

**Chapitre 5 : Pompage de la
nappe**

Chapitre 5 : Pompage de la nappe

Introduction :

Afin d'exécuter le projet on doit rabattre notre nappe d'eau, pour cela on suggère deux méthodes de travail:

1. On rabatte l'eau jusqu'à une distance de 1m sous le fond de la fouille donc a -7m et on excave 6m pour les deux sous-sols. Une fois les travaux terminés on relâche la nappe. On devra vérifier le tassement correspondant.

CALCUL :

Après excavation de l'argile, on a un nouveau

$$\sigma'_{vf} = 5 \times 20 + 2 \times 19.5 - 6 \times 10 = 79 \text{ kPa} < \sigma'_p.$$

(au milieu de la couche après excavation)

$$S_c = C_r \times \frac{H_0}{1+e_0} \log \left(\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{vi}} \right) = -2.8 \text{ cm}.$$

$$\frac{e_f - e_i}{1+e_0} = \frac{\Delta}{H_0}$$

Donc, $e_f = 0.795$. (courbe de recompression)

$$C_r = 0.02$$

Après avoir ajouté la charge: $\sigma'_{vf} = 79 + 6 \times 15 = 169 \text{ kPa} < \sigma'_p$.

(avec charge transmise par étage = 15 kPa).

Alors la même formule nous donne: $S_{total} = 3.88 \text{ cm}$.

et $e_f = 0.783$ (courbe de compression vierge).

Quand on relâche la nappe, elle remontera à son niveau initial, donc il y aura un gonflement du sol.

$\Delta u = 50 \text{ kPa}$ car la nappe remontera de 5 m et

$\Delta\sigma = 0$ car \leq sol ne change pas

Donc $\Delta\sigma' = 0 - 50 \rightarrow \sigma'_{vf} = 169 - 50 = 119 \text{ kPa} < \sigma'_p$.

Donc avec la même formule on tire:

$$S_c = -1.8 \text{ cm}.$$

2. On excave et on rabat la nappe à la même distance sauf que dans ce cas on relâche la nappe au fur et à mesure dès que le premier étage est terminé. Ceci est peut-être plus économique du point de vue utilisation de la pompe.

Le tassement final, à la fin de la construction sera donc moins élevé que le cas précédent!

En effet:

$$\sigma'_{vf} = \sigma - u = 5 \times 20 + 2 \times 19.5 + 90 - 110 = 119 \text{ kPa} < \sigma'_p.$$

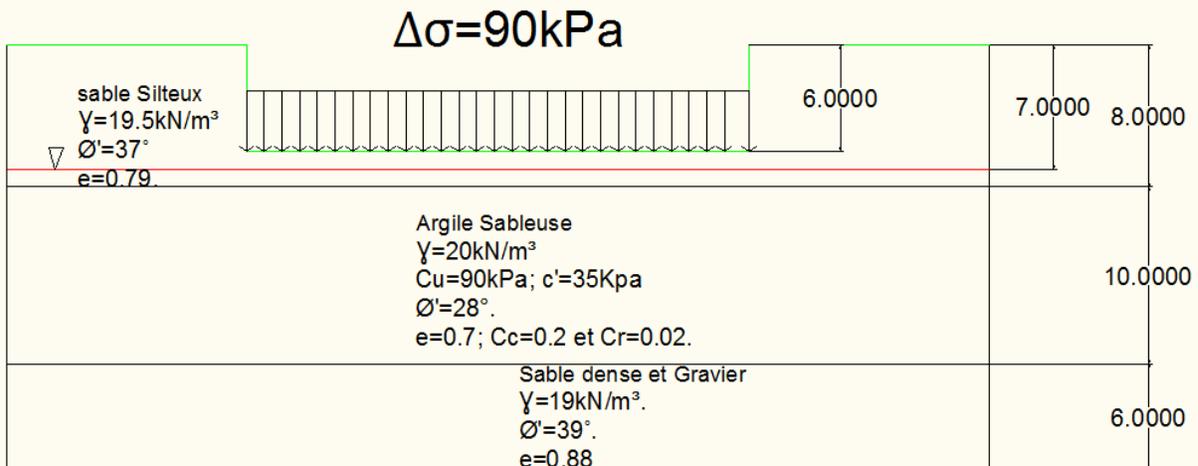
$$\text{avec } \sigma'_{vi} = 79 \text{ kPa}.$$

donc

$$S_{\text{ctotal}} = 2.09 \text{ cm} < 3.88 \text{ cm} \rightarrow \text{OK}.$$

$$e_f = 0.786 \quad (\text{Courbe de compression vierge}).$$

Après excavation de 6m et rabattement de la nappe.



1) **Définition des eaux souterraines:**

Il est convenu qu'une partie des eaux de précipitation ruissellent à la surface des continents pour former les cours d'eau, alors qu'une autre partie s'infiltré dans le sol perméable pour donner ce qu'on appelle les eaux souterraines. Elles constituent alors une nappe aquifère ou phréatique, contenant de l'eau en quantités exploitables.

Contrairement à la croyance souvent répandue que ces eaux sont stockées dans des sortes de rivières ou de grands lacs souterrains, les eaux souterraines sont contenues dans les pores des sédiments ou des roches.

2) **Différence entre porosité et perméabilité:**

- **Porosité:**

C'est la capacité d'un matériau de contenir de l'eau.

Pour un échantillon de roche, la porosité totale d'une roche est donnée par:

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100 (\%).$$

Les valeurs de n varient entre 0 et 100%.

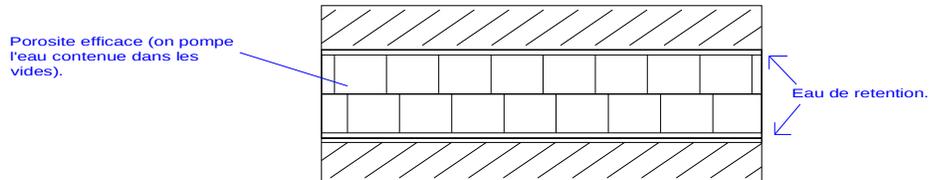
Quelques exemples de roches :

- à porosité nulle : le marbre, les roches évaporitiques (sels, anhydrites...)
- à porosité forte : les argiles.

Remarque : on ne peut prélever l'eau contenue dans les argiles car c'est de l'eau de rétention, "coincée" entre les feuillets. Seule la chaleur peut libérer cette eau. Les plantes ont toutefois la

capacité de la puiser. (A noter qu'en Afrique, l'argile était utilisée comme moyen de torture, sous la chaleur).

On distingue ainsi la porosité totale de la porosité efficace :



- **Perméabilité :**

La perméabilité est la capacité d'un matériau à se laisser traverser par l'eau.

Une roche très poreuse peut être faiblement perméable (comme les argiles : les pores ne sont pas reliés entre eux).

Quelques exemples de roches :

- à perméabilité faible : argiles, granites
- à perméabilité forte : sables, graves, calcaires.

$$K = \text{perméabilité} \left(\frac{\text{longueur}}{\text{temps}} \right).$$

$i = \text{gradient hydraulique}.$

Écoulement (seepage) : mouvement de l'eau à travers les particules du sol.

En mécanique des fluides, il existe différentes façons de décrire les écoulements : ils peuvent être permanents ou transitoires, selon que les conditions varient ou non dans le temps. L'écoulement peut être unidimensionnel si la pression, la vitesse et la température sont constantes dans n'importe quelle direction perpendiculaire à l'écoulement.

Un écoulement bidimensionnel : les paramètres sont constants dans les plans parallèles.

Un écoulement tridimensionnel : les paramètres varient selon les trois directions orthogonales.

En géotechnique, on suppose que les écoulements sont unidimensionnels ou bidimensionnels (barrage → bidimensionnel).

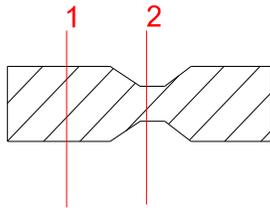
Un écoulement peut être laminaire ou turbulent ; il est laminaire quand il se produit en couches parallèles qui ne se mélangent pas. Il est turbulent quand des variations aléatoires engendrent un certain mélange et une dissipation d'énergie interne.

La zone qui sépare les deux régimes est la zone transitoire.

On remarque que i varie en fonction de la vitesse v .

i est un concept très important ; il est défini comme la perte de charge Δh par unité de la longueur l :

$$i = \frac{\Delta h}{l}.$$



Pour un Venturi, d'après la loi de conservation de masse, pour des écoulements incompressibles, on peut écrire, q constante (m^3/s) avec

$$q = V_1 \times A_1 = V_2 \times A_2 ,$$

L'air diminue alors la vitesse augmente, on s'intéresse à la surface où l'eau va y pénétrer.

Dans l'écoulement laminaire, quand i augmente, Δh augmente, et la perte de charge Δh varie linéairement avec v . Ailleurs, cette variation n'est plus linéaire. A partir de la zone de transition, l'énergie se dissipe à un taux élevé et la relation devient non linéaire.

Dans la zone turbulente, quand v diminue, l'écoulement redevient à la fin laminaire.

Dans la plupart des sols, la vitesse est très faible donc on est en écoulement laminaire, d'où la relation suivante :

$$v = Ki \quad (v = \text{vitesse de l'écoulement}).$$

C'est la loi de Darcy.

Résumé :

$$q = v \times A = KiA = K \frac{\Delta h}{l} A$$

$q = d \text{ é bit total à travers la surface transversale } A.$

$v = \text{vitesse}.$

$A = \text{section transversale}.$

$K = \text{constante de proportionnalité ou perméabilité}.$

Pour une longueur unitaire ($l=1$). L'eau passe à travers le sol par le vide existant dans ce sol, plus il ya du vide, plus le passage de l'eau est grand.

L'eau ne peut pas s'écouler à travers les particules solides et circule à travers les pores.

Pourquoi ne pas utiliser la section des vides pour calculer une vitesse ?

$$e = \frac{V_v}{V_s} (\text{indice des vides}).$$

Pour une même longueur, $e = \frac{A_v}{A_s}.$

La vitesse d'approche V_a et la vitesse de décharge V_d sont toutes les deux égales à

$$v = \frac{q}{A}.$$

D'où v n'est qu'une vitesse superficielle (donc fictive). La vitesse V_s de l'eau s'écoulant dans les pores est plus grande (A plus petite) que la vitesse superficielle.

$$q = V_a A = V_d A = VA = V_s A_v$$

On peut alors établir l'équation :

$$\frac{A_v}{A} = \frac{V_v}{V} = n$$

D'où, $V = n V_s$ (avec $n = \text{porosité}$)

$0 < n < 1$ où, $V_s \text{ toujours} > V$.

K dépend de e et de n.

La forme des vides et des cheminements aux travers des interstices (pores) qu'on appelle tortuosité (elle affecte la perméabilité), a aussi un effet sur le paramètre K.

3) Mesure de la perméabilité :

- Au laboratoire :

Les essais en laboratoire apparaissent comme le moyen le plus simple, le plus rapide et le moins coûteux de déterminer le coefficient de perméabilité K des sols. Les deux essais les plus couramment utilisés sont les essais de perméabilité à charge constante et à charge variable. Avec les sols peu perméables, on mesure K à partir de l'essai de consolidation. Sur terrain on fait généralement des essais de pompage.

1. Dans l'essai à charge constante, la quantité d'eau recueillie pendant un intervalle de temps t est :

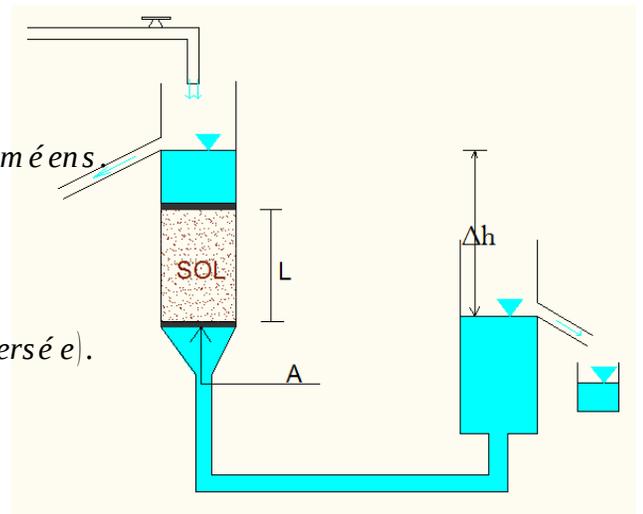
$$Q = Avt.$$

$$v = Ki = K \frac{\Delta \hat{c}}{l} \text{ et } k = \frac{QL}{\hat{c}}$$

Q = quantité totale d'eau en m^3 durant un intervalle t exprimé en s.

A = aire normale à l'écoulement de l'échantillon en m^2 .

L = longueur en m (hauteur du sol, ou longueur du sol traversé e).



2. Dans l'essai à charge variable :

$$q_{ech} = q_i.$$

$$K = 2.3 \frac{aL}{A \Delta t} \log_{10} \frac{h_1}{h_2}.$$

a = aire du tube .

A = aire normale du sol .

L = hauteur du sol .

Δt = l' intervalle de temps pour que l' eau passe de h_1 à h_2 .

$$\Delta t = t_2 - t_1.$$

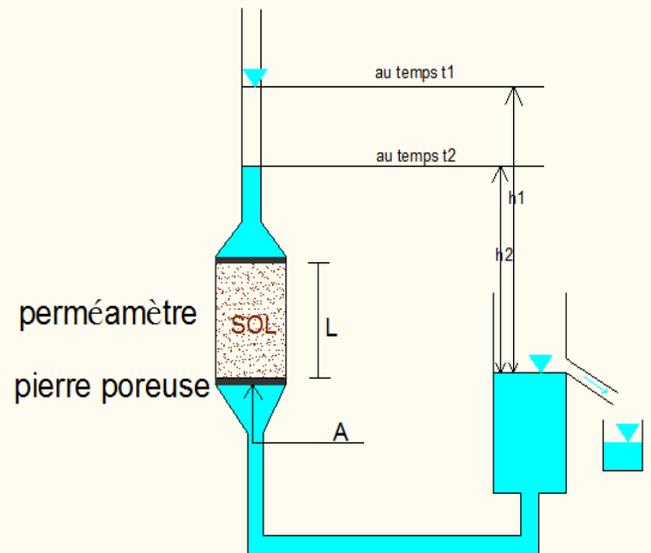
$$K \text{ est en } \frac{m}{s}$$

➤ **In situ :**

Ces mesures sont réalisées dans l'environnement rapproché du captage pour apprécier le degré de vulnérabilité de la nappe. Elles doivent être couplées avec des sondages pour évaluer l'épaisseur des formations de recouvrement.

Les essais de perméabilité in situ font appel à différentes méthodes :

Essai PORCHET à niveau variable. De mise en œuvre aisée, il nécessite un appareillage très sommaire. Un trou cylindrique, foré à l'aide d'une tarière est rempli d'eau afin de saturer le sol. Au cours de l'infiltration, après saturation, les variations du niveau d'eau dans le trou sont notées, en fonction du temps, et l'on écrit :



$$K = \frac{r}{2(t_2 - t_1)} \log \frac{h_1 + h_2}{h_2 + r_2}$$

Avec r et h en mètre

t en seconde

K en m/s

Log : logarithme népérien

Avantage : Cet essai est facile, rapide à réaliser même sur de grandes superficies.

Inconvénients :

- La mesure peut être longue car elle nécessite la saturation complète du sol. De plus, pour les terrains peu perméables, le niveau d'eau varie très peu en une heure.
- La valeur de la perméabilité est imprécise :
L'exploitation mathématique de l'essai PORCHET se base sur l'hypothèse que l'eau s'écoule selon un gradient hydraulique de 1. Cette hypothèse est vérifiée seulement lorsque les terrains à proximité du trou sont suffisamment saturés et que le milieu d'infiltration est homogène et isotrope. Ces deux conditions sont rarement présentes dans la nature. A noter qu'il existe quelques logiciels, qui fabriquent des modélisations numériques afin de corriger le taux d'erreurs dans les formules mathématiques de PORCHET. (FEFLOW...)

Essai PORCHET à niveau constant. Un dispositif adapté permet de maintenir le niveau d'eau constant dans le trou foré à la tarière, comme précédemment. La relation qui permet alors le calcul de la perméabilité, après saturation, est la suivante :

$$K = \frac{Q}{2\pi r \left(h + \frac{r}{2} \right)}$$

Avec r et h en mètre

K en m/s, Q en m^3/s

La méthode de PORCHET à niveau constant nécessite un matériel plus sophistiqué que pour l'essai à niveau variable. En revanche, elle donne des résultats plus précis et plus fiables.

Essai MUNTZ (<<double- anneaux>>). La méthode des double-anneaux, permet de différencier les perméabilités horizontale et verticale, pour ne prendre en compte que cette dernière. Le principe de la technique convient parfaitement à la mesure in situ de faibles perméabilités.

Cet essai, de mise en œuvre plus délicate, nécessite un dispositif comprenant essentiellement deux cylindres métalliques emboîtés, l'un de mesure au centre, l'autre de garde, ou de saturation, en périphérie.

Le maintien d'une charge d'eau constante sur un anneau de terrain autour du cylindre étudié limite la mesure à la seule perméabilité verticale.

L'opération consiste à maintenir constant le niveau d'eau sur l'anneau périphérique.

Sur le disque intérieur, le maintien de cette charge entraîne un abaissement du niveau d'eau dans le réservoir, correspondant à la hauteur d'eau infiltrée au droit de la surface d'étude (le disque a la même surface que la section du réservoir).

La mesure consiste à enregistrer la hauteur d'eau infiltrée en fonction du temps.

L'interprétation des résultats suit la loi de Darcy. Par rapport à la méthode PORCHET, le terme d'infiltration horizontale disparaît en raison de la saturation des terrains entourant le cylindre étudié. Le débit d'eau s'écrit :

$$Q = \left(\frac{dh}{dt} \right) \cdot \pi \cdot R^2$$

D'après Darcy :

$$Q = K \cdot S \cdot i = K \cdot (\pi \cdot R)$$

D'où :

$$K = \frac{dh}{dt}$$

Le coefficient de Darcy K est donc directement donné par la pente << hauteur d'eau infiltrée sur temps >> après stabilisation du phénomène.

Essai LUGEON (Maurice LUGEON)

Test permettant la mesure de la perméabilité des roches au travers d'un forage d'essai. On obtient par cette méthode uniquement les coefficients de perméabilité ponctuels de fissure soit au voisinage immédiat de la cavité du forage. Méthode utilisée pour estimer la perméabilité des fondations de barrages.

Il consiste à injecter de l'eau sous différentes pressions croissantes (de 0 à 1Mpa puis 0) dans une partie de la cavité du forage préalablement isolée à l'aide d'un obturateur.

Essai Lugeon pour la perméabilité des roches :

Pour chaque pallier de pression, on mesure le volume d'eau injecté en 10 minutes. Les valeurs de pressions p ascendantes et descendantes sont des pressions corrigées en fonction de la profondeur de l'essai et des pertes de charge :

$$p = p_{\text{mano}} + \gamma_w h - p_c$$

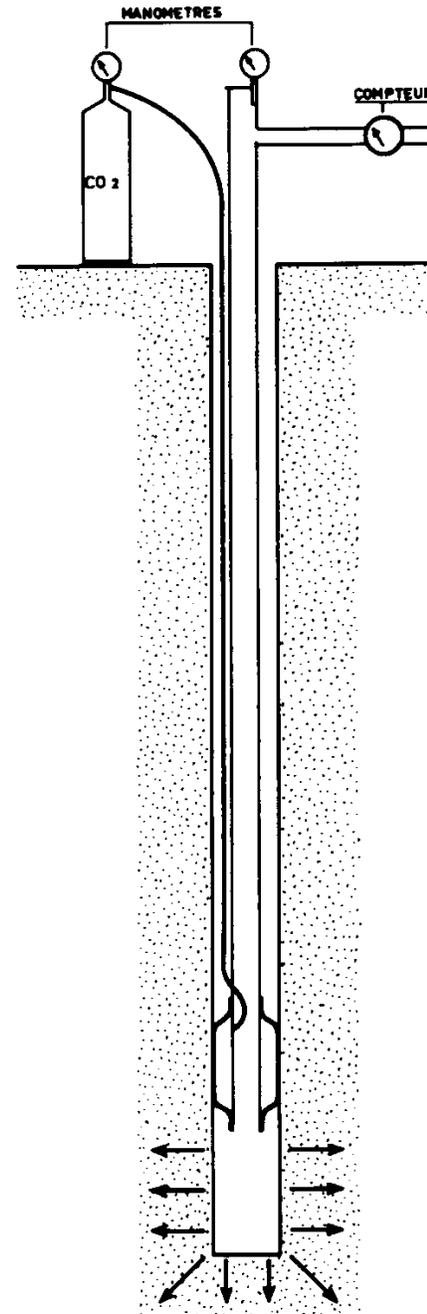
p_{mano} : pression lue sur le manomètre ;
 h : hauteur du manomètre / nappe ;
 p_c : pertes de charge ;
 γ_w : poids volumique de l'eau.

Pour l'interprétation des essais Lugeon, on construit les courbes débit/pression : $Q = f(p)$, de la montée et la descente en pression.

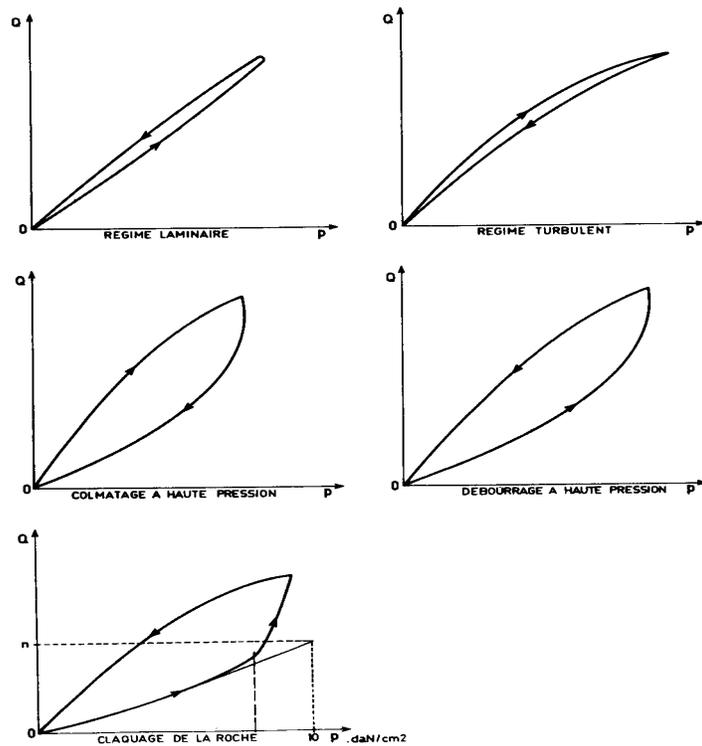
Leur non-chevauchement fournit des indications sur le comportement du forage (écoulement turbulent, colmatage, éboulement, etc...).

En début d'essai l'écoulement est à tendance laminaire ce qui permet de tracer la tangente à l'origine de la courbe pour la détermination du débit [en l/min] pour 1Mpa que l'on ramène ensuite à 1ml de forage. Toutefois, on limitera cette approximation au cas du colmatage à haute pression ou de l'écoulement turbulent car elle joue dans le sens de la sécurité. Dans le cas du débouillage, on relèvera directement sur la courbe la valeur du débit correspondant à la pression de 1Mpa. Par contre, s'il y a claquage, le débit caractérisant la roche est obtenu en extrapolant jusqu'à 1Mpa la courbe obtenue avant le claquage.

Différentes formes de courbes d'essais Lugeon



Le résultat est donné en unité Lugeon. L'unité Lugeon correspond à l'absorption de 1 litre d'eau par mètre de forage et par minute sous une pression constante de 1Mpa. Si le débit ramené à 1,00 mètre de forage est de N litres/minute, on dira que la perméabilité de la roche est de N Lugeon.



Si longueur de la passe d'essai L > 1,00 mètre :

$$N = \frac{Q [l / mn \text{ sous } 1Mpa]}{L} \quad [\text{Lugeon}]$$

- ✓ Q : débit injecté sous 1Mpa ;
- ✓ L : longueur de la passe.

Si longueur de la passe d'essai L < 1,00 mètre :

$$N = Q_o [\text{Lugeon}] \text{ avec } Q_o = \frac{m_o}{m} Q$$

- m_o : coefficient de forme d'un tronçon de 1ml ;
- m : coefficient de forme de la passe d'essai ;
- Q : débit injecté sous 1MPa
- L : longueur de la passe.

Une perméabilité de 1 Unité Lugeon correspond environ à 10^{-7} m/s

Essai LUGEON simplifié

On peut réaliser un essai Lugeon simplifié moins long pour les sols de mauvaise qualité mécanique avec des paliers de 5 minutes et des pressions moindres. Les résultats obtenus ne sont pas d'une grande précision, ils doivent être considérés comme une simple indication. On utilise alors la formule :

Unité Lugeon :

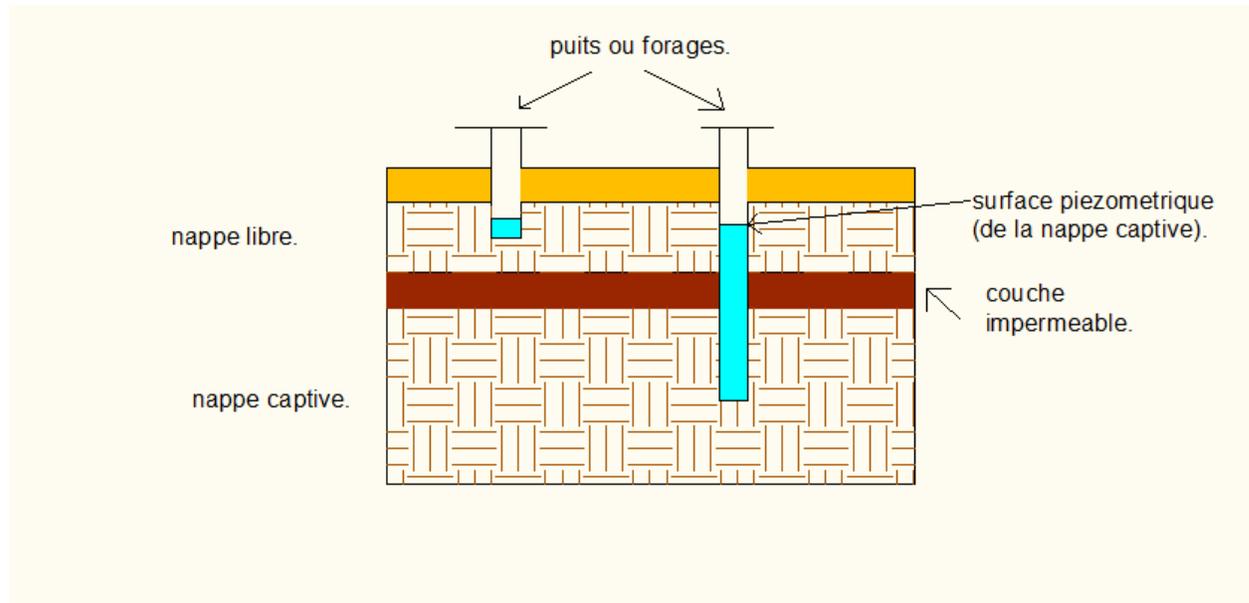
$$N = \frac{2.Q}{(P + 0,1.H).L}$$

- N : Coefficient Lugeon
- Q : Quantité totale d'eau absorbée (en litre par 5 minutes) ;
- P : Pression de l'eau en tête de forage;
- H : profondeur du niveau statique en m ;
- L : Longueur de la tranche.

4) **Principaux types d'aquifères :**

Les formations géologiques sont sédimentaires pour l'essentiel. Elles composent les différents systèmes aquifères et ont des caractéristiques géométriques (épaisseur et extension) et hydrodynamiques (emménagement, perméabilité) très variées.

On distingue deux types principaux de réservoirs d'eau souterraine :



- Les aquifères homogènes, ou continus, à perméabilité d'interstices, sont constitués de sables, graviers, grès... ; c'est le cas des nappes alluviales qui occupent les fonds de vallée et d'une partie des nappes des grands bassins sédimentaires (bassin de Paris, Bassin aquitain...). Les vitesses d'écoulement y sont généralement lentes ;
- Les aquifères hétérogènes, ou discontinus, à perméabilité de fissures, sont surtout constitués de calcaires mais également de roches volcaniques, granitiques ou gréseuses. Dans les massifs calcaires, les fissures sont souvent ouvertes (aquifères de type Karstique), et constituent de véritables conduits souterrains dans lesquels la vitesse de circulation des eaux peut être très rapide.

Dans certaines roches (craies ou grès), les deux types de perméabilité (interstices, et fissures) peuvent coexister, avec généralement une prédominance de la perméabilité de fissures sous les vallons et les vallées.

La vulnérabilité des nappes aux pollutions est conditionnée par plusieurs facteurs :

- le **pouvoir filtrant** du réservoir : il existe de manière variable selon la granulométrie dans les aquifères à perméabilité d'interstices. Il est faible ou nul dans les terrains à perméabilité de fissures.
- l'**épaisseur de la zone non saturé du réservoir** : dans cette zone, l'eau s'infiltré sous l'influence d'une composante verticale jusqu'au moment où elle atteint la surface de la nappe ;
- la **vitesse d'écoulement des eaux souterraines** : elle conditionne les phénomènes de dilution, dégradation et fixation de certains produits polluants. Elle est assez lente en aquifère homogène et peut être extrêmement rapide en milieu Karstique. Ainsi, le transfert d'une même quantité d'eau, sur une même distance, pourra demander un an dans une nappe à perméabilité d'interstices alors qu'il pourra se faire en quelques jours en milieu Karstique.

Il est évident que, dans les terrains karstiques, la pollution se déplace rapidement et, en l'absence de filtration, peut se propager sur de grandes distances.

- la **protection naturelle du réservoir aquifère** : la présence au-dessus du réservoir d'une couverture imperméable continue, assure une protection naturelle efficace des eaux souterraines puisqu'elle constitue un écran protecteur contre les pollutions de surface ;
- le **type de nappe** :
 - les nappes libres, peuvent être très vulnérables aux pollutions en l'absence d'une telle couverture.
 - Les nappes captives, au contraire, parfois très profondes et situées sous un toit imperméable, bénéficient d'une très bonne protection naturelle. Les contaminations ne pourraient provenir que d'injections volontaires de déchets liquides par forages, ou de la mise en communication avec des eaux ou des nappes superficielles par des ouvrages à parois non étanches.

5) **Nappe phréatique :**

C'est la première nappe rencontrée, correspondant la plupart du temps à une nappe libre. Il s'agit de l'eau provenant des précipitations, le sol l'absorbe tel une éponge jusqu'à rencontrer une couche imperméable.

Le niveau de la nappe phréatique peut être au dessus du sol si l'aquifère est saturé (zones humides).

➤ **La nappe phréatique est-elle potable ou pas ?**

Cette eau est considérée comme non potable, car il s'agit de l'eau de pluie, souvent contaminée par les pollutions de surface. Une analyse en laboratoire permet de connaître rapidement et efficacement la qualité de l'eau.

Toutefois, dans certaines zones géographiques, l'eau de la nappe phréatique est chimiquement et microbiologiquement potable.

➤ **Quelques usages de la nappe phréatique :**

Elle est principalement utilisée par les agriculteurs, l'industrie, et l'alimentation en eau potable. Mais l'eau des nappes phréatiques devrait servir davantage au quotidien afin d'économiser l'eau du robinet :

- lavage de la voiture (200 litres),
- arrosage du jardin (15 à 20 litres par m²),
- chasse d'eau classique (10 litres),
- lessive (70 à 120 litres)

L'utilisation de l'eau potable pour ces utilisations n'est que du gaspillage.

6) **Nappe captive et nappe profonde:**

Il s'agit de l'eau circulant dans une couche géologique profonde.

Les nappes profondes correspondent la plupart du temps à des aquifères captifs, c'est-à-dire délimités au-dessus et au-dessous par des couches imperméables (de type argileux). L'eau d'une nappe profonde est donc généralement sous pression.

Creuser un forage jusqu'à cet aquifère va donc créer une différence de pression. L'eau va monter dans le puits pour s'équilibrer avec la pression de l'air.

Le niveau d'équilibre est appelé surface piézométrique (quelquefois la surface piézométrique est au-dessus du niveau du sol. Le puits va alors déborder, c'est ce que l'on appelle un puits artésien).

Lorsque la couche géologique renfermant la nappe profonde arrive à l'affleurement, l'aquifère devient libre.

Attention, un puits même peu profond peut atteindre une nappe profonde ! Les couches géologiques ne sont pas horizontales, elles peuvent remonter près de la surface.

Remarque : on peut injecter de la Montmorillonite, tout au tour de notre paroi pour la protéger contre les infiltrations. Elle joue le rôle d'un bloqueur. Elle gonfle en contact avec de l'eau alors elle protège plus.

➤ **La nappe profonde potable ou pas ?**

En s'infiltrant profondément dans le sol, et en parcourant de longues distances, cette eau est naturellement filtrée par la roche. C'est pourquoi l'eau des nappes profondes est intéressante d'un point de vue chimique, et bactériologique. Plus l'aquifère est profond, plus il aura de chance d'être préservé des pollutions de surface, et donc de rester potable.

Au contact des roches qu'elle traverse, l'eau va également se minéraliser, c'est-à-dire se charger en sels minéraux (calcium, magnésium, sodium...) et en oligo-éléments (zinc, cuivre, argent...), nécessaires aux fonctions vitales de notre organisme. Ces eaux peuvent être captées et embouteillées sous les appellations « eau de source » ou « eau minérale », selon leurs caractéristiques ioniques.

Malheureusement on trouve certaines nappes profondes, polluées à cause de la pollution des eaux de surface (traitements agricoles, déchetterie, élevage intensif, produits toxiques...).

7) **Pollution des eaux souterraines :**

Une eau renferme une teneur en substances dissoutes ou en suspension, d'origine naturelle, appelée <<bruit de fond>>. Le degré de pollution est apprécié par la mesure de l'écart entre le bruit de fond et les caractéristiques physico-chimiques de l'eau incriminée.

Un polluant est par conséquent un facteur physique, chimique ou biologique issu de l'activité humaine et provoquant sous une intensité ou une concentration anormales, une altération de la qualité de l'eau naturelle.

L'eau souterraine est considérée comme polluée lorsqu'elle contient des substances autres que celles liées à la structure naturelle des terrains où elle a séjourné et, en particulier, lorsque les concentrations des constituants dissous ou en suspension dépassent les concentrations maximales admissibles fixées par les standards nationaux ou internationaux.

- **Origine des pollutions :**

Les pollutions peuvent être classées suivant différents critères :

-En fonction de l'origine de la pollution :

- urbaine: (eaux usées domestiques, eaux pluviales, eaux d'infiltration sous les dépôts d'ordures, etc.) ;
- industrielle : (eaux usées, eaux d'infiltration sous les stockages de déchets industriels, liquides dangereux tels que hydrocarbures et solvants, eaux des bassins de lagunages, etc.) ;
- agricole : (eaux d'infiltration de drainage et de ruissellement sous aires cultivées, ou sous aires agricoles (élevages, stockages et épandages d'engrais et de produits phytosanitaires)).

-Selon la nature des polluants :

- physiques : (chaleur, matières en suspension, radioactivité) ;
- chimiques : (sels minéraux, métaux lourds, pesticides, détergents, hydrocarbures, solvants) ;
- microbiologiques : (micro-organismes, virus, bactéries).

-Selon la répartition géographique :

- pollution diffuse ;
- pollution ponctuelle.

-En fonction de la répartition dans le temps :

- pollution permanente (chronique) ;
- pollution accidentelle ;
- pollution saisonnière (sels de déneigement, etc.).

- **Mécanisme de pollution :**

-Dans une nappe libre :

Une pollution se produisant à la surface du sol peut s'infiltrer jusqu'à la surface de la nappe.

On distingue :

Une zone non saturée, comprise entre le sol et la surface de la nappe. De nature très diverse suivant le type de roches concernées et d'épaisseur variable (de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres), elle conditionne en grande partie les temps de transfert vers la nappe (de

quelques jours à plusieurs années). Suivant que la roche est à perméabilité d'interstices (sables, grès) ou de fissures (calcaires), les circulations seront plus ou moins rapides.

Dans le milieu non saturé, les transferts se font sous l'influence d'une composante verticale.

Une zone saturée qui constitue l'aquifère. Dans cette zone, les transferts sont essentiellement latéraux (composante horizontale) selon la direction générale d'écoulement de la nappe.

-Dans une nappe captive :

Dans ce cas la nappe est protégée par des formations géologiques imperméables ou très peu perméables. Si elles sont suffisamment épaisses, le risque principal de pollution est l'injection de polluant par l'intermédiaire de forages, ou de mise en communication avec des nappes supérieures par des ouvrages à parois non étanches (ex. : forages profonds d'eau, d'hydrocarbures, forages <<sauvages>>). Les pollutions peuvent aussi provenir des zones d'affleurement de l'aquifère plus ou moins éloignées.

-Dans un aquifère fissuré:

La pollution peut s'introduire par les puits, bétoires, gouffres, à travers la zone non saturée.

-Dans une nappe alluviale ou proche d'un cours d'eau :

Si le fond du lit du cours d'eau, ou de l'étendue d'eau de surface n'est pas parfaitement étanche, la pollution peut provenir des eaux de surface si celles-ci sont polluées ou de mauvaise qualité.

8) Rabattement des nappes :

Le rabattement de nappes consiste à abaisser temporairement le niveau de la nappe phréatique, par pompage, et modifier le champ d'écoulement de cette eau dans le sol et ce pendant la construction des infrastructures d'un bâtiment ou des ouvrages d'art.

On augmente ainsi la cohésion du terrain dans lequel on doit entreprendre les travaux, la sécurité est accrue et il est possible de travailler à sec en fond de fouille.

Un rabattement de nappe correctement réalisé doit assurer:

Un maintien des fines, un fond de fouille sec et stable et des parois sécurisées.

Un rabattement de nappe ne s'improvise pas ! C'est pour cela qu'il faut mener pour chaque chantier une étude approfondie des conditions dans lesquelles le captage de l'eau sera effectué. Dans ces études, plusieurs paramètres sont à prendre en compte afin de déterminer les moyens à mettre en œuvre pour le rabattement de la nappe phréatique.

Les 3 méthodes suivantes sont principalement employées:

- **1- Par pointes filtrantes :**

Le rabattement de nappe par pointe filtrante permet de réaliser un abaissement de la nappe phréatique pour une zone de travaux et une profondeur de terrassement défini. Le système de rabattement par pointes filtrantes est utilisé pour des profondeurs inférieures à 5 mètres en général.



***Rabattement de nappes
par pointes filtrantes.***

La pointe filtrante est un élément primordial du rabattement de nappe. Elle filtre l'eau dans le terrain et permet ainsi de remonter un minimum de particules solides. La pointe filtrante sera donc définie par la dimension et la forme de ses ouvertures, et par sa section de passage de l'eau, déterminée par le coefficient d'ouverture.

La pointe filtrante auto lançable est de loin la plus pratique. Elle est composée de deux tubes concentriques :

- Le tube extérieur possède des fentes
- Le tube intérieur est plein et débouche presque au niveau de la pointe

Une pompe de lançage est utilisée pour la mise en place des pointes filtrantes dans le sol. Celles-ci sont enfoncées par l'eau envoyée à l'intérieur de la pointe filtrante à une pression moyenne de 5 à 8 kg/cm².



Pointes filtrantes.

➤ **Pompes de rabattement de nappes par pointes filtrantes :**

Ce sont elles qui, placées sur le collecteur, évacuent l'eau de la nappe.

Hauteur d'aspiration d'une pompe : aucune pompe, installée au niveau de la mer, ne peut aspirer de l'eau ayant une température de zéro degré celsius, à une profondeur de 10,33 m (1 atmosphère).

Cette valeur idéale n'est d'ailleurs jamais atteinte, à cause des facteurs suivants :

- Pertes dans la tuyauterie d'aspiration.
- Pertes dues à l'altitude.
- Pertes dues à la température de l'eau.
- Pertes dues à la conception des pompes.

En règle générale, sauf pour les chantiers à haute altitude, on prendra une hauteur maximale d'aspiration de 7,50 m.



*Pompe rabattement de nappes
par pointes filtrantes*

Récapitulatif :

Rabattement de nappes par pointes filtrantes :

- Jusqu'à 6 mètres de profondeur.
- Fonction de la granulométrie du terrain.
- Adapté aux sols fins.

- Stabilisation/consolidation des sols.

- **2- Par puits filtrants :**

Le rabattement de nappes par puits filtrants permet de rabattre des terrains dont la perméabilité est comprise entre 10^{-4} et 10^{-2} m/s.

Les puits filtrants sont équipés de pompes immergées et permettent de grands débits unitaires ainsi qu'une hauteur importante de rabattement.

En fait, un forage est réalisé puis tubé. Le tubage est terminé par un élément à fentes afin de filtrer l'eau.

La pompe de refoulement de l'eau est descendue directement dans le forage.



***Rabattement de nappes
par puits filtrants.***

Remarque :

Dans le cas de pointes filtrantes, les puits sont remplacés par les pointes et la pompe est placée à l'extérieure de la fouille.

➤ **Pompes de rabattement de nappes par puits filtrants :**

Plongées directement dans l'eau, elles ne sont pas sujettes aux contraintes des limitations d'aspiration.

Elles permettent des rabattements de nappes d'une profondeur supérieure à 10 m.



*Pompes de puits filtrants
de rabattement de nappes.*

Récapitulatif :

Rabattement de nappes par puits filtrants :

- Pas de limite de profondeur.
- Fonction de la granulométrie du terrain.
- Adapté aux sols gros

➤ **Emplacement des pointes et puits filtrants**

Les pointes et puits filtrants sont placés le plus près possible de la tranchée future, soit environ à 0,50 m du bord de la fouille.

En présence de terrains fins qui risquent de boucher les pores des pointes filtrantes, ou de terrains hétérogènes qui risquent de ne laisser évacuer qu'une partie de la nappe. Il faut alors procéder au "sablage", qui est la partie la plus délicate du travail. Cela consiste à entourer la crépine d'une gaine de gravier fin qui filtrera l'eau, augmentera la surface filtrante, et empêchera la crépine de se boucher.

Dans le cas des terrains hétérogènes, comme celui d'une couche imperméable entre deux couches gorgées d'eau, un sablage correctement réalisé permettra à la nappe phréatique supérieure de descendre et d'être aspirée par la crépine.

- **3- Par tranchées drainantes:**

Un drain est déposé au fond d'une tranchée qui est ensuite comblée d'un matériau drainant. Le drain est connecté à une pompe à vide qui évacue l'eau.

- Perméabilité du sol: 10^{-7} à 10^{-4} m/s.
- Profondeur maxi: 5 mètres.

C'est une méthode pas très utilisée.

Remarque :

Concernant les tuyaux collecteurs, le diamètre à utiliser est fonction de la quantité d'eau à évacuer et de la longueur d'un tronçon de conduite branché sur la pompe.

Récapitulatif :

Type de rabattement.	Profondeur maximale.	Granulometrie
Pointes filtrantes	6m	Sols fins
Puits filtrants	Pas de limite	Sols fins+ grossiers
Tranchees drainantes	5m	Sol à perméabilité 10^{-7} à 10^{-4} m/s.



Principe d'un rabattement de nappe phréatique par puits filtrants.

➤ Écoulement de nappes en conditions de pompage:

En condition naturelles, un aquifère est en état d'équilibre dynamique. Le pompage dans un puits modifie l'état d'équilibre, et provoque un rabattement de la surface piézométrique de la nappe.

A débit constant, trois facteurs déterminent les dimensions du cône de rabattement : les paramètres hydrodynamiques (transmissivité et coefficient d'emmagasinement), le temps de pompage et le régime d'écoulement au niveau du captage.

Il faut distinguer deux zones : la zone d'influence et la zone d'appel.

La zone d'influence est la zone dans laquelle les niveaux sont influencés, c'est-à-dire rabattus par le pompage.

La zone d'appel est la partie de la zone d'influence d'où provient l'eau captée. Sur cette zone, l'ensemble des lignes de courant se dirigent vers le puits ou le forage en pompage en amont jusqu'à une limite du système.

Les dimensions du cône de rabattement, de la zone d'influence et de la zone d'appel, varient en fonction du débit de pompage.

Dans les méthodes de délimitations des périmètres de protection, il est fréquemment fait mention de ces zones. La zone d'appel a une importance considérable parce que les polluants introduits dans cette zone sont susceptibles d'atteindre le puits de pompage.

➤ Pompage en nappe alluviale

Un pompage en nappe alluviale provoque une inversion des écoulements et une réalimentation de la nappe, plus ou moins importante, par le cours d'eau. La portion d'eau dans les eaux de pompage peut atteindre 60% à 90%.

9) **Types de pompes :**

➤ **Pompes centrifuges auto-amorçantes avec pompe à vide et anneau d'eau :**

Une nouvelle gamme de pompe à anneau d'eau pour les installations de rabattement de nappes phréatiques.

Principales caractéristiques:

- Sans danger pour l'environnement
- Rendement hydraulique élevé.
- Pas d'entretien.
- Silence de fonctionnement.
- Circuit de refroidissement à échangeur calorifique de la pompe à vide.
- Electrique et diesel Insonorisé.



Pompe à vide SWELL VACUUM

➤ **Pompe à vide à lubrification d'huile :**

Les pompes SWELL VACUUM se composent de pompes centrifuges auto-amorçantes de la série SWELL avec en plus une pompe à vide garantissant un amorçage très rapide et continu.

De par leurs caractéristiques spécifiques, les pompes SWELL VACUUM sont particulièrement indiquées pour le raccordement à des installations de rabattement de nappe.

Version Diesel et électrique.



Pompes immergées

➤ **Pompes électriques immergées :**

Débit: jusqu'à 1200 m³/h

Pompes électriques submersibles centrifuges avec moteur triphasé ou monophasé à sec.

Applications:

- Pompage d'eaux sales ou boueuses, filtrées, avec corps en suspension
- Pompage d'eaux sales, de puisards, industrielles, fluviales
- Pompage d'eaux très sales, d'égout, de décharges civils, etc...

Pompe à membrane SWELL MUD

➤ **Pompes à membrane :**

Debit: jusqu'à 200 m³/h

Les pompes à membrane de la série SWELL MUD sont des pompes auto-amorçantes universelles conçues pour le fonctionnement ininterrompu sur 24 heures.



Les pompes à membrane peuvent aspirer n'importe quel liquide contenant également des corps solides de gros diamètre, des boues, etc...

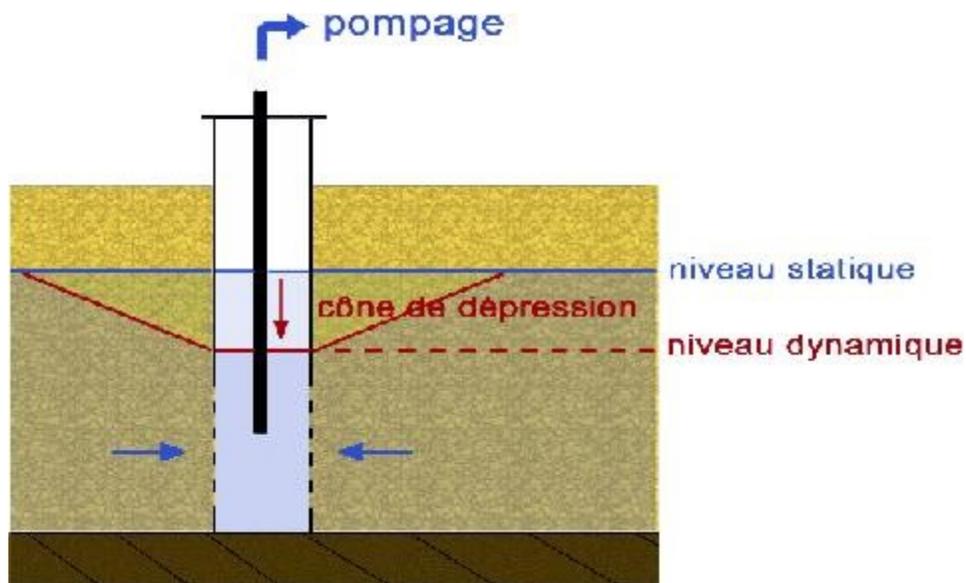
La version standard est en aluminium anticorrosion à haute résistance mécanique, sur demande, elle peut être fournie en fonte, en bronze ou en acier inox.

Qu'est ce qu'un cône de dépression ?

Si le débit du prélèvement d'eau est supérieur au débit de la nappe, le niveau de la nappe va baisser jusqu'à créer un cône de rabattement (ou de dépression).

Il faut cependant distinguer le cas de prélèvements dans une nappe libre, avec le cas de prélèvements dans une nappe captive.

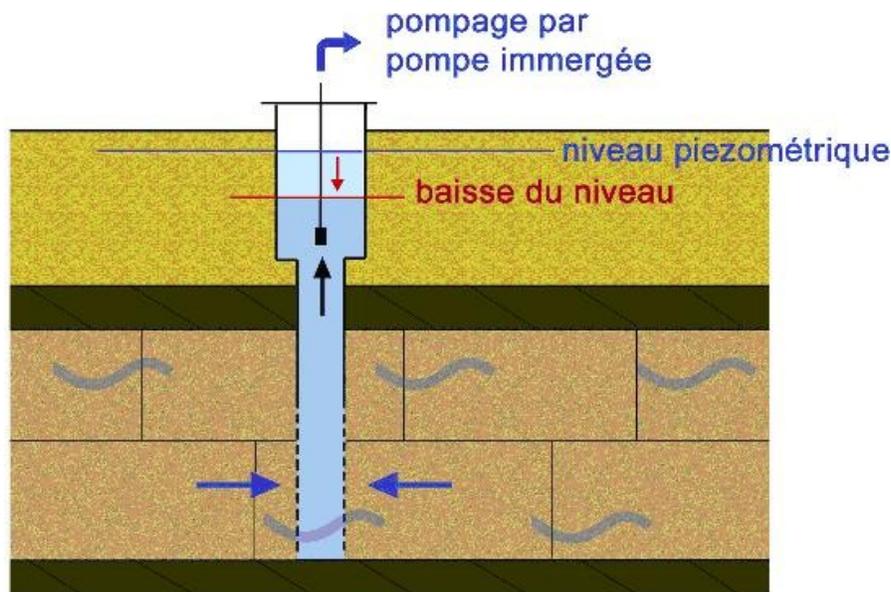
- **Dans la nappe libre :**



Si le débit de prélèvement est supérieur au débit de la nappe, le pompage vide véritablement les réserves en eau. Il crée un cône de dépression (ou de rabattement).

C'est pourquoi il faut veiller à ne pas prélever plus que le débit de la nappe.

- **Dans la nappe captive :**



En pompant, on ne vide pas l'aquifère mais on fait baisser la pression. La surface piézométrique baisse, donnant lieu à un cône de rabattement virtuel.

Si la surface piézométrique descend jusqu'au niveau de la nappe, le cône devient bien réel, et la nappe se vide.

En plus, si l'on coupe le cône de rabattement de nappe par un plan vertical passant par le forage, on obtient une courbe dite courbe de rabattement/distances. C'est une fonction logarithmique.

Exemple de fonction de courbe de rabattement de nappe pour un forage non artésien:

$$Q = \frac{\pi \cdot k \cdot (H^2 - h^2)}{2.3 \cdot \log \frac{R}{r}}$$

avec:

Q = débit en m³/s

k = coefficient de perméabilité en m/s

H = hauteur de la couche aquifère jusqu'au niveau imperméable en mètres

h = hauteur d'eau dans le puits depuis le substratum imperméable en mètres

R = rayon d'action du rabattement en mètres

r = rayon du puits en mètres

l = hauteur de la crépine en mètres

h' = hauteur d'eau dans la crépine, depuis le substratum imperméable en mètres

m = épaisseur de la couche aquifère en mètres

Il est souvent difficile d'appliquer ces formules dans le cas d'un rabattement de nappe provisoire, surtout sur un chantier d'avancement comme celui du terrassement en tranchées drainantes, pour les raisons suivantes :

- le terrain étant hétérogène et se modifiant souvent le long du parcours, le coefficient de perméabilité est difficile à calculer par les essais classiques employés en forages d'eau.
- le travail s'effectue la plupart du temps sans connaître le niveau du fond étanche .

Mais l'on s'aperçoit que ces courbes sont des fonctions logarithmiques.

Risque de prélèvement :

Des prélèvements trop importants ont une incidence directe sur le niveau des nappes. Lorsque le débit de prélèvement est supérieur au débit de la nappe, celle-ci n'a pas le temps de se recharger en eau, et le niveau descend.

10) **Forage de l'eau et modes de captage :**

Capter l'eau souterraine, c'est la détourner de son cours naturel. C'est le but des ouvrages de captage tels que puits et forages.

Le puits est un ouvrage en général de profondeur moyenne ou faible (inférieure à 100m), d'un diamètre supérieur à 1,20m, aux parois revêtues au moins partiellement de béton ou de maçonnerie.

Le forage peut être peu profond, mais peut aussi aller chercher l'eau à plus de 1000 mètres ; son diamètre est généralement plus faible que celui du puits et sa paroi est protégée par un tube en métal ou en matière plastique, et une cimentation entre terrain et tubage dans les premiers mètres.

Les sources sont les exutoires naturels des nappes. Pendant longtemps, elles ont été captées sans être aménagées. L'eau était canalisée par gravité vers le lieu d'utilisation. Les sources importantes sont maintenant la plus souvent aménagées, notamment par des chambres de captage et des dispositifs permettant le contrôle de la hauteur du seuil d'émergence. Elles peuvent aussi comporter des drains ou des galeries drainantes.

Eau de forage est- elle potable ?

Les eaux de forage sont en général de meilleures qualités. Du fait de leur éloignement de la surface, elles sont en effet davantage protégées de la pollution.

Il faut construire un puits allant jusque dans la couche de caillasse formant l'aquifère. Des fentes sont alors aménagées dans les parois de ce puits, afin que l'eau souterraine puisse s'y infiltrer.

L'eau souterraine est ensuite pompée en surface, où elle est soumise si nécessaire à un traitement désinfectant conservant ses qualités naturelles.

La protection des stations de captage :

La loi sur l'eau fait obligation aux communes de protéger les captages à l'aide de périmètres de protection situés autour des points de prélèvement des eaux superficielles ou souterraines. Ce périmètre permet d'éviter les déversements et infiltrations d'éléments polluants.

➤ **Rendement d'un forage (stabilisé)**

Le rendement d'un forage est égal au quotient du rabattement théorique avec le rabattement réel.

Rabattement réel : niveau mesuré dans le puits de pompage ;

Rabattement théorique : Valeurs obtenues graphiquement. On mesure le rabattement sur plusieurs piézomètres et grâce à un graphique semi-logarithmique, on prolonge la droite jusqu'au rayon du puits. On lit ainsi le rabattement réel

$$\text{rendement du forage} = \frac{\text{rabattement théorique}}{\text{rabattement réel}}$$

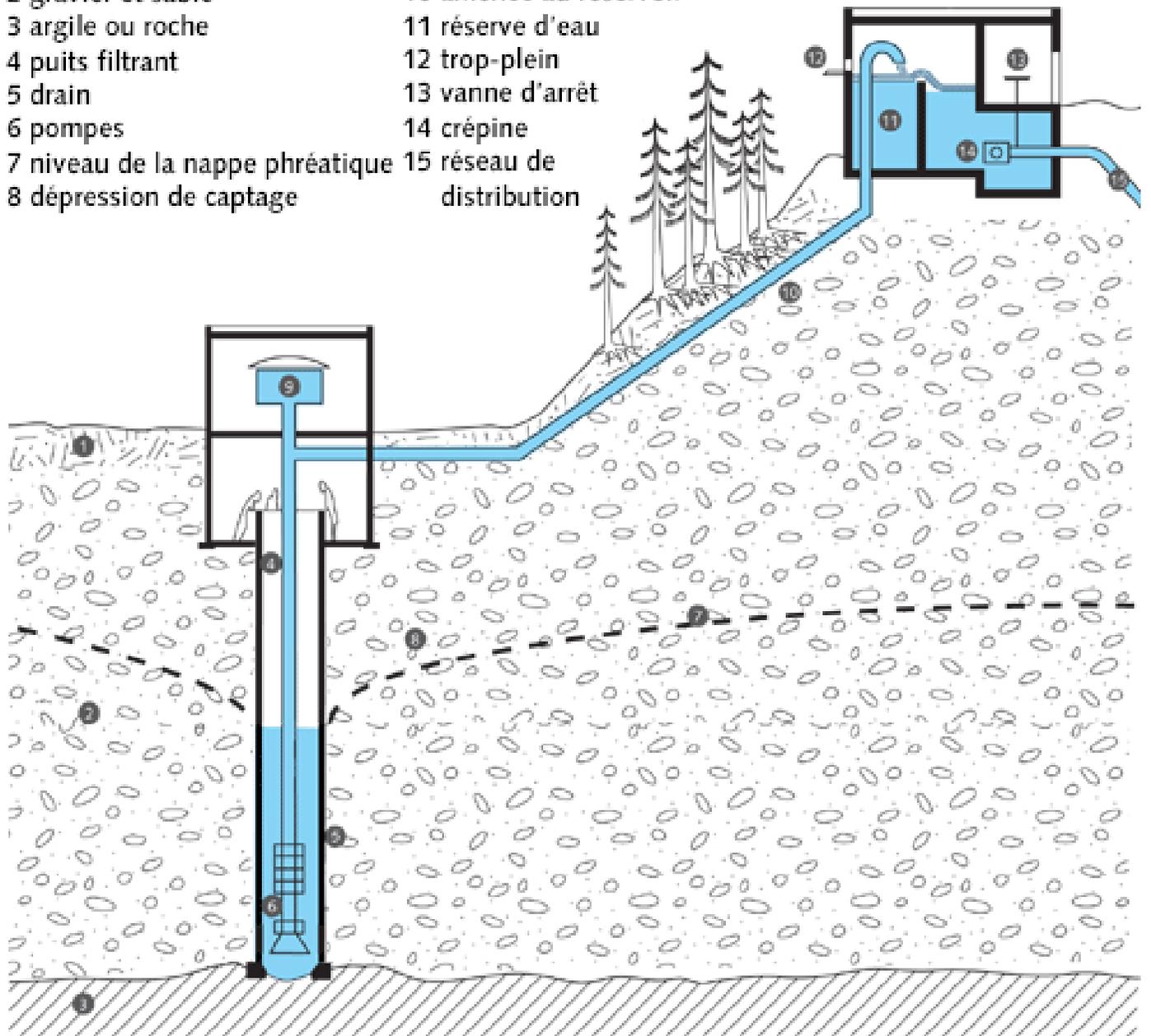
Remarque, on peut également déterminer le rendement par le rapport des débits spécifique réel et théorique.

$$\text{rendement du forage} = \frac{\text{Débit spécifique réel}}{\text{Débit spécifique théorique}}$$

Dans ce cas, le débit spécifique peut se déterminer par les formules empiriques suivantes :

$$\text{Nappe libre : } \left(\frac{Q}{s} \right)_{\text{théorique}} = \frac{T}{1,38}$$

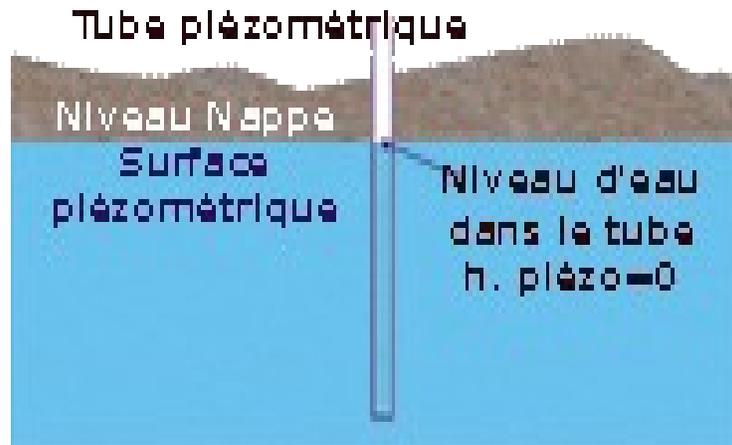
- | | |
|---------------------------------|---------------------------|
| 1 humus | 9 moteur |
| 2 gravier et sable | 10 amenée au réservoir |
| 3 argile ou roche | 11 réserve d'eau |
| 4 puits filtrant | 12 trop-plein |
| 5 drain | 13 vanne d'arrêt |
| 6 pompes | 14 crépine |
| 7 niveau de la nappe phréatique | 15 réseau de distribution |
| 8 dépression de captage | |



➤ Différents types de forage :

• Forage en nappes libres :

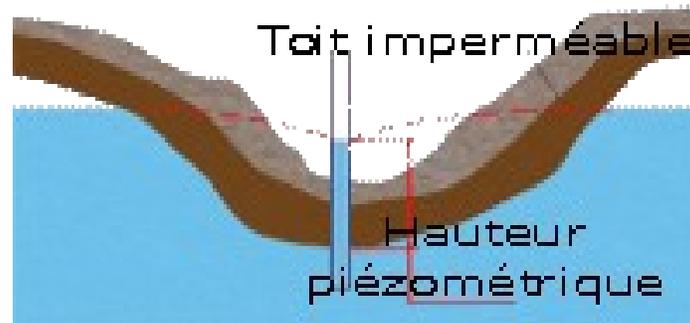
La surface piézométrique coïncide avec la surface libre de la nappe qui est surmontée par une zone non saturée. Ce type de nappe est la première directement atteinte par les puits: c'est la nappe phréatique.



Forage en nappe phréatique libre

• Forage en nappe alluviale :

L'aquifère est constitué par les alluvions d'une rivière. L'eau de la nappe phréatique est en équilibre avec celle de la rivière et les échanges se font dans les deux sens.



Forage puits artésien.

- **Forage en nappe de plaine littorale :**

La nappe phréatique d'eau douce qui est située dans les alluvions est en équilibre hydrostatique avec la nappe salée issue de l'eau de mer. Ces 2 nappes se mélangent peu, leur interface constitue un biseau salé.

- **Forage en nappes captives :**

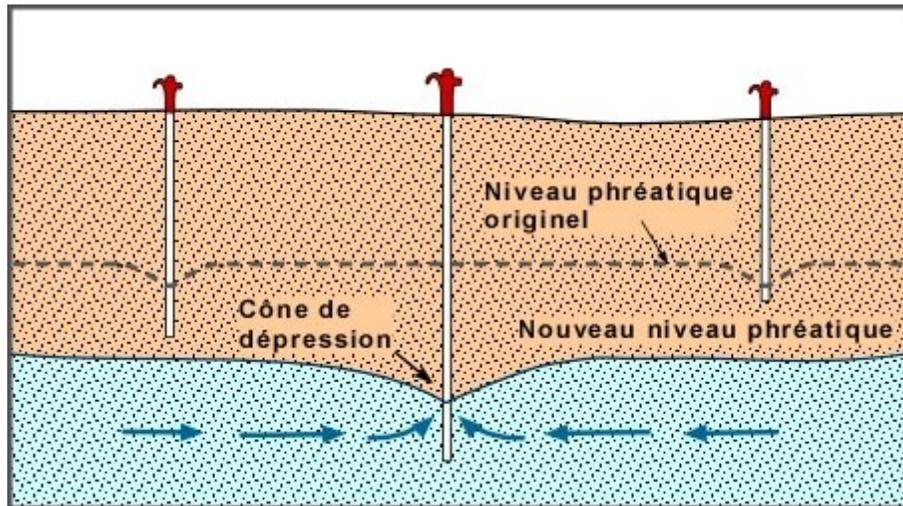
La nappe phréatique est confinée car elle est surmontée par une formation peu ou pas perméable; l'eau est comprimée à une pression supérieure à la pression atmosphérique. A la suite d'un forage au travers du toit imperméable, l'eau remonte et peut jaillir: la nappe est artésienne. Le jaillissement peut disparaître par la suite si la nappe est exploitée au point de diminuer sa pression.



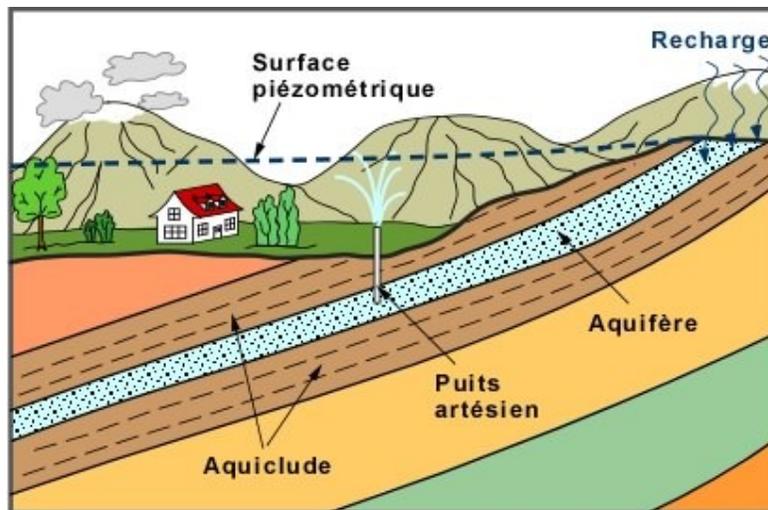
Forage nappe phréatique captive.

Elle se fait par deux types de puits: le puits de surface et le puits artésien.

On appelle **puits de surface** un puits qui s'approvisionne directement dans la nappe phréatique. Le pompage dans un puits de surface a pour effet de former autour du puits un cône de dépression. Un excès de pompage abaissera le niveau phréatique et pourra contribuer à assécher d'autres puits avoisinants.



Le **puits artésien** est un puits qui s'approvisionne dans un aquifère confiné par un aquiclude et mis sous pression à la faveur d'une zone de recharge. Le schéma qui suit montre que la recharge en eau de l'aquifère se fait à partir de la surface du terrain, créant dans l'aquifère une pression croissante avec la profondeur.



Au point où on a percé l'aquiclude, la pression dans l'aquifère fait en sorte que l'eau va jaillir si la bouche du puits se situe sous la surface piézométrique. Si la bouche du puits se situait au-dessus de la surface piézométrique, il n'y aurait pas de jaillissement; l'eau atteindrait dans le puits la

hauteur de la surface piézométrique. C'est une question d'équilibre entre la zone de recharge ouverte à la pression atmosphérique et le puits aussi ouvert à la pression atmosphérique (le principe des vases communicants). Ceci explique qu'il faut une zone de recharge qui soit au-dessus de la bouche du puits. On pourrait avoir facilement un puit artésien dans une plaine qui borde une zone montagneuse, si la recharge se fait en montagne, mais il serait impossible d'avoir un puits artésien jaillissant si la zone de recharge ne se trouvait que dans la plaine.

- **Que faire au cas de mélange de nappes?**

La taille et la longueur de la crépine sont très importantes tout autant que la mise en place dans le sol.

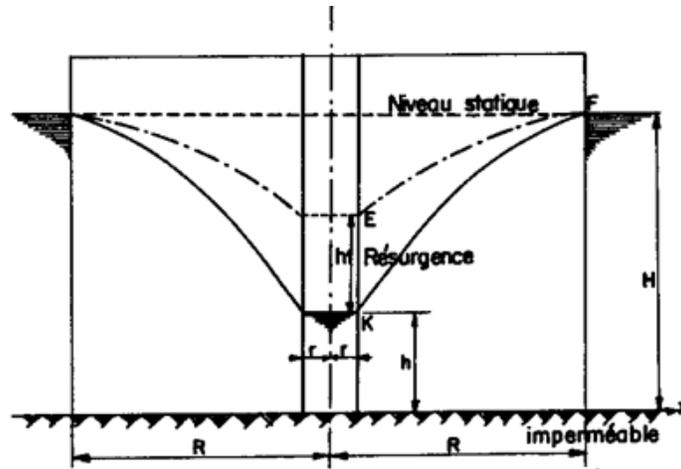
Un puits ne doit capter qu'une seule et même nappe afin d'éviter tout déversement d'une nappe dans une autre. Si la crépine recoupe deux nappes différentes, le puits va alors mettre en communication les eaux. Et si l'une est polluée (ou chargée en fer par exemple), la deuxième va le devenir.

Tout forage amateur, le plus souvent pratiqué en travail clandestin, produit la plupart du temps un résultat déplorable. Il faut éviter toute atteinte à la ressource tant d'un point de vue qualitatif (pollution provenant de la surface ou de mélange entre nappe) que quantitatif (perte d'une nappe dans une autre du fait d'un mauvais tubage de forage par exemple).

12) **Calcul du débit au fond de la fouille :**

DUPUIT est le premier hydraulicien (1863) à avoir exprimé une formule liant le débit de pompage d'un puits en régime permanent avec le rayon d'action (ou d'influence du cône de dépression) en fonction de la perméabilité. La loi se base sur les hypothèses suivantes :

1. La loi de Darcy s'applique.
2. L'eau et le squelette solide de l'aquifère sont incompressibles.
3. L'aquifère est homogène, isotrope, d'épaisseur uniforme, sur un substratum horizontal imperméable.
4. Le débit de pompage est constant.
5. Le pompage a atteint un régime d'écoulement permanent.
6. Le puits pénètre entièrement l'aquifère et il est crépiné sur toute la hauteur de l'aquifère (il existe des solutions pour les pénétrations partielles).



On note, dans sa représentation (*figure ci-dessus*) que DUPUIT fait passer la surface du cône de rabattement par FK alors qu'en vérité on constate qu'elle passe par FEK. Il existe une zone EK, dite zone de résurgence, par laquelle il arrive une partie plus ou moins grande du débit. Cette zone de turbulence au passage de la crépine est **l'effet de puits**.

Formules de DUPUIT :

Débit traversant une surface équipotentielle de rayon r

$$Q = 2 \pi r h k i \quad \text{avec} \quad i = \frac{dh}{dr}$$

Equation de continuité en coordonnée polaire :

$$\Delta h = \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = 0$$

Aquifère à nappe libre sans réalimentation :

$$Q = 2 \pi r k h \frac{dh}{dr}$$

Par intégration entre r_p et R_a (h_p et H_0)

$$Q = \frac{\pi k (H_0^2 - h_p^2)}{\ln \left(\frac{R_a}{r_p} \right)}$$

- ✓ Q ; débit de pompage ;
- ✓ k : perméabilité du terrain ;

Dans notre cas $K = 10^{-6}$ m/s (sable silteux).

- ✓ H_0 : épaisseur de la partie saturée ;
- ✓ h_p : hauteur d'eau dans le puits pendant le pompage ;
- ✓ r_p : rayon du puits ;
- ✓ R_a : rayon d'action (ou d'influence du cône de dépression) ;

Ces formules supposent un aquifère idéalement simple avec des conditions de pompage idéales et parfaitement stabilisées (cône de dépression, débit).

Néanmoins, pour les forages d'eau, les résultats obtenus sont parfaitement fiables et exploitables.

Détermination de la perméabilité avec l'essai DUPUIT

Principe :

L'essai consiste à pomper à régime constant dans un puits jusqu'à l'établissement d'un état d'équilibre avec une stabilisation des niveaux dans les piézomètres.

Aquifère à nappe libre sans réalimentation :

$$k = Q \frac{\ln\left(\frac{R_a}{r_p}\right)}{\pi(H_0^2 - h_p^2)}$$

Se basant sur ces formules, on a calculé le débit de l'eau dans notre fouille, et on a eu comme résultat ce qui suit :

En prenant le triangle rectangle ci-joint :

En utilisant le théorème de Thalès :

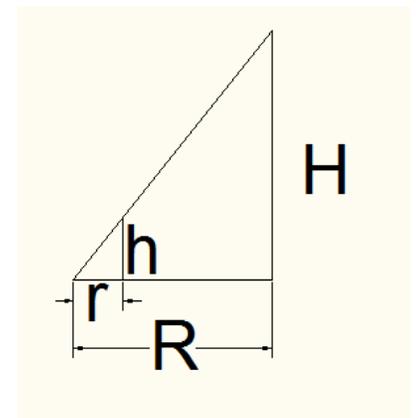
$$\frac{H}{h} = \frac{R}{r} \rightarrow \frac{R}{r} = \frac{6}{2} = 3.$$

$$Q = \pi \times 10^{-6} \frac{(6^2 - 2^2)}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}.$$

$$Q = 9.15 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Donc,

$$Q = 7.9 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}.$$



Pour une heure de pompage, le volume d'eau au fond de la fouille est de 7.9 m^3 .

13) **Conclusion :**

Tout compte fait, on a choisit de faire notre pompage en utilisant **les pointes filtrantes**, par suite nos pompes seront installés à l'extérieur de notre fouille.

C'est plus économique.