



Université Mohamed Boudiaf - M'sila
Faculté de technologie
Département de génie civil

Module : TP MDS II
Niveau : 3^{ème} année licence
Année Universitaire : 2020/2021

TP ESSAI DE PERMEABILITE DES SOLS (Perméamètre à charge constante et à charge variable)



1. OBJECTIF

On dit qu'un matériau est perméable si les vides qu'il contient sont continus. La majeure partie des matériaux utilisés en génie civil (hormis les matériaux métalliques) sont perméables y compris le granite sain ou les bétons.

La qualification d'imperméabilité qui est associée souvent aux bétons ou aux argiles est simplement liée au fait que nous ne « voyons » pas l'eau qui passe au travers de ces matériaux. Cela n'implique pas l'absence d'écoulement et surtout l'absence de forces liées à cet écoulement.

La perméabilité a une influence vitale sur les problèmes de fondations et certains ouvrages de mécanique des sols tels que :

- la stabilité des barrages.
- la stabilité des excavations ouvertes.
- la stabilité des ouvrages en palplanches.
- les caractéristiques de consolidation du sol.
- la classification des sols et leurs propriétés.

Les écoulements des eaux à travers les interstices d'un système de sol, sont complexes et variés. Ils ne permettent pas de tirer des conclusions et définir par la suite des méthodes de calcul pour résoudre les problèmes pratiques posés. Des hypothèses sont alors nécessaires ; les écoulements sont supposés lents et leurs chemins plus courts. Ainsi, la condition d'écoulement laminaire est satisfaite.

2. LES FORMES DE L'EAU DANS LE SOL

L'eau peut se trouver dans plusieurs états à l'intérieur d'un sol, ces états se distinguent essentiellement par l'intensité des forces qui lient l'eau et les grains.

On distingue classiquement :

- **l'eau de constitution** : c'est l'eau qui entre dans la composition chimique/minéralogique de certains minéraux (essentiellement les argiles) Exemple : gypse ($\text{SO}_4\text{Ca}, 2\text{H}_2\text{O}$) ;
- **l'eau liée ou adsorbée** : c'est la fine pellicule d'eau qui est « collée » aux grains par des phénomènes électriques.
- **l'eau capillaire** : qui est retenue par les pores les plus fins du sol au-dessus du niveau de la nappe : la zone de remontée capillaire peut être complètement ou partiellement saturée ;
- **l'eau libre** : l'eau libre remplit les interstices formés par les grains solides et peut y circuler sous l'effet des forces de pesanteur.

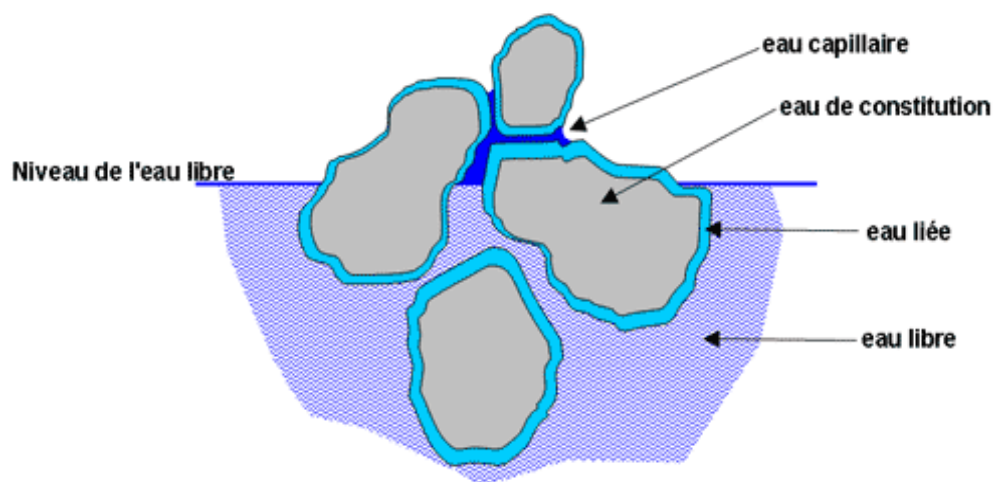


Figure 1. Les formes de l'eau dans le sol.

2. LOI DE DARCY

La relation entre la vitesse d'écoulement et la charge hydraulique a été établie expérimentalement par Darcy dans le cas de tubes remplis de sable (fig. 2).

$$v = k.i \quad \text{avec } i : \text{gradient hydraulique} \quad i = \frac{\Delta h}{L}$$

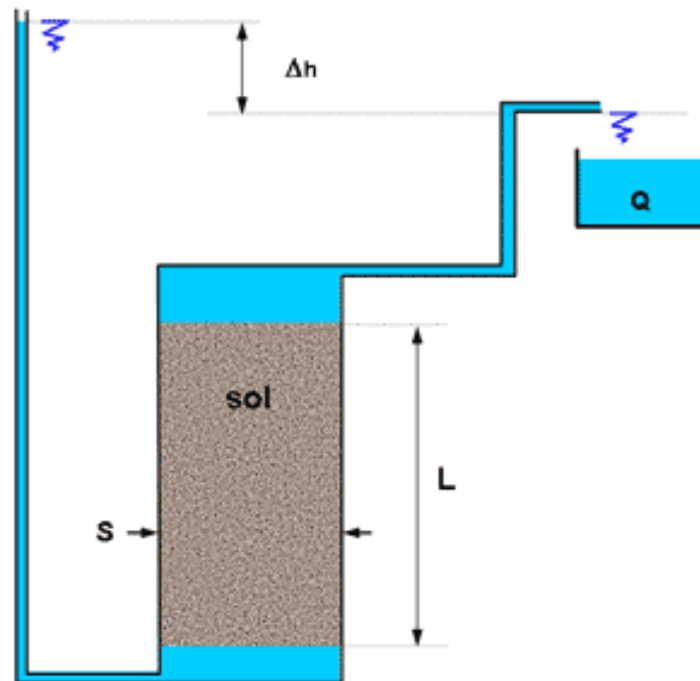


Figure 2. Montage expérimental correspondant aux expériences de Darcy.

A noter :

1. La loi de DARCY se vérifie en générale très bien à condition de rester en régime laminaire, c'est-à-dire quand les vitesses restent faibles ;
2. Le coefficient de proportionnalité k est appelé coefficient de perméabilité du sol. Il s'exprime en m/s ou en cm/s ;
3. L'équation du débit à travers une section S de sol, s'écrit alors en fonction de i et k :

$$Q = k . i . S$$

3. VITESSE DE L'EAU DANS LE SOL

Soit Q le débit à travers S . La vitesse apparente v de l'eau est par définition :

$$v = Q/S$$

Cette définition bien que la plus utilisée, donne une vitesse fictive car en réalité l'eau ne circule que dans les pores de surface $n.S$ (n étant la porosité du sol) d'une part et d'autre part, les trajectoires sont vraisemblablement tortueuses. On définit la vitesse moyenne v' par le rapport

$$v' = Q / n.S$$

4. COEFFICIENT DE PERMEABILITE

La loi de DARCY pose donc la proportionnalité de la vitesse de décharge et du gradient hydraulique. Le coefficient de proportionnalité k à la dimension d'une vitesse, c'est le coefficient de perméabilité, il dépend à la fois du milieu poreux et du fluide. On l'exprime en général en m/s ou en cm/s.

Le coefficient de perméabilité à l'eau d'un sol, appelé aussi coefficient de Darcy, est une caractéristique intrinsèque au sol et qui dépend de la granulométrie du sol, de sa nature et de sa structure.

- Plus un sol est fin, plus les pores sont petits, et plus les frottements et donc les pertes de charges sont importants, donc plus le coefficient de perméabilité sera petit. On dit parfois par simplification que les argiles sont imperméables, en fait elles ont une perméabilité très faible.
- Plus un sol est dans un état de compacité élevé, plus la porosité est faible et l'espace dans lequel l'eau peut circuler réduit, donc moins le sol sera perméable.

Quelques exemples de perméabilité de sol

Type de sol	k (cm/s)	Degré de perméabilité
Graviers moyens à gros	10^{-3} à 10^{-1}	Très élevé
Petits graviers, sable	10^{-3} à 10^{-5}	Assez élevé
Sable très fin, sable limoneux, loess	10^{-5} à 10^{-7}	faible
Limon compact, argile silteuse	10^{-7} à 10^{-9}	Très faible
Argile franche	10^{-9} à 10^{-12}	Pratiquement imperméable

5. DETERMINATION DU COEFFICIENT DE PERMEABILITE K AU LABORATOIRE

Divers procédés sont utilisés pour déterminer la perméabilité d'un sol. Le plus simple est l'utilisation d'un **perméamètre**.

Deux méthodes, applications directes de la loi de Darcy, sont utilisées en laboratoire :

- la mesure sous charge constante pour les sols très perméables
- la mesure sous charge variable pour les sols peu perméables.

6. PRINCIPE D'ESSAIS

6.1 Perméamètre à charge constante

Cette méthode de mesure consiste à maintenir une charge hydraulique constante dans l'échantillon, le flux traversant l'échantillon est engendré par un gradient de charge hydraulique constant (figure 3), Les conditions du régime permanent seront atteintes lorsque le débit d'eau entrant est égal au débit sortant de l'échantillon.

La perméabilité est calculée en utilisant la loi de Darcy. Cette méthode de mesure peut être appliquée aussi bien aux échantillons intacts qu'aux échantillons remaniés. Il est certain qu'avec cette méthode, on peut obtenir des résultats assez précis mais elles présentent des temps d'essais assez importants.

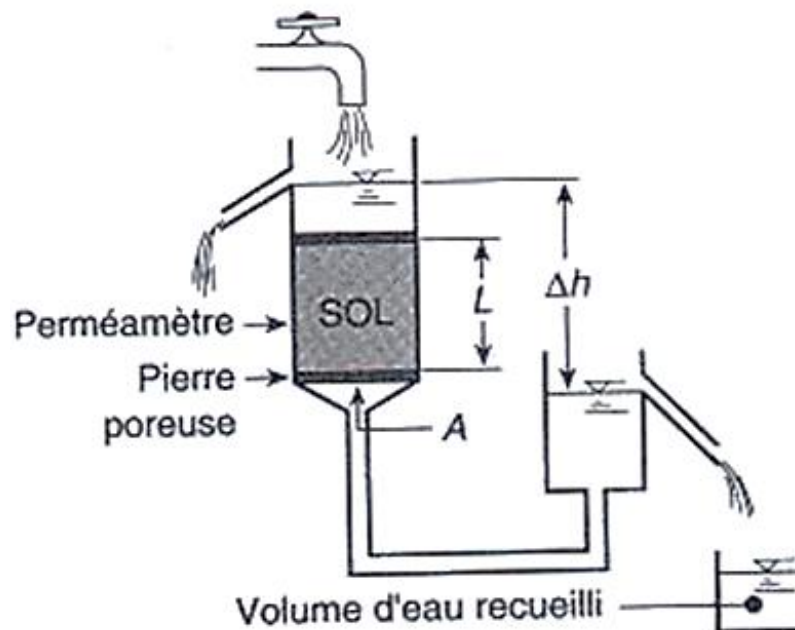


Figure 3. Perméamètre à Charge constante

6.2 Perméamètre à charge variable

Avec les sols peu perméables comme les sols silteux et argileux, l'essai de perméabilité à charge constante ne délivre que très rarement des résultats acceptables, pour cela, on utilise l'essai à charge variable (figure 4). On mesure le temps nécessaire pour que le niveau de l'eau descende du niveau h_1 au niveau h_2 . On se trouve bien dans le cas d'un écoulement à une dimension, et on peut appliquer la loi de Darcy pour chaque intervalle élémentaire de temps ($t, t + dt$)

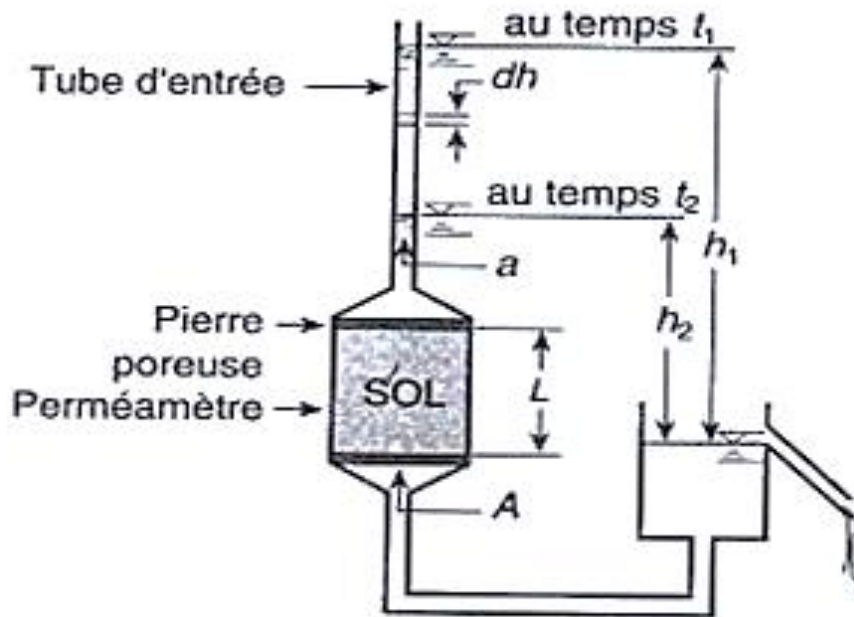


Figure 4. Perméamètre à charge variable

7. MATERIEL APARAILLAGE DE L'AISSAI :

- Un perméamètre de compactage avec accessoires ;
- Un support de perméamètre avec accessoires ;
- Un panneau de tubes piézométriques ;
- Un réservoir d'eau ;
- Une éprouvette graduée ;
- Un chronomètre ;
- Moule CBR (Proctor) ;
- Dame Proctor normal ou modifié ;
- Règle à araser ;
- Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau ;
- Tamis 0.5 mm et 2 mm ;
- Balance précise au 1/100 g.
- Balance de précision 200 g, précision $\pm 0,1$ g ;
- Etuve $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$;
- Papier filtres.
- Sable de diamètres 0,5/2 mm

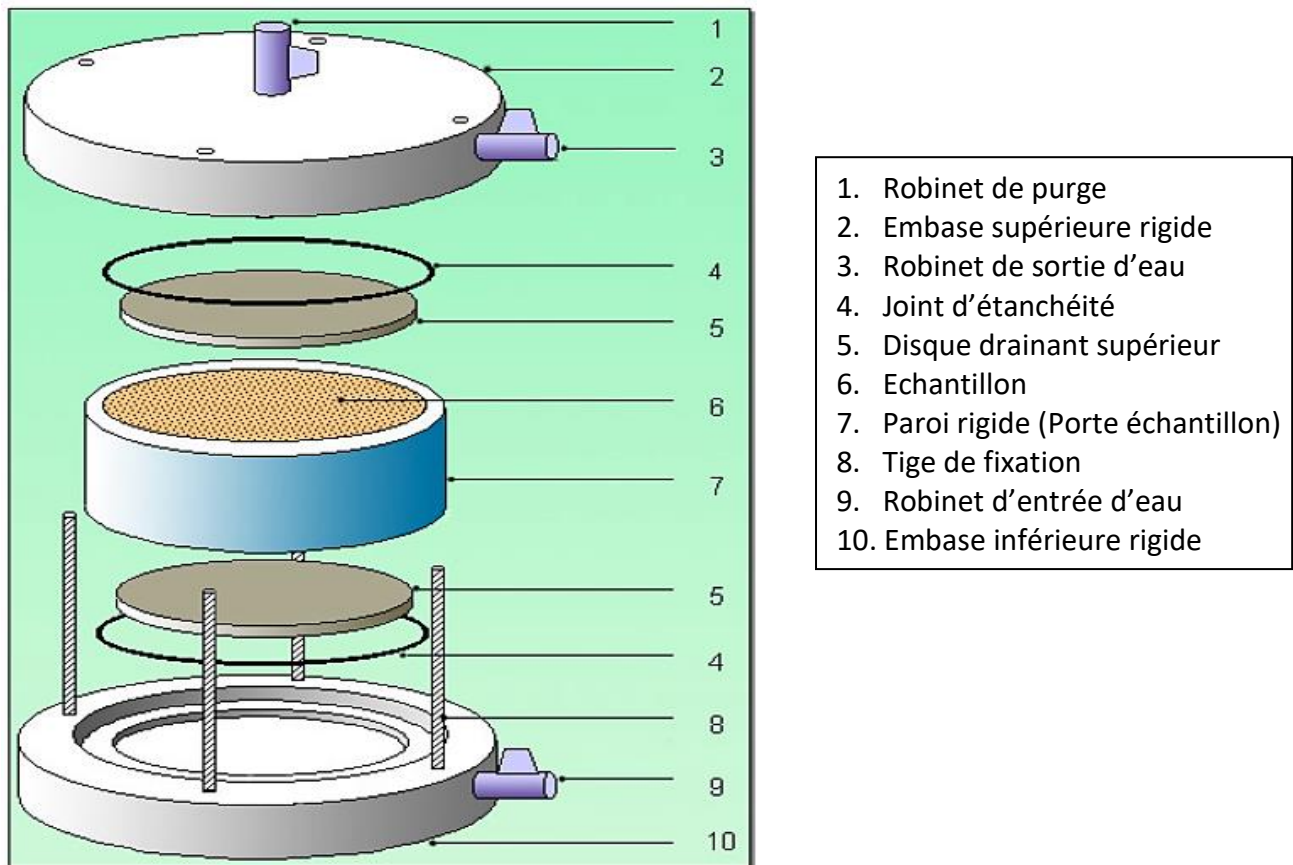


Figure 5. Vue éclatée d'un Perméamètre à paroi rigide (d'après NF X30-441)

8. MODE OPERATOIRE :

a. Préparation de l'échantillon

- L'essai se déroule sur un échantillon de sable de diamètres 0,5/2 mm imprègne d'eau et compacts.
- Mettre le matériau dans le perméamètre, sur la plaque inférieure et sur le disque perforé et le papier filtre.
- Compacter par couches successives.
- Araser le matériau compacté sur le bord du perméamètre.
- Poser le papier filtre puis le second disque perforé et fermer le perméamètre.

b. Saturation du système

Avant tout essai, **l'échantillon et le circuit doivent être saturés.**

- Connecter le robinet inférieur du panneau à l'orifice d'entrée du perméamètre, puis l'orifice de sortie (supérieur) du perméamètre au réservoir de récupération de l'eau. La circulation de l'eau dans l'échantillon se fera ainsi de **façon ascendante**,
- Ouvrir les robinets du réservoir d'eau, du panneau et du perméamètre. Lorsqu'un régime permanent s'établit à la sortie du perméamètre (lorsque le débit d'eau entrant est égal au débit sortant de l'échantillon), on peut considérer que l'échantillon est saturé.

- Fermer le robinet du réservoir d'eau, puis attendre que le niveau de l'eau dans le tube piézométrique soit proche du niveau 100 du réglet.
- Lorsque ce niveau est atteint, fermer les robinets du panneau et du perméamètre. Le niveau de l'eau dans le tube piézométrique ne doit plus alors bouger et l'eau ne doit plus sortir du perméamètre.

c. Essai de perméabilité

- Une série de tests doit être effectué, chaque test à un taux d'écoulement différent.



Pour un essai à charge constante :

Dans cet essai, l'échantillon est soumis à un gradient de charge dû à la différence de hauteur d'eau des deux réservoirs amont et aval, dont le niveau du réservoir amont est maintenu constant.

- Alimentation en eau le réservoir amont et fixer le niveau désiré,
- Ouvrir les robinets du panneau et du perméamètre. Déclencher aussitôt le chronomètre,
- Attendre un certain temps de stabilisation (environ 5 mn),
- Lire le temps t_1 , la hauteur h_1 et mesurer le volume V_1 de l'eau ayant traversé l'échantillon à l'aide du récipient gradué,
- Renouveler l'opération plusieurs fois, (changer le niveau d'eau dans le réservoir amont),
- Lire les nouvelles mesures $t_2, t_3, \dots, h_2, h_3, \dots$ et mesurer les volumes $V_2, V_3, \dots$



Pour un essai à charge variable :

Dans l'essai de perméamètre à charge variable (figure 4), la colonne est remplie d'eau et à un temps $(t_1 - t_0)$ son niveau baisse de h_0 à h_1 .

- Alimenter le tube piézométrique et relever le niveau de l'eau h_0 .
- Ouvrir les robinets du panneau et du perméamètre. Déclencher aussitôt le chronomètre.
- Après quelques minutes, stopper le chronomètre et relever le temps t_1 et la hauteur h_1 sur le tube piézométrique.
- Renouveler l'opération plusieurs fois,
- Lire les nouvelles mesures $t_2, t_3, \dots, h_2, h_3, \dots$

La durée de cette opération est de quelques minutes pour les sables et plusieurs jours pour l'argile.

3. CALCUL ET RESULTATS :

Un perméamètre est composé d'une enceinte étanche dans laquelle est placé un échantillon de sol de section A et de longueur L .

a) Perméamètre à charge constante

On mesure le débit d'eau Q en recueillant un volume d'eau V en un temps t .

Le débit : $Q = V/t$

Sachant que : $v = Q/A$ (v : vitesse de l'eau dans le sol)

D'après la loi de DARCY, on a :

$$v = k.i = k \frac{h}{L} = \frac{Q}{A} = \frac{V}{A.t}$$

On obtient :

$$k = \frac{V.L}{h.A.t}$$

b) Perméamètre à charge variable

À l'instant dt la perte de charge correspondante est dh , donc le débit est :

En un point du tube d'entrée, la vitesse d'écoulement est égale à :

$$v = -dh/dt$$

et le débit à l'entrée est : $Q_{\text{entrée}} = -adh/dt$

dh : distance parcourue par l'eau en un temps dt

a : aire du tube d'entrée

$$Q_{\text{sortie}} = k.i.A = k.A.h/L$$

comme l'eau est incompressible et selon le principe de continuité : $Q_{\text{entrée}} = Q_{\text{sortie}}$

$$\frac{-adh}{dt} = k \frac{h}{L} A$$

$$-\frac{dh}{h} = k \frac{A}{aL} dt$$

En intégrant cette équation et en isolant le coefficient de perméabilité :

$$\int_{h_0}^{h_1} -\frac{dh}{h} = \int_{t_0}^{t_1} k \frac{A}{aL} dt$$

on obtient :

$$k = \frac{aL}{A(t_1 - t_0)} \ln \left(\frac{h_0}{h_1} \right)$$

En utilisant les logarithmes décimaux, on a :

$$k = 2.3 \frac{aL}{A(t_1 - t_0)} \lg \left(\frac{h_0}{h_1} \right)$$

CALCUL DES DEBITS ET DE LA PERMEABILITE**1. Essai de perméabilité à charge constante :**

L=.....m

S=..... m²

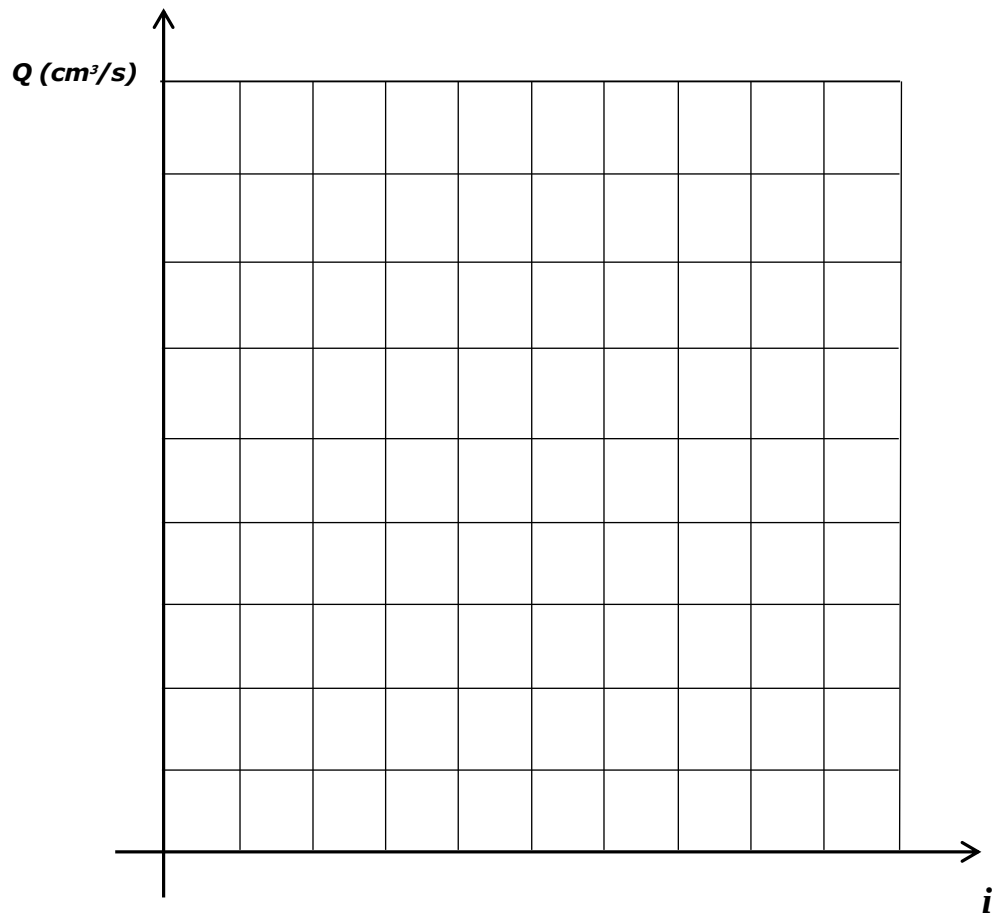
Essais	Perte de charge h (m)	Gradient hydraulique $i=h/L$	Volume d'eau V (m ³)	Temps t (s)	Débit $Q=V/t$ (m ³ /s)	Coefficient de perméabilité k (m/s)
1						
2						
3						
4						
5						

2. Essai de perméabilité à charge variable

L=.....m

A=..... m² a=..... m²

Essais	Hauteur h_1 (m)	Hauteur h_2 (m)	Gradient hydraulique $i=\Delta h/L$	Volume d'eau V (m ³)	Temps t_1 (s)	Temps t_2 (s)	Coefficient de perméabilité k (m/s)	Débit $Q=V/t$ (m ³ /s)
0								
1								
2								
3								
4								
5								



Vérification de la loi de Darcy (la relation $Q=f(i)$)