



Quelques réflexions sur les problèmes hydrogéologiques rencontrés lors du creusement des tunnels

Bruno DEMAY (GT 7) – Mardi de l'AFTES 26 11 2024

Rappel : écoulement vers une fouille ou un batardeau

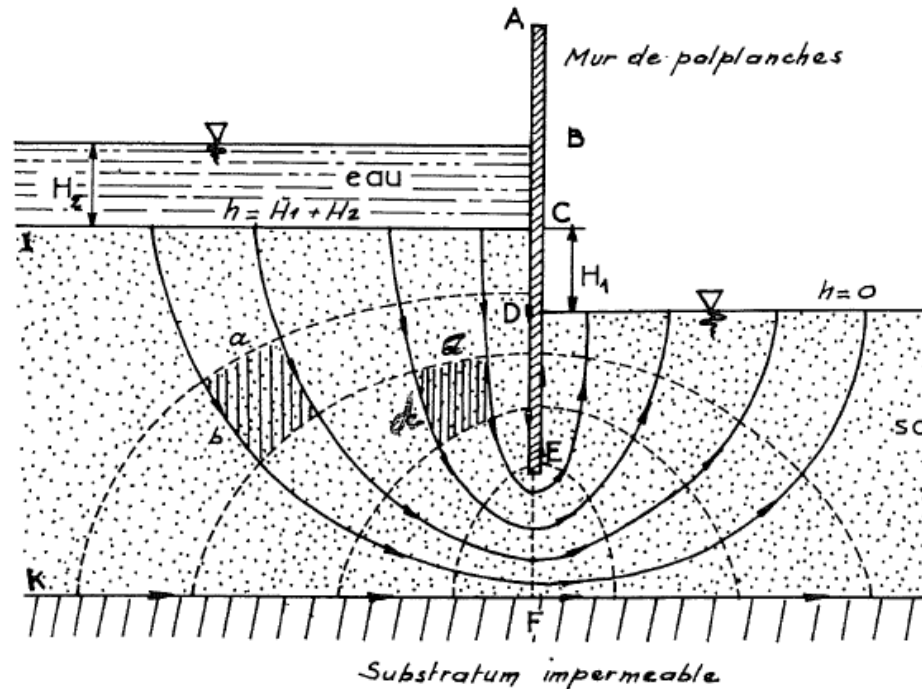
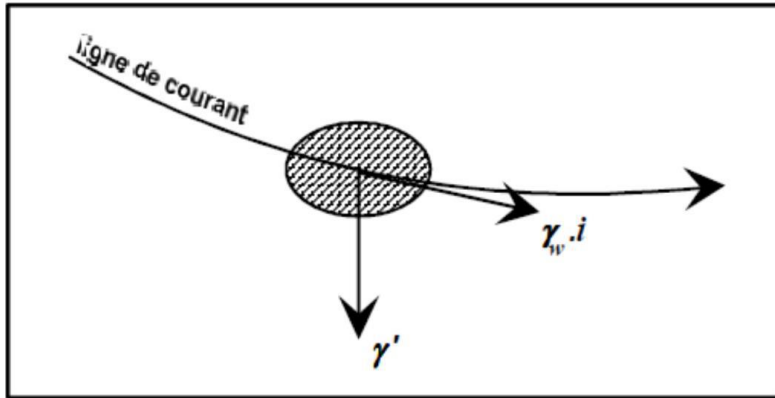


Figure ci-dessus : gradient maximum lors de l'écoulement le long de la palplanche (f fiche de la palplanche)

$$i = \frac{H_1 + H_2}{H_1 + 2f}$$

- $h = \text{charge hydraulique} = \frac{u}{\gamma_w} + z$
- Avec $u = \text{pression hydrostatique}$, $\gamma_w = \text{poids volumique de l'eau}$, $z = \text{altitude par rapport à un plan de référence}$
- Notion d'équipotentielle et de ligne de courant \perp équipotentielle
- Gradient hydraulique i (le long d'une ligne de courant caractérisant l'écoulement entre deux points) = rapport entre la perte de charge entre ces deux points et la distance parcourue lors de l'écoulement

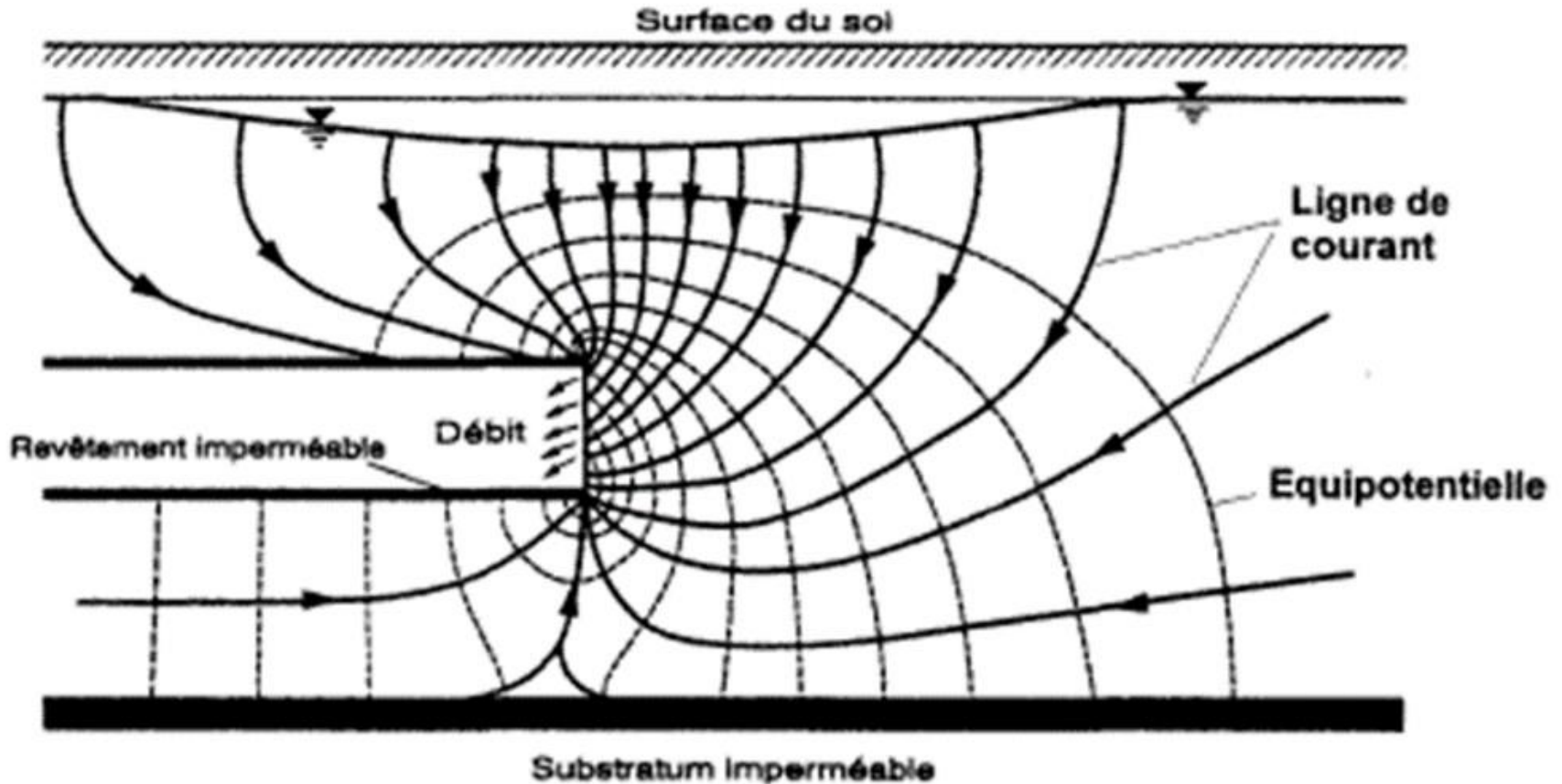
Rappel : Forces d'écoulement le long des lignes de courant



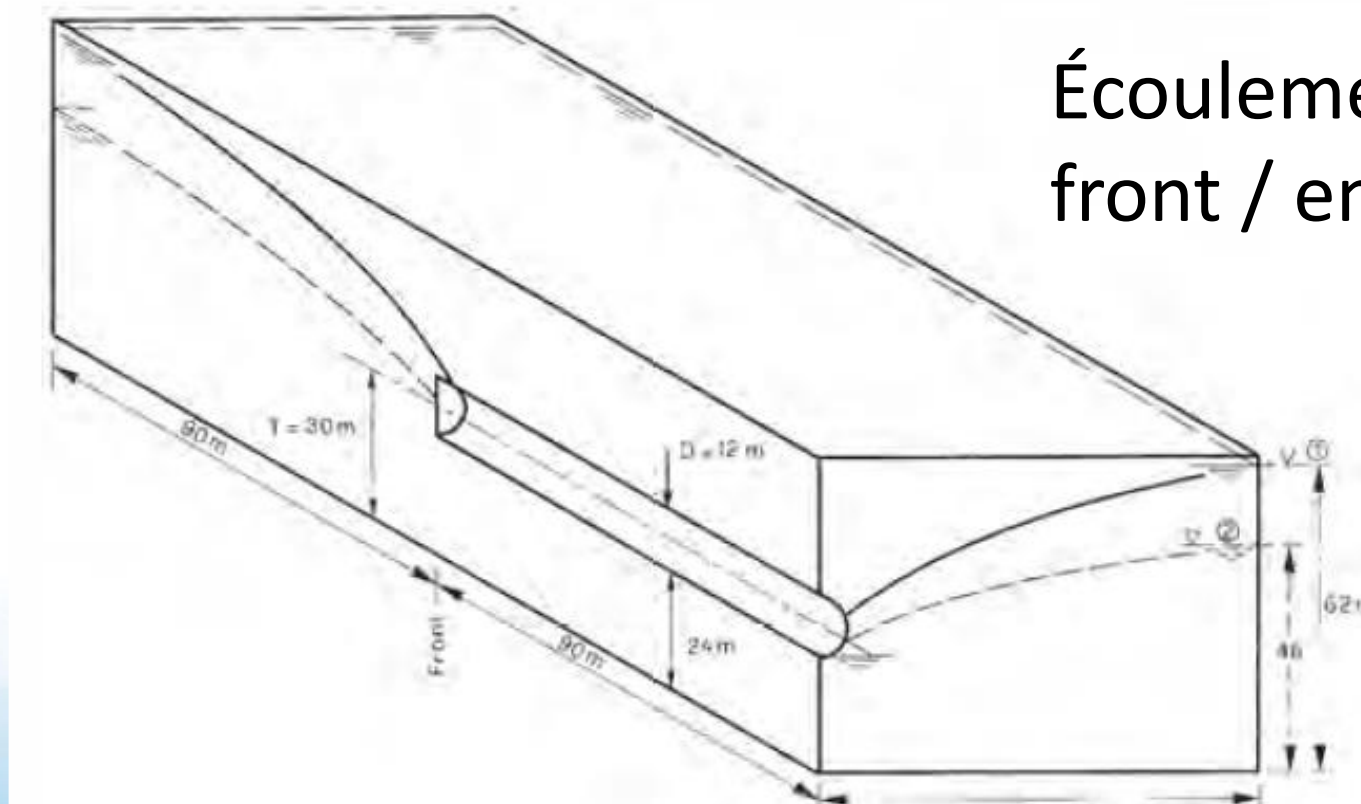
- $\frac{dF}{dV} = i\gamma_w$ est la force d'écoulement unitaire le long de la ligne de courant

Dans l'exemple précédent, pour éviter le soulèvement du fond de fouille (force d'écoulement ascendante verticale) $i\gamma_w$ doit être $< \gamma'$ d'où une condition sur f , en appliquant les coefficients de sécurité réglementaires

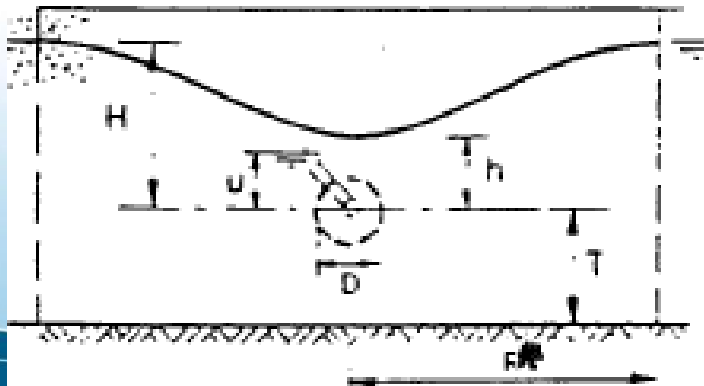
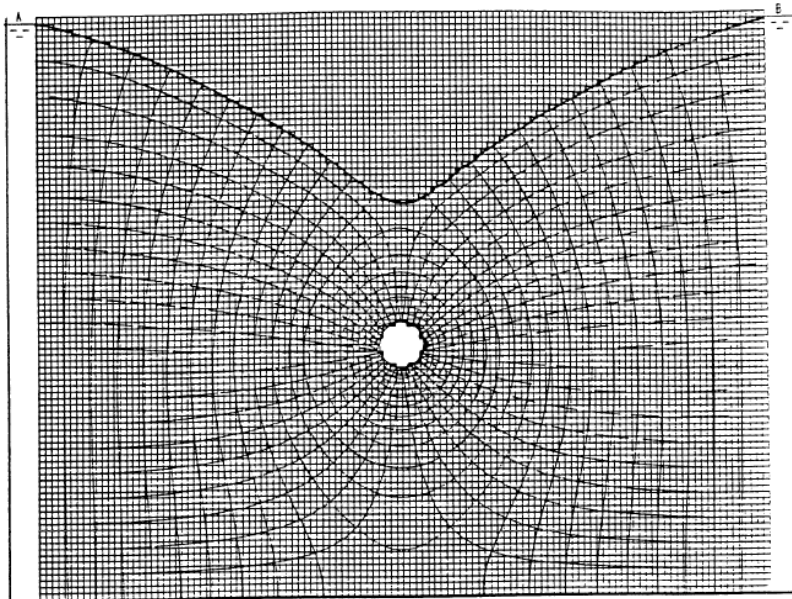
Schéma de l'écoulement d'une nappe libre vers le front d'un tunnel (revêtement imperméable)



Vision 3D (EPFL Descoeurdes, 1987)

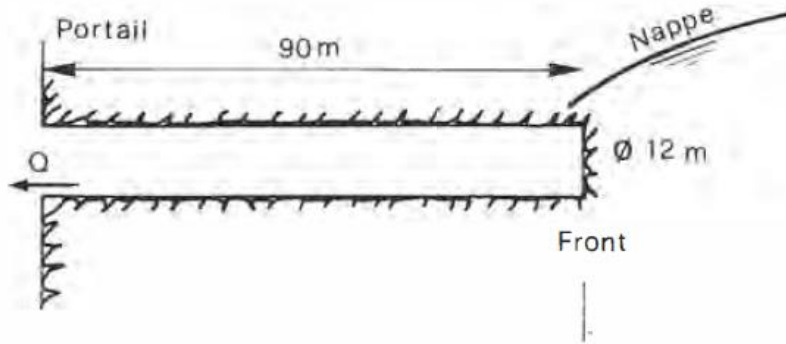


Écoulement à
front / en paroi

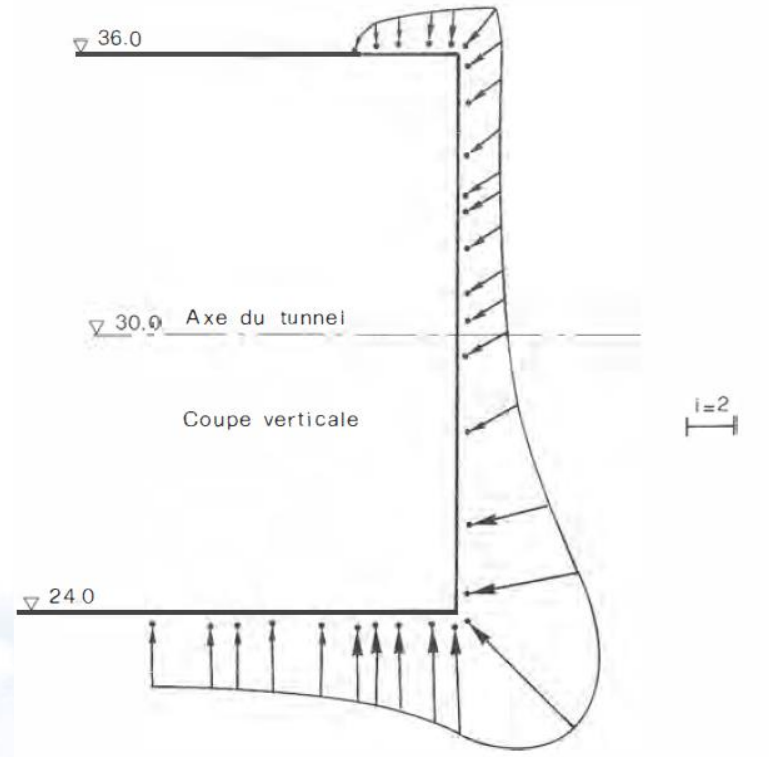


- Source : Descoedres (1987)
- Débit unitaire suivant les notations de la figure
- $q = k(H - u) \left(1 + 3 \frac{T}{H+T} \right) \frac{H}{R^*}$
- u = pression intérieure dans le tunnel (en m)
- R* = rayon d'influence du rabattement
- Et $\frac{h}{D} = 1,43 \left(\frac{H}{D} - 5 \right)$ pour T/D compris entre 1/3 et 5 (pour H/D < 5, l'eau ne s'infiltré que dans la partie inférieure du tunnel)
- Gradients maxi : 1,7

Écoulement en paroi / à front – 2/ à front

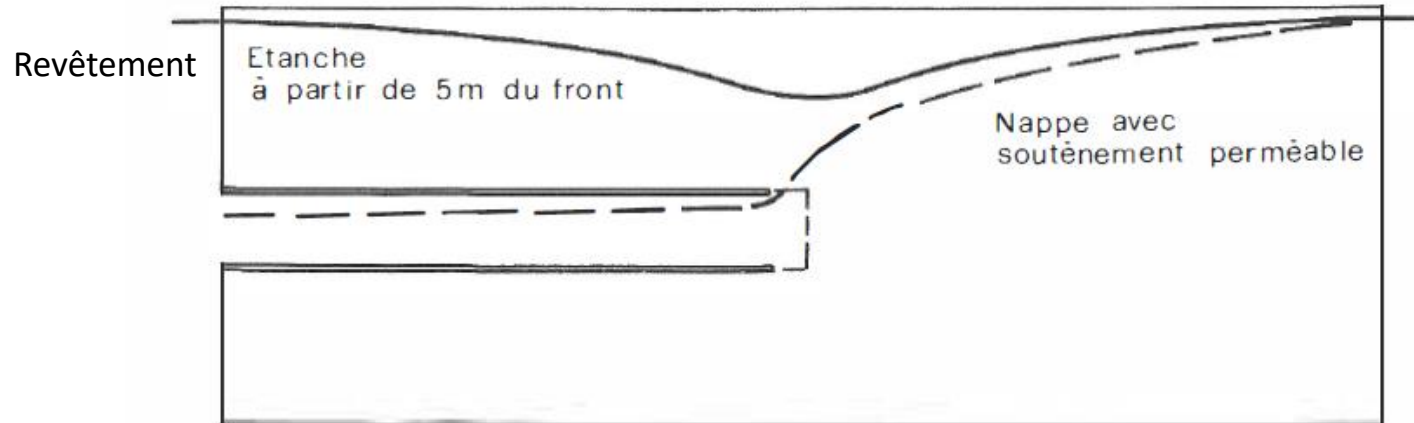


Front totalement ennoyé



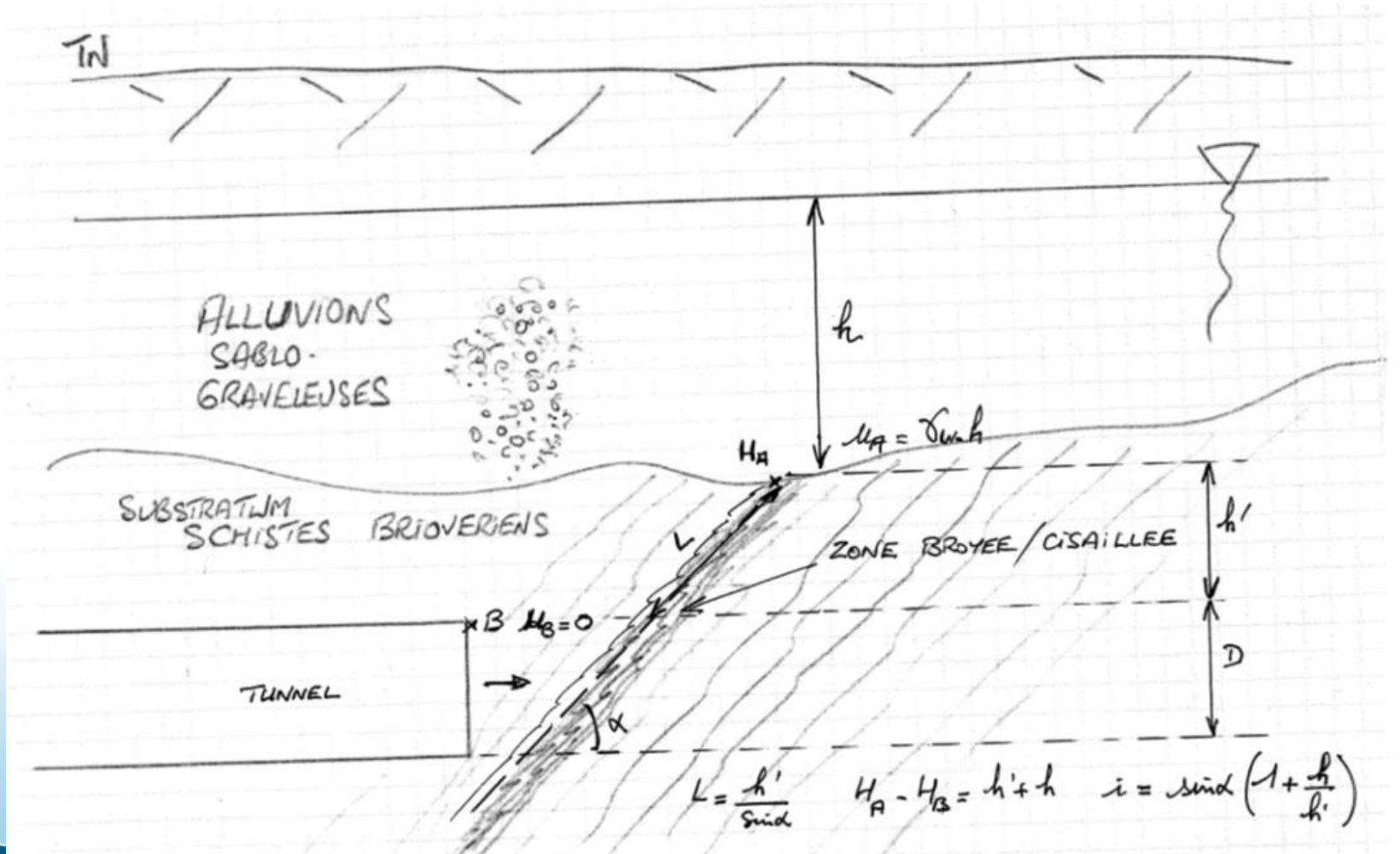
Gradients plus élevés en radier
(6) par rapport à la voûte (2)

Influence du revêtement



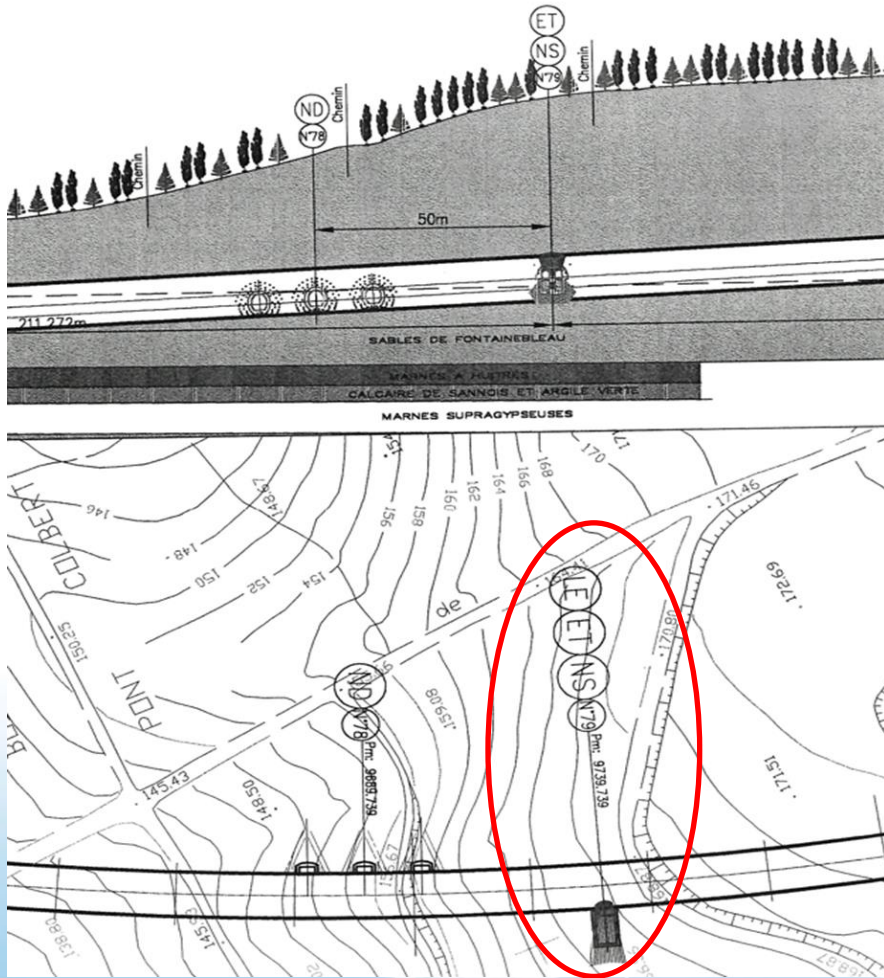
- Cas du revêtement étanche (mis en place immédiatement après l'excavation) = cas du tunnelier : le problème hydraulique se transforme principalement en un **problème de stabilité du front**
- Cas du soutènement perméable (creusement en méthodes conventionnelles) : le problème hydraulique est à la fois un **problème de stabilité du front** et un **problème de maîtrise des débits d'écoulement en tunnel**, également d'influence du tunnel sur la nappe

Impact des forces d'écoulement sur la stabilité du front de taille en milieu rocheux



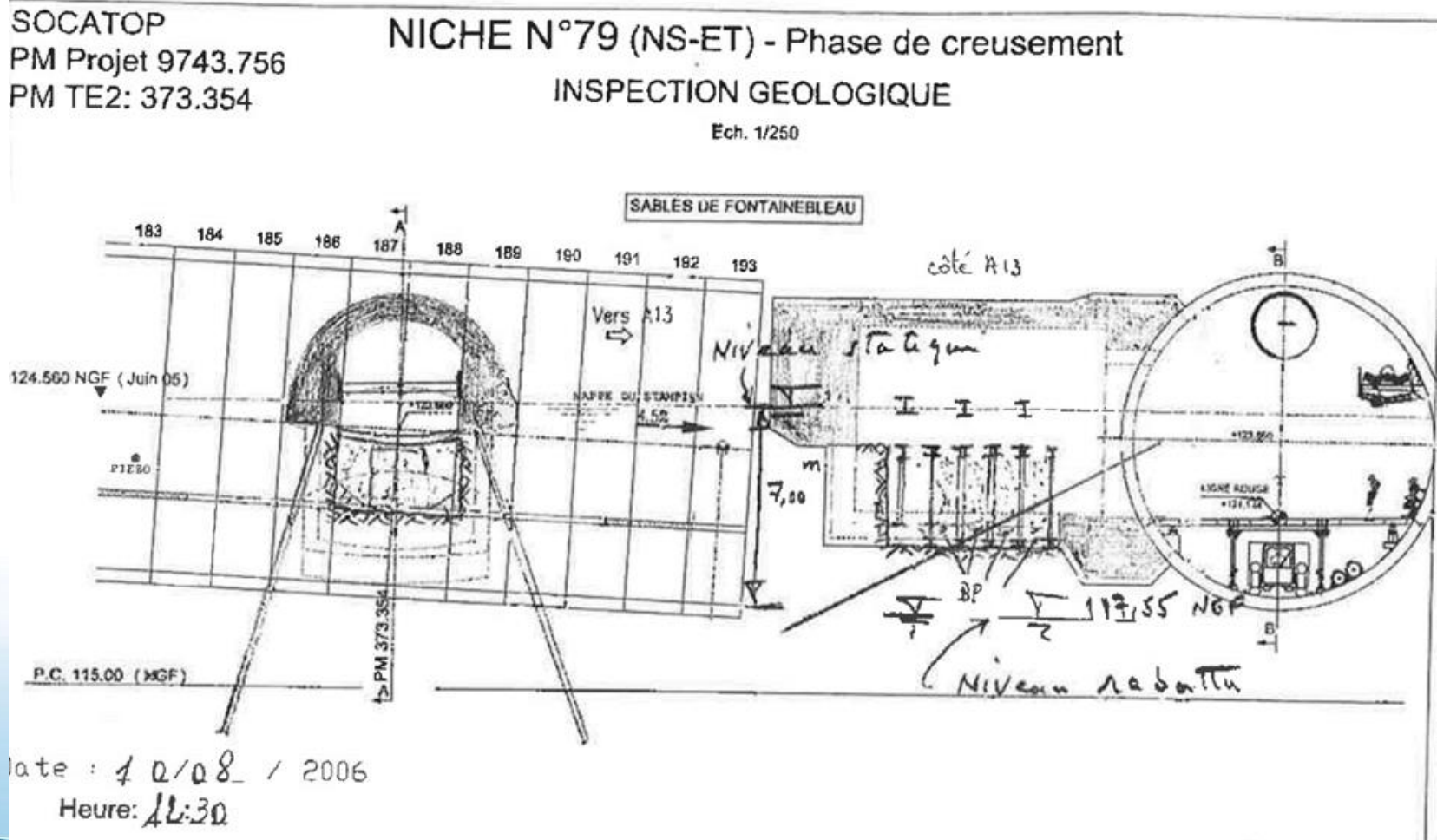
- Exemple du métro de Rennes : creusement dans les schistes Briovériens possédant un pendage α sur l'horizontale
- Schistes hétérogènes (passées gréseuses, siltites, argilites...) avec des plans de cisaillement marqués dans le sens de la schistosité (zones de très faible résistance au sens résistance du joint rocheux)
- si absence de confinement ($u_B = 0$ sur la figure précédente)
 - Gradient hydraulique > forces d'écoulement
 - Expulsion de ces matériaux vers le front du tunnel et instabilité rapide du front de taille
- Difficulté d'identifier ces zones de faiblesse par sondages verticaux

Exemple de réalisation en méthode conventionnelle : les niches du projet SOCATOP



Niches de section rectangulaire ($H = 2l$) à réaliser dans les sables de Fontainebleau sous nappe ($k = 10^{-5} \text{ m/s}$)

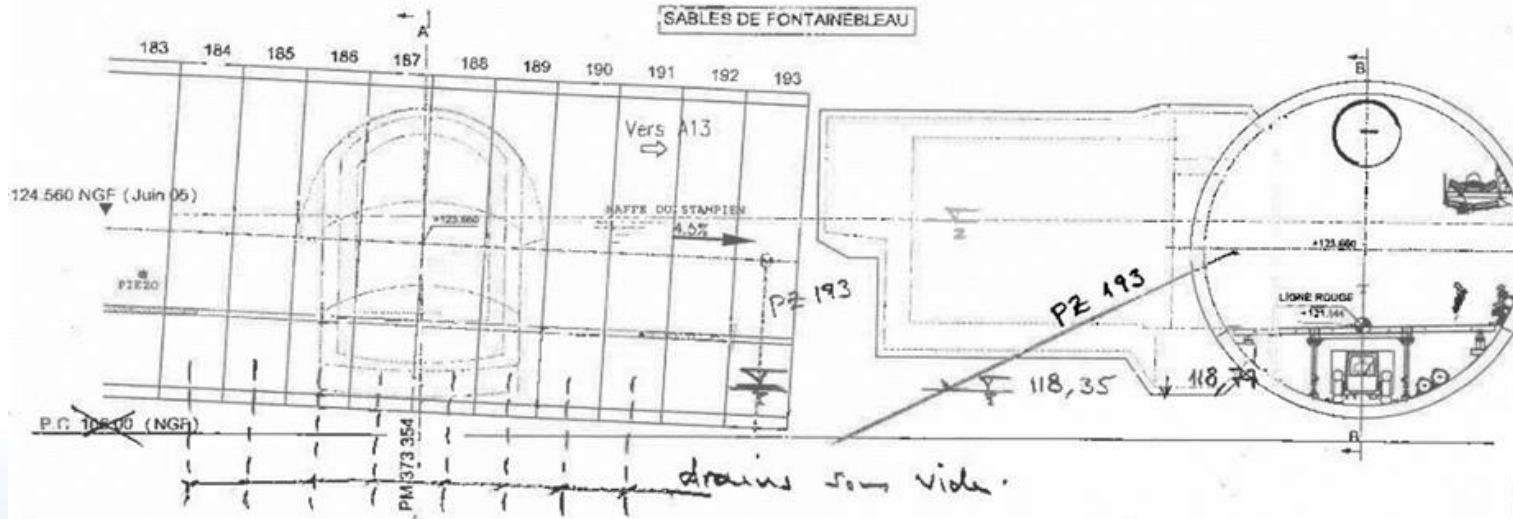
Exemple de réalisation en méthode conventionnelle : les niches du projet SOCATOP



Exemple de réalisation en méthode conventionnelle : les niches du projet SOCATOP

SOCATOP
PM Projet 9743.756
PM TE2: 373.354

NICHE N°79 (NS-ET) - Phase de creusement
INSPECTION GEOLOGIQUE
Ech. 1/250



Date : 16 / 02 / 2006
Heure : 16:40

Observations: Rabattement de dalle, niches 79 et 78

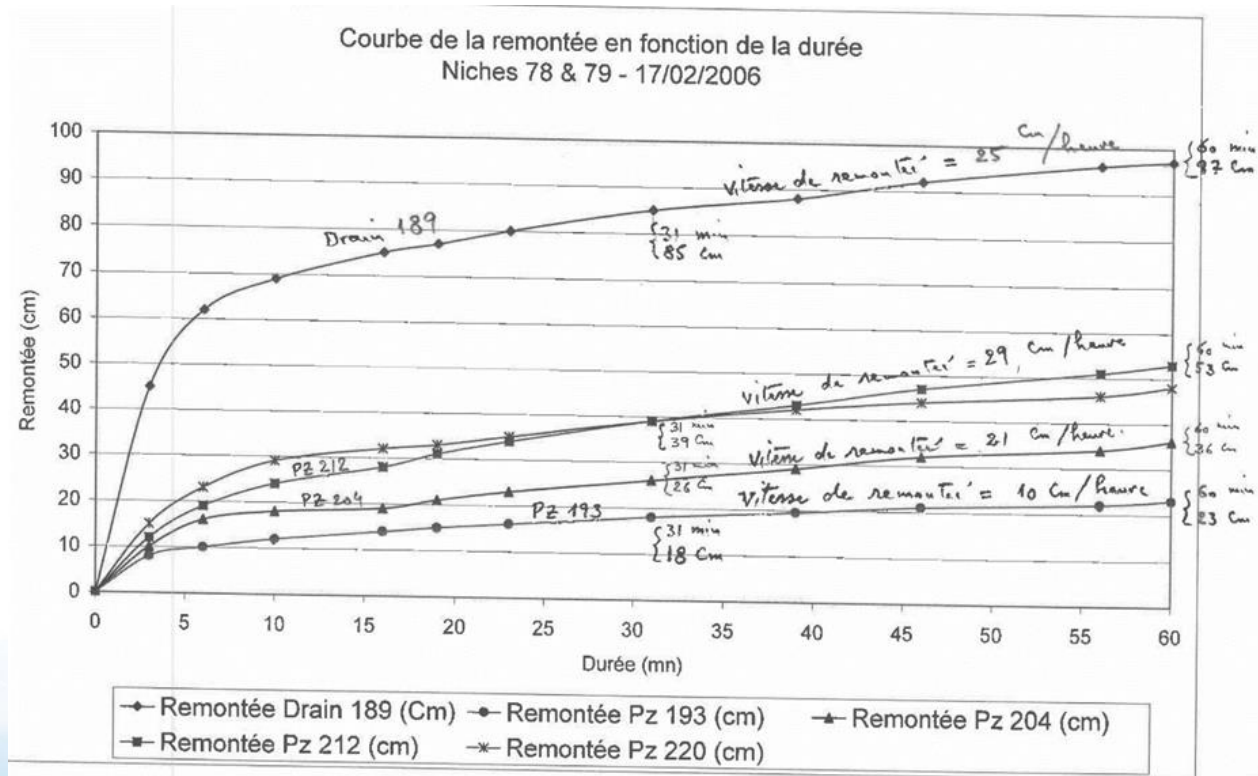
Exemple de réalisation en méthode conventionnelle : les niches du projet SOCATOP



Foration sous sas ϕ 127 mm L = 7,80 m
70 forages maille 2,00 m x 2,00 m



Réseau de drains crépinés 50 mm
fente **750 μ** L = 4,60 à 5,00 m reliés à
une pompe à vide



- Remontée des niveaux d'eau à 0,25 m/h en moyenne lors des déconnexions / reconnexions de drain nécessitées par le phasage d'avancement

- CF. Travaux de M.RAT « Ecoulement et répartition des pressions interstitielles autour des tunnels » (LCPC, 1973), repris par PANET (1995)
- Ce qui a été évoqué jusqu'à présent est relatif à l'écoulement permanent avec des conditions aux limites $h = \text{constante}$ (équipotentielle) et dans ce cas $\Delta h = 0$ (Equation de LAPLACE)
- (= connaissance de la charge hydraulique en tout point du champ étudié)

- Mais pour un terrain compressible et écoulement à surface libre, il existe une phase transitoire (écoulement non permanent) d'une durée égale « au temps nécessaire à l'établissement du régime permanent » pendant laquelle l'écoulement est régi par une équation différente

$$k\Delta h = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

- Avec S_s = coefficient d'emmagasinement du terrain dans le champ étudié = $\alpha + n\beta$
 - $\alpha \rightarrow$ compressibilité du squelette solide
 - $\beta \rightarrow$ compressibilité de l'eau
 - n = porosité (connectée ?) du terrain

S_s est le coefficient d'emmagasinement du massif

$$S_s = \gamma_w \left[\frac{1}{K_d} + \frac{n}{K_w} \right]$$

h est la charge hydraulique ;
 k est le coefficient de perméabilité du terrain ;
 K_d est le module de compressibilité du squelette solide ;
 K_w est le module de compressibilité de l'eau ;
 n est la porosité du terrain.

- Précisions apportées par M.PANET (1995)

- Module de compressibilité du squelette solide $K_d = \frac{E}{3(1-2\nu)}$
- Module de compressibilité de l'eau $K_w = 2000 \text{ MPa}$

Travaux de M.RAT (1973) sur le temps de rétablissement du régime permanent t_w , complétés par M.PANET (1995)

- Cas d'un cylindre infini (assimilable à un creusement en méthode conventionnelle)

$$t_w = 2 \frac{S_s}{k} L_w^2$$

- Cas d'une sphère (assimilable au front d'un tunnelier)

$$t_w = \frac{4}{\pi} \frac{S_s}{k} L_w^2$$

Avec L_w = distance entre l'axe du tunnel et l'équipotentielle

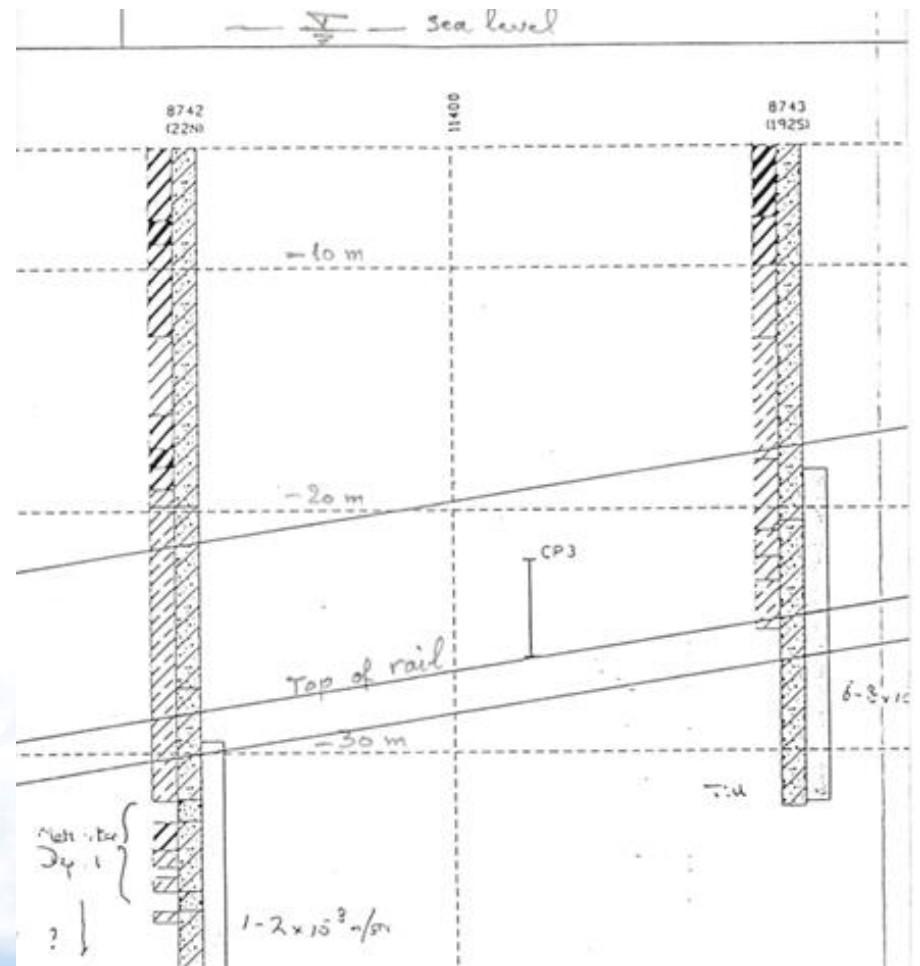
HYDRAULIC CONDITIONS AROUND A TUNNEL

Calculation of time for restoration of hydraulic flow rate around the tunnel

from "le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement", M.PANET, ENPC

| | | | |
|--|------------------|---------------------|----------|
| | | | |
| | PROJECT : | A86 SOCATOP | |
| | SECTION : | Niche NS 79 | |
| | | | |
| Type of tunnel | | Conventional | |
| Ground permeability | k = | 1,00E-05 | m/s |
| Ground deformation modulus | E = | 150 | MPa |
| Ground POISSON's ratio | ν = | 0,3 | |
| Ground porosity | n = | 0,4 | |
| Groundwater head at tunnel axis | L_w = | 4 | m |
| | | | |
| Compressibility modulus for soil particles | K_d = | 125 | MPa |
| Compressibility modulus for water | K_w = | 2000 | MPa |
| | | | |
| Storage coefficient | S_s = | 8,20E-05 | m^{-1} |
| | | | |
| Time for restoration of hydraulic flow (duration of undrained conditions state) | t_w = | 0,073 | hour |

- Projet STOREBAELT(1989-1995 : 2 tunnels ferroviaires Φ 8,00 m de 7500 m de long reliés par 32 cross-passages ϕ 4,50 m
- Certains cross-passages sont dans des argiles glaciaires (tills) surconsolidés
- Cas du CP3 à 26 m de profondeur sous le fond marin



| HYDRAULIC CONDITIONS AROUND A TUNNEL | | | |
|--|------------------|--------------|-----------------|
| Calculation of time for restoration of hydraulic flow rate around the tunnel from "le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement", M.PANET, ENPC | | | |
| PROJECT : STOREBAELT | | | |
| SECTION : CP 3 | | | |
| Type of tunnel | | Conventional | |
| Ground permeability | k = | 1,00E-06 | m/s |
| Ground deformation modulus | E = | 150 | MPa |
| Ground POISSON's ratio | v = | 0,35 | |
| Ground porosity | n = | 0,33 | |
| Groundwater head at tunnel axis | L _w = | 26 | m |
| Compressibility modulus for soil particles | K _d = | 167 | MPa |
| Compressibility modulus for water | K _w = | 2000 | MPa |
| Storage coefficient | S _s = | 6,17E-05 | m ⁻¹ |
| Time for restoration of hydraulic flow (duration of undrained conditions state) | t _w = | 23,153 | hour |

- Argile plutôt sableuse : perméabilité estimée à 10^{-6} m/s
- Faible porosité (terrain surconsolidé)
- Temps de stabilité : de l'ordre d'une journée
- Autres exemples du même type :
 - tous les creusements dans l'Argile de Londres
 - Métro de BAKOU (avec une nappe artésienne !)

- Les reconnaissances hydrogéologiques sérieuses sont fondamentales pour les projets de tunnel
- Rien ne remplace les essais en laboratoire sur des échantillons intacts
- **Bien comprendre les conditions d'alimentation / réalimentation de la nappe et d'établissement du régime hydrostatique (facteur temps !)**
 - Attention aux dimensionnements abusifs des soutènements et des revêtements (ex. prendre la pression hydrostatique toute hauteur... dans des formations argileuses globalement imperméables avec des nappes non réalimentées...) (cas vécus sur le GRAND PARIS)





Merci de votre attention