

Appareil utilisant une source de neutrons pour la mesure des vitesses horizontales de filtration

Par J. GUIZERIX, P. CALMELS, P. COROMPT, B. GAILLARD
(Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble; France)

& A. MAESTRINI

(Instituto de Pesquisas Radioactivas, Belo Horizonte; Brésil)

Sommaire

1. Introduction

2. Appareil du CENG

- 2. 1. Principe de l'appareil
- 2. 2. Description de l'appareil
- 2. 3. Avantages de l'appareil

3. Etude expérimentale

- 3. 1. Détermination du coefficient ε
 - 3. 1. 1. Méthodes proposées différents auteurs
 - 3. 1. 2. Méthode du CENG
 - 3. 1. 2. 1. Principe de la méthode d'analogie électrique
 - 3. 1. 2. 2. Cas d'un conducteur plan
 - 3. 1. 2. 3. Résultats des mesures
- 3. 2. Etude expérimentale de l'appareil
 - 3. 2. 1. Mise au point de l'appareil
 - 3. 2. 2. Traduction de la mesure — Résultats — Vérification de la méthode d'analogie électrique

1. Introduction

La mesure des vitesses de filtration horizontale des eaux souterraines a connu un renouveau d'intérêt depuis 1957, année où MOSER présenta un appareil utilisant un traceur radioactif.

La méthode consiste à mesurer la concentration d'un traceur introduit dans une section d'un tube crépiné implanté dans le milieu. La disparition du traceur suit une loi exponentielle et la relation

$$V_f = \frac{V_0}{S \cdot t} \log \frac{C_0}{C}$$

$$S = \varepsilon \cdot D \cdot h$$

permet de calculer V_f .

- V_f vitesse de filtration
- C_0 concentration du traceur à la date $t = 0$
- C concentration du traceur à une date t
- V_0 volume de la chambre de mesure
- D diamètre de la chambre mesure
- h hauteur de la chambre de mesure
- ε largeur de l'écoulement horizontal intercepté par le tube crépiné, exprimée en prenant D comme unité.

Nous ne nous étendrons pas ici sur les conditions d'application de cette méthode; on en trouvera dans (2) une analyse. La détermination de ε fera l'objet, plus bas, d'un chapitre particulier.

On a pu proposer l'utilisation de ^{131}I comme traceur (3) en 1916, et plus récemment, en 1966, l'utilisation d'une impulsion de chaleur (4). On dispose de peu d'information sur les difficultés et les performances de la première méthode, la seconde est en cours d'investigation.

Les appareils qui ont été développés depuis 1957, utilisent comme traceurs radioactifs, de l'iode 131 ou du Brome 82 (1) (2).

L'intérêt des traceurs radioactifs réside en la facilité et la sûreté des mesures de leur concentration et dans leur faible masse, caractéristique qui permet d'éviter les courants de densité.

Nous avons réalisé en 1962—1963 un appareil utilisant comme traceur, de l'iode 131; nous venons d'étudier et de réaliser un appareil utilisant comme traceur un sel de cadmium non radioactif. C'est cet appareil que nous vous présentons.

2. Appareil du CENG

2. 1. Principe de l'appareil

Le principe général de l'appareil est identique à celui que nous avons exposé plus haut. La particularité de cet appareil par rapport à ceux qui ont été présentés jusqu'ici réside en la nature du traceur et la manière d'en mesurer la concentration.

Le mode de mesure de la concentration est la détermination des variations du flux de neutrons thermiques en fonction des concentrations d'un sel possédant une forte section efficace de capture pour les neutrons thermiques.

L'appareil comporte une source de neutrons rapides (américium — béryllium). Ces neutrons sont thermalisés par l'eau, plus ou moins absorbés par le traceur, et mesurés à l'aide d'un compteur à trifluorure de bore.

Les variations du signal de sortie sont en sens inverse de ceux des appareils classiques. A une diminution de concentration correspond une augmentation du signal. Nous avons montré que la réponse de l'appareil était linéaire en fonction de la concentration; il en résulte que la courbe enregistrée lors d'un essai est une exponentielle. Seule change donc, par rapport aux appareils classiques, la ligne de référence; elle correspond dans un cas au bruit de fond et dans le second au flux maximal de neutrons thermiques.

2. 2. Description de l'appareil

La figure 1 représente un schéma de l'appareil. La chambre de mesure est délimitée par le tube crépiné dans lequel on introduit l'appareil et dans le sens vertical par deux chambres en caoutchouc annulaires gonflées depuis la surface. Cette chambre, de capacité 2.8 litres, comprend une chemise centrale dans laquelle se trouvent deux hélices destinées à favoriser l'homogénéisation du traceur, condition essentielle à l'application de la méthode. A la partie centrale de la chambre, se trouve, dans une chemise en acier inoxydable, la source de 300 mCi d'Américium-Béryllium, surmontée par un compteur à BF_3 (type 3 NE 12 LCT). Ce compteur est associé un préamplificateur qui est contenu dans l'enceinte supérieure de l'appareil.

L'enceinte inférieure comprend un réservoir contenant le traceur. La capacité de ce réservoir est de 1.35 litre. Il contient, au début de l'essai environ 1 litre de solution de $\text{CdSO}_4 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$. Dans ce réservoir, on établit, à l'aide d'une pompe, une pression d'air de l'ordre de 5 kg/cm^2 . L'injection du traceur est commandée depuis la surface du sol par l'intermédiaire d'une électrovanne également contenue dans l'enceinte inférieure de l'appareil. Dans cette enceinte, on trouve également le moteur qui entraîne les hélices d'homogénéisation. Sa vitesse de rotation est de 500 tours/minute pendant l'essai. Pour favoriser l'homogénéisation après l'injection pendant 5 minutes, on lui donne une vitesse de 900 tours/minute. Ce changement de vitesse est effectué en changeant la tension d'alimentation du moteur (12—14 volts).

La solution injectée a une densité de 1.55 et contient 40% en masse de CdSO_4 . Le volume de la solution injectée que l'on détermine par le temps d'injection est environ 25 cm^3 . On peut réaliser approximativement 35 mesures sans sortir l'appareil du tube crépiné.

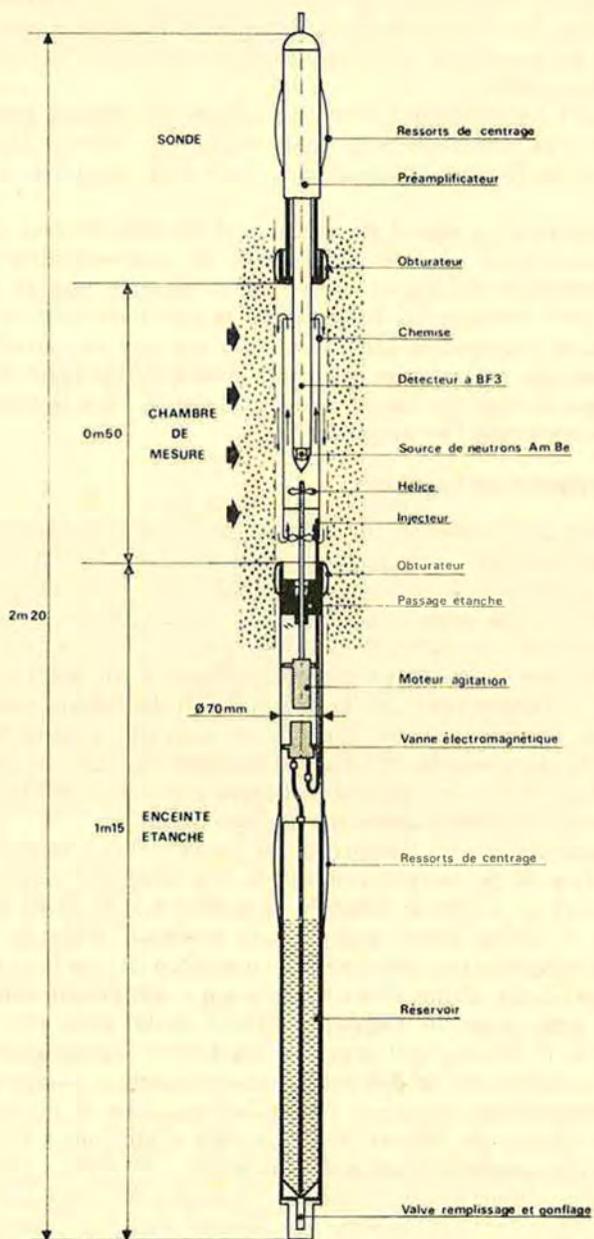


Fig. 1: Schema du rheometre.

Indiquons enfin que le signal est de 1000 chocs/sec avant l'injection de traceur. Lorsque cette dernière est réalisée il est voisin de 500 chocs/sec.

La constante de temps RC de l'ensemble électronique est de 30 secondes.

2. 3. Avantages de l'appareil

Cet appareil présente, par rapport aux appareils utilisant des traceurs radioactifs, deux avantages principaux:

a) Il évite les inconvénients liés à l'approvisionnement et à la manipulation d'éléments radioactifs.

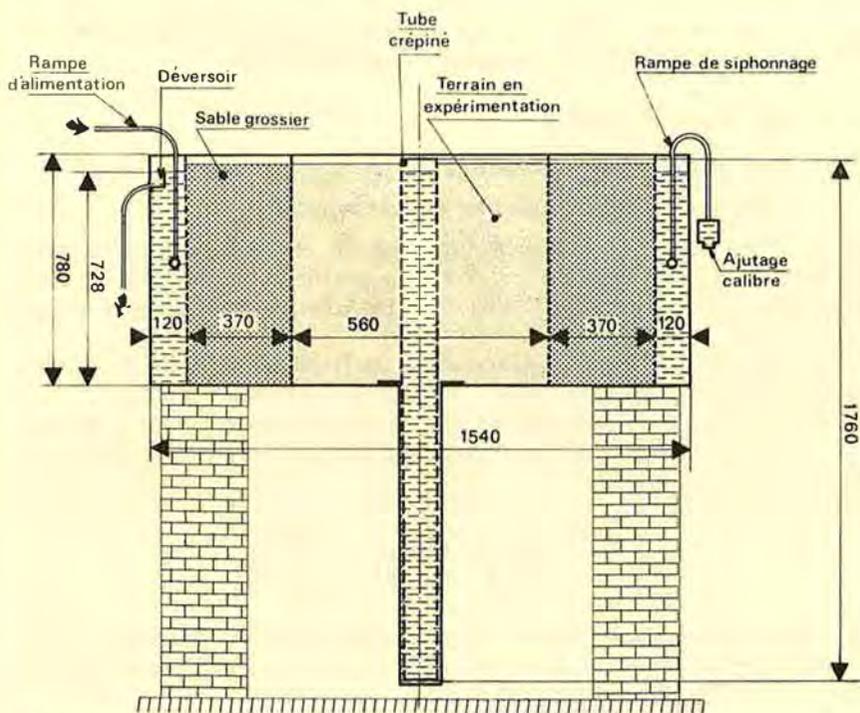


Fig. 2: Cuve rhéométrique.

b) Il autorise plusieurs mesures successives sur un même tube crépiné. Cela n'est pas toujours possible avec les appareils à traceurs radioactifs. En effet, en général, les éléments radioactifs sont partiellement adsorbés sur le terrain au voisinage du tube. Ceci a pour conséquence d'augmenter le bruit de fond et de nécessiter l'injection d'une activité plus grande pour un deuxième essai. En particulier dans notre

cuve expérimentale du laboratoire, lors de notre étude de l'appareil à iode 131, les fortes valeurs du bruit de fond interdisaient la poursuite des essais après deux journées de mesure.

Nous noterons, dans cette comparaison, que la forte densité de la solution de CdSO_4 était „a priori“ un élément défavorable à ce traceur relativement aux traceurs radioactifs. Le dessin et les caractéristiques de la chambre de mesure, qui ont constitué une part importante de notre étude, sont tels que l'effet des courants de densité est évité. Nous devons faire remarquer que la simplicité et la reproductibilité de la mesure des concentrations d'un sel de cadmium par cette méthode en est l'un des avantages certain.

Nous noterons enfin que la partie supérieure de l'appareil comprenant la source et le détecteur peut être dissociée de l'ensemble et utilisée pour la mesure de l'humidité volumique du sol.

3. Etude expérimentale

3. 1. Détermination du coefficient ε

3. 1. 1. Méthode proposée par différents auteurs

La relation donnée dans notre introduction, et qui permet de calculer la vitesse de filtration, fait intervenir le coefficient ε , largeur du flux horizontal intercepté par le tube crépiné relative au diamètre de ce tube.

Les tentatives les plus intéressantes de traitement analytique de la question ont été faites par OGILVI (3), MOSER & NEUMAIER (5) (6).

Une erreur s'est certainement glissée dans l'expression de ε donnée par OGILVI dans (3), mais sa méthode d'analyse doit être analogue à celle de MOSER qui donne:

$$\varepsilon = \frac{4}{1 + \left(\frac{r}{R}\right)^2 + \frac{K_2}{K_1} \left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right]}$$

où r et R sont respectivement les rayons intérieurs et extérieurs d'une couronne cylindrique de matériau filtrant K_1 et K_2 les coefficients de perméabilité du filtre et du terrain.

Le problème est déplacé, car il s'agit alors de déterminer $\frac{K_2}{K_1}$. MOSER a fait une très intéressante étude expérimentale et théorique de ce problème; il recourt finalement à un étalonnage.

Citons aussi les travaux de MAJRHOFFER & ZUBER (7) qui, traitant expérimentalement la question, raisonnent sur le modèle d'OGILVI. Ils ont apporté les conclusions intéressantes suivantes: pour un taux de perforation de 10% et $V_f < 40$ m/j, on a $\varepsilon = 2$; pour $V_f > 40$ m/j, la même valeur est atteinte pour un taux de perforation de 30%.

3. 1. 2. Méthode du CENG

Afin d'éviter l'étalonnage expérimental nécessaire pour définir le coefficient ε nous avons étudié une représentation analogique du phénomène d'écoulement des filets d'eau au voisinage du piézomètre.

3. 1. 2. 1. Principe de la méthode d'analogie électrique

Les écoulements en milieux poreux obéissent à la loi de DARCY

$$\vec{V} = -K \text{ grad } h$$

ou \vec{V} est le vecteur vitesse, K le coefficient de DARCY (perméabilité pour l'eau) et $\text{grad } h$ le gradient hydraulique au point considéré (8). Il devient alors possible, si l'écoulement est horizontal, de représenter l'écoulement sur une longueur dl par la relation

$$\frac{\vec{dh}}{dl} = \frac{\vec{V}}{K}$$

Or, dans un corps conducteur si \vec{j} est le vecteur courant électrique on a la relation.

$$\vec{j} = -\frac{1}{\rho} \text{ grad } E$$

où ρ est la résistivité et $\text{grad } E$ le gradient électrique au point considéré: En appliquant la loi d'OHM à la chute de tension dU le long d'une longueur dL l'intensité traversant un segment de conducteur d'épaisseur e et de largeur unité devient:

$$I = -\frac{e}{\rho dL} \cdot dU$$

En posant $c = \frac{1}{\rho}$ conductivité du conducteur et en remarquant que $\frac{1}{e} = \sigma$ est une densité de courant, l'équation du gradient de la tension peut s'écrire

$$-\frac{dU}{dL} = \frac{\sigma}{c}$$

Les deux lois régissant l'écoulement de la nappe et le passage du courant sont représentées par des équations semblables. La correspondance entre les paramètres régissant les deux phénomènes est alors:

Perméabilité	→	Conductance
Gradient hydraulique	→	Potentiel électrique
Débit hydraulique	→	Intensité du courant

3. 1. 2. 2. Cas d'un conducteur plan

Dans l'analogie directe, un modèle isolant ou de résistivité donnée est placé au milieu du plan conducteur. Cette réalisation permet d'étudier la déformation d'un champ uniforme due à la présence d'un objet cylindrique ou quelconque. On obtiendra ainsi l'image d'un écoulement uniforme autour d'un obstacle.

Le tracé des équipotentiels donne l'image des lignes potentielles hydrodynamiques d'un écoulement dirigé suivant l'axe des électrodes.

On peut encore chercher à définir les lignes orthogonales aux précédentes (analogie inverse). Il suffit de remplacer le modèle isolant par un modèle conducteur, les équipotentiels représentent alors les lignes de courant de l'essai précédent.

Transposées dans le domaine analogique, ces équipotentiels sont les images de lignes de courant de l'écoulement hydrodynamique.

La superposition des tracés obtenus par ces deux expériences donne le réseau orthogonal classique.

3. 1. 2. 3. Résultats des mesures

Nous avons traité le problème par la deuxième analogie en utilisant comme conducteur plan du papier „TELEDELTA“ de la Sté française des diagrammes (résistance $500 \Omega \text{ cm/cm}$). Le tube piézométrique était figuré par une couronne d'un dépôt de laque d'argent très conductrice, les trous de crépinage ainsi que l'intérieur du forage étaient simplement découpés dans la couronne et le papier. Considérant la parfaite symétrie du modèle nous n'avons figuré que le quart du forage et du tube.

L'étude a porté sur les valeurs relatives de ε par rapport au diamètre du tube en fonction du nombre et de la dimension des trous de crépinage (figure 3). Nous avons figuré un mode de crépinage déjà utilisé tant au laboratoire que sur le terrain, constitué par des fentes longitudinales de 10 cm de long en nombre et en largeur variables, imbriquées sans recouvrement.

L'analogie portant sur une section horizontale du tube les fentes peuvent être assimilées à des trous ou inversement, l'important étant que la perméabilité relative du tube soit constante sur toute la section verticale de mesure.

Nous avons fait varier la largeur des fentes depuis une valeur minimum de 2 mm en exprimant toujours la valeur de ε en fonction du rapport

$$\frac{\text{aire des fentes}}{\text{aire totale}}$$

Nous avons tout d'abord vérifié le cas du tube parfait pour lequel nous avons trouvé $\varepsilon = 2$ fois le diamètre du trou. Nous avons ensuite étudié le cas de crépinages à 4, 6, 8 et 12 fentes (fig. 7 et 8) pour lesquels

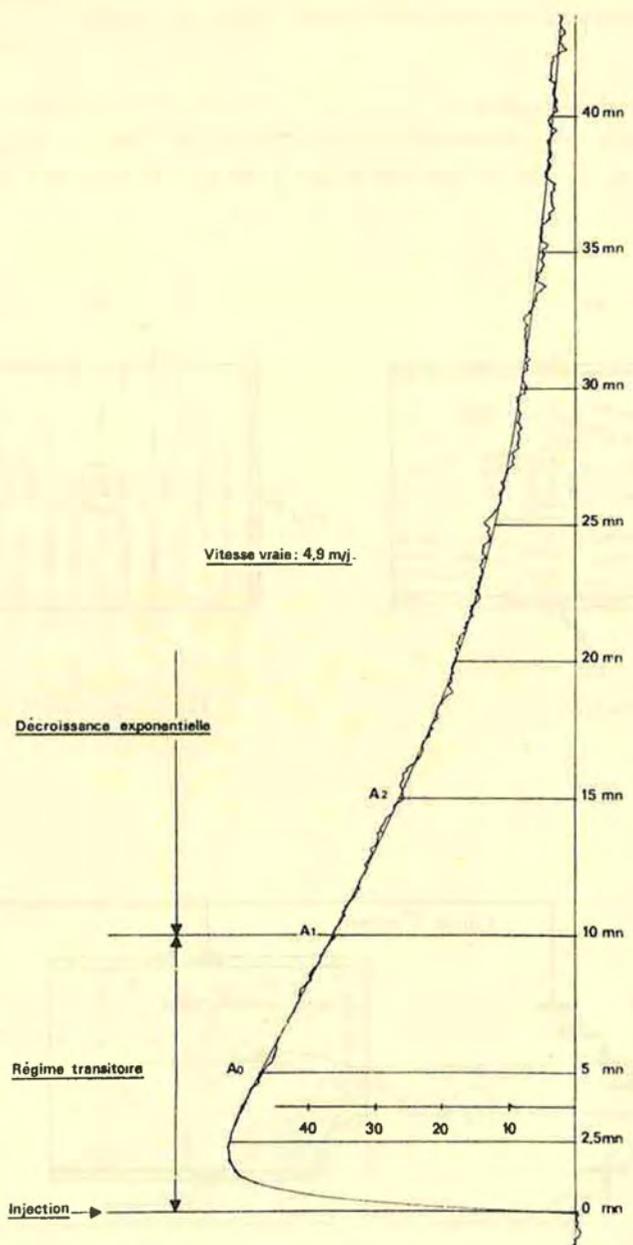


Fig. 4: Essai du 14. 10. 1966.

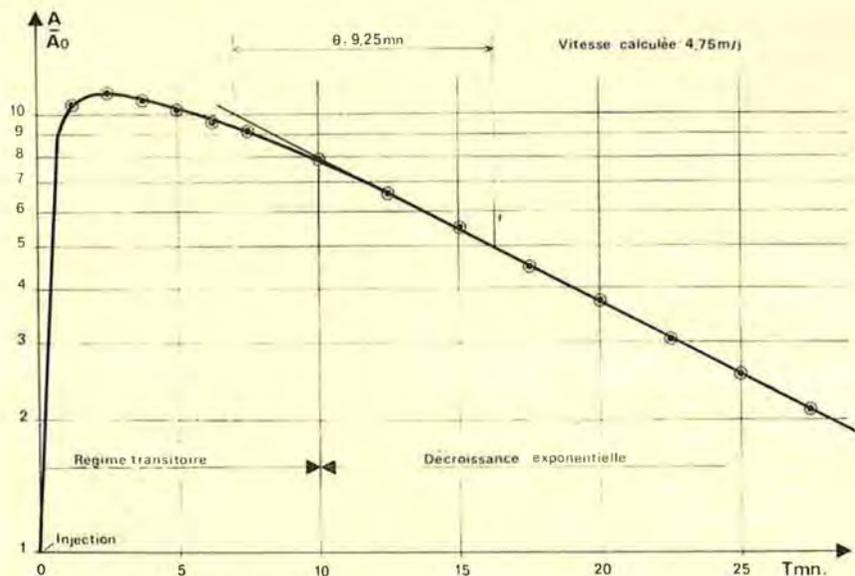


Fig. 5: Exploitation de l'enregistrement du 14.

Nous avons également considéré le cas où le tube crépiné est entouré (pour des raisons pratiques de mise en place) par une couronne de gravier, c'est-à-dire de matériaux plus perméables que le terrain environnant. En analogie, cette couronne a été figuré par du papier »TELEDELTO« de résistance $50 \Omega \text{ cm/cm}$.

Au vu de ces résultats nous avons considérés pour nos essais pratiques que l'utilisation d'un tube crépiné à 8 fentes de 10 cm de long imbriquées sans recouvrement ne posait pas de difficultés particulières de réalisation et offrait une parfaite constance de ε quelle que soit la direction de l'écoulement.

3. 2. Etude expérimentale de l'appareil

3. 2. 1. Mise au point de l'appareil

L'étude expérimentale a porté principalement sur la détermination de la géométrie de la chambre de mesure, de la chemise centrale, de la forme du nombre, de la position des hélices et de leur vitesse de rotation, pour éviter l'effet des courants de densité.

Les résultats auxquels nous sommes parvenus sont définis au paragraphe 2. 2.

Les essais ont été réalisés dans une cuve expérimentale (figure 2), remplie de sable, de perméabilité $2.5 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$. Le tube piézométrique métallique avait un diamètre intérieur de 90 mm et extérieur de 102 mm.

Il comportait 8 fentes de 100 mm de hauteur, 2 mm de largeur, imbriquées sans recouvrement.

La figure 4 reproduit l'un des enregistrements obtenu. Après une période transitoire suivant l'injection du traceur, la courbe prend une allure exponentielle.

Cet enregistrement est traduit à la figure 5 sur une diagramme semi-logarithmique. On remarquera que la courbe obtenu est parfaitement exponentielle.

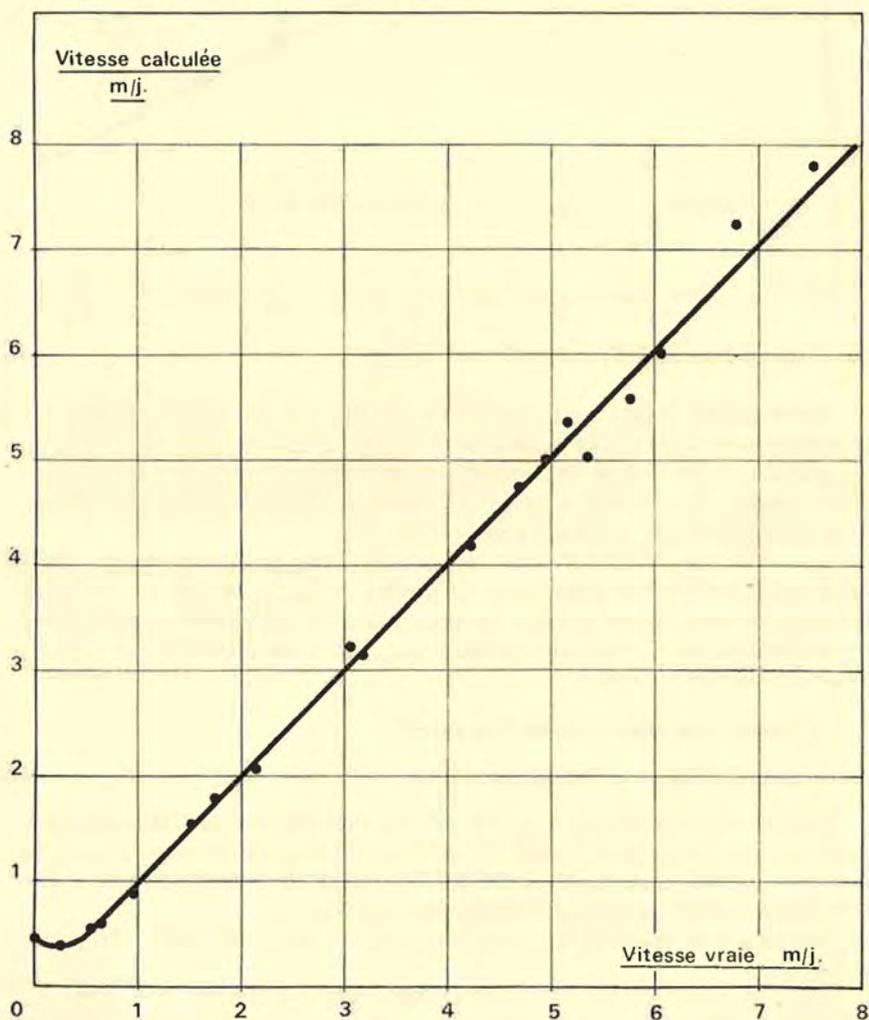


Fig. 6: Resultats des mesures.

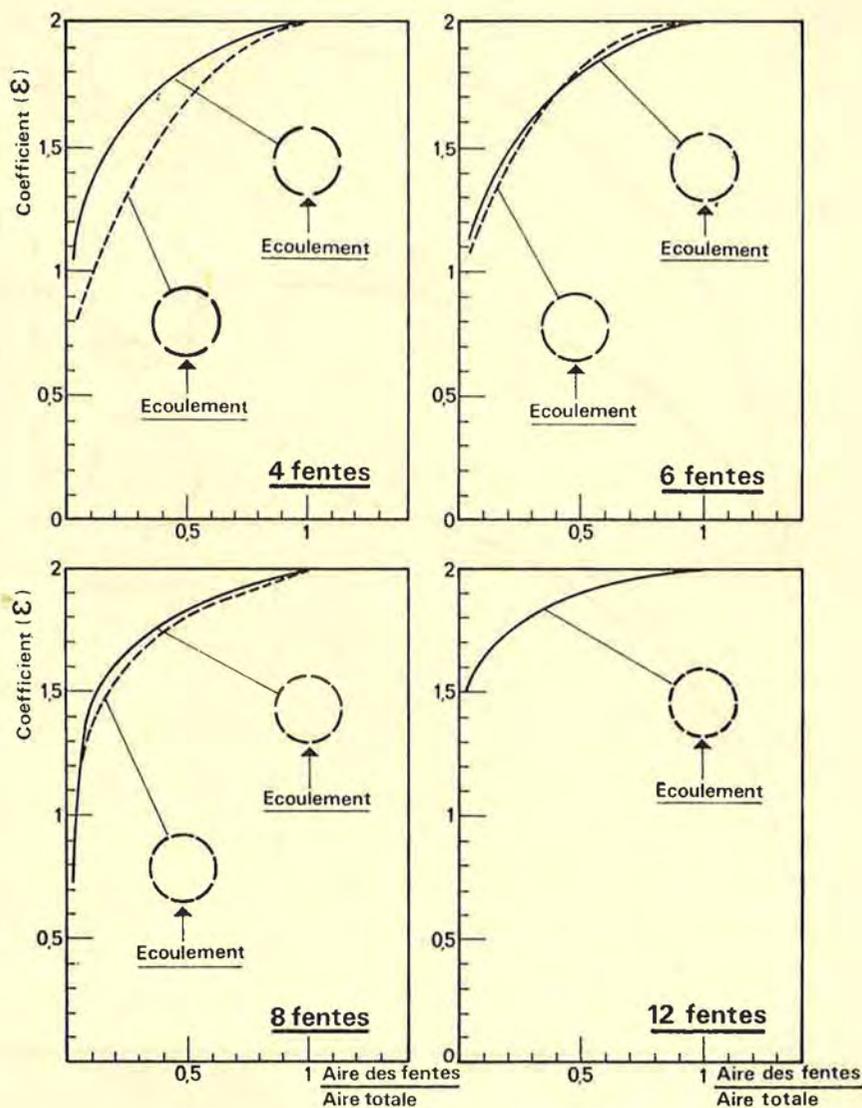


Fig. 7: Variations de « ϵ » en fonction du nombre, de la largeur et de l'orientation des fentes.

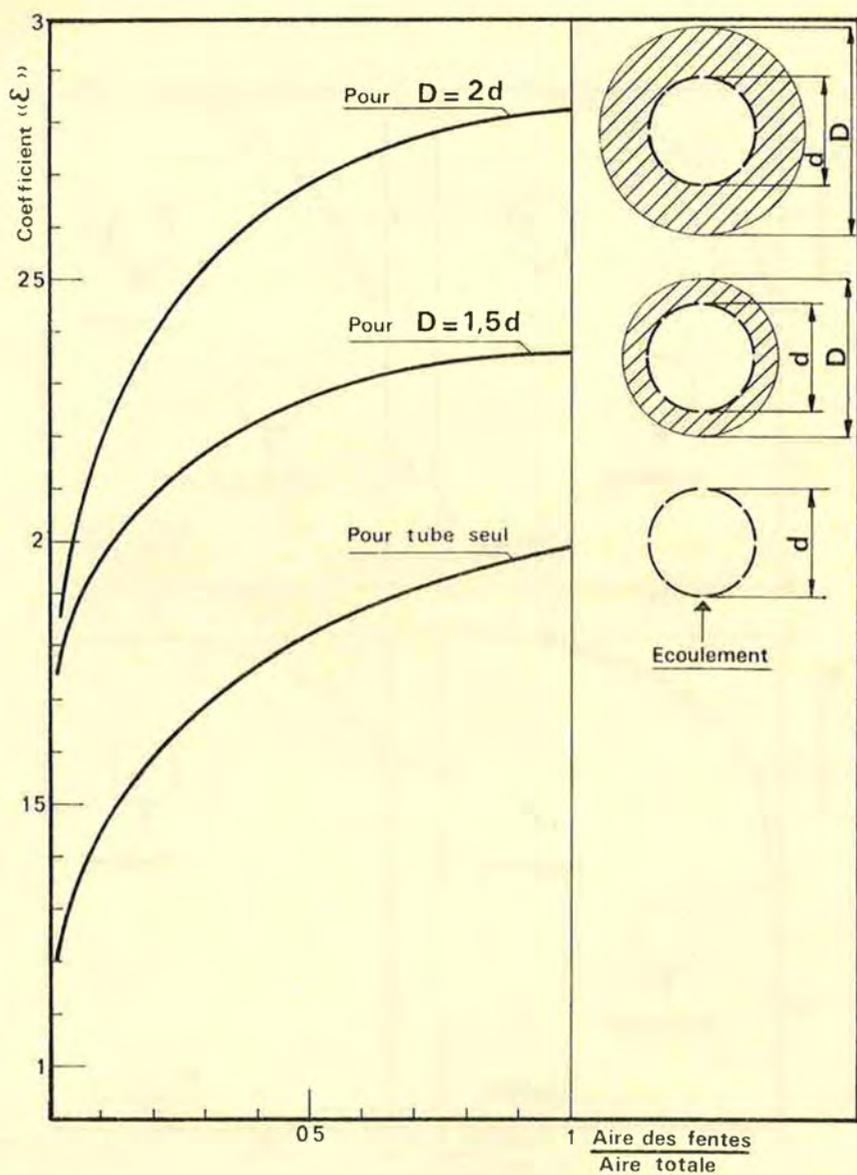


Fig. 8: Variations de « ϵ » en fonction des dimensions d'une couronne de materiau filtrant.

3. 2. 2. Traduction de la mesure — Résultats — Vérification de la méthode d'analogie électrique

La vitesse de filtration est déterminée en prélevant à la sortie de la cuve un volume donné d'eau pendant un certain temps. Cette vitesse est appelée vitesse vraie sur le graphique de la figure 6. Par ailleurs, la vitesse est calculée à partir des résultats des mesures de concentration en CdSO_4 . Ce calcul fait intervenir la valeur de ε déterminée par analogie électrique.

On remarque que la vitesse vraie et la vitesse calculée sont liées par une relation linéaire dans la partie de la gamme de vitesse explorée. La droite représentant cette relation a un coefficient angulaire de 45° ce qui est une excellente vérification indirecte de la méthode d'analogie électrique.

Le phénomène antagoniste pour les faibles vitesses est la diffusion du traceur. Il est certain que ce phénomène n'est pas indépendant de la perméabilité. Pour une vitesse vraie nulle, la vitesse calculée est voisine de 40 cm/jour. Cet effet de la diffusion est cependant minimisé lorsqu'un écoulement a lieu; en effet, le traceur diffusant vers l'amont est réinjecté par l'écoulement dans la chambre de mesure.

References

- MOSEER, H. & al.: Atomkernenergie, **6**, 2 (1957), 225.
- GUIZERIX, J. & al.: Appareil pour la mesure des vitesses relatives des eaux souterraines par la méthode de dilution ponctuelle. Proc. Symp. Application Rad. in Hydrology IAEA. — Tokyo, 5 March 1963, p. 25.
- OGLIVI, N. A.: Electrical method for measurement of the filtration velocity of subterranean waters. Bulletin for the Scientific and Technical News, **4**, 1958, Gosgeoltekhizdat.
- FRITSCH, V. & al.: Acta hydrophysica, Band X, Heft 3, des Instituts für Physikalische Hydrographik der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1966, p. 111.
- MOSEER, H. & F. NEUMAIER: Forschungsstelle für Radiohydrometrie in München, Jahresbericht 1964 und 1965.
- KOCH, A.: Über die Bestimmung der Ergiebigkeit einer Grundwasserströmung nach dem Verdünnungsverfahren. Diplomarbeit Universität de Munich 1966.
- BOROWCZYK, M., J. MAIRHOFER & A. ZUBER: Laboratory investigations on the determination of the filtration velocity by means of radioisotopes. P. A. N. Varsovie 1964 et Atomkernenergie, **10** (1965), pp. 51—56.
- MULLER-FEUGA, R. & P. RUBY: Adaption de la méthode du papier conducteur pour l'étude par analogie électrique des nappes de faible épaisseur relative. Chronique d'Hydrogéologie, BRGM, **4**, 1964, p. 59.

Summary

The authors give a detailed description of their apparatus for measuring horizontal filter velocities in a single bore-hole. This apparatus employs the classical method of punctual dilution, which determines filter velocities on the basis of the changes in the concentration of a tracer that has been injected into a section of a bore-hole. With the aid of this apparatus the changes in the concentration of the cadmium sulphate can be measured on the basis of the measurement of a thermic stream of neutrons that emanates from a neutron-emitting source. Compared with the radioactive tracers generally used with this method, the inactive tracer has the advantage of avoiding the difficulties connected with the use of conductors, i. e. the necessity of frequent injections, the pollution of the waters, and the handling of radioactive material. Moreover, this apparatus enables several successive measurements to be taken in the same bore-hole, which is mostly impossible with a radioactive tracer, as this is absorbed into the soil.

Zusammenfassung

Die Verfasser beschreiben die Einzelheiten eines Gerätes zur Messung der horizontalen Filtergeschwindigkeiten in einem Bohrloch mit Saugkorb.

Dieses Gerät verwertet die klassische Methode der punktweisen Verdünnung, bei der man zur Bestimmung der Filtergeschwindigkeiten die Konzentrationsänderungen eines in einen Abschnitt eines Bohrloches eingespeisten Triftgutes verwendet. Mit dem vorliegenden Gerät kann man die Konzentrationsveränderungen an Cadmiumsulfat messen, auf Grund der Messung eines thermischen Neutronenstroms, der von einer Neutronenquelle ausgeht. Der Vorteil eines inaktiven Triftgutes im Vergleich zu dem bei dieser Methode ganz allgemein verwendeten radioaktiven Triftgut besteht darin, daß man die besonderen, mit dem Gebrauch dieses letzteren verbundenen Probleme vermeiden kann, nämlich die Notwendigkeit einer häufigen Einspeisung, die Verschmutzung der Wässer und das Arbeiten mit radioaktivem Material. Im besonderen ermöglicht das Gerät mehrere Messungen hintereinander im selben Bohrrohr, was mit einem radioaktiven Triftgut meist unmöglich ist, da das letztere im Boden absorbiert wird.

Discussion

E. HALEVY: Could you tell me if you studied the absorption of cadmium in your experiments and could you indicate whether this instrument is ready for field-use?

J. GUIZERIX: I have not made such studies of the absorption of cadmium in soils. I don't know if the cadmium is a good or a bad tracer of ground-water. But in this apparatus we need to have cadmium solution only in the room measurement and we don't care for the absorption of the tracer out of this room.

The answer to the second question is: We are just now finishing the making of the prototype in the laboratory, but I think that after a few months of the verification of the prototype in the laboratory the apparatus will be ready for field-use.

O. FLORKOWSKI: Mister GUIZERIX could you give us some more detailed informations about the last question you mentioned? I mean the correlation between tritium-peak in rain-water, river- and underground-water.

(Cette partie de la discussion est relative à un commentaire de M. GUIZERIX, sur le problème général des traceurs en hydrogéologie. Il mentionne le ^{51}Cr EDTA, dont une méthode de concentration sur charbon actif étudié à Grenoble donne une concentration minimale détectable de 10^{-9} ; Puis INa, inactif, dont une méthode de dosage automatique, faisant intervenir un processus d'oxydo-réduction d'ions arsenieux-cérique, donne une même concentration minimale détectable de 10^{-9} . Il souligne enfin l'intérêt du tritium d'origine thermonucléaire comme traceur »naturel« des eaux souterraines, et en particulier d'une méthode d'accès à l'information basée sur l'exploitation des variations de concentration de ce traceur qui apparaissent au niveau des précipitations.)

J. GUIZERIX: The princip for the establishment of such correlations is quite simple. That's if we have peaks, we have signals and if we have signals, we have information. We have every year in a certain time between June and July one peak to tritium concentration in rain-water. Last year or the year before the ratio peak/valley was about five or six, then we have a very interesting peak. And about the application I told you, it was schematically the following one. In a karstic country there is somewhere important losses of a river called Artuby. Elsewhere there is an important spring called Fontaine-Lévêque close to a future dam (1.6 milliard cubic meters). One part of the problem is the existence of a correlation between the two points. We have made during one year measurements of tritium in rain-water, river-water, in different parts of this basin. Nature was good for us because we have obtained two peaks in tritium concentration of the Artuby. I cannot develop here the hypothesis that we can do on the origin of theses peaks, one only being strongly correlated with the peak of concentration in rain-water. At least a close correlation in time was established between these two peaks, and two peaks of concentration found in Fontaine-Lévêque. A preceding experiment with fluorescein had shown this communication between these two points distant of 30 km. Here was for us the demonstration of the interest of the method.