

Zeitschrift: Bulletin der Vereinigung Schweiz. Petroleum-Geologen und -Ingenieure
Band: 39 (1972-1973)
Heft: 94

Artikel: Influence de l'hétérogénéité de la perméabilité des roches sur la surface piézométrique : quelques essais réalisés sur papier conducteur
Autor: Simeoni, Gianpietro / Tripet, Jean-Pierre
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-198491>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 06.10.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Influence de l'hétérogénéité de la perméabilité des roches sur la surface piézométrique : quelques essais réalisés sur papier conducteur

par GIANPIETRO SIMEONI et JEAN-PIERRE TRIPET*)
avec 8 figures

Résumé

L'hétérogénéité de la perméabilité des roches calcaires fissurées joue un rôle très important dans l'organisation des systèmes d'écoulement souterrain. Le but de cette étude est de mettre en évidence l'influence de quelques cas d'hétérogénéité de forme simple sur la distribution des potentiels hydrauliques, sur la forme de la surface piézométrique ($\varphi = z$) et surtout sur les fluctuations de cette dernière dans le temps.

La technique utilisée est celle des modèles en papier conducteur.

Abstract

Heterogeneity of permeability in fractured limestones is a very important factor of the organization of the groundwater flow systems. The aim of this study is to show the influence of some simple-shaped heterogeneities on the distribution of hydraulic heads, on the shape of the water table, and especially on the variations of the water table versus time.

The method is that of electric analogs made on conductive paper.

1. Introduction

1.1. *Problèmes posés par la détermination des systèmes d'écoulement souterrain*

Il a été démontré que la détermination des systèmes d'écoulement souterrain tels que TOTH (1963) les a définis était de première importance dans l'étude du mouvement naturel des eaux souterraines d'un bassin hydrogéologique (KIRALY, 1969b). Pour pouvoir déterminer les systèmes d'écoulement, il faut connaître le champ des perméabilités K (coefficient de perméabilité de DARCY) et celui des potentiels hydrauliques φ ; la reconstruction du champ φ exige la connaissance de la surface piézométrique¹).

Les mesures directes de perméabilité et de niveau piézométrique se font dans les puits ou dans les piézomètres; dans les pays calcaires, le Jura notamment, ces facteurs ne peuvent être étudiés qu'en de rares points, en raison du coût très élevé des forages profonds dans de telles roches. La connaissance des champs K et φ exige donc la mise en évidence de relations entre ces deux paramètres et les facteurs géologiques directement observables en surface, pour permettre l'extrapolation des mesures isolées de perméabilité et de

1) Dans le présent travail, *surface piézométrique* est pris au sens de lieu géométrique des points pour lesquels $\varphi = z$, où $z =$ altitude du point par rapport à un niveau de référence; il s'agit donc de la surface supérieure de la zone noyée. Le *niveau piézométrique* h désigne la grandeur $\varphi = z$ en un point donné.

*) Université de Neuchâtel, Centre d'Hydrogéologie, 2000 Neuchâtel 7.

niveau piézométrique à tout le bassin hydrogéologique (KIRALY, 1969b). Une méthode de calcul de K à partir des paramètres de la fissuration des roches a été décrite (KIRALY, 1969a); la détermination de la surface piézométrique à partir de facteurs facilement observables, qui sont d'ordre géologique, morphologique et climatique, est un problème plus complexe et encore non résolu.

Par la méthode des modèles analogiques électriques en papier conducteur, KIRALY (1970) a montré l'influence du champ des perméabilités (hétérogénéité et anisotropie) sur les systèmes d'écoulement, et notamment sur le champ des potentiels; dans l'étude citée, la surface piézométrique a été fixée arbitrairement.

1.2. *Etude des variations naturelles du niveau piézométrique*

Les piézomètres permettent d'observer un facteur hydrologique qui n'a pas été mentionné dans le paragraphe précédent: les variations naturelles du niveau piézométrique, $h = f(t)$, où h = niveau piézométrique et t = temps. La fonction $h = f(t)$ est en relation avec le champ des perméabilités; de récents travaux (UNGEMACH, 1969; DEGALLIER, 1969) décrivent des méthodes de calcul des propriétés physiques de l'aquifère à partir des variations naturelles de h . Il est donc important d'envisager l'exploitation de ces données pour compléter les résultats acquis par d'autres méthodes d'étude des systèmes d'écoulement souterrain.

Dans le cadre d'une étude hydrogéologique actuellement en voie d'achèvement dans le Haut-Jura neuchâtelois (bassin karstique de la source de l'Areuse), l'enregistrement continu des variations naturelles de h dans cinq piézomètres montre des déformations sensibles des courbes d'abaissement de la surface piézométrique, en période non influencée, attribuées à l'hétérogénéité de la perméabilité (TRIPET, en préparation). Le système d'écoulement observé se situe dans les calcaires fissurés du Malm, épais de 350 m. environ.

Le but de la présente étude est de mesurer l'influence de quelques cas d'hétérogénéités simples sur la surface piézométrique et ses variations dans le temps. Les résultats obtenus seront ensuite confrontés avec les limnigrammes observés sur le terrain.

1.3. *La méthode utilisée*

Les mesures qui suivent ont été réalisées au moyen de la méthode des modèles analogiques électriques en papier conducteur. Les méthodes de l'analogie électrique ont pour base l'identité existant entre les lois qui régissent l'écoulement des fluides en milieu poreux et celles qui régissent les phénomènes de conduction électrique en milieu continu. L'utilisation des modèles en papier conducteur a été décrite par BONNET (1970). Ces modèles sont bi-dimensionnels; dans le cas présent, ils simulent des écoulements dans le plan vertical. Leur champ d'application est limité au cas des écoulements en régime permanent; les exemples traités ici ayant pour but l'étude des variations de la surface piézométrique dans le temps, ce phénomène transitoire a été ramené à une succession d'états permanents.

Le milieu conducteur utilisé a été soit du papier graphité disponible dans le commerce, dit papier télédeltos, soit du simple papier calque sur lequel a été appliquée une couche de graphite au moyen d'un crayon. Dans le premier cas, l'hétérogénéité est introduite par découpage d'une surface dans le modèle; le second cas offre de plus larges possibilités puisqu'il permet d'obtenir divers contrastes de conductibilité grâce à l'utilisation de crayons de duretés variées pour le graphitage du papier. Cette dernière méthode a déjà été utilisée par KIRALY (1970).

Dans les exemples qui suivent, les échelles verticale et horizontale sont identiques; l'unité de longueur est arbitraire, sans dimension. L'unité de potentiel est la même que celle des variables spatiales; elle est représentée sur les figures par une échelle, qui donne la position du potentiel zéro. Aux limites amont et aval du modèle, la ligne équipotentielle a été choisie verticale; de cette façon, le modèle représente une partie d'un système d'écoulement souterrain, dont les zones d'alimentation et d'exutoire sont suffisamment éloignées pour que les lignes d'écoulement fassent un angle faible avec l'horizontale aux limites de la zone étudiée (pratiquement, et par simplification, cet angle est nul).

Le principe de l'analogie électrique implique que le milieu réel considéré est saturé et que l'on se trouve dans les limites d'application de la loi de DARCY; dans les exemples étudiés ici, les conditions aux limites ont donc été fixées telles que les variations dans le temps de la surface piézométrique correspondent à un tarissement exponentiel de l'exutoire du système d'écoulement. La valeur du potentiel aux limites, h_t (amont) et h_t (aval), pour chaque état permanent successif, est donnée par les fonctions

$$\begin{aligned} h_t \text{ (amont)} &= h_o \text{ (amont)} \cdot e^{-0,026 t} \\ \text{et } h_t \text{ (aval)} &= h_o \text{ (aval)} \cdot e^{-0,026 t} \end{aligned}$$

pour des valeurs choisies de la variable de temps t exprimée en jours; elle est notée sur les figures par la mention $df. \varphi = C^e$.

2. Mesures expérimentales

2.1. Nature de l'hétérogénéité: zone de perméabilité nulle

Dans le premier exemple, l'hétérogénéité consiste en une zone de perméabilité nulle ($K = 0$) dans un milieu homogène; la perméabilité de ce dernier est égale à environ 150 dans l'échelle des valeurs de K adoptée pour les exemples suivants. Le milieu conducteur est du papier télédeltos dans lequel une surface a été découpée pour obtenir une zone imperméable (fig. 1).

Le champ des potentiels et la surface piézométrique ont été étudiés pour une douzaine de valeurs des potentiels aux limites. La fig. 1 montre les lignes équipotentielles et la surface piézométrique (en trait plein) pour φ (amont) = 2,40 et φ (aval) = 0,60; le trait pointillé représente la surface piézométrique correspondant à φ (amont) = 0,80 et φ (aval) = 0,20.

La surface piézométrique correspondant à un milieu homogène de perméabilité $K = 150$, avec des conditions aux limites identiques, est figurée en tireté. On voit que, dans les conditions données, le gradient hydraulique moyen entre un point de la surface piézométrique situé en amont de la zone imperméable et un autre à la limite aval du modèle a une valeur plus élevée que dans le cas homogène; l'inverse se produit pour un point situé en aval de la zone imperméable.

Les états successifs de la surface piézométrique permettent de déterminer la fonction $h = f(t)$ en un point quelconque du modèle. Ceci a été fait pour les points numérotés 1 à 6 à la fig. 1; les courbes résultantes ont été reportées à la fig. 5, en échelle semi-logarithmique.

Les courbes No 1 et 6 correspondent aux potentiels imposés; rappelons qu'il s'agit de courbes exponentielles (voir paragraphe 1.3.). Le No 2 est, dans ce mode de représentation, une droite parallèle aux précédentes. L'influence de l'hétérogénéité se fait sentir sur les courbes No 3, 4 et 5; elles peuvent être caractérisées, dans la représentation utilisée, par des segments de droite de pente généralement différente (supérieure ou inférieure) à la pente des No 1, 2 et 6, reliés entre eux par des courbes avec ou sans point

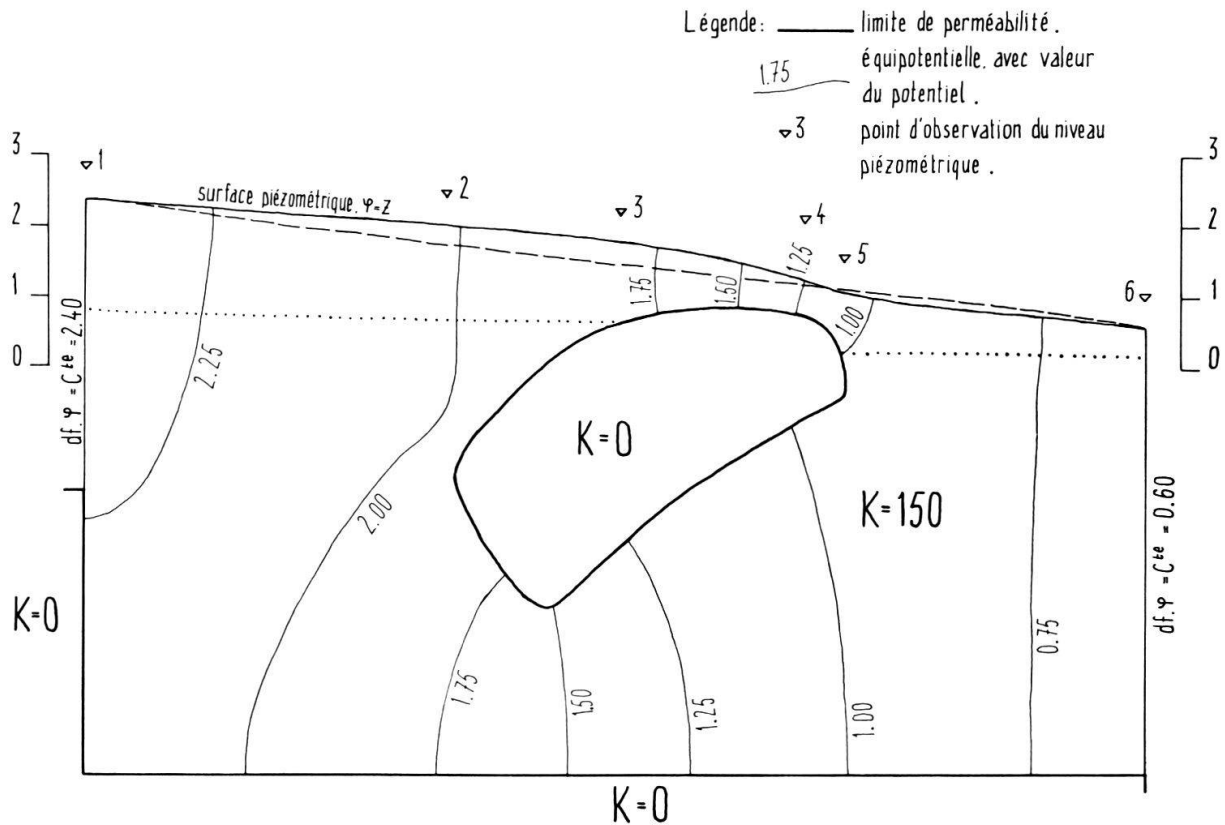


Fig. 1. Ecoulement en milieu hétérogène (surface piézométrique et équipotentiels). Nature de l'hétérogénéité: zone de perméabilité nulle ($K = 0$), dans milieu homogène ($K = 150$). Lignes en tireté et en pointillé: explications dans le texte.

d'inflexion. La surface piézométrique peut s'abaisser à une cote inférieure à celle de la surface supérieure de la zone imperméable; des piézomètres implantés à la verticale des points 3 et 4, s'ils ont été poussés jusqu'à l'intérieur de la zone imperméable sans la traverser, permettront d'observer, à partir d'un certain moment, un niveau d'eau immobile (représenté par une droite horizontale à la fig. 5): l'eau piégée dans le tube, isolée du système d'écoulement.

2.2. Nature de l'hétérogénéité: zone de perméabilité faible

Dans le deuxième exemple, l'hétérogénéité consiste en une zone de perméabilité faible ($K = 1$ par définition) dans un milieu homogène plus perméable ($K = 150$ environ; peut varier de 100 à 200). Le milieu conducteur est du papier calque sur lequel a été appliquée une couche de graphite au moyen de deux crayons de dureté différente; la conductibilité électrique du milieu le plus conducteur est voisine de celle du papier télé-deltos (fig. 2).

Le champ des potentiels et la surface piézométrique ont été étudiés pour sept valeurs des potentiels aux limites. La fig. 2 montre les lignes équipotentiels et la surface piézométrique (en trait plein) pour φ (amont) = 5,50 et φ (aval) = 2,75; le trait pointillé représente la surface piézométrique correspondant à φ (amont) = 4,00 et φ (aval) = 2,00.

La surface piézométrique correspondant à un milieu homogène de perméabilité $K = 150$, avec des conditions aux limites identiques, est figurée en tireté. Comme pour le cas précédent, on voit que le gradient hydraulique moyen entre un point de la surface pié-

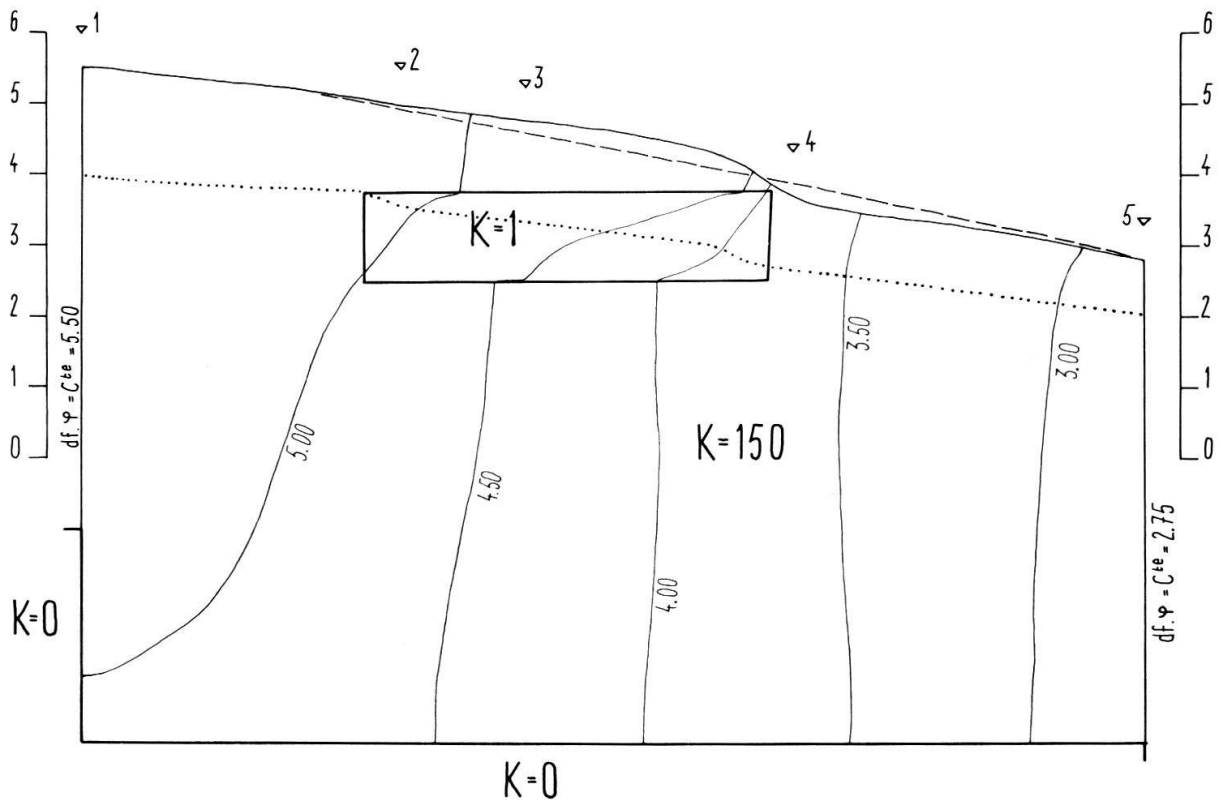


Fig. 2. Ecoulement en milieu hétérogène (surface piézométrique et équipotentielles). Nature de l'hétérogénéité: zone de perméabilité faible ($K = 1$), dans milieu homogène ($K = 150$). Légende: voir fig. 1. Lignes en tireté et en pointillé: explications dans le texte.

zométrique situé en amont de la zone peu perméable et un autre à la limite aval du modèle a une valeur plus élevée que dans le cas homogène; l'inverse se produit pour un point situé en aval de la zone peu perméable.

La fonction $h = f(t)$ a été déterminée pour les points numérotés 1 à 5 à la fig. 2; les courbes résultantes ont été reportées à la fig. 6; comme pour les fig. 5, 7 et 8, l'échelle est semi-logarithmique.

Les courbes No 1 et 5 correspondent aux potentiels imposés. L'influence de l'hétérogénéité se fait sentir sur les No 2, 3 et 4; la déformation maximum se produit au-dessus de la zone peu perméable. Pour des valeurs faibles de t , les points s'alignent selon des droites, de pente soit supérieure, soit inférieure à celle des No 1 et 5; pour des valeurs élevées de t , on peut supposer que la pente tend à devenir constante et égale à celle des No 1 et 5, même si cet état n'est réalisé, pour l'intervalle étudié, que dans le cas du No 2; pour les trois courbes No 2, 3 et 4, on observe ainsi un point d'inflexion, bien visible et à pente maximum (No 2 et 3), ou peu marqué et à pente minimum (No 4, où l'on peut supposer que le point d'inflexion se situe vers la fin du segment de courbe étudié).

2.3. Nature de l'hétérogénéité: zone de perméabilité élevée

Dans le troisième exemple, l'hétérogénéité consiste en une zone de perméabilité élevée ($K = 150$ environ) dans un milieu homogène moins perméable ($K = 1$). Le milieu conducteur a été obtenu de la même façon que pour le cas précédent (fig. 3).

Le champ des potentiels et la surface piézométrique ont été étudiés pour sept valeurs des potentiels aux limites. La fig. 3 montre les lignes équipotentielles et la surface piézo-

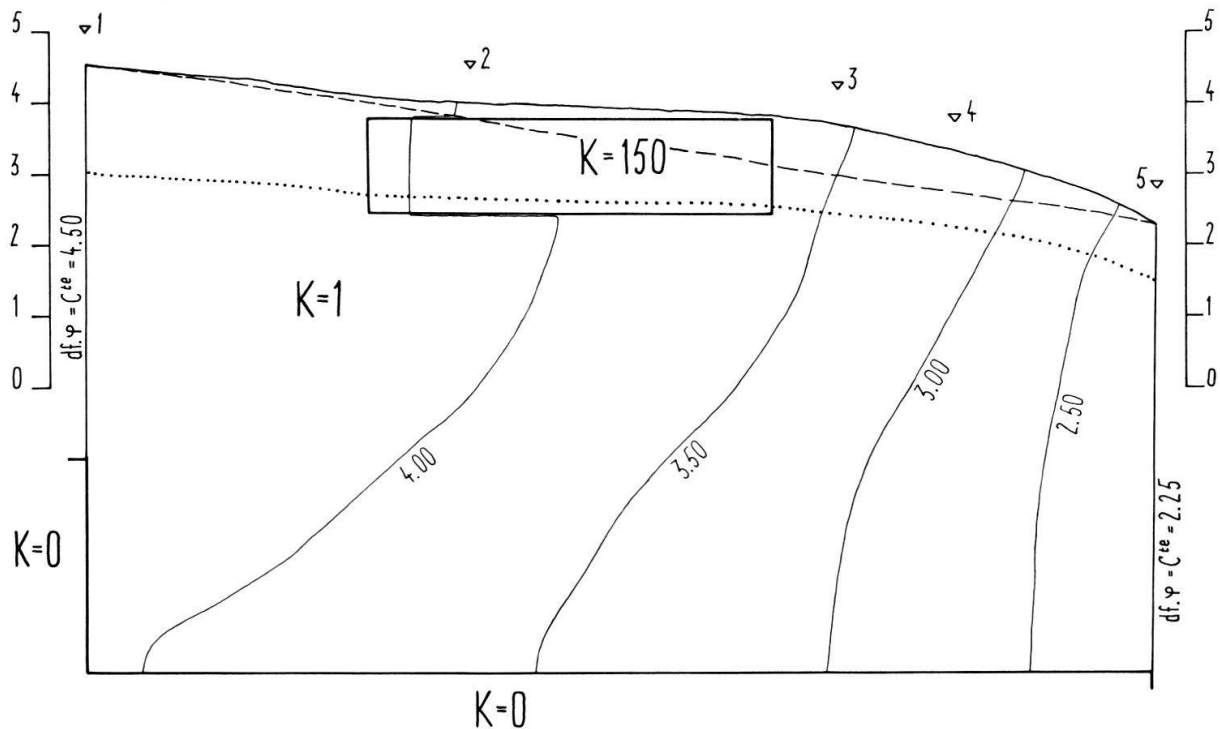


Fig. 3. Ecoulement en milieu hétérogène (surface piézométrique et équipotentiellles).
 Nature de l'hétérogénéité: zone de perméabilité élevée ($K = 150$), dans milieu homogène ($K = 1$).
 Légende: voir fig. 1. Lignes en tireté et en pointillé: explications dans le texte.

métrique (en trait plein) pour φ (amont) = 4,50 et φ (aval) = 2,25; le trait pointillé représente la surface piézométrique correspondant à φ (amont) = 3,00 et φ (aval) = 1,50.

La surface piézométrique correspondant à un milieu homogène de perméabilité $K = 1$, avec des conditions aux limites identiques, est figurée en tireté. On voit que le gradient hydraulique moyen entre un point quelconque de la surface piézométrique et un autre à la limite aval du modèle est plus élevé dans le cas hétérogène.

La fonction $h = f(t)$ a été déterminée pour les points numérotés 1 à 5 à la fig. 3; les courbes résultantes ont été reportées à la fig. 7.

Les courbes No 1 et 5 correspondent aux potentiels imposés. Le No 2 est une droite parallèle aux précédentes. L'influence de l'hétérogénéité se fait sentir sur les No 3 et 4, en aval de la zone de perméabilité élevée; pour des valeurs faibles de t , les points s'alignent selon des droites, de pente inférieure à celle des No 1 et 5; puis les courbes s'infléchissent et deviennent parallèles aux autres.

2.4. Influence des piézomètres

Les fonctions $h = f(t)$ des exemples précédents (fig. 5, 6 et 7) ont été déterminées dans des conditions théoriques; or, le niveau d'eau mesuré dans un piézomètre implanté dans une zone où les équipotentiellles ne sont pas verticales, n'est pas identique au niveau piézométrique naturel; le niveau mesuré est fonction de la profondeur de l'ouvrage (TOTH, 1962, p. 4383 et fig. 5; NAHRGANG, in CASTANY, 1963, p. 254 et fig. 14-6; KIRALY, 1969b).

Dans le but de déterminer si des déformations de la fonction $h = f(t)$ telles que celles mises en évidence dans les exemples précédents peuvent être observées réellement, l'exemple du paragraphe 2.2. (fig. 2) a été repris, et deux piézomètres y ont été simulés (piézomètres ouverts sur toute leur hauteur). Cette situation a été obtenue en traçant deux

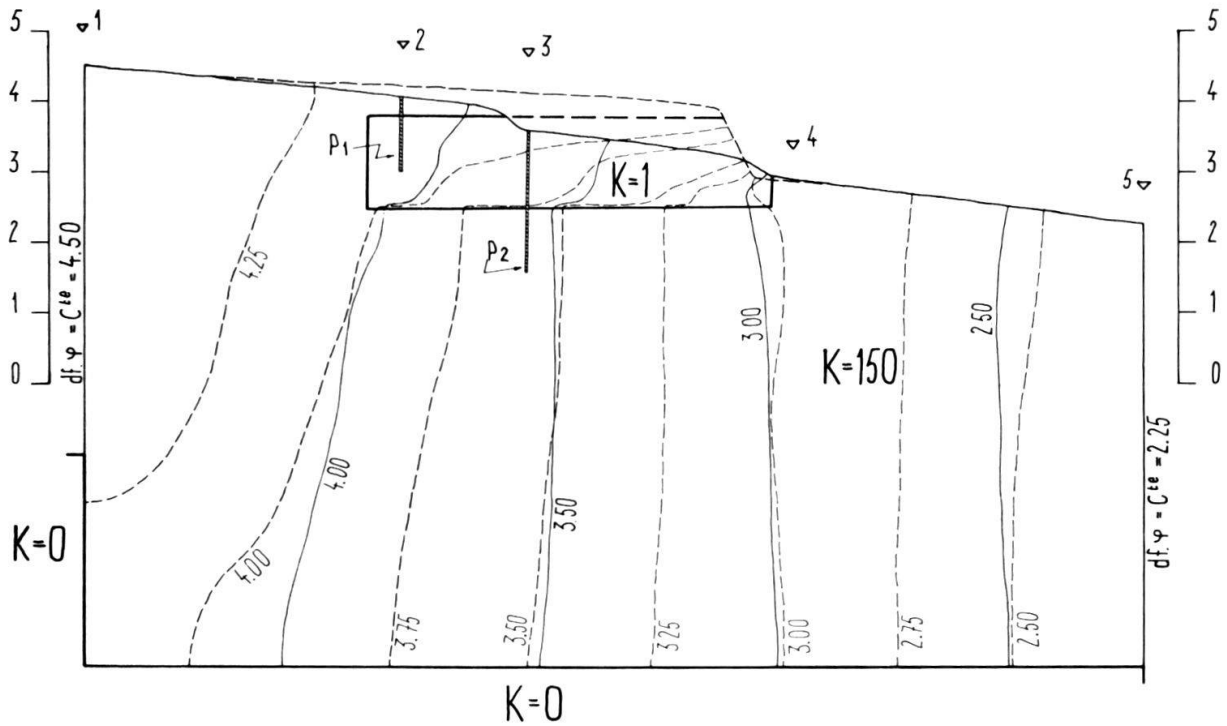


Fig. 4. Influence de la présence de piézomètres sur un écoulement en milieu hétérogène. Nature de l'hétérogénéité: identique à celle de la fig. 2. Légende: voir fig. 1. P1 et P2: piézomètres. Lignes en tireté: explications dans le texte.

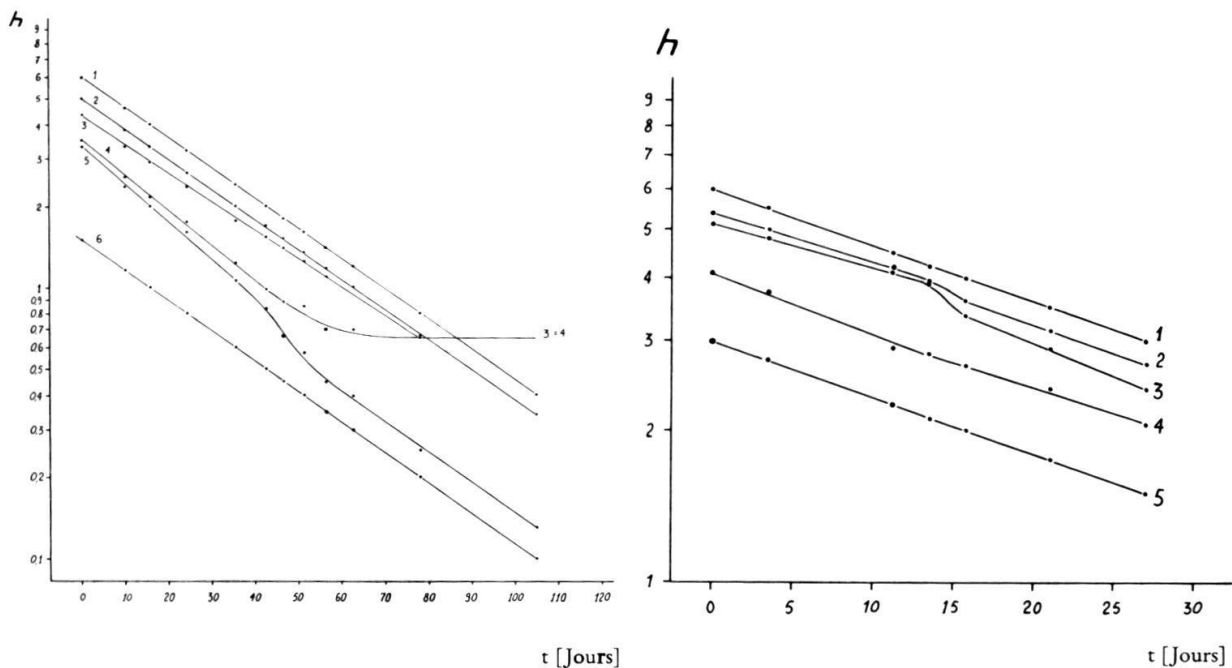


Fig. 5. Abaissement naturel du niveau piézométrique en milieu hétérogène. Nature de l'hétérogénéité et situation des points d'observation: voir fig. 1. h = niveau piézométrique. Chaque courbe porte le numéro du point d'observation à laquelle elle correspond.

Fig. 6. Abaissement naturel du niveau piézométrique en milieu hétérogène. Nature de l'hétérogénéité et situation des points d'observation: voir fig. 2.

traits verticaux, larges de 1 mm, avec de la peinture d'argent, dans la zone où la nature hétérogène du milieu influence d'une façon sensible le champ des potentiels. Ces deux piézomètres sont marqués P1 et P2 à la fig. 4.

Le champ des potentiels et la surface piézométrique ont été étudiés pour sept valeurs des potentiels aux limites. La fig. 4 montre les lignes équipotentiellles et la surface piézométrique (en trait plein) pour φ (amont) = 4,50 et φ (aval) = 2,25; la surface piézométrique et les équipotentiellles correspondant au même milieu, avec des conditions aux limites identiques, mais sans la présence des piézomètres, sont figurées en tireté. L'examen de cette figure appelle les remarques suivantes:

1. Dans les exemples précédents, l'échelle des variables spatiales était donnée en unités arbitraires; à la fig. 4, le diamètre des piézomètres doit être pris comme unité de référence; ainsi, la zone d'influence des deux piézomètres conjugués est inférieure à 200 fois leur diamètre.

2. La surface piézométrique dessinée en trait plein correspond à un état d'équilibre (écoulement permanent); il est probable que l'état réalisé lors de l'abaissement naturel de la surface piézométrique soit intermédiaire entre la position dessinée en trait plein et celle dessinée en tireté. Par contre, la différence entre le niveau d'eau mesuré dans les piézomètres et le niveau naturel, doit être considérée comme équivalente à celle qui existe dans le cas réel.

3. On constate que la différence entre le niveau d'eau naturel et le niveau mesuré dans le piézomètre est bien fonction de la profondeur de celui-ci.

La fonction $h = f(t)$ a été déterminée pour les points numérotés 1 à 5 à la fig. 4; les courbes résultantes ont été reportées à la fig. 8.

Les courbes No 1 et 5 correspondent aux potentiels imposés. Les No 2 et 3 correspondent aux piézomètres P1 et P2, et sont à comparer avec les No 2 et 3 de la fig. 6,

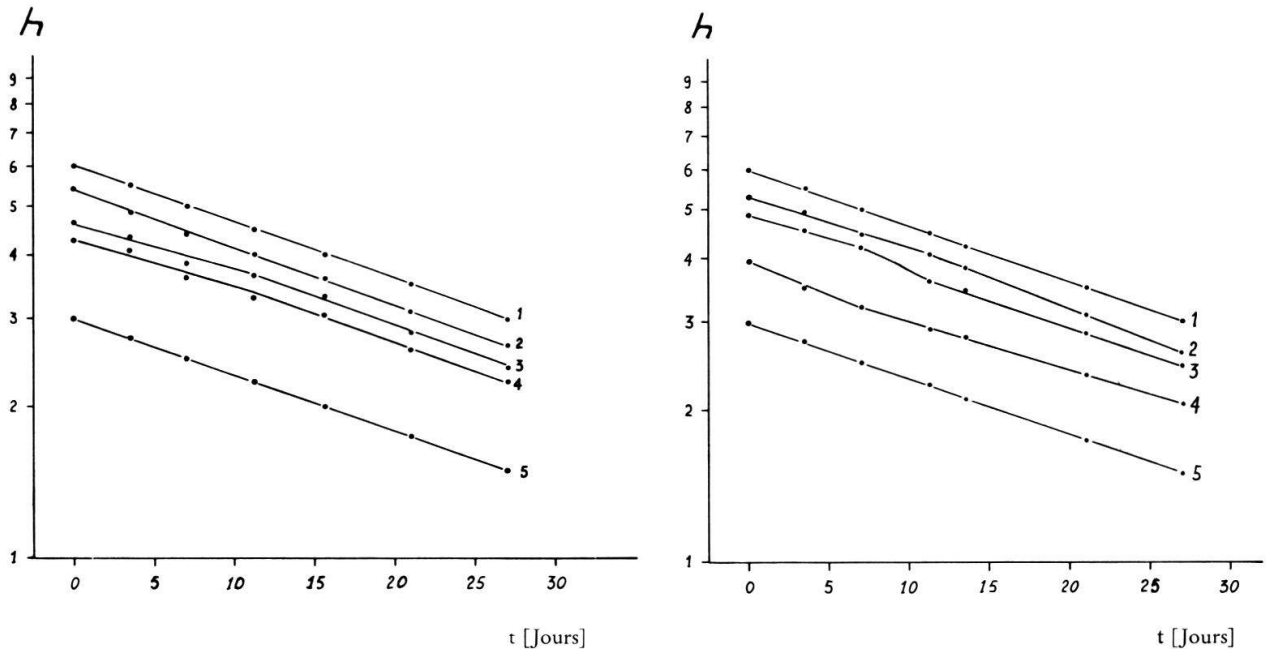


Fig. 7. Abaissement naturel du niveau piézométrique en milieu hétérogène. Nature de l'hétérogénéité et situation des points d'observation: voir fig. 3.

Fig. 8. Influence de la présence de piézomètres sur l'abaissement naturel du niveau piézométrique en milieu hétérogène. Nature de l'hétérogénéité et situation des points d'observation: voir fig. 4.

dont la situation spatiale est la même. Au point de vue qualitatif, les mêmes déformations peuvent être observées : pente trop faible au début, ensuite point d'inflexion à pente maximum, enfin tendance au parallélisme avec les courbes No 1 et 5 (pour le No 2, ce parallélisme n'est pas encore réalisé à la fin de l'intervalle de mesure). Au point de vue quantitatif cependant, les courbes No 2 et 3 ne sont pas équivalentes dans les deux figures; les points d'inflexion ne se produisent pas au même instant; à la fig. 8, ils sont relativement atténués; seule, la pente du segment situé à gauche du point d'inflexion est identique dans les deux cas.

Ce dernier exemple permet de tirer les conclusions suivantes :

1. Dans certains cas au moins, des déformations de la fonction $h = f(t)$ dues à l'hétérogénéité du milieu sont effectivement mesurables dans des piézomètres; mais la courbe observée n'est pas identique à la variation dans le temps du niveau piézométrique naturel.

2. Si $h = f(t)$ est influencée par l'hétérogénéité du milieu, la surface piézométrique à un instant donné l'est aussi, comme dans les exemples précédents.

3. Conclusions

1. Les exemples traités ont montré qu'il était possible d'obtenir expérimentalement, dans des cas simples d'hétérogénéité du champ des perméabilités, des courbes d'abaissement du niveau piézométrique de forme complexe, analogues à celles observées dans la réalité.

2. En raison de la multiplicité des formes d'hétérogénéité possibles, et de la non-identité entre niveaux piézométriques vrai et mesuré, l'interprétation des limnigrammes observés ne peut pas, à notre connaissance, constituer une méthode de détermination du champ des perméabilités. On se contentera, pour l'instant, de distinguer les limnigrammes qui montrent une influence probable de l'hétérogénéité du milieu, de ceux qui peuvent être attribués à des terrains homogènes.

3. Les deux conclusions du paragraphe 2.4. ont la conséquence suivante: la surface piézométrique reconstruite à partir de limnigrammes, lorsqu'on ne connaît ni le champ des perméabilités K , ni celui des potentiels hydrauliques φ , est doublement approximative: 1) En raison de l'hétérogénéité de K ; 2) En raison de la non-identité entre niveaux piézométriques naturel et mesuré.

4. Les résultats obtenus à partir du 4e exemple (paragraphe 2.4) soulignent l'importance d'un paramètre mesurable dans les puits et piézomètres: la valeur ponctuelle du potentiel hydraulique, mesurée à diverses profondeurs, soit lors de l'avancement de l'ouvrage, soit dans un tube crépiné, le tronçon étudié étant isolé par un obturateur (ou une paire, cas échéant). Ce paramètre serait utile dans l'étude des systèmes d'écoulement souterrain, en particulier dans la détermination des champs K et φ ; sa mesure est évidemment subordonnée à des problèmes d'ordre technique.

5. Les cavités naturelles donnant accès à un regard sur la zone noyée fonctionnent comme des piézomètres; aussi, les observations et remarques faites plus haut au sujet des niveaux piézométriques et de leurs variations dans le temps s'appliquent également aux niveaux d'eau observés dans les cavités naturelles, qui doivent être interprétés avec la même prudence.

Bibliographie

- BONNET, M. (1970): Utilisation du papier télédeltos; notions théoriques et travaux pratiques. B. R. G. M., Orléans, 70 SGN 124 HYD, 44 p.
- CASTANY, G. (1963): *Traité pratique des eaux souterraines*. Dunod, Paris. 657 p.
- DEGALLIER, R. (1969): Interprétation des variations naturelles du niveau des nappes. Bull. du B. R. G. M. (2e série). Section III, No 2, 7-56.
- KIRALY, L. (1969a): Anisotropie et hétérogénéité de la perméabilité dans les calcaires fissurés. *Eclogae geol. Helv.*, 62/2, 613-619.
- (1969b): La notion d'«Unité hydrogéologique» dans le Jura (Essai de définition). Thèse Neuchâtel. *Eclogae geol. Helv.*, à paraître.
 - (1970): L'influence de l'hétérogénéité et de l'anisotropie de la perméabilité sur les systèmes d'écoulement. Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u.-Ing. No 91, 50-57.
- TOTH, J. (1962): A theory of groundwater motion in small drainage basins in Central Alberta, Canada. *Journ. of Geophysical Res.*, 67/11, 4375-4387.
- (1963): A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journ. of Geophysical Res.*, 68/16, 4795-4812.
- TRIPET, J.-P. (—): Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse. Univ. de Neuchâtel, en préparation.
- UNGEMACH, P. (1969): Exploitation des tarissements des nappes d'eaux souterraines. Application à la recherche du coefficient d'emménagement en nappe libre, de l'infiltration efficace et de la diffusivité hydraulique. Journées H. SCHOELLER, Bordeaux. *Mém. B. R. G. M.*, No 76, 271-295.