

Hydraulique des sols

Rupture hydraulique

Calculs en régime permanent autour d'ouvrages

Rabattement de la nappe autour des fouilles

Brice lecampion



-
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

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

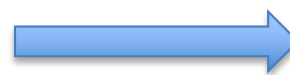
$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0$$

- 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

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

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

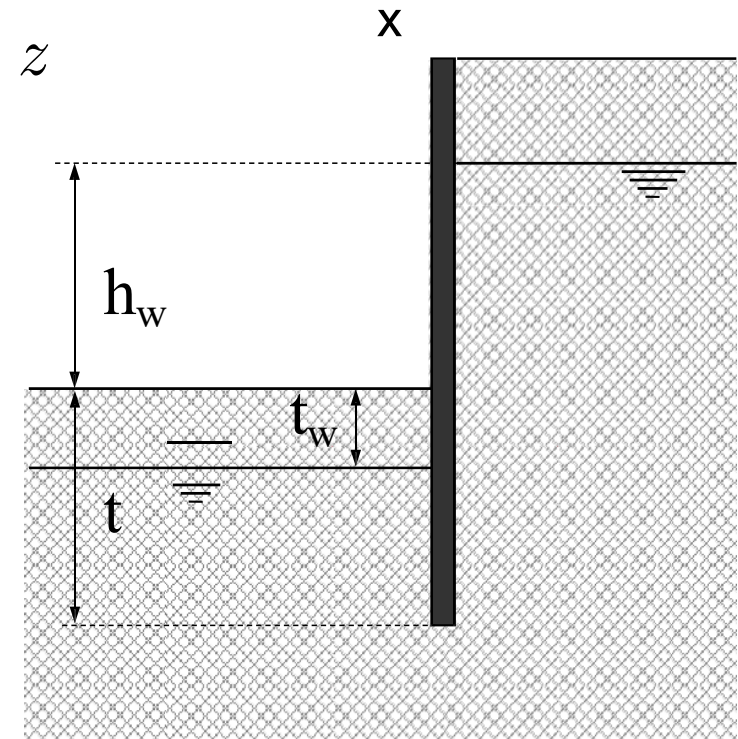
Composantes des forces d'écoulement:

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

Force de pesanteur
déjaugée

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

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



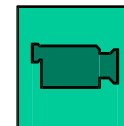
Risque de renard hydraulique
lorsque la résultante des forces
d'écoulement est > à la force de
pesanteur déjàugée

-> gradient hydraulique critique
(vers le haut) :

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

Mise en boullance de sable dans une colonne

(renard hydraulique)



Laboratoire réalisé en 2011 par

- Alessandro d'Amario
- Raphaël Coquoz

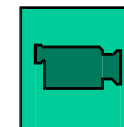
Mise en boullance au pied d'une paroi

(renard hydraulique)



Paroi dont le déplacement est entravé sur toute la hauteur

→ *rupture
très
progressive*

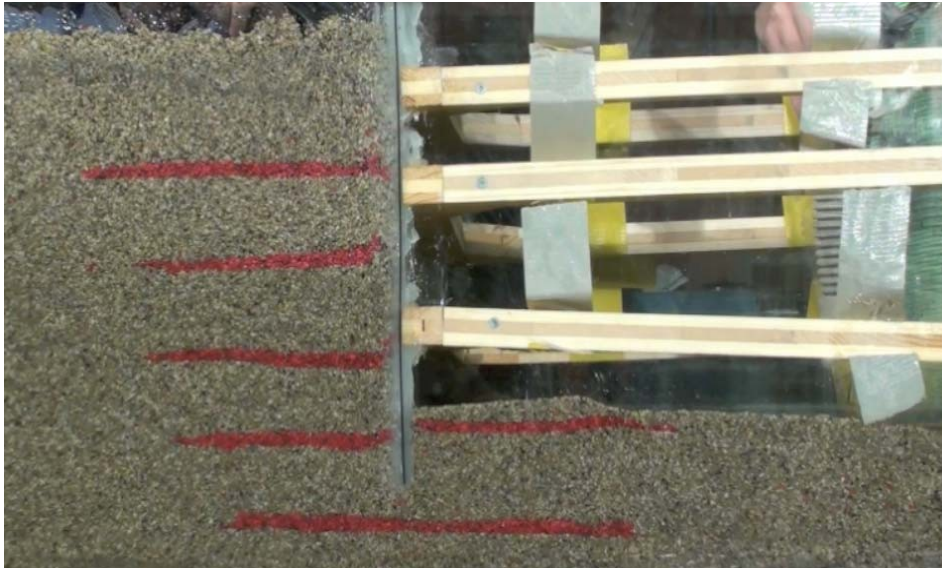


Laboratoire réalisé en 2011 par

- Alessandro d'Amario
- Raphaël Coquoz

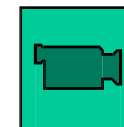
Défaut de butée et de portance au pied d'une paroi

(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

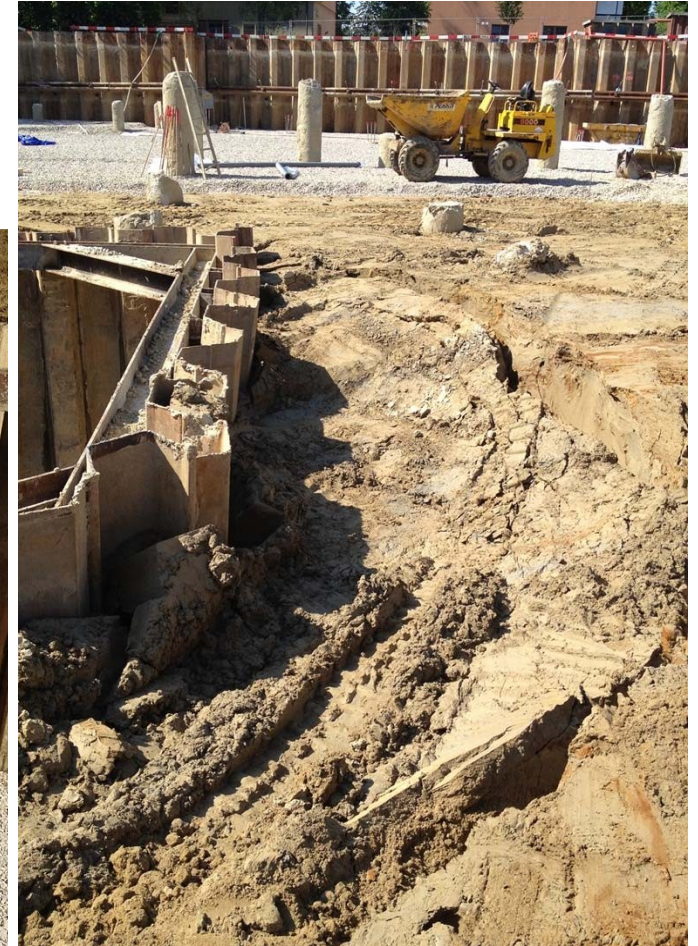
- Alessandro d'Amario
- Raphaël Coquoz



Instabilité d'origine hydraulique



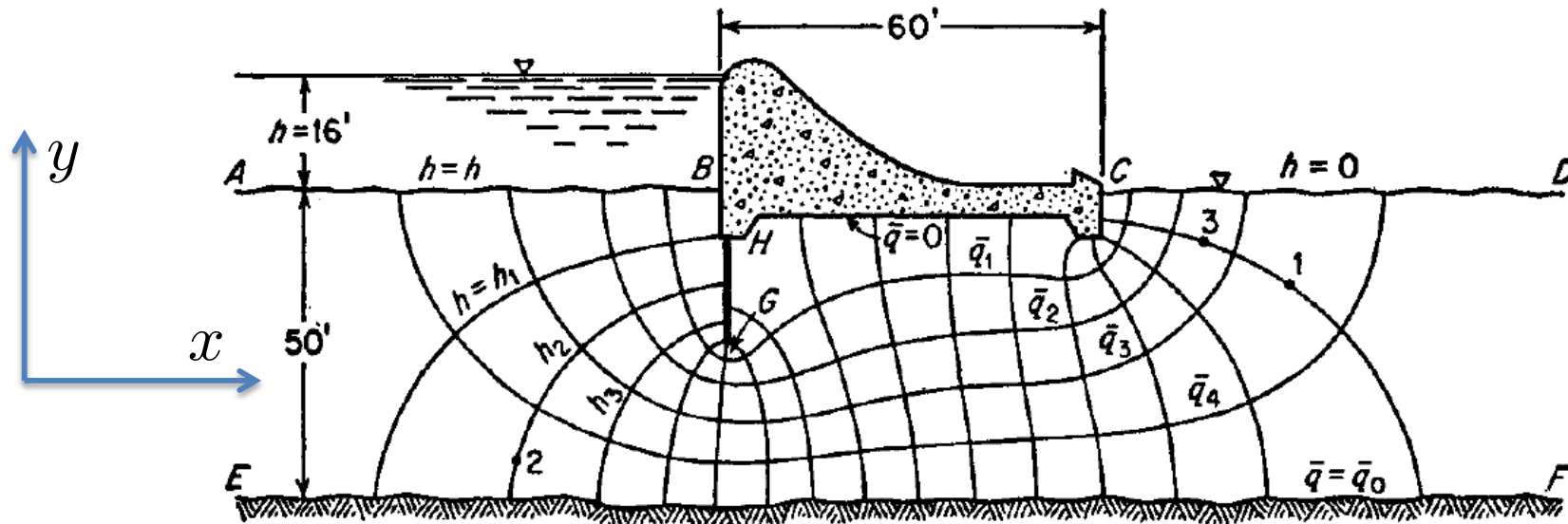
karakas & française
K géotechnique
géotechniques



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

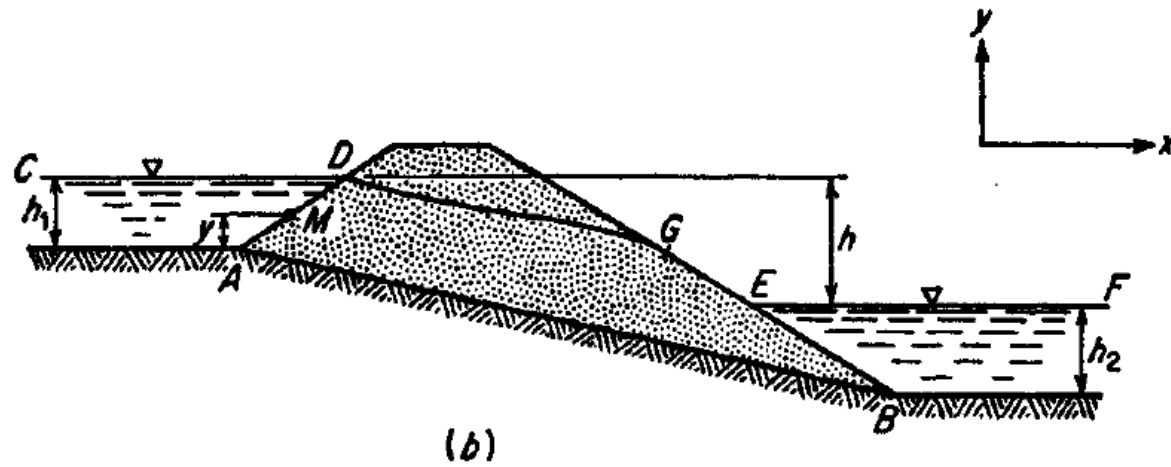
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad h = u/\gamma_w + y$$

Equipotentielles & Lignes de courant

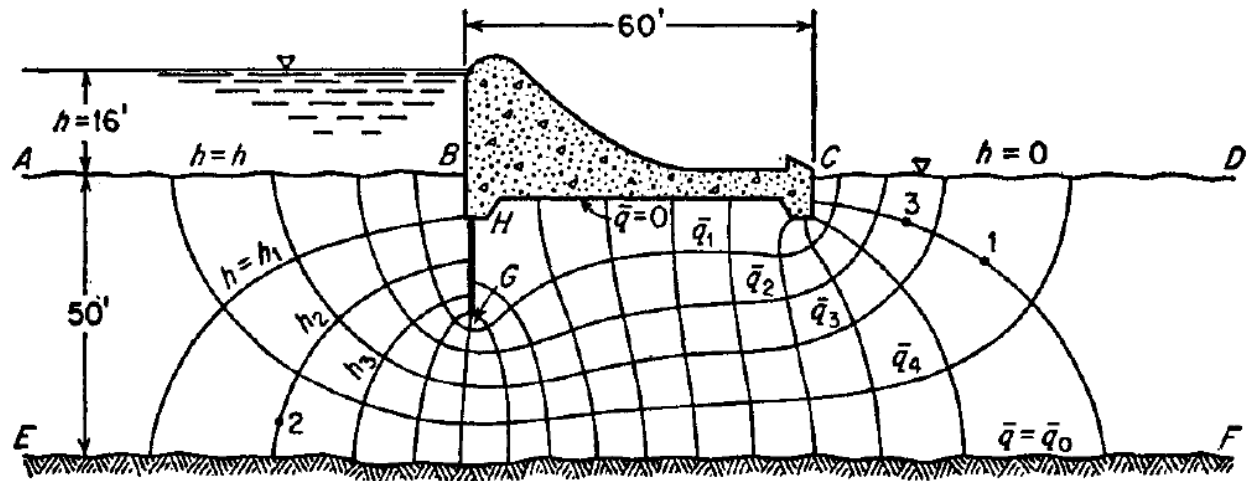
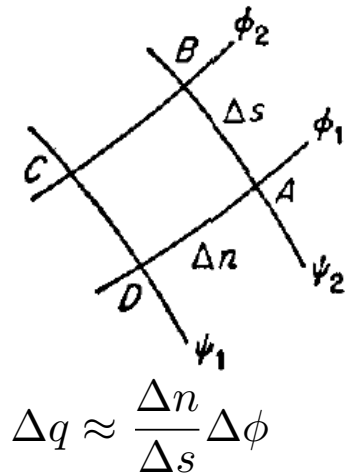
Au tableau

Conditions aux limites

Au tableau

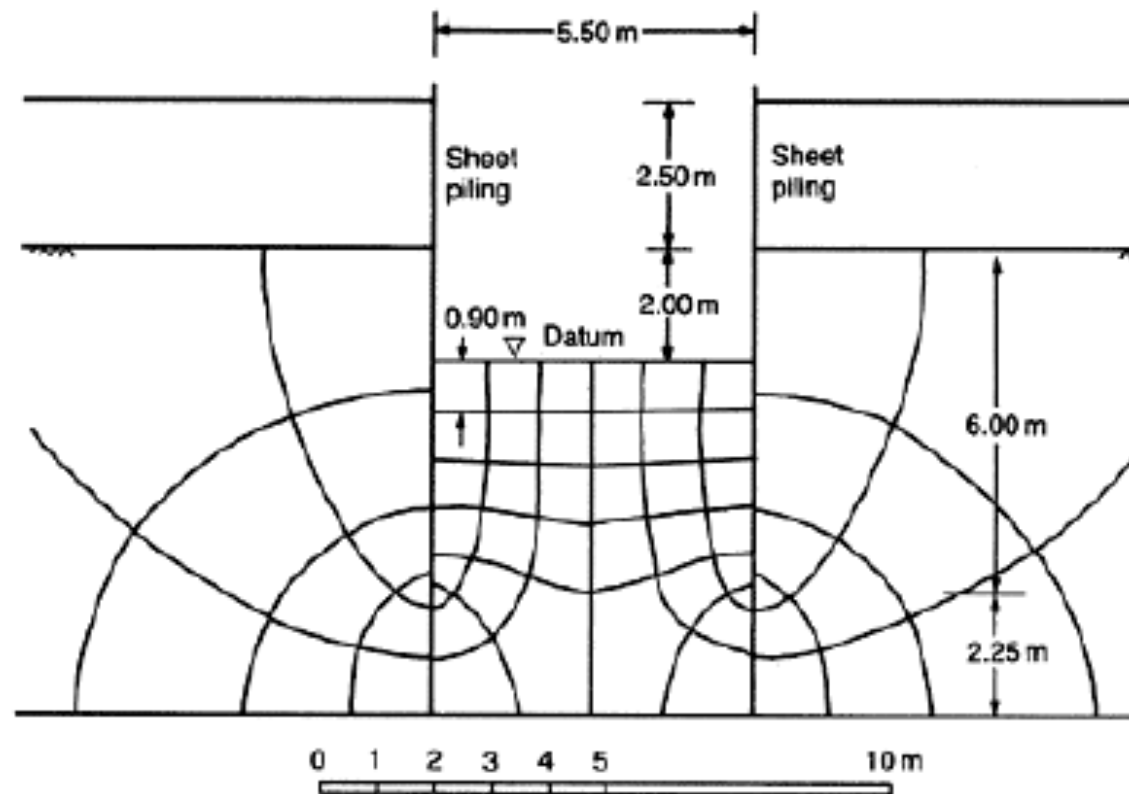


Réseau d'écoulement / Flow net



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

Example



Note - anisotropie

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

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

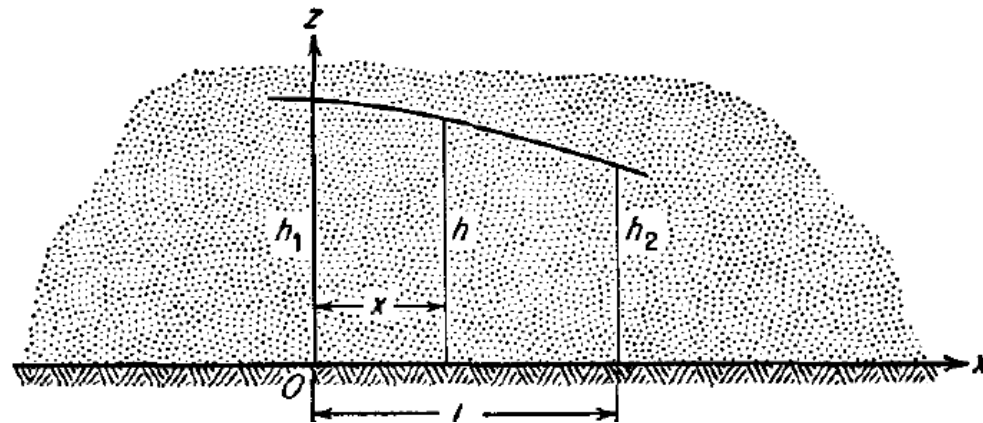
$$X = \sqrt{k_v/k_h} x$$

- Démarche identique après changement de variable

Écoulement non-confinés

Approximation de Dupuit

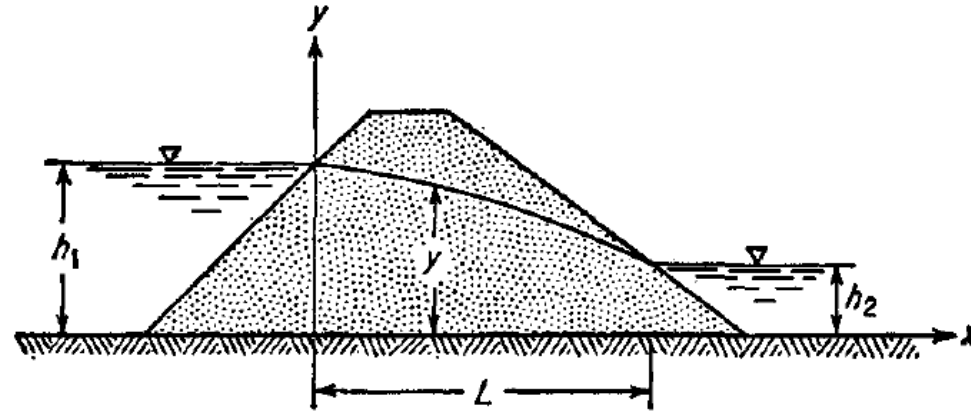
Écoulement ~1D après intégration sur la hauteur de la couche ayant la nappe libre $h(x)$ comme frontière supérieure



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

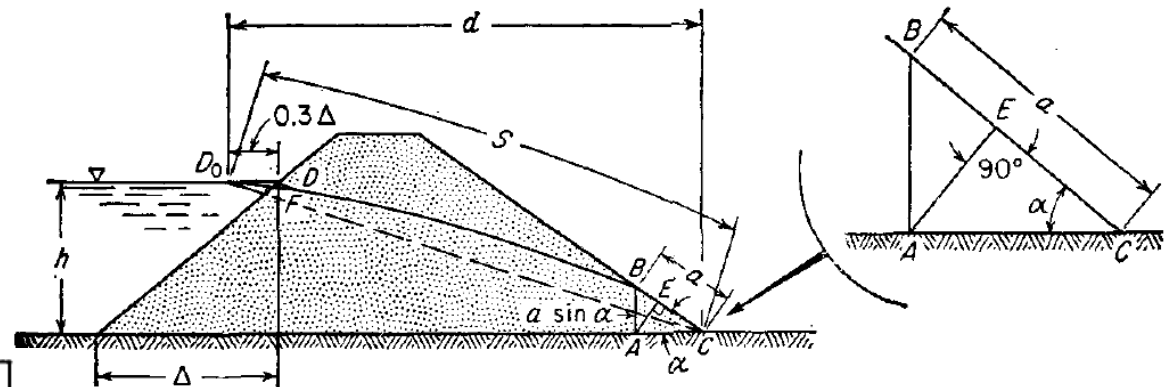
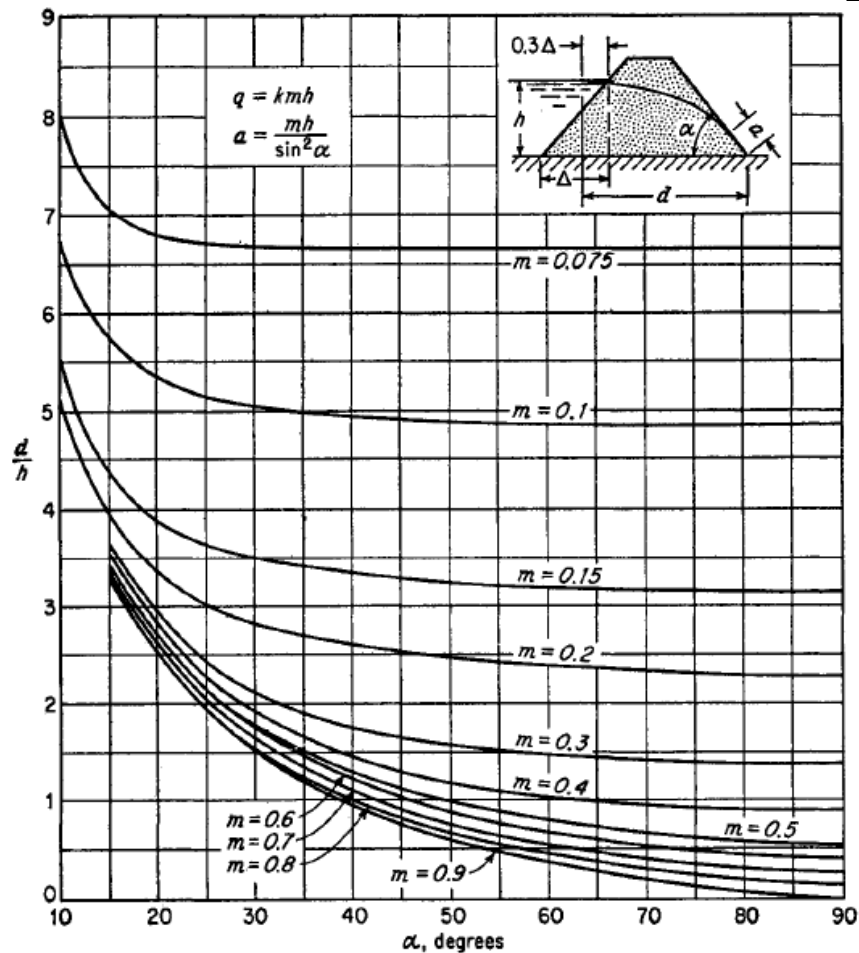
Écoulement à travers un barrage en terre

1. Dupuit



Ecoulement à travers un barrage en terre

2. Casagrande



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_{∞} Rayon d'influence (f (k))

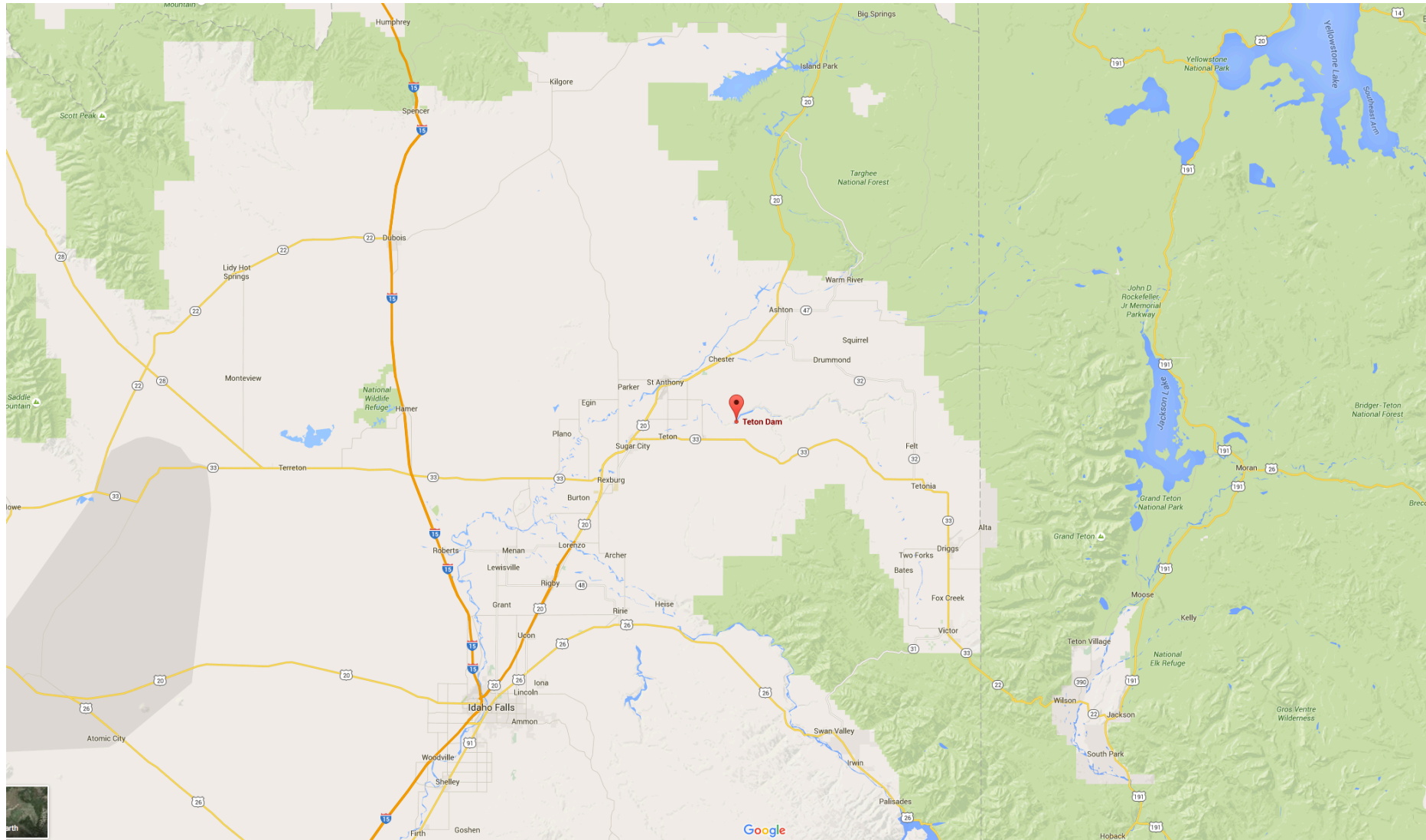
- Nappe confinée de hauteur m

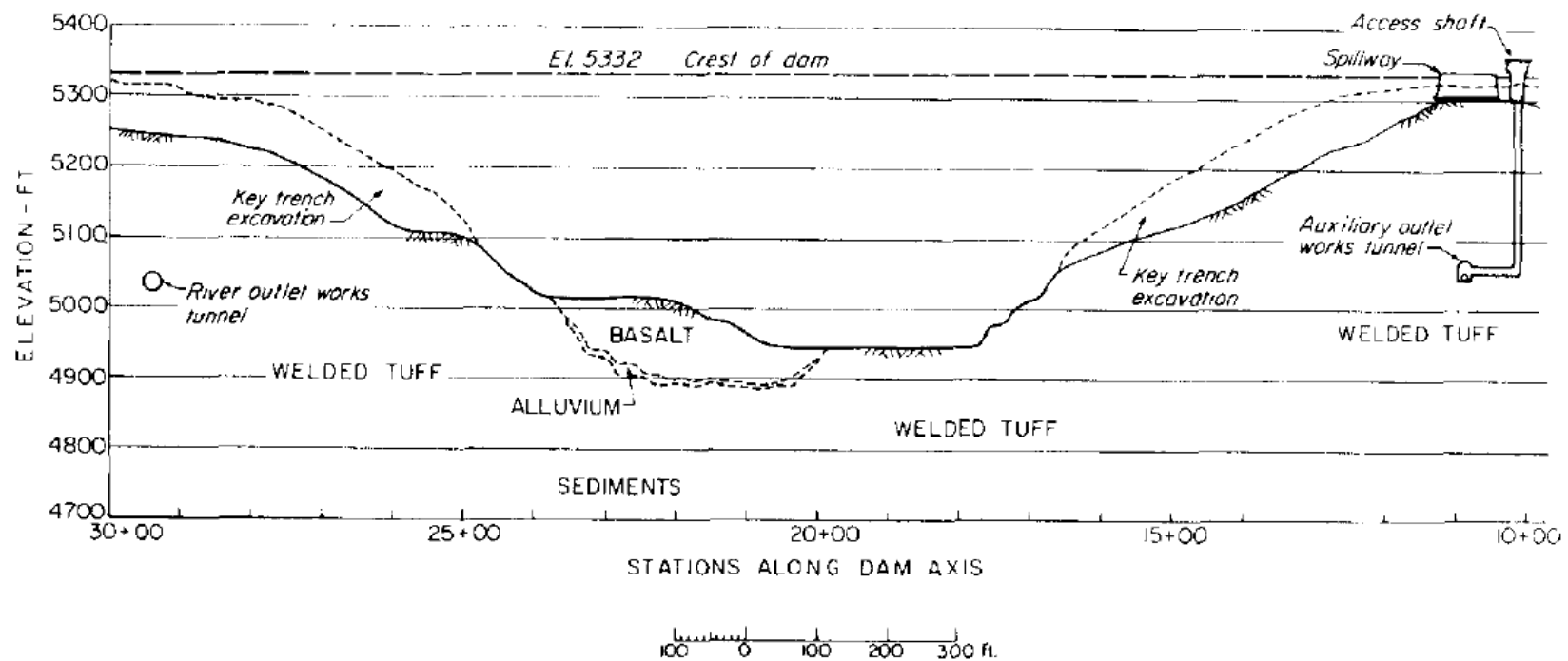
$$Q = 2\pi km \frac{h_{\infty} - h}{\ln R_{\infty} / R_w}$$

June 5, 1976

TETON DAM DISASTER

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

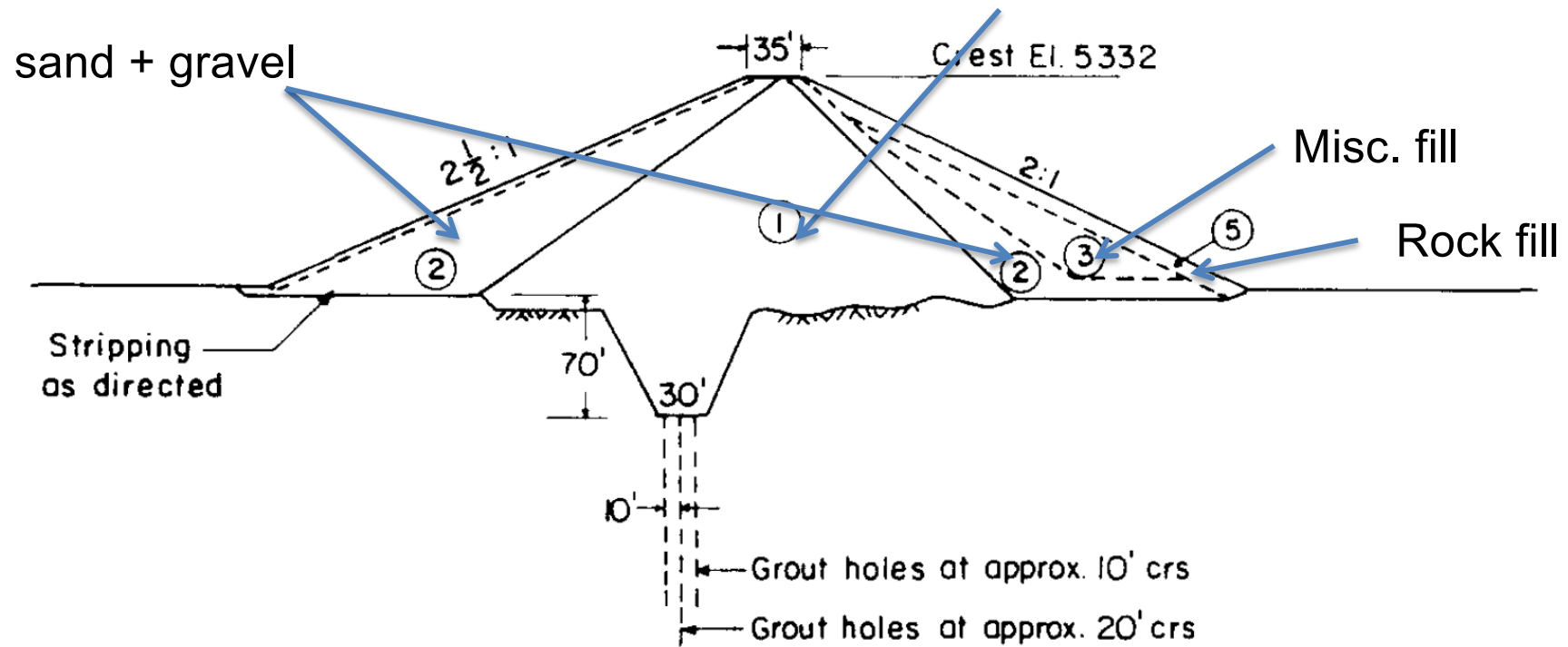




^

sand + gravel

Silt + sand + gravel (Loess core)



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 (24m³/s max), the main outlet was not yet in service (gates being painted !).

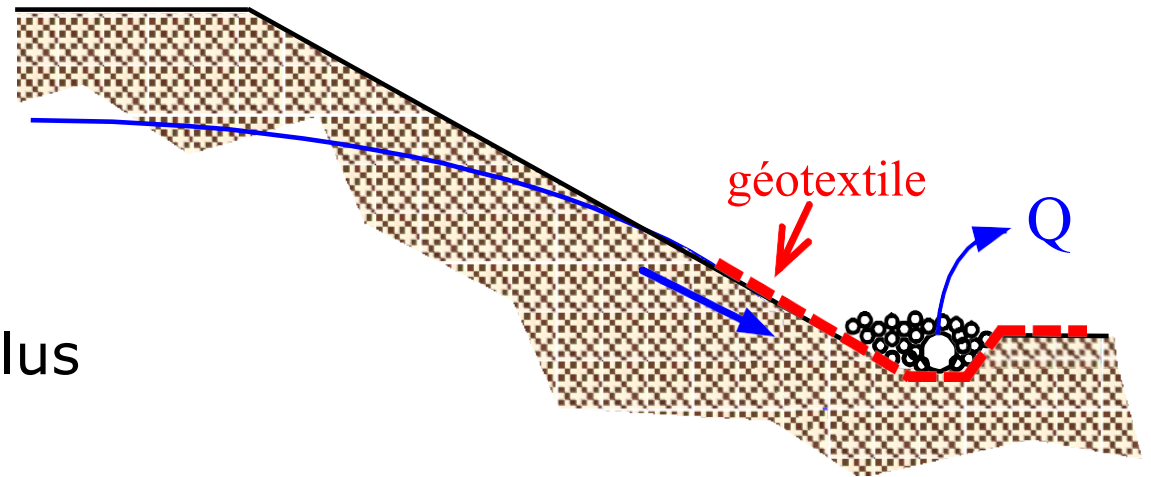
CONTRÔLE DE LA NAPPE PHRÉATIQUE

Contrôle de la nappe phréatique

Écoulement gravitaire

Pompage de l'eau en pied de talus

→ écoulement parallèle au talus



Avantage:

- Technique économique

Inconvénients:

- Risque d'entraînement 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

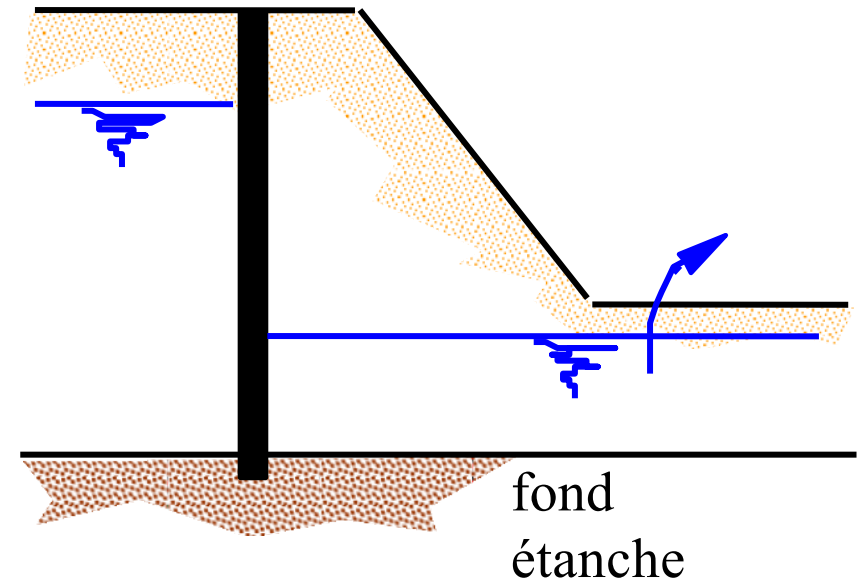
Une fois l'écran réalisé, on épuise l'eau dans la fouille.

Avantages:

- Pas de rabattement de la nappe en dehors de la fouille → pas de tassement
- Pas de risque d'entraînement 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 :

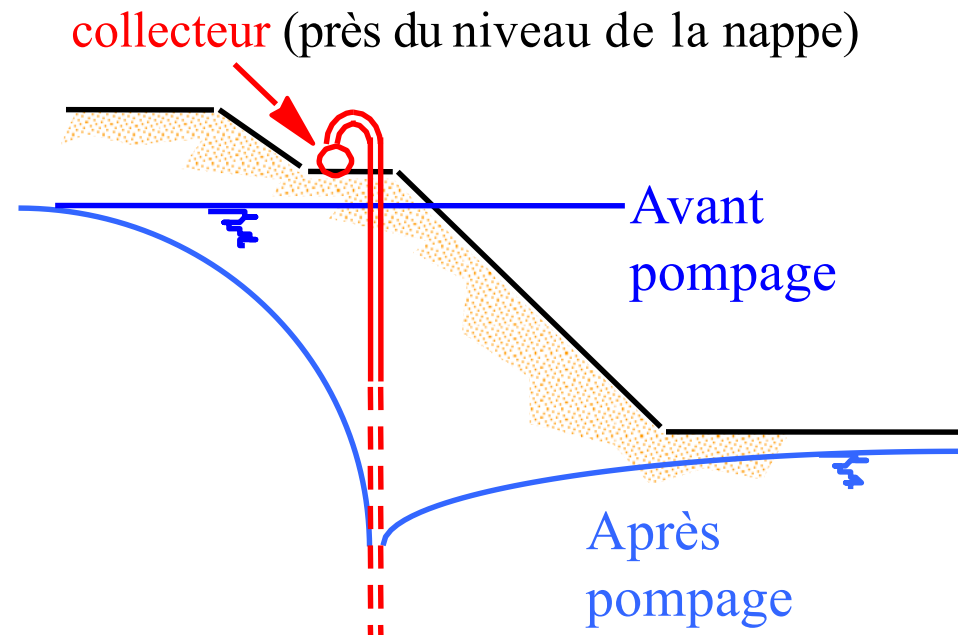
- puits filtrants
- micro-puits
- pointes filtrantes

Avantages:

- Bonne stabilité des talus
- Non entrainement 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

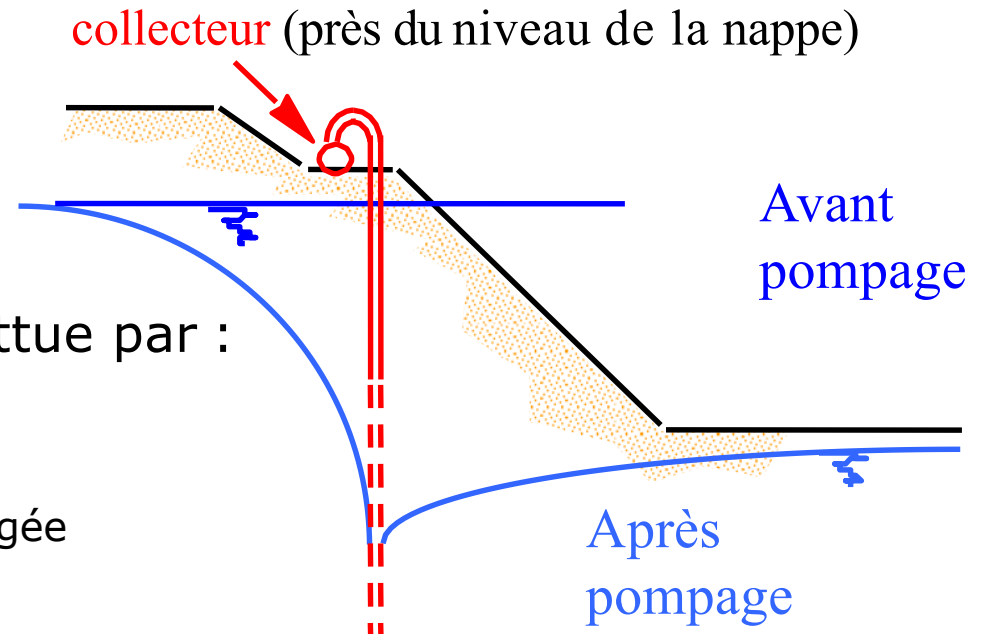


Contrôle de la nappe phréatique

Rabatement

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 10 ⁻⁵	Puits filtrants ϕ_{int} : 200 - 300 mm Espacement: 10 - 20 m	Forage ϕ : 500 mm Profondeur: 30 - 60 m	Pompe immergée Débit: 10 - 150 m ³ /h
Sables Sables fins	10 ⁻⁴ 10 ⁻⁶	Micro-puits $\phi_{\text{int}} \approx 100$ mm Espacement: 5 - 15 m	Forage ϕ : 200 mm Lançage Profondeur: 15 - 20 m	Hydro-éjecteur Débit ≈ 3 m ³ /h
Sables fins Limons	10 ⁻⁵ 10 ⁻⁷	Pointes filtrantes Wellpoints ϕ : 50 - 70 mm Espacement: 0.6 - 1.8 m	Lançage Profondeur: 7 m	Aspiration sous vide Débit unitaire: 0.5 - 1 m ³ /h Rabattement max: 5 - 6 m

Rabatement de nappe par puits filtrants



Rabatement de nappe par puits filtrants



www.tecs-france.com

Rabatement de nappe par pointes filtrantes



Pompage de l'eau en fond de fouille

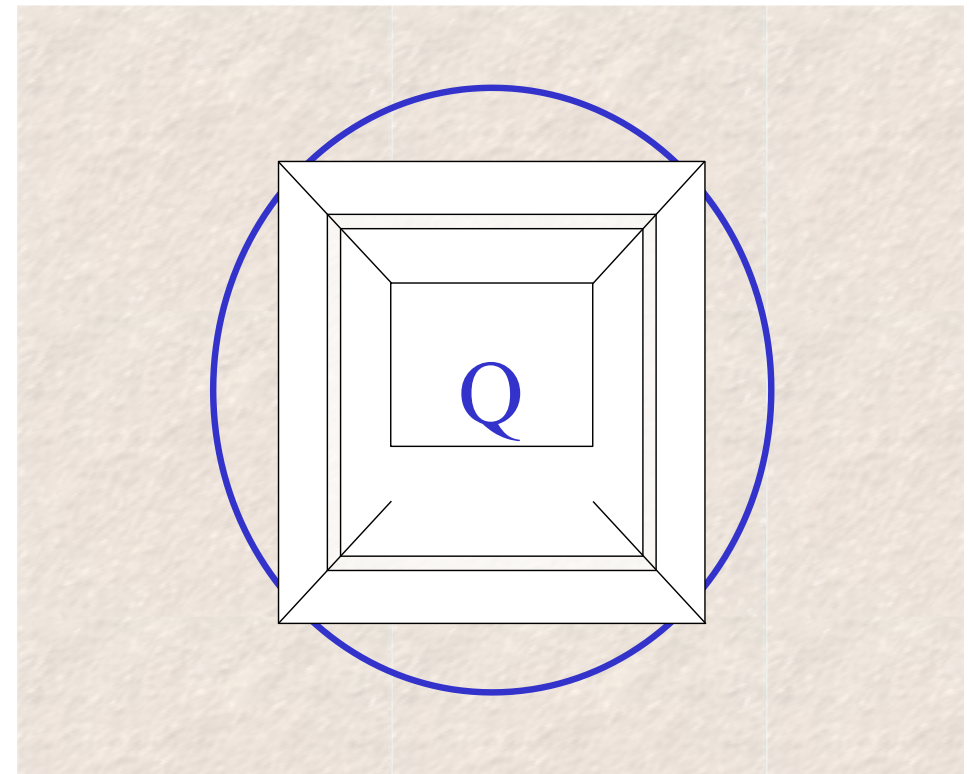
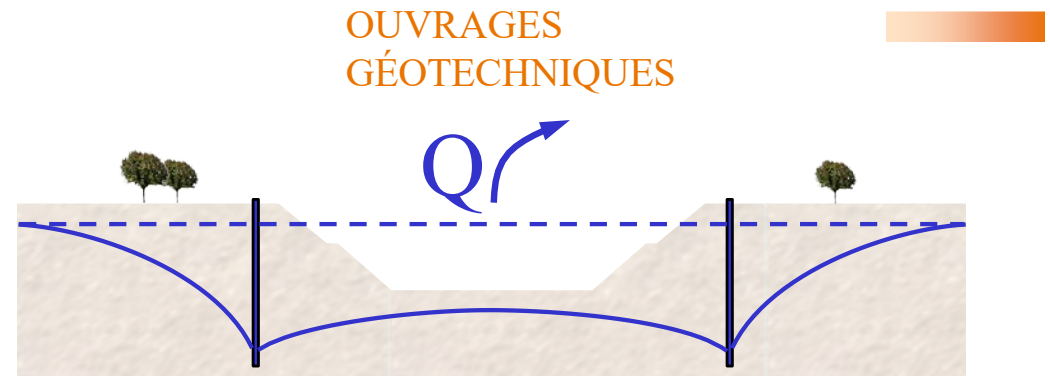
Puisard et pompe refoulante



Rabatttement de la nappe phréatique - calcul

Principe:

1. Calcul du débit total à pomper

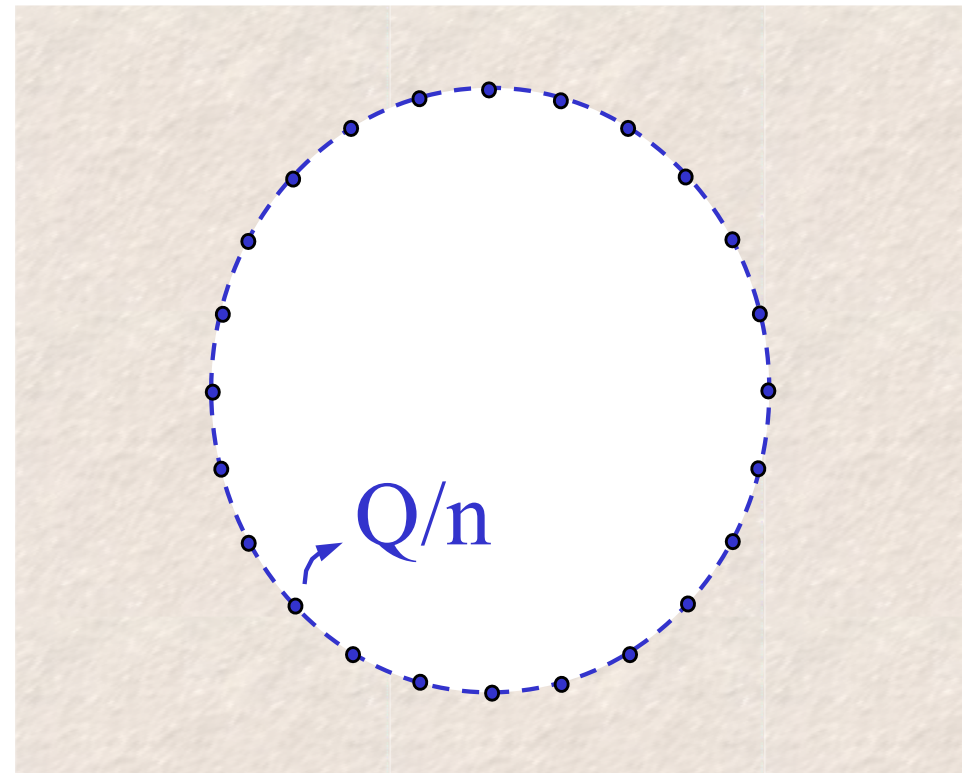
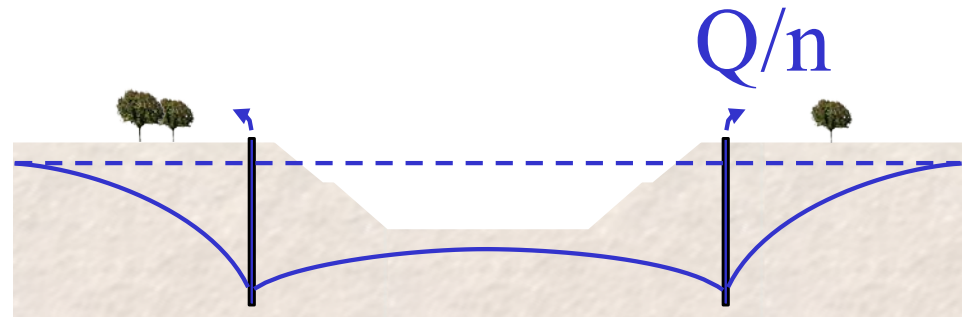


Rabatement de la nappe phréatique - calcul

Principe:

1. Calcul du débit total à pomper

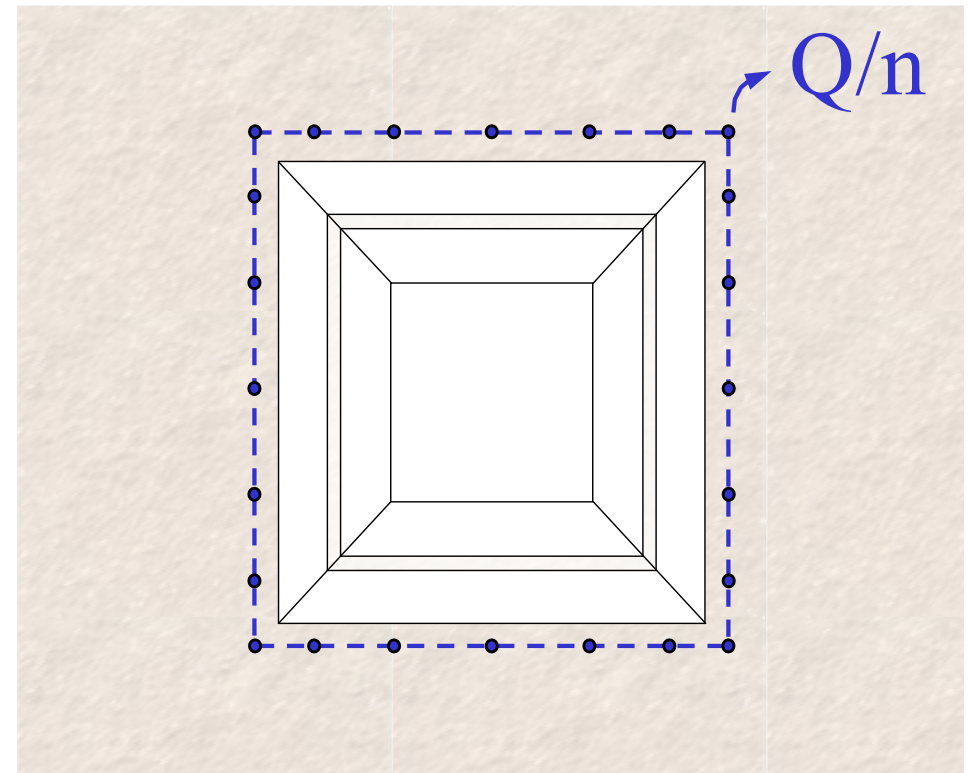
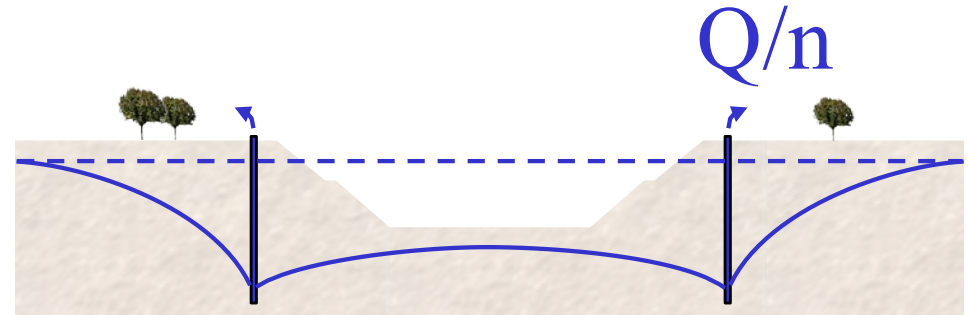
2. Calcul du nombre de puits



Rabatement de la nappe phréatique - calcul

Principe:

1. Calcul du débit total à pomper
2. Calcul du nombre de puits
3. répartition spatiale des puits



Rabatement de la nappe phréatique - calcul

1. Calcul du débit total à pomper

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

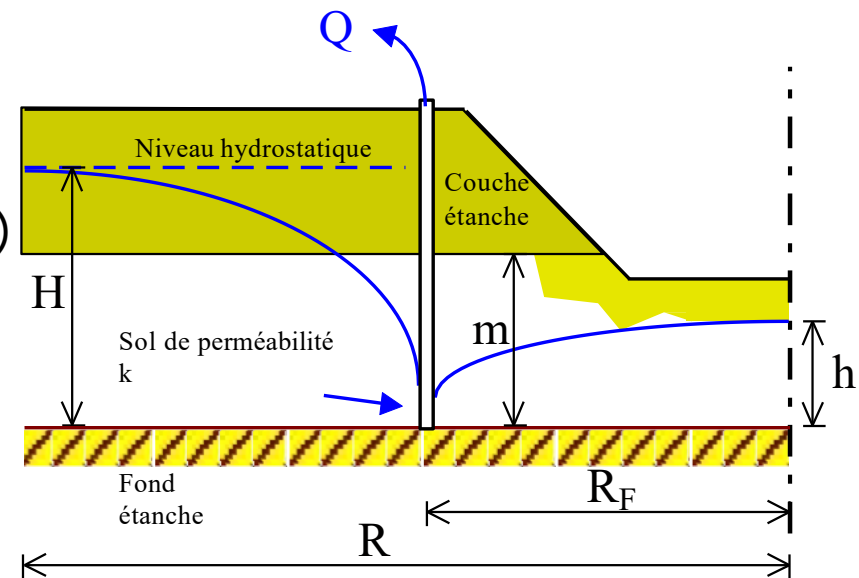
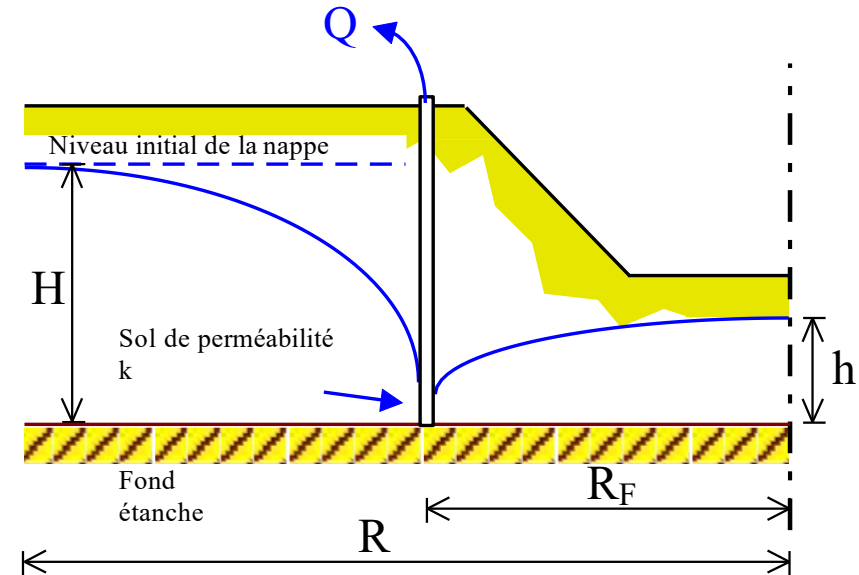
$$Q = \pi k \frac{H^2 - h^2}{\ln R/R_F}$$

- 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 ($H > m > h$)

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



Rabatement de la nappe phréatique - calcul

Evaluation de R : Rayon d'action du pompage

- ordre de grandeur :

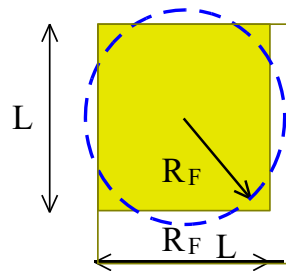
- sables et graviers	$R \approx 500 \div 3000 \text{ m}$
- sables grossiers	$R \approx 100 \div 1000 \text{ m}$
- sables fins	$R \approx 50 \div 200 \text{ m}$
- limons	$R \approx 30 \div 80 \text{ m}$

($R > 30\text{m}$ 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]

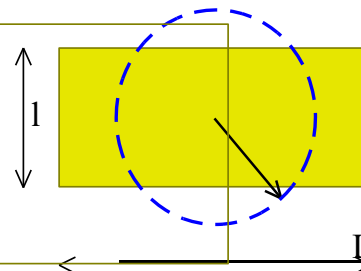
Evaluation de R_F : Rayon équivalent de la fouille

fouille carrée



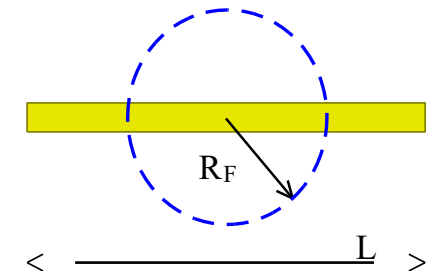
$$R_F = \frac{P}{6.8} = \frac{4L}{6.8} = \frac{L}{1.7}$$

fouille rectangulaire



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

fouille très allongée

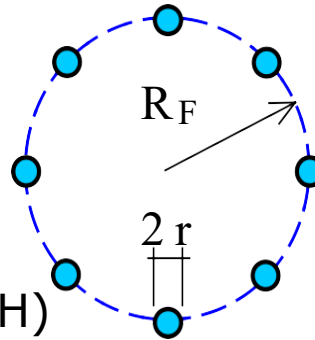


$$R_F \approx \frac{P}{8} \approx \frac{L}{4}$$

Rabatement 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 ($m > H$)

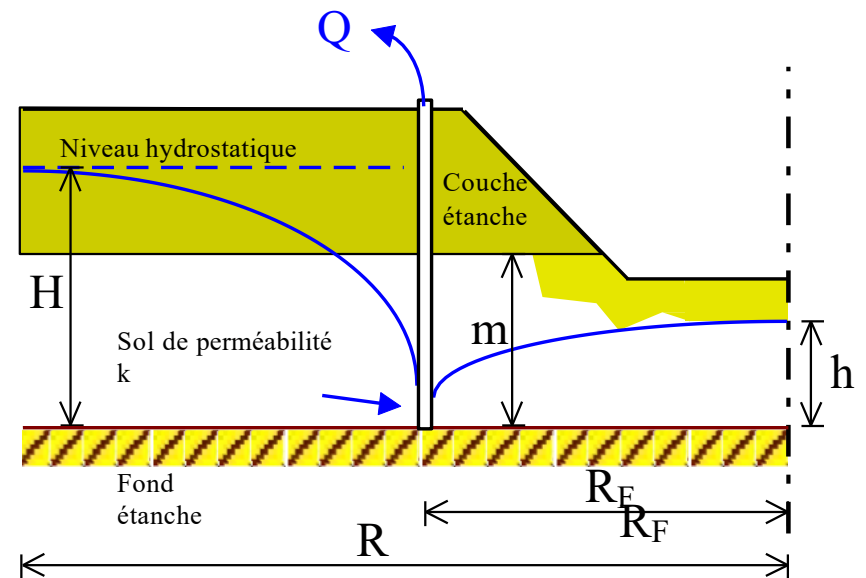
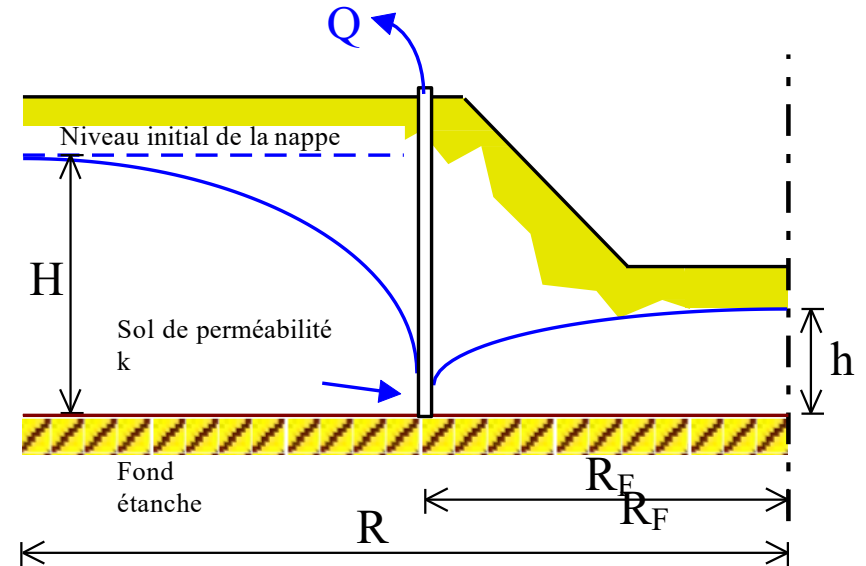
$$C = \frac{h^2}{H^2 - h^2}$$

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

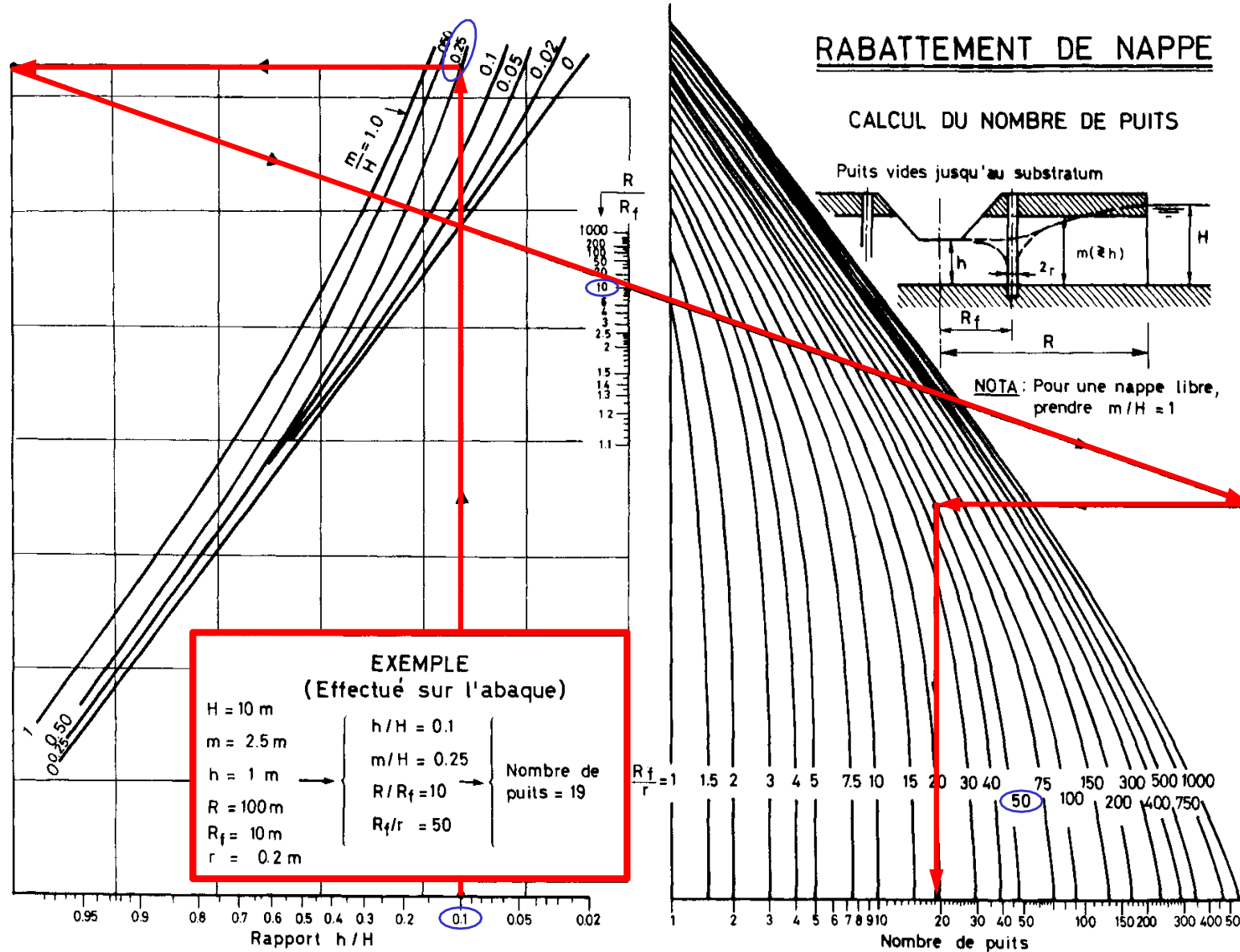
$$C = \frac{2h - m}{2(H - h)}$$

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

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



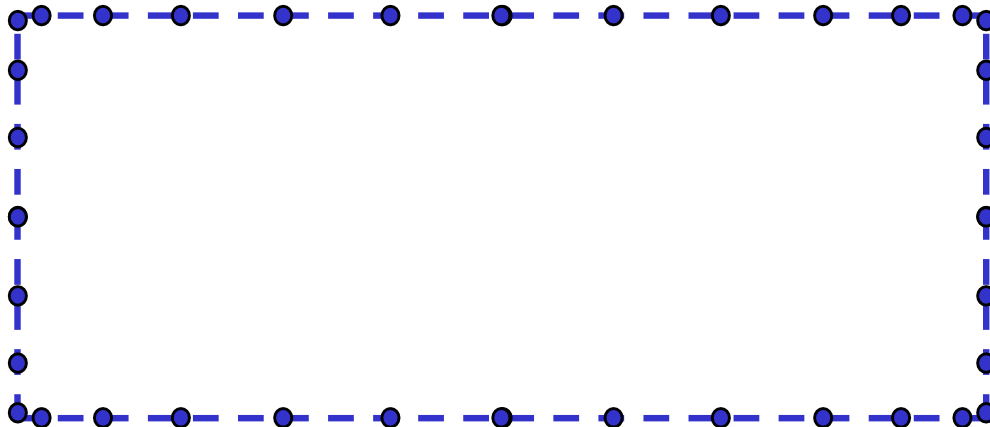
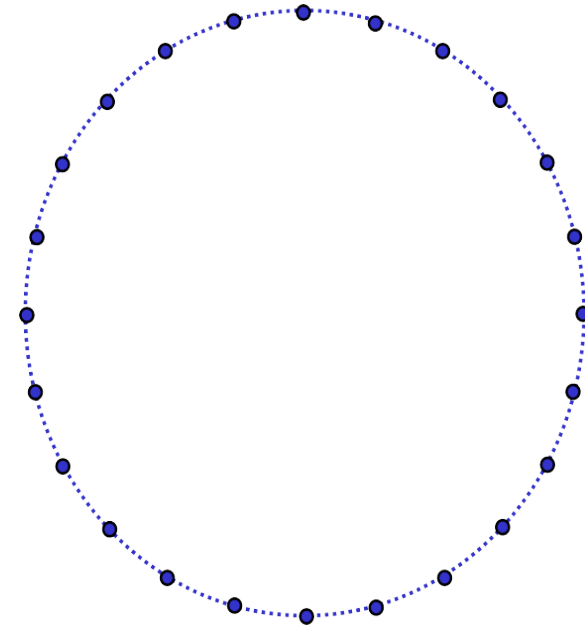
Abaque pour le calcul du nombre de puits



Rabatementment de la nappe phréatique - calcul

3. Répartition spatiale des puits autour de la fouille

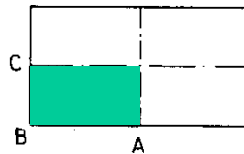
- pour une fouille circulaire
uniformément répartis
- pour une fouille rectangulaire
concentrer les puits dans les
angles



Répartition spatiale des puits autour de la fouille

REPARTITION NORMALE DE 100 PUITS SUR UN PERIMETRE RECTANGULAIRE DE 100 CM

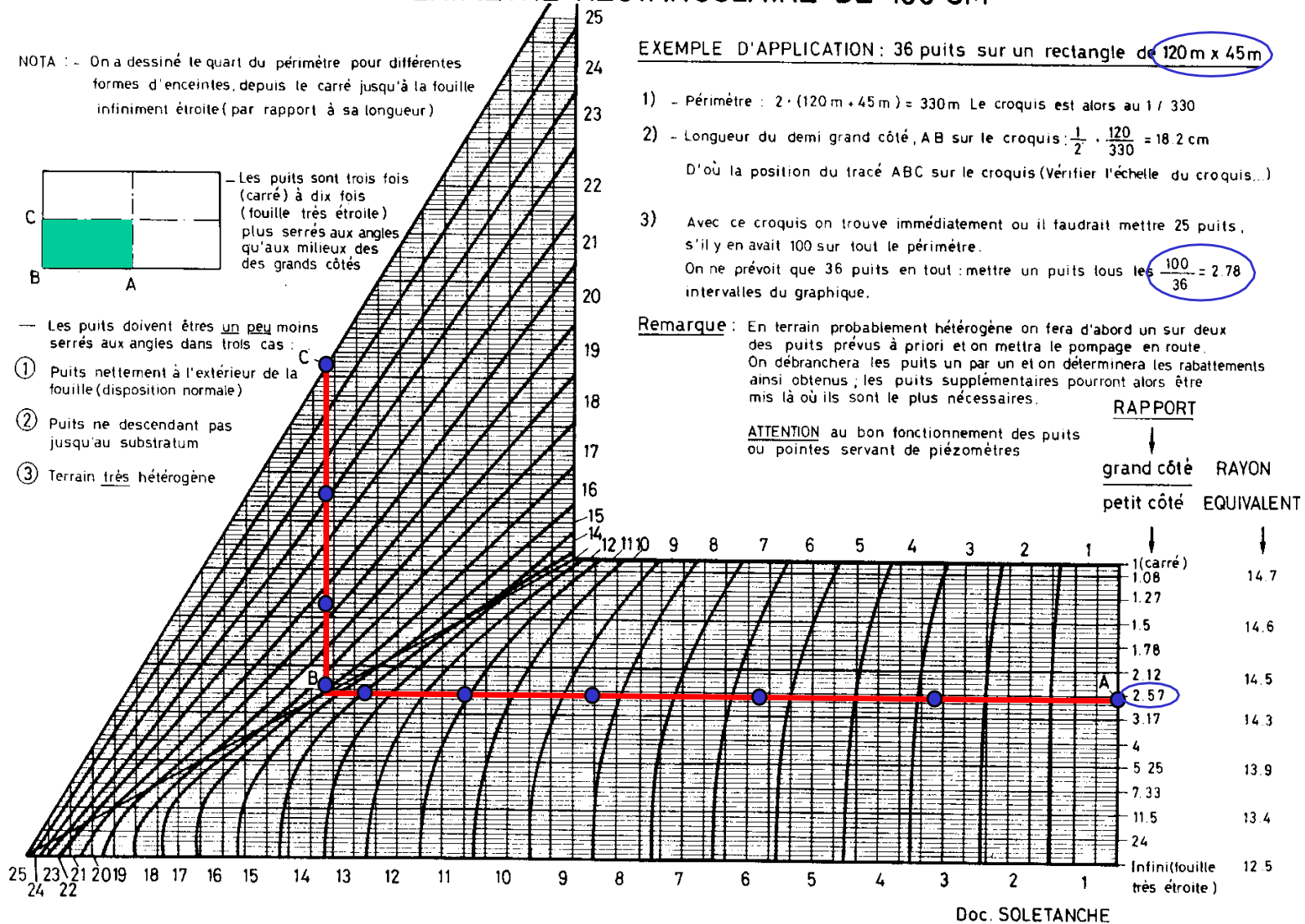
NOTA :- On a dessiné le quart du périmètre pour différentes formes d'enceintes, depuis le carré jusqu'à la fouille infiniment étroite (par rapport à sa longueur)



— 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 où 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.

ATTENTION au bon fonctionnement des puits ou pointes servant de piézomètres

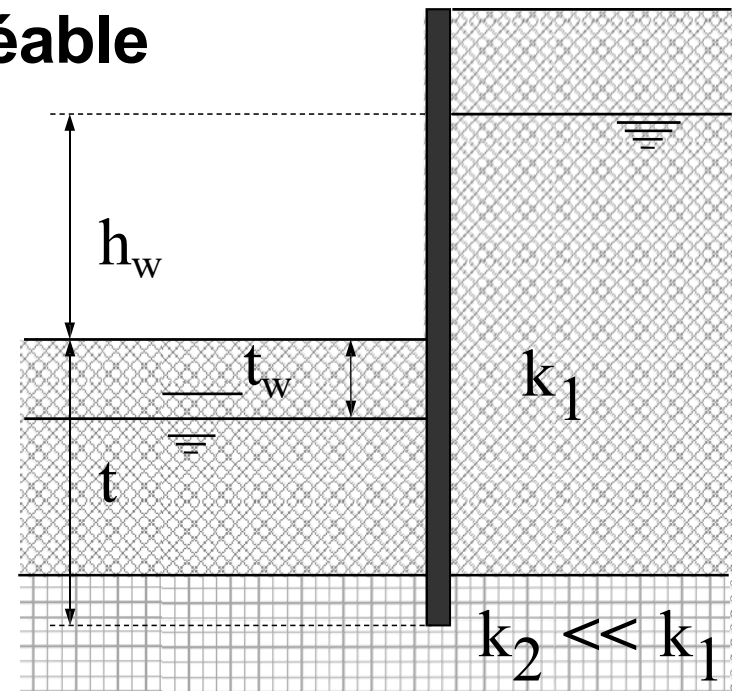
**RENARD HYDRAULIQUE /
FOUILLES**

1^{ère} 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^{ème} méthode simplifiée

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

ou

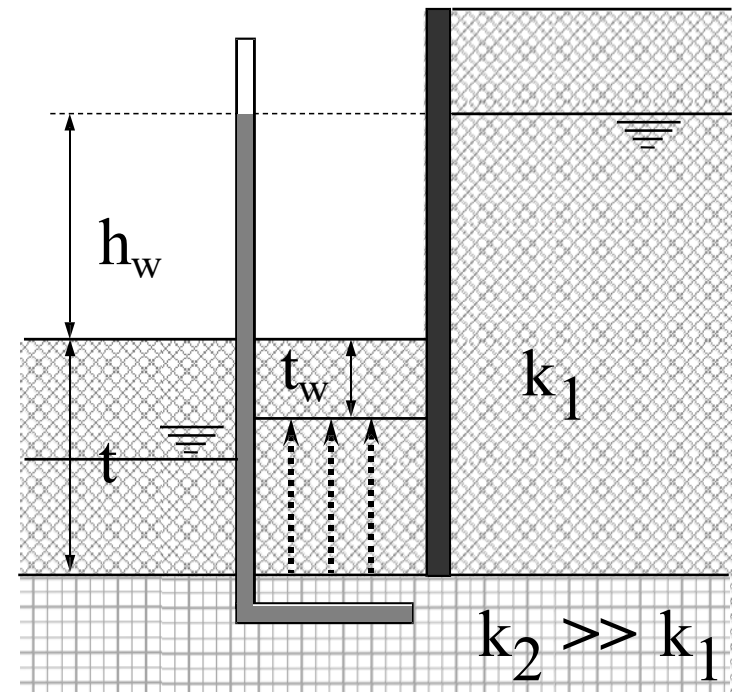
Terrain stratifié avec perméabilité anisotrope ($k_h \gg k_v$)

→ 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^{ème} méthode simplifiée

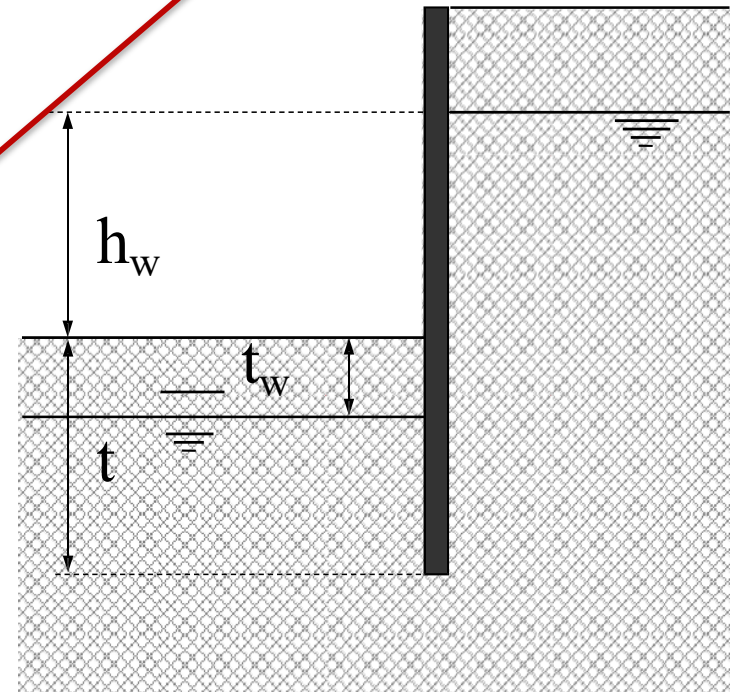
Terrain homogène et isotrope

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**.

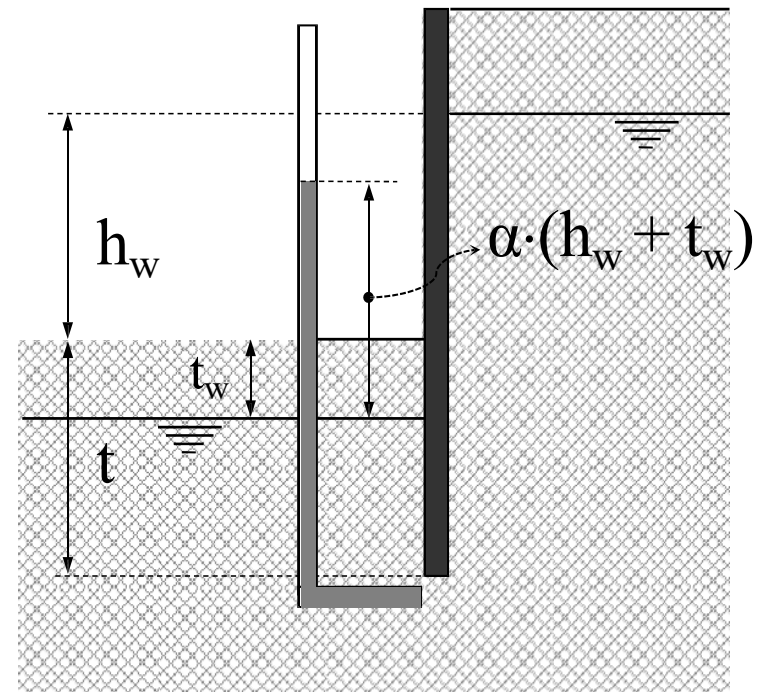
Solution de Mandel

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



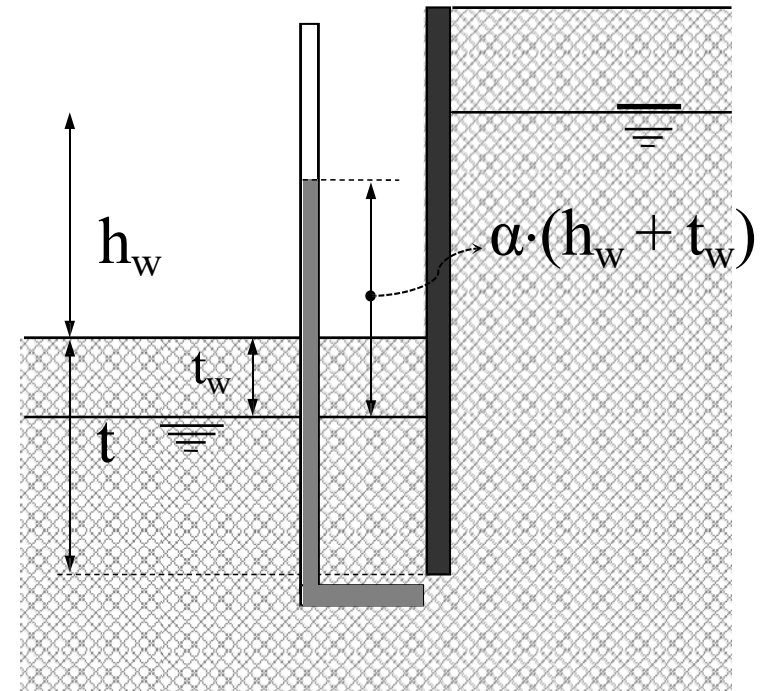
Equation implicite pour obtenir α

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
α	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 : $i_{\text{aval}} = \frac{\alpha \cdot (h_w + t_w)}{t - t_w}$

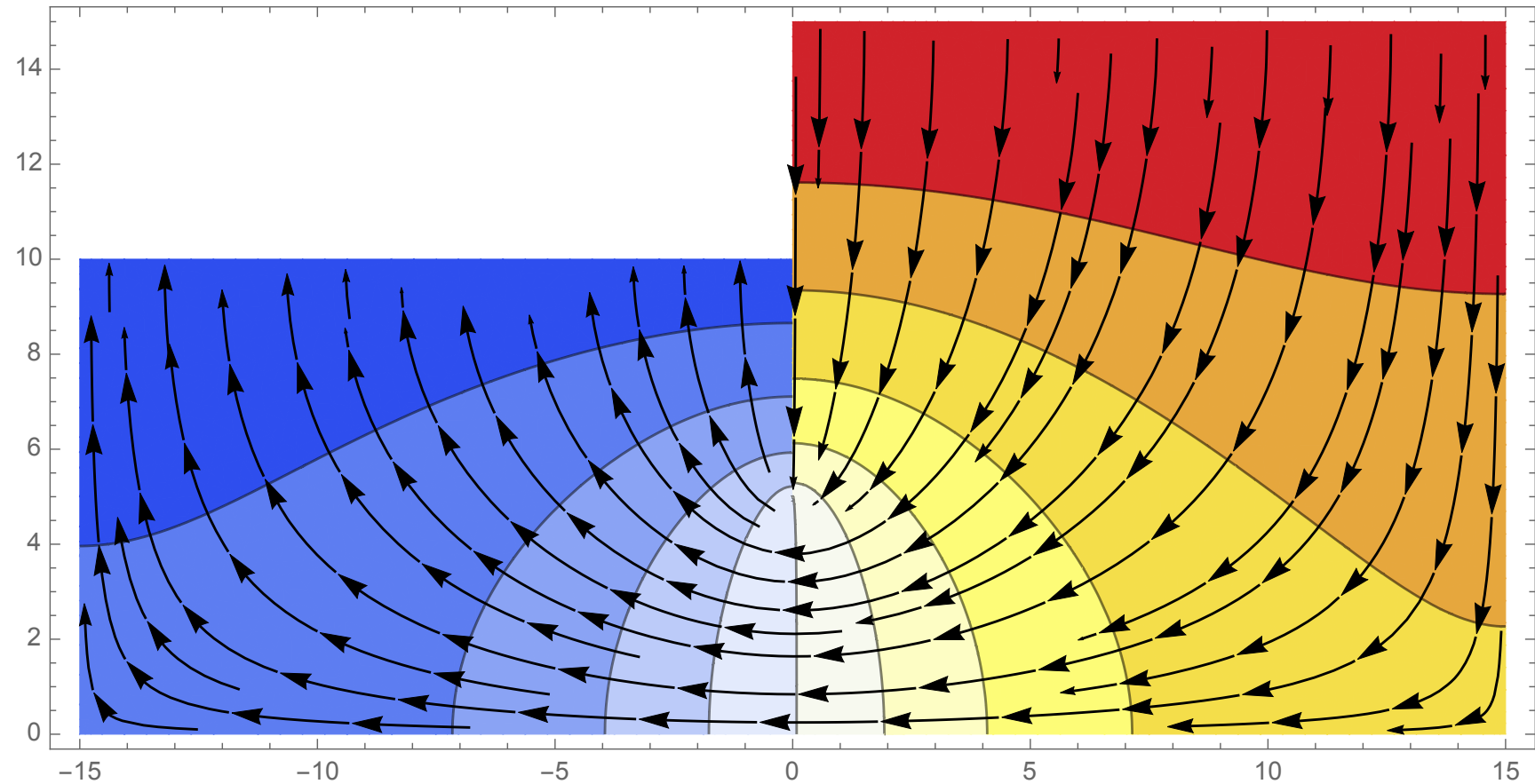
→ gradient hydraulique à l'amont : $i_{\text{amont}} = \frac{(1 - \alpha) \cdot (h_w + t_w)}{h_w + t}$

Mandel

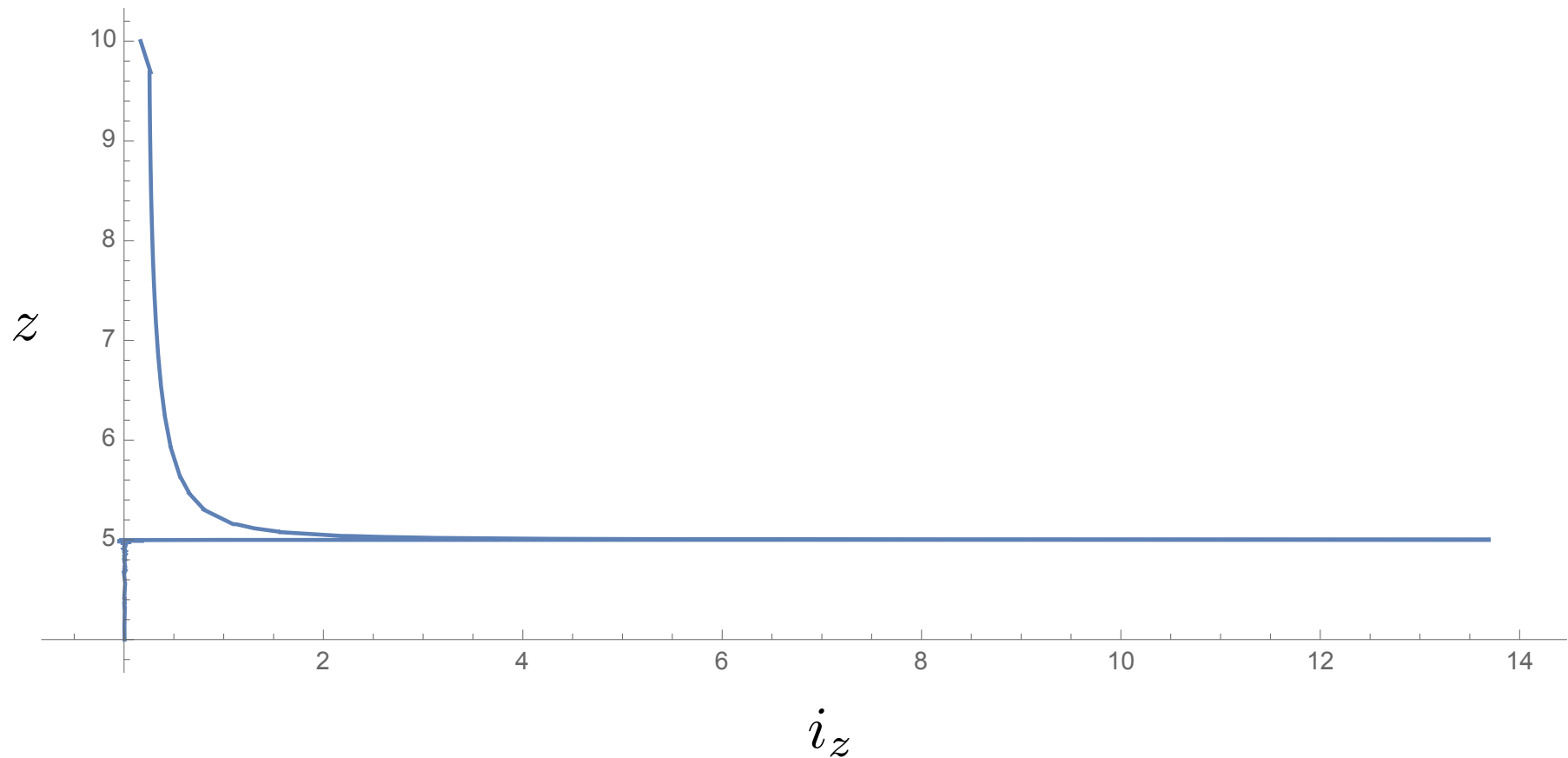
- Approximation pour $(h_w + t_w)/(t - t_w) < 10$

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

Exemple numérique

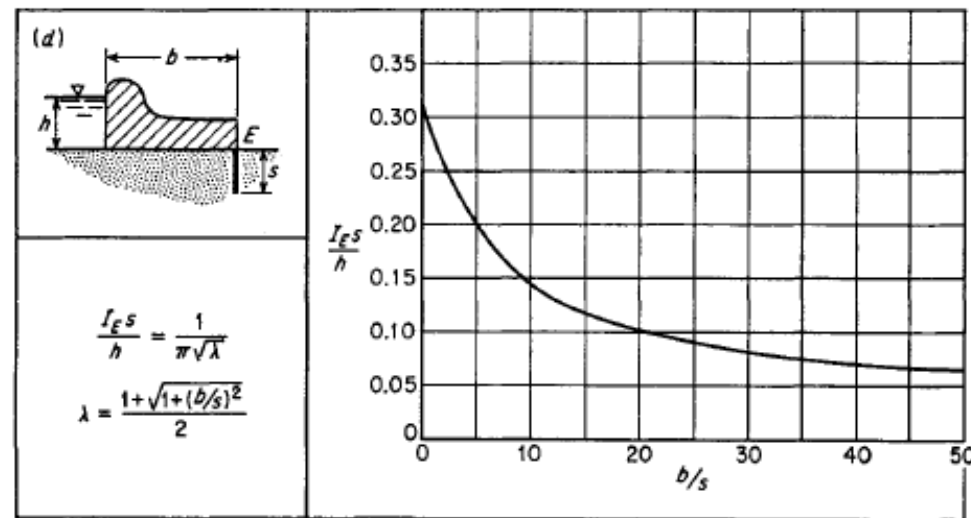
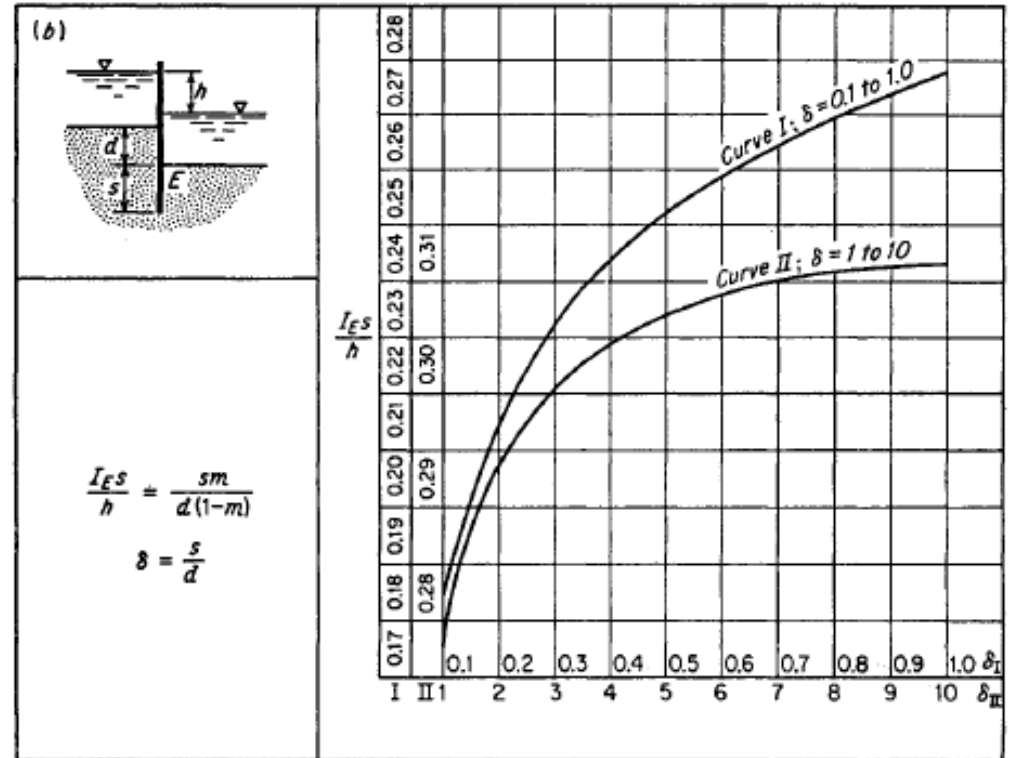
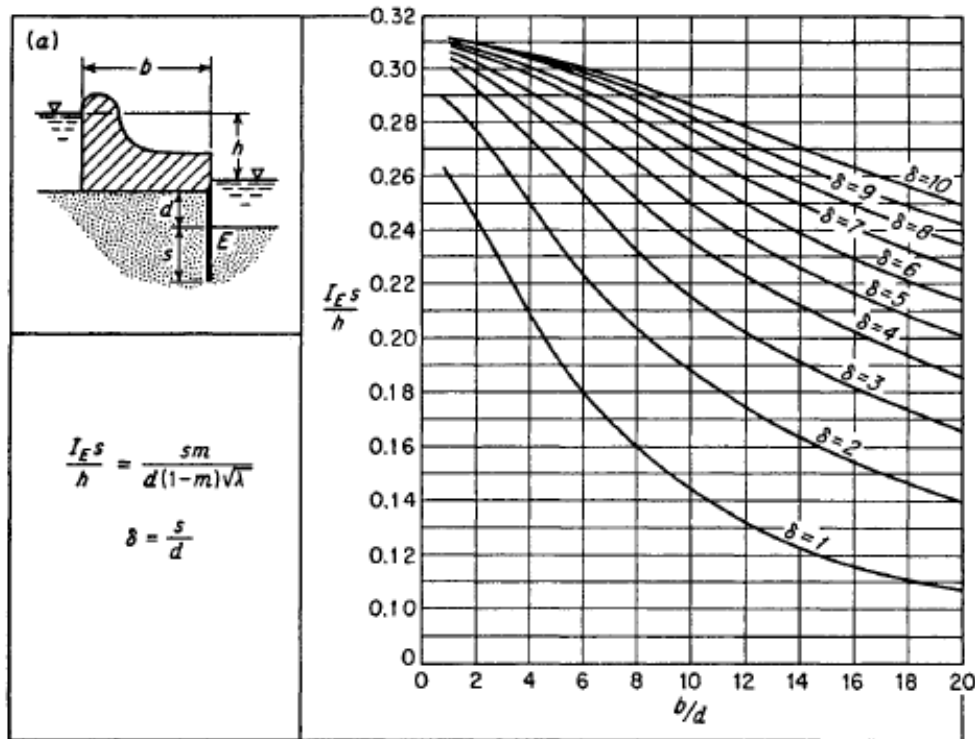


Exemple numérique



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

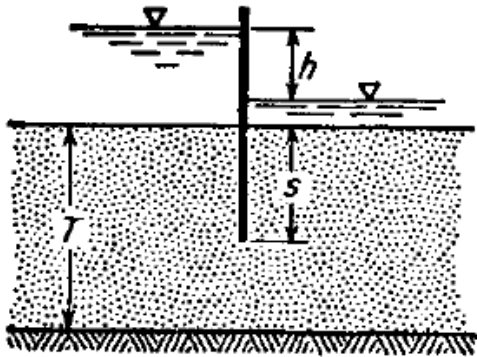
Abaques pour le gradient de sortie (point E)



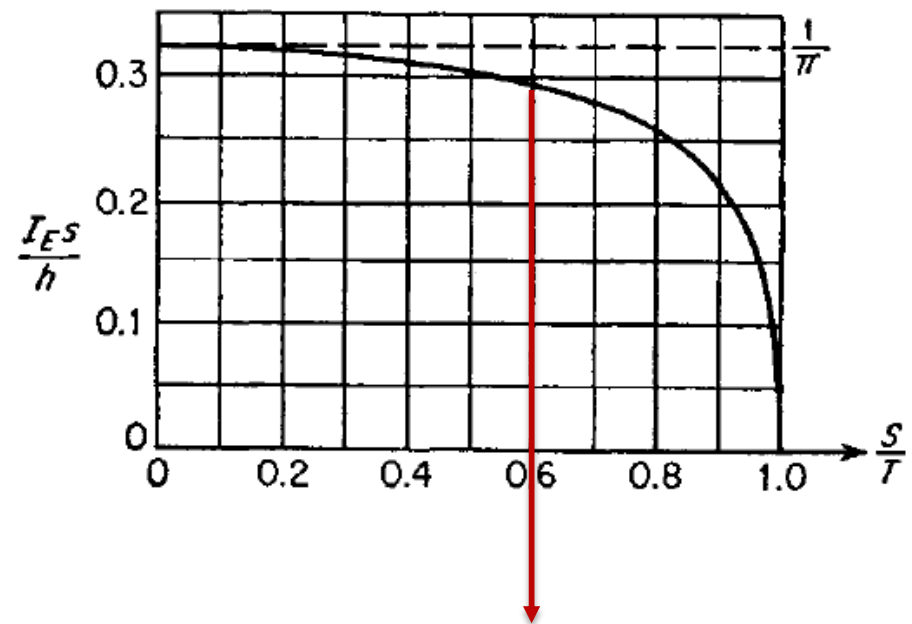
Tiré de Harr

! Différent du gradient moyen !

Effet d'une couche imperméable

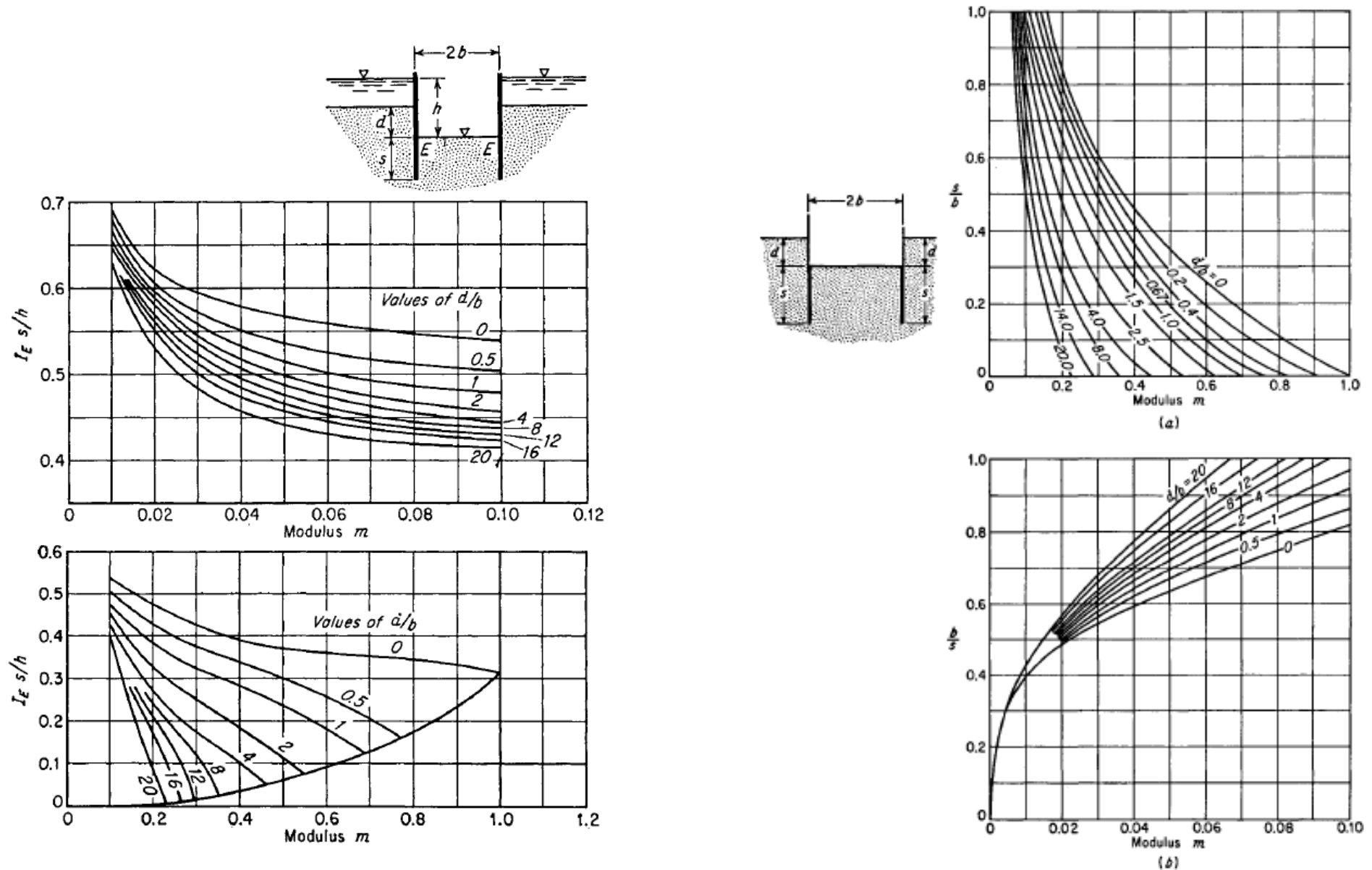


Abaque pour le gradient de sortie



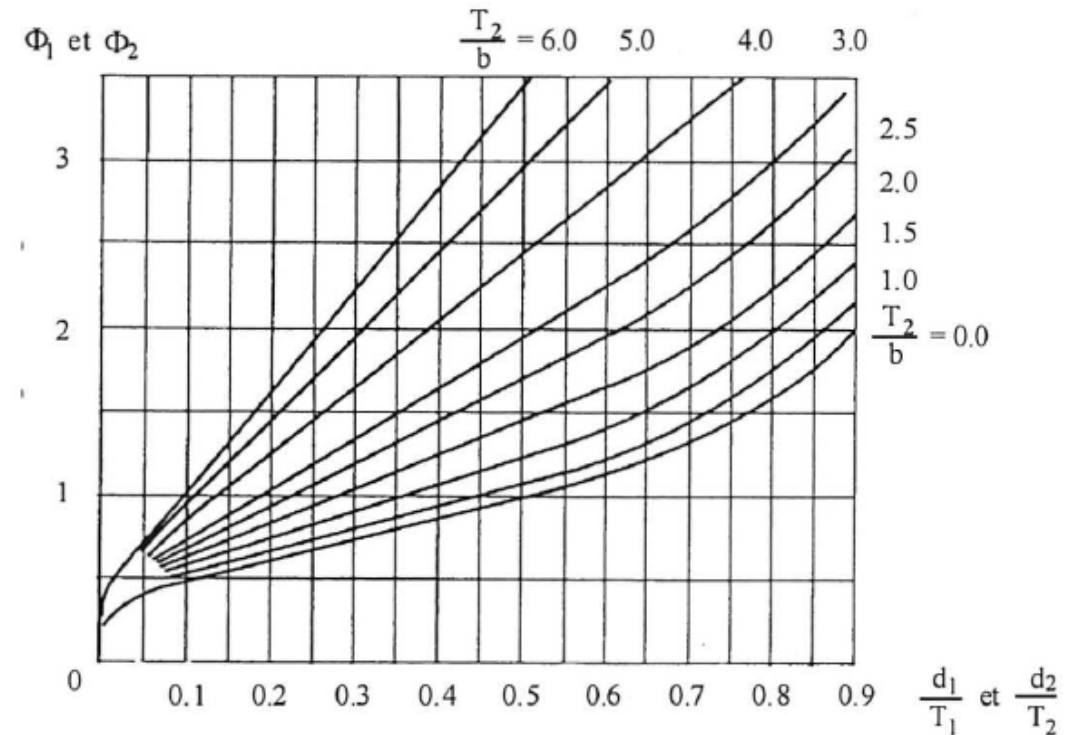
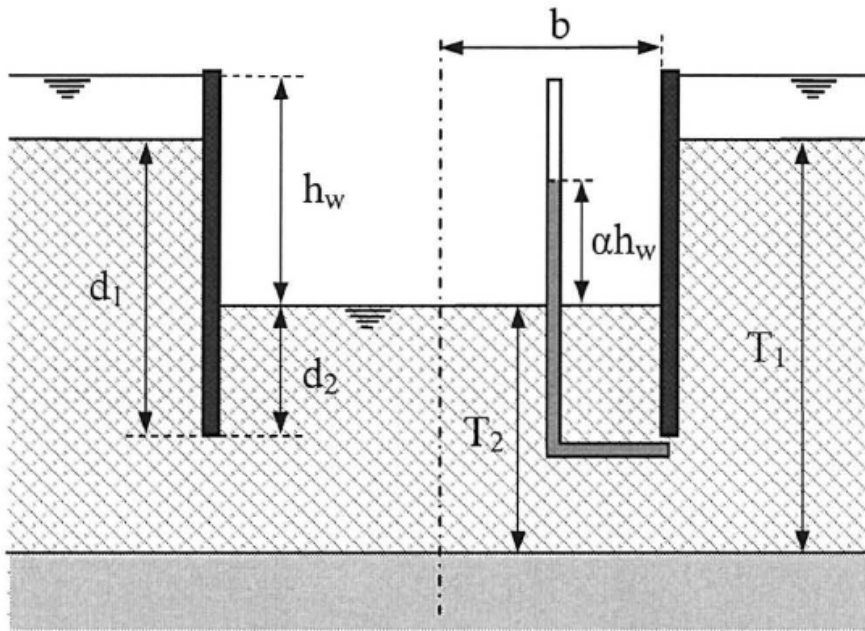
Effet <10% relatif pour $s/T < 0.6$

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)

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

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

- 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)

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

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

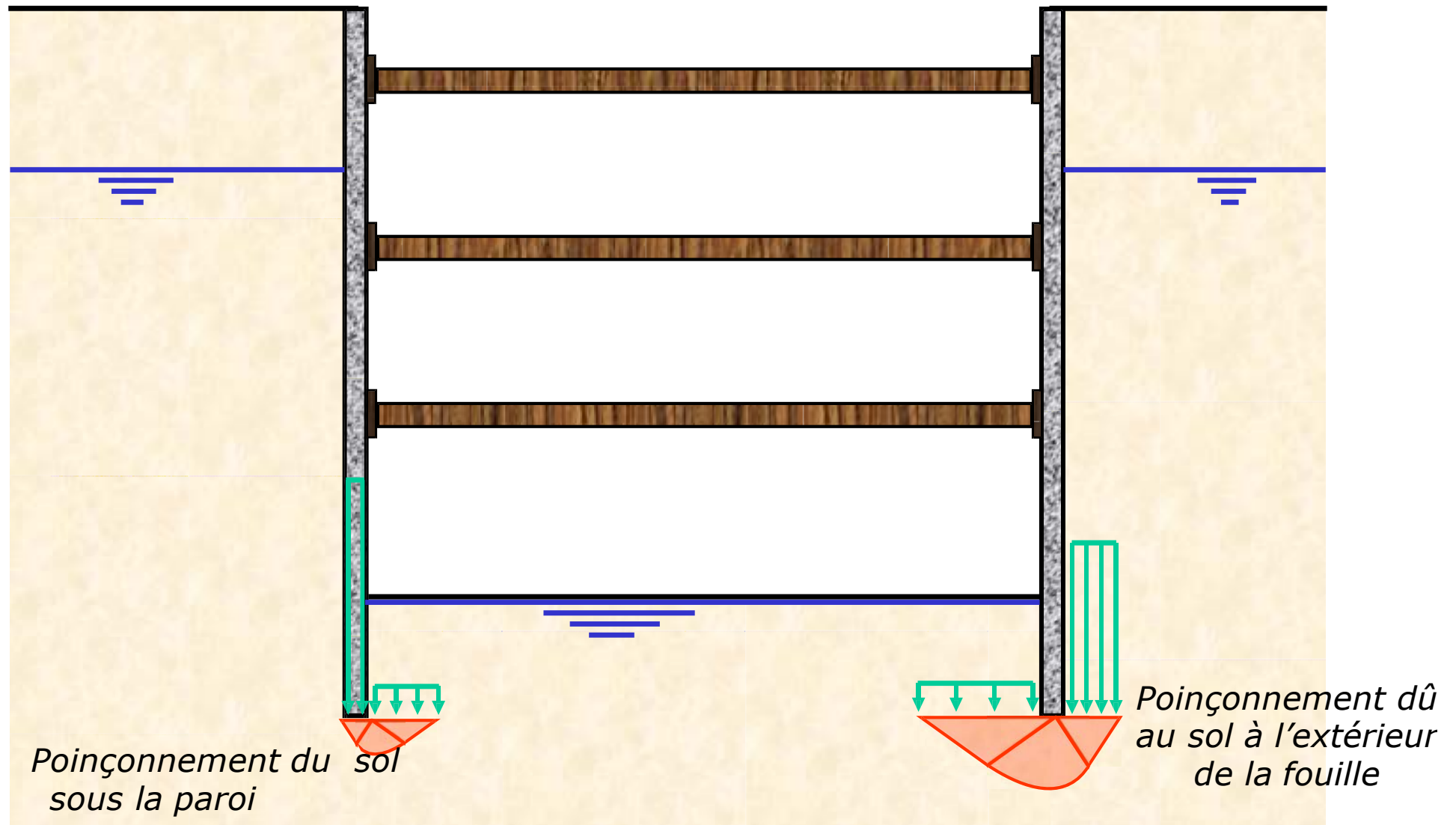
$$Q = 0.7 \times 8b \frac{k}{\Phi_1 + \Phi_2} h_w$$

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

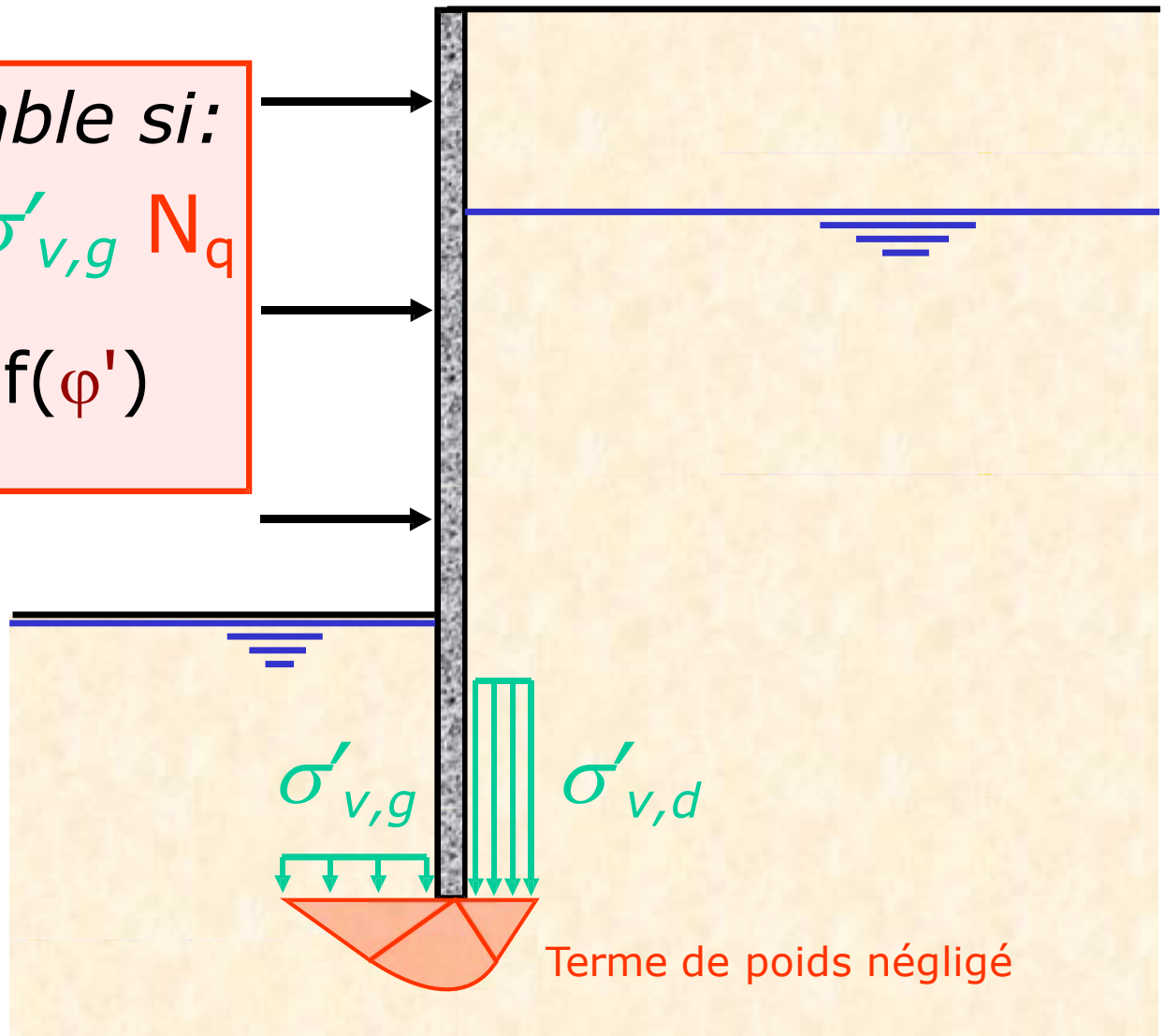


Par analogie avec la portance pour une fondation superficielle

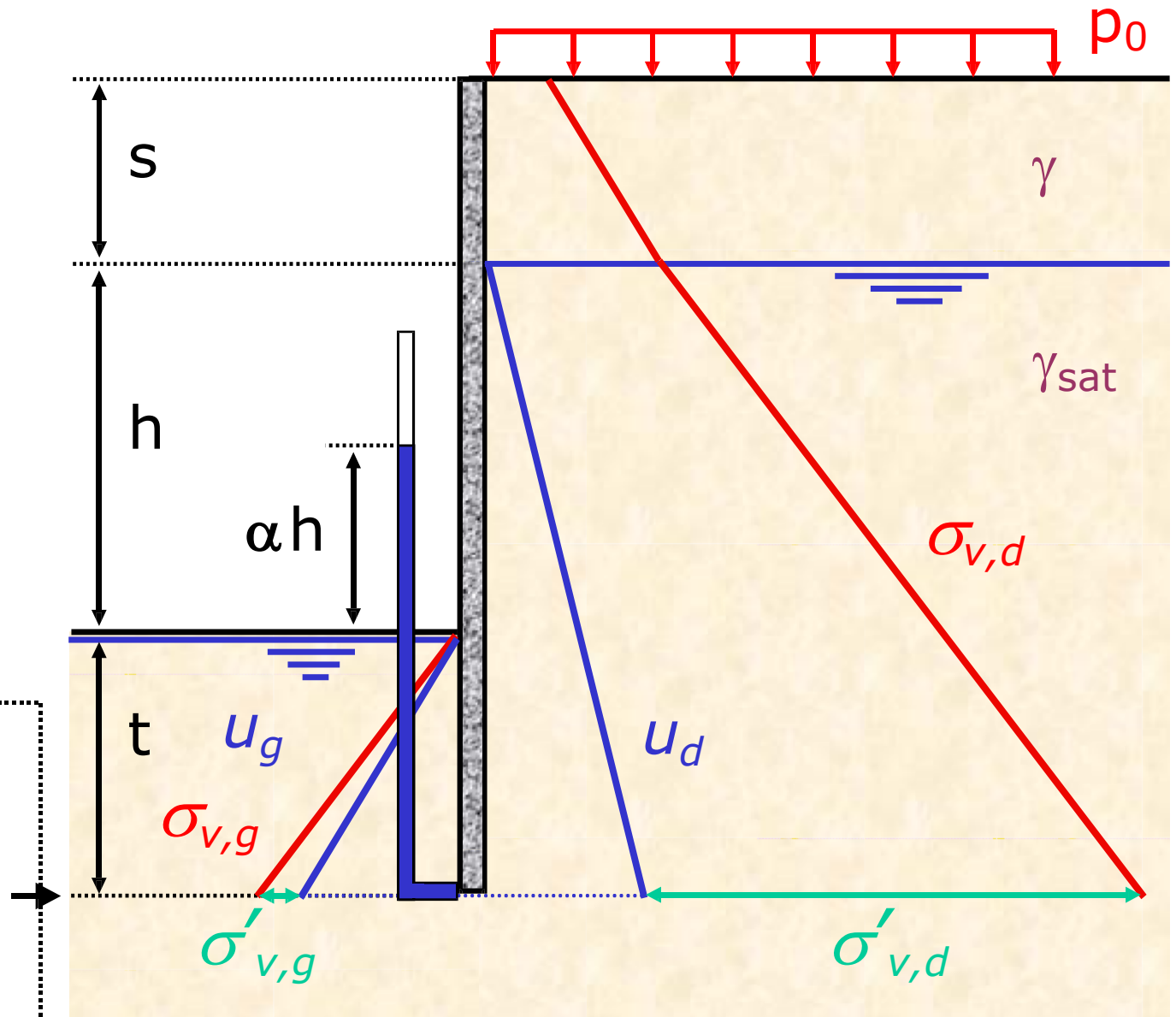
Fond de fouille stable si:

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

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



Contraintes à gauche (côté fouille)

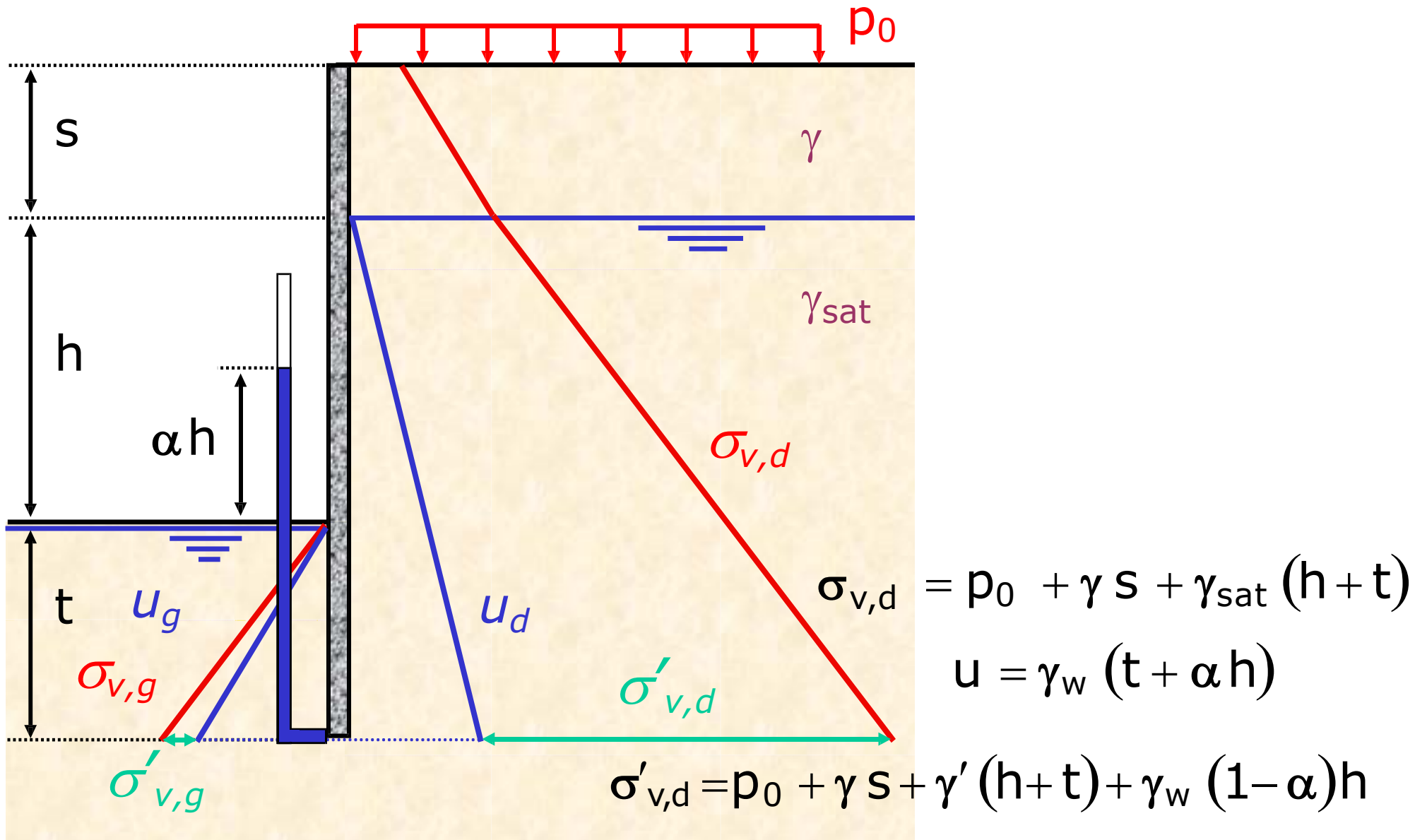


$$\sigma_{v,g} = \gamma_{sat} t$$

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

$$\sigma'_{v,g} = \gamma' t - \gamma_w \alpha h$$

Contraintes à droite (côté terrain)



Vérification avec facteur global de sécurité

fond de fouille stable si:

$$\sigma'_{v,d} < \sigma'_{v,g} N_q / F_s$$

$$t = \frac{1}{\gamma'} \left[\frac{p_0 + \gamma s + \gamma_{\text{sat}} h}{N_q / F_s - 1} + \gamma_w \alpha h \right]$$

avec $N_q = e^{\pi \tan \varphi} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$

$$F_s = 3$$

et $c' = 0$

