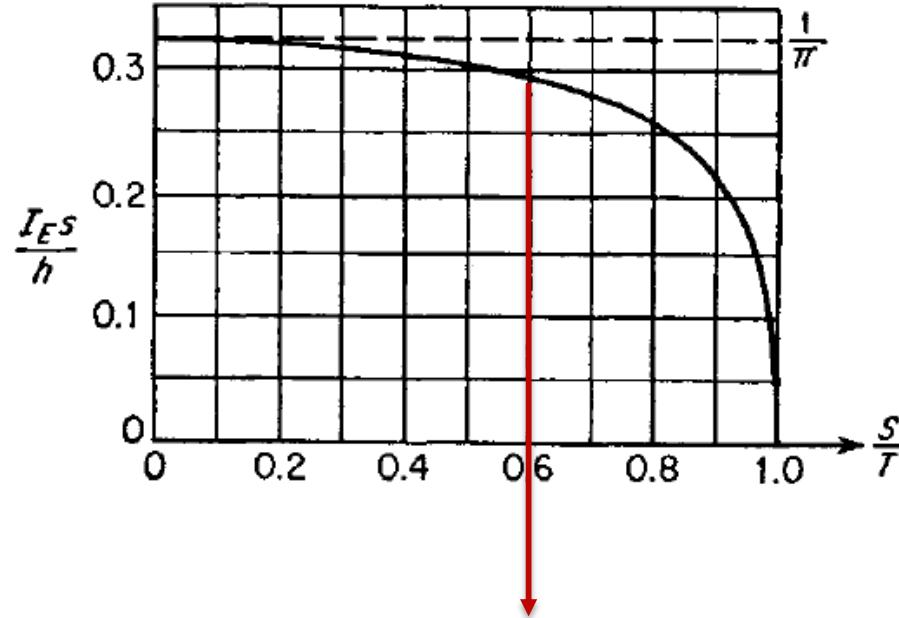
! Différent du gradient moyen !

# Effet d'une couche imperméable

---

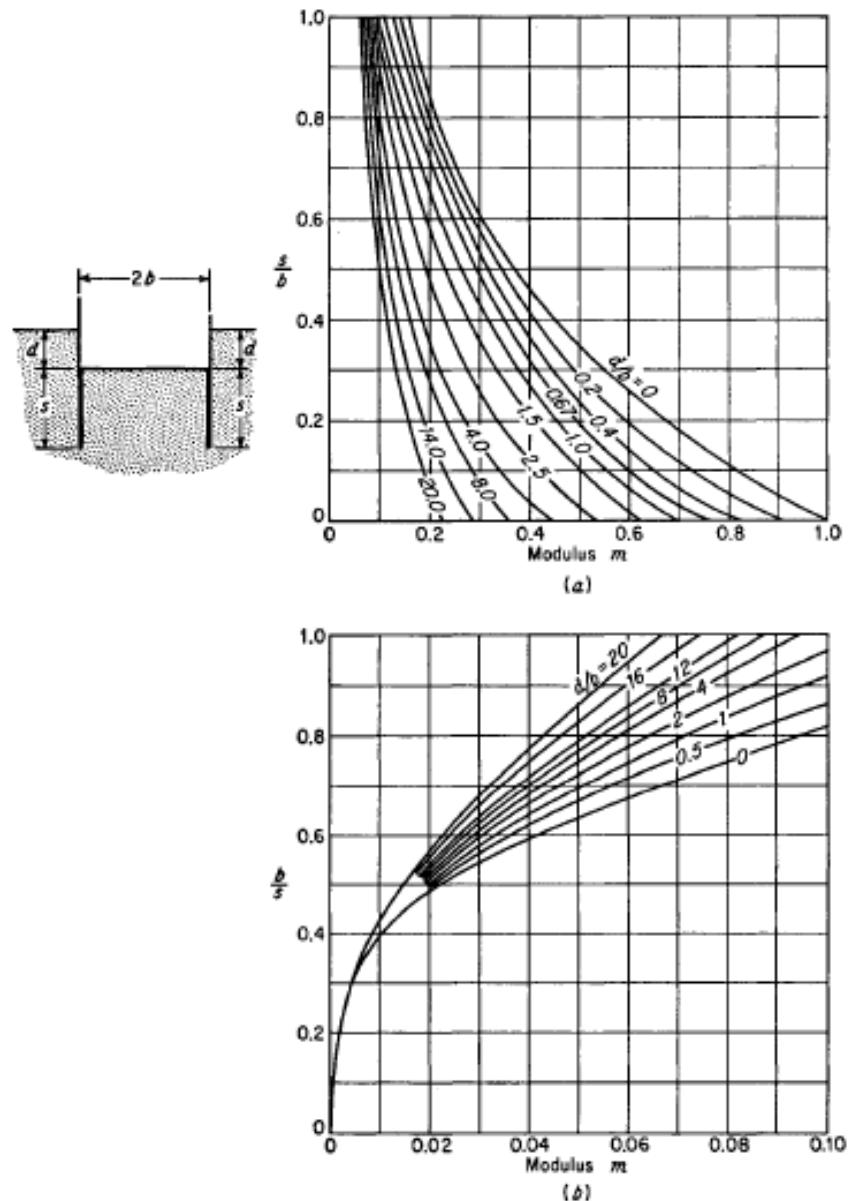
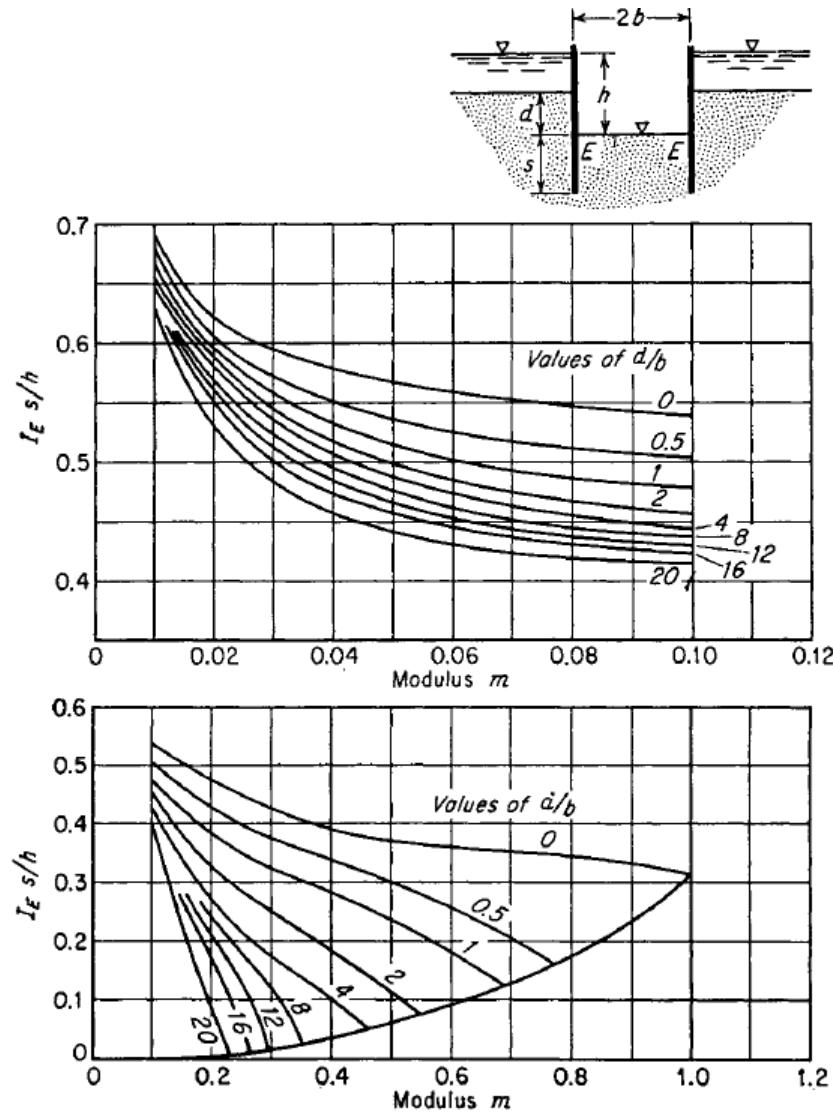


Abaque pour le gradient de sortie



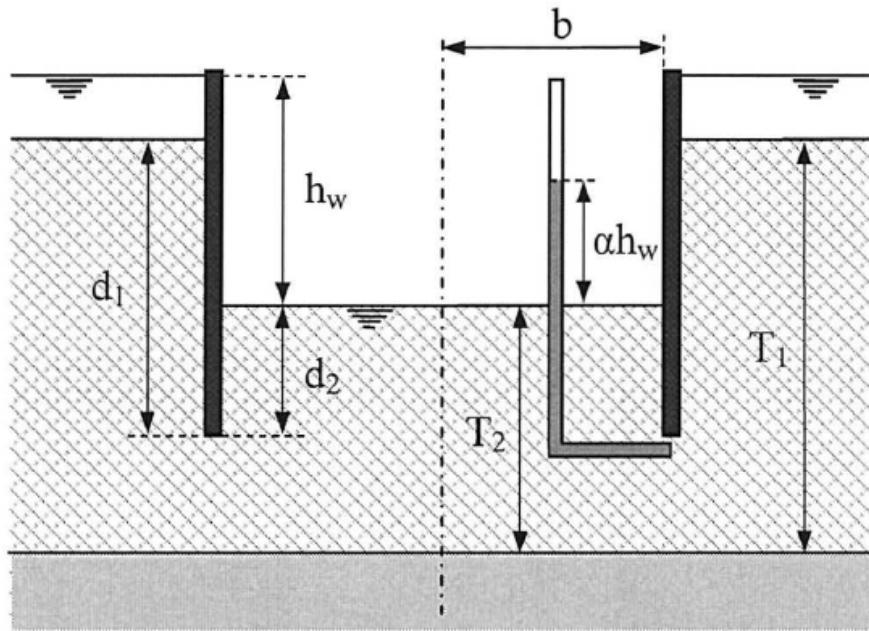
Effet <10% relatif pour  $s/T < 0.6$

# Maille sèche (cofferdam)

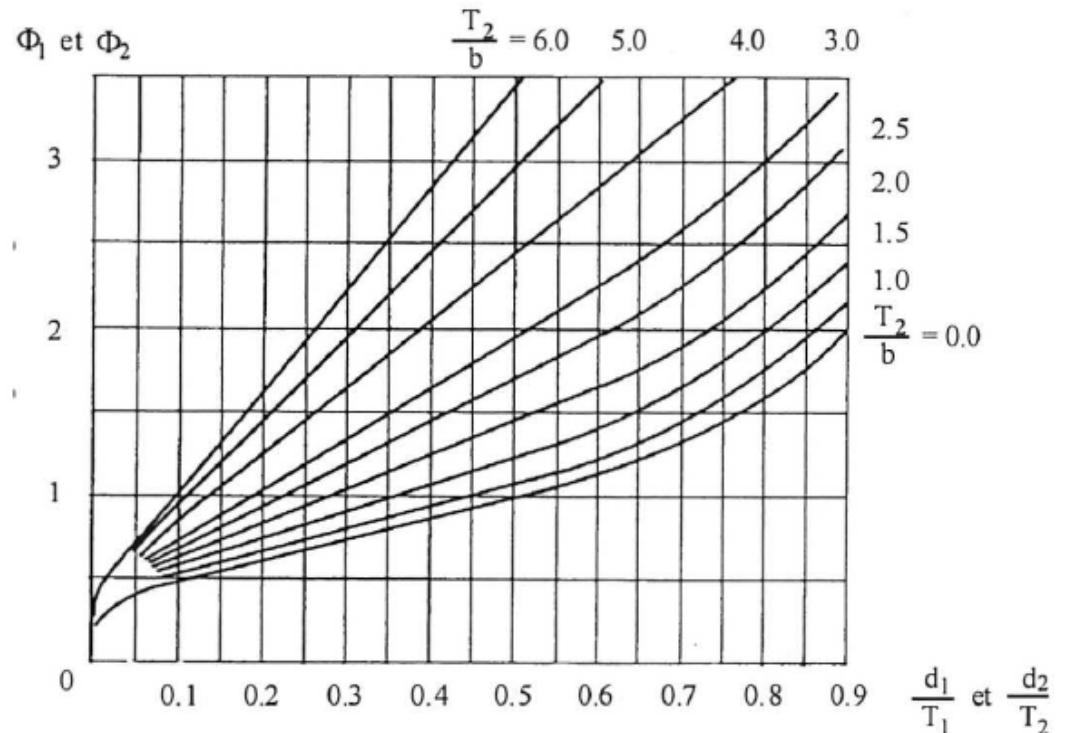


Abaques pour le gradient de sortie maximum (tiré de Harr)

# Davidenkoff



$$\Phi_{1,2}(d_1/T_1, d_2/T_2)$$



- Perte de charge aval (moyenne)

$$\alpha h_w = \frac{\Phi_2}{\Phi_1 + \Phi_2} h_w$$

$$\text{Débit (/m')} \quad q = \frac{k}{\Phi_1 + \Phi_2} h_w$$

- Enceintes fermées

Circulaire ( $R=b$ )

$$\alpha h_w = 1.3 \frac{\Phi_2}{\Phi_1 + \Phi_2} h_w$$

$$Q = (2\pi b) 0.8 \frac{k}{\Phi_1 + \Phi_2} h_w$$

Carrée ( $b = \frac{1}{2}$  coté)

$$\alpha h_w = 1.3 \frac{\Phi_2}{\Phi_1 + \Phi_2} h_w \text{ (coté)}$$

$$\alpha h_w = 1.2 \frac{\Phi_2}{\Phi_1 + \Phi_2} h_w \text{ (coin)}$$

$$Q = 0.7 \times 8b \frac{k}{\Phi_1 + \Phi_2} h_w$$

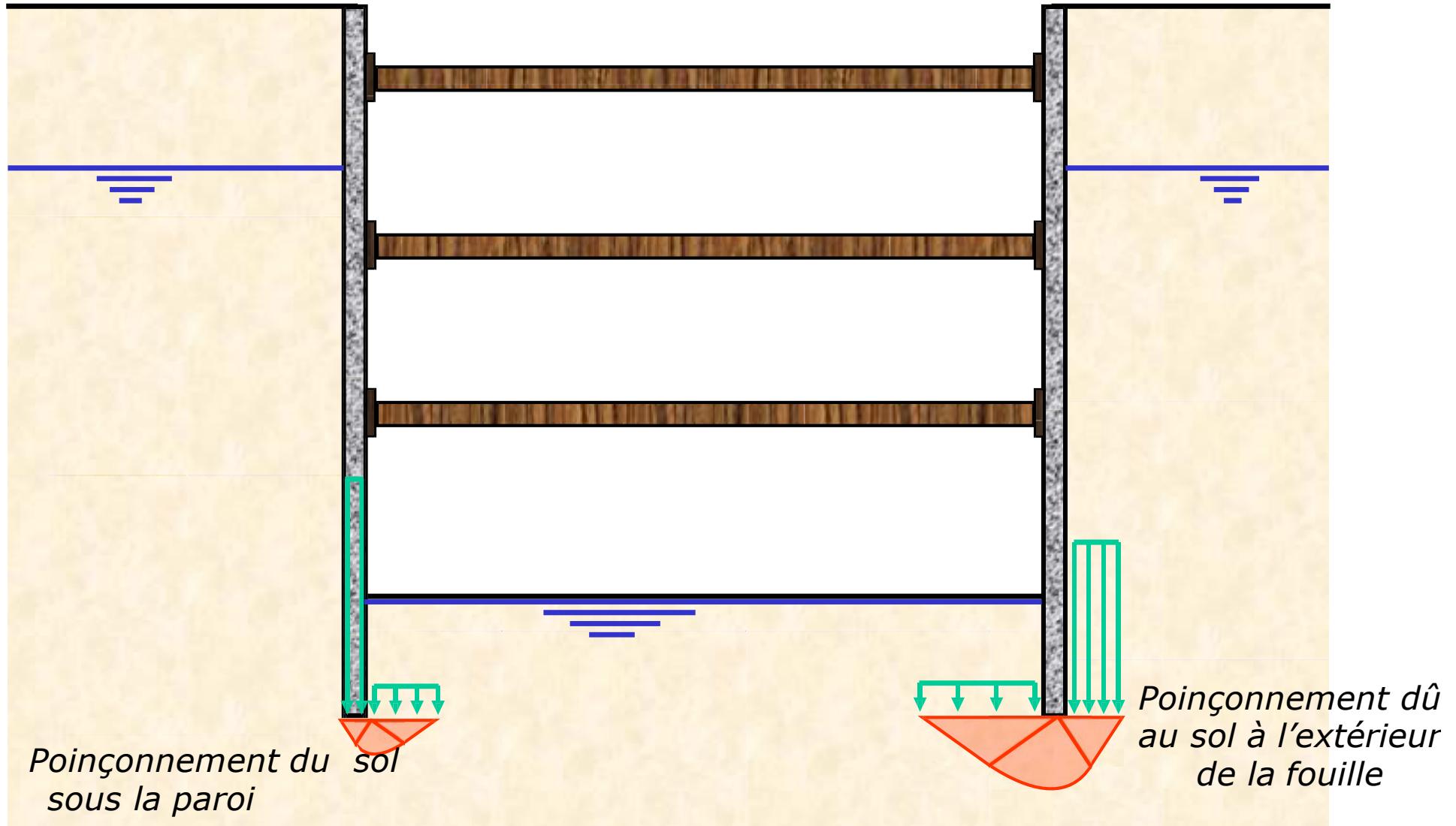
Rectangulaire

$$Q = 2 \frac{k}{\Phi_1 + \Phi_2} h_w L \left( 1 + \frac{B}{L} \right) \times \left( 1 - 0.3 \frac{B}{L} \right)$$

**RENARD SOLIDE**

# Soulèvement du fond de fouille par défaut de portance du sol

---



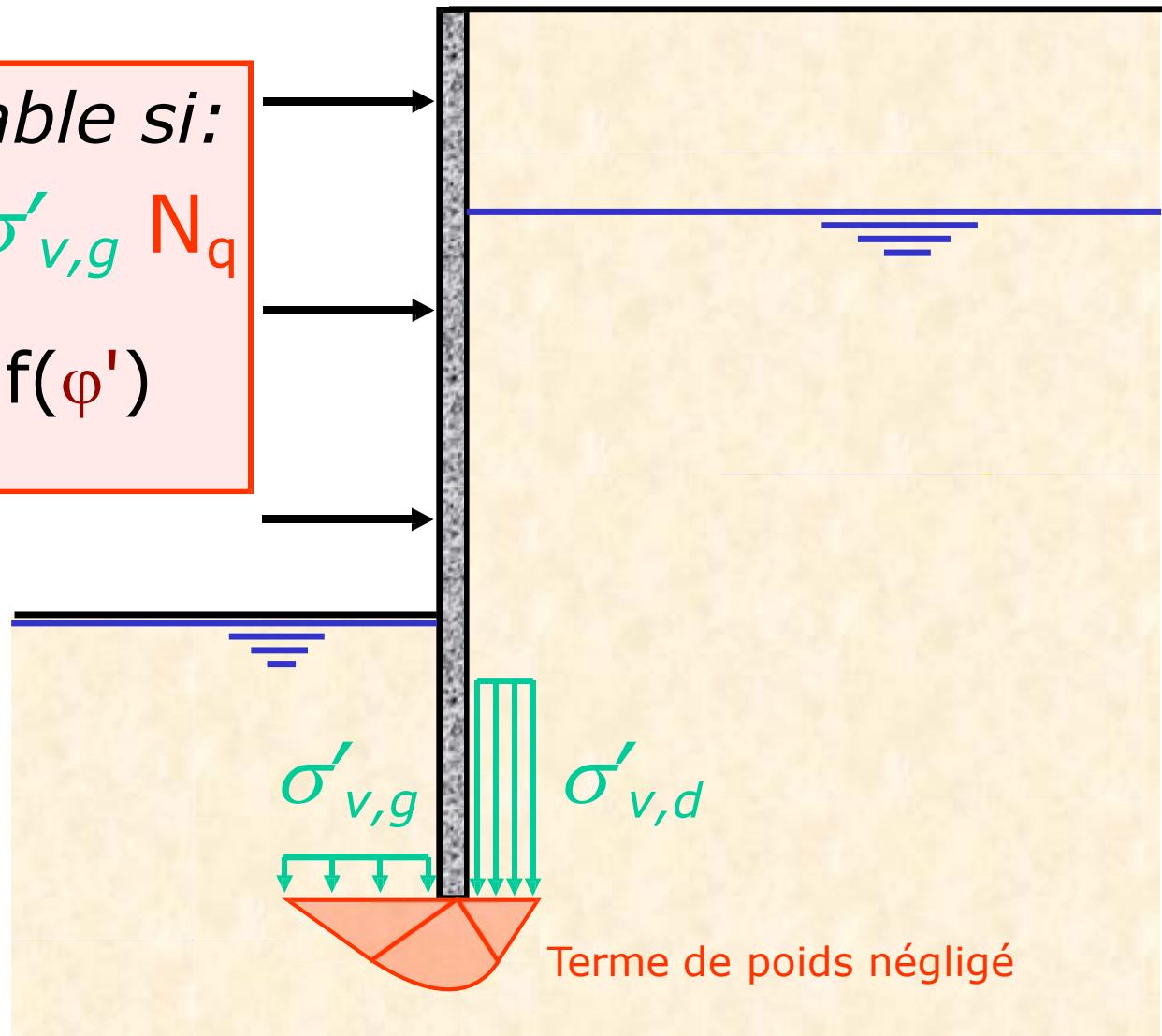
Par analogie avec la portance pour une fondation superficielle

---

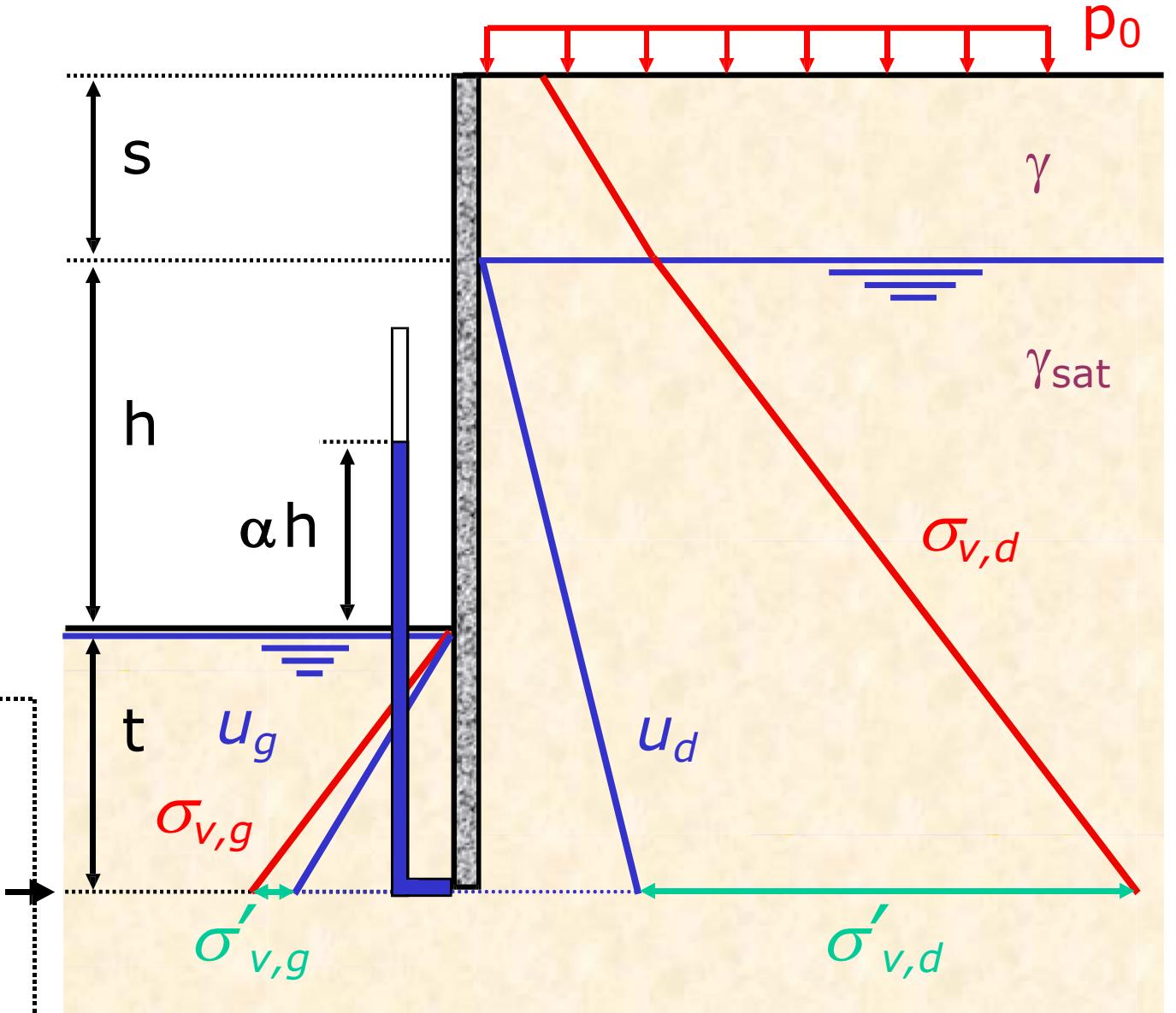
*Fond de fouille stable si:*

$$\sigma'_{v,d} < c' N_c + \sigma'_{v,g} N_q$$

avec  $N_c$  et  $N_q = f(\phi')$

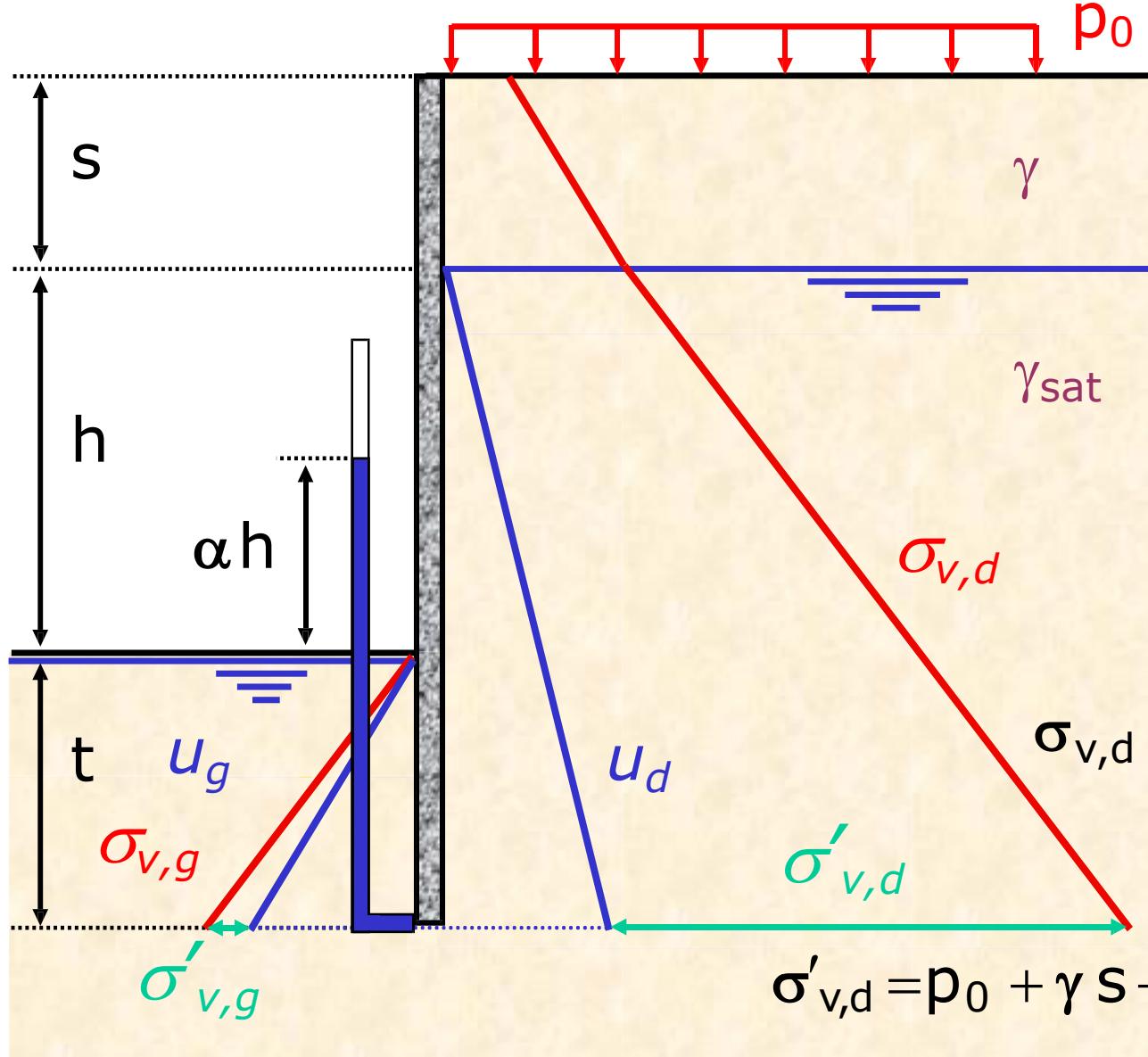


# Contraintes à gauche (côté fouille)



# Contraintes à droite (côté terrain)

---



$$\sigma'_{v,d} = p_0 + \gamma s + \gamma_{sat} (h + t)$$

$$u = \gamma_w (t + \alpha h)$$

$$\sigma'_{v,d} = p_0 + \gamma s + \gamma' (h + t) + \gamma_w (1 - \alpha) h$$

# Vérification avec facteur global de sécurité

