

**BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES**

**SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL**  
B.P. 6009 – 45 Orléans (02) – Tél.: (38) 66.06.60

**MESURE "IN SITU" DE LA PERMÉABILITÉ  
D'UN SOL NON SATURÉ**

**Étude bibliographique**

par

J.M. LAMACHERE

stagiaire E.N.S.G.



**Département HYDROGÉOLOGIE**  
B.P. 6009 – 45 Orléans (02) – Tél.: (38) 66.06.60

**71 SGN 279 HYD**

Juin 1971

## R E S U M E

Il est parfois nécessaire de connaître la perméabilité de formations proches du sol et initialement non saturées en eau, par exemple , lorsque l'on prévoit le relèvement artificiel d'une nappe phréatique , sous l'effet d'irrigation par exemple, ou la submersion d'un sol pour la création d'une retenue d'eau.

Au cours de la présente étude on s'est penché sur les trois principales méthodes permettant d'évaluer la perméabilité de ces sols non saturés. Des essais pratiques sur terrain expérimental ont permis de juger du coût et des difficultés d'application de chacune d'elles.

Les valeurs de la perméabilité déterminée par chacune des méthodes sont notablement différentes, leur principe et les approximations qu'elles exigent étant aussi différentes. On trouvera dans ce rapport les éléments permettant de choisir la méthode la plus appropriée à chaque cas.

Cette étude bibliographique et expérimentale a été effectuée dans le cadre des études générales méthodologiques du département d'hydrogéologie.

S O M M A I R E1. MESURE PAR INFILTRATION DANS UN PUIT A FAIBLE PROFONDEUR1.1. Méthode de WINGER

- Principe
- Mise en oeuvre
- Calcul de la perméabilité
- Limitations techniques de cet essai

1.2. Méthode de NASBERG-TERLETSKATA

- Principe
- Mise en oeuvre
- Calcul de la perméabilité
- Remarques

1.3. Intérêt et limitation de ces deux méthodes2. MESURE PAR INFILTRATION A PARTIR D'UNE TRANCHEE SUPERFICIELLE2.1. Essais MATSUO

- Principe
- Mise en oeuvre
- Calcul de la perméabilité
- Limites de la méthode

2.2. Compléments à propos de l'essai MATSUO

- Principe : Cas I - Cas II

2.3. Intérêt et critiques de la méthode3. MESURE PAR SATURATION LOCALISEE DU TERRAIN - METHODE DES DEUX TYBES (BOUWER)3.1. Généralités - Notations3.2. Principe de la méthode

- Principe
- Remarque A
- Calcul de la perméabilité

.../...

### 3.3. Mise en oeuvre

- L'équipement sur le terrain
- La préparation du trou
- Installation des tubes et mise en eau
- Mesures sur le terrain

### 3.4. Critiques et extension de la méthode

#### 3.4.1. Intérêts et critiques de la méthode des deux tubes

#### 3.4.2. Extension de la méthode des deux tubes aux terrains anisotropes

- Introduction
- Principe de la méthode
- Mesure de la perméabilité verticale  $K_v$
- Mise en oeuvre pratique
- Discussion et limites de la méthode

### BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

# 1. MESURE PAR INFILTRATION DANS UN PUIT A FAIBLE PROFONDEUR

## 1.1. Méthode de WINGER

### - Principe

L'essai consiste à mesurer le volume d'eau qui s'écoule à partir d'un puits dans lequel une charge hydraulique est maintenue constante. Bien que influencée par la nature des autres couches sollicitées par l'écoulement, la perméabilité horizontale ainsi déterminée reflète tout d'abord la perméabilité des couches les plus perméables.

### - Mise en oeuvre (fig. 1.1.)

Un trou est creusé à la profondeur désirée. Un appareil à flotteur est installé permettant de maintenir constant le niveau de l'eau dans ce trou. Cet appareil est relié par un tuyau à un réservoir calibré fixé sur un petit socle placé à côté du trou. Le temps et le niveau d'eau dans le réservoir sont enregistrés simultanément. Chaque fois qu'il est nécessaire, de l'eau peut être ajoutée dans le réservoir. Quand les variations de température excèdent 2°C des corrections de viscosité doivent être faites. L'essai doit être continué jusqu'à saturation du terrain autour du trou et obtention d'un débit d'infiltration constant. Pour cette raison, après chaque mesure, on calcule la perméabilité jusqu'à ce qu'elle ait atteint une valeur constante. Au bout de 24 heures d'essai, on peut supposer que la zone de terrain située autour du trou est saturée.

### - Calcul de la perméabilité (fig. 1.2. - fig. 1.3. - fig. 1.4.)

Deux cas sont à envisager :

. CAS\_I       $T_u \geq 3 h$     (fig. 1.2. et 1.3.)

$T_u$     distance entre le niveau d'eau dans le trou et la nappe aquifère (ou une couche imperméable)

$h$       hauteur de l'eau dans le trou (en pieds)

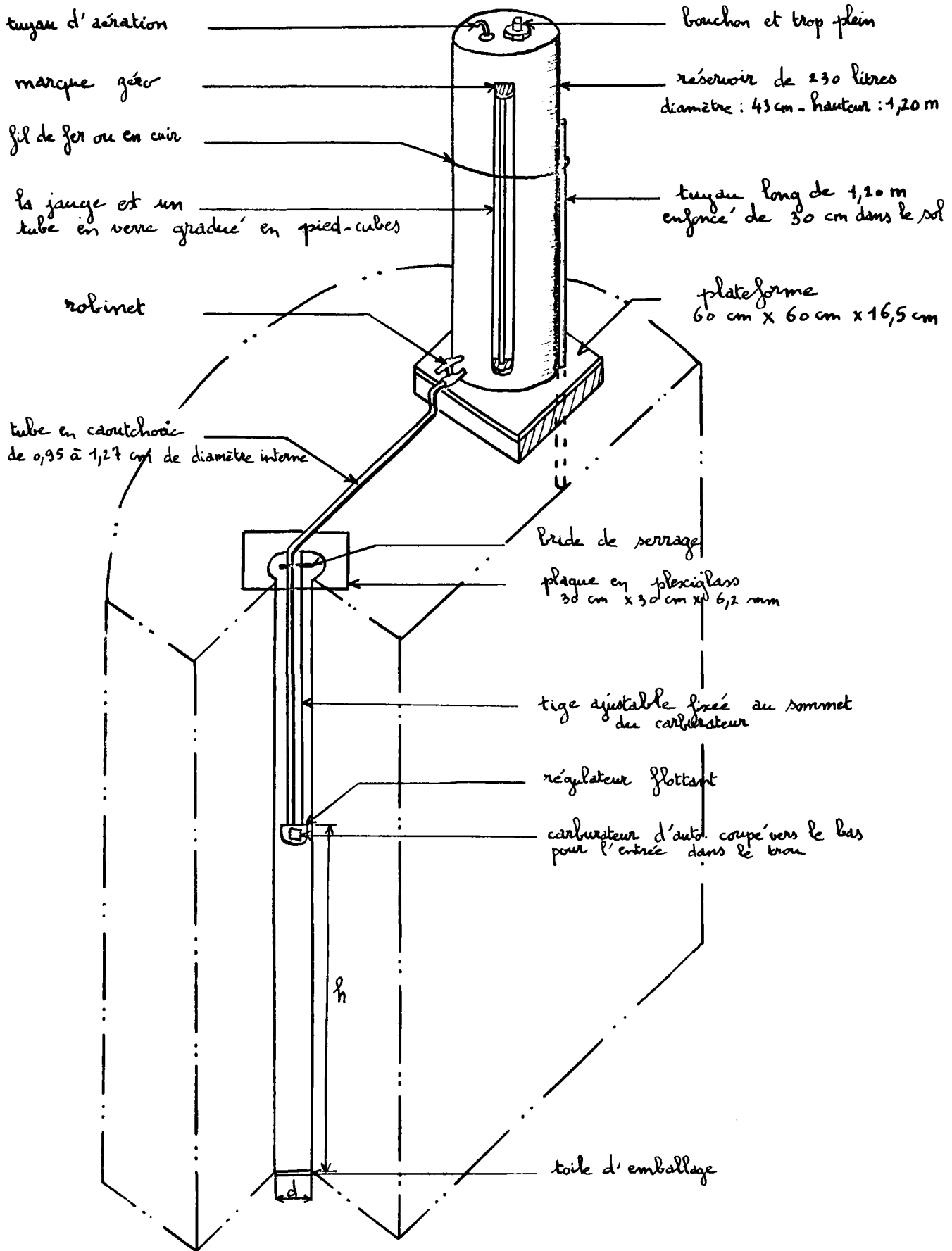
$r$       rayon du trou (en pieds)

$Q$       en pieds cube par minute

La formule suivante permet de calculer la perméabilité  $K$  :

$$K = \frac{720 \left[ \log_e \left( \frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1} \right) - 1 \right] Q}{2 \pi h^2} \quad K \text{ en pouces/heure}$$

Un abaque (fig. 9-18) permet de lire directement  $K$  connaissant  $Q$ ,  $h$  et  $r$ .



Équipement du puits (WINGER 1960) Figure 1-1

NOTATIONS et UNITES utilisées

$D$  : profondeur totale du trou (en pieds)

$r$  : rayon du trou (en pieds)

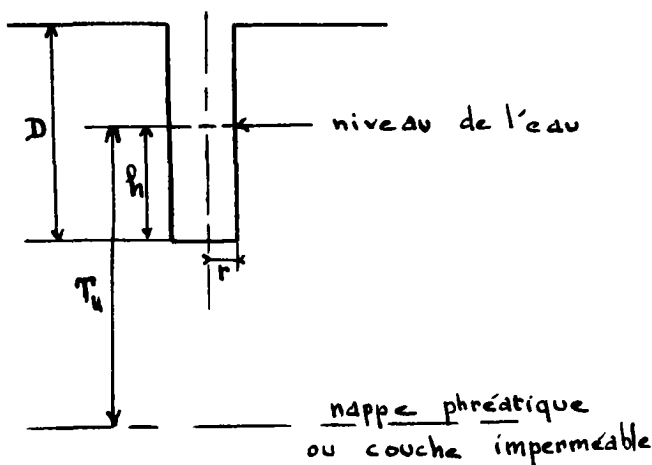
$T_u$  : profondeur de la nappe phréatique ou de la couche imperméable sous le niveau d'eau maintenu constant dans le trou (en pieds)

$h$  : profondeur de l'eau dans le trou (en pieds)

$Q$  : débit mesuré (en pied-cubes par minute)

**CAS I**

$$\underline{T_u \geq 3h}$$



**CAS II**

$$\underline{3h > T_u \geq h}$$

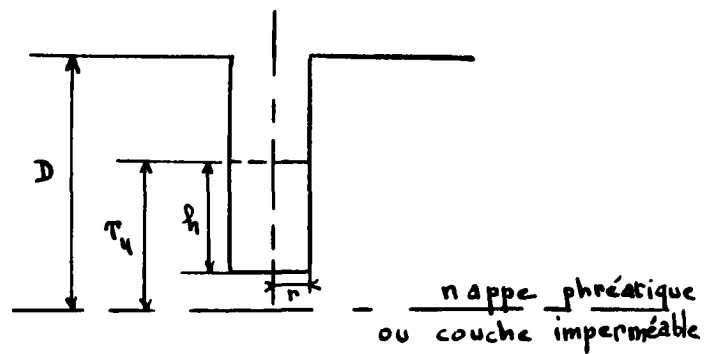
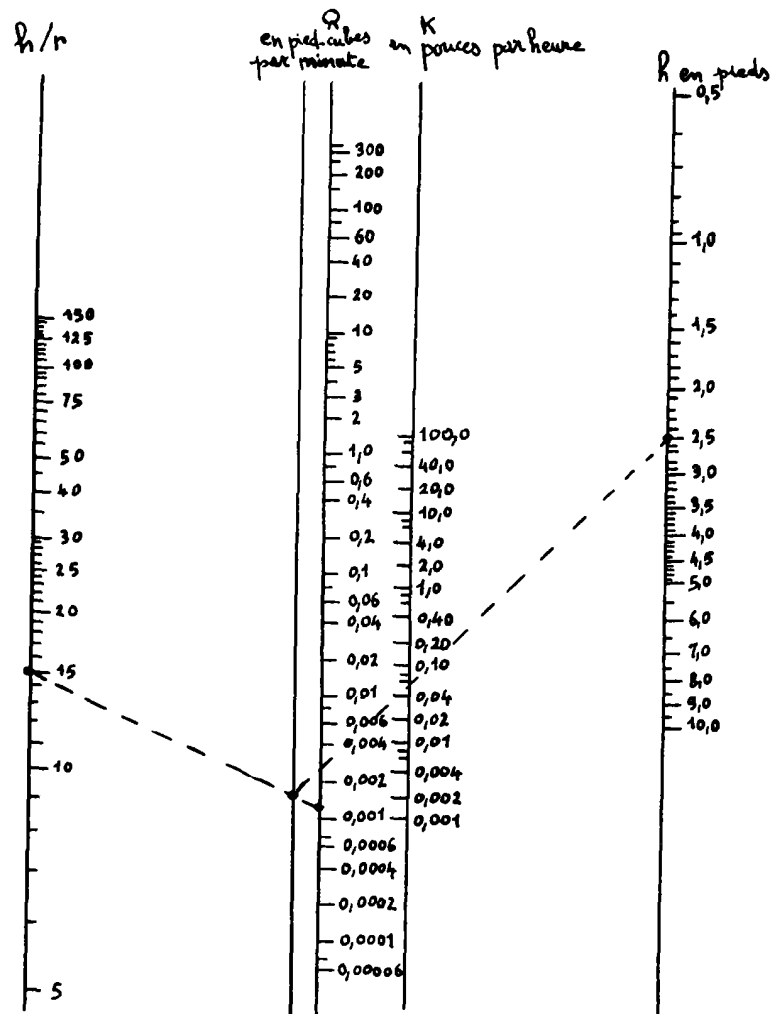


figure 1 - 2

## CAS I



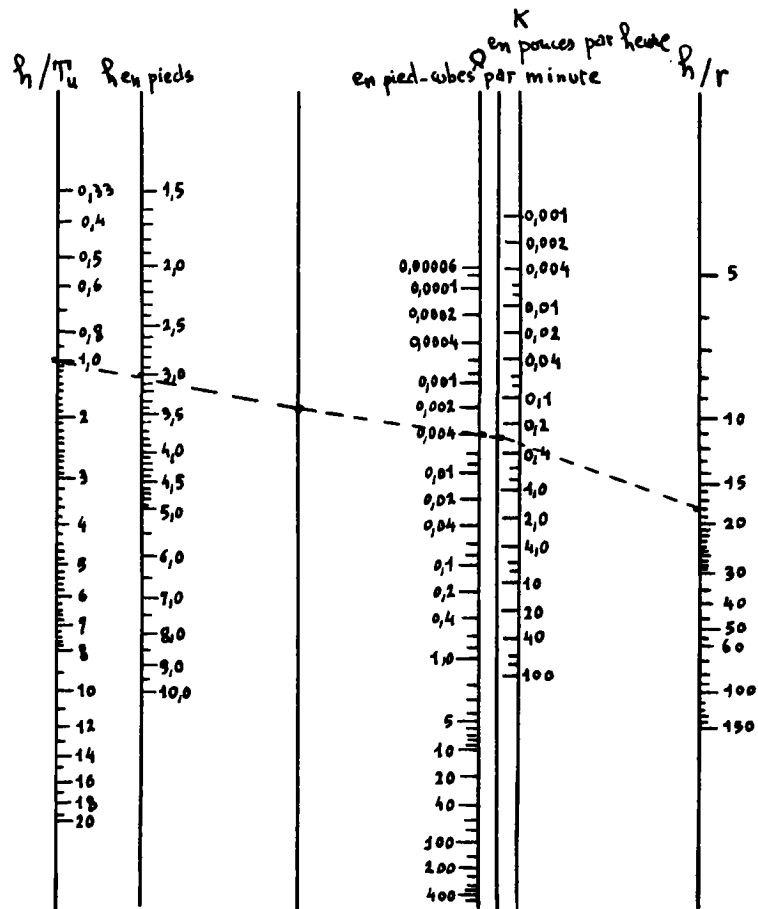
$$T_u \geq 3h$$

$$K = \frac{720 Q \left[ \log_e \left( \frac{R}{r} + \sqrt{\left( \frac{R}{r} \right)^2 - 1} \right) - 1 \right]}{2 R h^2}$$

Abaque I pour déterminer la perméabilité par infiltration dans un puits à faible profondeur (WINGER)

Figure 1-3

## CAS II



$$3h > T \geq h$$

$$K = 720 \left[ \frac{3 \log_e \frac{h}{r} Q}{\pi h (h + 2 T_u)} \right]$$

Abaque II pour déterminer la perméabilité par infiltration dans un puits à faible profondeur (WINGER)

figure 1 - 4

. CAS II  $h \leq Tu < 3h$  (fig. 1.2. - fig. 1.4.)

On applique la formule suivante :

$$K = 720 \left[ \frac{3 Q \log_e \frac{h}{r}}{\pi h (h+2 Tu)} \right]$$

Un abaque (fig. 9-18) permet de lire directement K connaissant Q, h et r.

- Limitations techniques de cet essai

Une des limitations principales de cet essai concerne la durée (2 à 6 jours) et le montage de l'équipement du trou. Une quantité d'eau relativement importante est aussi nécessaire, spécialement si le terrain à une perméabilité supérieure à 2 ou 3 pouces/heure (5 ou 7,5 cm/h).

1.2. Méthode de NASBERG-TERLETSKATA

- Principe

Le principe est le même que celui de la méthode précédente.

- Mise en oeuvre (fig. 1.5.)

Dans un forage de diamètre d, on verse de l'eau avec un débit Q réglé de façon à maintenir au fond de l'ouvrage une colonne d'eau de hauteur h constante.

- Calcul de la perméabilité

NASBERG a étudié de façon théorique l'écoulement dans un sol sec à partir d'un point d'émergence situé dans ce sol. TERLETSKATA a tiré de cette étude et de l'expérimentation une formule qui relie le débit Q, absorbé par un forage ou un puits dans lequel on maintient une hauteur d'eau h constante, et la perméabilité du terrain K :

$$K = \frac{0,423}{h^2} Q \log_{10} \frac{4 h}{d}$$

d diamètre du forage (en m) avec  $25 < \frac{h}{d} < 100$

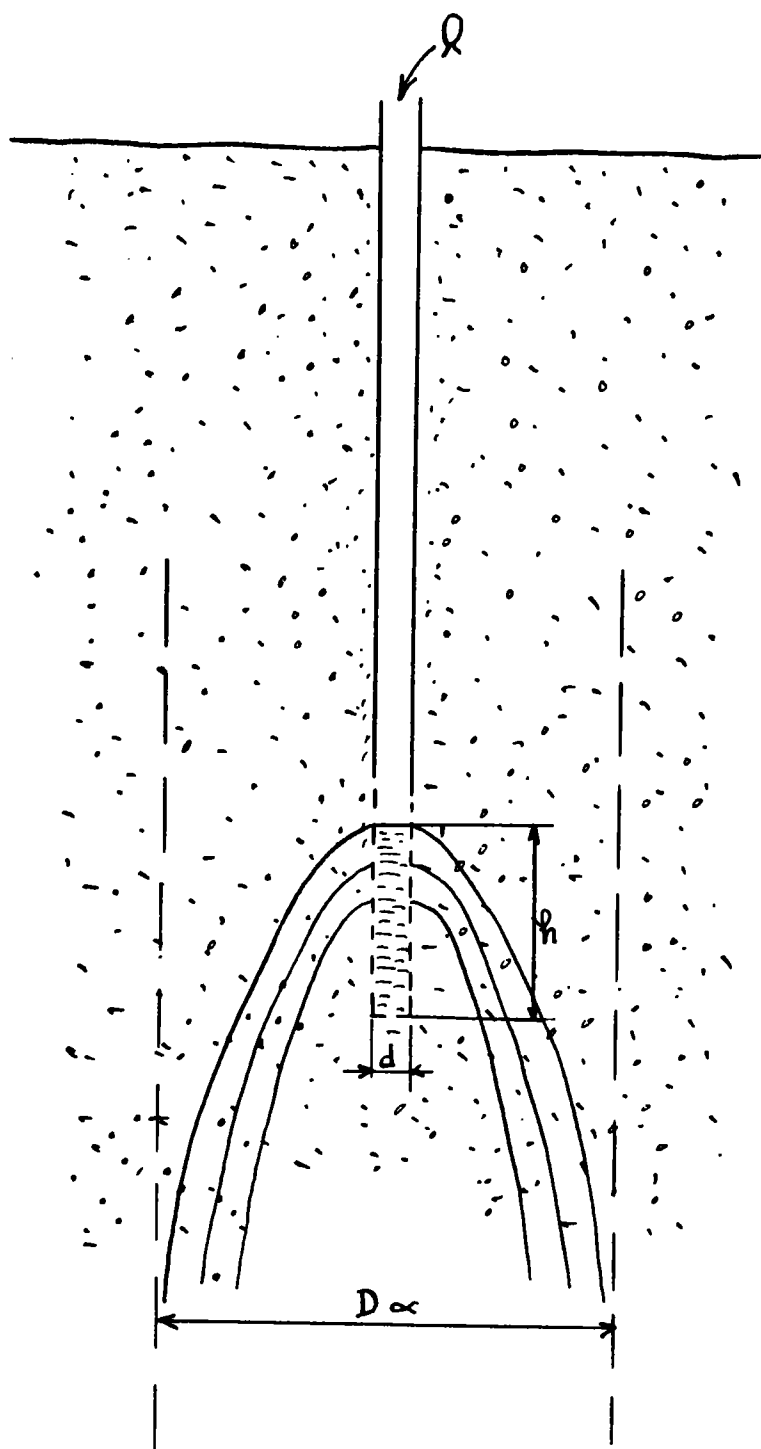
h hauteur de la colonne d'eau dans le puits (en m)

Q débit en m<sup>3</sup>/s

K en m/s

Si  $\frac{h}{d} < 25$  un abaque permet encore de calculer K

# Essais NASBERG - TERLETSKATA



$$K = \frac{0,423}{R^2} Q \log_{10} \frac{4h}{d}$$

$$\text{avec } 25 < \frac{h}{d} < 100$$

$$D_\alpha = 2 \sqrt{\frac{Q}{\pi K}}$$

Figure 1-5

- Remarques

Cette formule diffère sensiblement peu de celle proposée par WINGER. Il suffit en effet dans cette dernière de poser  $\frac{h}{l}$  très petit devant 1 et l'on retrouve la formule ci-dessus

On estime que la perméabilité ainsi mesurée s'applique au terrain contenu dans un cylindre ayant pour axe le forage et un diamètre D tel que :

$$D = 2 \sqrt{\frac{Q}{\pi K}}$$

D en m  
Q en m<sup>3</sup>/s  
K en m/s

### 1.3. Intérêt et limitation de ces deux méthodes

L'intérêt de ces deux méthodes réside dans leur facilité de mise en oeuvre (pour la seconde surtout).

Leur inconvénient est d'ordre théorique. On ne connaît en fait la signification de la mesure que dans deux cas bien précis. Le premier cas est celui d'un terrain homogène et isotrope, le second cas est celui d'un terrain de grande perméabilité horizontale devant la perméabilité verticale. De plus, la mesure de la perméabilité est influencée par les conditions dans lesquelles se fait l'écoulement. Elle est influencée en particulier par le degré de saturation du sol, par les phénomènes capillaires et par les conditions aux limites de l'écoulement, conditions qui restent souvent mal définies puisque l'écoulement est à surfaces libres.

Malgré ses inconvénients, cette méthode est intéressante parce qu'elle permet une investigation plus profonde que l'infiltration à partir d'un fossé, et qu'elle est plus aisée à mettre au point que la méthode des deux tubes.

## 2. MESURE PAR INFILTRATION A PARTIR D'UNE TRANCHEE SUPERFICIELLE

### 2.1. Essais MATSUO

Dans une communication au III<sup>ème</sup> Congrès international de mécanique des sols (Zurich 1958), MATSUO et AKAI ont décrit une méthode de mesure de la perméabilité d'un sol sec par l'étude du débit absorbé par une petite fouille d'essai.

#### - Principe (fig. 2.1.a - fig. 2.1.b)

La mesure de la perméabilité est faite en interprétant l'écoulement plan qui se produirait à partir d'une tranchée indéfinie de largeur B et dans laquelle un niveau H serait maintenu.

# Essais MATSUO

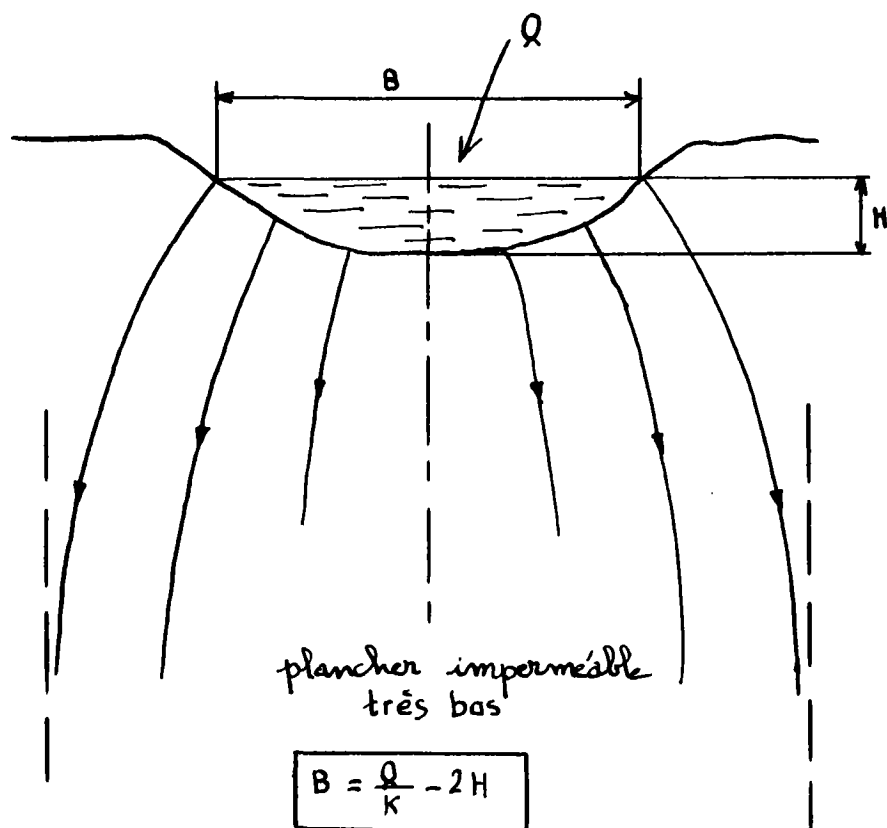


fig 2-1-a

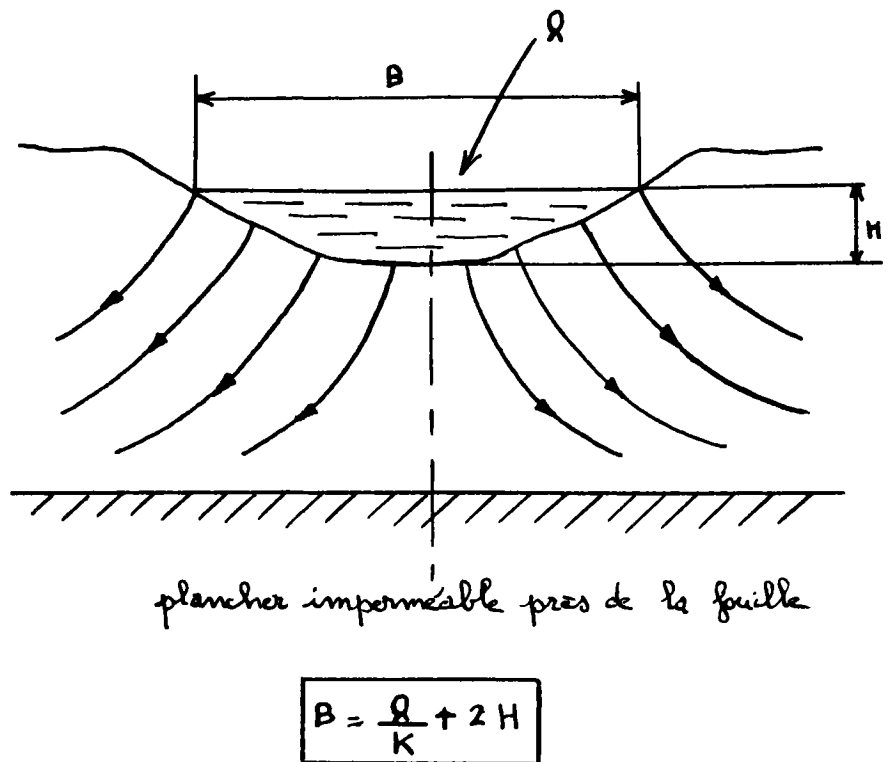


fig 2-1-b

- Mise en oeuvre

Une fouille rectangulaire est réalisée. On mesure alors le débit  $Q$ , qu'il faut y déverser pour y maintenir une hauteur d'eau constante. Puis la fouille est allongée d'une certaine longueur et le débit mesuré de nouveau. La différence des deux débits mesurés est le débit absorbé par la longueur supplémentaire de fouille. On élimine ainsi l'influence des extrémités.

- Calcul de la perméabilité

Deux cas doivent être envisagés (fig. 2.1.).

. CAS I Le plancher imperméable est très bas (fig.2.1.a).

$$B = \frac{Q}{K} - 2 H$$

B largeur de la fouille au niveau du plan d'eau

$$K = \frac{Q}{B + 2 H}$$

H profondeur de l'eau dans la faille

Q débit absorbé par unité de longueur

. CAS II Le plancher imperméable est assez près de la tranchée (fig. 2.1.b).

$$B = \frac{Q}{K} + 2 H$$

Q débit absorbé par unité de longueur

$$K = \frac{Q}{B - 2 H}$$

B largeur de la fouille au niveau du plan d'eau

H hauteur d'eau dans la fouille

- Limites de la méthode

Outre les limitations propres aux essais par infiltration, l'essai MATSUO semble pécher par excès de simplicité dans les formules de calcul de la perméabilité (perméabilité verticale dans le cas 1, horizontale dans le cas 2 pour les sols anisotropes). En toute rigueur les formules de MATSUO ne sont valables que pour une forme trochoïdale de la section du fossé. Il semble donc qu'une meilleure précision puisse être obtenue par les considérations suivantes, relatives à l'étude des pertes d'eau dans les fossés.

2.2. Compléments à propos de l'essai MATSUO

- Principe

L'étude de l'écoulement plan qui se produit à partir d'une tranchée indéfinie de largeur  $B$  et dans laquelle un niveau  $H$  est maintenu s'identifie à celui des pertes d'eau dans les fossés.

Comme précédemment, deux cas doivent être envisagés.

- CAS I Le canal perd de l'eau jusqu'à une profondeur relativement grande. (fig. 2.2.a.).

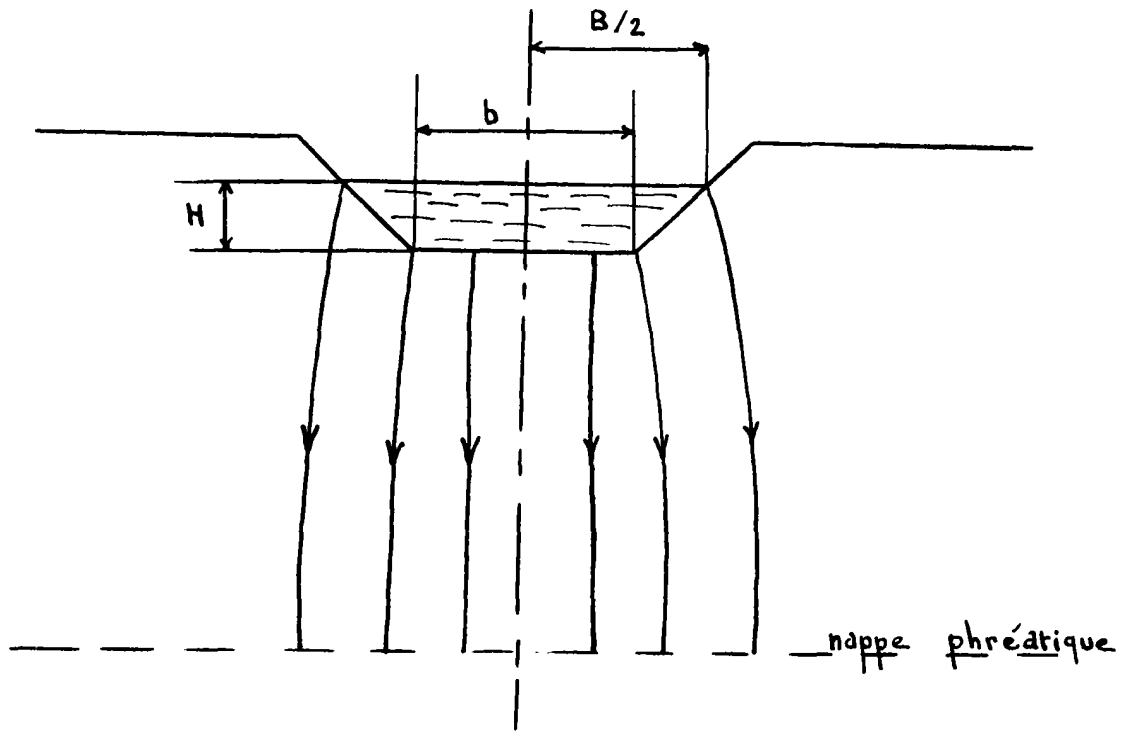


figure 2-2-a

Une solution a pu être trouvée (MUSKAT 1946 - POLUBARINOVA - KOCHINA 1964). La solution obtenue en appliquant les transformations conformes est celle de WEDERNIKOV (de MUSKAT pp. 331 FF) où :

$$\frac{Q}{K} = \frac{\pi m H}{\cos^{-1} \theta} = B + 2 H \frac{I}{I'}$$

Q perte d'eau par unité de longueur du fossé

H hauteur du niveau d'eau dans le fossé

B largeur du fossé au niveau de l'eau

b largeur au fond du fossé

m pente du talus

I et I' sont des intégrales elliptiques de première espèce ayant comme module :

$$\theta \text{ et } (1 - \theta^2)^{\frac{1}{2}} \quad \theta = \sin \pi \left( \frac{Q}{2K} - \frac{B}{2} + \frac{b}{2} \right) = \cos \frac{m \pi H K}{Q}$$

La largeur maximum de la bande infiltrée sous le canal est donnée par

$$L = \frac{Q}{K} = B + 2 H \frac{I}{I'}$$

L'utilisation des équations ci-dessus est assez compliquée mais elle est grandement facilitée par l'existence du diagramme (Fig. 2.3.).

Ce diagramme est construit de telle façon que connaissant  $m$ ,  $B$  et  $H$  on en déduit  $\frac{Q}{KH}$  graphiquement donc  $K$  par mesure de  $Q$  infiltré.

CAS 2 Le plancher imperméable est assez près de la tranchée (fig. 2.2.b)

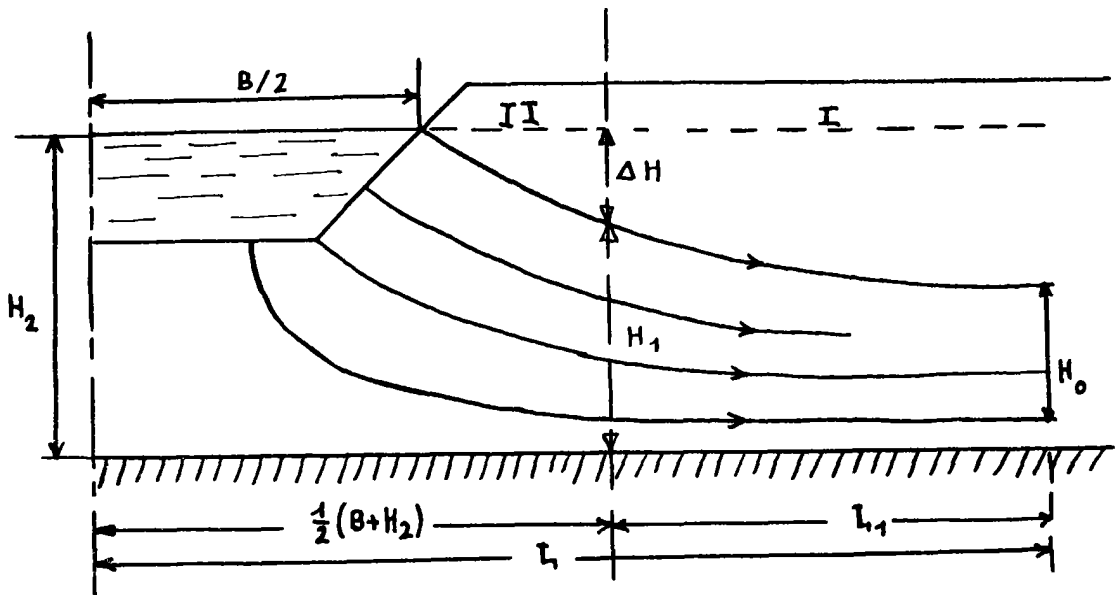


figure 2.2.b

La tranchée est remplie jusqu'au niveau  $H_2$  au-dessus de la couche imperméable.

L'eau se perd dans la nappe aquifère pour laquelle, à une distance  $L$ , le niveau  $H_0$  est mesuré.

Une solution à ce problème a été donnée par DACHLER (DACHLER R. Die Wasserwirtschaft 1903 pp. 110 FF) et repris par MUSKAT (pp. 347 FF).

Dans la partie I, l'écoulement est considéré comme horizontal. La limite entre les deux régions est située à une distance de  $\frac{1}{2}(B + H_2)$  du milieu du fossé.

L'application des hypothèses de DUPUIT pour l'écoulement de l'eau dans la partie I :

$$Q = K \left( \frac{H_1 - H_0}{L_1} \right) \left( \frac{H_1 + H_0}{2} \right) \dots\dots\dots I$$

.  $Q$  est la quantité d'eau qui sort d'un côté du fossé soit  $Q = \frac{Q_t}{2}$   
 $Q_t$  étant le débit total.

## CAS I

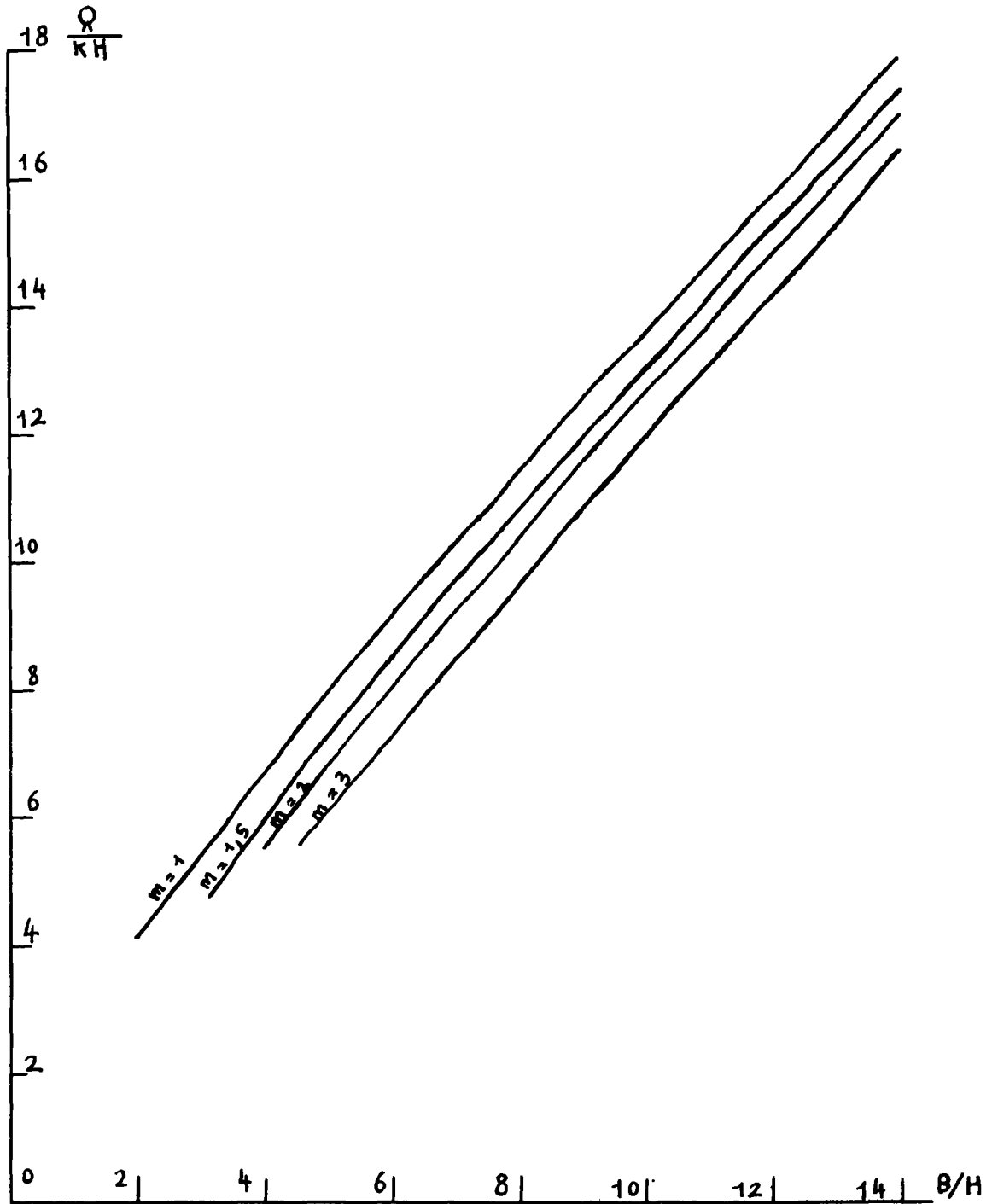


Diagramme permettant la détermination du rapport  $\frac{Q}{KH}$

Figure 2-3

Dans la partie II, on peut poser :

$$Q = K (H_2 - H_1) f \quad \dots\dots\dots \text{II}$$

.  $f$  est un facteur de forme qui dépend de la géométrie du fossé et de son voisinage.

DACHLER a déterminé les valeurs de  $f$  en remplaçant le fossé par une ligne source. A partir de la répartition des équipotentiels et des lignes de courant engendrées par la ligne source, des courbes pour  $f$  constant peuvent être construites. Ces courbes donnent graphiquement les variations de  $B/H_2$  en fonction de  $H_1/H_2$ . Elles sont de deux types selon les valeurs de  $B/u$  (fig. 2.4.a. - fig. 2.4.b.).

$u$  est le périmètre maillé de la fouille

$B$  est la largeur du fossé au niveau de l'eau

### Calcul de $K$ dans le cas II

La mesure du débit total infiltré  $Q$  permet de calculer  $Q = \frac{Q_t}{2}$ .

$L = \frac{1}{2} (B + H_2) + L_1$  est la distance du fossé à laquelle le niveau de l'eau est celui de la nappe aquifère  $H_0$ . Cette méthode nécessite donc l'installation d'un piézomètre pour la mesure de  $H_0$  et de  $L_1$ .

Enfin on choisit une valeur arbitraire de  $H_1$ . Connaissant  $B$ ,  $H_2$  et  $u$  on peut alors déterminer  $f$  à partir de l'un des deux graphes (fig. 2.4.a. - fig. 2.4.b.) et calculer les deux valeurs correspondantes de  $K$  par les équations I et II.

Le calcul est répété pour différentes valeurs de  $H_1$  jusqu'à donner avec I et II les mêmes valeurs  $Q$  donc une valeur unique de  $K$ .

### 2.3. Intérêt et critique de la méthode

La méthode de mesure de la perméabilité d'un sol par infiltration dans un fossé se révèle très aisée à mettre en oeuvre bien que nécessitant une grosse réserve d'eau à sa disposition.

La précision de la mesure semble limitée par la précision sur la mesure du débit. Pour améliorer cette dernière, il est conseillé d'allonger au maximum la fouille afin d'obtenir une différence des débits mesurés relativement grande par rapport à l'erreur de lecture.

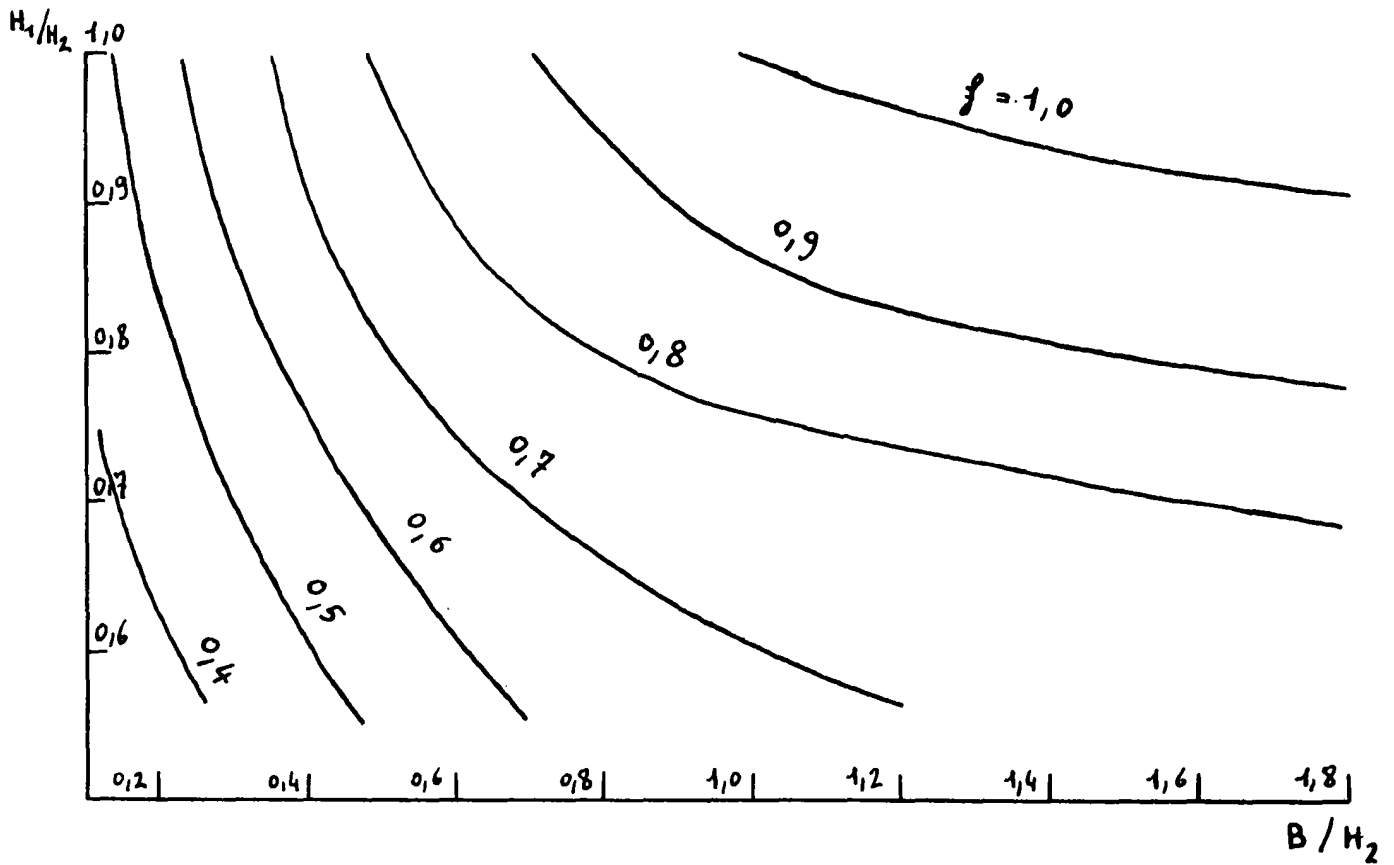
Selon que la précision sur la différence des mesures de débit est bonne ou mauvaise, il sera ou il ne sera pas nécessaire de tenir compte des compléments apportés à la méthode de MATSUO. Quoiqu'il en soit, ces compléments permettent une meilleure approche théorique du problème de l'infiltration à partir d'un fossé. Notons en passant que dans le cas 2, l'installation d'au moins un piézomètre se révèle indispensable pour affiner la mesure.

Finalement malgré les difficultés pratiques dues au colmatage les difficultés théoriques dues au type d'écoulement à surfaces libres et aux phénomènes capillaires, cette méthode pour mesurer la perméabilité d'un sol non saturé se révèle digne d'intérêt.

# CAS II

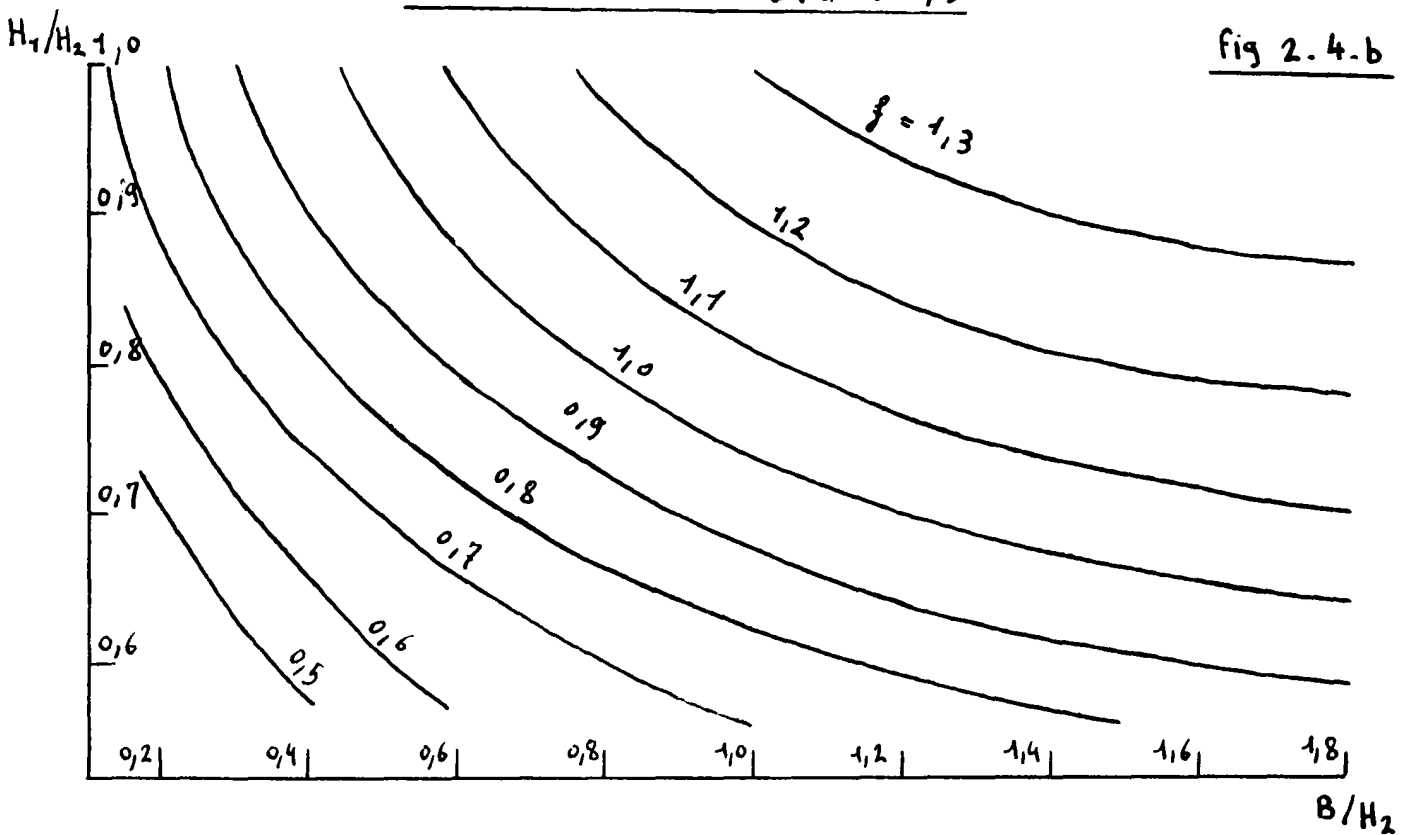
FOSSÉ PEU PROFOND  $B/U > 0,9$

fig 2.4.a



FOSSÉ PROFOND  $B/U < 0,9$

fig 2.4.b



### 3. MESURE PAR SATURATION LOCALISEE DU TERRAIN - METHODE DES DEUX TUBES (BOUWER)

#### 3.1. Généralités - Notations

La méthode des deux tubes consiste essentiellement à saturer une zone d'extension limitée au-dessous d'un trou foré dans lequel sont placés deux tubes concentriques.

La perméabilité du milieu est calculée à partir des mesures de la vitesse de déplacement du niveau d'eau dans le tube interne. Toute la méthode est basée sur la séparation entre l'écoulement dû à la différence des niveaux d'eau dans les deux tubes et l'écoulement dû à l'infiltration de l'eau dans le sol.

Des paramètres sans dimension sont utilisés pour décrire l'écoulement dû à la différence des niveaux d'eau dans les deux tubes. Ces paramètres ont été déterminés avec un réseau électrique de résistances sous trois conditions différentes : un sol homogène, un sol situé au-dessus d'une couche de très forte perméabilité, un sol situé au-dessus d'une couche de très faible perméabilité.

Cette méthode apparaît dès lors théoriquement très intéressante car elle définit de façon précise les limites de l'écoulement étudié en ne faisant pas intervenir de surface libre d'écoulement.

Dans tout ce qui suit nous emploierons les notations et unités suivantes :

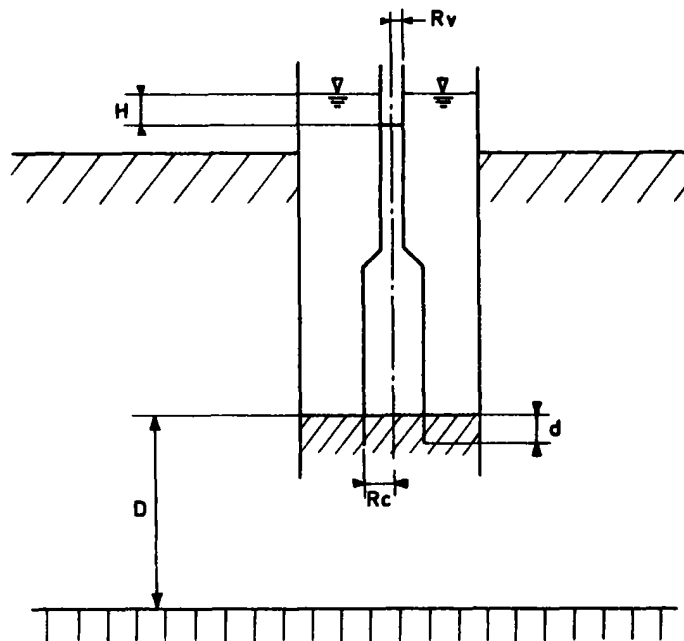


Schéma 3-1

- d profondeur de pénétration du tube interne dans le fond du puits (en mètres)
- D distance entre le couche peu perméable et le fond du puits (en mètres)

$D_p$	distance entre la couche très perméable et le fond du puits (en mètres)
$F_f$	facteur de l'écoulement
$F_f = \frac{Q_H}{\pi K H R_c}$	(sans dimension)
$H$	distance entre les niveaux d'eau dans les deux tubes (en mètres)
$I$	vitesse moyenne d'infiltration dans le sol au fond du tube interne (en mètres par seconde)
$K$	perméabilité du sol sous le fond du trou (en mètre par seconde)
$R_c$	rayon du tube interne (en mètre)
$R_v$	rayon du tube dans lequel sont mesurés les niveaux d'eau (en mètre)
$Q_H$	débit entrant (ou sortant) dans le tube interne, dû à la différence des niveaux d'eau (en mètre cube par seconde)
$Q_I$	débit sortant du tube interne, dû à l'infiltration ( $Q_I = I \pi R_c^2$ ) (en mètre cube par seconde)
$t$	temps écoulé (en secondes)

### 3.2. Principe de la méthode

#### - Principe général

La saturation artificielle d'une zone d'extension limitée du sol rend attrayante la méthode des deux tubes. Cette saturation est obtenue en laissant s'infiltrer l'eau à partir des tubes interne et externe. Dès que le sol est suffisamment saturé sous le tube externe, la mesure de la perméabilité devient vraiment significative.

Les mesures à effectuer sont de deux types. Le premier type (baptisées plus loin mesures  $\beta$ ) concerne la mesure de la vitesse d'infiltration et le second (mesures  $\alpha$ ) concerne la différence entre la vitesse d'infiltration et la vitesse d'écoulement du tube externe vers le tube interne. Cette manière de procéder permet donc de séparer l'écoulement dû à la différence des niveaux d'eau dans les deux tubes et l'écoulement dû à l'infiltration de l'eau dans le sol. Seul l'écoulement dû à la différence des niveaux d'eau dans les deux tubes intervient dans la mesure de la perméabilité. Ce type d'écoulement est caractérisé par un facteur d'écoulement appelé  $F_f$ , obtenu de la façon suivante :

- le rapport  $\frac{Q_H}{\pi K R_c^2}$  est divisé par le rapport  $\frac{H}{R_c}$  qui peut être considéré comme un facteur géométrique de l'écoulement dans le tube interne. C'est un nombre sans dimension.

$$F_f = \frac{Q_H}{\pi K H R_c}$$

..... 1

le rapport  $\frac{Q_H}{\pi K R_c^2}$  décrit l'écoulement entre les deux tubes : c'est la moyenne des vitesses verticales de cet écoulement dans le tube interne, par unité de perméabilité.

Le facteur sans dimension  $F_f$  a été déterminé avec un réseau électrique de résistances sous des conditions variables de sols non homogènes et de réseaux géométriques d'écoulement. Les résultats obtenus ont été consignés sous forme d'abaques (fig. 3.2. - fig. 3.3.).

De l'égalité 1 on tire :

$$K = \frac{Q_H}{\pi H R_c F_f}$$

Le problème consiste maintenant à isoler le débit  $Q_H$  dû à la différence des niveaux d'eau entre les deux tubes, du débit total comprenant, en plus de ce dernier, le débit dû à l'infiltration de l'eau dans le sol.

Pour ce faire, il faut supposer que les conditions de charge n'influencent pas le réseau géométrique de l'écoulement dû à l'infiltration. Dans ces conditions on opère de la manière suivante en prenant deux séries de mesures :

- α ) On commence avec des niveaux d'eau identiques dans les deux tubes. L'arrivée d'eau du tube interne est arrêtée. La vitesse de chute du niveau de l'eau dans le tube interne est alors mesurée pendant que le niveau dans le tube externe est maintenu constant.
- β ) Le niveau de l'eau dans le tube interne est ensuite ramené à sa position originale, dans le même plan horizontal que celui du tube externe. La vitesse de chute de l'eau dans le tube interne est maintenant mesurée pendant que le niveau de l'eau dans le tube externe est continuellement ajusté au niveau de l'eau dans le tube interne.

Les valeurs de  $H$  et de  $t$  sont enfin reportées sur un graphe.

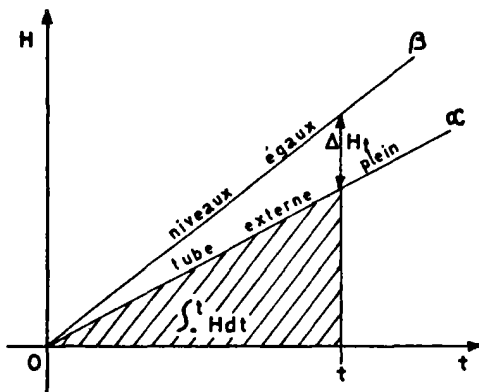


Fig.3-4

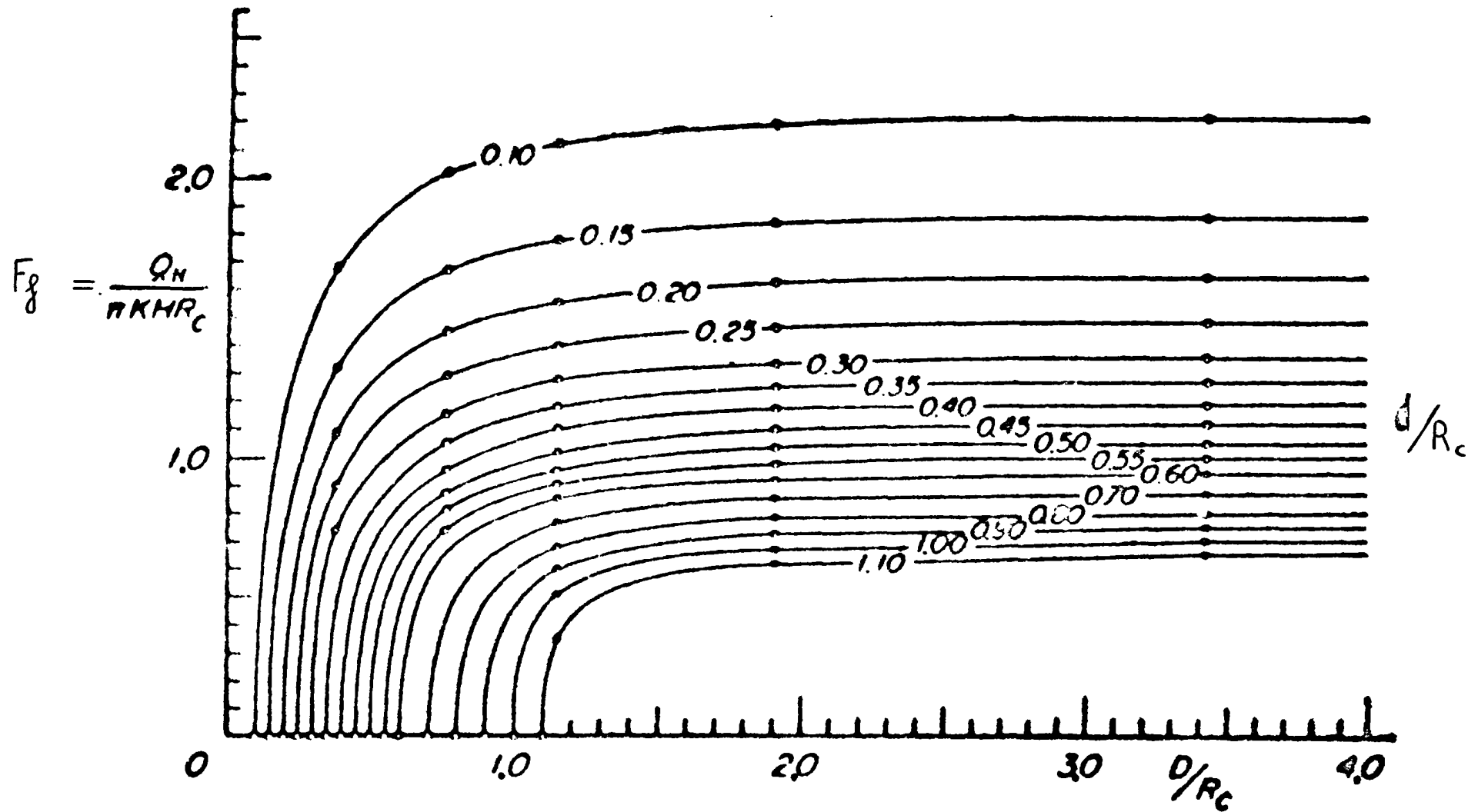
La distance  $\Delta H_t$  entre les deux courbes au temps  $t$  peut être exprimée de la façon suivante :

$$\Delta H_t = \int_0^t \frac{Q_H}{\pi R_c^2 v} dt$$

Or  $Q_H = \pi K H R_c F_f$  d'après 1

Il vient donc :

$$\int_0^t Q_H dt = \pi K R_c F_f \int_0^t H dt = \Delta H_t \pi R_c^2 v$$



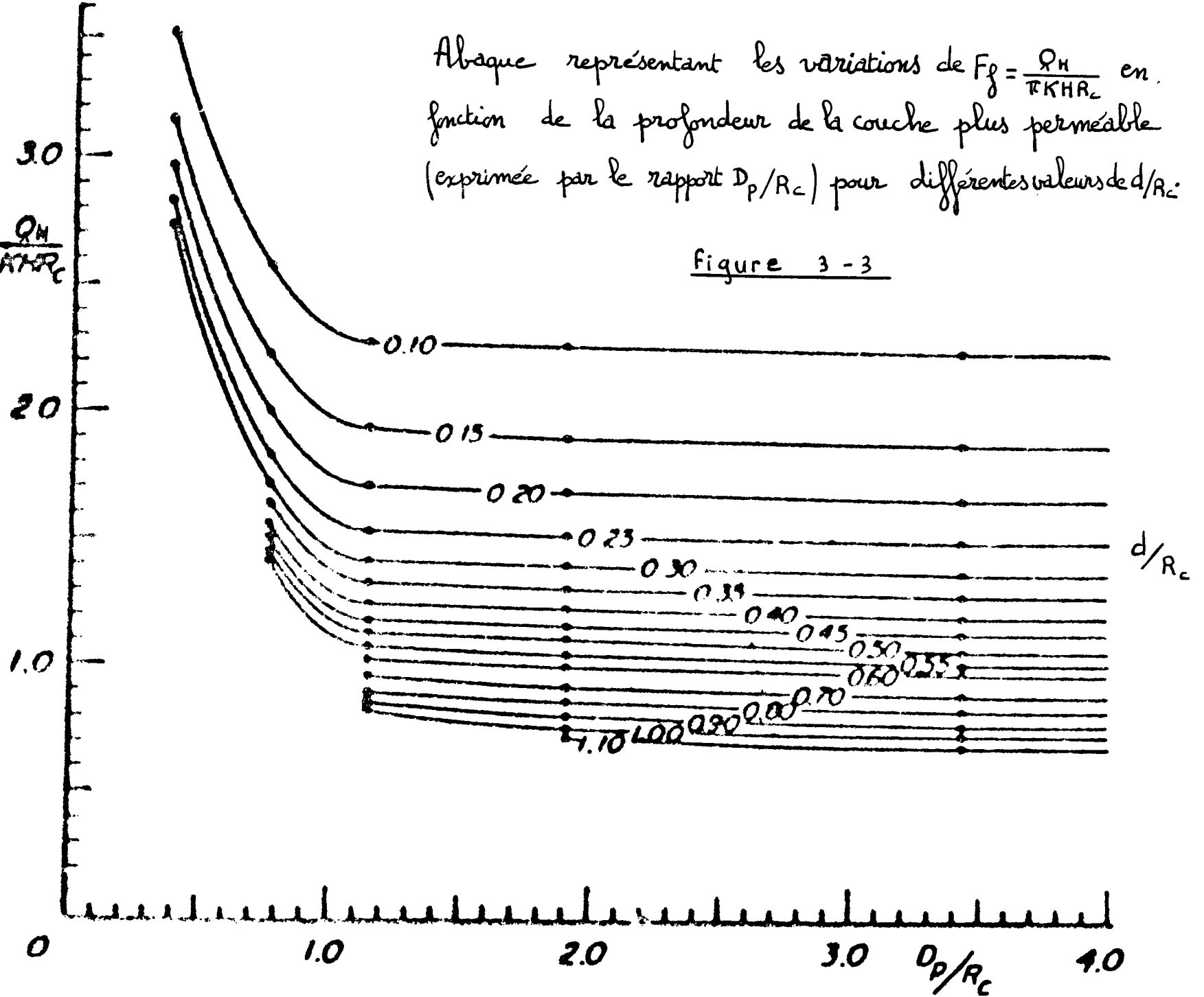
Abaque représentant les variations de  $F_g = \frac{Q_H}{\pi K H R_c}$  en fonction de la profondeur de la couche imperméable (exprimée par le rapport  $D/R_c$ ) pour différentes valeurs de  $d/R_c$ .

figure 3-2

Abaque représentant les variations de  $F_g = \frac{Q_H}{\pi K H R_c}$  en fonction de la profondeur de la couche plus perméable (exprimée par le rapport  $D_p/R_c$ ) pour différentes valeurs de  $d/R_c$ .

$$F_g = \frac{Q_H}{\pi K H R_c}$$

Figure 3-3



$$K = \frac{\Delta H_t R_v^2}{F_f R_c} \frac{1}{\int_0^t H dt} \dots\dots\dots 2$$

$\int_0^t H dt$  est l'aire hachurée sous la courbe  $\alpha$  entre les temps  $t = 0$  et  $t$ .

$R_v$  et  $R_c$  sont connus,  $F_f$  est déterminé à partir des graphes mentionnés plus haut,  $\Delta H_t$  et  $\int_0^t H dt$  sont mesurés d'après les graphes représentant les variations de  $H$  en fonction du temps  $t$ .

- Remarque A

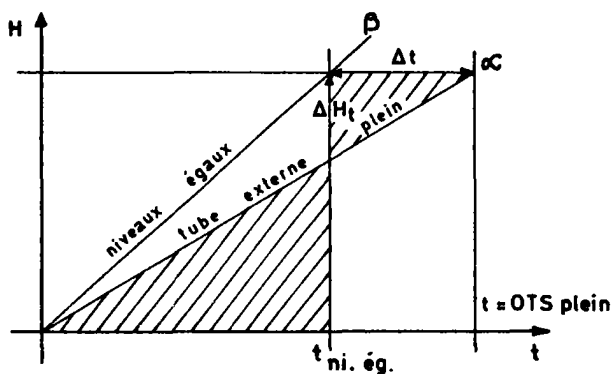


Fig.3-5

Les courbes  $H = f(t)$  sont en général assimilables à des droites.

L'utilisation des triangles semblables permet d'écrire la relation suivante

$$\frac{\Delta H_t}{\int_0^t H dt} = \frac{2 \Delta t}{t_{\text{niv. ég.}}^2}$$

- $\Delta t$  est la différence de temps entre les mesures à niveaux égaux et à tube externe plein pour une même hauteur de chute  $H$
- $t_{\text{niv. ég.}}$  est le temps relatif à la mesure du temps nécessaire à la chute simultanée des deux niveaux d'une même hauteur  $H$ .

- Calcul de la perméabilité

L'équation qui sert au calcul de la perméabilité est l'équation 2.

Dans cette équation :

- .  $R_v$  est le rayon du tube dressé (tube gradué) connecté au tube interne
- .  $R_c$  est le rayon du tube interne
- .  $F_f$  est le facteur sans dimension déterminé graphiquement à partir des abaques correspondants (fig. 3.2. - fig. 3.3.).

Ces abaques, construits à partir des mesures effectuées sur des réseaux analogiques de résistances sont de deux types. Le premier abaque (fig. 3.2.) correspond à un terrain sous-jacent imperméable, le second (fig.3.3.) à un terrain sous-jacent beaucoup plus perméable que le sol étudié.

Pour la détermination de  $F_f$ , les mesures de  $d$ , profondeur de pénétration du tube interne dans le sol, et éventuellement de  $D$  (ou  $D_p$ ), distance du fond du trou à la couche imperméable (ou très perméable), sont nécessaires.

Le rapport  $\frac{\Delta H_t}{\int_0^t H dt}$  peut être obtenu de deux manières distinctes :

a) par les graphes de H fonction du temps (fig.3.4.)

Pour un temps  $t$ , la différence  $\Delta H_t$  entre les courbes  $\alpha$  et  $\beta$  est mesurée sur le graphe et l'aire hachurée sous la courbe  $\alpha$  est déterminée.

Le choix de la valeur de  $t$  pour la détermination graphique du rapport

$$\frac{\Delta H_t}{\int_0^t H dt}$$

est réglé par l'hypothèse que l'effet d'une chute de charge dans le tube ITS seul est le même sur l'écoulement dû à l'infiltration, qu'une chute de charge simultanée dans les deux tubes. Cette hypothèse reste valable tant que  $H$  est petit comparé à la hauteur de charge totale. La validité de cette hypothèse peut être vérifiée par l'évaluation du rapport

$$\frac{\Delta H_t}{\int_0^t H dt}$$

pour différentes valeurs de  $t$ .

Si ce rapport, qui devrait être constant varie avec  $t$ , une extrapolation à  $t = 0$  devra être faite pour estimer sa valeur correcte.

b) par le calcul (voir figure 3.5.)

Conformément à la remarque A faite plus haut, l'égalité suivante permet de nous affranchir de la construction d'un graphe.

En effet :

$$\frac{\Delta H_t}{\int_0^t H dt} = \frac{2 \Delta T}{t^2 \text{ niv. eg.}}$$

Pour une chute  $H$  du niveau d'eau dans le tube interne dressé (ITS) il suffit de prendre les temps correspondants à niveaux égaux et à tube dressé externe (OTS) plein et de calculer le rapport  $\frac{2 \Delta t}{t^2 \text{ niv. eg.}}$

Cependant la forme des courbes  $\beta$  à niveaux égaux et des courbes  $\alpha$  à OTS plein, dépend du gradient hydraulique sous le fond du trou. Si ce gradient est bas, la courbe  $\beta$  est presque une droite. La courbe  $\alpha$  coïncide donc avec la précédente pour  $t$  petit mais elle s'en écarte pour  $t$  croissant. Afin d'éliminer l'effet de la différence de courbure entre les deux courbes, le rapport  $\frac{2\Delta t}{t_{\text{niv. eg.}}^2}$  est déterminé pour différentes valeurs de  $H$  et extrapolé à  $H = 0$  pour le calcul de la perméabilité  $K$ .

Que la perméabilité soit mesurée comme il est indiqué en a ou bien en b, la saturation artificielle suffisante du sol sous le fond du trou sera évidente par la coïncidence des déterminations successives de la perméabilité  $K$ .

Pour éliminer les erreurs dues à des variations de la vitesse d'infiltration, un essai avec OTS plein peut être combiné avec la moyenne des valeurs de  $t_{\text{niv. eg.}}$  de deux essais à niveaux égaux ; l'un des essais à niveaux égaux précède et l'autre suit l'essai à OTS plein.

Les détails des opérations pratiques sont exposés dans l'explication technique (3.2. mise en oeuvre). Un certain laps de temps doit séparer les mesures  $\alpha$  et  $\beta$  pour permettre à l'écoulement sous le fond du trou de revenir à des conditions normales. D'autre part, plusieurs séries de mesures  $\alpha$  et  $\beta$  sont nécessaires, jusqu'à ce que le rapport

$$\frac{2 \Delta t}{t_{\text{niv. eg.}}^2}$$

ait atteint une valeur constante.

La saturation artificielle du sol sous le fond du trou peut alors être considérée comme suffisante et la mesure de la perméabilité satisfaisante. Avant d'effectuer toute mesure on peut aussi attendre un certain temps pour permettre une bonne saturation du terrain. Celle-ci doit atteindre au moins une profondeur deux fois supérieure au diamètre du tube externe sous le fond du trou pour permettre une mesure significative de la perméabilité.

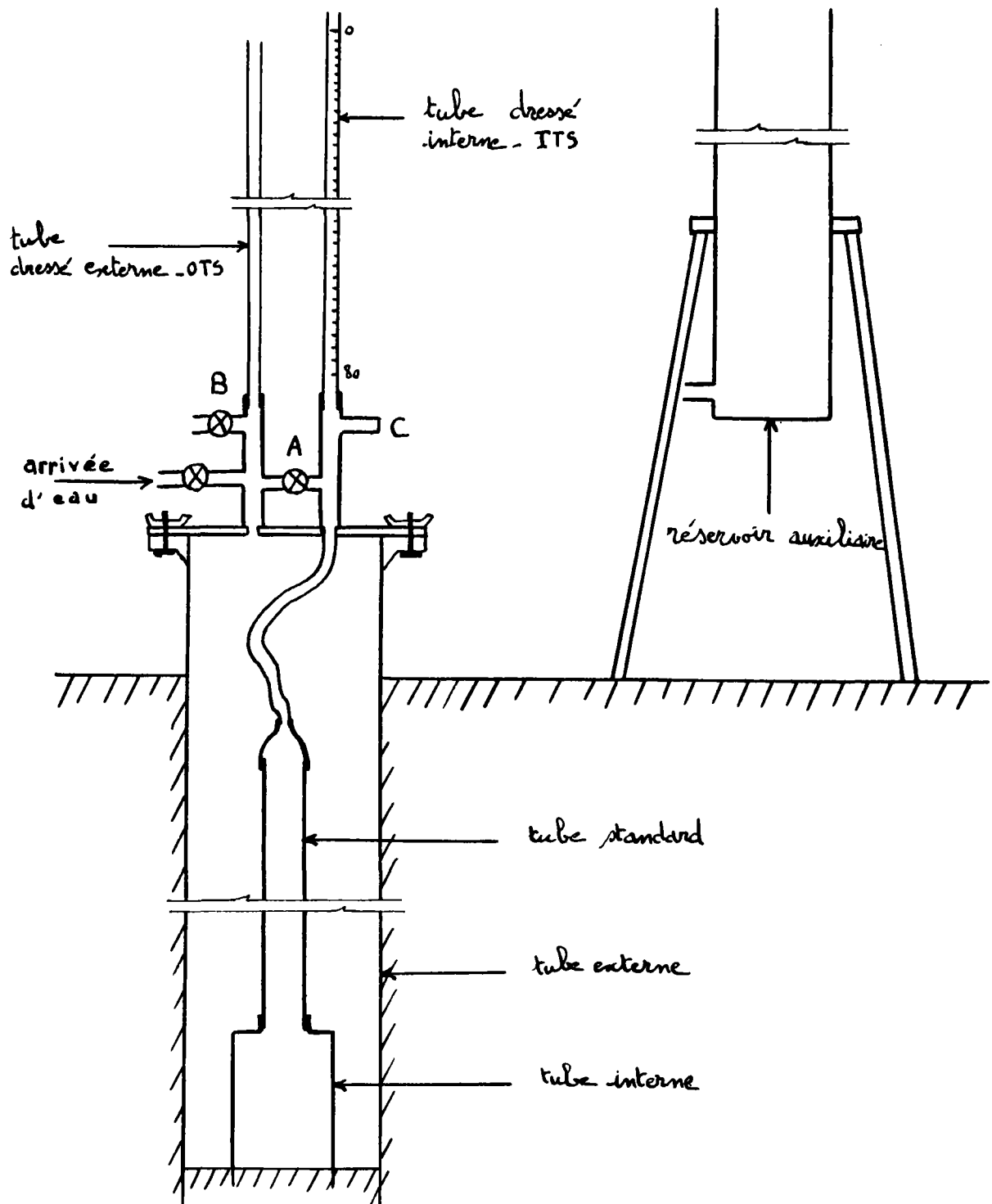
### 3.3. Mise en oeuvre

Les explications et les observations qui vont suivre sont tirées de la publication "Field determination of hydraulic conductivity above a water table with the double-tube method" (H. BOUWER - 1962).

L'équipement sur le terrain, la préparation du trou, l'installation des tubes et l'arrivée d'eau, les mesures à effectuer, y sont exposés d'une manière très détaillée. L'exposé se termine par quelques remarques d'ordre pratique.

#### - L'équipement sur le terrain (fig. 3.6.)

Les expériences de mesure ont été effectuées avec un tube externe de diamètre 8 pouces et un tube interne de diamètre 5 pouces. Le rapport des diamètres des deux tubes (égal à 1,6) est légèrement inférieur au rapport minimum recommandé (1,67).



Équipement des deux tubes pour la mesure de la perméabilité

Figure 3-6

Le rapport théorique 1,67 a été déterminé pour le cas d'une pénétration profonde du tube externe. En réalité, le tube externe ne pénètre dans le fond du trou que de quelques centimètres si bien que l'extension horizontale de l'écoulement dans le sol sous le trou peut dépasser le diamètre du tube externe. C'est pourquoi la légère différence entre le rapport réel et le rapport minimum autorisé ne devrait pas prêter à objection.

Le choix des tubes doit être un compromis entre des considérations de dimensions de la zone de terrain où est effectuée la mesure et de bonne mise en oeuvre de la méthode sur le terrain. Si d'un côté, l'extension de la zone du sol à partir de laquelle est déterminée la perméabilité est directement proportionnelle au diamètre du tube interne, d'un autre côté les grands trous sont plus difficiles à creuser et nécessitent un volume d'eau plus important pour mener à bien les essais.

Le montage est figuré p. 24, fig. 3.6. La partie la plus basse du tube interne est un tuyau d'acier trempé de faible épaisseur dont la partie inférieure est biseautée. Le reste du tube est un tuyau galvanisé de diamètre 2 pouces couplé avec le premier. Ainsi la longueur du tube interne peut être ajustée à la profondeur désirée. Des ailes sont soudées au sommet et à la base du premier et du second tube pour les centrer dans le tube externe. Un flexible, qui ne peut pas se nouer, est connecté entre le tube interne et le tube gradué (ITS) dressé sur la plaque sommitale.

Les tubes dressés (ITS et OTS) sont des tubes de diamètre 1 pouce en plexiglas. Ils sont montés sur des tubes courts soudés à la plaque sommitale en métal qui est boulonnée à un rebord du tube externe. L'étanchéité est obtenue avec une gomme collante placée sur les bords de la plaque.

Le tube dressé (ITS) a une longueur graduée d'environ 80 centimètres. Il est approximativement de 2 cm plus long que l'autre tube (OTS). Ceci permet d'élever le niveau de l'eau dans ITS temporairement au-dessus de la graduation 0 afin de faciliter le départ des mesures de chute du niveau d'eau.

Le sommet du tube OTS (ce tube est gardé plein à ras bord entre les mesures) est placé quelques millimètres en dessous de la marque 0 de ITS pour tenir compte de la hauteur du trop plein.

La manche C, installée près du fond du tube ITS, permet de le connecter à un réservoir auxiliaire de diamètre 4 pouces pour augmenter le diamètre effectif de ITS au cas où il y aurait de grandes vitesses d'infiltration au fond du trou causant une chute trop rapide du niveau d'eau dans ITS. En cas de très petites vitesses d'infiltration, le diamètre effectif de ITS peut être réduit par l'introduction d'une baguette.

Le tube OTS est équipé d'une vanne pour l'arrivée d'eau et d'une vanne B pour ajuster le niveau d'eau dans OTS pendant les mesures à niveaux égaux dans les deux tubes ITS et OTS.

Une vanne A relie les tubes OTS et ITS. Elle est ouverte entre les mesures pour maintenir le niveau d'eau dans ITS à la cote 0, fermé pendant les mesures de vitesse de chute de l'eau dans ITS.

### - La préparation du trou

Les trous sont creusés, avec une foreuse équipée de lames, de façon à obtenir des trous de diamètre 8 pouces. Après forage du trou à la profondeur voulue, le fond du trou est nettoyé et rectifié avec un disque tournant ou un outil, type lame semi-circulaire (fig. 3.7.) fixée à angle droit au manche qui la supporte. Pour les sols meubles, sableux, ce traitement peut suffire et le tube externe peut être installé.

Cependant, pour les sols cohérents, argileux, il est très important d'enlever du fond du trou le sol dont la structure a été perturbée afin d'éviter la formation d'une couche de matériaux peu perméables. Une surface propre, non perturbée au fond du trou, est obtenue avec un outil spécial appelé le nettoie-trou (fig. 3.8.). La partie active de cet outil consiste en un certain nombre de lames d'acier parallèles séparées par des intervalles de 1,2 cm et faisant saillie jusqu'à 1,9 cm du corps principal. Ce corps principal est fait de bois coincé entre les lames d'acier. Les intervalles en bois et les lames sont boulonnés ensemble et reliés à un manche extensible. Le diamètre de l'outil est d'à peu près 5 mm plus grand que le tube externe.

Quand les lames d'acier sont poussées dans le sol humide et cohérent, le sol tend à coller entre les lames et la levée verticale de l'outil produit une cassure propre. Si le sol est sec et dur au fond du trou, un peu d'eau est introduite avant l'utilisation du nettoie trou.

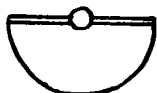
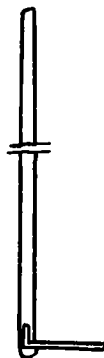
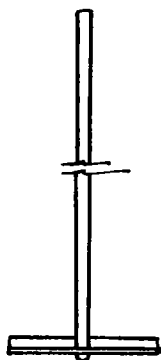
L'opération est répétée jusqu'à ce que la surface de la cassure soit clairement celle du sol non perturbé. L'outil ne doit pas être tourné pour obtenir la cassure désirée, l'arrangement structural du sol en serait modifié. De plus il doit être utilisé manuellement. Des précautions doivent être prises de façon à ce que le nettoie-trou ne soit pas poussé plus profondément que la hauteur des lames afin d'éviter la compaction du sol.

### - Installation des tubes et mise en eau

Après achèvement du trou sec, du sable grossier, est versé au fond du trou de façon à former une couche protectrice de 1 à 2 cm d'épaisseur protégeant les macropores du sol mis à nu. Le tube externe est ensuite placé dans le trou et enfoncé jusqu'au sol original.

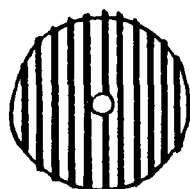
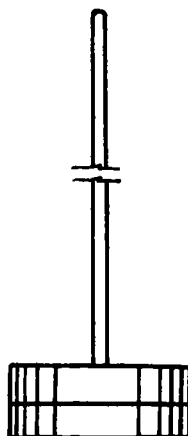
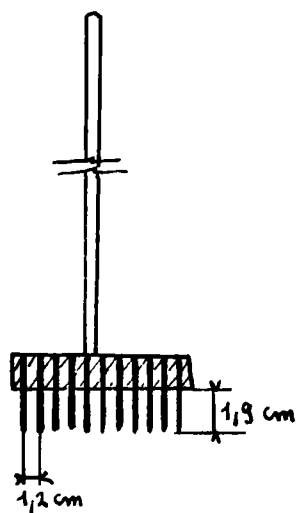
Pour briser l'énergie de l'eau lors de la mise en eau du trou, le tuyau d'arrivée d'eau est muni d'un disque qui repose sur le sable. L'eau est alors amenée jusqu'à remplir le tube externe. Le disque est précautionneusement remonté et le niveau d'eau maintenu au sommet du tube externe.

Peu de temps après le début du remplissage du trou, le tube externe est enfoncé d'approximativement 5 cm au plus sous le fond du trou pour éviter la remontée de l'eau dans le trou en dehors du tube externe. Si des fuites surviennent et que l'eau apparaisse autour du tube externe, il serait prudent de maintenir le niveau d'eau relativement constant à l'extérieur du tube. Un niveau fluctuant affecterait l'écoulement dû à l'infiltration sous le fond du trou, ce qui fausserait les résultats. Après environ une heure pour les sols argileux, moins pour les sols sableux, le tube interne est précautionneusement descendu dans l'eau jusqu'à ce qu'il repose sur la couche de sable. Il est alors poussé d'approximativement 2 cm dans la surface originale du sol.



outil pour nettoyer les trous  
dans les sols sableux

figure 3-7



nettoie-trou pour les sols argileux

figure 3-8

Cette opération devrait être exécutée doucement en utilisant la force musculaire ou un poids mort. La profondeur de pénétration du tube interne devrait être assez petite pour éviter la compaction et une perturbation de la structure du sol. Elle doit cependant être suffisante pour produire une bonne barrière empêchant les fuites latérales.

La profondeur de pénétration  $d$ , du tube interne dans le sol sous le fond du trou, doit être connue pour calculer la perméabilité. Elle peut être déterminée en faisant une marque fixe au-dessus du trou avant d'y verser le sable. La distance de la marque au fond du trou est mesurée. Après introduction du tube interne, la distance du sommet du tube à la marque est à nouveau mesurée. Connaissant la longueur du tube interne,  $d$  peut être calculé.

Les tubes étant en place, la partie flexible du tuyau est connectée au sommet du tube interne. La plaque sommitale est alors fixée, la valve A ouverte et l'arrivée d'eau connectée temporairement à C. Pendant que l'eau sort ainsi de ITS, la plaque est vissée. Quand le tube ITS est rempli d'eau, on change rapidement l'arrivée d'eau de C à la vanne d'arrivée d'eau sur OTS. Cette façon de procéder élimine le danger de soufflage sous le tube interne, dû généralement à des différences de pression excessives entre les tubes interne et externe. Elle évite aussi la formation de bouchons d'air dans le flexible. Cependant pour que les bulles d'air dans le flexible puissent remonter dans le tube interne, le flexible doit être soigneusement enroulé sans courbure vers le bas.

L'arrivée d'eau au tube OTS est maintenue de façon à faire légèrement déborder l'eau au sommet du tube et la vanne A est ouverte pour conserver l'eau dans ITS à la graduation 0. Cette vanne est fermée uniquement pendant les mesures de chute du niveau d'eau dans ITS.

#### - Mesures sur le terrain

Une fois les tubes mis en place et les niveaux d'eau stabilisés au sommet des deux tubes dressés ITS et OTS, les mesures doivent être effectuées de la façon suivante :

- α ) La vanne A est fermée, la vitesse de chute du niveau d'eau dans ITS est mesurée en gardant OTS plein à ras bord. Les mesures peuvent être faites convenablement en ajoutant de l'eau à ITS pour élever son niveau au-dessus de la marque 0. Le signal de départ du chronomètre est donné quand la surface de l'eau passe à la marque 0 et les lectures de temps sont faites aux graduations suivantes, choisies sur l'échelle de 80 cm graduée. Le signal d'arrêt coïncide avec le passage du niveau d'eau devant une marque quelconque (par exemple 20 cm), choisie arbitrairement comme chute maximale du niveau d'eau dans ITS.

De l'eau est alors versée dans ITS pour remettre le niveau d'eau en coïncidence avec la marque 0 et la vanne A est ouverte.

- β ) Après un certain temps d'attente (environ 10 fois le temps de la mesure α ), la vanne A est à nouveau fermée. Les mesures faites en α sont répétées pendant que le niveau d'eau dans OTS est ajusté, grâce à la vanne B, de façon à descendre à la même vitesse que le niveau d'eau dans ITS.

Quand la chute atteint la distance maximale choisie, le chronomètre est arrêté, la vanne B est fermée, ITS et OTS sont remplis.

Un laps de temps suffisant doit être pris entre les mesures  $\alpha$  et  $\beta$  pour permettre à l'écoulement sous le fond du trou de revenir à des conditions normales. A partir de l'expérience déjà acquise, on doit tenir compte d'au moins dix fois plus de temps entre les mesures que pour les exécuter. Ainsi, si la durée des mesures  $\alpha$  est de 2 minutes, il faudra attendre 20 minutes avant de commencer les mesures suivantes  $\beta$ .

La chute maximale du niveau d'eau dans ITS avant la remontée à des conditions normales (ITS et OTS pleins) devrait être choisie assez grande pour permettre les mesures de  $\Delta H_t$  mais aussi assez petite pour éviter de longues périodes de mesure. Une distance de 20 à 50 cm pour la chute maximale du niveau d'eau dans ITS semble satisfaire un certain nombre de conditions.

Les tableaux de mesure pourront être calqués sur le modèle suivant :

tableau des mesures Figure 3-9

H en cm	$\beta_1$ $t_1$ en s.	$\alpha_1$ $t'_1$ en s.	$\beta_2$ $t_2$ en s.	$\alpha_2$ $t'_2$ en s.	$\beta_3$ $t_3$ en s.	$\alpha_3$ $t'_3$ en s.	$\beta_4$ $t_4$ en s.
0	heure :	heure :	heure :	heure :	heure :	heure :	heure :
5							
10							
15							
20							
25							
30							

tableau des premiers calculs      Figure 3-10

$H$ $m$	0	5	10	15	20	25	30
$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$							
$\Delta t = t'_1 - t_m$							
$\frac{2 \Delta t}{t'_1}$							
$t_m = \frac{t_2 + t_3}{2}$							
$\Delta t = t'_2 - t_m$							
$\frac{2 \Delta t}{t'_2}$							

### 3.4. Critique et extension de la méthode

#### 3.4.1. Intérêts et critiques de la méthode des deux tubes

L'intérêt de cette méthode consiste en son application aussi bien superficielle que plus profonde, éventuellement dans un puits. De plus elle ne fait pas dépendre la mesure de la perméabilité, des conditions dans lesquelles se fait l'écoulement (conditions aux limites, influence des caractéristiques du sol non saturé), conditions qui sont difficiles à déterminer. Cependant certaines précautions doivent être prises pour la préparation du fond du trou, la pose des tubes et le remplissage avec l'eau. Ces précautions visent toutes à ne pas perturber la structure du sol au fond du puits afin que la mesure de la perméabilité soit la plus exacte possible.

Toutes les précautions nécessaires ayant été prises, la méthode des deux tubes permet dans la plupart des cas une mesure de la perméabilité verticale d'un sol au voisinage du fond du trou. La zone de sol où s'effectue la mesure ne dépasse pas une profondeur égale au diamètre du tube interne et une largeur de même dimension. Elle nécessite en outre une préparation minutieuse et un volume d'eau suffisant pour saturer le sol et y effectuer les mesures.

Pour les sols isotropes, la plus grande partie de la charge disponible, à partir de laquelle est déterminée la perméabilité, est dissipée dans la direction verticale. Cependant des parties de lignes de courant sont aussi dirigées dans une direction horizontale. Ainsi, la perméabilité mesurée avec la méthode de BOUWER est-elle affectée par les deux perméabilités verticale et horizontale. Dans le cas extrême où l'une ou l'autre de ces deux perméabilités est nulle, la valeur obtenue est également nulle, sans tenir compte de la valeur de la perméabilité dans l'autre direction, aussi grande soit-elle. Pour pallier cet inconvénient, BOUWER a étendu l'application de la méthode des deux tubes aux sols anisotropes.

#### 3.4.2. Extension de la méthode des deux tubes aux terrains anisotropes

##### - Introduction

En pratique, l'anisotropie d'un sol semble être la règle générale plutôt que l'exception. L'exposé qui va suivre décrit comment la méthode des deux tubes peut être appliquée au cas d'un sol homogène mais anisotrope. Il sera supposé que les directions principales de l'anisotropie coïncident avec les directions horizontale et verticale.

Le principe de la mesure est basé sur la manipulation de la direction d'écoulement dans une zone artificiellement saturée sous le fond du trou. Des piézomètres sont utilisés pour mesurer le gradient hydraulique vertical et, connaissant la vitesse d'infiltration, la perméabilité verticale peut être calculée. En transformant le milieu en un milieu équivalent isotrope, la relation entre les rapports  $K_{dt} / K_v$  et  $K_h / K_v$  peut être déterminée et exprimée graphiquement. Ainsi, connaissant la perméabilité globale  $K_{dt}$  et la perméabilité verticale  $K_v$ , la perméabilité horizontale  $K_H$  peut être évaluée à partir de ce graphe.

- Principe de la méthode

En appliquant la loi de DARCY dans un milieu homogène, la méthode du double tube peut être adaptée en transformant le sol anisotrope en un sol isotrope équivalent de perméabilité  $\sqrt{K_h K_v}$ . Il suffit de multiplier les dimensions verticales par le rapport  $\sqrt{K_h / K_v}$ . Les différents paramètres sont alors transformés de la manière suivante :

$R_c$	donne	$\bar{R}_c = R_c$
$d$	donne	$\bar{d} = d \sqrt{K_h / K_v}$
$D$ (ou $D_p$ )	donne	$\bar{D} = D \sqrt{K_h / K_v}$
		$\bar{K} = \sqrt{K_h K_v}$
$F_f$	donne	$\bar{F}_f$ pour $\bar{d}/\bar{R}_c$

Le terme  $\sqrt{K_h / K_v}$  n'est pas connu initialement si bien que  $\bar{F}_f$  ne peut être déterminé. La perméabilité apparente calculée avec l'une des deux équations du double tube sur les bases d'une isotropie supposée sera désignée par  $K_{dt}$ .  $K_{dt}$  est donc la perméabilité obtenue quand  $F_f$  est évalué par le rapport  $d/R_c$ .

Les valeurs de  $R_c$ ,  $R_v$ ,  $H$  et  $t$  ne sont pas affectées par la transformation du milieu anisotrope en un milieu isotrope équivalent.

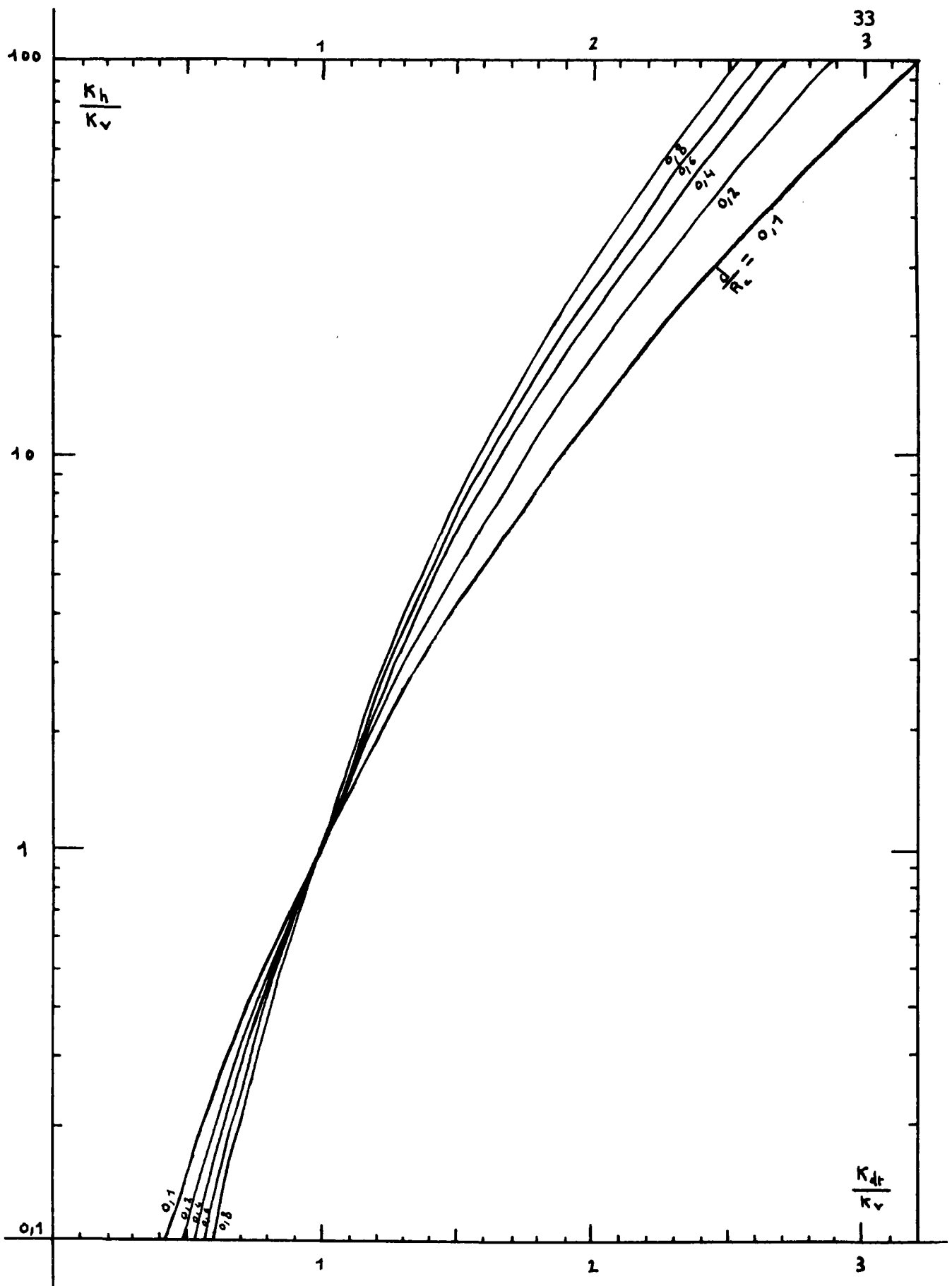
De l'équation  $K = \frac{R_v^2}{F_f R_c} \frac{\Delta H_t}{\int_0^t H dt}$  on en déduit la relation :

$$\boxed{\frac{K_{dt}}{\bar{K}} = \frac{\bar{F}_f}{F_f}} \dots\dots\dots 1$$

Or  $\boxed{\bar{K} = \sqrt{K_h K_v}} \dots\dots\dots 2$

Il vient donc  $\boxed{\frac{K_{dt}}{K_v} = \frac{\bar{F}_f}{F_f} \sqrt{\frac{K_h}{K_v}}}$   $\dots\dots\dots 3$

Des graphes (fig. 3.11) donnant les valeurs de  $\frac{K_h}{K_v}$  en fonction de  $\frac{K_{dt}}{K_v}$  pour différentes valeurs de  $d/R_c$  ont été construits en prenant une valeur de  $d/R_c$  et en calculant  $\bar{d} / \bar{R}_c$  pour un certain nombre de valeurs de  $K_h/K_v$ .



Graphique donnant les variations de  $K_h/K_v$  en fonction de  $K_{dE}/K_v$  pour différentes valeurs de  $d/R_e$

Figure 3 - 11

Les facteurs d'écoulement pour  $d/R_c$  et  $\bar{d}/\bar{R}_c$  ont été évalués à partir du graphe de  $F_f$  (fig. 3.2. pour  $D$  infini ( $D$  ou  $D_p$  plus grand que  $2 R_c$ ), après quoi  $K_{dt}/K_v$  a été calculé avec l'équation 3. Ce procédé a été ensuite répété pour d'autres valeurs de  $d/R_c$  afin d'obtenir les cinq courbes représentées sur la fig. 3.11.

Le principe de l'évaluation de la perméabilité horizontale et de la perméabilité verticale par la méthode des deux tubes consiste donc à obtenir, en plus de  $K_v$  déterminé par la méthode conventionnelle, une mesure de  $K_v$ . Le rapport  $K_{dt}/K_v$  est calculé et  $K_h/K_v$  déterminé à partir du graphe (3.11.) pour la valeur de  $d/R_c$  correspondante.  $K_v$  étant connu,  $K_h$  peut être calculé.

#### - Mesure de la perméabilité verticale $K_v$

L'appareillage utilisé est analogue au dispositif déjà décrit dans la partie technique (2ème partie). Il comprend, en plus, 3 piézomètres (voir fig. 3.12). Si les niveaux dans les deux tubes dressés ITS et OTS sont égaux, l'écoulement dans le sol sous le tube interne peut être considéré comme vertical en direction jusqu'à une certaine distance du fond du trou.  $K_v$  peut donc être déterminé à partir de la mesure de la vitesse d'infiltration et du gradient hydraulique. Ce gradient hydraulique vertical  $dh/dz$  est mesuré, graphe (3.13), à l'aide de piézomètres pénétrant dans le sol au fond du trou à l'intérieur du tube interne. Le terme  $h$  représente le niveau piézométrique au-dessus d'un plan de référence arbitraire. Le terme  $z$  est la profondeur de pénétration du piézomètre dans le sol sous le fond du trou. Puisque les lignes de courant divergent assez rapidement en profondeur,  $z$  devra être pris assez petit (au maximum 10 centimètres). La vitesse d'infiltration est déterminée graphiquement à partir de la pente de la courbe  $H = f(t)$  à niveaux égaux pour  $H = 0$ . En appelant :

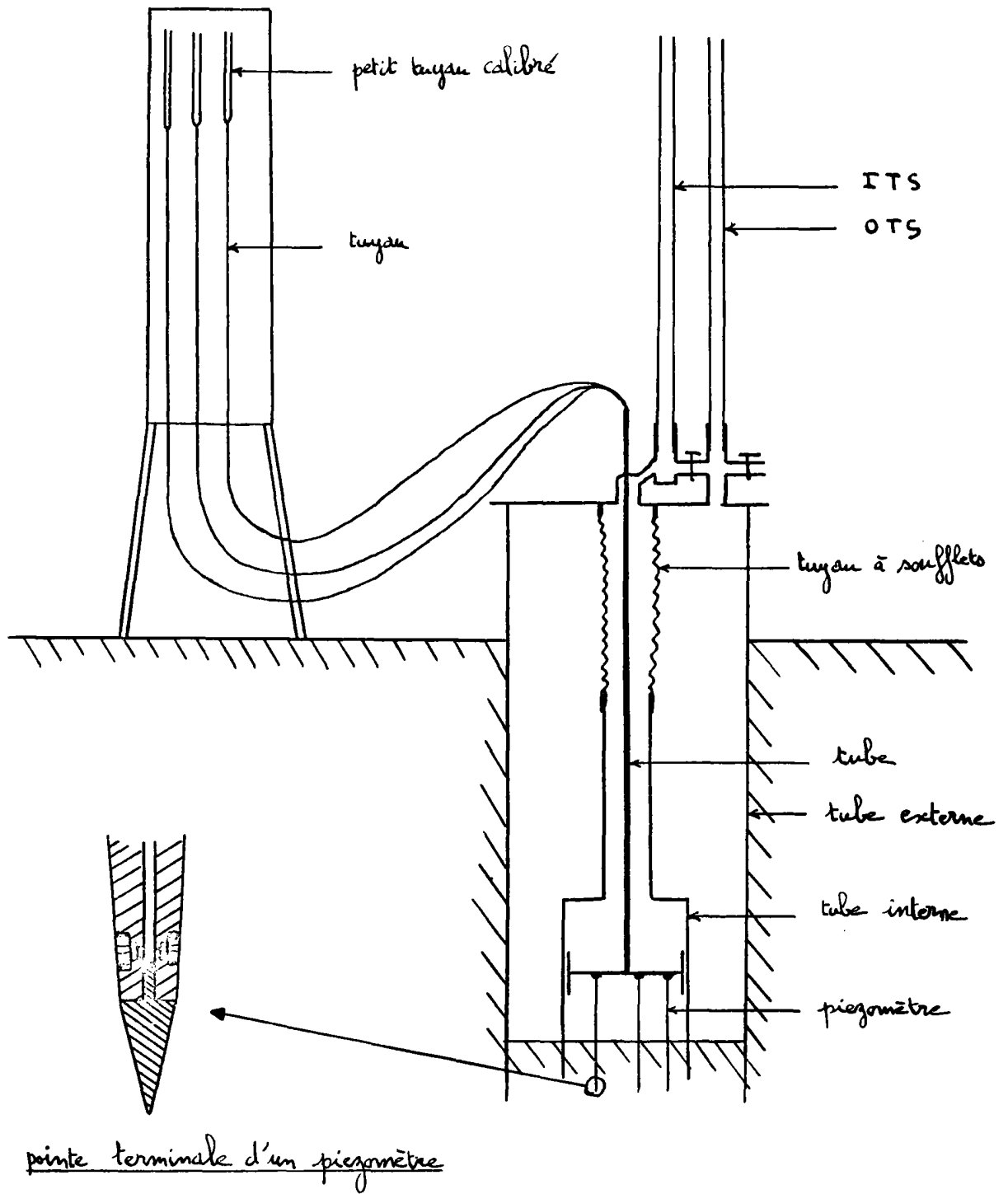
$$\left( \frac{dH}{dt} \right)_{H=0}$$

cette pente,  $K_v$  est calculé comme suit :

$$K_v = - \frac{R_v^2}{R_c^2} \left( \frac{dH}{dt} \right)_{H=0} \left( \frac{dh}{dz} \right)^{-1}$$

#### - Mise en oeuvre pratique

Les piézomètres utilisés dans l'évaluation de  $K_v$  étaient longs de 12 centimètres, de diamètre 6 mm, terminés par un cône de hauteur 3 mm (fig. 3.12). Ils étaient montés symétriquement sur un disque en laiton muni d'un manche servant de guide à l'intérieur du tube interne. La position du disque et des piézomètres a été contrôlée grâce à ce manche qui se prolonge au-dessus de la plaque sommitale. Les piézomètres ont été reliés à des tubes manométriques par des flexibles d'1/4 de pouce. Afin d'obtenir de bonnes mesures des niveaux piézométriques, des tubes de petit calibre ont été utilisés comme tubes manométriques. Ils peuvent être levés ou abaissés pour une détection rapide du niveau d'équilibre.



Équipement des deux tubes pour la mesure  
de la perméabilité verticale

Figure 3-12

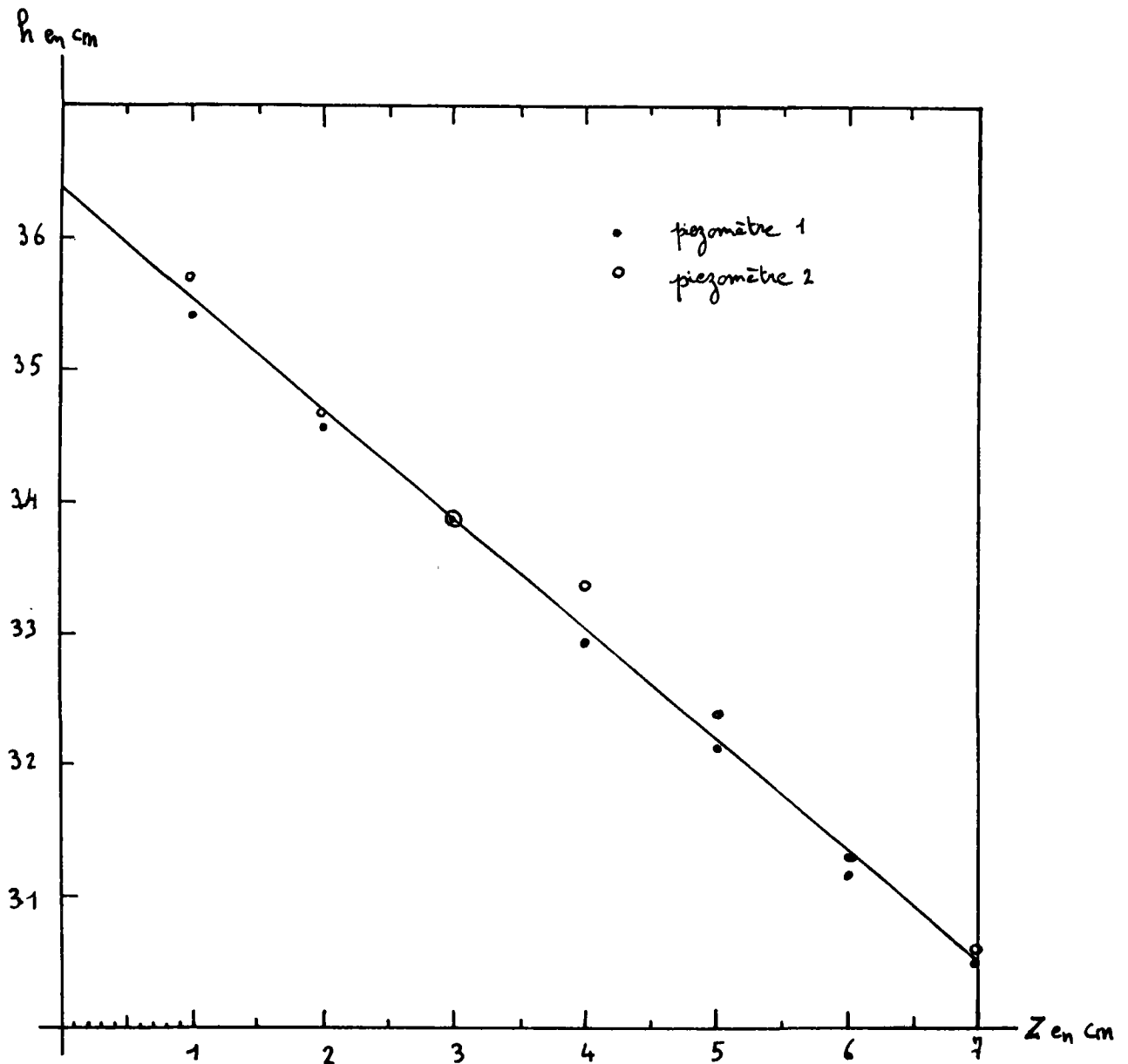
Ce dispositif a donné des résultats satisfaisants dans les sols sableux et les silts. Pour les sols argileux, d'autres dispositifs, type membranes, sensibles aux différences de pression, peuvent être nécessaires.

La vitesse d'infiltration au fond du trou devrait être constante pendant les mesures de  $h$  et de  $z$  avec les piézomètres. En pratique ce n'est pas le cas. Il est donc nécessaire de faire plusieurs séries de mesures de chute à niveaux égaux dans les deux tubes ITS et OTS pour obtenir un enregistrement de  $(dh/dt)_{H=0}$  en fonction du temps, pendant les mesures piézométriques. De cette façon, les hauteurs piézométriques  $h$  pourront être corrigées pour une même vitesse d'infiltration. Après chaque lecture des niveaux piézométriques, la profondeur des piézomètres pourrait être augmentée à chaque fois de 2 cm. Les résultats font ensuite l'objet d'un graphe (fig. 3.13).

- Discussion et limites de la méthode pour la mesure de  $dh/dz$

La figure 3.11 montre que le rapport  $K_{dt}/K_v$  varie approximativement de 0,5 à 2,7 quand le rapport  $K_h/K_v$  varie de 0,1 à 100. De petites variations de  $K_{dt}/K_v$  ont donc un effet considérable sur l'évaluation de  $K_h/K_v$ . Le rapport  $K_{dt}/K_v$  doit donc être déterminé le plus exactement possible par des essais répétés. Cette remarque limite l'intérêt de la méthode surtout si  $K_h$  est grand devant  $K_v$ . La mesure de l'anisotropie du sol serait considérablement améliorée si, au lieu de  $K_v$ , on pouvait mesurer  $K_h$ . Cependant, obtenir par la méthode des deux tubes une mesure de  $K_h$ , semble beaucoup plus difficile qu'obtenir une mesure de  $K_v$ .

Trois autres approches de la mesure de l'anisotropie par la méthode des deux tubes ont été envisagées par BOUWER mais aucune d'entre elles ne semble donner satisfaction. Bien que peu précise, la méthode exposée ci-dessus a au moins pour mérite de donner un ordre de grandeur de l'anisotropie et une valeur assez exacte de la perméabilité verticale.



Graphique de  $h$  fonction de  $z$  pour un essai  
dans un sol sableux homogène

figure 3 - 13

BIBLIOGRAPHIE1. ESSAIS PAR INFILTRATION DANS UN PUIT A FAIBLE PROFONDEUR

LUTHIN J.N. (1966)

Drainage engineering

JOHN WILEY &amp; SONS, I.N.C., pp. 142 - 146

NASBERG V.M. (1951)

La question de filtration dans les terrains secs

Communication à l'Académie des Sciences d'U.R.S.S. (Septembre)

TERLETSKATA M.N. (1954)

Détermination de la perméabilité dans les terrains secs

Construction hydroélectrique - n° 2 - Février - Moscou

WINGER R.J. (1960)

In place permeability tests and their use in subsurface drainage

Int comm. of irrigation and drainage - Madrid

2. ESSAIS PAR INFILTRATION DANS UNE TRANCHEE OU UN FOSSE

LUTHIN J.N. (1966)

Drainage engineering

JOHN WILEY &amp; SONS, I.N.C. p. 146

MATSUO - AKAI (1958)

Communication du Troisième congrès international de mécanique des sols  
Zurich

MUSKAT M. (1937)

The flow of homogeneous fluids through porous media

EDWARDS Inc. Ann. Arbor - Michigan

Ninth International Course on land drainage - Wageningen - The Netherlands  
1970 - W.1. - Working group on groundwater flow - chapter W.1.1.

PAVLOVSKII (1956)

Motion of ground water

Moscow Leningrad, Isdat Akad Nauk S.S.S.R., 771 p.  
(Collected works, vol. 2) (In Russian)

POLUBARINOVA-KOCHINA P.Ya (1962)

Theory of groundwater movement

Translated from the Russian by R. J.M. DE WIEST - Princeton - Univ.  
Press Princeton

RIZENKAMPF B.K. (1940)

Hydraulics of ground water

Sci. papers of Univ. of Saratov, vol. 15, n° 5 (In Russian)

VEDERNIKOV V.V.

Seepage from channel - Moscow Gosstroüzdat (1934)

Seepage theory and its application in irrigation and drainage

Moscow Gosizdat (1939) (In Russian)

### 3. ESSAIS PAR SATURATION ARTIFICIELLE DU TERRAIN NON SATURE

BOWER H. (1961)

A double tube method for measuring hydraulic conductivity of soil in situ above a water table

Soil. Sci. Soc. Am. Proc. 25 - 334 - 339

BOWER H. (1962)

Field determination of hydraulic conductivity above a water table with the double tube method

Soil. Sci. Soc. Am. Proc. 26 - 330 - 335

BOWER H. (1964)

Simplified procedure for calculation of hydraulic conductivity with the double tube method

Soil. Sci. Soc. Am. Proc. 28 - 133 - 134

BOWER H. (1964)

Measuring horizontal and vertical hydraulic conductivity of soil with the double tube method

Soil. Sci. Soc. Am. Proc. 28 - 19 - 23

COMPTE RENDU DES ESSAIS EFFECTUES AU B.R.G.M.  
D'ORLEANS LA SOURCE

---

SOMMAIRE

1. RENSEIGNEMENTS D'ORDRE GEOLOGIQUE SUR LES FORMATIONS SUPERFICIELLES
  
2. ESSAIS PAR INFILTRATION DANS UN PUIT A FAIBLE PROFONDEUR
  - 2.1. Mise en oeuvre
  - 2.2. Mesures
  - 2.3. Calcul de la perméabilité
    - 2.3.1. Calcul des débits
    - 2.3.2. Méthode de NASBERG TERLETSKATA
    - 2.3.3. Méthode de WINGER
  - 2.4. Calcul d'erreur
    - 2.4.1. Erreurs relatives sur les mesures
    - 2.4.2. Erreurs absolues sur la perméabilité K
  
3. ESSAIS D'INFILTRATION DANS UNE TRANCHEE
  - 3.1. Mise en oeuvre
    - 3.1.1. Forme de la tranchée
    - 3.1.2. Mise en eau du fossé
    - 3.1.3. Mesures
  - 3.2. Calcul de la perméabilité K
    - 3.2.1. Méthode de MATSUO
    - 3.2.2. Méthode dite de MUSKAT
  - 3.3. Calcul d'erreur
  - 3.4. Conclusion
  
4. ESSAIS PAR LA METHODE DES DEUX TUBES
  - 4.1. Mise en oeuvre
  - 4.2. Mesures
  - 4.3. Calcul de la perméabilité
    - 4.3.1. Détermination du rapport  $\frac{2 \Delta t}{t_{\text{niv.eg.}}}$
    - 4.3.2. Détermination du facteur  $F_f \frac{R^2}{v}$
    - 4.3.3. Détermination du rapport  $\frac{R}{c}$
    - 4.3.4. Résultats

#### 4.4. Calculs d'erreurs

4.4.1. Erreur relative sur le rapport  $\frac{2 \Delta t}{t^2} = r$   
niv.eg.

4.4.2. Erreur relative sur le facteur d'écoulement  $\frac{F}{f}$

4.4.3. Erreur relative sur  $R_v$  et  $R_c$

4.4.4. Conclusion à propos du calcul d'erreurs

4.5. Conclusion à propos des essais par la méthode des deux tubes

#### 5. CONCLUSION GENERALE

## 1. RENSEIGNEMENTS D'ORDRE GEOLOGIQUE SUR LES FORMATIONS SUPERFICIELLES

Les essais ont été effectués sur une aire expérimentale située près des bâtiments du B.R.G.M. à Orléans la Source.

La coupe schématique (fig. I) des formations superficielles va permettre de mieux localiser les zones du sol intéressées par les différentes mesures de perméabilité.

## 2. ESSAIS PAR INFILTRATION DANS UN PUITTS A FAIBLE PROFONDEUR

### 2.1. Mise en oeuvre (fig. II-1)

Un trou de 2 m de profondeur a été creusé à l'aide d'une tarière de 4,5 cm de diamètre. La profondeur du petit puits ainsi foré a été choisie de façon à ce que la condition de NASBERG - TERLETSKATA ( $\frac{h}{d} > 25$ ) soit respectée et de façon à permettre la comparaison des mesures par les différentes méthodes.

Dans ce trou, on introduit un tuyau en plastique qui empêche l'éboulement des parois du puits. Le tuyau a été crépiné sur une longueur de 1,50 m.

Afin de maintenir le niveau de l'eau dans le puits à la hauteur choisie, on utilise une sonde électrique. Les débits sont mesurés en observant la chute du niveau d'eau dans un seau calibré de capacité 20 litres, relié au trou par un tube en caoutchouc. Une petite pince à vis permet de régler à volonté le débit d'arrivée d'eau dans le trou.

### 2.2. Mesures

#### a) Première série de mesures - h = 1,40 m

Le niveau d'eau dans le puits est maintenu à la hauteur  $h = 1,40$  m. En fait ce niveau a sans cesse tendance à bouger. Il faut donc, pendant toute la durée des mesures, qu'un observateur attentif fasse varier le débit d'arrivée d'eau pour que le niveau d'eau n'oscille que faiblement autour de la valeur choisie.

Dans le tableau fig. II-2 sont consignées les mesures de temps  $t$  et de niveau d'eau  $h'$  dans le seau. Une mesure de  $h'$  est prise toutes les 30 secondes. Quand le niveau d'eau  $h'$  a trop baissé, il devient nécessaire de rajouter de l'eau dans le seau. Les petits traits hachurés indiquent entre quelles mesures on a ajouté l'eau.

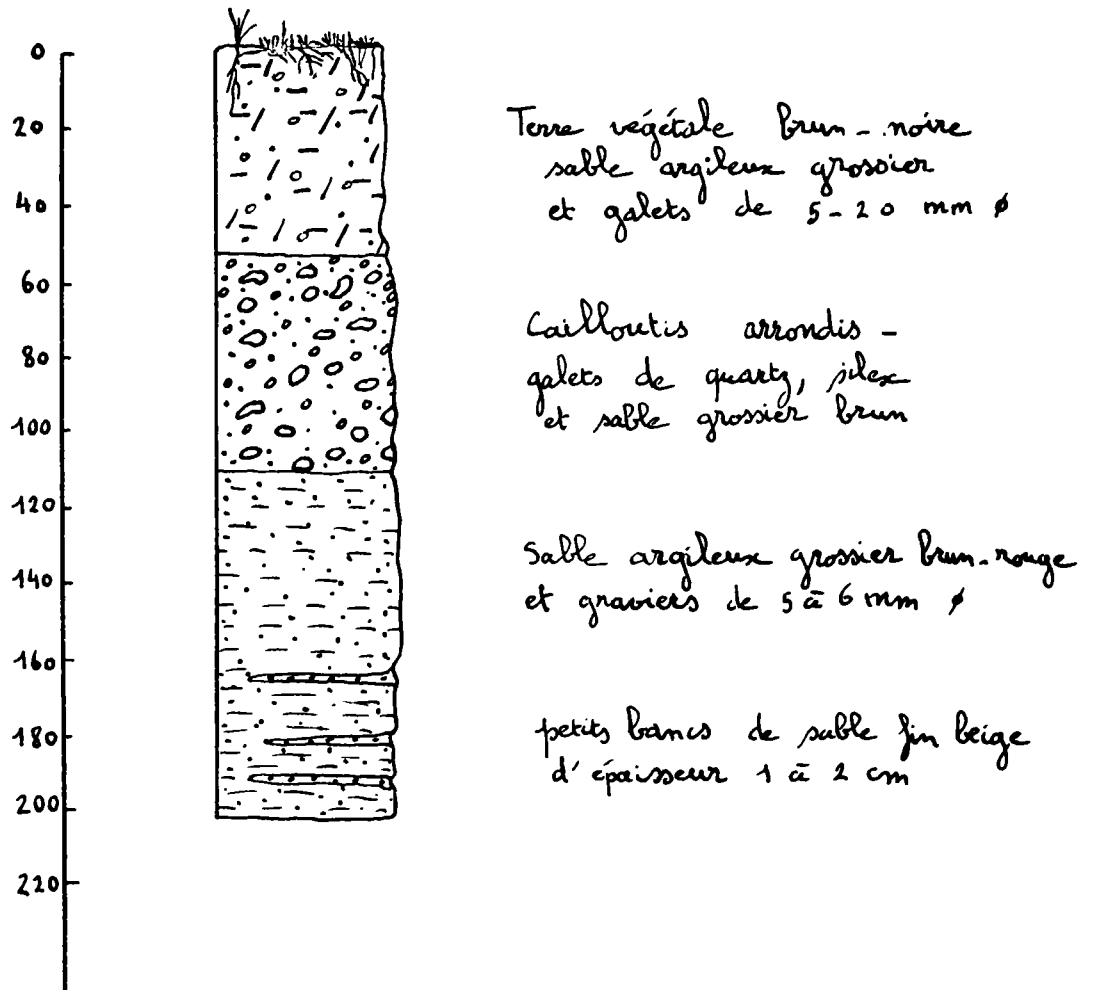
Nous désignerons par :

$h'_1$  la hauteur initiale du niveau d'eau dans le seau

$h'_2$  la hauteur finale du niveau d'eau dans le seau

La hauteur finale est la hauteur d'eau pour laquelle il devient nécessaire de rajouter de l'eau dans le seau.

## Log des formations superficielles



échelle des profondeurs  
en centimètres

Figure I

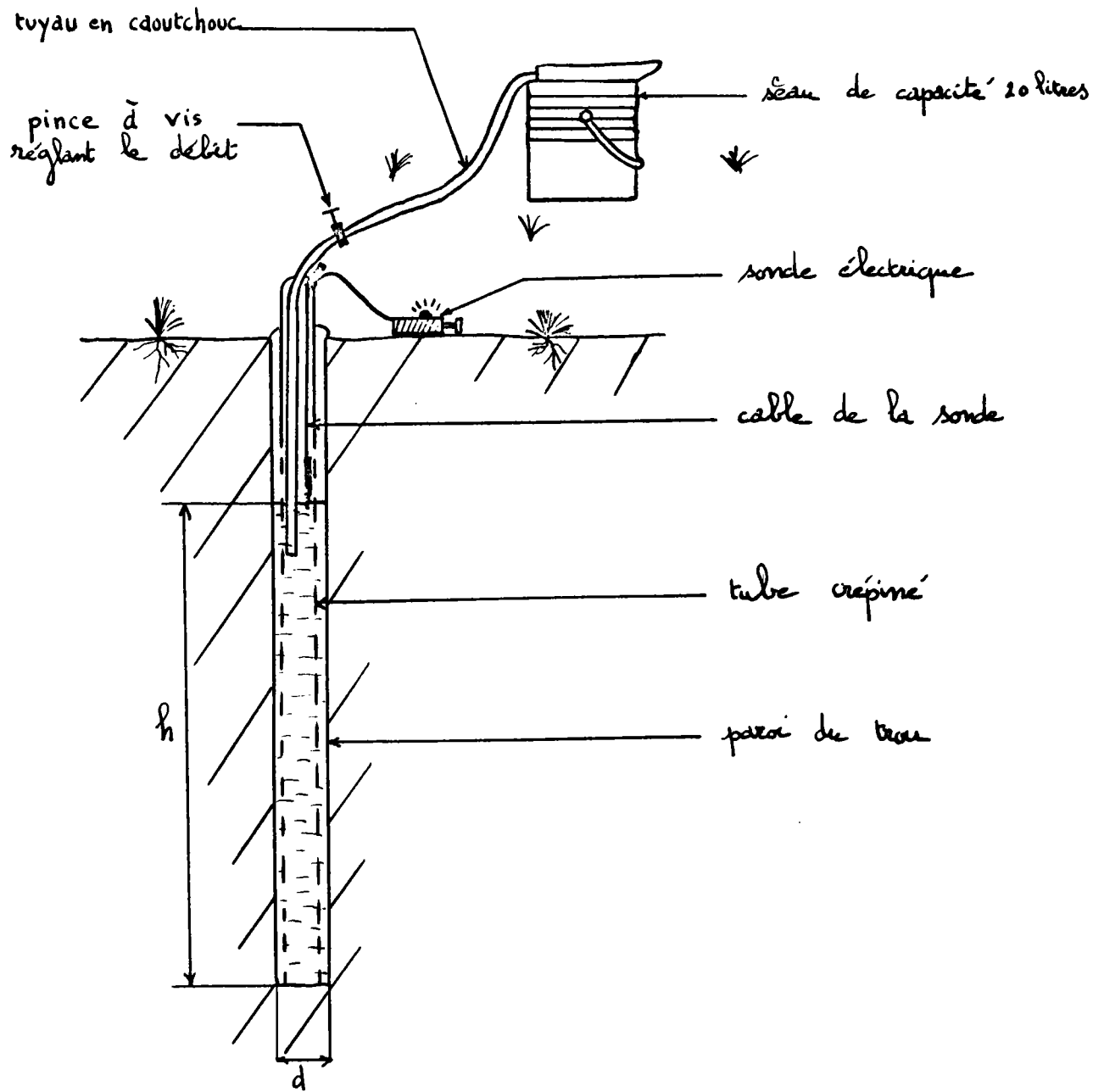


schéma de l'installation

figure I-1

b) Seconde série de mesures - h = 1,30 m

Les mesures correspondantes ont été reportées sur le tableau fig. II-3.

Remarques

Pour que la mesure de la perméabilité soit significative, il faut attendre que le débit d'infiltration dans le sol soit constant. Plusieurs séries de mesures ont donc été effectuées avant que le débit d'infiltration se stabilise et deux séries seulement ont été retenues.

2.3. Calcul de la perméabilité

Avant d'effectuer tout calcul, il faut essayer de savoir dans quelle condition nous sommes placés. Pour notre gouverne, nous supposons le terrain homogène et isotrope sur une profondeur suffisante ( $Tu \geq 3h$  - voir l'exposé théorique de la méthode). Cette supposition semble justifiée par les renseignements que nous avons pu obtenir. La nappe phréatique se situe en effet à environ 10 mètres de profondeur et le sol reste sableux jusqu'à cette profondeur. Nous opterons donc pour le cas I de WINGER c'est-à-dire la nappe phréatique où la couche imperméable située à une distance suffisante du fond du trou.

2.3.1. Calcul des débits

Sachant que le seau est cylindrique, qu'à une profondeur de 30 cm correspond un volume de 20 litres, il est facile d'en déduire les valeurs suivantes du débit.

A/ h = 1,40 m

Trois valeurs du débit peuvent être calculées à partir des mesures effectuées :

$$\left. \begin{array}{l} h'_1 = 27,3 \text{ cm} \\ h'_2 = 16,8 \text{ cm} \end{array} \right\} \begin{array}{l} t_1 = 0 \\ t_2 = 3'30'' = 210 \text{ s} \end{array}$$

$$Q = \frac{(h'_1 - h'_2) 20 \cdot 10^{-3}}{30} \frac{1}{t_2 - t_1}$$

$$Q_1 = \frac{10,5 \times 20 \times 10^{-3}}{30 \times 210} = \underline{\underline{3,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}}$$

a       $h = 1,40 \text{ m}$

tableau des mesures      figure II-2

t en mn.cts.	0	30"	1'	1'30"	2'	2'30"	3'	3'30"	4'
h' en cm	27,3	25,8	24,3	22,8	21,2	19,7	18,3	16,8	29,8
t en mn.cts.	4'30"	5'	5'30"	6'	6'30"	7'	7'30"	8'	8'30"
h' en cm	28,3	26,8	25,3	24,8	22,3	20,7	19,2	17,7	28
t en mn.cts.	9'	9'30"	10'	t : temps h' : hauteur d'eau dans le sèdu					
h' en cm	26,5	25	23,5						

b       $h = 1,30 \text{ m}$

tableau des mesures      figure II-3

t en mn.cts.	0	30"	1'	1'30"	2'	2'30"	3'	3'30"	4'
h' en cm	28,5	27,3	26,1	25	23,8	22,5	21,3	20,1	18,9
t en mn.cts.	4'30"	5'	5'30"	6'	6'30"	7'	7'30"	8'	8'30"
h' en cm.	17,7	16,5	29,8	28,6	27,3	26,1	24,9	23,6	22,3
t en mn.cts.	9'	9'30"	10'						
h' en cm	21	19,9	18,6						

De même :

$$\underline{Q_2 = 3,36 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$\underline{Q_3 = 3,33 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}}$$

On prendra pour le calcul de la perméabilité, la moyenne des valeurs  $Q_1$ ,  $Q_2$ , et  $Q_3$  soit :

$$Q = 3,34 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

B/  $h = 1,30 \text{ m}$

Deux valeurs du débit ont été calculées :

$$Q = \frac{12 \times 20 \times 10^{-3}}{30 \times 300} = 2,67 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = \frac{11,2 \times 20 \times 10^{-3}}{30 \times 270} = 2,76 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Pour le calcul de la perméabilité nous prendrons le débit moyen  $Q = 2,71 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

### 2.3.2. Méthode de NASBERG-TERLETSKATA

$$K = \frac{0,423}{h^2} Q \log_{10} \frac{4 h}{D}$$

A/  $h = 1,40 \text{ m}$

$d = 4,5 \text{ cm}$

$Q = 3,34 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$

$$\frac{h}{d} = \frac{140}{4,5} \approx 31$$

$\frac{h}{d} > 25$  la méthode de NASBERG TERLETSKATA est donc applicable :

$$K = \frac{0,423}{(1,40)^2} 3,34 \times 10^{-5} \log \frac{4 \times 1,40}{4,5 \cdot 10^{-2}}$$

$$\underline{\underline{K = \frac{0,423 \times 3,34 \times 10^{-5} \times 4,82}{(1,4)^2 \times 2,3} = 1,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}}}$$

$$B/ \quad h = 1,30 \text{ m}$$

$$d = 4,5 \text{ cm}$$

$$Q = 2,71 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\frac{h}{d} = \frac{130}{4,5} \approx 29$$

$$K = \frac{0,423 \times 2,71 \times 10^{-5} \times \log 116}{(1,3)^2} = \underline{1,47 \times 10^{-5} \text{ m/s}}$$

### 2.3.3. Méthode de WINGER

$$A/ \quad h = 1,40 \text{ m} = \frac{1,40}{0,3048} = 4,6 \text{ pieds}$$

$$r = \frac{d}{2} = \frac{4,5}{2 \times 30,48} = 0,074 \text{ pieds}$$

$$\frac{h}{r} = 62,2$$

$$Q = \frac{3,34 \times 10^{-5} \times 60}{(0,3048)^3} = 7,08 \times 10^{-2} \text{ pied cube/minute}$$

L'abaque fig. II-4 permet de donner la valeur suivante de la perméabilité :

$$K = 1,5 \text{ pouce/heure} = \frac{1,5 \times 0,0254}{3 \ 600} = \underline{1 \times 10^{-5} \text{ m/s}}$$

$$B/ \quad h = 1,30 \text{ m} = 4,26 \text{ pieds}$$

$$r = 0,074 \text{ pieds}$$

$$\frac{h}{r} = 57,7$$

$$Q = 5,75 \times 10^{-2} \text{ pied cube/minute}$$

L'abaque fig. II-4 permet de donner la valeur suivante de la perméabilité :

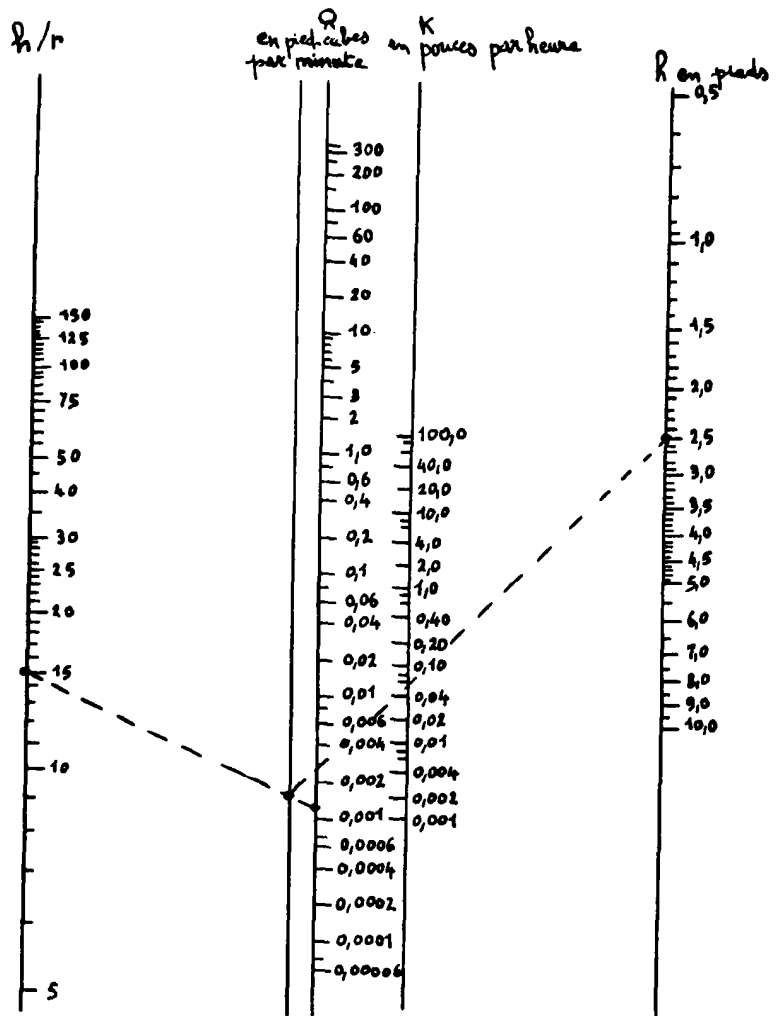
$$K = 1,5 \text{ pouce/heure} = \underline{1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}}$$

## 2.4. Calcul d'erreur

### 2.4.1. Erreurs relatives sur les mesures

La hauteur d'eau est appréciée au millimètre dans le seau et le temps est apprécié à la seconde. Il vient donc :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta(h_1' - h_2')}{h_1' - h_2'} + \frac{\Delta t}{t}$$



$$T_u \geq 3h$$

$$K = \frac{720 R \left[ \log_e \left( \frac{R}{r} + \sqrt{\left( \frac{R}{r} \right)^2 - 1} \right) - 1 \right]}{2 R R^2}$$

Abaque I pour déterminer la perméabilité par infiltration dans un puits à faible profondeur (WINGER)

FIGURE 11-4

$$\Delta (h'_1 - h'_2) = \Delta h'_1 + \Delta h'_2$$

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{2}{105} + \frac{1}{120} = \underline{0,03}$$

D'autre part :

$$\underline{\Delta h = 2 \text{ cm}} \qquad \frac{\Delta h}{h} = \frac{2}{140} = 0,0144$$

$$\underline{\Delta d = 5 \text{ mm}} \qquad \frac{\Delta d}{d} = \frac{5}{45} = 0,11$$

#### 2.4.2. Erreurs absolues sur la perméabilité K

A/ Dérivons la formule donnant la perméabilité en fonction de Q, h et d. Il vient :

$$\begin{aligned} \Delta K = & 0,423 \ Q \ x \ (2 \ x \ h^{-3} \ \log_{10} \frac{4h}{d} + h^{-3}) \Delta h + \frac{0,423}{h^2} \ \log_{10} \frac{4h}{d} \ \Delta Q \\ & + \frac{0,423}{h^2} \ Q \ \frac{4 \ h d^{-2}}{4 \ h d^{-1}} \ \Delta d \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{2 \ \Delta h}{h} + \frac{\Delta h}{h \ \log_{10} \frac{4h}{d}} + \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta d}{d \ \log_{10} \frac{4h}{d}}$$

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{2 \times 2}{140} + \frac{1}{140 \times 2} + 0,03 + \frac{5}{45 \times 2}$$

$$\frac{\Delta K}{K} = 0,0290 + 0,0036 + 0,0300 + 0,0560$$

$$\underline{\frac{\Delta K}{K}} = 0,1186 \approx \underline{0,12}$$

$$\Delta K = 0,12 \times 1,5 \times 10^{-5} = 0,18 \times 10^{-5}$$

$1,32 \times 10^{-5} \text{ m/s} < K < 1,68 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
---

B/ Par ailleurs, les abaques permettent de déterminer K avec une erreur relative égale à 0,2.

$$\frac{\Delta K}{K} = 0,2$$

$$0,8 \times 10^{-5} \text{ m/s} < K < 1,2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

## 2.5. Conclusion

Les méthodes de NASBERG-TERLETSKATA et de WINGER donnent des résultats sensiblement différents à partir des mêmes mesures effectuées sur le terrain. Mais il ne faut pas s'en inquiéter. En effet les valeurs ainsi obtenues sont dix fois plus faibles que les valeurs de la perméabilité mesurée en laboratoire ou mesurée sur le terrain par infiltration dans une tranchée.

Pour savoir si cet écart est dû à une différence locale de la nature du sol, plusieurs mesures devront être effectuées et comparées.

Cette méthode, très aisée à mettre en oeuvre, doit donc être répétée un certain nombre de fois dans la zone où la perméabilité du sol est à mesurer. Si le sol paraît homogène, alors on pourra prendre comme perméabilité la moyenne des valeurs obtenues.

## 3. ESSAIS D'INFILTRATION DANS UNE TRANCHEE

### 3.1. Mise en oeuvre

#### 3.1.1. Forme de la tranchée

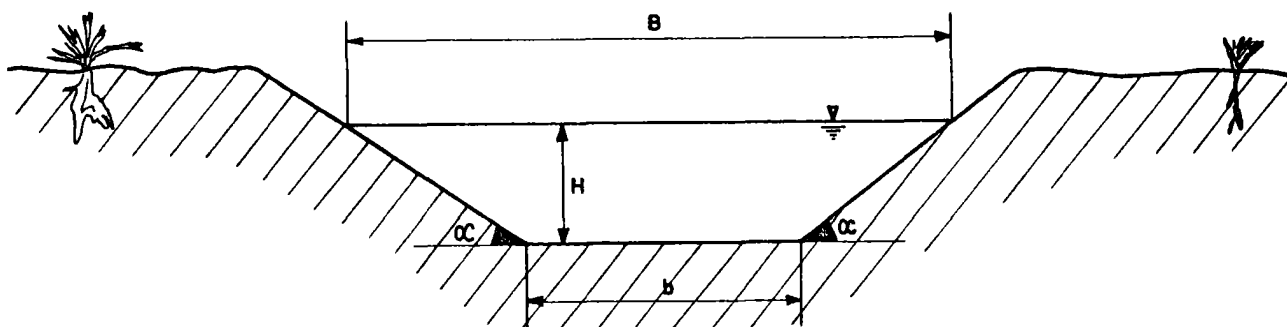


Schéma de la section

En surface la forme est rectangulaire, de longueur L. Un niveau à bulle a permis d'obtenir un fond de fossé aussi horizontal que possible.

- Dimensions choisies

$$\begin{aligned}
 b &= 50 \text{ cm} \\
 \alpha &= 45^\circ & \text{pente du talus } m &= 1 \\
 B &= 86 \text{ cm} \\
 H &= 18 \text{ cm} \\
 L_1 &= 4 \text{ m} & L_2 &= 5 \text{ m} & L_3 &= 6 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Les trois longueurs  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  ont été choisies pour étudier l'effet de l'allongement du fossé sur la précision de la mesure. Les dimensions  $b$  et  $B$  ont été choisies pour se donner un ordre de grandeur de leurs valeurs. Il sera nécessaire de mesurer  $B$  quand la hauteur d'eau dans le fossé atteindra la hauteur  $H$  et de mesurer  $b$  après assèchement de la fouille ; éventuellement il faudra prendre la moyenne des valeurs obtenues de  $B$  et  $b$ , pour le calcul de la perméabilité.

3.1.2. Mise en eau du fossé

Pour éviter de perturber le sol en versant l'eau dans le fossé, il est conseillé de verser l'eau sur une planche destinée à briser l'énergie de l'eau.

3.1.3. Mesures

A/ Première série de mesures  $L_1 = 4 \text{ m}$   $H = 18 \text{ cm}$

Le niveau d'eau dans le fossé doit être maintenu constant à la hauteur  $H$ . En fait, il est assez difficile de maintenir le niveau d'eau constant. Ce dernier a tendance à osciller autour de la valeur choisie et le débit d'arrivée d'eau doit être sans cesse réglé de façon à stabiliser le niveau d'eau.

Pour cet essai, le débit d'arrivée d'eau a été mesuré à l'aide d'un déversoir triangulaire. La valeur finale obtenue correspond à une stabilisation du niveau d'eau à la hauteur voulue. Les lectures effectuées sont celles du niveau d'eau  $h$  dans le déversoir et du temps. Elles sont reportées dans le tableau fig. III-1.

B/ Deuxième série de mesures  $L_2 = 5 \text{ m}$   $H = 18 \text{ cm}$

tableau fig. III-2

C/ Troisième série de mesures  $L_3 = 6 \text{ m}$   $H = 18 \text{ cm}$

tableau fig. III-3

3.2. Calcul de la perméabilité  $K$

La coupe géologique des formations superficielles (voir fig. I) permet de supposer le sol homogène sur une assez grande profondeur. La nappe phréatique étant d'autre part située à environ 10 mètres sous la surface du sol, nous nous situons dans les cas I des méthodes de MATSUO et MUSKAT.

a)  $L = 4 \text{ m}$

$H = 18 \pm 1 \text{ cm}$  52

tableau des mesures

Figure III - 1

t en minutes	0	1	2	3	4	5	6	7	8
h en mm		60	53	53	48	48	48	47	47
H		/	/	/	/	/	/	/	/
t en minutes		9	10	11	12	13	14	15	16
h en mm		47	47	47	46	43	41	41	42
H		/	/	/	/	/	/	/	/
t en minutes		17	18	19	<p>Les mesures de B et b effectuées après les essais ont donné les valeurs suivantes :  <math>B : 78 \pm 1 \text{ cm}</math>  <math>b : 42 \pm 1 \text{ cm}</math></p>				
h en mm		44	44	44					
H en mm		180	180	180					

b)  $L = 5 \text{ m}$

$H = 18 \pm 1 \text{ cm}$

tableau des mesures

Figure III - 2

t en minutes	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
h en mm		60	58	52	51	50	48	48	49	53
H		/	/	/	/	/	/	/	/	/
t en minutes		10	11	12	13	14	15	16	17	18
h en mm		53	53	52	52	51	50	50	45	45
H		/	/	/	/	/	/	/	/	/
t en minutes		19	20	21	22	23	24	25	26	27
h en mm		47	44	50	49	49	52	48	47	48
H		/	/	/	/	/	/	180	180	180

$B = 78 \pm 1 \text{ cm}$

$b = 42 \pm 1 \text{ cm}$

c)  $L = 6 \text{ m}$

$H = 18 \pm 1 \text{ cm}$

tableau des mesuresfigure III-3

t en minutes	1	2	3	4	5	6	7	8	9
h en mm	62	62	63	60	44	44	51	53	54
H	/	/	/	/	/	/	/	/	/
t en minutes	10	11	12	13	14	15	16	17	18
h en mm	53	51	50	50	50	51	50	51	50
H	/	/	/	/	/	/	/	/	180
t en minutes	19	20	21	22	23				
h en mm	50	50	50	50	50				
H	180	180	180	180	180				

Les mesures de B et b ont donné :

$B : 78 \pm 1 \text{ cm}$

$b : 42 \pm 1 \text{ cm}$

### 3.2.1. Méthode de MATSUO

$$Q = K (B + 2 H)$$

Q en m<sup>3</sup>/m/s

B en m

H en m

$$K = \frac{Q}{B + 2H}$$

Conformément à la formule donnant le débit Q' d'un déversoir triangulaire d'angle 90° en fonction de la hauteur d'eau h dans le déversoir, il vient :

$$Q'_1 = 1,32 h_1^{2,47} \quad Q'_1 \text{ en m}^3/\text{s}$$

$$Q'_2 = 1,32 h_2^{2,47} \quad h_1 \text{ en m}$$

Si la fouille a été allongée d'un mètre entre les essais 1 et 2 :

$$Q = Q'_2 - Q'_1 = 1,32 \left( h_2^{2,47} - h_1^{2,47} \right) \quad Q \text{ en m}^3/\text{m/s}$$

Les mesures A/, B/, C/ effectuées précédemment permettent 3 calculs de la perméabilité K (voir tableau fig. III-4).

### 3.2.2. Méthode dite de MUSKAT (1946)

Dans la formule du débit infiltré par mètre de tranchée, MUSKAT fait intervenir un coefficient A de forme de la section

$$Q = K (B + A H)$$

Un graphe (fig. III-6) donne le rapport  $\frac{Q}{KH}$  en fonction de  $\frac{B}{H}$  et de la pente des talus du fossé.

Dans le cas présent :

. la pente des talus du fossé est égale à l'unité  $m = 1$

. le rapport  $\frac{B}{H} = \frac{0,78}{0,18} = 4,34$

Le rapport  $\frac{Q}{KH}$  et A ont donc pour valeurs respectives :

$$\frac{Q}{KH} = 7,1$$

$$A = 2,76$$

En reprenant les calculs de Q faits en 3.1., nous obtenons les résultats consignés sur le tableau fig. III-5.

## 3 - 1 Calcul de la perméabilité par la méthode de Matsuo

$h_1$ en m	0,044	0,048	0,044
$h_2$ en m	0,048	0,050	0,050
$Q$ en $m^3/m/s$	$1,83 \cdot 10^{-4}$	$0,49 \cdot 10^{-4}$	$\frac{2,32}{2} \cdot 10^{-4}$
$H$ en m	0,18	0,18	0,18
$B$ en m	0,78	0,78	0,78
$K$ en $m/s$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$0,44 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$

Figure III-4

## 3 - 2 Calcul de la perméabilité par la méthode de Muskat

$Q$ en $m^3/m/s$	$1,83 \cdot 10^{-4}$	$0,49 \cdot 10^{-4}$	$1,16 \cdot 10^{-4}$
$\frac{Q}{KH}$	7,1	7,1	7,1
$B$ en m	0,78	0,78	0,78
$H$ en m	0,18	0,18	0,18
$K$ en $m/s$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^{-4}$	$0,9 \cdot 10^{-4}$

Figure III-5

## CAS I

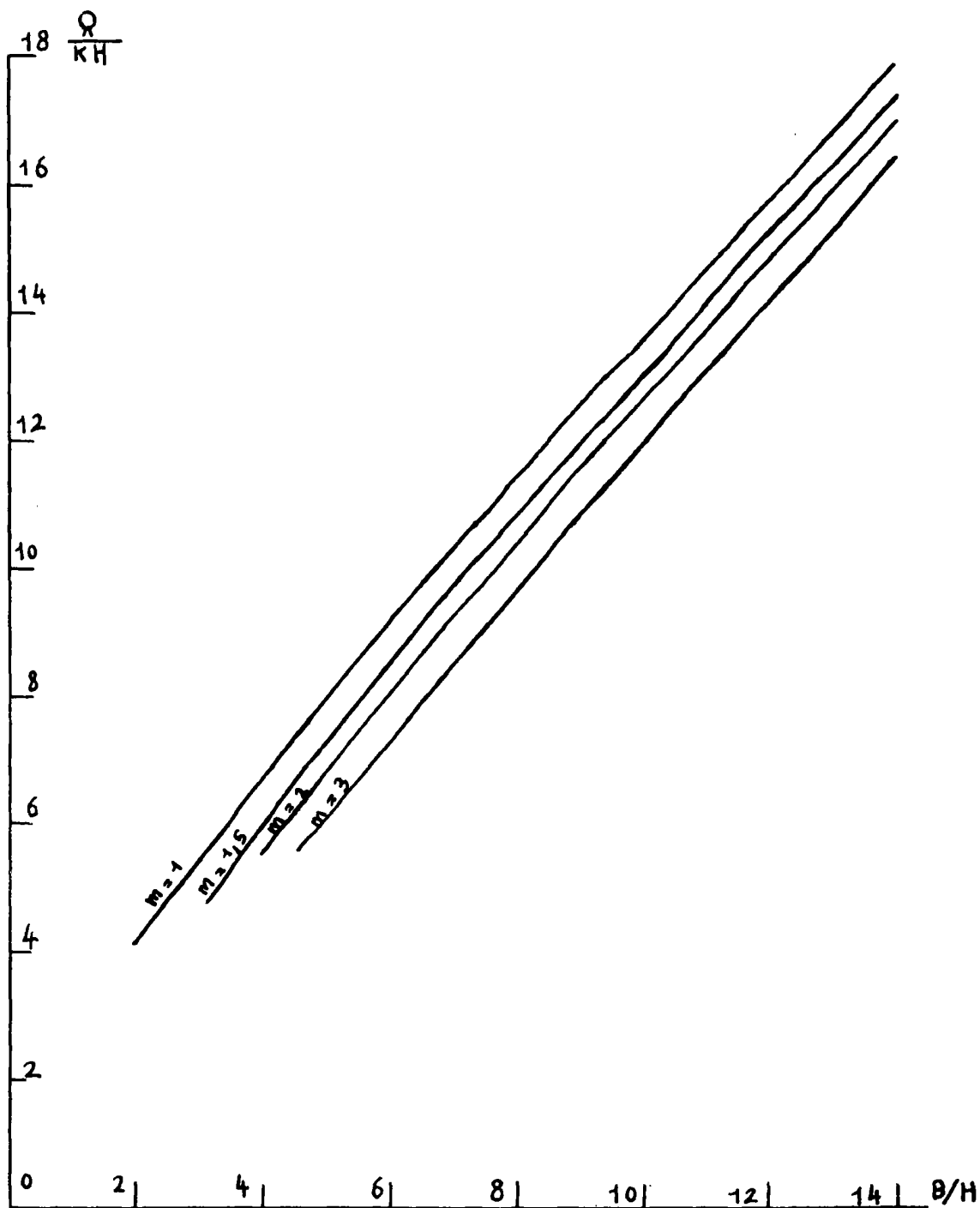


Diagramme permettant la détermination du rapport  $\frac{R}{KH}$

FIGURE III-6

### 3.3. Calcul d'erreur

La formule utilisée pour le calcul de la perméabilité est la suivante :

$$K = \frac{Q}{B + AH}$$

Nous désignerons par :

$\Delta K$  l'erreur absolue sur  $K$

$\Delta Q$  l'erreur absolue sur  $Q$  etc...

Calculons tout d'abord l'erreur relative sur l'évaluation du débit  $Q$ .

$$\Delta Q = \Delta Q'_2 + \Delta Q'_1 = 1,32 \left[ \Delta \left( h_2^{2,47} \right) + \Delta \left( h_1^{2,47} \right) \right]$$

$$\Delta Q = 2,47 \left( Q'_2 \frac{\Delta h_2}{h_2} + Q'_1 \frac{\Delta h_1}{h_1} \right)$$

L'erreur relative sur  $Q$  est donc :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{2,47}{Q} \left( Q'_2 \frac{\Delta h_2}{h_2} + Q'_1 \frac{\Delta h_1}{h_1} \right)$$

Les hauteurs du niveau d'eau dans le déversoir sont appréciées au millimètre.

Prenons pour erreur absolue commise sur la mesure des longueurs  $B$  et  $H$  la valeur de 1 cm

$$\Delta H = \Delta B = 1 \text{ cm}$$

L'erreur sur  $A$  n'est à prendre en considération que dans le calcul de MATSUO puisque la formule proposée par ce dernier est une formule approchée. Dans notre cas, en considérant que la valeur exacte de  $A$  est donnée par la méthode de MUSKAT :

$$\Delta A = 0,76$$

En ce qui concerne l'autre détermination de la perméabilité par la méthode dite de MUSKAT, l'erreur commise sur le rapport  $\frac{B}{H}$  entraîne une erreur sur la détermination du rapport  $\frac{Q}{KH}$

$$\Delta \left( \frac{B}{H} \right) = \frac{B}{H} \left( \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta H}{H} \right) + \frac{\Delta B}{H} + \frac{B \Delta H}{H^2}$$

Finalement,  $\Delta \left( \frac{B}{H} \right) = 0,3$  et  $\Delta \left( \frac{Q}{KH} \right) = 0,3$  d'après le graphe fig. III-6.

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta \left( \frac{Q}{KH} \right)}{\frac{Q}{KH}} + \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta H}{H}$$

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de tableaux (4.1. pour la méthode de MATSUO ; 4.2. pour la méthode de MUSKAT).

4-1 calcul d'erreurs à partir de la formule de Matsuo

$h_1$ en m	0,044	0,048	0,044
$h_2$ en m	0,048	0,050	0,050
$\Delta h_1 = \Delta h_2$	0,001	0,001	0,001
$Q'_1$ en $m^3/s$	$5,92 \cdot 10^{-4}$	$7,75 \cdot 10^{-4}$	$5,92 \cdot 10^{-4}$
$Q'_2$ en $m^3/s$	$7,95 \cdot 10^{-4}$	$8,24 \cdot 10^{-4}$	$8,24 \cdot 10^{-4}$
$Q$ en $m^3/m/s$	$1,83 \cdot 10^{-4}$	$0,49 \cdot 10^{-4}$	$1,16 \cdot 10^{-4}$
$\Delta Q$	$0,74 \cdot 10^{-4}$	$8,2 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-5}$
$\frac{\Delta Q}{Q}$	0,41	1,68	<u>0,32</u>
$B$ en m	0,78	0,78	0,78
$H$ en m	0,18	0,18	0,18
$\Delta H = \Delta B$	0,01	0,01	0,01
$\Delta A$	0,76	0,76	0,76
$\frac{\Delta B}{B + \Delta H}$	0,009	0,009	0,009
$\frac{H \Delta A}{B + \Delta H}$	0,12	0,12	0,12
$\frac{A \Delta H}{B + \Delta H}$	0,025	0,025	0,025
$\frac{\Delta K}{K}$	0,564	1,83	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,47</span>

4-2 calcul d'erreurs à partir de la méthode dite de Muskat

$\Delta(\frac{B}{H})$	0,3	0,3	0,3
$\Delta(\frac{Q}{KH})$	0,3	0,3	0,3
$\frac{\Delta(Q/KH)}{Q/KH}$	0,043	0,043	0,043
$\frac{\Delta Q}{Q}$	0,41	1,68	<u>0,32</u>
$\frac{\Delta H}{H}$	0,056	0,056	0,056
$\frac{\Delta K}{K}$	0,50	1,78	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">0,42</span>

Pour résultat final on prendra la mesure qui donne la meilleure précision :

$$\underline{0,5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s} < K < 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}}$$

### 3.4. Conclusion

Le calcul d'erreurs permet de constater que la précision de la mesure est limitée principalement par l'évaluation du débit. Pour améliorer cette dernière mesure, on peut utiliser un déversoir plus précis ou un autre appareil de son choix. On peut aussi augmenter la valeur de la différence des débits mesurés ( $Q_2' - Q_1'$ ) en allongeant la fouille au maximum entre deux mesures.

En outre, la méthode dite de MUSKAT permet un gain non négligeable sur la précision dans l'évaluation de la perméabilité, gain qui serait plus substantiel si la précision sur la mesure du débit était meilleure.

Enfin les résultats obtenus par cette méthode ont été comparés à ceux obtenus par des mesures faites en laboratoire. Les mesures en laboratoire ont donné une valeur de la perméabilité égale à  $2 \cdot 10^{-4}$  m/s et la mesure par infiltration dans une tranchée une valeur comprise entre  $1,3 \cdot 10^{-4}$  et  $0,5 \cdot 10^{-4}$  m/s. On peut donc considérer que cette méthode de mesure de la perméabilité d'un sol non saturé donne des résultats satisfaisants malgré ses imperfections.

## 4. ESSAIS PAR LA METHODE DES DEUX TUBES

### 4.1. Mise en oeuvre

Un trou de 80 cm de profondeur a été creusé à la main à l'aide d'une pelle-bêche. Le tube externe a ensuite été posé, puis enfoncé de 10 cm dans le fond du trou. Après quoi, le fond du trou lui-même a été soigneusement nettoyé de façon à enlever la partie du sol perturbé.

Pour éviter, pendant les mesures, que l'eau ne remonte le long du tube externe jusqu'en surface, on comble l'espace entre le trou et le tube externe par un mélange de boue et de matériaux argileux sur une hauteur jugée suffisante pour arrêter la progression de l'eau vers le haut.

Tout l'appareillage utilisé au B.R.G.M. a été fait en plastique. Ce matériau présente des avantages certains tant du point de vue de son prix que de la facilité avec laquelle on peut le travailler. Il reste cependant un matériau fragile et il est fortement conseillé de faire faire la partie basse du tube interne en acier. Cette partie est en effet celle qui est la plus malmenée pendant la mise en place de l'appareillage.

Après la pose du tube externe on procède à la mise en eau du trou suivant les précautions prescrites puis à la mise en place du tube interne jusqu'à l'enfoncer d'une profondeur de 6 à 7 cm dans le fond du trou. C'est là une opération assez délicate. Appuyer sur le tube ne suffit pas ; il faut frapper à petits coups répétés sur le couvercle de la partie basse du tube interne en contrôlant son enfoncement. De plus, cette phase doit être effectuée le plus rapidement possible car elle est immédiatement suivie de la pose de la partie supérieure de l'appareil et du branchement de l'arrivée d'eau sur la vanne correspondante.

Entre l'instant où on commence à enfoncer le tube interne et l'ouverture de la vanne d'arrivée d'eau, il faut arrêter l'alimentation en eau du trou pour ne pas créer de surcharge entre les tubes interne et externe. Mais il faut éviter pendant ce temps que l'eau ne descende trop bas dans le tube externe, ce qui poserait ultérieurement des problèmes de remplissage (sans dommages pour le terrain) des deux tubes.

Une fois les deux tubes externe et interne pleins, l'eau monte dans les tubes dressés OTS et ITS.

Des essais rapides ont permis de constater que le diamètre des tubes dressés OTS et ITS étaient insuffisants. Les vitesses de chute des niveaux d'eau dans les deux tubes étaient trop rapides pour permettre de bonnes mesures. Nous avons donc mis en parallèle deux autres tubes OTS<sub>2</sub> et ITS<sub>2</sub>, d'un diamètre plus grand. Ces tubes vont permettre des mesures correctes de vitesse de chute des niveaux d'eau.

Malheureusement ces derniers tubes ne sont pas transparents et les mesures seront effectuées sur les petits tubes en plexiglass couplés avec les autres. A ce sujet il serait judicieux de posséder un jeu de tubes amovibles et transparents qui pourraient remplacer en cas de besoin les tubes ITS et OTS.

Une fois l'eau arrivée au sommet des tubes dressés, les mesures peuvent commencer.

#### 4.2. Mesures

##### - Mesures de type $\beta$ (tableau fig. IV-2)

Nous commençons par une mesure à niveaux égaux (mesure du type  $\beta$ ). Pour simplifier la mesure, nous ne fermerons pas la vanne qui met en communication les tubes interne et externe. Il faudrait en fait la fermer et ajuster sans cesse la chute du niveau d'eau dans le tube externe à la chute du niveau d'eau dans le tube interne. En fermant la vanne de communication entre les deux tubes, nous nous sommes rendus compte que les deux niveaux d'eau chutaient à peu près à la même vitesse. Cependant, si ces vitesses de chute étaient trop différentes, il faudrait soit procéder à une petite correction, soit suivre scrupuleusement le détail des opérations exposées précédemment.

Tous les 5 cm sur une hauteur de 50 cm nous avons relevé les temps de passage du niveau d'eau (voir tableau fig. IV-2.). Il est souvent nécessaire d'affiner la mesure dans les 10 premiers centimètres.

##### - Mesures de type $\alpha$ (tableau fig. IV-3)

Un quart d'heure après la première mesure  $\beta$ , a été effectuée la première mesure avec le tube dressé externe plein (mesure  $\alpha$ ).

Assez rapidement le niveau d'eau dans le tube interne se stabilise. Il faut donc prendre des mesures plus resserrées que pour les mesures de type  $\beta$  et prévoir les tableaux correspondants (voir tableau fig. IV-3.).

H en cm	$\beta_1$ $t_1$ en s	$\beta_2$ $t_2$ en s	$\beta_3$ $t_3$ en s	$\beta_4$ $t_4$ en s
0	heure : 10 h 5 mn	heure : 10 h 35 mn	heure : 11 h 7 mn	heure : 11 h 40 mn
8	/	2	2	2,3
9	/	1	2,6	3
10	3,9	1	3	3,7
11	/	1	4	4,3
12	/	4,5	4,4	4,9
13	/	1	5	5,4
14	/	1	5,6	6
15	/	6,5	6,5	6,8
20	10	10	10	9,8
30	17,5	16,5	16	17

tableau des mesures de type  $\beta$

figure IV - 2

H en cm	$\alpha_1$ $t'_1$ en s	$\alpha_2$ $t'_2$ en s	$\alpha_3$ $t'_3$ en s
0	heure : 10h 20 mn	heure : 10h 50 mn	heure : 11h 25 mn
8	13	9	12
9	15	14	16
10	20	18	21
11	25,5	22,5	26
12	31,5	28,5	33
13	37	36	42
14	45	42	51
15	60	52	70
20	/	/	/
30	/	/	/

tableau des mesures de type  $\alpha$

Figure IV - 3

- arrêt des mesures

Les mesures  $\alpha$  et  $\beta$  ont été alternées avec un laps de temps d'environ un quart d'heure entre chaque série de mesures. L'arrêt des mesures est subordonné à la concordance des premiers calculs du rapport

$$\frac{2 \Delta t}{t^2 \text{ niv. eg.}}$$

4.3. Calcul de la perméabilité

$$K = \frac{R_p^2}{F_f R_c} \frac{2 \Delta t}{t^2 \text{ niv. eg.}}$$

$R_p$  rayon du tube dressé interne (ITS)  
 $R_c$  rayon du tube interne  
 $F_f$  facteur de l'écoulement

4.3.1. Détermination du rapport  $\frac{2 \Delta t}{t^2 \text{ niv. eg.}}$

Les mesures effectuées ont montré que le débit d'infiltration varie dans le temps (voir graphe  $H = f(t)$  fig. IV-5.).

Pour corriger l'erreur due à cette variation du débit d'infiltration, on prendra pour chaque hauteur de chute  $H$ , la moyenne  $t_m$  des temps des deux séries de mesures de type  $\beta$  précédant et suivant la mesure de type  $\alpha$ .

Nous appellerons  $t_1, t_2, t_3$  les temps correspondant aux mesures de type  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ , et  $t'_1, t'_2, t'_3$  les temps correspondant aux mesures de type  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ . Il vient :

$$t_m = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

$$\Delta t = t'_1 - t_m$$

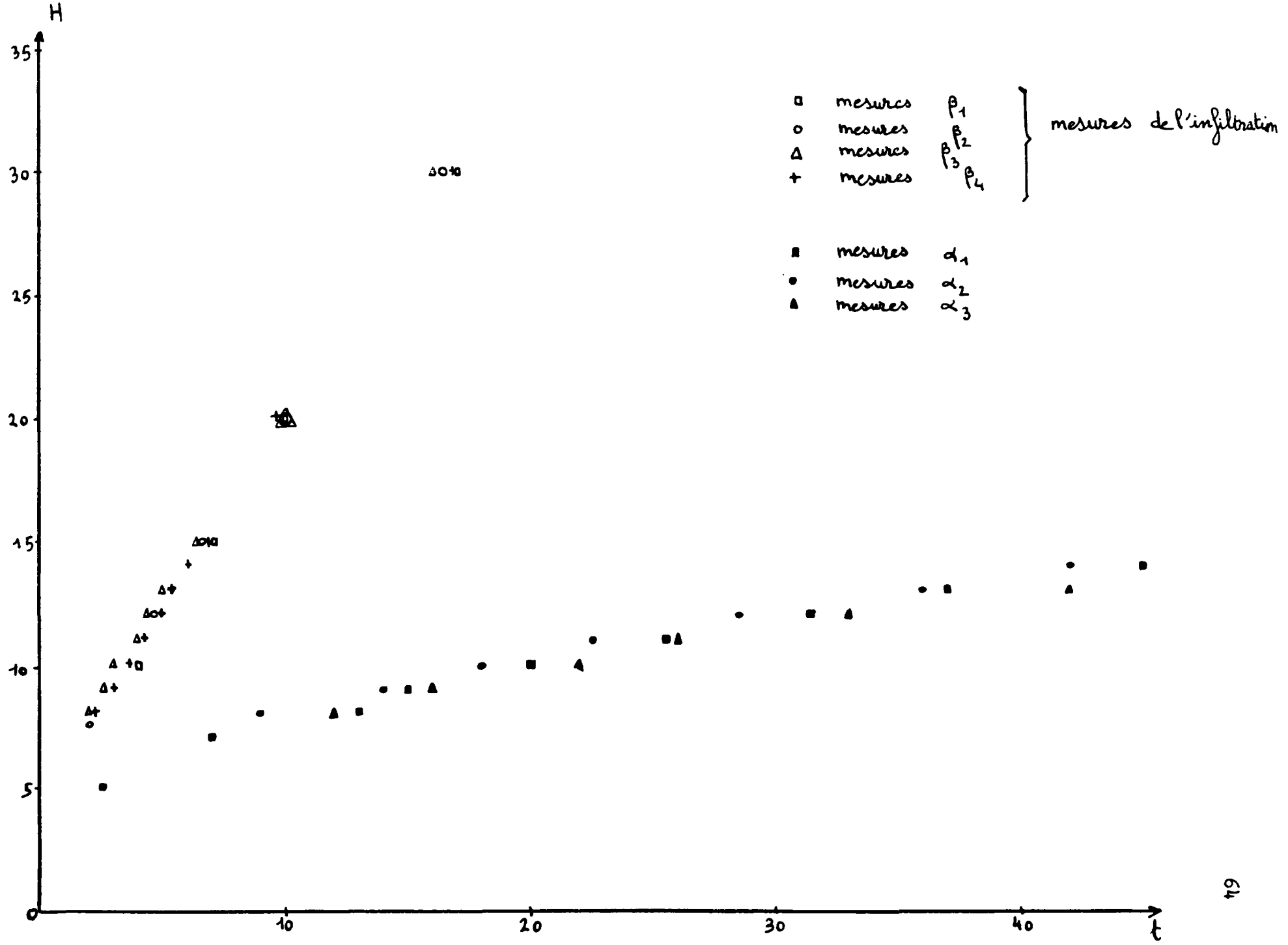
$$\frac{2 \Delta t}{t^2 \text{ niv. eg.}} = \frac{2 (t'_1 - t_m)}{t_m^2}$$

En comparant les résultats obtenus, on peut constater que le rapport :

$$\frac{2 \Delta t}{t_m^2}$$

varie peu.

Figure IV - 5



Parmi ces résultats nous avons retenus le dernier tableau qui est aussi le plus complet (voir fig. IV-4).

On peut ainsi constater que le rapport  $\frac{2 \Delta t}{t_m^2}$  ne varie pas de façon continue quand H croît. Il n'est donc pas possible d'extrapoler ce rapport pour  $H = 0$ .

Nous prendrons donc :

$$2,5 < \frac{2 \Delta t}{t_m^2} < 3,4$$

#### 4.3.2. Détermination du facteur $F_f$

La coupe schématique (fig. I) montre que, dans la zone qui nous intéresse, le terrain peut être considéré comme homogène et isotrope sur une profondeur suffisante.

Nous utiliserons donc l'abaque (voir fig. IV-6) en supposant l'existence d'une couche imperméable profonde,  $d = 5 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ . Le tube interne avait été enfoncé de 7 cm dans le terrain au fond du trou, mais un examen de ce terrain après les essais a montré qu'il avait été perturbé sur une épaisseur de 2 à 3 cm. Nous avons donc choisi pour  $d$  la valeur de 5 cm avec une erreur absolue de 1 cm.

$$R_c = 6,5 \pm 0,05 \text{ cm}$$

D est grand devant  $R_c$ , le rapport  $\frac{D}{R_c}$  est donc très grand.

L'abaque (fig. IV - 6) donne donc pour valeur de  $F_f$  :

$$F_f = 0,78$$

#### 4.3.3. Détermination du rapport $\frac{R_v^2}{R_c}$

$$R_c = 6,5 \pm 0,05 \text{ cm}$$

Dans le cas présent,  $R_v^2$  doit être évalué comme le carré du rayon du tube équivalant aux deux tubes utilisés de rayons respectifs  $R_1$  et  $R_2$ .

$$R_v^2 = R_1^2 + R_2^2$$

$$R_1 = 38 \pm 0,5 \text{ mm}$$

$$R_2 = 8 \pm 0,5 \text{ mm}$$

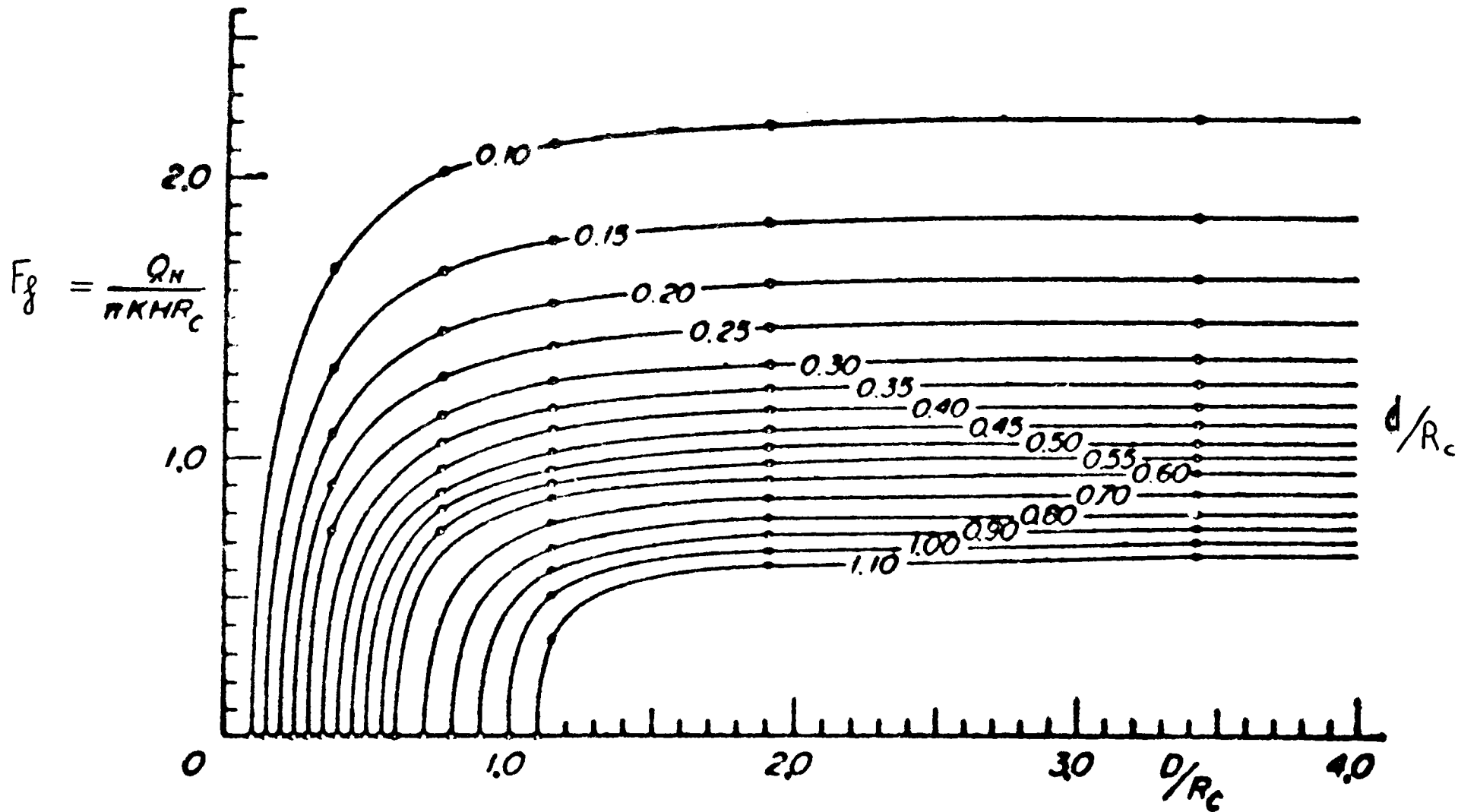
Il vient donc :

$$R_v^2 = 15,05 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

H en cm	OTS Plein $\alpha_3$ $t'_3$ en s	niveaux égaux $t_m = \frac{t_3 + t_4}{2}$ $t_m$ en s	$\Delta t = t'_3 - t_m$	$t_m^2$	$\frac{2 \Delta t}{t_m^2}$
8	12	2,15	9,85	4,63	4,25
9	16	2,8	13,2	7,85	3,36
10	21	3,35	17,65	11,2	3,15
11	26	4,15	21,85	17,2	2,54
12	33	4,65	28,35	21,6	2,62
13	42	5,2	36,8	27	2,73
14	51	5,8	45,2	33,6	2,69
15	70	6,65	63,35	44,4	2,86

tableau des calculs

figure IV-4



Abaque représentant les variations de  $F_g = \frac{Q_H}{\pi K H R_c}$  en fonction de la profondeur de la couche imperméable (exprimée par le rapport  $D/R_c$ ) pour différentes valeurs de  $d/R_c$ .

FIGURE IV-6

4.3.4. Résultats

$$15 \times 10^{-4} \text{ m/s} < K < 21 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

Cette fourchette de valeurs de la perméabilité correspond aux variations du rapport :

$$\frac{2 \Delta t}{t_{\text{niv. eg.}}^2}$$

4.4. Calcul d'erreur

Posons :

$$r = \frac{2 \Delta t}{t_{\text{niv. eg.}}^2}$$

$$K = \frac{R_v^2}{F_f R_c} r$$

Soient  $\Delta R_v$ ,  $\Delta F_f$ ,  $\Delta R_c$  et  $\Delta r$  les erreurs absolues respectivement sur  $R_v$ ,  $F_f$ ,  $R_c$  et  $r$

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{2 \Delta R_v}{R_v} + \frac{\Delta F_f}{F_f} + \frac{\Delta R_c}{R_c} + \frac{\Delta r}{r}$$

4.4.1. Erreur relative sur le rapport  $\frac{2 \Delta t}{t_{\text{niv. eg.}}^2} = r$ 

Nous admettrons que les temps sont mesurés avec une erreur absolue  $\Delta' t$  de 0,2 s.

$$\Delta' t = 0,2 \text{ s}$$

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta'(\Delta t)}{\Delta t} + \frac{2 \Delta' t_{\text{niv. eg.}}}{t_{\text{niv. eg.}}^2}$$

Prenons le tableau figure IV-4. à titre d'exemple :

$$\Delta t = t_3' - t_m$$

$$t_m = \frac{t_3 + t_4}{2}$$

$$\Delta' t_m = \frac{1}{2} (\Delta' t_3 + \Delta' t_4) = 0,2 \text{ s}$$

$$\Delta'(\Delta t) = \Delta' t_3' + \Delta' t_m$$

$$\Delta'(\Delta t) = 0,4 \text{ s}$$

A chaque valeur de H correspond une valeur du rapport  $r$  donc une valeur de l'erreur relative  $\frac{\Delta r}{r}$  (voir tableau fig. IV-7).

H en cm	$\Delta'(t_m)$ en s.	$\Delta'(\Delta t)$ en s.	$\frac{2\Delta't_m}{t_m}$	$\frac{\Delta'(\Delta t)}{\Delta t}$	$\frac{\Delta r}{r}$
8	0,2	0,4	0,19	0,041	0,231
9	0,2	0,4	0,15	0,030	0,18
10	0,2	0,4	0,12	0,023	0,143
11	0,2	0,4	0,10	0,019	0,119
12	0,2	0,4	0,09	0,014	0,104
13	0,2	0,4	0,08	0,011	0,091
14	0,2	0,4	0,07	0,009	0,079
15	0,2	0,4	0,06	0,007	0,067

tableau des calculs d'erreurs commises

sur le rapport  $\frac{2\Delta t}{t^2} = r$   
 $t^2$  niv. égaux

figure IV-7

#### 4.4.2. Erreur relative sur le facteur d'écoulement $F_f$

La profondeur de pénétration  $d$ , du tube interne dans le sol non perturbé est appréciée au centimètre.

$$\underline{d = 5 \pm 1 \text{ cm}}$$

En outre, le diamètre du tube interne est mesuré au mm près.

$$\underline{R_c = 6,5 \pm 0,05 \text{ cm}}$$

Il vient donc :

$$\frac{\Delta(d/R_c)}{d/R_c} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta R_c}{R_c}$$

$$\Delta(d/R_c) = \frac{\Delta d}{R_c} + \frac{\Delta R_c \times d}{R_c^2}$$

$$\Delta(d/R_c) = \frac{1}{6,5} + \frac{0,05 \times 5}{(6,5)^2} = 0,155 + 0,006$$

$$\Delta(d/R_c) = 0,16 \quad \boxed{0,61 < \frac{d}{R_c} < 0,93}$$

L'abaque (fig. IV-6) donne les valeurs correspondantes de  $F_f$

$$\boxed{0,71 < F_f < 0,92}$$

Nous obtenons donc deux valeurs de  $\Delta F_f$  :

par excès  $\underline{\Delta F_f = 0,14}$

$$\boxed{\frac{\Delta F_f}{F_f} = 0,18}$$

par défaut  $\underline{\Delta F_f = 0,07}$

$$\boxed{\frac{\Delta F_f}{F_f} = 0,09}$$

#### 4.4.3. Erreur relative sur $R_v$ et $R_c$

Rappelons que :

$$R_c = 6,5 \pm 0,05 \text{ cm}$$

$$R_1 = 3,8 \pm 0,05 \text{ cm}$$

$$R_2 = 0,8 \pm 0,05 \text{ cm}$$

$$R_v^2 = 15,05 \text{ cm}^2$$

$$R_v = \sqrt{R_1^2 + R_2^2}$$

$$\Delta R_v = \frac{R_1}{R_v} \Delta R_1 + \frac{R_2}{R_v} \Delta R_2$$

$$\frac{\Delta R_v}{R_v} = \frac{R_1}{R_v^2} \Delta R_1 + \frac{R_2}{R_v^2} \Delta R_2$$

$$\frac{\Delta R_v}{R_v} = \frac{3,8 \times 0,05}{15,05} + \frac{0,8 \times 0,05}{15,05} = 0,013 + 0,003$$

$$2 \frac{\Delta R_v}{R_v} = 0,032$$

$$\frac{\Delta R_c}{R_c} = \frac{0,05}{6,5} = 0,008$$

#### 4.4.4. Conclusion à propos du calcul d'erreurs

---

En éliminant la première mesure pour  $H = 8$  cm l'erreur relative sur la perméabilité varie entre les valeurs extrêmes 0,4 et 0,2.

Selon que l'on est optimiste ou pessimiste sur la précision de la mesure, on peut donner comme résultats l'une des fourchettes suivantes :

$$7 \times 10^{-4} \text{ m/s} < K < 30 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

ou

$$11 \times 10^{-4} \text{ m/s} < K < 25 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

En conclusion, le calcul d'erreurs effectué ci-dessus nous indique que les deux principales causes d'erreurs sont, d'une part la prise des temps de chute à niveaux égaux dans les 15 premiers centimètres, et d'autre part l'évaluation du facteur d'écoulement  $F_f$ .

Pour améliorer la précision sur la mesure des temps, il est nécessaire de prendre les temps par arrêt du chronomètre.

Pour déterminer  $F_c$  avec une plus grande précision, il faut une meilleure connaissance de la profondeur d'enfoncement du tube interne dans le sol non perturbé. Dans ce but, il est conseillé d'ajouter une couche de sable propre au-dessus du sol mis à nu au fond du trou et d'utiliser le disque permettant de briser l'énergie de l'eau lors de la mise en eau du tube externe.

#### 4.5. Conclusion à propos des essais par la méthode des deux tubes.

Cette méthode, bien que délicate à mettre au point nous paraît digne d'intérêt parce qu'elle permet la mesure de la perméabilité d'un sol à partir d'une zone localisée, artificiellement saturée, où l'écoulement est bien défini. La valeur de la perméabilité ainsi mesurée est 10 fois supérieure à la valeur obtenue par la méthode d'infiltration dans un fossé rectangulaire ( $2 \cdot 10^{-3}$  m/s dans un cas,  $2 \cdot 10^{-4}$  m/s dans l'autre cas).

Cet écart peut étonner. Il semble toutefois que la mesure par infiltration soit une mesure par défaut à cause des risques de colmatage du fossé et de l'état de saturation partielle du terrain où se fait l'écoulement.

Par contre, il est possible que le terrain très sableux, dans lequel ont été effectués les essais, ait été lessivé par l'infiltration continue de l'eau au cours des essais par la méthode des deux tubes. Il en résulterait une mesure de la perméabilité par excès.

### 5. CONCLUSION GENERALE

L'étude des mesures "in situ" de la perméabilité d'un sol non saturé devrait nous permettre maintenant de faire un choix parmi les différentes méthodes proposées.

La méthode par infiltration dans un puits à faible profondeur (NASBERG-TERLETSKATA et WINGER) est très simple à mettre en oeuvre mais donne des résultats dont on ne connaît pas bien la signification. Elle est limitée par une étude théorique insuffisante du phénomène régissant l'écoulement "en parapluie" qui part du puits.

La méthode par infiltration dans une tranchée ne requiert pas d'appareillage spécial. Elle nécessite cependant une grosse réserve d'eau à proximité de la fouille d'essai. C'est une mesure globale par défaut de la perméabilité du sol non saturé.

La méthode des deux tubes (mise au point par BOUWER) requiert un appareillage spécial et une préparation minutieuse. La quantité d'eau utilisée est peu importante. C'est une mesure sélective (par excès semble-t-il dans l'exemple précédent) de la perméabilité du sol artificiellement saturé.

Quelque soit la méthode pour laquelle on aura opté, il paraît prudent de ne pas se contenter d'une seule méthode de mesure ni d'une seule mesure surtout si la méthode est sélective. En outre une étude géologique préliminaire des formations superficielles est nécessaire. Cette étude permettra de faire un choix parmi les différents cas proposés et parfois d'expliquer la désharmonie des résultats.

Rappelons enfin qu'il existe des méthodes de mesure en laboratoire de la perméabilité d'un sol. Ces dernières, malgré leurs inconvénients devraient permettre, comparées aux méthodes de mesure "in situ" de la perméabilité, d'en déduire des résultats intéressants.